

항공기사고 조사보고서

이륙포기 중 활주로 초과 이탈
미국 UPS 항공(UNITED PARCEL SERVICE)
MD-11F, N277UP
인천공항 활주로 33L
2016. 6. 6.



2019. 6. 20.

이 항공기 사고 보고서는 대한민국 「항공·철도 사고조사에 관한 법률」 제25조에 따라 작성되었다.

대한민국 「항공·철도 사고조사에 관한 법률」 제30조에는

“사고조사는 민·형사상 책임과 관련된 사법절차, 행정처분절차, 또는 행정쟁송절차와 분리·수행되어야 한다.” 고 규정하고 있으며,

국제민간항공조약 부속서 13, 3.1항과 5.4.1항에는

“사고나 준사고 조사의 궁극적인 목적은 사고나 준사고를 방지하기 위함 이므로 비난이나 책임을 묻기 위한 목적으로 사용하여서는 아니 된다. 비난이나 책임을 묻기 위한 사법적 또는 행정적 소송절차는 본 부속서의 규정 하에 수행된 어떠한 조사와도 분리되어야 한다.” 고 규정하고 있다.

그러므로 이 보고서는 항공안전을 증진시킬 목적 이외의 용도로 사용하여서는 아니 된다.

만일 이 사고조사 보고서의 해석에 있어서 한글판과 영문판의 차이가 있을 때는 한글판이 우선한다.

항공기사고 조사보고서

항공·철도사고조사위원회, 이륙포기 중 활주로 초과 이탈, 미국 UPS 항공, N277UP, MD-11F, 인천국제공항 활주로 33L, 2016. 6. 6. 항공기사고 조사보고서 ARAIB/AAR1606, 대한민국 세종특별자치시

대한민국 항공·철도사고조사위원회는 독립된 항공사고조사를 위한 정부 기구이며, 「항공·철도 사고조사에 관한 법률」 및 「국제민간항공조약」 부속서 13의 규정에 의거하여 사고조사를 수행한다.

항공·철도사고조사위원회의 사고 또는 준사고 조사 목적은 비난이나 책임을 묻고자 하는 것이 아니라 유사 사고 및 준사고의 재발을 방지하고자 하는 것이다.

주 사무실은 세종특별자치시에 위치하고 있다.

주소: 세종특별자치시 가름로 232 세종비즈니스센타 A동 6층 604호

우편번호: 30121

전화: 044-201-5447

팩스: 044-201-5698

전자우편: araib@korea.kr

홈페이지: <http://www.araib.go.kr>

차 례

이륙포기 중 활주로 초과 이탈1

개 요1

1. 사실 정보3

1.1 비행 경위	3
1.2 인명 피해	8
1.3 항공기 손상	9
1.3.1 조종 계통	9
1.3.1.1 피치 콘트롤 시스템(pitch control system)	9
1.3.1.2 롤 콘트롤 시스템(roll control system)	9
1.3.1.3 요 콘트롤 시스템(yaw control system)	9
1.3.1.4 2차 조종 계통	9
1.3.2 유압 계통	10
1.3.3 착륙장치계통	10
1.3.3.1 전방 착륙장치	11
1.3.3.2 주 착륙장치	11
1.3.3.3 중앙 착륙장치	12
1.3.4 항공기 구조	12
1.3.5 항공기 엔진	13
1.4 기타 손상	13
1.5 인적 정보	13
1.5.1 기장	13
1.5.2 부기장	14
1.5.3 안전조종사	15
1.6 항공기 정보	16
1.6.1 항공기 일반정보	16
1.6.2 항공기 제원	17
1.6.3 장착 엔진 및 보조동력장치 일반정보	17
1.6.4 항공기 정비 이력	17
1.6.4.1 항공기 정비프로그램	18

1.6.4.2 탑재용 항공일지 기록	19
1.6.5 중량 및 평형	19
1.6.5.1 탑재화물 중량	20
1.7 기상정보	21
1.8 항행안전시설	21
1.9 통신	21
1.10 비행장 정보	22
1.11 비행기록장치	23
1.11.1 비행자료기록장치(Flight Data Recorder, FDR)	23
1.11.1.1 이륙포기와 관련된 이벤트 시점	24
1.11.2 조종실음성기록장치(Cockpit Voice Recorder, CVR)	24
1.12 잔해와 충격 정보	25
1.12.1 활주로 상의 잔해	25
1.12.2 활주로의 타이어 흔적	26
1.12.3 로컬라이저 안테나 충돌 흔적	28
1.12.4 조종실 기재취급	29
1.13 의학 및 병리학적 정보	31
1.14 화재	31
1.15 생존분야	31
1.15.1 비상대응	31
1.16 시험 및 연구	32
1.16.1 N277의 제동 성능	32
1.16.2 모의비행장치 시연	34
1.16.3 중앙착륙장치의 9번 · 10번 타이어	36
1.16.3.1 9번 타이어	36
1.16.3.2 10번 타이어	38
1.16.4 중앙착륙장치 Anti-Skid 제동 유압 라인	39
1.16.5 중앙착륙장치 드래그 브레이스 (Drag Brace)	40
1.16.5.1 거시적 관찰 결과	40
1.16.5.2 SEM을 이용한 분석	42
1.16.5.3 EDS 분석	43
1.16.5.4 경도 분석	43
1.16.5.5 금속 조직 검사	43
1.16.5.6 중앙착륙장치 드래그 브레이스의 분석 결과	43

1.16.6 휠 어셈블리(Wheel Assembly)	44
1.16.7 Brake Temperature Monitor(BTM)/Tire Pressure Indicator(TPI)	44
1.17 조직 및 관리정보	45
1.17.1 UPS사 운항승무원 훈련	45
1.17.1.1 Tire failure 및 Landing gear system 훈련	45
1.17.1.2 이륙 중 항공기결함발생 훈련	45
1.17.1.3 비상탈출훈련	47
1.17.2 UPS사 조종사훈련가이드(Pilot Training Guide)	47
1.17.2.1 이륙포기절차	47
1.17.2.2 Tire fail 절차	51
1.17.2.3 비상탈출 (Evacuation)	51
1.17.3 인천공항공사 활주로 점검	52
1.18 기타 사항	52
1.18.1 운항승무원 진술	53
1.18.1.1 기장	53
1.18.1.2 부기장	55
1.18.1.3 안전조종사	56
 2. 분석	58
 2.1 일반	58
2.2 중앙착륙장치 타이어 파열로 시작	58
2.2.1 최초 타이어 마찰 흔적, 그 후 가속도 급변 발생	58
2.2.2 중앙착륙장치의 드래그브레이스 파열로 가속도 급변	59
2.2.3 타이어 다중 파열로 중앙착륙장치 드래그브레이스 손상	59
2.3 사고 진행과정	60
2.3.1 V1 까지 항공기 정상 운항	62
2.3.2 최초 9번 타이어 파열, 약 0.6초 후 10번 타이어 파열	64
2.3.3 중앙착륙장치 드래그브레이스 파손 진행	65
2.3.4 브레이크시스템 1R 유압관 파열	67
2.3.5 이륙포기 조치(V1에서 3.3초 지난 시점)	68
2.3.6 유압관 파열의 영향	69
2.3.6.1 N277 기수의 좌편향 발생	70
2.3.6.2 총 브레이크 효율 48% 그리고 2,3,4번 스포일러 retract	72

2.3.7 활주로 이탈, 항공기 이탈절차 수행	74
2.4 이륙포기 결정	74
2.4.1 V1 정의	74
2.4.2 V1 이후 비행불가능	76
2.4.2.1 UPS 교범의 V1 이후 비행불가능 개념	76
2.4.2.2 V1이후 이륙포기에 대한 지침	76
2.4.3 N277기장의 이륙포기결정	78
2.5 이륙 지속 시 항공기 성능	78
2.6 중앙착륙장치 타이어 잔해의 라이너 주름(Liner Wrinkles)과 X형 손상	80
2.7 예방대책	81
2.7.1 V1 이후 비행불가능의 판단	81
2.7.2 ‘비행불가능’ 방지를 위한 항공기관리	81
 3. 결론	83
3.1 조사결과	83
3.2 원인	87
 4. 안전 권고	88
4.1 FAA에 대하여	88
4.2 UPS에 대하여	88
 5. 첨부	89
첨부 A: CVR 녹취록(이륙시작부터 정지까지)	89
첨부 B: N277UP 탑재화물 위치별 중량측정결과(단위: lbs)	91
첨부 C: 사진	92

〈표 차례〉

[표 1] 운항승무원 부상	8
[표 2] 항공기 일반정보	16
[표 3] 엔진 및 보조동력장치 일반정보	17
[표 4] 정비작업 수행현황	18
[표 5] 제동장치 및 중앙착륙장치 결함내용	19
[표 6] 중앙착륙장치 미끄럼방지 계통의 반복결합내용	19
[표 7] N277 관제 교신 내용	22
[표 8] 인천공항 활주로33L의 제원	22
[표 9] FDR-SRN(ARAIB), FDR-SRN(Boeing)의 시간 일치	24
[표 10] 이륙포기와 관련된 이벤트 시점	24
[표 11] N277의 제동 환경에 따른 가속정지거리	34
[표 12] 9번 · 10번 타이어 현황	36
[표 13] 2014, 2015년 UPS사의 운항승무원 훈련 내용	46
[표 14] 운항승무원 이륙포기절차	49
[표 15] 주요 이벤트 요약	62
[표 16] N277의 이륙 가속거리, 이륙포기 시 정지거리	73

〈그림 차례〉

[그림 1] N277 활주로 이탈 경로	3
[그림 2] N277 이륙 포기 과정	8
[그림 3] 착륙장치의 구성	10
[그림 4] N277 중량 및 평형자료	20
[그림 5] 인천공항 활주로 배치도	23
[그림 6] 활주로 상 잔해분포	26
[그림 7] 최초 타이어 흔적	27
[그림 8] 2차 타이어 흔적	27
[그림 9] N277 활주로이탈 후 경로	29
[그림 10] 오버헤드패널 기재취급 상태	30
[그림 11] Forward Pedestal 기재취급 상태	31
[그림 12] N277의 감속률 모의시험 결과(보잉사)	33

[그림 13] 9번 타이어	36
[그림 14] 9번 타이어 X형 파손	37
[그림 15] 9번 타이어 안쪽면 라이너 주름(Liner Wrinkles)	38
[그림 16] 10번 타이어	38
[그림 17] C-1유압매니폴드 유압라인	39
[그림 18] C-1 유압매니폴드의 압력 및 회송라인	40
[그림 19] 중앙착륙장치의 드래그 브레이스	41
[그림 20] 중앙착륙장치 드래그 브레이스 파단부위	42
[그림 21] 파단면 A·B 중심 SEM 사진(Dimpled Rupture)	42
[그림 22] 비상탈출 절차(UPS MD11 QRH)	52
[그림 23] 주요사실정보 순서	58
[그림 24] 초기 주요 이벤트시점과 활주로잔여거리	63
[그림 25] 중앙착륙장치 타이어 최초 마찰 흔적	64
[그림 26] 중앙착륙장치 하부 드래그브레이스 파손 단계	66
[그림 27] 브레이크 및 유압 시스템 관련 FDR 자료	67
[그림 28] N277 이륙포기과정의 관련 FDR data	69
[그림 29] MD11 브레이크시스템	70
[그림 30] 기수의 좌편향 경향	71

<약어>

AGL	Above Ground Level(지표높이)
AOM	Aircraft Operation Manual(항공기운영교범)
AQP	Advanced Qualification Program(자격관리프로그램)
ARAIB	Aviation and Railway Accident Investigation Board(항공·철도사고조사위원회)
ASDA	Accelerate Stop Distance Available(가용가속정지거리)
ASDE	Airport Surface Detection Equipment(공항지상감시레이더)
ASDR	Accelerate Stop Distance Required(필요가속정지거리)
ATC	Air Traffic Control(항공교통관제)
ATIS	Automatic Terminal Information Service(공항정보자동방송업무)
BTM	Brake Temperature Monitoring System(브레이크 온도 감시시스템)
CAS	Calibrated Air Speed(수정속도)
CCTV	Closed Circuit Television(폐쇄회로 TV)
CG	Center of Gravity(무게중심)
CLG	Center Landing Gear(중앙착륙장치)
CQ	Continuing Qualification (자격유지)
CVR	Cockpit Voice Recorder(조종실음성기록장치)
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectrometer(에너지분산형분광기)
EEC	Electric Engine Control(전자식엔진제어장치)
EPR	Engine Pressure Ratio(공기압력비)
FAA	Federal Aviation Administration(미국연방항공청)
FADEC	Full Authority Digital Electronic Control(전자식통합엔진제어)
FBS	Fixed Based Simulator (고정식모의비행장치)
FCC	Flight Control Computer(비행조종컴퓨터)
FDR	Flight Data Recorder(비행자료기록장치)
FFS	Full Flight Simulator(전비행모의비행장치)
F/O	First Officer(부기장)
FOD	Foreign Object Damage(외부물질손상)
FOM	Flight Operation Manual(비행운영교범)
GS	Ground Speed(지상속도)
GMM	General Maintenance Manual(정비교범)

HRC	Hardness Rockwell C(로크웰경도 C 스케일)
IFR	Instrument Flight Rule(계기비행방식)
IRO	International Relief Officer(안전조종사)
KV	Knowledge Validation(지식확인)
LC	Line Check(평가비행)
LDA	Landing Distance Available(사용가능착륙거리)
LMLG	Left Main Landing Gear(좌측 주 착륙장치)
LOE	Line Operational Evaluation(비행운영평가)
LOS	Line Operational Simulation(비행운영모의훈련)
METAR	Meteorological Aerodrome Report(정시관측보고)
MSM	Maintenance Specification Manual(정비절차매뉴얼)
MV	Maneuvers Validation(기동능력확인)
NTSB	National Transportation Safety Board(미국국가교통안전위원회)
PF	Pilot Flying(조종담당 조종사)
PM	Pilot Monitoring(조종감시 조종사)
PTG	Pilot Training Guide(조종사훈련지침)
QRH	Quick Reference Handbook(신속참고철)
RMLG	Right Main Landing Gear(우측 주착륙장치)
RTO	Rejected Take Off(이륙포기)
SASCO	ST Aerospace Service Co(싱가폴 정비전문업체)
SCU	Start Control Unit(시동조절장치)
SEM	Scanning Electron Microscope(주사전자현미경)
SRN	Sub-frame Reference Number(서브프레임 참조번호)
TODA	Take-off Distance Available(사용가능이륙거리)
TODR	Take-off Distance Required(필요이륙거리)
TORA	Take-off run available(이륙활주가능거리)
TPI	Tire Pressure Indicator(타이어압력지시계)
TR	Thrust Reverser(역추력장치)
ULD	Unit Load Device(화물탑재함)
VMC	Visual Meteorological Condition(시계비행기상상태)

이륙포기 중 활주로 초과 이탈

- 항공기 운영자 : 미국 UPS 항공
- 항공기 제작사 : 보잉(맥도널더글러스)
- 항공기 형식 : MD-11F
- 항공기 등록부호 : N277UP
- 발생장소 : 인천공항 활주로 33L ($37^{\circ} 29' 6.81''$ N, $126^{\circ} 25' 58.68''$ E)
- 발생일시 : 2016년 6월 6일 13:45경(국제표준시: UTC)¹⁾

개요

2016년 6월 6일 13:45경(현지시각 22:45경), 국제정기화물운송용 UPS항공(주) 소속, 미국 국적항공기 UPS061편, MD-11F(N277UP)가 대한민국 인천국제공항 활주로33L에서 이륙활주 중 이륙결심속도²⁾를 지난 시점에서 중앙착륙장치에 구조적 손상이 발생하여 이륙을 포기하고 급제동하였으나, 항공기는 활주로 끝을 통과하여 활주로 33L 끝으로부터 약 485m (1,590ft)의 높지대에 정지되었다.

이 사고로 항공기는 대파되었고, 운항승무원 1명이 경상을 입었다.

대민민국 항공·철도사고조사위원회(이하 “위원회”라 한다)는 사고발생국으로서 조사단을 구성하여 조사를 수행하였고, 사고항공기의 운영국이며 제작국인 미국의 신임대표와 고문들이 사고조사에 참여하였다.

위원회는 이 사고의 원인을 「이륙결심속도(V1) 이후 중앙착륙장치의 타이어와 드래그 브레이스 결함으로 고속이륙포기를 수행하여 활주로 이탈」로 결정한다.

1) 이 보고서상의 모든 시각은 24시를 기준으로 한 국제표준시각임. 현지시각은 22:45경으로 야간이며 국제표준시각에 9시간을 더하면 됨

2) 이륙결심속도(V1)는 항공기를 가속정지거리이내에서 정지하기 위하여 이륙포기조치가 시작되어야 하는 최대속도이다. 2.5.1 V1 정의 참조. UPS는 비행운영교범에서 “V1 이후 이륙포기는 기장이 항공기가 ‘비행 불가능’이라고 판단하지 않는 한 추천되지 않는다.”고 정하고 있다.

기여요인으로 「(1)조우된 상황에 대하여 제한된 시간과 가용한 정보로 항공기 비행 성능을 결정하여야 하는 기장의 결심에 있어 내재된 어려움 (2)타이어 결함 이후 중앙착륙장치 드래그브레이스의 동적 불안정 (3)1번 브레이크 시스템 유압관 파열로 인한 제동 성능의 저하」로 결정한다.

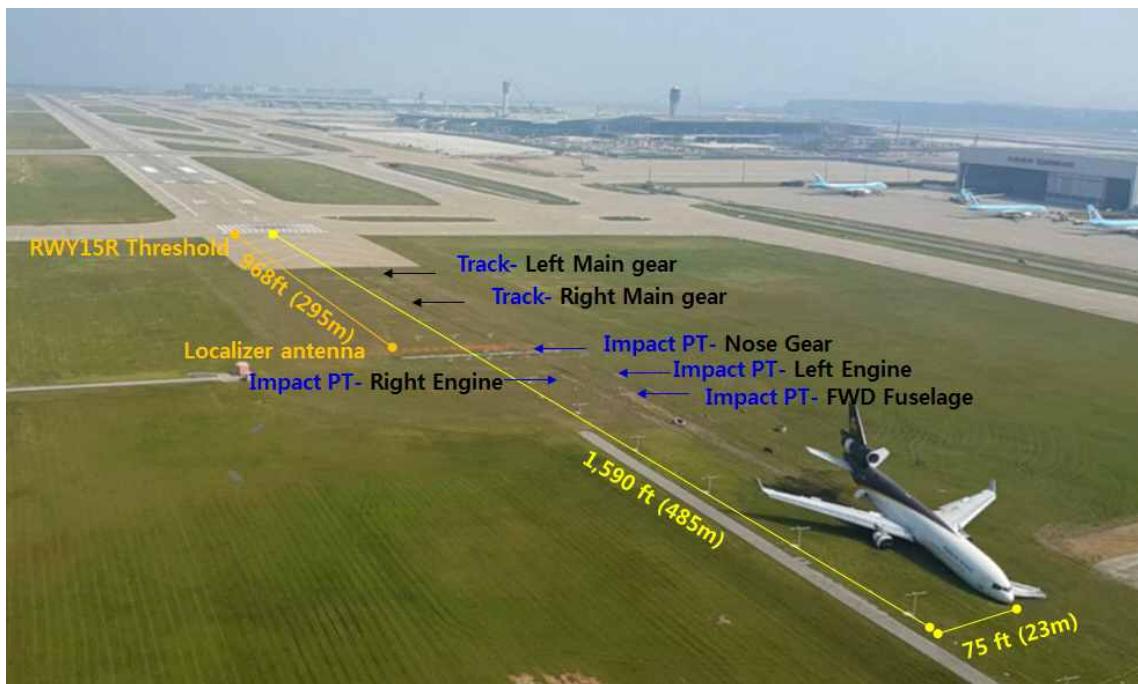
위원회는 사고 조사 결과에 따라서 FAA에 1건, UPS항공에 1건의 안전권고를 발행한다.

1. 사실 정보

1.1 비행 경위

2016년 6월 6일 13:43:57경, UPS항공(주) 소속, 미국 국적항공기 UPS061편, 정기국제선화물기 MD-11F, N277UP(이하 “N277”이라 한다)가 미국 앵커리지국제공항을 목적지로 대한민국 인천국제공항(이하 ‘인천공항’이라 한다) 활주로 33L에서 이륙활주 중 이륙결심속도(이하 ‘V1’이라 한다)를 지난 시점에 중앙착륙장치의 타이어가 파열되면서 중앙착륙장치가 손상되었다.

이 과정에서 항공기 가속도가 급격히 줄어드는 현상 등이 발생하였고, 이를 인지한 기장은 이륙을 포기하고 급제동하였으나, N277은 13:45:28경 활주로 끝을 통과하여 활주로 33L 끝으로부터 약 485m(1,590ft), 활주로 중심선으로부터 좌측으로 약 23m(75ft) 지점에 정지되었다. 활주로 이탈 경로는 [그림 1]과 같다.



[그림 1] N277 활주로 이탈 경로

N277의 비행자료기록장치(FDR), 조종실음성기록장치(CVR), 항공교통관제교신기록 그리고 운항승무원 진술 등에 근거하여 작성한 비행경위³⁾는 다음과 같다.

N277은 인천공항에서 미국 앵커리지 국제공항으로 약 185,000lbs(84ton)의 화물을 운송하기 위하여 계기비행방식(IFR) 비행계획을 제출하였다.

N277은 기장이 좌측석에서 조종감시(PM), 부기장은 우측석에서 조종담당(PF), 안전조종사(IRO)는 관숙석에서 안전감시 업무를 수행하였다. 또한 임무를 마치고 귀국하는 조종사(extra pilot) 1명은 객실(supernumerary)에 탑승하고 있었다.

N277은 인천공항 지상관제사의 허가를 받고 뒤로밀기를 하여 13:27:47경 엔진시동을 완료하였다. 이때 항공기 중량⁴⁾은 631,680 lbs, 연료는 98,304 lbs 였다. 당시 인천공항의 기상은 야간 시계비행기상상태(VMC)였다.

인천공항 관제탑은 13:41:51경 N277에게 활주로33L에 진입 후 대기를 허가하였고, 13:43:50경 N277에게 바람이 없음을 알려주며 활주로33L으로 이륙을 허가하였다. N277은 13:43:57경⁵⁾ 이륙중량 629,500 lbs, 플랩10으로 이륙활주를 시작하였고 V1은 169kts⁶⁾이었다.

13:44:02경 부기장은 “Set take off thrust please...” (이륙출력 설정)라고 호창(call out)하였고, 기장은 “Thrust set” (이륙출력 설정 완료)라고 호창하였다. 13:44:20경 기장은 “80kts”라고 호창하였고 부기장은 “check” (확인)라고 호창하였다.

3) N277의 주요 이벤트순서(sequence of event)는 2.3.1 주요 이벤트 요약 참조

4) N277의 최대허용이륙중량은 630,500 lbs이고 FDR에 13:38:31경 630,400 lbs로 기록되었다. 13:37:13경 기장은 “항공기중량이 630.400 lbs가 되었고 이 시점부터 최대허용이륙 중량이하가 되어 출발해도 좋다.”고 하였다.

5) 외부온도 19C, 건조 활주로, FLEX 30/EPR 1.61/PACKS OFF, 인천공항에서 앵커리지공항까지 예상비행시간 7시간 57분

6) N277의 이륙전환속도(VR)는 184kts, 최소이륙안전속도는(V2) 191kts이었다.

13:44:44.1경 N277은 V1(169kts)에 도달하였고, 기장은 13:44:44.9 ~ 13:44:45.4경 “V”, “1”이라 호칭하였고, 부기장은 13:44:45.6경 “roger”(알았다)라고 응답하였다.

13:44:45.7경(176kts) N277에 “쿵” 하는 충격과 함께 항공기가 갑자기 흔들림, 좌편향 및 가속도가 감소되는 현상⁷⁾이 발생하였고, 13:44:46.3경부터 0.55초 동안 2차례 비정상적인 큰소리가 발생하였으며 13:44:47.1경 타이어 고장(tire failure) 음성경고음⁸⁾이 울렸다.

기장은 항공기의 가속도가 갑자기 줄어드는 이상 현상을 인지하고 이륙 포기를 결심하였으며, 부조종사로부터 항공기 조종을 이양 받아 이륙포기절차⁹⁾를 수행하였다고 진술하였다.

N277의 엔진출력레버는 V1에서 약 3.3초 지난 13:44:47.4경 줄어들기 시작하였고, 이때 지상속도¹⁰⁾ 182kts, 수정속도 181kts로 활주로33L 종단까지 잔여거리는 약 4,635ft¹¹⁾이었다.

N277의 중앙착륙장치는 파손되어 13:44:48경 고정되지 않음(not down locked)과 불안전(unsafe) 상태에 있음이 기록되었다.

13:44:48.3경 N277의 브레이크 페달이 작동되기 시작하여 13:44:53경 최대 위치에 도달하였으나, 중앙착륙장치실(CLG wheel well)에 있는 1번 브레이크 시스템의 우측(Brake 1R) 압력라인의 파열로 유압이 손실되어 1번 브레이크 시스템이 정상적으로 작동¹²⁾되지 않았다.

7) FDR에 기록된 가속도변화: 수직가속도 $0.725G \rightarrow -0.664G(+상승)$, 종가속도 $0.17G \rightarrow -0.075G(+전진)$, 횡가속도 $0.033G \rightarrow -0.305G(+우측)$

8) “Tire failure, failure tire failure tire failure” [2번의 tire failure 경고는 중첩되어 울렸고 2번째 경고는 0.6초 후 시작되었다.]

9) 이륙포기절차 : 엔진출력레버 최소위치로 줄임, 브레이크 최대 사용, 자동 스포일러 전개확인, 최대 역추력장치 사용 (1.17.2.1 이륙포기절차 참조)

10) 수정속도(Calibrated Air Speed)는 계기속도에서 장착오차를 수정한 속도, 지상속도(Ground Air Speed)는 수정속도(Calibrated Air Speed)에서 밀도, 바람을 고려한 속도로서 지상에 대한 항공기의 상대속도이다.

11) 항공기 감속성능이 정상일 때 V1(169kts)에서 정지까지 이론상 소요거리는 5,385ft였다.

양쪽 주날개에 위치한 감속장치인 스포일러(spoiler)는 13:44:51경¹³⁾ 자동으로 전개되었다.

13:44:49.5경 역추력장치 3개가 작동되기 시작하여 3.5초 후 모두 최대로 전개되었으며 항공기가 정지할 때까지 작동되었다.

13:45:04경 1번 유압시스템의 압력 낮음(hydraulic system 1 pressure Low)이 지시되었고, 13:45:06.4경 착륙장치음성경고음¹⁴⁾이 울렸다.

13:45:07경 N277은 지상속도 90kts¹⁵⁾로 활주로중심선에서 좌측으로 약 7m 벗어난 상태로 활주로33 종단을 이탈하였다. 기장은 120m 길이의 콘크리트로 된 정지로를 통과한 이후 전방의 ILS 안테나 시설(활주로33L 종단에서 약 295m 위치)을 피하기 위해 기수를 의도적으로 좌측으로 틀었다고 진술하였다.

13:45:15.7경 전방착륙장치는 지상속도 46kts로 ILS 안테나 시설의 좌측 부분의 약 30cm 높이의 콘크리트 구조물에 충돌하여 손상되었고 약 2초간 튀어올랐다가¹⁶⁾, 13:45:18경 전방으로 접힌 상태¹⁷⁾로 지면에 접지되었다. 양쪽 엔진은 항공기 전방부분이 내려감에 따라 지면에 닿아 동체하부와 함께 손상되었다.

기장은 13:45:20경 지상속도 29kts에서 모든 엔진정지(shut all engines

12) 브레이크를 작동한 13:44:49경(182kts), Brake PRESS Sys 1R은 388psi지시 후 급감되어 13:45:06경 ‘0’을 지시(비정상)하였고 Brake PRESS Sys 2L은 13:44:49경 2,150psi에서 증가하여 13:44:53경 3,031psi를 지시(정상)하였다. Brake Sys 1L의 가용압력은 13:45:02경 감소 시작(비정상)하였고 Brake Sys 2R의 가용압력은 정상이었으나 지시압력은 0으로 기록(지시만 비정상)되었다.

13) 부기장은 13:45:01.7경 “spoilers”[속도감속장치(ground spoiler) 전개]라고 호칭하였다.

14) “ding! landing gear, ding! landing gear, ding! landing gear landing gear”

15) 수정속도 79kts

16) 2초간(13:45:16, 13:45:17) 전방착륙장치 좌, 우측 비행중 (Nose gear compressed L, R- In flight)이 비행자료기록장치에 기록되었다.(전방착륙장치 공중/지상 logic은 2초간 “공중” 모드에 있었음을 의미하며, 이는 항공기가 실제 부양된 것이 아니고 전방착륙장치가 콘크리트 빔에 부딪히며 손상되는 과정에서 부분적 튀어 오름을 나타낸 것으로 보인다.)

