

解說

이륙단념과 이륙결심속도의 효율적 적용에 관한 고찰

노건수*, 유광의**

A Review on Rejected Takeoff and Flexible Use of Takeoff Decision Speed

K. S. Noh*, K. E. Yoo**

목 차

- I. 서론
- II. 이륙단념 인증기준
 - 1. 이륙결심속도(V1)
 - 2. 가속정지거리 인증기준
 - 3. 가속진행거리 인증기준
- III. 실제 운항 분석
 - 1. 이륙단념에 관한 기존 연구
 - 2. 현행 이륙단념 절차
 - 3. 이륙단념절차 대안
 - 4. 이륙결심속도 적용시 기타 고려사항
- IV. 결론

I. 서 론

항공시대의 개막 이래로 이륙단념(Rejected Takeoff: RTO)은 조종사에게는 달갑지 않은 그러나 피할 수 없는 부분으로 인식되어왔다. 이륙할 때는 언제나 이륙단념을 해야할 수도 있고, 이륙단념 중 취하는 조작으로 인해 발생하는 연쇄적인 문제들에 직면할 수도 있다. 역사적으로 볼 때 이륙단념을 하는 경우가 이륙 3,000 번에 한번 꼴로 발생하고 있다.

† 2002년 9월 10일 접수

* 정희원, 대한항공 운항훈련원 전문교관
연락처자, E-Mail : nks2919@hanmail.net
서울특별시 강서구 공항동 1370

** 한국항공대학교 항공교통물류학부 조교수

그러나 업계에서도 인정하듯이 많은 이륙단념의 경우들이 보고되지 않기 때문에 실제로는 매 2,000 번의 이륙마다 한번 꼴로 이륙단념이 일어나는 것으로 추정한다.¹⁾ 예를 들어, 조종사가 이륙활주 중 이륙경고음으로 인해 저속에서 이륙단념을 한 후, 다시 활주로로 돌아와 이륙을 계속하는 경우는 이륙단념이라고 보고되지 않고 있다. <표 1> 은 이륙단념 및 이로 인한 사고/준사고 (Accident/Incident)²⁾현황을 보여주고 있다.

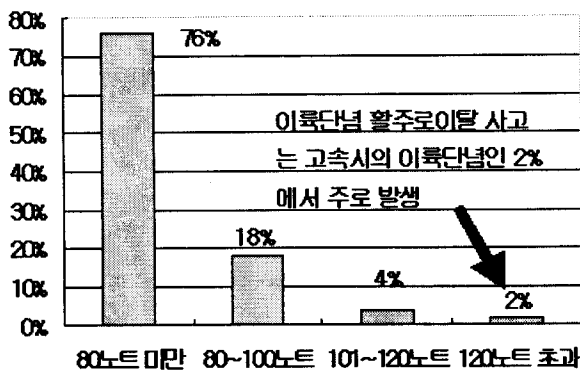
<표 1> 이륙, 이륙단념, 활주로이탈 횟수 (자료: 미국 NTSB/SIR-90/02)

항목 \ 연도	1990년 까지	1991년에서 1995년까지
이륙	230,000,000	18,000,000
이륙단념	76,000	6,000
이륙단념시 활주로이탈 사고 / 준사고	74	6

- ▷ 이륙 3,000번 당 이륙단념 1회
- ▷ 이륙 3,000,000번 당 이륙단념 활주로이탈 사고/준사고 1회

기종별 년평균 이륙횟수를 고려한다면 장거리 위주의 B747 조종사는 20년에 한번 정도로 이륙단념 상황에 직면하지만, 단거리 위주의 B737 조종사는 3년에 한번 정도로 이륙단념을 한다고 볼 수 있다. 불행하게도 조종사는 이륙시 언제나 이륙단념을 결심해야 하는 경우에 대해 준비를 해야 한다. <표 2> 에서 나타난 바와 같이 이륙단념의 약 75%가 80노트 이하의 저속에서 이루어졌으며 사고(Accident)로 이어지는 경우는 드물었다.

<표 2> 이륙속도별 이륙단념 비율



(자료 : 미국 보잉사, takeoff Safety Training Aid)

1) 미국 Boeing 사 Aero Magazine 11호, 2000년 7월