17) 13:45:18경 전방착륙장치 불안전이 지시되었다.

down)를 지시한 후 13:45:23경 지상속도 19kts에서 비상탈출(emergency ground egress procedure)을 지시하였으며, 13:45:26경 지상속도 9kts에서 연료스위치는 “OFF” 되었다.

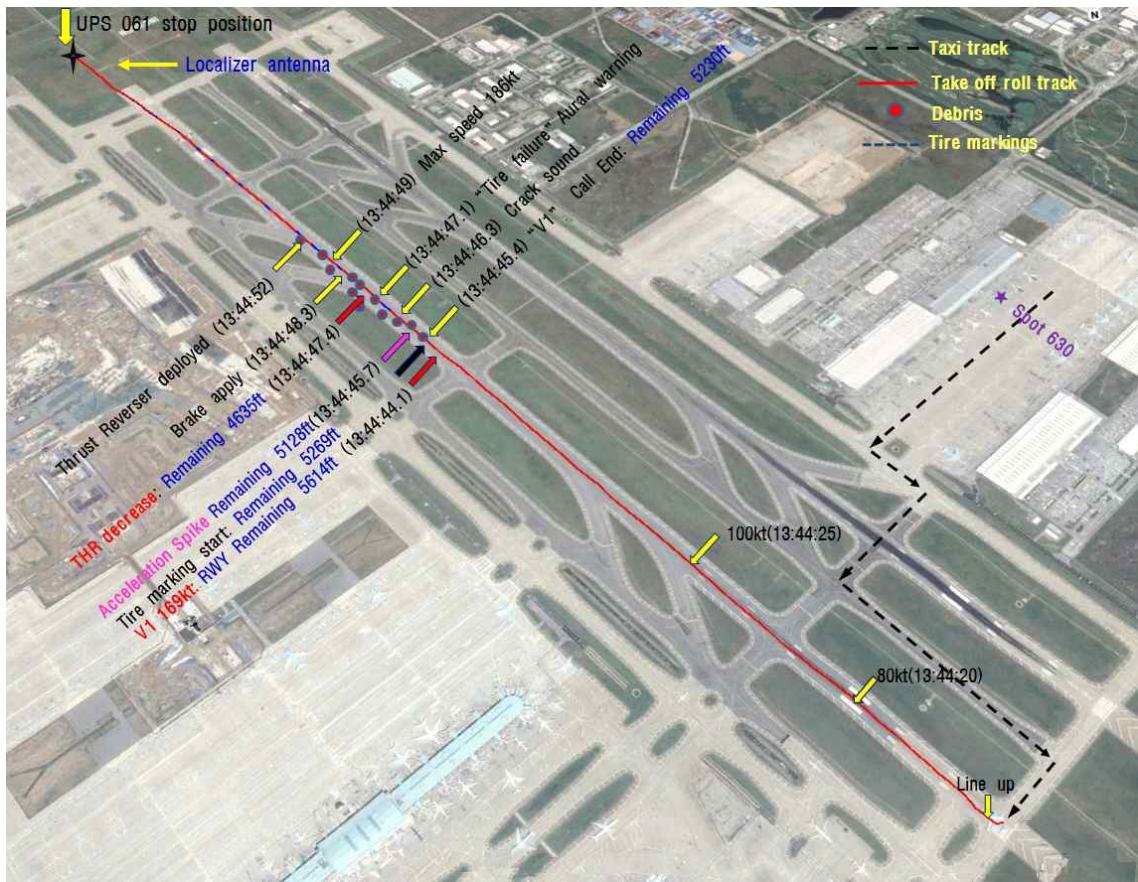
13:45:28경 N277은 활주로 33L 종단에서 485m(1,590ft), 활주로 중심선으로부터 좌측으로 약 23m(75ft) 지점의 녹지대에 정지하였다.

항공기가 정지하자 객실에 있던 조종사는 좌측 앞문을 개방하였고, 운항승무원들은 항공기 이탈절차를 수행한 후 펼쳐진 탈출미끄럼대(escape slider)를 이용하여 항공기에서 이탈하였다.

13:46:22경 인천관제탑은 UPS61을 호출하였으나, N277의 전원은 모두 차단되어 교신되지 않았다. 운항승무원들은 이륙포기¹⁸⁾부터 항공기 비상탈출까지 진행된 비정상상황을 ATC에 통보하지 못하였다고 진술하였다.

N277의 지상이동경로와 이륙활주 시작, 타이어 마찰흔적, 가속도 급변, 이륙포기 조치 및 항공기 정지 위치는 [그림 2]와 같다.

18) UPS 항공기운영교법의 02.01.01.02 이륙포기 항목에는 ‘시간이 허용될 때 항공기 위치, 활주로 그리고 필요한 지원사항을 ATC에 통보하라.’고 기록되어 있다.



[그림 2] N277 이륙 포기 과정

1.2 인명 피해

운항승무원 1명이 경상¹⁹⁾을 입었다.

피해 정도	승무원	승객	기타
사망	0	0	0
중상	0	0	0
경상/무	1/3	0	0

[표 1] 운항승무원 부상

19) 2016년 6월 7일 01:51경 운항승무원 4명은 인하대병원으로 후송되어 응급진료를 받았으며 진료 결과는 Sprain of lumbar spine(요추염좌), Contusion thigh right(우측허벅지 타박상), sprain of Ankle(발목 염좌) 등이다.

1.3 항공기 손상

1.3.1 조종 계통

항공기외부가 손상된 상태에서 지상에서 수행된 조종계통에 대한 육안검사 결과는 아래와 같다.

1.3.1.1 피치 콘트롤 시스템(pitch control system)

좌, 우측 날개의 안쪽 승강타(inboard elevator)는 후연이 아래로 내려져 있었고, 바깥쪽 승강타(outboard elevator)는 중립 위치에 있었다. 수평안정판에 손상된 흔적이 없이 3도 노즈 다운(nose down)을 유지하고 있었으며, 이는 피치 콘트롤 시스템이 정상적인 이륙위치를 유지하고 있었다고 판단된다.

1.3.1.2 롤 콘트롤 시스템(roll control system)

좌, 우측 날개의 안쪽 에일러론(inboard aileron)은 후연이 $11\frac{1}{2}$ 도 내려가 있었으며 바깥쪽 에일러론(outboard aileron)은 후연이 15도 내려가 있었다. 에일러론 트림탭(trim tab)은 중립위치에 있었다.

1.3.1.3 요 콘트롤 시스템(yaw control system)

방향타(rudder)는 손상이 없었으며, 유압사용이 불가능하여 작동 할 수 없었다.

1.3.1.4 2차 조종 계통

1번~8번 슬랫(slat)²⁰은 모두 완전히 전개되어 있었으며, 우측날개 1번 전연

20) 슬랫(slat)은 공기흐름의 박리를 저연시켜 양력을 증가시켜 주기 위해 앞전의 일부를 앞으로 내밀어 슬롯을 형성하는 가동(movable) 장치

슬랫의 동체인접 부분은 심하게 깨져있었다.

좌, 우측 날개의 1번과 5번 스포일러는 전개되어 있었고, 2번, 3번 및 4번 스포일러는 전개되지 않은 위치(stow)에 있었으며 특이사항은 없었다.

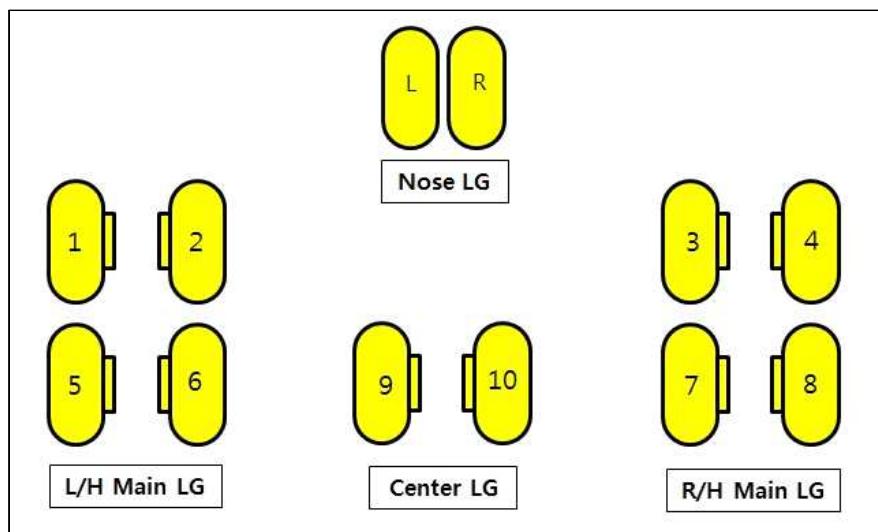
좌, 우측 날개의 후연 고양력장치(trailing edge flap)는 10도로 전개되어 있었고 후연 고양력장치의 표면은 손상이 없었다. 유압사용이 불가능하여 작동할 수 없었다.

1.3.2 유압 계통

전방착륙장치실(NLG wheel well)의 유압계통 부품이 손상을 입었다. 중앙착륙장치실(CLG wheel well) 후방 칸막이 벽(bulkhead)의 좌측면에 위치한 중앙착륙장치 미끄럼방지(anti skid) 매니폴드는 충격에 의해 장착부위가 풀려있었고 유압공급 및 회송튜브가 대부분 손상되었다.

1.3.3 착륙장치계통

착륙장치의 구성은 [그림 3]과 같다.



[그림 3] 착륙장치의 구성

1.3.3.1 전방 착륙장치

전방착륙장치실(NLG wheel well)은 심하게 손상되었다.

전방착륙장치 완충 스트러트(shock strut)는 토크링크가 연결된 상태로 완전히 압축된 상태였으며, 인입 작동기 위쪽 끝은 손상된 동체구조물에 연결되어 있었으나 아래쪽 끝의 클레비스(clevis)는 부러져 있었다.

1.3.3.2 주 착륙장치

주 착륙장치는 비교적 양호한 상태였다.

1) 좌측 주 착륙장치

트럭 어셈블리 잔해 가드(Truck Assembly debris guard)는 긁힌 자국과 중간부위가 찌그러져 있었다. 착륙장치 하부 완충 스트러트는 약 1.75인치의 내부 피스톤 크롬이 보였고 액체류의 유출흔적은 없었다. 주 착륙장치 구성하고 있는 타이어 중에서 2번 타이어는 손상을 입었고 나머지 1번, 5번, 6번 타이어는 온전하였다.

2) 우측 주 착륙장치

육안검사 결과 브레이크는 정상이었고 유압유 누설현상은 보이지 않았다. 트럭 어셈블리 잔해 가드(truck assembly debris guard)는 긁힌 자국과 중간부위가 찌그러져 있었다.

타이어 압력계(TPI) 및 휠스피드(wheel speed) 감지계통이 손상되었다. 착륙장치 완충 스트러트는 약 3인치의 내부 피스톤 크롬이 보였고 액체류의 유출흔적은 없었다. 3번, 7번 타이어의 압력은 210psi로 확인되었으나 4번, 8번 타이어는 심하게 파열되어 있었다.

1.3.3.3 중앙 착륙장치

중앙착륙장치실(CLG wheel well)의 후방에 위치한 중앙착륙장치 미끄럼방지 매니폴드 장착부분이 풀려져 있었고, 유압 공급 및 회송튜브는 피팅 부근에서 굽힘과 충격에 의한 손상이 있었다.

중앙착륙장치는 정상적으로 전개되어 고정(lock) 위치에 있었고 고정링크는 전개되었을 때 정상 위치인 오버센터(over center) 상태였다. 유압라인은 손상되었거나 장착 피팅으로부터 분리되었다.

중앙착륙장치의 인입 작동기 피스톤(retract actuator piston)은 하우징으로부터 분리되어 있었다.

사고항공기 복구 중 정비사가 손상된 중앙착륙장치를 항공기에 재 정렬시키기 위해 완충장치의 작동유 및 기체를 유출시켰으며, 이를 통해 조사단은 중앙착륙장치 완충장치내 압력이 있었음을 확인하였다.

1.3.4 항공기 구조

사고항공기 복구 중 전방 하단부분이 손상되어 사고로 인한 손상과 복구 후 조사된 손상에는 차이가 있을 수 있지만, 항공기 좌·우측 날개에 장착된 1번 및 3번 엔진, 전방착륙장치실 주변, 공조장치와 전자기기 수납실, 중앙착륙장치 후방하부 등 주로 항공기 동체 전방부분이 손상되었다.

전방착륙장치실 후방 및 앞쪽에서 심각한 손상 및 좌굴^{21)현상}이 발생하였고, 전방착륙장치 트러니언과 지지대 피팅이 부서지고 항공기 구조부재로부터 떨어져 나갔다.

동체 전방에 위치한 1L 및 1R 출입문을 육안 검사 시 특이사항은 보이지 않았으나 작동할 수 없었다. 동체 하부에 위치한 전방·후방 화물 출입문은

21) 좌굴(Buckling): 물체에 압축하중이 가해졌을 경우 하중의 증가에 따라 물체가 구부러지거나 휘는 현상

수동으로 열 수 있었다.

1.3.5 항공기 엔진

좌·우측 날개에 장착되어 있는 1번과 3번 엔진의 팬 카울은 사고시 지상에 접촉되어 일부 손상되었으며, 1번과 3번 엔진의 팬 블레이드는 대부분 회전저항에 의해 길이방향의 중간정도에서 절단되었다.

팬 블레이드 러브스트립 세그먼트(rubstrip segments)는 대부분 마모되거나 이탈되었으며 모든 2차 공기 출구 안내깃(fan exit guide vanes)이 손상을 입었다. 엔진 인렛카울은 엔진으로부터 분리되어 손상된 상태로 활주로 주변에서 발견되었다.

꼬리날개에 장착되어 있는 2번 엔진의 역추력장치는 완전히 전개된 상태였으며, 엔진 입구와 외부 부품에서는 손상이 발견되지 않았다.

1.4 기타 손상

이 사고로 인천공항 활주로15R 등화시설과 항행안전시설 일부가 파손되었다. ‘첨부사진 3’과 같이 진입등시스템의 등기구 14등, 진입등시스템의 Pole Single Type 8개소 및 T형 Master Type 2개소가 파손되었다. 활주로 15R의 로컬라이저 안테나 20개 중 활주로 33L 이륙방향 좌측 6개와 연결 선 등이 파손되었다.

1.5 인적 정보

1.5.1 기장

기장(53세, 남)은 1994년 6월 6일 UPS항공(주)에 입사하였으며 유효한 운송용조종사자격증명²²⁾, MD-11한정, 제1종 항공신체검사증명²³⁾을 보유하고

22) 발행일: 2008년 2월 26일

있었다. 또한 기장은 B-737, B-747, B-757, B-767, BE-1900, L-300, SA-227기종으로 비행한 경력이 있었다.

기장은 총 7,769시간을 비행하였고, 총 기장시간은 6,152시간, MD-11기종 기장시간은 5,034시간이었다. 기장은 최근 3개월 동안 255시간, 최근 1개월 동안 66시간을 비행하였다.

기장은 2016년 1월 24일 모의비행장치로 정기훈련을 받은 후 1월 25일 평가(LOE)에 합격하였으며 동년 3월 21일 평가비행(LC)에 합격하였다.

사고 발생 전 3일간 행적으로 기장은 6월 3일(금) 안전조종사와 같이 편조되어 호주(시드니)에서 싱가포르로 비행 후 19시간 39분을 휴식하였다. 기장은 6월 4일(토) 오후 8시 55분경 싱가포르에서 이륙하여 6월 5일(일) 새벽 3시 42분경 인천공항에 착륙하였고, 인근 승무원체류호텔로 이동하여 아침 식사 후 오후 7시경까지 취침하였으며 저녁식사 후 다시 취침하였다. 기장은 6월 6일(월) 새벽에 기상하여 체력단련실에서 운동하였으며 아침 식사 후 취침하였다. 기장은 저녁식사 후 밤 10시경 인천공항에 도착하여 알라스카 앵커리지로 가는 비행을 시작하였다. 기장은 사고비행 전 40시간 13분간을 휴식하였다.

기장은 비행 전 24시간 이내에 음주나 허가되지 않은 약물을 복용하지 않았다고 진술하였다.

1.5.2 부기장

부기장(57세, 남)은 2006년 11월 1일 UPS항공(주)에 입사하였으며 유효한 운송용조종사자격증명²⁴⁾, MD-11한정, 제1종 항공신체검사증명²⁵⁾을 보유하였다. 또한 부조종사는 DC-10, B-757, B-767기종으로 비행한 경력이 있었다.

23) 검사일: 2015년 12월 7일

24) 발행일: 2009년 6월 23일

25) 검사일: 2016년 2월 8일

부기장은 총 4,236시간을 비행하였고, 그 중 MD-11 부기장으로 3,491시간을 비행하였다. 부조종사는 최근 3개월 동안 126시간, 최근 1개월 동안 66시간을 비행하였다.

부기장은 2014년 9월 29일 비행자격유지를 위한 평가비행(LC)에 합격하였으며 2016년 6월 3일 모의비행장치로 정기훈련을 받은 후 평가(LOE)에 합격하였다.

사고 발생 전 3일간 행적으로 부기장은 6월 3일(금) 알라스카 앵커리지에서 모의비행장치로 정기훈련 및 평가 후 휴식하였다. 부기장은 6월 4일(토) 오후 2시 32분경 앵커리지공항을 이륙하여 6월 5일(일) 오후 3시 58분경 인천공항에 착륙하였다. 부기장은 인천공항 인근 승무원체류호텔로 이동하여 휴식 후 취침하였으며 6월 6일(월) 오전 9시경 기상하여 식사 후 호텔에서 취침 및 휴식하였다. 부기장은 저녁 식사 후 밤 10시경 인천공항에 도착하여 알라스카 앵커리지로 가는 비행을 시작하였다. 부기장은 인천공항에서 27시간 57분간 휴식하였다.

부기장은 비행 전 24시간 이내에 음주나 허가되지 않은 약물을 복용하지 않았다고 진술하였다.

1.5.3 안전조종사

안전조종사(45세, 남)는 2006년 8월 30일 UPS항공(주)에 입사하였고 유효한 운송용조종사자격증명²⁶⁾, MD-11한정²⁷⁾, 제1종 항공신체검사증명²⁸⁾을 보유하고 있었다. 또한 안전조종사는 CL-65, B757, B767, EMB-120기종으로 비행한 경력이 있었다.

26) 발행일: 2000년 9월 25일

27) 취득일: 2010년 8월 16일

28) 검사일: 2016년 5월 2일

안전조종사는 총 12,330시간을 비행하였고 MD-11기종으로 약 2,685시간을 비행하였다. 안전조종사는 최근 3개월 동안 122시간, 최근 1개월 동안 41시간을 비행하였다. 안전조종사는 2015년 8월 11일 모의비행장치 평가(LOE)에 합격하였고 2016년 4월 7일 비행자격유지를 위한 평가비행(LC)에 합격하였다.

사고 발생 전 3일간 행적으로 안전조종사는 6월 3일(금) 시드니에서 싱가포르로 비행하였고, 6월 4일(토) 오후 9시경 싱가포르에서 출발하여 6월 5일(일) 오전 4시 10분경 인천공항에 도착하여 승무원체류호텔로 이동하였고, 호텔에서 운동, 식사, 휴식 후 저녁 9시경 취침을 하였으며, 6월 6일(월) 오전 4시 30분경 기상하여 운동 및 아침 식사 후 오전 8시 30분부터 오후 8시까지 취침하였다. 안전조종사는 저녁 식사 후 밤 10시경 인천공항에 도착하여 알라스카 앵커리지로 가는 비행을 시작하였다.

1.6 항공기 정보

1.6.1 항공기 일반정보

N277은 [표 2]와 같이 1987년 12월 19일 미국 맥도널더글러스사²⁹⁾에서 제작되어 일본항공(Japan Airline)에 인도되어 운용되었고, 2004년 6월 7일 UPS로 매각되었으며, 2004년 7월 6일 SASCO³⁰⁾에서 화물기로 개조 후 2004년 11월 2일부터 UPS에서 운영되었다.

29) McDonnell Douglas Corporation

30) SASCO(ST Aerospace Service Co): 항공기의 중정비 및 개조작업을 하는 싱가폴에 위치한 정비전문업체

항공기형식(Type)	MD-11
제작일자	1987.12.29
UPS 도입일자	2004.06.07
제작사 일련번호	48578
총 비행시간	63,195 시간
총 비행횟수	11,344 회

[표 2] 항공기 일반정보

1.6.2 항공기 제원

첨부 사진 4 참조

1.6.3 장착 엔진 및 보조동력장치 일반정보

N277에 장착 운용중인 엔진과 보조동력장치(APU)의 일반정보는 [표 3]과 같다.

	No.1 엔진	No.2 엔진	No.3 엔진	APU
제작사	Pratt & Whitney			Honeywell
품명번호	PW4460-3			TSCP7004E
일련번호	723857	733734	728876	P111
제작일자	1991.04.30	1993.07.08	1991.07.23	1991.02.22
장착일자	2016.03.20	2014.03.24	2014.09.15	2014.06.29
오버홀후 사용시간/횟수	20,701/4,529	50,358/10,149	17,306/4,378	1,575/1,951
총사용 시간/횟수	78,370/14,004	50,358/10,149	65,826/10,992	17,929/18,840

[표 3] 엔진 및 보조동력장치 일반정보

1.6.4 항공기 정비 이력

1.6.4.1 항공기 정비프로그램

N277은 UPS의 지속적감항유지프로그램(CAMP)에 따라 정기적인 점검과 검사가 수행되었으며, UPS의 General Maintenance Manual (GMM) 및 Maintenance Specifications Manual (MSM)에 명시된 정해진 주기에 따라 점검과 검사가 이루어졌다.

운항정비³¹⁾에 해당되는 도착점검(AS: Arrival Service Checks)은 지상계류시간이 2~6시간인 경우 AS-N과 6시간 이상일 경우 AS-E로 수행된다.

정시점검³²⁾에는 매 9일마다 수행되는 PS1, 매 450비행시간 주기로 수행되는 PS2, PS3, PS4, PS5가 있다. 15개월 또는 4,200비행시간 중 먼저 도래하는 시기에 수행되는 C점검이 MSM에 규정되어 있다.

D점검이라고도 불리는 C4점검은 기체구조검사³³⁾를 포함하고 있으며, 정시점검 수행 현황은 [표 4]와 같다.

점검종류	수행일자	장소	비행시간	비행횟수
Arrival Service	2016.06.05	HKG	63,193.17	11,343
PS점검	PS1	RDU	63,142.56	11,336
	PS5	ONT	61,707.36	10,941
	PS2	ONT	62,138.03	11,062
	PS3	ONT	62,527.36	11,167
	PS4	ONT	62,903.39	11,257
C점검	C1	SAA	61,069.56	10,730
	C2	SAA	58,825.59	10,157
	C3	SAA	61,069.56	10,730
	C4	SAA	58,825.59	10,157

[표 4] 정비작업 수행현황

31) Arrival Service: 항공기 도착 후 수행하는 전형적인 운항정비

32) Period Service: MSM에 정해진 부품과 계통에 대해 점검

33) 기체구조검사: Extensive Structural Inspection Task

1.6.4.2 탑재용 항공일지 기록

2016년 1월 1일부터 사고발생 전까지 탑재용항공일지에 기록된 중앙착륙장치의 타이어 교환이력은 [표 5]와 같다.

날짜	결함 내용	조치내용	휠·타이어의 사용현황
2016.04.02	9번 휠·타이어 마모	9번 휠·타이어 교환	288.56FH/87FC
2016.05.07	10번 휠·타이어 마모	10번 휠·타이어 교환	142.38FH/41FC

[표 5] 제동장치 및 중앙착륙장치 결함내용

중앙착륙장치 미끄럼방지 계통과 10번 휠의 반복결함이 2015년 12월 7일 시작되었고, 정비이월 및 종결조치를 확인한 내용은 [표 6]과 같다.

날짜	결함/점검 내용	조치내용	근거
2015.12.13	미끄럼방지계통의 와이어와 연결부위 등의 도통 상태 및 접지특성을 점검	연결부분의 부식과 헐거움을 발견하여 수정조치	정비교범 32-45-30
2015.12.31	미끄럼방지 계통의 부작동	정비이월	MEL 32-45-1-1
2016.01.09	모든 제동계통 튜브의 장착상태를 확인	3번 유압계통 매니폴드, 10번 휠 스피드 변환기 (wheel speed transducer) 및 10번 브레이크 교환	교환 후 20일간 결함이 재발되지 않아 2016.02.01부로 정비이월 종료

[표 6] 중앙착륙장치 미끄럼방지 계통의 반복결함내용

1.6.5 중량 및 평형

N277의 이륙 시 중량 및 평형은 [그림 4]와 같이 기준 범위 이내로 정상이었다.

무연료중량: 440,100lbs, 무연료 CG: 15.1

이륙중량: 629,500lbs, 이륙 CG: 19.5

이륙 CG % MAC 기준범위: 19.3~19.7

최대허용무연료중량: 461,300lbs

최대허용이륙중량: 630,500lbs

[그림 4] N277 중량 및 평형자료

1.6.5.1 탑재화물 중량

N277의 화물은 주화물실에 26개³⁴⁾의 ULD, 하부화물실에 13개³⁵⁾의 ULD가 bulk에 탑재되었다. 화물적하목록에는 홍콩공항에서 탑재한 화물(2,553개 /61,788lbs: ULD 포함)과 인천공항에서 탑재한 화물(9,161개/123,446lbs)을 포함하여 총 11,714개/185,234lbs(ULD 포함)이었다.

사고 현장에서 화물을 하기 후 인천공항 UPS 화물장치장에 있는 장비로 측

34) 4 pallets, 22 containers

35) 전방 6개, 후방 7개

정한 중량은 185,394lbs(ULD 중량 포함)로 화물적하목록상 중량과 170lbs 차이로 운항에 영향을 줄 정도가 아니었다. 위험률은 없었으며, 각 ULD 별 중량측정결과는 '첨부 B'와 같다.

1.7 기상정보

인천공항의 정시관측보고는 아래와 같으며 13:30경에는 북풍 1kts, 시정 9km, 4,000ft에 적은구름, 12,000ft에 많은 구름, 기온 섭씨19도, 노점온도 섭씨14도, 기압 1,012mb로 시계비행기상상태였다.

- 13:00 MET 02001 9000 SCT040 BKN120 19/14 1013
- 13:30 MET 36001 9000 SCT040 BKN120 19/14 1012
- 14:00 MET 36002 9000 SCT040 BKN120 20/14 1013

1.8 항행안전시설

해당 사항 없음

1.9 통신

인천공항에서 지상 활주 및 이륙하기 위해 인천지상관제, 인천관제탑과의 통신 교신은 정상으로 이루어졌으며 주요 교신 내용은 [표 7]과 같다.

송신시간	송신자	통신내용	비고
13:24:28	UPS61	Apron, UPS61 Parking Bay630 with C start up request push back	121.875 Mhz
13:24:31	Apron	UPS61 Push back and start up approved and make long push back	인천계류장 관제
13:24:36	UPS61	Push back, Start up approved and long push back UPS61	
13:31:30	UPS61	Apron, UPS61, Ready to Taxi	
13:31:32	Apron	UPS61, Taxi to 4Yankee via D3	

송신시간	송신자	통신내용	비고
13:31:34	UPS61	4Yankee via D3	
13:32:52	Apron	UPS61, Contact Tower 118.2 Good night	
13:32:55	UPS61	118.2 UPS61 Good night	
13:33:18	UPS61	UPS61, Approaching D3	118.2Mhz
13:33:21	Incheon Tower	UPS61, Departure Runway 33L, Taxi D, J Hold Short Runway 33R	
13:33:28	UPS61	Runway 33L Taxi D, J Hold Short 33R UPS61	
13:41:51	Incheon Tower	UPS61 Line Up Runway 33L	
13:41:55	UPS61	Line Up and Wait Runway 33L, UPS61	
13:43:50	Incheon Tower	UPS61 Wind Calm Runway 33L Cleared for Take off	
13:43:55	UPS61	Cleared for Take off UPS61	
13:46:22	Incheon Tower	UPS61 In-Cheon Tower Radio Check	

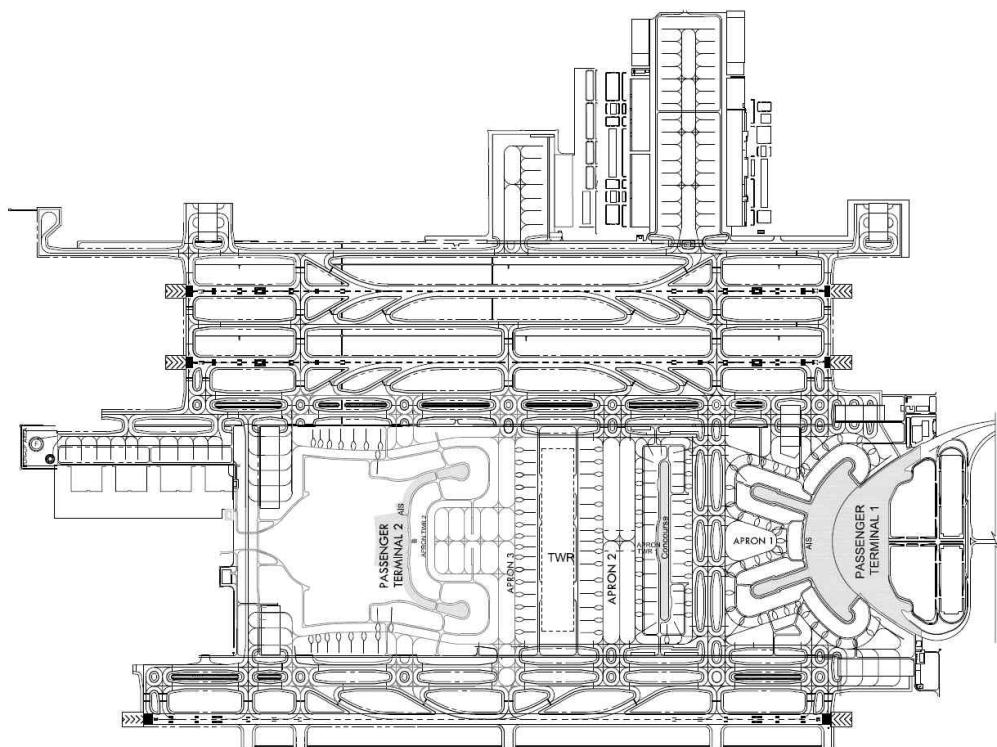
[표 7] N277 관제 교신 내용

1.10 비행장 정보

인천공항의 표면고도는 7m이며, 3본의 활주로(15R/33L, 15L/33R, 16/34)는 콘크리트로 포장되어 있다. 사고가 발생한 활주로33L의 제원은 다음 [표 8]과 같다.

구분	길이	폭	비고(설명)
이륙활주가능거리 (TORA)	3,750m (12,303ft)	60m	Take-off Run Available: 이륙지상활주에 적합하고 가용한 것으로 선포된 활주로 길이
정지로(stopway)	120m (394ft)	60m	Stopway: 이륙실패 시 항공기에 구조적 충격을 야기하지 않고 항공기를 정지시키고 지지하기 위한 활주로 종단 이후의 장방형 지역
가속정지가능거리 (ASDA)	3,870m (12,697ft)	60m	Accelerate Stop Distance Available: 이륙활주 가능거리에 정지로를 합한 거리
개방구역(clearway)	300m (984ft)	150m	Clearway: 공항당국의 통제 하에 있고 장애물이 없는 포장 활주로 이후의 지역
사용가능이륙거리 (TODA)	4,050m (13,287ft)	-	Take-off Distance Available: 이륙활주가능거리에 개방구역을 합한 거리

[표 8] 인천공항 활주로33L의 제원



[그림 5] 인천공항 활주로 배치도

1.11 비행기록장치

1.11.1 비행자료기록장치(Flight Data Recorder, FDR)

N277의 비행자료기록장치³⁶⁾에는 약 25시간의 비행자료가 있었다. 이번 사고비행은 엔진시동 후 사고로 정지하기까지 총 18분 14초간 자료가 기록되어 있었다.

본 보고서의 자료에 사용된 수치 변환은 항공기 제작사인 보잉사의 “MD-11 DFDR EXPANDED PARAMETER LIST-REV. H“의 기술문서를 기반으로 하였다. 수치 값의 부호는 항공기가 상승되는 경우 및 우선회가 되는 경우의 양의 값(+)이 되도록 변환하였다. 제작사의 수치 값의 부호가 다를 경우에도 이 원칙에 맞도록 수정하여 작성하였다.

36) 비행자료기록장치(FDR: Flight Data Recorder): 제작사 : 미국 L-3COM사, 종류 : SSFDR(Solid State FDR FA2100), 물품번호 : 2100-4043-02, 일련번호 : SSFDR-000521584

1.11.1.1 이륙포기와 관련된 이벤트 시점

본 보고서에 사용된 시간의 일치는 [표 9]와 같다.

FDR-SRN(ARAIB)	FDR-SRN(Boeing)	
631511	34086	Vertical-G value dropped

※ SRN(Subframe Reference Number): FDR Data Block 단위로 1초에 1씩 증가한다.

※ 동일한 FDR Raw data를 사용하여 수치변환작업을 하여도 분석 시작점에 따라 SRN 숫자가 다를 수 있으나, 1초에 1씩 증가하는 것은 같다.

[표 9] FDR-SRN(ARAIB), FDR-SRN(Boeing)의 시간 일치

이륙포기와 관련된 이벤트 시점은 [표 10]과 같다.

국제 표준시	시차 (초)	이벤트	의미	표본율
13:44:45.7	0	수직가속도 급변 시작	비정상을 보인 첫 번째 파라미터	수직가속도는 매 0.125초마다 수집되며 자료수집 장치와 직접 선으로 연결. 절차지연 없음
13:44:46.2	0.5	수직가속도 정상 복귀	CVR녹취록의 0.55초간 비정상음과 일치	
13:44:47.4	1.7	스로틀 감소를 보인 첫 번째 표본	이륙포기조치 시작	스로틀 각도는 FADEC으로부터 초당 한번 수집. 절차지연 극미
13:44:48.3	2.5	브레이크 페달 위치 '0' 아닌 첫 번째 표본	브레이크 작동 시작	브레이크 페달 위치는 초당 한번 수집되고 자료수집 장치와 직접 선으로 연결. 절차지연 없음
13:44:48.8	3.1	스포일러 위치 '0' 아닌 첫 번째 표본	스포일러 전개시작	스포일러는 FCC로부터 2초당 한번 수집. 절차지연 최대 0.7초

[표 10] 이륙포기와 관련된 이벤트 시점

1.11.2 조종실음성기록장치(Cockpit Voice Recorder, CVR)

조종실음성기록장치³⁷⁾는 IC메모리를 자료저장매체로 사용하는 Solid-state

37) 조종실음성기록장치(CVR: Cockpit Voice Recorder): 제작사 : 미국 L-3COM사, 종류 : SSFDR(Solid State FDR FA2100), 물품번호 : 2100-1020-02, 일련번호 : SSFDR-000147391

타입으로 기장, 부조종사, 조종실 그리고 조종실 내 예비 장착 마이크를 통하여 입력되는 조종실 내 발생음을 디지털 방식으로 기록한다. 위원회는 조종실음성기록장치 제작사 장비를 이용하여 기록된 음성자료를 30여분의 길이의 4개 채널 파일로 각각 구분하여 인출하였다.

조종실음성기록장치에 기록된 자료 약 30여분의 길이에는 인천공항에서 비행을 위하여 움직인 시각부터 활주로 33L의 끝단을 통과하여 정지한 사고비행구간이 모두 포함되어 있었다.

미국 사고조사단을 포함한 CVR조사팀은 전체 녹음구간을 청취 후 사고비행구간에 대하여 녹취록을 작성하였다.

1.12 잔해와 충격 정보

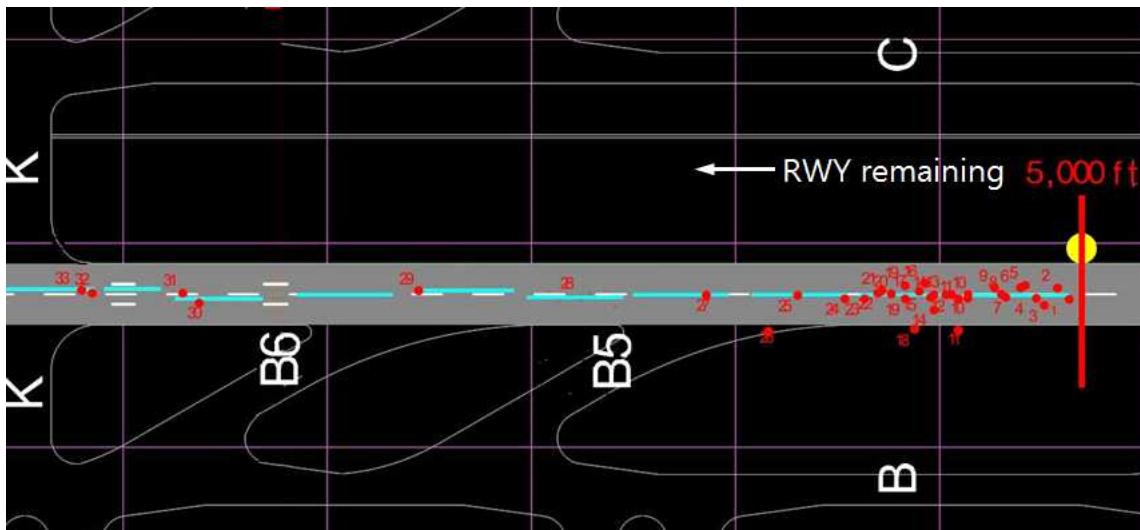
1.12.1 활주로 상의 잔해

N277의 항공기의 잔해는 활주로 상에 있던 잔해와 활주로 종단을 지나 녹지대에 위치한 잔해를 구분하여 조사하였다.

활주로 상에 있던 잔해는 활주로33L 활주로거리등³⁸⁾ 5부터 4사이(유도로 B4와 유도로 B5사이)에 금속과 타이어 잔해들이 [그림 6]과 같이 활주로 중심선 좌우로 퍼져 있었고 잔해의 분포도는 첨부 사진 2와 같다. 일부 타이어 잔해들은 활주로를 벗어나 있었다.

활주로의 금속 잔해는 중앙착륙장치의 랜딩기어도어 일부와 부속부품들이었다. 중앙착륙장치의 9번과 10번 타이어의 잔해들은 활주로33L 시단으로부터 7,034ft에서 8,600ft 사이에 주로 흩어져 있었다.

38) 활주로거리등(runway distance remaining signs): 이착륙하는 항공기 조종사에게 활주로의 잔여거리를 아래비아숫자로 알려주는 표지판(예: 활주로거리등 ‘5’는 이 표지판의 위치가 활주로33L 종단 까지 약 5,000ft가 남아있음을 알려주는 표지판이다. 이 표지판 뒷면에는 ‘7’로 표지되어 있는데 활주로15R로 이착륙하는 항공기에게 활주로33L 시단까지 약 7,000ft가 남아있음을 알려준다)



[그림 6] 활주로 상 잔해분포

1.12.2 활주로의 타이어 흔적

활주로의 타이어 흔적은 활주로33L 시단으로부터 약 7,034ft(2,144m)의 활주로 중심선³⁹⁾ 부근에서 시작되어 활주로 종단까지 16회, 정지로에서 3회 등 총19회에 걸쳐 불규칙한 간격으로 반복되었으며, 각 흔적들의 길이는 약 33~120ft였고 간격은 약 100~270ft였다.

최초 흔적은 [그림 7]과 같이 활주로33L 시단으로부터 약 7,034ft(종단으로부터 약 5,269ft)에서 시작되어 107ft 길이로 4개의 구간으로 분할되어 나타났다. 10번 타이어의 홈(groove) 자국은 4구간에서 모두 선명하게 나타났으나, 9번 타이어의 홈 자국은 거의 보이지 않았다. 10번 타이어의 흔적은 4구간에서 구간 끝에서 좌측으로 휘어졌다 다시 우측으로 환원되는 소용돌이(swirl) 형태였다.

39) 활주로중심선표지는 활주로 중앙부분을 따라 30m간격으로 흰색 점선형태로 도색되었으며 폭 0.9m, 길이 30m이다.



[그림 7] 최초 타이어 흔적

2차 타이어 흔적은 활주로 33L 시단으로부터 약 7,224ft(종단으로부터 약 5,079ft)에서 다시 시작되어 66ft 길이로 나타났으며, 최초 타이어 흔적에서 나타난 소용돌이 형태가 없이 [그림 8]과 같이 일직선 형태였다.



[그림 8] 2차 타이어 흔적

3차 타이어 흔적은 활주로33L 시단으로부터 약 7,543ft에서 시작되어 114ft 길이로, 4차 타이어 흔적은 활주로33L 시단에서 약 7,858ft에서 시작되어 72ft 길이로 나타났다.

1.12.3 로컬라이저 안테나 충돌 흔적

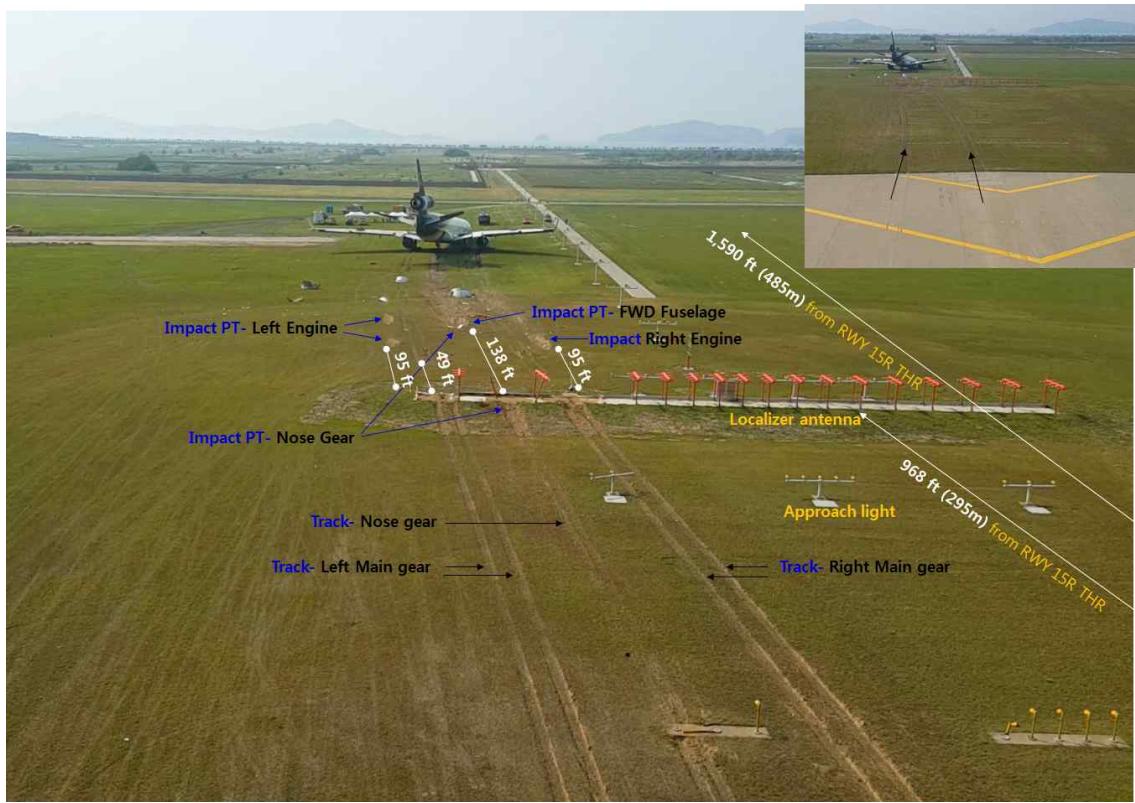
N277는 전방착륙장치가 활주로중심선에서 좌측으로 약 23ft(7m) 벗어난 상태로 활주로33 종단과 정지로(stopway)를 이탈하였다.

정지로를 지난 후 N277의 전방착륙장치와 좌우측 주륜의 흔적은 좌측으로 점진적으로 휘어지며 [그림 9]와 같이 활주로33L 종단에서 약 968ft(295m)에 있는 로컬라이저 안테나의 좌측부분을 향하여 진행되었다.

이후 N277의 전방착륙장치와 좌우측 주착륙장치의 바퀴 흔적은 로컬라이저 안테나의 좌측 부분 약 1ft 높이의 콘크리트 구조물에 충돌된 것⁴⁰⁾으로 나타났다. 이 흔적들은 로컬라이저 안테나 구조물을 지나면서 잠시 사라졌다가 이후 약 49ft(15m)에서 좌우측 주착륙장치의 바퀴 흔적이, 약 138ft(42m)에서 전방착륙장치와 동체전방이 지상에 접촉된 흔적이, 약 95ft(29m)에서 좌우측 엔진이 지상에 접촉된 흔적이 시작되었다.

이후 N277은 로컬라이저 안테나에서 약 622ft(190m)를 더 전진한 후 활주로33L 종단에서 약 1,591ft(485m), 활주로 중앙연장선상에서 좌측으로 약 75ft(23m) 벗어나 정지되었다.

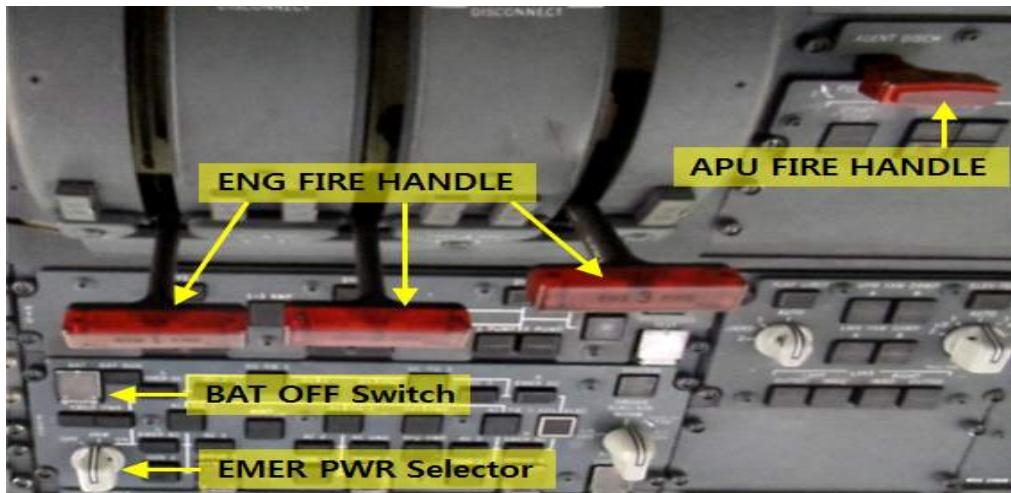
40) 비행자료기록장치에 의하면 N277은 로컬라이저 안테나에 지상속도 46kts로 충돌한 후 전방착륙장치가 손상되었음을 나타내었다. (전방착륙장치- 'In Flight' 2초, 'Unsafe Nose' 지시)



[그림 9] N277 활주로이탈 후 경로

1.12.4 조종실 기재취급

조종석 오버헤드패널에 있는 엔진 화재손잡이(engine fire handle) 3개는 [그림 10]과 같이 모두 연료와 유압을 차단하는 위치에 놓여있었고, 보조동력 장치 화재손잡이(APU fire handle)는 작동되지 않은 위치에 있었다. 비상전원 선택기(emergency PWR selector)는 ARM 위치에 있었으며, 배터리스위치는 가용한 전원이 없어서 켜진 위치에 있는지 여부는 확인할 수 없었다.

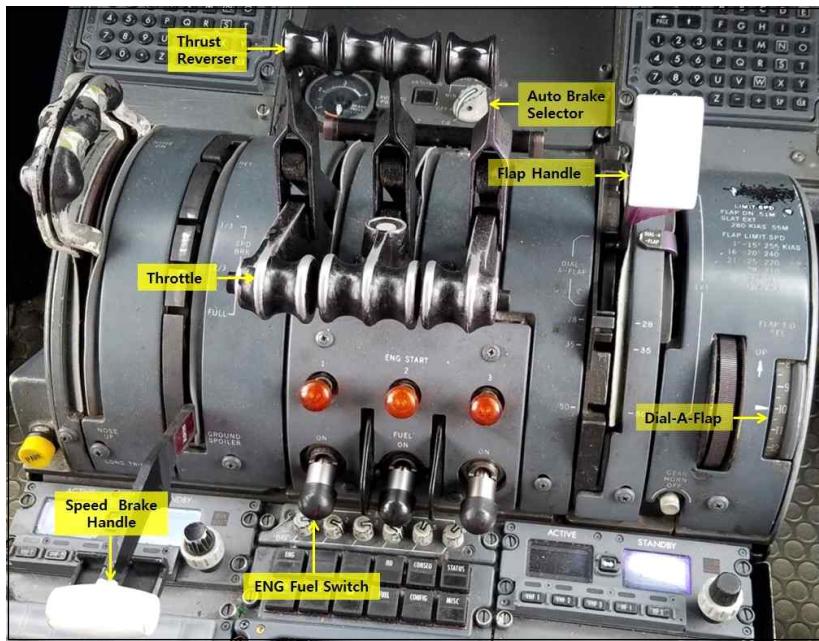


[그림 10] 오버헤드패널 기재취급 상태

[그림 11] 과 같이 조종석의 중앙부분에 있는(forward pedestal) 자동브레이크선택기(auto brake selector)는 이륙위치(T.O.)⁴¹⁾에 있었고, 3개의 엔진 추력레버는 완속(fully retard) 위치에, 3개의 역추력장치 레버는 완전 전개(fully deployed) 위치에 있었으며, 3개의 엔진연료 차단스위치는 차단(off) 위치에 있었다.

스피드브레이크 핸들(speed brake handle)은 최대지상전개(full ground spoiler deployment) 위치에 있었다. 플랩 및 슬롯 핸들 위치는 10도의 전개 위치에 있었고 Dial-A-Flap은 10도에 맞춰져 있었다.

41) 자동브레이크 선택기(Auto Brake Selector)가 T.O.위치로 선택되면 자동브레이크시스템이 ARM되어 있을 경우 이륙포기 시 100kts 이상에서 스포일러가 전개될 때 브레이크시스템 1과 2로부터 최대 브레이크가 제공된다. 100kts이하에서는 최소 브레이크가 제공된다.



[그림 11] Forward Pedestal 기재취급 상태

1.13 의학 및 병리학적 정보

N277에 탑승했던 4명의 조종사들에 대한 약물복용 및 알코올 섭취 테스트가 2016년 6월 7일~10일 기간 중 미국소재병원에서 실시되었고, 특기할 만한 약물 및 알코올은 검출되지 않았다.

1.14 화재

해당사항 없음

1.15 생존분야

1.15.1 비상대응

사고 당일 13:45:01 인천공항소방대 상황실(본대4층)에는 3명이 근무하고 있었다. 상황실 근무자의 진술에 따르면 활주로 15R에 있는 항공기에서

“펑” 소리와 함께 불꽃을 확인하였고, 13:45:21경 인천관제탑에 항공기 이상 유무 및 소방대 출동여부를 문의하였으며, 13:46:31경 인천관제탑은 비상 전화로 활주로 북측 종단으로 소방대 출동을 요청하였다.

13:46:44경 인천공항소방대 상황실은 소방본대 및 소방분소에 출동을 지시하였고, 13:47:17경 인천시 남구에 소재한 인천소방본부에 사고발생을 통보하였다. 13:47:27경 인천관제탑은 인천공항소방대에 출동을 재차 요청하였다.

인천공항소방본대는 13:51:01경 사고현장에 도착하였고, 조종사들은 4명 모두 항공기로부터 탈출한 상태였다. 13:52:23경 인천공항소방본대는 항공기 좌우측 착륙장치의 화재발생을 방지하기 위하여 소화액(foam)을 방사하였다. 13:53:14경 인천공항 소방분소가 현장에 도착하여 착륙장치를 확인한 결과 화재 징후는 없었다.

13:57:01 인천소방본부에서 출동한 차량 8대와 인원 22명은 인천공항소방대 앞에서 대기하였다.

14:31:25경 인천공항 소방분소는 화재 징후나 특이사항 없음을 확인하였고 15:30:05경 귀소하였다. 15:35:10경 인천공항소방본대는 조종사 4명을 공항의 료센터로 이송하였고, 15:39:00경 출동한 소방차량⁴²⁾과 인원들도 복귀하였다.

1.16 시험 및 연구

1.16.1 N277의 제동 성능

보잉사는 모의시험 프로그램인 desktop simulation program(GSC)을 이용하여 브레이크시스템 1에 작동유(hydraulic)가 없었다면 좌우측 주륜에 60%⁴³⁾의

42) 주력차 2, 경화학차 2, 물탱크 1, 구조 및 구급차 각 1대, 조명차 1, 이동지휘소차 1, 화물탑 트레일러 1대, 동원인력 33명(분소: 주력2, 경화학 1, 물탱크 1, 구급차 2)

43) 보잉사는 spoiler, 역추력장치의 전개 등에 어느 정도 시차가 있기는 하지만, 모의시험결과 좌우측 주륜의 braking efficiency factor를 0.6으로 하였을 때 N277의 FDR에 기록된 일정 가속과 감속 level들이 예상된 Level들과 가장 잘 일치되었음을 확인하였다.

브레이크 파워만이 가용하였을 것으로 판단하였다.

N277은 중앙착륙장치의 제동효과가 전혀 없었으므로 총 제동장치 10개 중에 8개의 좌우측 착륙장치만 작동하였고, 좌우측 착륙장치에는 정상제동력의 60%가 가용되었을 것이다. 보잉사는 N277의 총 브레이크 효율이 정상 제동력의 48%(braking factor 0.48)이었을 것으로 결론을 내렸다.

보잉사의 모의시험 결과는 N277의 비행자료기록장치 데이터와 [그림 12]와 같이 매우 유사하였다.



[그림 12] N277의 감속률 모의시험 결과(보잉사)

보잉사는 MD-11 항공기가 다양한 제동환경(braking configuration)에서 이륙 포기하였을 경우의 가속정지거리를 산출하기 위한 모의시험을 하였다.

모의시험 조건은 이륙 중량 629,500lbs, Flap10, Flex 30, 지상속도 185kts에서 이륙포기절차 수행, 역추력장치 최대 작동, 제동장치 최대 작동, 지상감속장치 사용, 단단한 활주로 표면상태, 해면고도 0, 외기온도 19°C로 하였다.

모의시험 결과, 지상속도 185kts에서 정지까지의 표준거리는 [표 11]과 같이 산출되었다. 중앙착륙장치의 제동력이 작동되지 않았을 경우 정지거리는 약 500ft가 증가되었다. 중앙착륙장치의 고장과 나머지 좌우측 착륙장치의 60% 제동효율이 복합됨으로써 정지거리는 정상 경우보다 약 1,550ft 증가되었다.

이륙포기 MD-11 모의장치 시험 629,500 lb, Flap10, 19C, Sea Level, Flex30. Start Reject at 185 kts, Max Reverse Thrust, Ground Spoilers Deployed	
상황	이륙활주 시작부터 정지까지(ft)
모든 착륙장치에 최대 브레이크 가용 (CLG포함)	~12,100 ⁴⁴⁾
좌측 주착륙장치와 우측 주착륙장치에 최대 브레이크 가용, 중앙착륙장치 브레이크 없음	~12,600
좌측 주착륙장치와 우측 주착륙장치에 정상브레이크의 60% 가용, 중앙착륙장치 브레이크 없음	~13,650

[표 11] N277의 제동 환경에 따른 가속정지거리

1.16.2 모의비행장치 시연

미국 신임대표단은 UPS의 MD-11 시뮬레이터에서 여섯 가지 시나리오를 시연하여 타이어 결함, 센터기어 결함(center gear failure), RTO와 관련된 청각 및 시각 경보 등 시뮬레이터 결함 옵션(simulator fault options)과 UPS 운항승무원의 훈련 및 절차 등을 확인하였다.

다음은 이 번 사고와 유사한 상황을 설정하여 이륙을 포기하였을 경우와 이륙을 지속하였을 때의 두 가지 시나리오를 시연한 결과이다.

UPS 시뮬레이터는 D급으로써 성능 계산을 하는 데에는 제약이 따르기 때문에 본 시나리오의 산출결과인 활주로 정지거리, 항공기 정지 성능 등은 실제상황의 결과와는 다를 수 있다.

44) 인천공항 활주로 33L의 시단부터 종단까지의 길이는 12,303ft이다.

또한 이 모의비행은 승무원이 이륙을 지속했다면 발생했었을 일을 대표할 수는 없다. 비상상황에 대한 승무원 반응, 손상된 드래그브레이스에 대한 항공기 처리 등과 같이 시뮬레이터에서는 재현할 수 없는 수많은 미지의 변수들이 있기 때문이다.

〈모의비행장치 시연조건〉

- 활주로: 인천공항 (RKSI), 활주로 33L, Runway dry
- 항공기: 플랩 10, 연료 188,800 lbs, 중량 628,900 lbs, CG 19.4% MAC
- 환경: 무풍, 기온 19°C, 시정 9000m, 기압 1012hpa
- 속도(kts): V1-169, VR-184, V2-191
- 결함: V1+8 kts에서 중앙착륙장치 손상 및 타이어 파열, HYD 1 결함

■ 이륙포기 시나리오 이벤트 간 경과시간

- 스토클 증가 시작부터 항공기 속도 80 kts까지: 29.3초
- 항공기 속도 80 kts에서 V1까지: 22.1초
- V1에서 타이어 결함 청각 경고까지: 3.2초
- 결함 메시지에서 RTO 개시까지: 2.0초
- RTO 개시에서 80 kts로 감속까지: 17.9초
- 80 kts에서 “랜딩기어” 청각 경고까지: 1초
- 랜딩기어 경고에서 활주로 이탈까지: 4.5초
- 활주로 이탈에서 항공기 정지까지: 23.7초
- 총 소요시간: 1분 42.7초

■ 이륙지속수행 시나리오 수행시 이벤트 간 경과시간⁴⁵⁾

- 스토클 증가 시작부터 항공기 속도 80 kts까지: 29.3초
- 80 kts에서 V1까지: 22.1초
- V1에서 타이어 결함 청각 경고까지: 3.2초
- 결함 메시지에서 이륙지속결심까지: 1초
- V1에서 Vr 호창(“rotate”)까지: 7초
- V1에서 이륙부양 후 상승확실(“Positive climb⁴⁶⁾”)호창까지: 13초
- V1에서 착륙바퀴 내림상태 유지 결정까지: 16초

45) 경과시간은 ARAIB 조사관이 모의비행장치 시연 녹화 비디오를 보고 시간을 측정해서 산출한 수치이다.

46) 항공기가 이륙부양 직후 감시담당 조종사가 고도계와 수직속도계가 정상적인 상승을 지시함을 확인하고 이를 비행담당 조종사에게 “Positive climb”라고 호창하여 알림

1.16.3 중앙착륙장치의 9번 · 10번 타이어

9번 · 10번 타이어는 [표 12]와 같이 2회 재생하였다. 손상된 9번 · 10번 타이어에 대한 정밀분석⁴⁷⁾은 제작사인 미국 조지아주 아틀랜타 소재 굿이어 공장에서 수행하였다.

	9번 타이어	10번 타이어
품명번호	541K69-2	541K69-2
일련번호	41913102	50062126
재생(Retread)횟수	2	2
최근 재생일/회사	2016.02.16/Goodyear	2016.02.10/Goodyear

[표 12] 9번 · 10번 타이어 현황

1.16.3.1 9번 타이어

트레드는 케이싱으로부터 완전히 이탈되었고, 케이싱은 12시 방향⁴⁸⁾부터 10시30분 방향 사이가 손상되었으며, 손상은 [그림 13]과 같이 타이어 측벽(sidewall) 아래로 바이어스 패브릭 플레이스(Bias Fabric Plies)의 각도를 따라 이어졌다.



[그림 13] 9번 타이어

47) Goodyear Tire Report NARM160602a(2017.1.4.) 타이어 정밀분석 보고서

48) 타이어의 일련번호가 표기된 위치를 12시 방향으로 설정

[그림 14]에서 # 9-3 및 9-4는 3시 방향의 트레드 조각이며, 트레드 조각 # 9-3은 양쪽의 X형 파손으로 다이아몬드 모양을 나타내고 있다.

X형 또는 Y형 파손형태는 항공기 타이어에서 충격 파손 또는 파열될 경우 트레드나 측벽에서 발생한다. 이러한 파손형태는 일반적으로 극도의 과충격 작용 또는 작동 중 외부물질과의 충격에 의해 발생된다. 지난 25시간 동안의 비행자료기록장치 기록을 확인한 결과 과충격은 없었던 것으로 확인되었다.

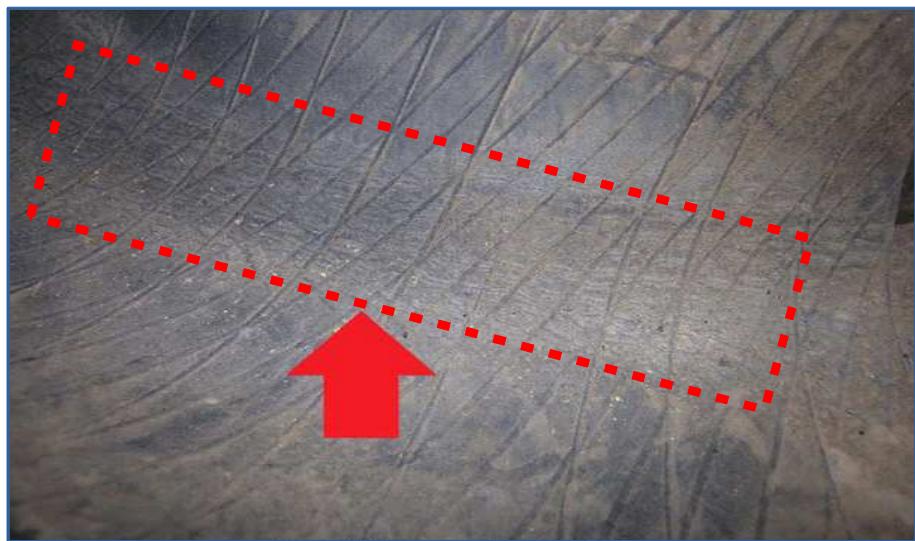
수거된 타이어와 트레드를 정밀 검사하였으나 X형 파손이 외부물질의 충격에 의한 것이라고 판단할 수 있는 단서는 발견되지 않았으며 기타 타이어 제작상의 문제라고 할 만한 사항도 발견할 수 없었다.



[그림 14] 9번 타이어 X형 파손

라이너를 검사한 결과 타이어 케이스에서 떨어져 나가지 않고 붙어있는 타이어의 측벽 부분이나 솔더 부분에서는 라이너 주름이 발견되었으나, 타이어 케이스에서 떨어져 나가 조각으로 수거된 트레드에서는 라이너 주름이 발견되지 않았다.

타이어 케이스에 장착된 상태로 남아있는 솔더 부분에서 보이는 라이너 주름 사진은 [그림 15]와 같다.



[그림 15] 9번 타이어 안쪽면 라이너 주름(Liner Wrinkles)

1.16.3.2 10번 타이어

케이싱의 8시 방향부터 4시 방향 사이의 트레드는 파열되었고, 파열은 타이어 측벽에서 바이어스 패브릭 플라이스의 각도를 따라 이어졌다. 수거된 조각을 원래의 위치에 배열하여 확인결과 [그림 16]과 같이 약 1시 방향의 트레드 중심에서 X형 파손 · 파열이 발생하였다.

라이너를 점검한 결과 타이어 케이스에서 떨어져 나가지 않고 붙어있는 타이어의 측벽이나 솔더 부분에서 미세한 라이너 주름이 발견되었다.



[그림 16] 10번 타이어

1.16.4 중앙착륙장치 Anti-Skid 제동 유압 라인

중앙착륙장치의 C-1 미끄럼방지 유압매니폴드에 장착된 압력라인 피팅의 브레이즈 연결부위는 [그림 17] 및 [그림 18]과 같이 파손되어 분리되었다. 같은 매니폴드의 회송라인은 휘어지고 브레이즈 연결부위에서는 균열이 발견되었다.



[그림 17] C-1 유압매니폴드 유압라인

손상된 압력라인과 회송라인의 파손분석⁴⁹⁾ 결과는 아래와 같다.

- 1) C-1 미끄럼방지 매니폴드 유압라인의 파단은 연성파괴에 의한 딥플형상 을 보이고 있다.
- 2) 브레이즈 연결부위 파단은 금속 간 형성(intermetallic formation) 파괴와 유사한 분열 파열을 보이고 있다. 보잉 프로세스 스탠다드(BPS)에 의하면 피팅 끝에서 0.045 inch 이내에는 금속 간 형성을 허용하지 않으나 압력 라인 끝 피팅의 모서리 (브레이즈 필렛)에 금속 간 형성의 징후가 있었다.
- 3) 보잉 프로세스 스탠다드에 의하면 브레이즈 부분의 접착불량 (void/porosity)이 총 접합면적의 15% 이상을 허용하지 않으나 압력라인과 회송라인의 브레이즈 조인트 접착불량 면적이 전체 조인트의 약 20%를 차지했다.

49) Boeing Engineering Report No. BLIS 160894(2016.8.18.)

- 4) 유압라인의 재질은 Ti-3Al-2.5V 티타늄 합금과 일치하며 브레이즈 합금은 Ag-Pd-Ga 브레이즈 합금과 일치하여 재질은 정상적인 것으로 확인되었다.

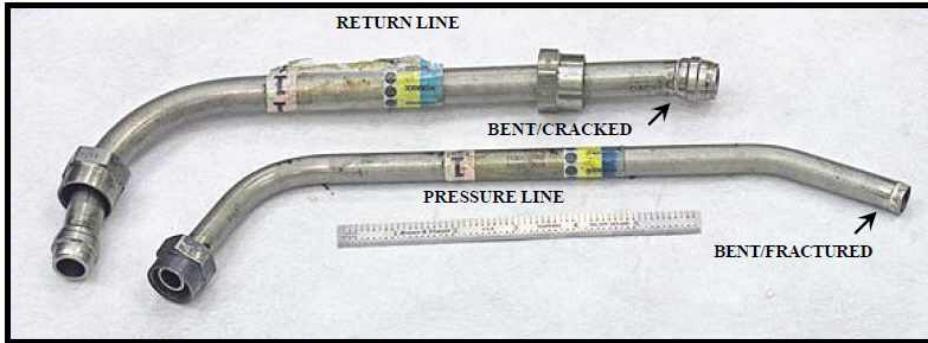


Figure 3. Overall view of Hydraulic Lines from Left CLG Anti-Skid Manifold (C-1)- Bent and Cracked/Fractured End Fittings.



Figure 4. Detailed view of Pressure Lines from Left CLG Anti-Skid Manifold (C-1)- Bent and Fractured End Fitting.



Figure 5. Detailed view of Return Lines from Left CLG Anti-Skid Manifold (C-1)- Bent and Cracked End Fitting.

[그림 18] C-1 유압매니폴드의 압력 및 회송라인

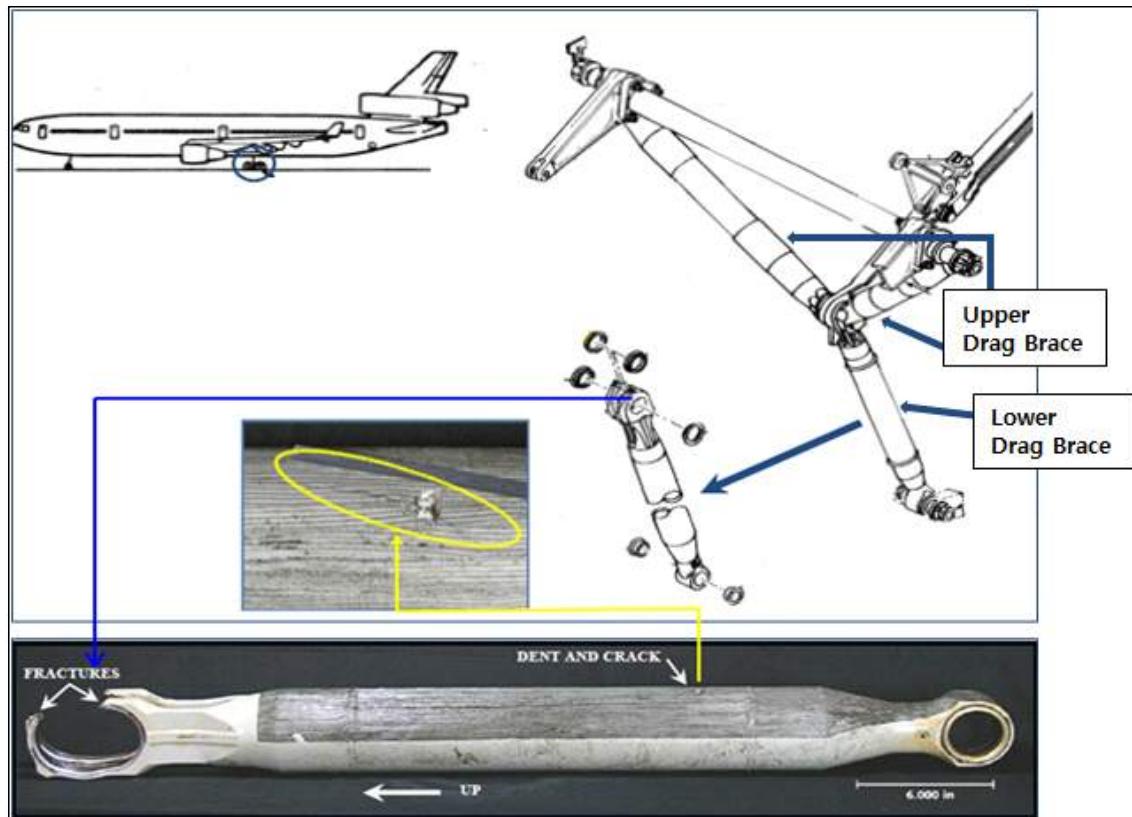
1.16.5 중앙착륙장치 드래그 브레이스 (Drag Brace)

1.16.5.1 거시적 관찰 결과

중앙착륙장치를 지지해 주는 드래그 브레이스는 [그림 19]와 같이 V자형으로 경사지게 장착된 두 개의 위쪽 드래그 브레이스와 그 밑에 수직으로 장착되어 있는 한 개의 아래쪽 드래그 브레이스로 구성되어 있다.

아래쪽 드래그 브레이스의 상단에 있는 클레비스(Clevis)는 [그림 19, 20]과

같이 한쪽 방향으로 작용된 집중하중에 의해 들어나면서 축의 수직방향으로 파단이 발생하였다. 클레비스의 파단 부위는 약 3.3inch 크기로 벌어졌다. 하단에 있는 클레비스에서는 특이사항이 발견되지 않았다.



[그림 19] 중앙착륙장치의 드래그 브레이스

손상된 드래그 브레이스의 파손분석⁵⁰⁾ 결과는 아래와 같다.

파단면에서 연성파괴에 의한 디플 형상은 확인되었으나 파단의 시작지점은 확인되지 않았다. 파단면 부근의 내부 표면에서 도금이 박리되어 일부 조각이 소실되었으며 [그림20]과 같이 파단 발생 중 베어링과의 마찰에 의해 베어링 재질의 구리빛 열룩이 나타나고 있다. 두 개의 파단면 모두 파단면 중앙에서 세로방향으로 2차 균열이 발생되었다.

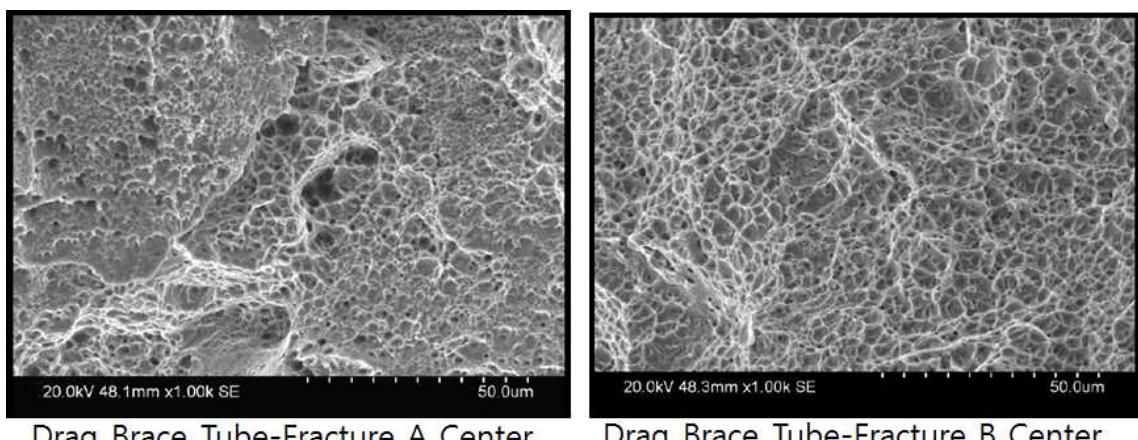
50) Boeing Engineering Report No. BLIS 160889(2016.8.15.)



[그림 20] 중앙착륙장치 드래그 브레이스 파단부위

1.16.5.2 SEM⁵¹⁾을 이용한 분석

중앙착륙장치 드래그 브레이스 파단면에 대한 주사전자현미경 검사결과 파단면 주위에서 도금층의 박리가 나타났고 베어링과의 마찰면은 밝은 부분이 나타나기도 하였다. 마찰 손상과 부식에 의해 관찰이 불가능한 일부 구간을 제외한 전체 파단면에서 [그림 21]과 같이 과하중에 의한 연성파괴 딤플 현상이 확인되었으나 재질적 결함은 발견되지 않았다.



[그림 21] 파단면 A · B 중심 SEM 사진(Dimpled Rupture)

51) SEM(Scanning Electron Microscope) : 전자총으로부터 방출된 전자빔이 시편에 주사되면서 이차적으로 발생되는 다양한 전자를 이용하여 시편 표면의 미세조직을 관찰하는 장비

1.16.5.3 EDS⁵²⁾ 분석

중앙착륙장치 드래그 브레이스 파단면 부근의 오염된 부분과 내부 표면을 따라 존재하는 흰색 물질은 크롬(Cr)을 주성분으로 하여 탄소(C)와 구리(Cu), 카드뮴(Cd), 산소(O), 알루미늄(Al), 철(Fe), 니켈(Ni) 등으로 구성되어 있으며 이는 베어링 재료와 일치한다.

파단면 부근의 크롬 도금이 떨어져 나간 내부 표면은 주로 철(Fe) 성분으로 구성되어 있으며 탄소와 산소, 실리콘(Si), 크롬, 니켈, 망간이 함유되어 있으며 300M 재질로 추정되는 산화된 합금강 성분으로 확인되었다.

1.16.5.4 경도 분석

중앙착륙장치 드래그 브레이스 파단면 부근의 경도를 검사한 결과 평균 54.1HRC⁵³⁾로 측정되어 300M 합금의 경도범위⁵⁴⁾ 기준에 적합한 것으로 확인되었다. 보잉 프로세스 스탠다드에 의하면 드래그 브레이스 파단면 부근의 경도는 53~55HRC범위 내에 있어야 한다.

1.16.5.5 금속 조직 검사

파단면 A를 단면 전처리하여 마운팅, 연마 및 에칭 후 실시한 조직검사 결과 300M 철강 합금 조직인 마르텐사이트 조직으로 확인되었다. 크롬 도금층은 약 0.002inch의 두께이고 카드뮴 도금층은 약 0.0002~0.0008inch의 두께로 확인되었다.

1.16.5.6 중앙착륙장치 드래그 브레이스의 분석 결과

1) 브레이스 균열의 파단면은 연성 과부하의 전형적인 딥플 파열로 구성되었

52) EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)는 전자현미경의 고에너지의 전자빔이 시편과 반응하여 시편의 구조 및 화학조성정보를 간직한 다양한 Signal 중 특성 X-ray를 검출하여 시편의 성분을 분석

53) HRC (Hardness Rockwell C) : 로크웰경도 C 스케일. 150KG 하중을 다이아몬드 인덴터로 시험을 했을때 나타내는 단위

54) 300M 합금의 경도범위는 53~55 HRC 임.

으나 파단 시작지점은 확인할 수 없었다.

- 2) 파단면에 인접한 내경 표면을 따라 크롬 도금이 부분적으로 박리되어 표면이 백색으로 나타나며, 이는 파단 시 베어링과의 접촉으로 발생된 금속 전달 및 일부 카드뮴 부식 생성물과 일치한다.
- 3) 금속 원소함량, 금속 미세조직 및 경도는 300M 철강합금의 기준에 적합한 것으로 확인되었다.

1.16.6 휠 어셈블리(Wheel Assembly)

휠, 타이볼트, 타이볼트 너트, 타이볼트 와셔 등 휠 어셈블리 전체 구성품에 대해 제작사인 하니웰(Honeywell)⁵⁵⁾에서 검사결과, 부식이나 기계적인 손상이나 휠 어셈블리의 접촉면에 대한 비정상적인 마모는 나타나지 않았다.

1.16.7 Brake Temperature Monitor(BTM)/Tire Pressure Indicator(TPI)

BTM⁵⁶⁾ 및 TPI⁵⁷⁾ 컴퓨터를 제작사인 사프란(SAFRAN)⁵⁸⁾에서 사고비행의 정보를 다운로드하여 조사하였다. 해당 컴퓨터는 커넥터 핀 검사 및 본딩 저항 점검 등을 포함하여 제작사 협용시험절차 테스트와 해당 부품정비매뉴얼⁵⁹⁾ 테스트를 통과하였다.

사고비행에는 총 5개의 결함들이 기록되었다. BTM/TPI 컴퓨터의 표본 울로 인하여 결함발생의 대략적인 시간들이 기록되었다. 높은 표본 울을 가진 항공기의 다른 기록 자원들(FDR/CVR)을 활용하여 사고 진행 과정을 분석하였다.

55) South Bend, Indiana, USA

56) BTM(Brake Temperature Monitoring) system: 주 착륙장치의 제동장치 온도를 측정하여 조종실에 전달

57) TPI(Tire Pressure Indication) system: 타이어의 압력을 측정하여 조종실에 전달

58) 2802 Safran Drive, GRAND PRAIRIE, TX 75054 USA

59) Component Maintenance Manual 32-46-01

1.17 조직 및 관리정보

1.17.1 UPS사 운항승무원 훈련

1.17.1.1 Tire failure 및 Landing gear system 훈련

UPS는 미국 규정(14CFR Part 121 Appendix H)에 근거하여 당시 비행운영 훈련교법(FOTM)에 따라 전환훈련과정에서 타이어 결함(Tire failure)⁶⁰⁾에 대한 특별훈련을 하였다. 이 훈련은 고정식 모의비행장치(FBS)를 이용한 지상 학습훈련과 모의비행장치(FFS)를 이용한 실제훈련으로 되어 있다.

모의비행장치 훈련내용은 V1 도달 10kts 전에 Tire failure가 발생하여 계획된 대로 이륙을 지속하는 훈련이었다. 기장은 2007년, 부기장은 2009년 그리고 안전조종사는 2010년에 이 훈련을 이수하였다.

UPS는 자격관리프로그램(AQP)⁶¹⁾에 따라 2011년 자격유지(CQ)과정에서 타이어 결함에 대한 모의비행장치 훈련을 하였다. 이 훈련은 부기장이 조종역 할로 이륙하여 V1(135kts)을 지난 후 140kts에서 타이어가 파열(burst)되는 상황이 부여되었다. 사고 운항승무원들은 모두 이 훈련을 이수하였다.

항공기의 각각의 시스템에 대한 운항승무원 훈련은 3년 주기로 이루어진다. 착륙장치시스템(Landing gear system)에 대한 훈련은 2008, 2011, 2014년에 수행되었다.

1.17.1.2 이륙 중 항공기결함발생 훈련

UPS 조종사 훈련 가이드(PTG)에는 ‘V1 이후 이륙포기는 기장이 그 항공

60) 2015.10~2017.4.기간의 UPS의 Tire failure rate는 전기종 2.7/10,000편이고 MD11기종 0.51/10,000편 이었다. 이 데이터는 Tire 교환 정비작업이 수행되었던 건들을 분석하여 발췌하였다.

61) Advanced Qualification Program(AQP)은 운항승무원의 해당자격유지에 필요한 교육 및 훈련 등의 내용을 안내하는 UPS의 자격관리 프로그램이다. 기종별로 제작된 AQP교법(AQPM)에는 교육(Indoctrination), 초기 자격부여(Initial Qualification), 자격유지(Continuing Qualification)로 구분되어 있다.

기가 비행불가능이라고 판단하지 않는 한 추천되지 않는다'고 규정하고 있다.

UPS는 제작사를 포함하여 'Incapable of flight'에 대한 기준을 정하지 않고 있으며 'Incapable of flight' 여부에 대한 결정은 기장의 판단에 달려 있다. 그리고 UPS는 V1이후 이륙포기를 하는 훈련은 하지 않는다고 하였다.

UPS는 2016년 자격유지훈련(CQ)과정에서 V1+5kts에서 엔진에 외부물질(FOD)이 흡입되어 400ft AGL에서 엔진 진동, 700ft AGL에서 엔진실속/서지, 900ft AGL에서 엔진고착(engine seizure) 상황으로 모의비행장치 훈련을 하였다.

UPS는 2014, 2015년 자격유지훈련(CQ)과정에서 [표 13]의 내용으로 이륙중 항공기결함 발생에 대한 운항승무원 훈련을 하였다.

2015년 이벤트	고장/비정상	PF	V1	VR	V2	속도(kt)
6 Month SPOT	Engine Failure 1200'	Capt	145	162	169	179
6 Month SPOT	Engine Failure 500"	FO	145	162	169	179
LOS ⁶²⁾ 12-1	Engine failure V1+3	FO	134	154	165	137
LOS 12-2	RTO Engine Failure V1-11	Capt	166	183	190	145
LOS 12-2	Engine failure V1+5	Capt	166	183	190	171
MV ⁶³⁾ 12-3	Engine failure V1+9	Capt	143	156	162	152
MV-12-3	Engine Failure 200'	FO	143	156	162	172
12-3 SPOT	RTO Engine Failure V1-73	FO	143	156	162	70
12-3 SPOT	DU 5 Failure V1-13	FO	143	156	162	130
2014년 이벤트	고장/비정상	PF	V1	VR	V2	속도(kt)
6 Month SPOT	F/O AIR SPEED freeze	Capt	134	153	162	70
6 Month SPOT	Engine seizure 200' AGL	Capt	134	153	162	
LOS 12-1	Engine Fire 150' AGL	F/O	134	153	162	
LOS 12-1	GND Sensing SW-stuck	F/O	134	153	162	
MV 12-3	Engine seizure Vr-5	F/O	134	153	162	148
MV-12-3	Engine seizure 250' AGL	Capt	134	153	162	
12-3 SPOT	RTO-Eng Slow Acceleration	Capt	134	153	162	

[표 13] 2014, 2015년 UPS사의 운항승무원 훈련 내용(V1이후 결함발생)

1.17.1.3 비상탈출훈련

UPS는 2015년과 2016년 운항승무원 자격유지훈련과정에서 화물실화재로 가까운 공항에 착륙하여 비상탈출을 하는 훈련을 하였다.

1.17.2 UPS사 조종사훈련가이드(Pilot Training Guide)

UPS사 조종사훈련가이드(PTG)에는 타이어결함, 이륙포기, 비상탈출 관련하여 다음의 내용이 수록되었다.

1.17.2.1 이륙포기절차

가. 이륙포기

- 비행운영교범(FOM) 02.07.01.01항에는 이륙포기에 관하여 다음과 같이 규정하고 있다.

이륙포기 결정은 기장이 한다. 항공기 속도가 V1에 접근함에 따라 의사결정은 이륙을 계속하는 쪽으로 전환되어야 한다.

항공기 속도가 V1에 가까워짐에 따라 이륙포기 시 활주로 상에 항공기를 정지시킬 수 있는 마진이 감소하게 되고, V1 이후에는 항공기를 활주로에 정지하는 것이 가능하지 않을 수 있다. 그러므로 이륙포기 기동이 V1 보다 늦지 않게 시작될 수 있도록 이륙포기 결정은 V1 이전에 이루어져야 한다.

V1이 지난 후 이륙포기는 기장이 항공기가 비행불가능이라고 판단하지 않는 한 추천되지 않는다. 비록 V1 이후 충분한 활주로가 남아있더라도 그

62) UPS MD-11 AQPM에 항공기 비행훈련 분야는 기동훈련(SIM)과 비행운영모의훈련(LOS)으로 구분된다.

63) UPS MD-11 AQPM에 자격부여 분야는 지식확인(KV), 절차확인(PV), 기동능력확인(MV), 비행운영평가(LOE) 그리고 비행평가(LC)로 구분된다.

브레이크들이 항공기를 활주로 종단이전에 정지시킬 수 있는 능력을 갖고 있다는 보장이 없다.

2. MD11 항공기운영교범(AOM) 02.01.01.02항에는 이륙포기에 관하여 다음과 같이 규정하고 있다.

이륙포기에 대한 결심은 전적으로 기장에게 있다. 기장은 V1까지 정지조치가 시작되도록 이륙포기 결정을 해야 한다.

기장이 이륙포기를 결정하였다면, 기장은 “포기(Reject)”라고 분명하게 알리고 기장이 비행감시임무를 수행하고 있는 경우에는 기장은 즉시 항공기의 조종을 이양받아 즉시 이륙포기 조작을 시작한다. 부기장이 이륙을 하고 있었다면 부기장은 ”포기(Reject)”호창 즉시 항공기 조종을 기장에게 이양해야 한다.

속도 80 kts 이전에는 다음에 경우 이륙이 포기되어야 한다.

- 엔진 고장 혹은 화재
- 주 주의등(master caution light) 혹은 경고등(warning light)의 점등
- 불안전한 외형 경고(unsafe configuration warning)
- 시스템 고장
- 일상적이지 않은 소음이나 진동
- 타이어 결함
- 비정상적인 증속 저하
- 항공기가 불안전하거나 비행이 불가능한 경우
- 윈드шу어(windshear)

항공기 속도가 80 kts를 지난 경우 엔진의 고장이나 화재 또는 항공기가 불안전하거나 비행이 불가능한 경우에만 이륙을 포기해야 한다. 이륙 중에 결함을 인지한 운항승무원은 비행안전에 부정적으로 영향을 주는 상황에 대하여 명확하고 정밀하게 즉시 호창하여야 한다(예, “엔진정지” 또는 “엔진화재” 등).

기장	부기장
동시에 스로틀을 완속으로 줄이고(필요시 자동추력장치 해제) 최대 수동 브레이크를 사용하라. 만약 자동 지상 스포일러가 전개되지 않으면 속도감속기를 전개하라. 역추력장치 레버를 들어올리고 상황에 맞게 최대 역추력장치를 사용하라. 브레이크, 지상 스포일러, 역추력장치를 안전한 정지가 확실할 때 까지 유지하라.	지상스포일러와 역추력장치가 전개되었음을 확인하고, 엔진 계기들을 감시하라. “스포일러 전개되었음” 또는 “스포일러 전개되지 않았음”을 호창하라. 조종간에 가벼운 전방압력을 주어라. 모든 필요한 조치들이 수행되었는지를 확인하고, 빠뜨림 또는 결함들을 호창하라.
활주로 길이가 허용되면 60kts에 역추력장치레버가 완속 위치에 도달하도록 역추력장치레버들을 움직이기 시작하라.	“80kts” 그리고 “60kts”를 호창하라. 시간이 허용하면, 항공교통관제에 항공기의 위치, 활주로 그리고 필요한 지원사항을 알려라.
항공기가 정지하였을 때, 적용하여야 하는 비상/비정상 절차들을 수행하라. 가능하면 활주로를 개방하고 그리고 착륙 후 절차를 수행하기 전에 정상우선순위를 따르라. 다른 이륙이 계획되었다면, 브레이크 냉각시간과 예방을 위하여 5장의 이륙브레이크 온도 차트를 검토하라	

[표 14] 운항승무원 이륙포기절차

주의: 이륙포기 중 “최대 수동 Anti-skid braking” 을 위한 적절한 브레이크 기술은 항공기가 완전히 정지하거나 안전정지가 확실할 때까지 최대 브레이크 페달 압력을 가하고 최대 브레이크 압력을 유지하는 것이다.

주의: 역추력장치를 사용하는 동안 방향조정에 문제가 발생하면 추력을 역추력 완속(필요하다면 전방완속추력)까지 줄이고, 방향조정을 확보하고 필요에 따라 역추력을 재 사용하라.

다음을 고려하라:

- 활주로 개방의 필요성
- wheel fuse plugs가 녹을 가능성
- remote parking의 필요성
- 화재 장비의 요청
- wheel chocks사용하고 parking brake 해제
- 지상요원에게 브레이크 과열 조언

- 기타 승무원에게 착석유지 또는 항공기 이탈 조언

나. V1근처 GO/STOP 결심

1. MD11 조종사훈련지침(PTG) 03.01.02.01항에는 이륙포기결심에 관하여 다음과 같이 규정하고 있다.

기장은 이륙포기결심에 대한 단독의 책임이 있다. 이륙포기기동은 V1보다 늦지 않게 시작되어야 한다.

80kts 이전에는 이륙외장경고 또는 기장이 비정상이라고 여기거나 항공기의 안전조건에 불확실을 야기하는 기타상황에서 이륙은 포기되어야 한다. 80kts 이전의 속도에서 이륙포기는 위험도가 낮으며 비정상이거나 불확실한 항공기 상황으로 이륙을 지속하는 것보다 선호된다.

경고: 이륙포기과정에서 “maximum manual anti-skin braking”을 위한 적절한 브레이크 기술은 최대 브레이크 페달 압력을 가하고 항공기가 완전히 정지할 때까지 이를 유지하는 것이다.

주의: 80kts에서 V1-20kts까지 다음의 ALERTS 들만 주경고등을 시현할 것이다. 주경고등은 V1-20kts 이후 시현되지 않는다.

- 승무원 휴식실 연기(장착시)
- 엔진배기ガ스 온도 높음
- 엔진오일압력 낮음
- 엔진회전수 높음
- 탱크펌프압력 낮음
- 화장실 연기
- 역추력장치 압력 결함(GE 경우)
- 타이어 결함
- 타이어압력 저하(100kts 이후 작동안함)
- 타이어압력 차이(100kts 이후 작동안함)

80kts 이후에는 다음의 경우 이륙은 포기되어야 한다.

- 기장이 항공기가 불안전하거나 비행이 불가능하다고 여길 때
- 화재 또는 화재경고
- 주경고등 시현
- 엔진 고장

V1이후 이륙포기는 기장이 그 항공기가 비행이 불가능한 상태에 있다고 판단하지 않는 한 추천되지 않는다.

1.17.2.2 Tire fail 절차

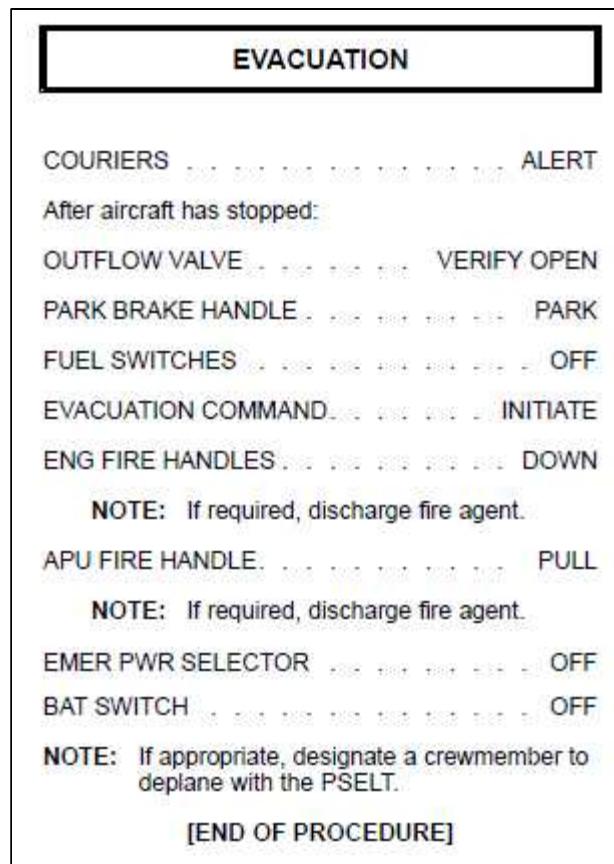
MD11 항공기운영교범(AOM) 02.11.01.04항에는 타이어결함 발생시 다음과 같은 절차를 규정하고 있다.

- 상황에 따라 이륙포기하거나 이륙을 지속하라

주의: 항공기 속도가 V1 -20 kts를 초과한 경우에는 이륙을 지속하는 것을 고려하라. 타이어 고장으로 인하여 정지성능이 감소된다.

1.17.2.3 비상탈출 (Evacuation)

MD11 QRH에 명시된 비상탈출 절차는 [그림 22]와 같다.



[그림 22] 비상탈출 절차(UPS MD11 QRH)

1.17.3 인천공항공사 활주로 점검

인천공항공사 이동지역안전관리소의 이동지역점검기록부에 의하면 인천공항공사는 기동지역을 일일 4회의 활주로 점검과 2회의 유도로 및 계류장 점검을 실시하고 있었다.

인천공항공사 이동지역안전관리소는 사고 당일 00:30경과 06:00경에 활주로, 유도로 및 계류장을 점검하였고, 점검 결과는 만족이었다. 그리고 13:30경 활주로 33L에 대한 점검을 실시하였으며, 결과는 만족이었다.

1.18 기타 사항

1.18.1 운항승무원 진술

1.18.1.1 기장

N277의 기장의 주요 진술 내용은 다음과 같다. 나는 조종감시역 할이었고 항공기가 무거워서 만만치 않은 이륙이라는 것을 알고 있었다. 이륙 전 점검 표를 수행하여 이륙준비가 완료된 것을 확인하고 항공기를 활주로 33L에 정대하였다.

나는 공기압력비(EPR) 1.61의 이륙출력을 설정하여 이륙활주를 시작하였고 항공기는 80kts 속도에 정상적으로 도달되었다. 나는 항공기 속도가 V1에 근접할 때 “V”라고 호창하고 난 후 V1에서 “1”이라고 호창했다. 나는 추력조절레버에서 손을 떼고 부기장이 항공기를 조종하는 것을 감시하였다.

다음의 이벤트들은 약 2~3초의 확장된 시간 속에서 일어났다. 항공기의 좌측 편향과 ‘타이어 결함’ 음성 경고가 들렸다. 그리고 나서 쿵 소리를 들었는데, 아마도 타이어에서 고무가 떨어져나가는 소리였을 것이다. 그 후 동시에 금속이 단단한 표면/무언가에 끌리거나 또는 금속이 금속에 갈리는 소리를 들었다. 그리고 누군가 제동 낙하산(drag chute)을 편 것 같은 ‘가속의 감소(lessening of acceleration)’를 느꼈고 그것은 항공기를 뒤로 잡아당기기 시작하는 것 같았다. 항공기가 이륙하기에는 위험하고 비행할 능력이 없었다고 결정하였다.

나는 “내가 조종합니다” 와 “이륙 포기(reject or abort)”라는 말을 한 것 같다. 나는 항공기 조종을 인수하여 즉시 제동장치를 수동으로 최대로 밟으며 이륙포기절차를 수행하였다.

나의 기억에 따르면, 격렬함의 정도가 순식간에 증가했다고 느꼈다. 모든 것이 전형적인 타이어 결함 시나리오를 따랐고, 그 후 모든 것이 다르게 전개되었다. 나의 경험과 모의비행장치 훈련에 따르면, 타이어 결함은 기체의

편향(veer)을 야기하곤 했다. 나의 허를 찌른 것은 금속과 금속이 마찰되는 소리였는데 이것은 정상이 아니었다. 무언가 잘못되었는데, 가속의 소강상태(lull in the acceleration)가 발생했기 때문이었다. 비행기가 정상적으로 가속되지 않고 있었다. 나는 당시 소위 코핀 코너(coffin corner⁶⁴⁾)로 들어가고 있었고, 그냥 비행기가 뜨지 않을 것이라는 느낌이 들었다.

덧붙이자면, 기장이 항공기가 비행하기에 위험하다고 결정한다면 이륙 포기는 절차에 따른 정상적인 것이다. 또한 그 당시 그것이 나의 결정이었고 그 결정을 나는 내려야만 했다.

기장은 위원회의 질문에 대하여 다음과 같이 진술하였다.

“이륙단념과 이륙지속에 대하여 결정을 내릴 때, 어떠한 요소들을 고려했는가?”라는 질문에 기장은 “당시의 비상상황과 항공기의 반응(최초의 쿵소리, 좌편향, 타이어 결함 경고, 글레이실드에서 본 적색등, 항공기의 빠른 ‘쿵’ 소리, 항공기의 진동, 금속이 금속이나 단단한 표면에 갈리는 소리, 예기치 않은 비정상적인 가속)을 평가하여, 승무원과 항공기를 살릴 수 있는 최적의 가능성을 기반으로 결정을 내렸다”고 하였다.

“활주로 내에서 정지하지 못할 수도 있다고 인식한 상태에서 이륙포기 결정을 내렸는가?”라는 질문에 기장은 “그렇다”라고 하였다.

64) 고정익 항공기는 고고도에 도달하면 실속속도와 임계마하수에 근접하게 된다. 이 임계마하수와 실속한계선이 교차하는 지점의 부근에서 이루게 되는 삼각형 모양의 영역을 “coffin corner”라 한다. 이 영역에서는 허용된 최대속도(임계마하수)와 최소속도(실속속도)간의 간격이 좁아져 항공기를 안전하게 운영하기가 어려워진다. 기장은 고고도에서와 같이 이러지도 저러지도 못 하는 상황에 처하였다는 의미로 “코핀 코너”를 사용한 것으로 추정된다. 기장은 “최대이륙중량(maximum gross weight)으로 V1에서 Vr 사이에서 이륙포기를 한다면 필시 남아있는 활주로 위에서 정지할 수 없을 가능성이 높다. 그러나 로테이션(rotation)속도 미만이라면 안전하게 이륙할 수 없을 수 있다.”고 진술하였다.

1.18.1.2 부기장

N277의 부기장의 주요 진술 내용은 다음과 같다. 나는 조종담당조종사(PF)로써 이륙 활주를 시작했고 V1까지 별다른 일이 없었다. 나는 이륙 활주 중 승강타를 중립이나 약간 아래로 유지했을 것이다. 후방은 아니었다. 나는 이륙 시에 플렉스 30도를 사용했다고 생각했는데, 이는 출력이 거의 최대였고 플랩은 10도였다. 이륙 활주 당시 최초의 문제 조짐은 타이어결함 경고였다.

V1에서 조종감시조종사(PM)가 V1이라고 호칭한 직후 타이어 결함경고가 나왔으며 항공기는 흔들리면서 경미한 진동과 함께 방향이 좌측으로 편향되었다. 기장은 이륙포기를 호칭하여 항공기 조종을 이양 받고 이륙포기절차를 시작 하였다. 나의 기억에 따르면 ‘V1’ 호출, 그 직후에 타이어 결함 음성 경고, 약간의 좌측 편향, 기장의 RTO 절차 개시의 순서였다.

결함발생과정에서 가속의 소강상태(lull in the acceleration)를 인지하지는 못 하였고 또한 비행조종장치(flight controls)에서 특이한 사항은 느끼지 못하였다.

나는 항공기가 정지로(stopway)⁶⁵⁾ 구역으로 진입할 것이 분명해지자 기장과 함께 제동장치를 밟았다. 기장은 “maximum braking” (최대 제동)이라고 말하였고 나도 기장을 도와 브레이크를 사용하라는 지시로 알아들었다. 역추력장치는 최대로 사용되었다.

항공기는 정지로 내에 정지할 만큼 감속되지 않았고 기장이 정면에 다가오는 진입등을 피하기 위해 항공기를 좌측으로 틀었다. 항공기는 포장면을 지난 후에 매우 격렬하게 흔들렸다.

부기장은 위원회의 질문에 대하여 다음과 같이 진술하였다. “기장이 RTO를 시작했을 때, 당신은 그의 결정에 동의했는가?”라는 질문에 “RTO를 할 유

65) 이륙을 실패한 경우에 항공기에 대한 구조적인 충격을 야기하지 않고 항공기를 정지시키고 지지하기 위한 목적으로 활주로 종단 이후에 준비된 장방형 지역

일한 결정권자는 기장이다. 당시 RTO 절차 수행 시, 기장의 결정에 동의 또는 반대하거나 토론할 기회가 없었다. 기억해보니 “V1이 지났다”고 언급했을 수도 있었다고 생각한다.”고 하였다.

“V1 전후의 RTO와 관련하여 어떤 훈련을 받았는가?”라는 질문에 “V1 이후의 RTO 시나리오나 그 결과에 관해서는 최소한의 학습 토론만 있었다”고 하였다.

1.18.1.3 안전조종사

N277의 안전조종사의 주요 진술 내용은 다음과 같다. 이륙 시 기상 등 모든 것이 양호하였고, 항공기는 이륙 추력이 1.61 EPR(Engine Pressure Ratio)로 설정되어 정상적으로 가속되었다.

V1 콜이 이뤄졌고, 기장은 스티어링휠에서 손을 뗐다. 항공기는 왼쪽으로 움직였다가 오른쪽으로 격렬하게 움직였고 타이어결함 음성경고⁶⁶⁾가 발생하였다. 스티어링휠 사이로 패널(system display)에 적색 경고등을 보았으나 강한 좌편향이 있었기 때문에 읽을 수 없었으며, 그것이 타이어 결함 메시지일 것이라고 생각했다. 나는 항공기에 닻이 달린 것처럼 감속되는 것을 느꼈다. 이는 이상한 느낌이었고 모든 것이 순식간에 일어났다.

기장은 항공기 추력을 최소로 줄였고 제동장치를 최대로 작동하였다. 기장은 “I have the aircraft and I’m rejecting” (내가 조종할게요. 그리고 이륙 포기합니다)라는 식의 말을 했고 스티어링휠을 완속(idle)으로 이동시켰다. 당시 이것이 표준이륙포기 절차였다. 기장은 모든 것을 이행했다. 나는 속도를 보고 확인했어야 했지만 너무 흔들려서 읽을 수가 없었다. 눈앞이 그저 흐릿했다. 지상항력장치는 완전히 전개되었고 너무 소음이 심해 역추력장치의 소리를 들을 수 없었다.

66) 안전조종사는 “SD(synoptic display)에 적색 메시지가 표시되었으나 좌석이 튀어 올라 계기를 읽을 수가 없었다.”고 진술하였다.

V1에서 이륙포기까지의 상황 발생은 V1 → 쿵(noise) → 좌측 편향(veer) → 항공기 소음증가 → 타이어결함경고 → “이상한” 감속 느낌 → 이륙포기 순 이었다. “쿵” 소리와 기체 편향은 거의 동시에 발생했다.

활주로 이탈 후 기장은 연료를 차단하고 항공기에서 대피하라고 요구했다. 나는 비상탈출 점검표(evacuation checklist)를 보려고 신속참고철(QRH)을 찾았으나, 어디에서도 찾을 수 없었다. 고정되어있지 않은 모든 것들이 달아나고 없었다.

안전조종사는 위원회의 질문에 대하여 다음과 같이 진술하였다.

“사고전 비행기가 ‘비행 불가능(incapable of flight)’이라는 결정을 내리는 것과 관련해 어떠한 훈련을 받았는가?”라는 질문에 안전조종사는 “훈련 중 이 개념을 개괄적으로 논의했다. 우리는 항공기의 비행성능에 영향을 미칠 수 있는 상황에 대해 논의했다.”고 하였다.

“기장이 이륙포기(RTO)를 시작할 때 당신은 그의 결정에 동의했는가?”라는 질문에 “나는 항공기가 비행하기에는 위험해 보였기 때문에, 기장의 이륙포기(RTO) 결정에 전적으로 동의했다”고 하였다.

2. 분석

2.1 일반

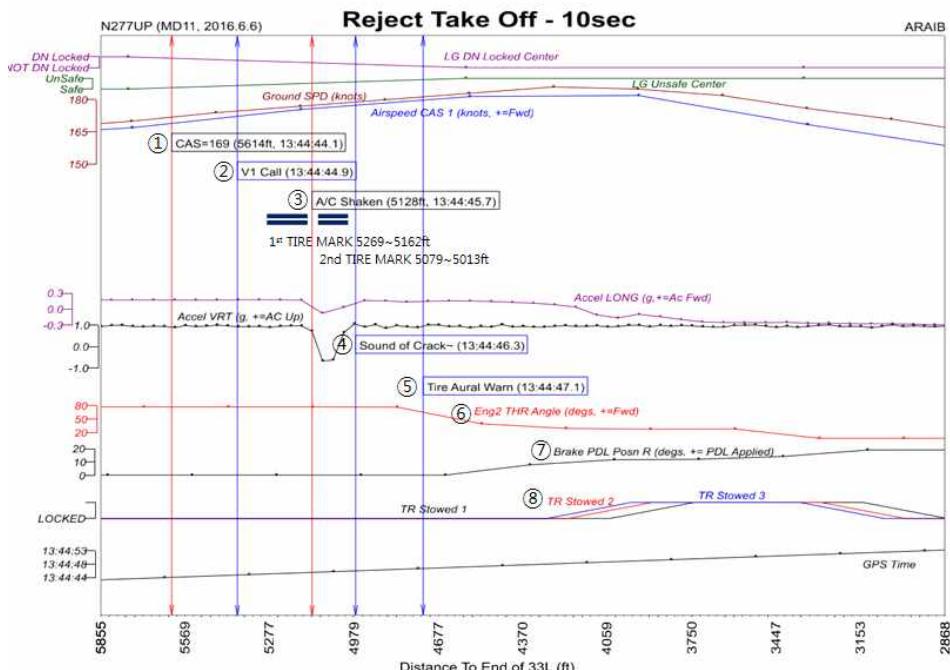
위원회는 발생한 항공기결함과 운항승무원 이륙포기 조치 그리고 기장의 이륙포기결심 등에 대하여 분석을 하였다.

2.2 중앙착륙장치 타이어 파열로 시작

2.2.1 최초 타이어 마찰 흔적, 그 후 가속도 급변 발생

N277의 V1부터 이륙포기결정까지 주요 사실정보(FDR, CVR, 타이어흔적 등)의 발생순서는 [그림 23]과 같으며 다음과 같이 요약된다.

이륙결심속도(V1) → 중앙착륙장치 9번, 10번 타이어 최초 마찰흔적 → 가속도 급변 → 9번, 10번 타이어 이차 마찰흔적 → 파열음(Sound of Crack) → 타이어결함 음성 경고(Tire Aural Warning) → 이륙포기



[그림 23] 주요사실정보 순서

2.2.2 중앙착륙장치의 드래그브레이스 파열로 가속도 급변

FDR에는 V1이 지난 시점에 항공기 3축 방향으로 가속도 급변이 기록되었다. 이 가속도 변화는 항공기가 수직으로는 하강을, 좌우로는 좌로 편향을, 전후방으로는 후진을 의미한다. 이 가속도의 변화들은 운항승무원들이 진술한 이벤트발생 초기의 ‘항공기 진동’, ‘좌편향’ 그리고 ‘가속의 감소’와 일치한다.

가속도 급변은 중앙착륙장치의 드래그브레이스가 손상될 때 발생한 것으로 분석되었다.

이 가속도 급변은 활주로상의 중앙착륙장치의 타이어 플랫의 최초 흔적과 이차흔적의 사이의 부근에서 발생되었다. 즉 중앙착륙장치의 타이어 플랫이 중앙착륙장치 드래그브레이스 손상보다 먼저 발생하였다.

중앙착륙장치의 타이어가 심하게 파열되는 과정에서 발생된 부하로 중앙착륙장치 드래그브레이스가 손상된 것으로 추정되었다. 이렇게 추정한 논리는 다음(2.2.3)과 같다.

2.2.3 타이어 다중 파열로 중앙착륙장치 드래그브레이스 손상

중앙착륙장치 드래그브레이스가 손상되려면 드래그브레이스에 부하 혹은 대항하는 힘이 작용하여야 한다. 중앙착륙장치 드래그브레이스의 잔해정밀조사결과 과부하에 의한 연성파괴로 손상되었고, 재질성분에 이상이나 피로흔적이 발견되지 않았다. 이륙활주 중 중앙착륙장치 드래그브레이스에 유일한 과부하 요인⁶⁷⁾은 타이어 파열이다.

67) N277는 이륙포기단계에서 브레이크를 사용하기 전에 이미 중앙착륙장치 “불안전”과 “내림 고정 안됨”이 기록되었다. 보잉사에 의하면 중앙착륙장치 드래그브레이스 결함이 발생한 사례는 9건이 있었다. 이 중앙착륙장치 드래그브레이스 결함은 모두 착륙 중 발생하였고 이륙 중에는 발생하지 않았다.

활주로 상의 4개의 타이어 소용돌이 흔적(swirl markings)을 분석한 결과 중앙착륙장치는 약 14Hz⁶⁸⁾로 진동하였다. 규정에 따라 정비된 완충 스트러트(shock strut)를 장착했을 때, 중앙착륙장치의 고유 진동수는 약 12Hz이고, 이 수치는 스트러트 타격(strut stroke)에 영향을 주는 중앙착륙장치 하중에 따라 달라질 수 있다. 축의 타이어 결함과 같은 부하 요인(forcing function)은 중앙착륙장치의 진동을 야기하여 앞뒤 방향으로 진폭의 차이를 만듦으로써 드래그브레이스 결함⁶⁹⁾을 야기할 수 있다.

[그림 25]에서 손상된 타이어에 의한 활주로 상의 4번의 회전 자국(swirl markings)은 손상된 타이어에 의한 항력이 4차례 발생했었다는 것을 시사한다. 중앙착륙장치 드래그브레이스 결함이 먼저 발생했다면, 중앙착륙장치 strut가 뒤로 가며 수직 자세가 될 때 활주로 상에 단 한 개의 타이어 자국 만이 생겼을 것이다. N277의 경우 곧고 일직선형태의 타이어 잔해흔적은 2차 흔적에서 발견되었다.

중앙착륙장치 드래그브레이스 결함 발생 후 최대 중앙착륙장치 strut 축방향 하중(axial load)은 중앙착륙장치 strut가 수직일 때 약 160,000 lbs이다. 즉 중앙착륙장치 타이어 하나당 약 80,000 lbs의 하중이 걸리게 된다. 중앙착륙장치 타이어의 과부하 용량 시험결과는 108,300 lbs이다. 따라서 중앙착륙장치 드래그브레이스 결함 후 중앙착륙장치의 후방 이동으로 인한 수직 하중이 타이어에 결함을 야기하기는 어렵다.

2.3 사고 진행과정

FDR, CVR, 타이어 흔적에 근거하여 N277의 이륙활주 시작부터 활주로 이탈 후 정지까지 발생한 주요 이벤트에 대하여 발생시각, 속도, 활주로 종단 까지 잔여거리를 [표 15]와 같이 요약하였다.

68) 4개의 마찰 자국의 길이는 약 90ft, 이 시점의 항공기 속도는 약 185kts(312 ft/초)였다. 따라서 사고기는 약 0.3초에 90ft를 이동하였고, 중앙착륙장치는 약 14Hz로 진동하였다.

69) 약 1375 RPM으로 회전하고 중앙착륙장치 고유 진동수로 진동하는 결함이 발생한 타이어들이 중앙착륙장치 드래그브레이스의 고장에 요구되는 부하 요인(forcing function)을 발생시켰다.

시각 (UTC)	속도 (kts)	RW33L 말단까지 거리(ft)	이벤트	의미(추정)
UPS61 N277UP	V1 169 VR 184 V2 191		TOW 629,000 LBS, FUEL 189,400 LBS, FLAP10, FLEX30, OAT+19, PACKS OFF	
13:43:57.0	0	12027	Starting the Take off roll	
13:44:19.8	81	10677	80 kts	
13:44:38.0	149	7261	V1-20 kts	
13:44:44.1	169	5614	Reaching at V1 speed	① V1
13:44:44.9	172	5377	"V1" call (Start)	
		5269~ 5162	First Tire marking	② CLG #9 Tire failure
13:44:45.4	175	5230	"V1" call (End)	
13:44:45.6	175	5171		③ CLG #10 Tire failure
13:44:45.7	176	5128	Acceleration Spike occur(VERT G: 0.0725->-0.664, LONG G: 0.17->-0.075, LAT G: 0.033-> -0.305)	④ CLG Drag brace fracture
		5079~ 5013	Second Tire marking	⑤ CLG moves after
13:44:46.3	178	4961	Sound of Crack [sound of loud two non normal sound, 0.55sec long]	⑥ CLG contact AFT Fuselage
13:44:47.1	180	4732	Tire failure aural warning [tire failure warning overlapped, 2nd warning began 0.6 sec later]	⑦ Tire failure aural warning
13:44:47.4	181 (182GS)	4635	Throttle angle begin to decrease	⑧ First action of Rejected TO
13:44:47.9	182	4475	Sound of triple separated unintelligible voice 1.4sec long	Rejected TO announce and control transfer
13:44:48.0	182	4444	•Center LG unsafe, LG center NOT DN Locked •ENG2 THR at IDLE	⑨ Indication of CLG NOT DN Locked and Unsafe
13:44:48.3	182 (185GS)	4351	•Both brake pedals begin to be applied. •Brake press sys 1R abnormal (0~400psi) for 18sec then 0 psi	⑩ Brake press sys 1R abnormal ⑪ Brake pedal apply
13:44:50.0	179	3824	•SPOILER begin to operate •THRUST REVERSER-UNLOCKED •Brake PRESS Sys 2L increase rapidly(18->2,150psi) •Master caution on	⑫ SPOILER begin to operate ⑬ THRUST REVERSER-UNLOCKED

시각 (UTC)	속도 (kts)	RW33L 말단까지 거리(ft)	이벤트	의미(추정)
13:44:52.0	166	3223	•NOSE Gear Compressed LR_IN FLT(3 SEC) •HYD PRESS1-LOW for 1sec •HYD 1 QTY begin to decrease	⑯ HYD 1 QTY begin to decrease
13:44:54.0	154	2658	THRUST REVERSER-1/2/3 deployed	
13:45:02.0	99	803	•Available brake pressure 1 starts declining. •Hydraulic system 1 pressure starts declining.	
13:45:03.0	96		Hyd QTY 1-0 (continue)	Hyd QTY 1-0
13:45:04.0	89	438	Hyd Pressure LOW 1 (continue)	
13:45:06.4	81		Landing gear aural warning sound	
13:45:07.0	79 (90GS)	0	Excursion RWY33L END	⑯ Excursion of RWY33L END
13:45:15.7	49 (48GS)	-1031	Collision with Localizer ANT	⑯ Collision with Localizer ANT
13:45:16.0	47GS		NOSE Gear Compressed LR_IN FLT(2 SEC)	
13:45:18.0	31	-1176	LG Nose-Unsafe	⑯ LG Nose-Unsafe
13:45:20.1	29GS		Captain order Engine shut down	
13:45:23.2	19GS		Captain order emergency ground egress procedure	
13:45:26.0	9GS		FUEL SWs OFF	⑯ FUEL SWs OFF
13:45:28.0	0	-1467	Aircraft STOP	⑯ GS 0

[표 15] 주요 이벤트 요약

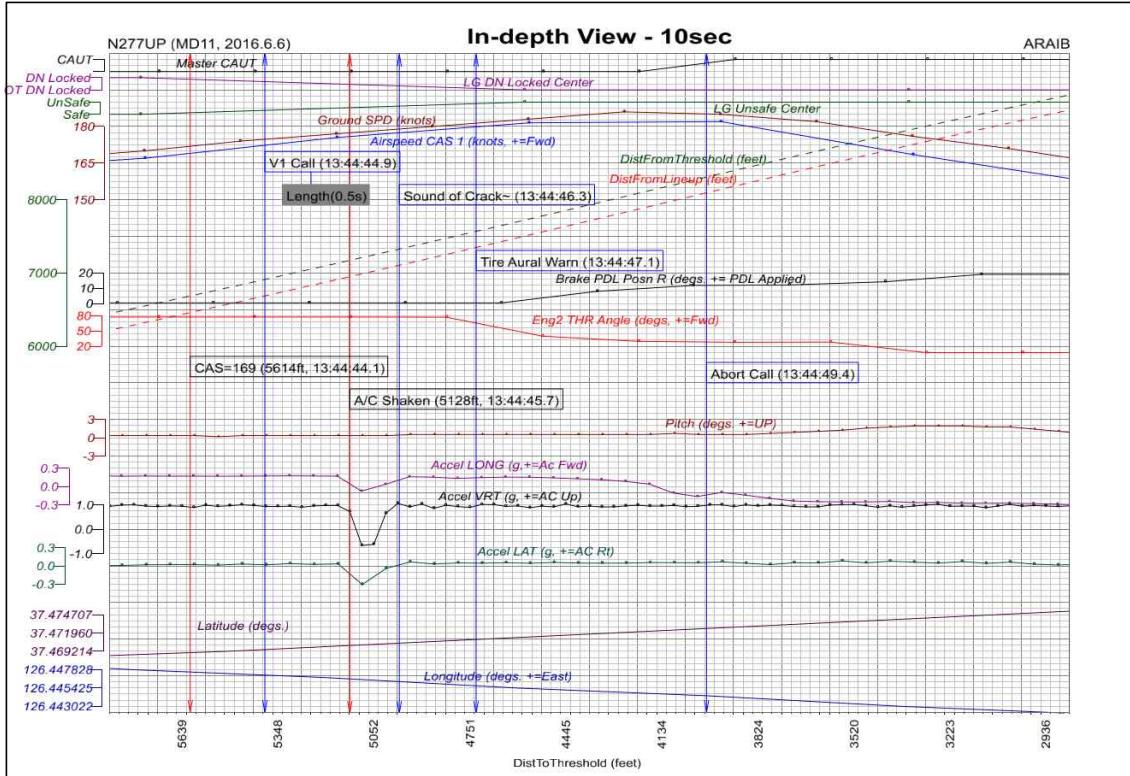
2.3.1 V1 까지 항공기 정상 운항

N277은 활주로33L 시단으로부터 276ft지점에 정대하여 13:43:57경 이륙⁷⁰⁾ 활주를 시작하였다. N277은 13:44:19.8경 “80 kts”를 거쳐 13:44:38경 149kts(V1-20kts)⁷¹⁾에 도달하였고 이때 활주로33L의 종단까지 잔여거리는 7,261ft였다.

70) N277이륙관련 제원: 이륙중량 629,500 lbs, FLAP 10, 외부온도 19C, 건조 활주로, FLEX 30/EPR1.61/PACKS OFF, 이륙중량 무게중심 19.5 % MAC, V1 169 kts, 이륙전환속도(VR) 184 kts: 지상 활주자세에서 상승자세로 자세변화가 시작되는 속도, 최소이륙안전속도(V2) 191 kts, V1까지 가속거리 6,528ft, V1에서 정지거리 5,385ft, 가속정지거리 11,913ft *인천공항 활주로33L의 시단부터 종단까지 길이는 12,303ft(3,750m)이다.

71) UPS MD11 항공기운영교범 02.11.8(비상절차: 타이어 고장)에는 이륙 중 타이어 고장 시에 주의사항으로 항공기 속도가 V1-20 kts를 초과한 경우에는 이륙을 지속하는 것을 고려하라. 타이어 고장으로 인하여 정지성능이 감소된다고 명시되어 있다.

[그림 24]는 N277의 V1부터 초기 이륙포기조치까지 주요 이벤트들의 발생 시점과 활주로33L의 종단까지의 잔여거리를 나타낸 것이다.

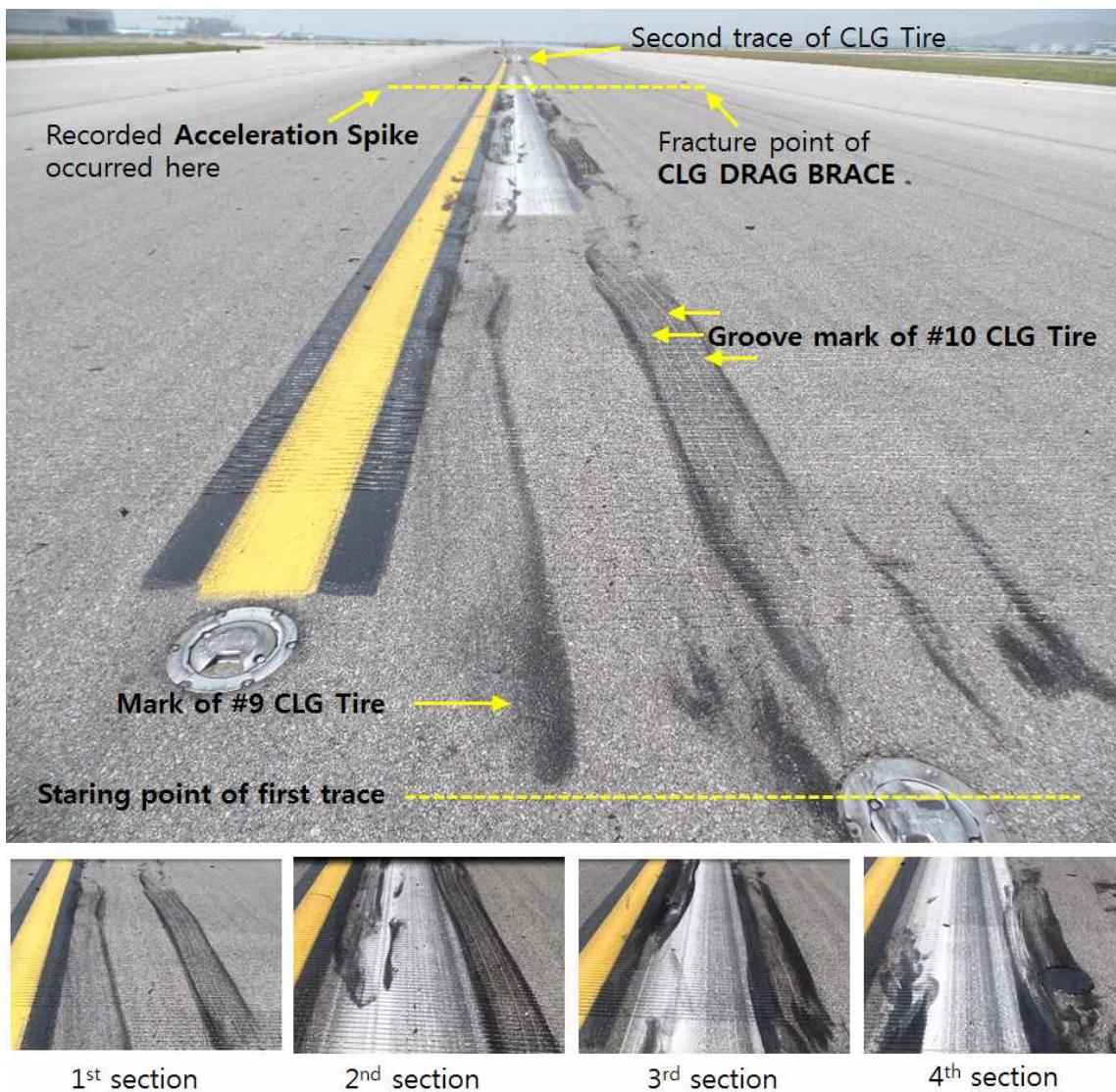


[그림 24] 초기 주요 이벤트시점과 활주로잔여거리

N277은 FDR에 의하면 13:44:44.1경 ‘V1 ‘(169kts)에 도달하였고 이 지점까지 활주한 거리는 약 6,413ft이었으며, 이 지점에서 활주로33L의 종단까지 잔여거리는 약 5,614ft였다. N277은 이론상 V1까지 가속거리가 6,528ft였고 실제 약 6,413ft가 소요되었으므로 V1까지 이륙성능은 정상이었다.

FDR 자료에서 V1까지 Landing gear, 브레이크, 유압 시스템 등에 이상 징후는 발견되지 않았다. Tire와 관련된 정보(tire pressure, tire temperature)는 FDR 수집항목이 아니어서 확인할 수 없었다.

2.3.2 최초 9번 타이어 파열, 약 0.6초 후 10번 타이어 파열



[그림 25] 중앙착륙장치 타이어 최초 마찰 흔적

[그림 25]에서 중앙착륙장치 타이어의 최초 마찰 흔적은 우측 10번 타이어의 마찰흔적을 기준하여 항공기 진행방향으로 4구간으로 구분된다.

1구간에서 좌측 9번 중앙타이어의 바퀴 홈 자국(groove mark)은 보이지 않는다. 반면 우측 10번 중앙타이어의 바퀴 홈 자국은 선명하며 끝부분에서 좌측으로 휘어지다 우측으로 되돌아가는 형태를 나타낸다.

2구간에서 좌측 9번 타이어의 흔적은 불규칙하여 타이어의 손상이 이미 심함을 나타낸다. 우측 10번 타이어의 흔적은 첫 번째 구간과 유사한 패턴이다.

일차흔적에서 9번 타이어의 바퀴 흠 자국이 거의 보이지 않고 흔적이 불규칙한 점, 일차흔적에서 10번 타이어의 바퀴 흠 자국이 좌측으로 구부러지는 좌편향현상이 반복되고 또한 운항승무원이 초기 항공기 좌편향현상이 있었음을 진술한 점으로 보아 일차흔적 직전에 9번 타이어는 어떠한 이유에서 이미 급격한 파손이 이루어졌던 것으로 추정된다.

3구간에서 좌측 9번과 우측 10번 타이어의 흔적은 농도가 진하여 활주로와 마찰이 심하였음을 나타내었다. 세 번째 구간에서 10번 타이어가 플랫 되었을 것으로 추정된다.

CVR의 타이어 fail 음성경고는 시작되고 0.6초 후 2번째 음성경고가 시작되어 Overlap되었다. 이는 중앙착륙장치의 9번과 10번 타이어가 0.6초 간격으로 플랫 되었음을 의미한다.

4구간의 흔적에서 10번 타이어의 바퀴 흠 자국이 점진적으로 우측으로 약 30도까지 휘어짐을 보이는데 이는 중앙착륙장치의 드래그브레이스가 이 구간에서 손상되었음을 의미한다.

2.3.3 중앙착륙장치 드래그브레이스 파손 진행

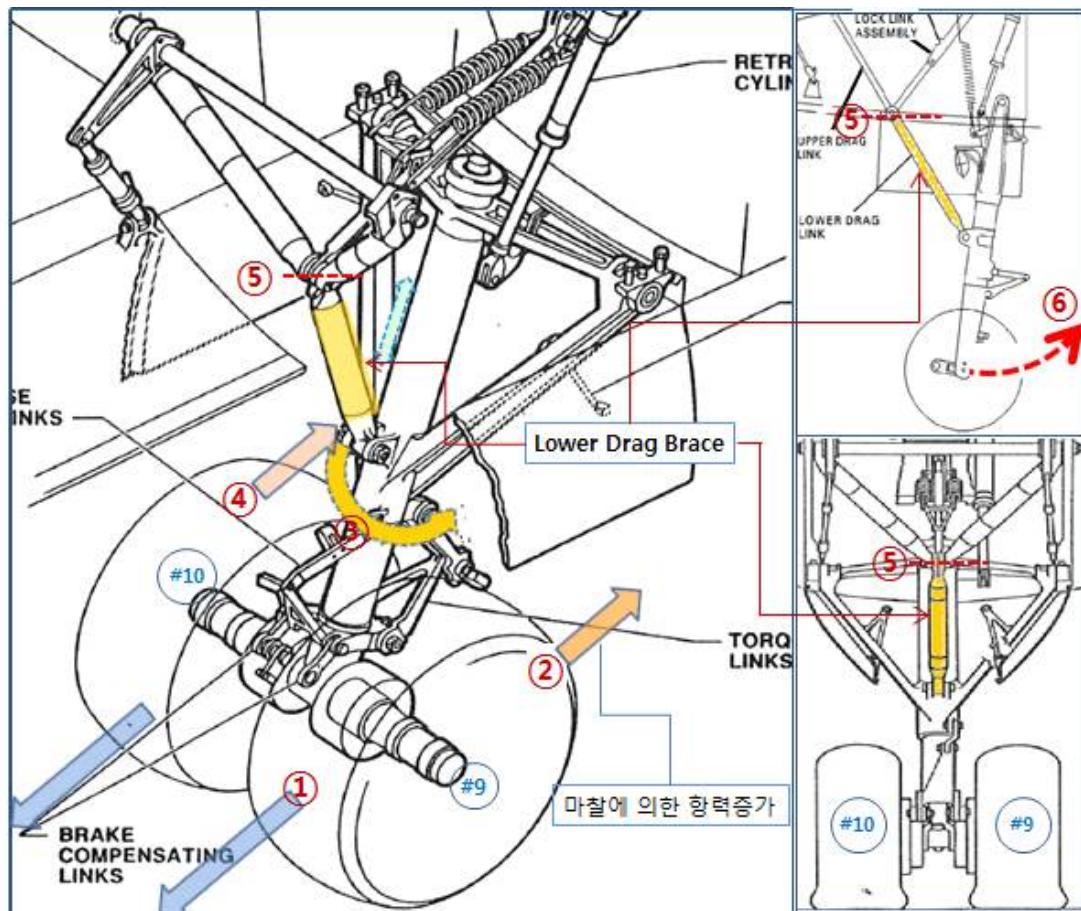
타이어와 연결 어셈블리가 파열되어 1회 이상의 진동부하로 인한 저항력에 의해 중앙착륙장치의 드래그브레이스가 파손되었다. 9번 타이어의 손상은 항공기가 전진하는 동안 중앙착륙장치에 저항력을 증가시켰다.

9번 타이어의 파열은 9번 타이어로부터 10번 타이어로 항공기 무게를 이동시켰고, 또한 9번 타이어 파열 약 0.6초 후에 10번 타이어의 파열을 야기시

켰다. 이 파열 타이어의 진동과 비틀림 현상이 조합되어 중앙착륙장치에 저항이 집중됨으로써 중앙착륙장치 하부(lower) 드래그브레이스가 파손되었다.

활주로 타이어 자국으로 보아, 최소 4차례의 진동현상이 발생하였던 것으로 판단되었다.

[그림 26]과 같이 하부 드래그브레이스 위쪽 크레비스(clevis)가 파손되자 하부 드래그브레이스는 아래에 고정된 크레비스에 연결되어 남아있었다. 이로서 중앙착륙장치가 앞뒤로 움직일 수 있었고, 그래서 스트럿은 파열된 타이어에 의해 야기된 중앙착륙장치 부하에 기인하여 후방으로 이동하였다.

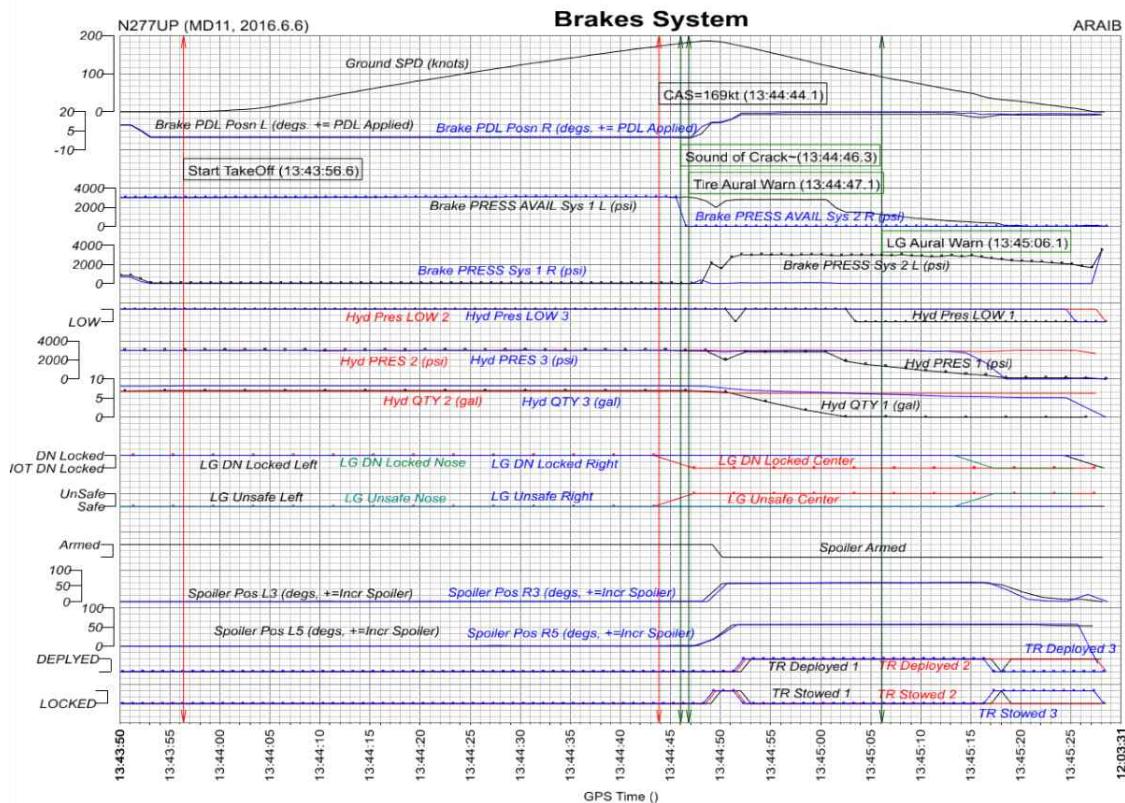


[그림 26] 중앙착륙장치 하부 드래그브레이스 파손 단계

2.3.4 브레이크시스템 1R 유압관 파열

유압 브레이크 시스템 1R의 유압관은 중앙착륙장치 휠과 스트럿과 가 뒤로 넘어감으로써 파손 되었고 휠은 동체 하부에 부딪히고 활주로에 접촉되었다. 이러한 현상은 활주로를 벗어나기까지 16회 반복되었다.

유압시스템 1의 유압유 손실은 이륙포기 중 제동시스템 성능을 감소시켰다. 파손된 유압관은 유압유를 방출하였으며 항공기 유압시스템 1의 유량을 감소시켰다. [그림 27]과 같이 13:45:03경⁷²⁾ 항공기 유압시스템 1의 용량이 '0' 을 지시하였으며, 13:45:04경 항공기 유압시스템 1의 '압력 낮음' 이 FDR에 기록되었다.



[그림 27] N277 브레이크 및 유압 시스템 관련 FDR 자료

72) 활주로33L 종단까지 잔여거리 689ft, 지상속도 111kts

2.3.5 이륙포기 조치(V1에서 3.3초 지난 시점)

N277은 V1에서 약 1.6초 지난 후 결함발생으로 인한 가속도 급변이 발생하였고 [그림 28]과 같이 V1에서 약 3.3초 후인 13:44:47.4경⁷³⁾기장이 엔진출력을 줄이며 이륙포기조치를 시작하였다.

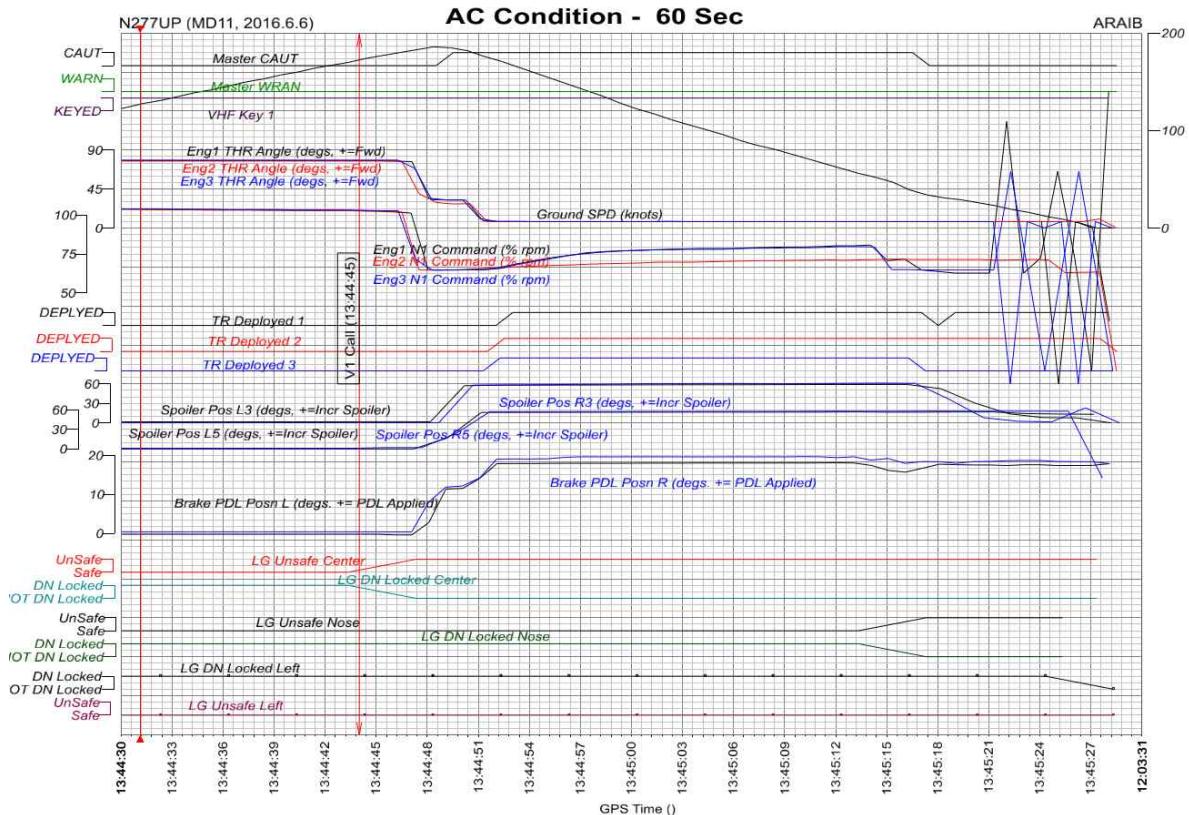
13:44:47.9경 CVR에 뭔지 알 수 없는 소리가 1.4초 동안 3회 녹음된 것은 기장과 부기장의 이륙포기 호창 및 조종 인수·이양의 내용으로 추정된다.

N277은 엔진출력이 줄어들며 이륙포기조치가 시작될 때 속도는 181kts(지상속도 182kts)였고 활주로33L 시단에서 약 7,668ft(종단에서 약 4,635ft)위치 이었다.

활주로 상의 중앙타이어 3차 혼적은 활주로33L 시단에서 약 7,657ft 지점에서 종료되었다. 따라서 기장은 중앙착륙장치가 손상되어 동체 뒤로 넘어가는 중앙타이어 2차 혼적부근에서 이륙포기 결정을 완료하였고 중앙타이어가 후방동체에 부딪히고 활주로에 접촉된 중앙타이어 3차 혼적이 종료되는 위치 부근에서 엔진출력을 줄이기 시작한 것으로 분석되었다.

N277은 V1에서 이륙포기를 시작한 지점까지 약 979ft가 소요되었고 약 12kts 증속되었다.

73) N277은 2번 엔진의 추력조절레버(스로틀)가 13:44:47.4경 줄어들기 시작하여 13:44:48경 최소위치에 도달하였고 1번과 3번 엔진의 추력조절레버(스로틀)는 13:44:48.3경 최소위치에 도달하였다. ARAIB는 2번 엔진이 줄어들기 시작한 시점을 이륙포기조치를 시작한 시점으로 정하였다.



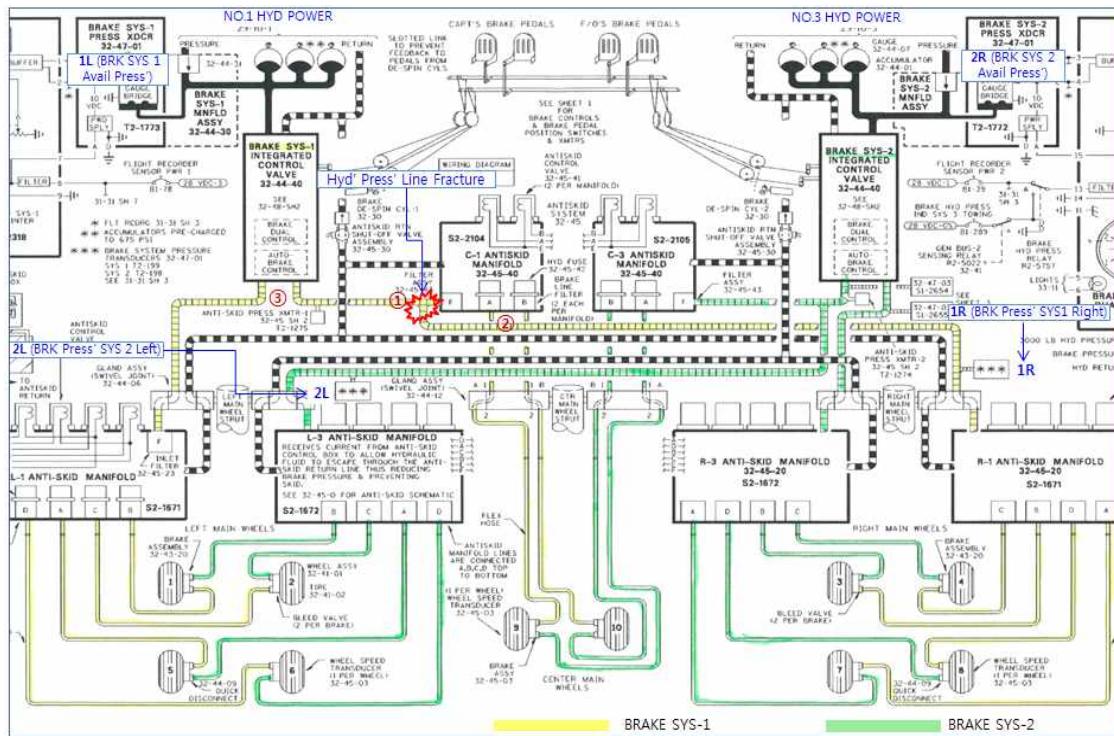
[그림 28] N277 이륙포기과정의 관련 FDR data

N277은 이륙포기조치로 엔진출력을 줄인 시점을 기준으로 약 0.9초 후 브레이크 페달 작동 시작, 약 1.4초 후 Ground spoiler 전개 시작, 1.6초 후 역추력장치 잠금 해제, 약 5.6초 후 3개 역추력장치의 전개가 완료되었다. N277의 브레이크 및 역추력장치는 활주로 이탈까지 최대로 사용되었다.

2.3.6 유압관 파열의 영향

N277의 브레이크는 좌·우측 주 착륙장치에 각각 4개와 중앙착륙장치에 2개로 총 10개가 장착되어 있다. 착륙장치 브레이크 시스템 1은 항공기 유압계통 1에서, 브레이크 시스템 2는 항공기 유압계통 3에 의해 작동되며 각 브레이크는 2개의 독립된 브레이크 실린더로 구성되어 있다. 설계상 이는 2개의 항공기 유압계통 중 1개가 손상되어도 브레이크가 작동할 수 있도록 하기

위함이다.



[그림 29] MD11 브레이크시스템

2.3.6.1 N277 기수의 좌편향 발생

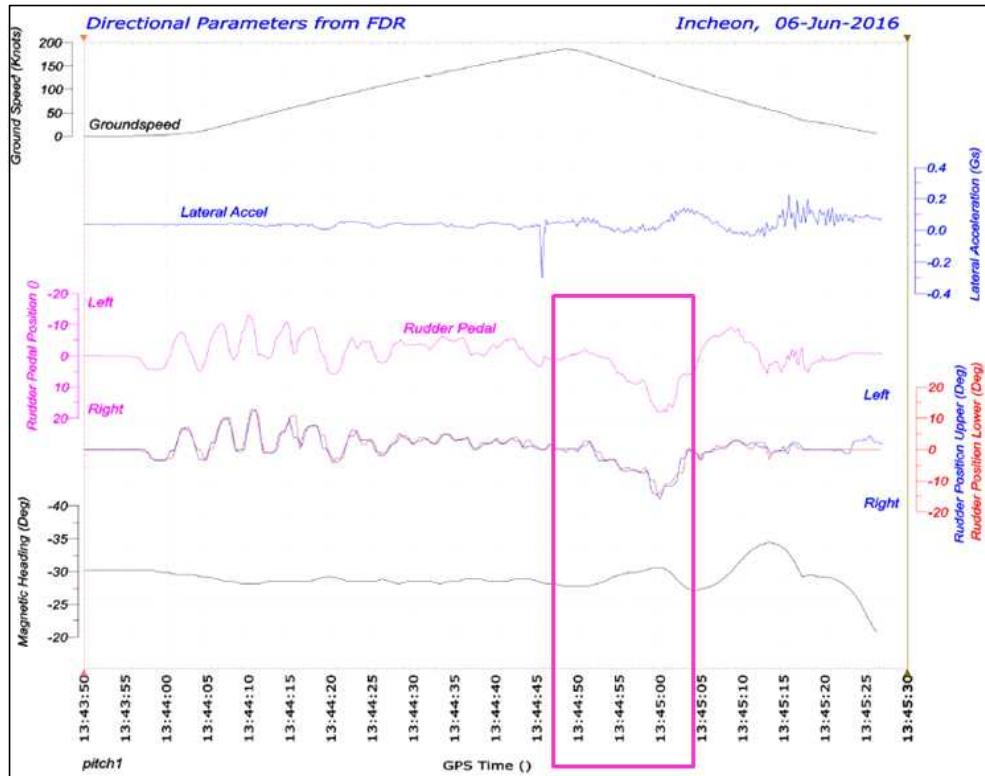
N277은 중앙착륙장치 손상과정에서 브레이크 시스템 1의 유압관이 파열 ([그림 29] ①위치, 1R)되었고 이륙포기시점에서 약 16초 후인 13:45:03경 항공기 유압시스템 1의 작동유가 모두 유출되었음이 FDR에 기록되었다.

우측 주륜에는 이륙포기 초기부터 브레이크 시스템1의 유압이 공급되지 않았고 브레이크 시스템2의 유압만 공급되었다. 반면 좌측은 브레이크 시스템2의 유압이 공급되었고 또한 유압시스템 1의 유압도 모두 누출되기 전까지는 공급이 되었다.

이와 같은 이유로 운항승무원이 이륙포기를 시작하여 최대로 좌우측 브레이

이크를 사용할 때 브레이크시스템 1의 작동유가 모두 유출되기까지의 약 16초 동안 좌우측 주륜에 브레이크 비대칭현상이 발생하게 되었고 항공기는 좌편향 경향이 발생하게 되었다.

[그림 30] FDR 자료에서 초기 브레이크 작동 후 브레이크시스템1에 유압이 누출되어 소진될 때까지 좌편향 경향을 보상하기 위한 우측 방향타 사용량이 증가되었다. 13:44:52경 우측으로 방향타페달 사용이 증가되었지만 항공기 기수는 좌편향 경향을 나타낸다. 13:45:00경 우측으로 방향타 사용이 최대가 되었고 항공기 유압시스템 1의 작동유가 모두 소진된 13:45:02경부터 기수가 우측으로 선회되기 시작함에 따라 동시에 점차 우측으로 방향타 사용이 감소되었다. 이는 좌편향 경향이 소멸되었음을 의미한다.



[그림 30] 기수의 좌편향 경향

이 좌편향 경향의 현상이 발생하는 동안에도 활주로 중심선 부근의 비행궤

적이 유지된 것으로 보아 N277UP의 운항승무원들은 좌우측 브레이크 비대칭에 대하여 적절한 대응조치를 한 것으로 판단된다.

2.3.6.2 총 브레이크 효율 48% 그리고 2,3,4번 스포일러 retract

[표 16]은 N277의 이륙활주거리와 이륙포기시 가속정지거리를 나타낸 것이다.

N277이 설정한 V1(169kts)은 Balanced V1⁷⁴⁾이었고 V1까지 가속거리는 6,528ft, 정지거리는 5,385ft로서 가속정지거리는 11,913ft이다.

N277의 엔진출력이 줄어든 위치(13:44:47.4)⁷⁵⁾는 활주로33L 시단에서 7,668ft의 거리, 활주로33L 종단까지 4,635ft가 남은 지점이었다. 이때 속도는 181kts(지상속도 182kts)이었다.

브레이크의 전체 효율이 약 48%⁷⁶⁾로 감소된 N277은 속도 185kts기준으로 브레이크시스템이 정상이었을 때 보다 약 1,550ft 증가된 13,650ft의 가속정지거리가 필요하였다.

모의장치로 시험한 데이터에서 항공기 정상상태인 경우 속도 185kts에서 정지까지 최대 역추력장치⁷⁷⁾와 최대 브레이크를 사용하였을 때 약 4,000ft 이상의 정지거리가 소요되었다. 이 데이터에 감소된 브레이크 성능 48%로 증가된 감속정지거리 1,550ft를 더하면 감속정지거리는 약 5,550ft가 소요된다고 할 수 있다.

N277은 사고현장에서 좌, 우측 날개의 1번과 5번 스포일러는 정상적으로

74) Balanced field takeoff는 항공기의 중량, 엔진추력, 항공기외장과 활주로상황에서 요구되는 가속정지거리(ASDR)과 요구되는 이륙거리(TODR)가 같은 경우의 이륙을 말하며 이 경우의 V1을 Balanced V1이라 한다.

75) 브레이크사용이 시작된 시점(13:44:48.3경)에서 활주로33L의 종단까지 잔여거리는 약 4,351ft, 속도는 182CAS(185GS)이었다.

76) 1.16.1 참조

77) wet runway에서 역추력장치는 이륙성능 산출에 반영되나 dry runway에서 역추력장치는 이륙성능 산출에 반영되지 않는다. 즉 dry runway에서 역추력장치는 없는 것으로 간주하여 이륙성능을 산출한다.

전개된 상태였으나 2번, 3번 및 4번 스포일러는 전개되지 않은 위치(stow)에 있었다.

N277의 경우 활주로 이탈 전 유압관 1R⁷⁸⁾ 파열로 항공기 유압시스템 1의 작동유가 모두 유출되어 2번과 4번 스포일러가 retract되었고, 활주로를 이탈하여 ILS 안테나에 충돌된 후 유압시스템 3의 압력이 0이 되었을 때 3번 스포일러도 retract되었을 것이다. 따라서 N277의 감속정지거리는 더 증가하게 되었을 것이고 [표 16]와 같이 실제 약 6,226ft가 소요되었다.

N277은 이륙포기를 시작한 지점의 상황(V1을 12kts 초과, 48%의 브레이크 성능)에서는 최대의 감속성능이 사용되더라도 활주로를 이탈할 수밖에 없었다.

항공기 상황 (MD11, 629,500 lb, Flap10, 19C, 해수면 기압고도 30 ft, Flex 30), 건조활주로[인천 활주로33L: 12,303ft(TORA)]

분류	V1 169kts ¹⁾ 에서 이륙 포기(역추력 없음)	185kts에서 이륙 포기(최대 역추력 사용), LMLG와 RMLG에 정상 브레이크의 60%, CLG에 브레이크 없음	
		Boeing performance	N277(FDR)
이륙시작부터 특정속도 까지 이륙활주거리	6,528 ft	8,100 ft	7,668 ft (181 kts)
특정속도에서 정지까지 정지거리	5,385 ft	4,000 ²⁾ +1,550 ³⁾ = 5,550 ft	4,635 ⁴⁾ +1,591 ⁵⁾ = 6,226 ft
가속정지거리(Accelerate-stop distance)	11,913 ft	13,650 ft	13,894 ft

169 kts¹⁾: V1 bal = Balanced V1
 4,000²⁾: 인가된 성능기준(AFM규칙)은 건조활주로에서 역추력장치를 포함하지 않는다. 본 사례에서 브레이크만으로 정지를 하면 최대 브레이크 에너지를 초과할 수 있다. 완전정지까지 최대 역추력장치와 최대 브레이크를 사용한 모의시험(인가된 성능자료 아님) 결과, 정상기능의 항공기로 185kts에서 정지까지 4,000피트의 거리가 소요되었다.

1,550³⁾: 브레이크 비정상으로 증가된 정지거리
 4,635⁴⁾: 활주로 종단까지의 거리
 1,591⁵⁾: 활주로 종단에서 이탈거리

[표 16] N277의 이륙 가속거리, 이륙포기 시 정지거리

78) 항공기 유압시스템 1은 항공기 좌우측 날개의 2번 및 4번 스포일러, 항공기 유압시스템 2는 1번 및 5번 스포일러, 항공기 유압시스템 3는 3번 스포일러에 유압을 공급한다.

2.3.7 활주로 이탈, 항공기 이탈절차 수행

N277은 지상속도 90kts로 활주로를 이탈한 후 지상속도 48kts로 로컬라이저 안테나에 충돌하였다. 이때 전방착륙장치가 손상되어 접혀 양쪽 엔진 또 한 지면에 접촉되며 심하게 손상되었다. 기장은 지상속도 29kts에서 엔진정지(shut all engines down)를 지시하였고 N277의 연료스위치는 지상속도 9kts에서 모두 차단되었다. 이는 엔진 및 동체가 심하게 손상된 상태에서 화재로 악화되는 것을 막기 위한 기장의 판단에 따른 조치였다.

운항승무원들은 정지 후 항공기이탈절차를 수행한 후 4명 모두 좌측 앞쪽 문(L1 Door)으로 항공기를 이탈하였다.

N277의 운항승무원은 이륙포기절차를 UPS MD11 항공기운영교범에 명시된 데로 정상적으로 수행한 것으로 판단된다.

2.4 이륙포기 결정

2.4.1 V1 정의

가. 미국연방항공청 규정 (FAR) 1.2 Definition

V1: 항공기를 가속정지거리 내에서 세우기 위하여 조종사가 처음 조치(예: 브레이크 작동, 추력 감소, 속도감속기 전개)를 수행하여야 하는 이륙시의 최대 속도.

또한 V_{EF} ⁷⁹⁾에서 중요한 엔진이 고장난 후에 조종사가 이륙을 지속하여 이륙거리 내에서 이륙 표면 위로부터 요구되는 높이에 도달할 수 있는 이륙시의 최소속도.

79) V_{EF} 는 중요한 엔진이 고장난 것으로 가정하였을 때의 속도로서 V_{MCG} 보다 적지 않아야 한다. V_{MCG} 는 critical engine이 부작동하고 다른 엔진들은 이륙출력이 적용되었을 때 지상에서 단지 공기역학적 조종만을 사용하여 방향조정이 유지될 수 있는 최소 속도이다.

나. Takeoff Safety Training Aid⁸⁰⁾

V1: 인가된 성능자료와 한정된 상황에 기반하여 개별적으로 선정된 속도로서 다음을 의미한다.

1. 잔여 활주로, 또는 활주로와 정지로내에서 안전한 정지가 완료될 수 있음이 확보되도록 이륙포기가 시작되어야만 하는 최대 속도
2. 지정된 속도에서 가장 중요한 엔진의 고장 후, 이륙이 잔여 활주로 또는 활주로와 개방구역 내에서 안전하게 완료될 수 있음을 보증하는 최소 속도, 그리고
3. 특정 중량의 최소 허용 활주로 길이에서 운영할 때 안전한 정지 또는 이륙을 허용하는 단일 속도

Note 1: 안전한 이륙의 완료는 활주로 끝 또는 개방구역에서 정해진 screen height가 확보되고 그리고 정해진 이륙비행경로를 따라 안전한 장애물 간격이 확보됨을 포함한다.

Minimum V1: 지정된 속도에서 가장 중요한 엔진의 고장 후, 이륙이 주어진 활주로 또는 활주로와 개방구역에서 안전하게 완료될 수 있는 기준 상황들을 고려한 허용되는 최소 V1 속도

Maximum V1: 이륙포기가 시작될 수 있고 항공기가 잔여 활주로 또는 활주로와 정지로 내에서 정지될 수 있는 기준 상황들을 고려한 최대 가능 V1 속도

Reduced V1: 요구되는 이륙포기 정지거리를 줄이기 위해 선정된 Maximum V1 또는 정상 V1 보다 적지만 Minimum V1보다 많은 V1

80) FAA에서 항공운수업자와 조종사들의 이륙단계의 비행안전증진을 돋기 위한 목적으로 1994년에 Advisory Circular No 120-62(제목: Takeoff Safety Training Aid Announcement of Availability)를 발행하여 공표

2.4.2 V1 이후 비행불가능

2.4.2.1 UPS 교범의 V1 이후 비행불가능 개념

이륙중량이 활주로 길이로 제한될 경우, V1이후 이륙포기를 하면 항공기는 활주로 내에 정지할 수 없다. V1의 정의에 따라 일반적으로 V1 이후에는 이륙을 지속하는 것이 원칙이다.

UPS는 비행운영교범에서 “V1 이후 이륙포기⁸¹⁾는 기장이 항공기가 비행 불가능이라고 판단하지 않는 한 추천되지 않는다.”고 하여 V1 이후 이륙포기 할 수 있는 예외를 언급하였다. 그러나 UPS는 ‘비행 불가능’에 대한 정의는 수립하지 않았다. 또한 보잉 MD-11 운항승무원 훈련교범과 FAA의 Takeoff Safety Training Aid에도 ‘비행불가능’에 대한 정의는 없었다.

예외의 경우를 언급한 배경은 V1 이후 이륙포기를 해야 하는 ‘비행 불가능’ 상황이 발생할 가능성을 배제할 수 없기 때문일 것이다.

즉 V1 이후 ‘비행 불가능’ 상황에서 이륙을 지속하였을 때 야기될 수 있는 위험정도 또는 결과가 이륙을 포기하였을 때 활주로를 이탈함으로써 야기되는 위험정도 또는 결과보다 더 심각할 수 있기 때문이다.

2.4.2.2 V1이후 이륙포기에 대한 지침

대부분의 상업용 비행은 일상적인 환경 아래에서 운항된다. 비정상적인 사건들은 규칙성 있는 환경이라기보다 예외에 해당된다. 대부분의 비정상적인 사건들은 반응에 필요한 적절한 시간 뿐 아니라 기억하여 수행하여야 하는 절차 또는 체크리스트와 같이 조종사들이 따라야하는 명확한 조치가 정하여 있다. 그 외 다른 사건의 경우, 조종사들은 알 수 없는 상황에 처하게

81) UPS는 비행운영교범에서 ‘기장은 이륙포기결정에 대한 독자적 의무를 갖는다. 이륙포기결정은 이륙포기기동이 V1보다 늦지 않게 시작될 수 있도록 V1 이전에 이루어 져야 한다.’고 정하고 있다.

되지만 제한된 정보로 빠른 결정을 내려야 만 한다.

조종사들은 이륙 활주 시 Go 혹은 No-go 결심을 포함하여 비정상적인 사건이 발생하였을 때 합당한 조치를 취하도록 전문 훈련을 받는다. 비행훈련 시나리오는 V1이전 이륙포기와 V1이후 이륙 지속에 초점을 맞추어 진행되는데, V1 이 후 이륙 지속을 해서는 안 되는 시나리오가 드물게 존재한다.

FAA의 이륙 안전 훈련 지침(Takeoff Safety Training Aid)에서는 조종사들에게 V1 이후 이륙 지속을 하도록 지시하고 있으며, V1이 지난 후 이륙포기는 조종사가 판단하기에 항공기가 비행하기에 안전하지 않거나 비행이 불가능할 경우에만 가능하다고 안내하고 있다.

이륙지속 혹은 이륙 포기 결정은 매우 어렵고 중요한 의사 결정이다 왜냐하면 V1 이후의 이륙 포기는 모든 상황에 해당하는 것은 아니지만 대부분 활주로를 이탈하는 결과를 초래하기 때문이다.

알 수 없는 상황을 포함하여 Go 또는 No-go 결정을 내릴 때 조종사들은 확고하게 결정을 내려야 하며 이륙포기를 할 때 지연을 할 수 없다. 최우선 의사결정의 인지는 특히, 상업용 비행 조종사들과 같이 전문가들이 제한적 정보만을 가지고 시간적 압박에 직면했을 때 어떻게 빠르고 효과적인 결정들을 내릴 수 있는지 설명해 준다. 전문가들은 문제의 두드러진 특징을 정확하고 빠르게 인지하는데 자신의 많은 경험에 의존을 하고 행동의 과정을 평가하며 그러한 행동의 결과를 마음속으로 그리게 된다.

예를 들어, 조종사들은 Go/No-go 결정을 하기 위해서 반드시 항공기 속도, 브레이크 작동, 활주로 길이, 환경적 요소와 더불어 비행기 시스템에서 나오는 경고음, 조종사의 시각, 청각, 전정, 고유감각을 고려해야 한다.

2.4.3 N277기장의 이륙포기결정

기장은 이륙포기결정을 한 후 이륙포기절차 수행 과정에서 TIRE FAILURE 음성 경고를 인지하였다. N277의 2번 엔진의 출력레버가 줄어든 시점은 TIRE FAILURE 음성 경고가 시작되고 약 0.3초 후이다.

기장은 가속도의 감소, 항공기의 과도한 진동, 비정상적인 소음으로 항공기는 비행을 할 수 없다고 판단하였고 V1 이후 이륙포기를 택하였다.

기장은 항공기의 활주로 중앙선에서 방향이 틀어짐, 금속과 금속간의 마찰 소리, 격렬한 흔들림, 가속도 감소현상을 진술했다. 이 시점에서 기장은 항공기가 비행할 수 있을지 확실히 알지 못했지만 결정은 즉시 해야만 했다. 항공기 속도는 증가하고 있었고 남은 활주로는 줄어들고 있었다.

사고 후 인터뷰에서 기장은 그의 V1 이후 이륙포기 결정으로 활주로를 이탈할 가능성이 농후하지만 항공기는 비행할 수 없을 것으로 느꼈다고 진술했다. 비록 그의 첫 번째 생각은 타이어 결함으로 느껴지고 있다고 할지라도 그 상황은 빠르게 진전되었고 기장은 그가 가진 정보를 바탕으로 야간에 지상에 있는 것이 최고의 선택 안이라고 결정했다.

때때로 조종사들은 알 수 없는 상황에 처하게 된다. 그 이유는 조종사들이 항공기가 안전하지 않거나 비행을 할 수 없는지 제대로 파악하기가 어려울 수 있기 때문이다. 조종사는 이륙활주 중에 충분한 시간이 없거나 또는 사고 조사관들이 사후 항공기 성능을 평가하여 얻을 수 있는 통찰력을 가질 수 없다. 뿐만 아니라 이륙 후 항공기 성능에 영향을 줄 수 있는 어떠한 손상이 있는지 또는 어떠한 다른 결과의 사건으로 진행될지 알 수 없다.

2.5 이륙 지속 시 항공기 성능

N277이 이륙포기조치로 엔진출력을 줄인 위치까지 활주로 상에는 세 차례의 구간에서 타이어 마찰흔적이 있었다. FDR 데이터는 이륙방향으로 이륙

포기 초기 조치까지 종가속도의 감소가 있었음을 보여준다.

첫 번째 종가속도의 감소는 10번 타이어가 파열되고 중앙착륙장치의 드래그브레이스가 손상될 때 이고 두 번째와 세 번째의 종가속도의 감소는 손상된 중앙착륙장치의 휠과 타이어 부분이 동체 후미로 넘어갈 때와 동체후미에 부딪친 후 내려와 다시 활주로에 마찰될 때 일 것이다.

V1 1.7초 후 모든 3축의 가속도 급변⁸²⁾이 FDR에 기록되었다. 이 가속도의 급변은 0.5초 후 회복되었다.

종가속도가 급감된 후 이륙포기조치까지 약 1초 동안의 평균 종가속도는 +0.15G이고 이는 초당 약 2.8kts의 증속을 의미한다. 가속의 급변이 발생하기 직전 평균 종가속도는 +0.17G였고 이는 초당 약 3.3kts의 증속을 의미한다. 따라서 N277은 이륙포기 직전 초당 가속률이 약 14% 감소된 것이다.

성능평가에 의하면 총 브레이크 효율은 약 52% 감소한 것으로 나타났으며 이는 브레이크 시스템 1의 유액 손실과 CLG 제동장치 손실로 인한 것이다. 동 성능평가 결과, CLG의 고장은 정상 브레이크(양쪽 브레이크에 최대 압력)와 비교하여 정지거리를 약 500피트 증가시켰다. CLG 결함과 남아있는 기어의 60% 브레이크 효율로 정상의 경우보다 1500피트 이상이 필요하였다.

하지만 만약 운항승무원이 이륙을 지속⁸³⁾하였다면 항공기는 이륙성능요건을 충족하였을 것이다. 결함의 단기적인 영향은 단지 CLG의 인입이 되지 않았을 뿐이다. 상승성능 산출은 한 개의 엔진 부작동을 가정한 것으로, 이는 CLG 인입결함보다 더욱 더 큰 영향을 미친다. 모든 엔진 정상상태에서 CLG가 전개됨으로 인한 상승 성능 감소는 무시해도 될 정도였을 것이다.

항공기가 비록 안전하게 공중으로 진입했을지 몰라도 착륙 성능에 미친 영

82) 종가속도 약 0.25G 감소, 수직가속도 약 1.4G 감소, 횡가속도 좌로 약 0.3G 발생

83) 가속도 감소는 176kts에서 시작되었다. 타이어 경고음은 180kts에서 시작되었다. 운항 승무원이 이륙을 결정한다면 185kts (V_r)에서 이륙부양되도록 항공기 자세를 변화하기 시작한다.

향은 산출되지 않았다. UPS 훈련센터에서 비행을 지속할 때의 모의훈련시험은 시행되었지만 항공기의 이륙 부양 후 비정상 이례들은 시뮬레이션 되지 않았다. 실제 사건과 다른 어떠한 시나리오의 결과는 승무원들이 다른 조치를 취하였다면 무엇이 발생하였겠는가의 지표가 되어서는 안 된다. 비상상황에 대한 운항 승무원의 대응과 부러진 드래그브레이스 상태로 항공기 조종을 포함하여 시뮬레이터에서 그대로 재 시연될 수 없는 많은 미지의 변수들이 존재한다.

2.6 중앙착륙장치 타이어 잔해의 라이너 주름(Liner Wrinkles)과 X형 손상

9번, 10번 타이어 케이스에 남아있는 솔더 부분에서 라이너 주름⁸⁴⁾이 발견되었으나, 타이어 케이스에서 떨어져 나간 트레드에는 라이너 주름이 없었다. 트레드조각이 타이어 케이스에서 떨어져 나간 후에 타이어 케이스에 남아있는 솔더 부분에만 라이너 주름이 발생되었음을 의미한다.

타이어가 파열된 후 타이어 잔해(carcass)에 남아 있는 숄더(shoulder) 부분이 항공기 중량에 의해 심하게 변형되었고, 라이너 주름을 발생하였다. 분리된 트레드조각에 라이너주름의 결여는 타이어의 심각한 저압상태(under inflated condition) 또는 만성적인 저압상태가 아니었음을 지시한다.

중앙착륙장치 9번 및 10번 타이어로부터 분리된 잔해를 재구성하였을 때 트래드 캡은 X형태로 손상되었음을 나타내었다. 이러한 X형태의 손상은 외부물질에 의한 손상이나 경착륙과 같은 강한 충격에 의해 발생되는 것으로 인정하고 있다. 하지만 타이어 검사와 활주로에서 발견된 조각들 검사 시 외부물질손상⁸⁵⁾의 증거는 보이지 않았다. 또한 FDR의 이전 비행기록들에서 경착륙은 발견되지 않았다.

84) 라이너 주름(Liner Wrinkles)은 일반적으로 타이어가 저압상태(underinflation)에서 반복적으로 사용될 경우 주로 솔더나 측벽부분에서 발생된다. 그러나 저압상태가 아니더라도 타이어가 심한 충격을 받거나 반복적인 하중이 작용되면 라이너 주름이 발생할 수 있다.

85) FOD: foreign object damage.

본 사고조사에서 10번 타이어 파열과 중앙착륙장치 드래그브레이스 파손의 계기가 된 9번 타이어 파손의 원인은 결정할 수 없었다.

2.7 예방대책

2.7.1 V1 이후 비행불가능의 판단

Go/No-go 결정을 내려야 하는 시간적 압박과 운항승무원들이 저한 상황에 대한 제한된 정보로 V1 이후 항공기의 비행성능을 결정하는 데에는 내재적인 어려움이 있다.

항공업계는 확정되지 않은 어떤 상황들 특히 V1 이후의 속도에서, 항공기 비행성능을 어떻게 판단할 것인가에 관해서 운항승무원들에게 ‘비행불가능’의 정의와 추가적인 지침 및 훈련을 제공하는 것이 유익할 것이다.

우리는 FAA에 다음과 같이 권고한다. FAA는 업계 전문가들과 협업하여 최근 사고 및 준사고 데이터가 반영되도록 FAA의 이륙안전훈련지침(Takeoff Safety Training Aid)을 검토 및 업데이트하고, 이를 통하여 조종사들에게 V1 이후의 속도에서 항공기가 불안전한지 또는 비행을 할 수 없는지를 잘 판단할 수 있도록 적절한 지침을 제공하라. 업데이트 되면 이 지침을 그들의 훈련 프로그램에 반영하도록 독려하라.

2.7.2 ‘비행불가능’ 방지를 위한 항공기관리

이번 사고는 V1이 지난 시점에서 중앙착륙장치의 9번 타이어가 파열됨으로써 결국 중앙착륙장치가 손상되었고 이 과정에서 발생한 가속의 감소 등의 현상으로 기장이 이륙포기를 결정하게 되었다.

9번 타이어의 파열 원인은 외부물질에 의한 충격, 제작상의 결함, 중앙착륙장치 타이어의 과하중 등 다양한 원인이 있을 수 있지만 사고조사과정에서

밝혀지지 않았다.

중앙착륙장치의 타이어가 손상될 수 있는 가능성을 최소화하기 위하여 중앙착륙장치 타이어의 운용 및 관리에 있어 취약요인을 검토하여 보완하는 것이 필요하다고 본다. 예를 들어 타이어 압력을 기록하는 정비프로그램이 제대로 갖추어져 있는지가 될 수 있다.

CLG 결함은 CLG 타이어 결함에 의한 동적 불안정으로 인해 생겨났다. 그러나 CLG는 fail-safe 구조로 설계되었기 때문에 다른 착륙 기어가 항공기 제한 하중을 지탱하게 된다.

N277의 경우와 같이 V1이 지난 시점에서 조종사들의 판단을 애매모호하게 만들 수 있는 항공기 결함상황이 발생하지 않도록 항공기를 관리하고 운영하는 것이 필요하다고 본다.

3. 결론

3.1 조사결과

1. 운항승무원들은 대한민국 항공법 및 미국연방항공규정(14 CFR Part 129)에 따라 비행에 적합한 자격증명과 자격을 갖추었다. 운항승무원의 성능이 피로, 의학적 질환 또는 음주나 약물 복용으로 인해 영향을 받았다는 증거는 발견되지 않았다.
2. N277은 중량 및 CG 한계 내에 있었고, 대한민국 규정과 미국연방항공규정(14 CFR Part 129)에 따라 장비를 탑재하고 인가를 받았으며 정비되었다. 사고 전 N277의 중앙 착륙장치의 타이어, 드래그브레이스를 포함하여 브레이크시스템, 유압시스템에 고장이 있었다는 증거는 발견되지 않았다.
3. 인천국제공항기상은 야간시계비행상태로 양호하였고 사고에 영향을 미치지 않았다.
4. N277은 이륙중량 629,600 LBS[최대허용이륙중량 (630,500 lbs), 이륙결심속도(V1_{BAL}) 169kts, 이륙전환속도 184kts, 최소이륙안전속도(V2) 191kts]로 이륙활주를 시작하였다.
5. N277은 이론상 이륙활주부터 V1까지 가속거리가 6,528ft였고 실제 가속거리는 약 6,413ft가 소요되어 V1까지 항공기 이륙성능은 정상이었다.
6. N277은 V1에서 약 1.6초 지난시점에서 종방향으로 감소, 좌측으로 편향, 수직으로 하향되는 가속도의 급한 변화가 시작되었고 이는 약 0.5초 후 회복되었다. 이 가속도의 급한 변화는 중앙착륙장치의 드래그브레이스가 손상될 때 발생한 현상으로 분석되었다.
7. N277은 V1이 지난시점에서 중앙착륙장치의 9번과 10번 타이어가 파열되었고 중앙착륙장치가 손상되었다. N277의 결함진행 순서는 중앙착륙장치의 좌측 9번 타이어 플랫→중앙착륙장치의 우측 10번 타이어 플랫→중앙착륙장치 Drag brace 손상→ 항공기가 전진함에 따라 중앙착륙장치는 후방으로 이동하여 동체에 수차례 부딪힘.

8. N277 9번 타이어가 파열되며 항공기 무게가 9번 타이어에서 10번으로 이동하였고 10번 타이어 또한 파열되었다 (9번 타이어 파열후 약 0.6초). 타이어 파열과정에서 발생한 진동과 비틀림으로 중앙착륙장치에 저항력이 집중되어, 중앙착륙장치 하부(lower) 드래그브레이스 파손을 야기 시켰다.
9. 중앙착륙장의 하부 드래그브레이스의 구조적 손상과 타이어 파열로 중앙착륙장치의 브레이크는 역할을 하지 못하였다. 더욱이 브레이크시스템 1의 유압관이 파열되어 N277의 총 브레이크효율은 이륙포기과정에서 약 48%로 감소되었다.
10. 인천공항 활주로33L의 시단부터 종단까지의 거리는 12,303ft이다. 총 브레이크 효율의 감소로 N277의 가속정지거리는 정상보다 약 1,550ft 증가되었다.
11. N277은 V1에서 3.3초 지난시점이며 활주로33L 종단까지 4,635ft가 남은 위치에서 엔진출력이 줄어들기 시작하였다. V1에서 이륙포기를 시작한 지점까지 약 986ft의 거리가 소요되었고 속도는 약 12kts 증가되었다. 총 브레이크효율이 약 48%로 감소된 N277은 이륙포기를 시작한 위치에서 정지까지 최소 약 5,550ft의 감속거리가 필요하였다. 결과로 N277은 활주로33L 종단에서 약 1,591ft(485m) 지난 위치에 정지하였다.
12. 이륙포기과정에서 좌우측 날개의 1번 및 5번 스포일러는 정상 작동되었으나, 활주로 내에서 유압시스템 1의 작동유가 모두 유출된 후 좌우측 날개의 2번 및 4번 스포일러가 retract 되었고 활주로 이탈 후 ILS안테나에 충돌로 유압시스템 3의 압력이 0가 되었을 때 좌우측 날개의 3번 스포일러도 retract 되었다. 이는 감속거리증가에 일부 기여하였다 것이다.
13. N277은 이륙포기조치로 엔진출력을 줄인 시점을 기준으로 약 0.9초 후 브레이크 페달 작동, 약 1.4초 후 Ground spoiler 전개, 1.6초 후 역추력 장치 잠금 해제, 약 5.6초 후 3개 역추력장치의 전개가 완료되었다. N277의 브레이크 및 역추력장치는 활주로이탈까지 최대였다. N277의 운항승

무원은 이륙포기절차를 UPS MD11 비행운영교법에 명시된 데로 정상적으로 수행하였다.

14. N277은 중앙착륙장치가 손상되는 과정에서 가속률이 약 14% 감소되었으나 0.5초 후 회복되었다. 이 ‘가속도 감소’가 발생한 구간에서도 초단위로 기록되는 실제 계기속도와 지상속도는 모두 증속되고 있었다. 이륙을 지속하였다면 ‘가속의 감소’는 이륙부양완료까지 두 세 차례 약화된 상태로 발생할 수 있으나 부양되면 더 이상 발생하지 않는다. N277의 이륙성능저하(‘가속의 감소’)는 ‘비행 불가능’의 경우가 아니었던 것으로 판단되었다.
15. 기장은 항공기의 좌측 편향, 흔들림, 킁 소리, 금속과 금속이 마찰되는 소리, 제동 낙하산(drag chute)을 편 것 같은 ‘가속의 감소(lessening of acceleration)’ 그리고 ‘타이어결함(Tire failure)’ 음성경고를 인지하였다. 기장은 진술에서 승무원과 항공기의 생존의 최적 기회에 근거하여 이륙포기를 결정하였고, 당시 “코핀 코너(coffin corner)로 들어가고 있었으며 그냥 비행기가 뜨지 않을 것이라는 느낌이 들었다고 하였다.
16. N277의 운항승무원들은 ‘가속의 감소’의 원인과 영향을 판단하기 위해 파악되어야 하는 Tire failure, 중앙착륙장치의 unsafe, 엔진의 정상작동, 속도가 증속되고 있음 등 항공기 내부에서 제공되는 정보를 파악하였었다고 볼 수 없다.
17. 기장은 이륙포기를 결정하고 이륙포기절차가 진행되는 과정에서 타이어 Fail 음성경고를 인지하였다.
18. 기장은 가속도 감소, 정상이 아닌 과도한 진동 및 소음으로 인해 항공기가 비행할 수 없을 것으로 판단하였고 V1 이후 이륙포기를 결정하였다.
19. Go/No-go 결정을 해야 하는 시간적 압박과 운항승무원들이 처한 상황에 대한 제한된 정보로 V1 이후 항공기의 비행 성능을 결정하는 데에는 내재적인 어려움이 있다.

20. UPS는 비행운영교범에 이륙포기결정은 기장이 하며 V1이 지난 후 이륙 포기는 기장이 항공기가 비행이 불가능하다고 판단하지 않는 한 추천되지 않는다고 정하고 있으나 ‘비행 불가능’에 대한 정의는 수립하지 않았다.
21. 항공업계는 어떤 상황들 특히 V1 이후의 속도에서, 항공기 비행성능을 어떻게 판단할 것인가에 관해서 운항승무원들에게 ‘비행불가능’의 정의와 추가적인 지침 및 훈련을 제공하는 것이 유익할 것이다.
22. 휠 어셈블리 전체 구성품의 부식이나 기계적인 손상 그리고 휠 어셈블리의 접촉면의 비정상적인 마모는 나타나지 않았다.
23. 9번 타이어 파열의 원인은 밝혀지지 않았다.
24. 중앙착륙장치의 9번과 10번 타이어는 2회 재생하였으며 최근 재생일은 각각 2016년 2월 16일과 2016년 2월 10이다. 9번과 10번의 타이어의 잔해에는 일반적으로 갑작스런 충격 또는 FOD에 의해 발생하는 X형태의 파열이 나타났다. 9번과 10번 타이어에서 갑작스런 충격이나 FOD 증거는 발견되지 않았다. 또한 FDR의 이전 비행기록들에서 경착륙의 증거는 발견되지 않았다.
25. 9번, 10번 타이어 케이스에 남아있는 솔더 부분에서 라이너 주름이 발견되었으나, 타이어 케이스에서 떨어져 나간 트레드에는 라이너 주름이 없었다. 9번, 10번 타이어는 손상되기 전 지속적인 저압상태가 아니었고 라이너 주름은 타이어 파열의 결과로 발생하였다.
26. C-1 미끄럼방지 매니폴드 유압라인의 파단은 주로 연성 과부하와 일치하는 딥풀 파열로 구성되었다.
27. 중앙착륙장치 드래그브레이스 재질성분, 미세조직 및 경도는 300M 합금의 기준에 적합하였다.

28. 중앙착륙장치의 드래그브레이스 금속조직검사 결과, 연성파괴에 의한 딥 플파열이 관찰되었다. 재질 결함은 발견되지 않았다. 드래그브레이스는 인장력에 의해 파단 되었다.
29. CLG 결함은 CLG 타이어 결함에 의한 동력 불안정으로 인해 생겨났다. 그러나 CLG는 fail-safe 구조로 설계되었기 때문에 다른 착륙 기어가 항공기 제한 하중을 지탱하게 된다.

3.2 원인

「이륙결심속도(V1) 이후 중앙착륙장치의 타이어와 드래그 브레이스 결함으로 고속이륙포기를 수행하여 활주로 이탈」로 결정한다.

기여요인으로 「(1) 조우된 상황에 대하여 제한된 시간과 가용한 정보로 항공기 비행성능을 결정하여야 하는 기장의 결심에 있어 내재된 어려움 (2) 타이어 결함 이후 중앙착륙장치 드래그브레이스의 동력 불안정 (3) 1번 브레이크시스템 유압관 파열로 인한 제동성능의 저하」로 결정한다.

4. 안전 권고

4.1 FAA에 대하여

1. 최근 사고와 준사고 자료를 반영하여 조종사들에게 V1이후의 속도에서 항공기의 안전여부 또는 비행가능 여부를 판단할 수 있는 적절한 가이드를 제공하는 것을 목표로 업계 전문가들과 협업하여 FAA의 이륙안전훈련지침(Takeoff Safety Training Aid)을 재검토 및 개선할 것. 이 지침이 개선되면 운영사의 훈련프로그램에 반영하도록 노력할 것(AAR1606-1)

4.2 UPS에 대하여

1. 중앙착륙장치 타이어의 결함예방을 위해 중앙착륙장치 타이어의 운용 및 관리를 강화하는 방안을 검토할 것(AAR1606-2)

5. 첨부

첨부 A: CVR 녹취록(이륙시작부터 정지까지)

CVR TRANSCRIPT

Transcript of a L-3Communications FA2100 (P/N 2100-1020-02, S/N 000147391) solid-state cockpit voice recorder installed on a MD-11F, registration number N277UP, which had an accident during take-off in INCHEON airport, South Korea, on 6th June 2016.

LEGEND

CAP	Captain Pilot
F/O	First Officer
P3	Pilot as the Jump seat
UNK	Voice unidentified
GND	Ground Service
ATC	Air Traffic Controller
TWR	ATC departure frequency
A/C	Aircraft Automatic Call
[]	Editorial Insertion
***	Unintelligible Words
###	Expletive words

N277UP(MD-11F Jun 6 '16)
INCHEON Airport

CVR TRANSCRIPT

ARAIB

UTC'	SRC	Contents (Original)
13:43:55.3	CAP	cleared for take off, UPS61
13:43:57.8	F/O	clear for take off
13:43:57.9	CAP	okay cleared for take off
13:44:02.1	F/O	set take off thrust please...
13:44:04.2		[sound of engine rpm increasing]
13:44:04.7	CAP	thrust set
13:44:05.4	F/O	thank You
13:44:07.0		[sound of clicks]
13:44:19.8	CAP	80 knots
13:44:20.7	F/O	checks
13:44:42.2		[sound of click]
13:44:44.9	CAP	V1
13:44:45.6	F/O	roger
13:44:46.3		crack~[sound of loud two non-normal sound, 0.55sec long]
13:44:47.1	A/C	Tire fail, tire failure tire failure tire failure [tire failure waring overlapped, 2nd warning began 0.6 sec later]
13:44:47.9	UNK	[Sound of triple separated unintelligible voice 1.4sec long]
13:44:49.4	UNK	***
13:44:49.5	F/O	you got it, abort
13:44:50.3	CAP	got it
13:44:51.6	F/O	come *** you need(?)
13:44:52.9	F/O	[sound of breathing, 1.25sec long]
13:44:55.1	F/O	*** you need to stop the ###, man
13:44:56.9	CAP	max ***
13:44:58.6	F/O	max brakes, max brakes
13:44:59.5	CAP	max brakes ON
13:45:01.7	F/O	spoilers
13:45:01.7	CAP	max brakes I'm alreay *** point
13:45:04.2	F/O	stop! ### [with breathing hard]
13:45:06.4	A/C	ding! landing gear, ding! landing gear, ding! landing gear landing gear [landing gear aural warning sound]
13:45:06.8	F/O	stop! ###, ###, u~ah
13:45:10.2		[crash and impact sound repeats 7 times, 10.4 sec long]
13:45:15.2	CAP	hold on, hold on
13:45:20.1	CAP	shut all engines down, shut all engines down
13:45:23.2	CAP	emergency ground egress ###~
13:45:27.1	F/O	emergency ground egress
13:45:28.2	P3	where is the book I can't find
13:45:29.0	UNK	***
13:45:29.5		[End of CVR recording]

첨부 B: N277UP 탑재화물 위치별 중량측정결과(단위: lbs)

위치	ULD번호	탑재 공항	총중량	ULD중량	측정중량	중량차이
1L	96762	HKG	4,702	400	4,716	14
2L	03703	CGO	620	479	635	16
3L	93293	ICN	3,455	2,205	3,460	5
4L	52083	ICN	4,625	605	4,625	0
5L	54410	ICN	5,300	916	5,295	-15
6L	90467	CGO	5,277	262	5,270	-6
7L	52849	ICN	5,735	605	5,735	0
8L	59109	ICN	6,030	591	6,035	5
9L	59278	ICN	6,225	600	6,220	-5
10L	50679	ICN	6,095	627	6,095	0
11L	59316	HKG	6,702	600	6,720	18
12L	41766	HKG	3,763	400	3,780	17
bulk		HKG	064		076	12
		계	62,088	8,370	62,153	65
컨테이너(P1) 바닥 일부 파손						
P1	2607	HKG	3,852	205	3,866	4
P2	34623	HKG	4,072	248	4,095	23
P3	25330	ICN	2,726	470	2,726	0
P4	26196	ICN	4,015	475	4,015	0
P5	26269	ICN	4,255	475	4,255	0
P6	66910	HKG	5,765	609	5,790	14
		계	24,165	2,380	24,226	41
1R	79440	HKG	4,395	475	4,400	5
2R	52373	ICN	3,495	591	3,495	0
3R	59392	TAO	4,159	630	4,150	-9
4R	50769	ICN	5,080	591	5,090	0
5R	93692	CGO	5,745	262	5,726	-20
6R	52608	HKG	5,692	604	5,706	14
7R	52664	ICN	5,940	605	5,940	0
8R	52399	ICN	7,210	605	7,210	0
9R	92890	ICN	6,700	223	6,770	-10
10R	52628	ICN	6,210	605	6,210	0
11R	52096	ICN	6,690	595	6,690	0
12R	15423	CGO	8,711	634	8,710	-1
13	72991	HKG	3,934	400	3,945	11
14	42798	ICN	4,110	409	4,110	0
		계	76,181	7,209	76,160	-11
1개의 Pallet 파손(P9)						
P7	19547	HKG	2,630	305	2,640	10
P8	19781	HKG	3,308	346	3,315	7
P9	19329	HKG	3,320	376	3,325	5
P10	19153	HKG	3,334	396	3,345	11
P11	20297	HKG	3,622	304	3,635	13
P12	20426	HKG	3,620	403	3,460	20
P13	19522	HKG	4,156	300	4,165	9
	21,195	계	23,790	2,670	23,865	75
		총계	185,224	20,629	185,394	170

첨부 C: 사진

사진 1: 항공기



사진 2: 활주로 상의 잔해분포

(거리기준: 활주로33L거리등 5, 중앙선)

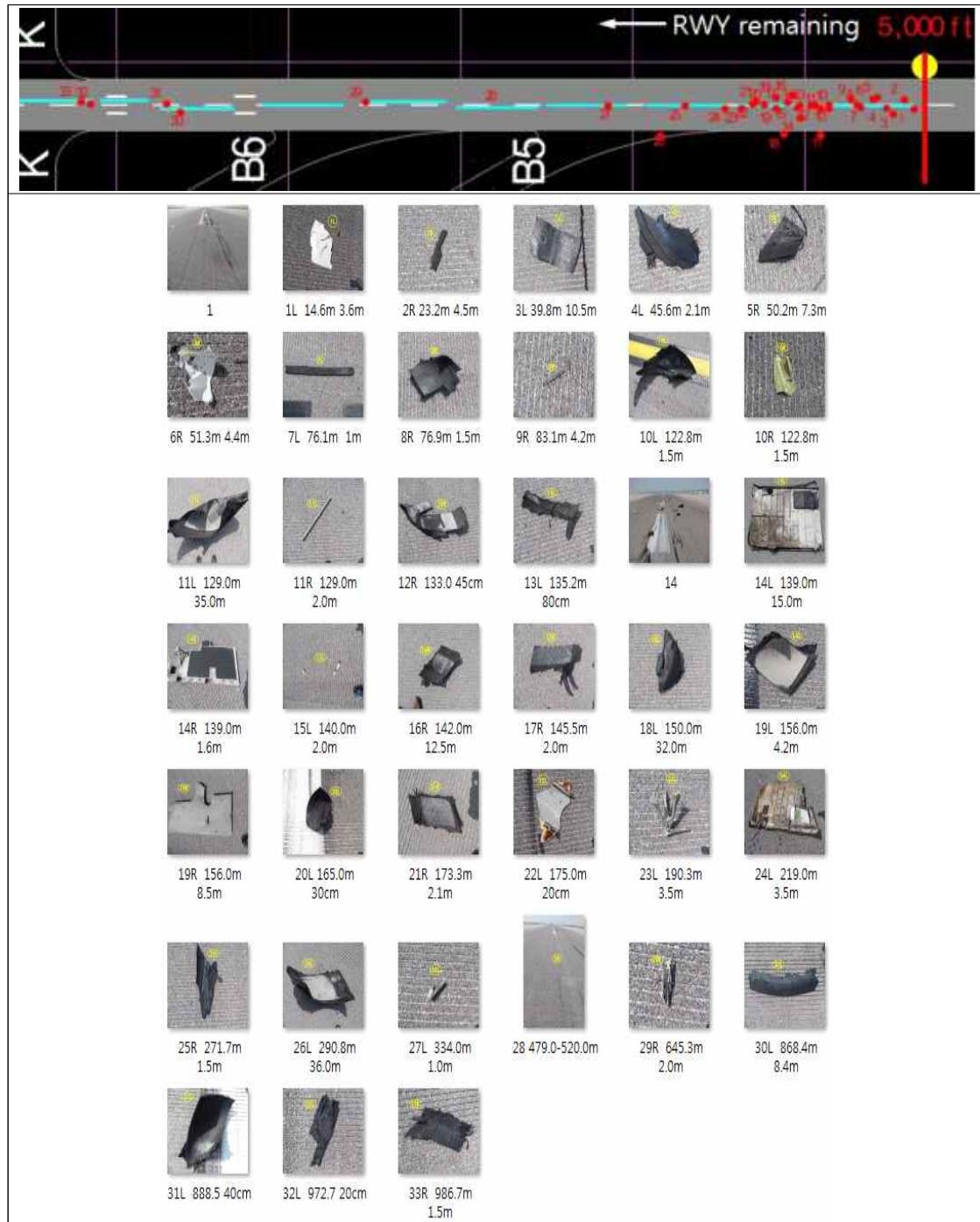


사진 3: 손상된 Apporoach Lights & localizer antenna

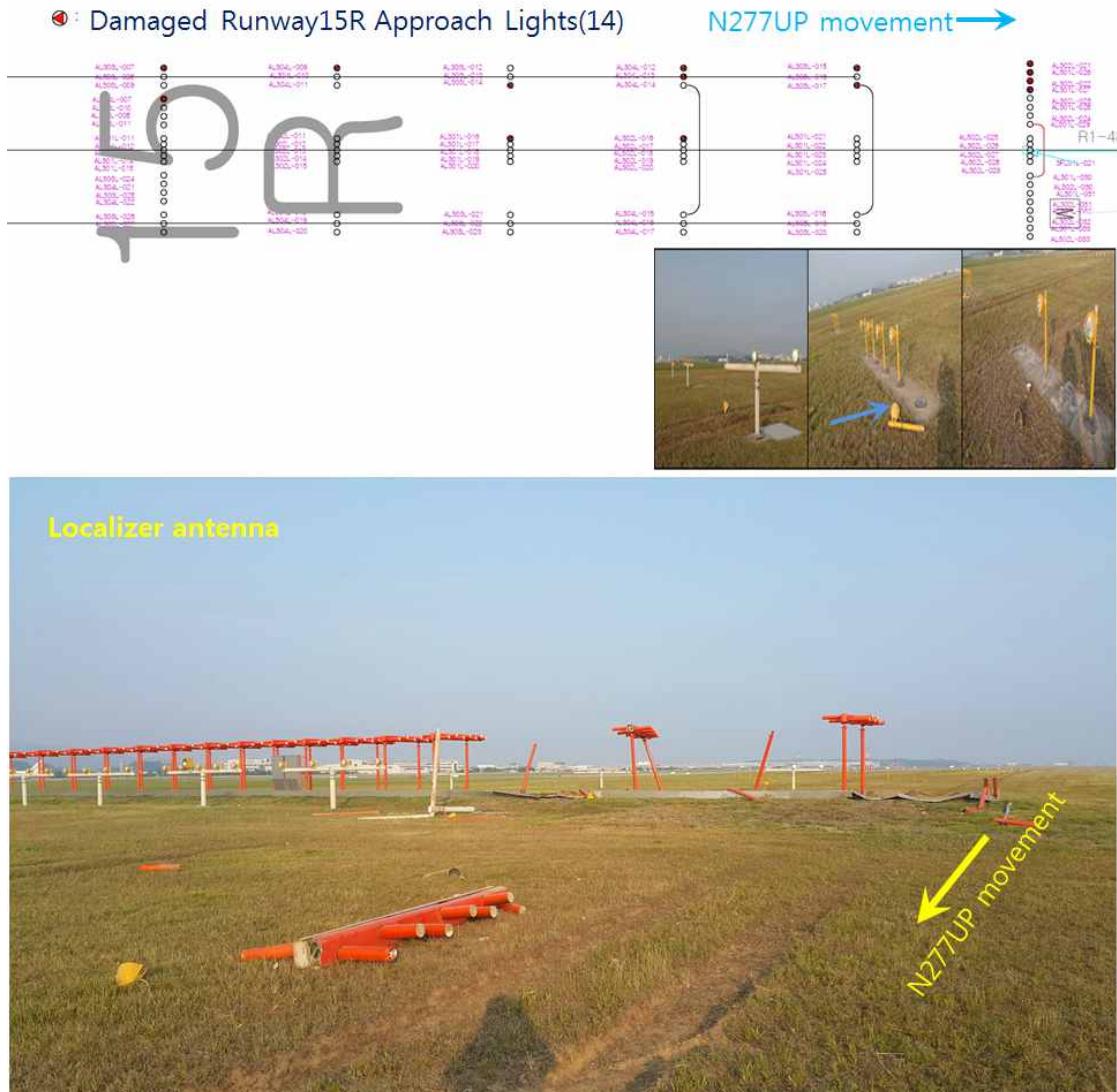


사진 4: MD-11 제원

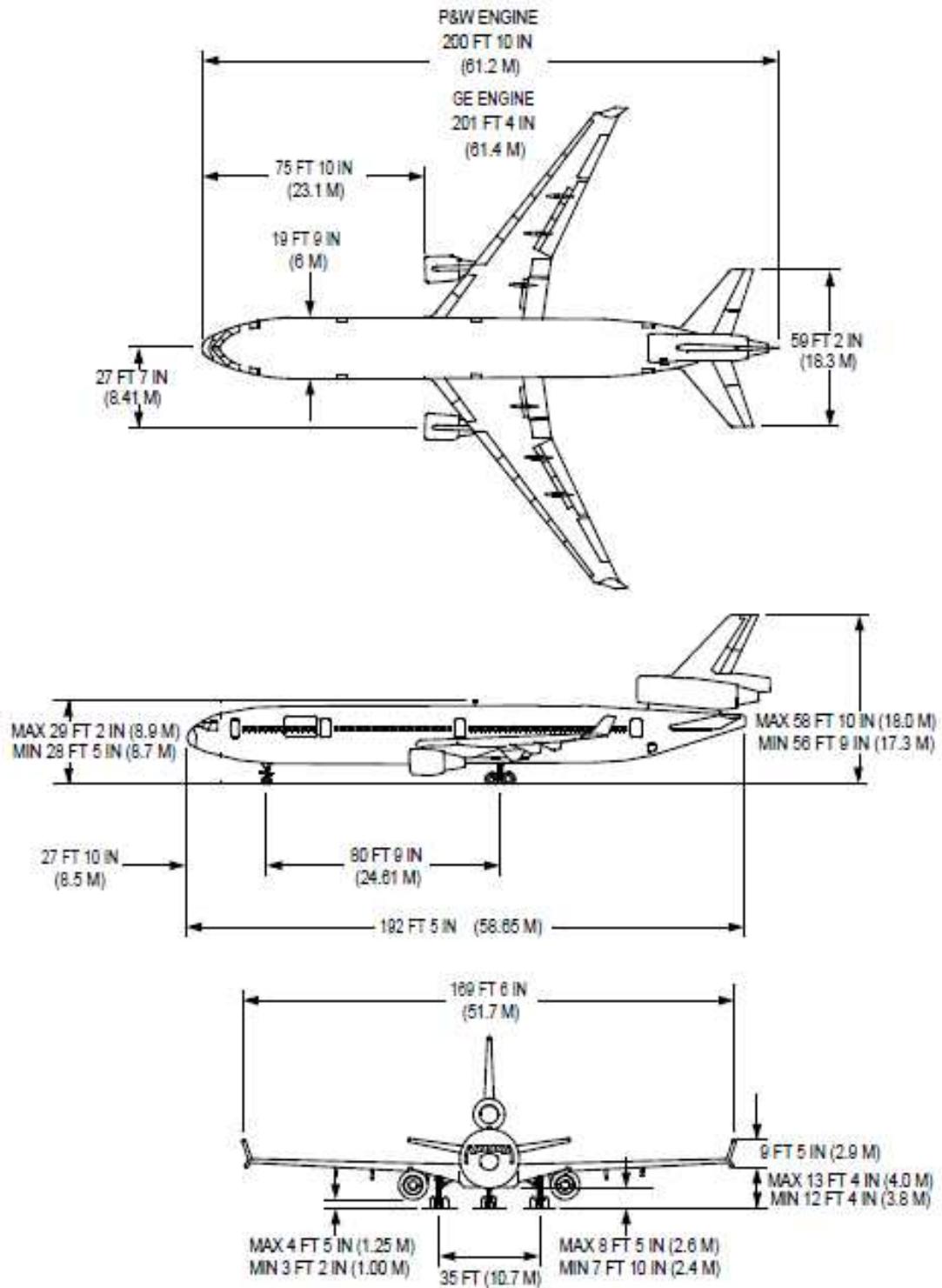


사진 5: #9 & #10 Tire (중앙착륙장치)

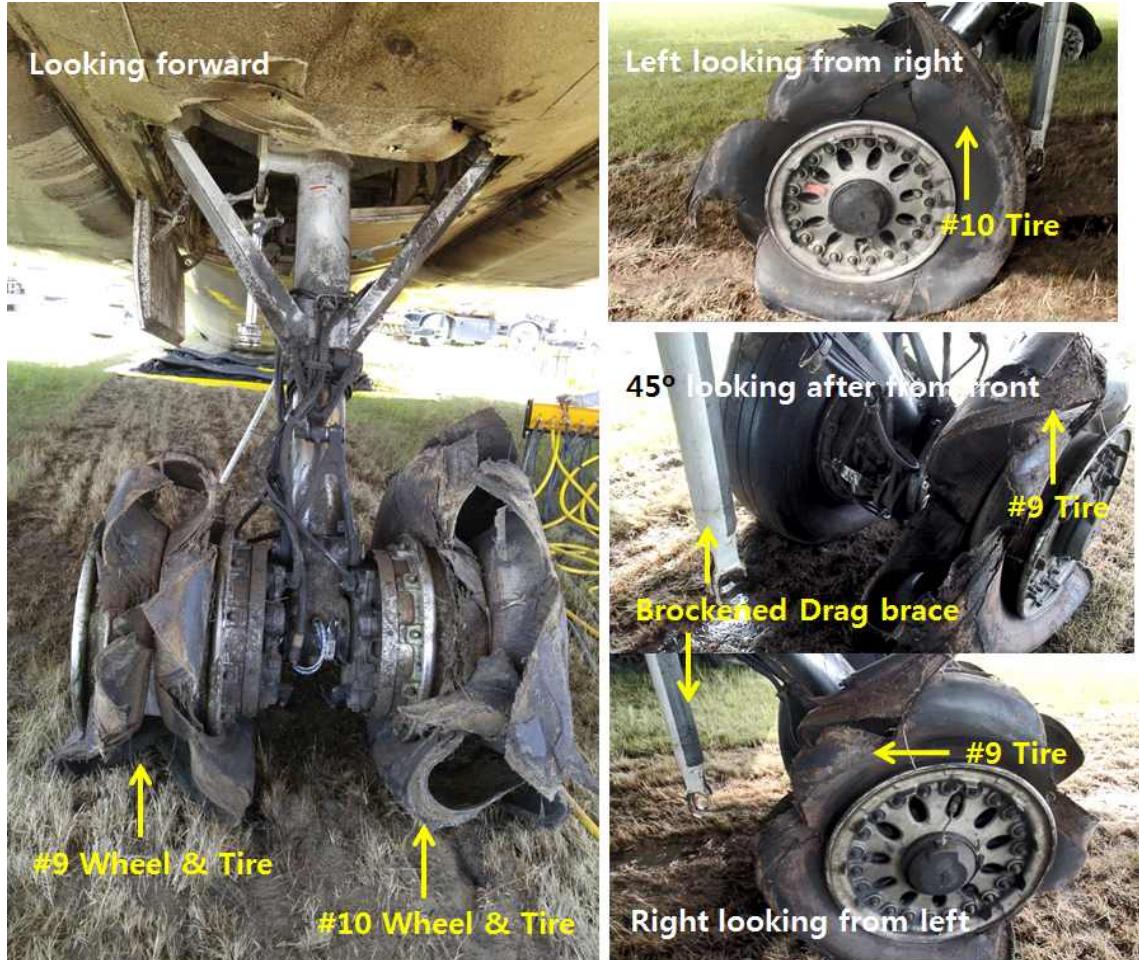


사진 6: 항공기 손상

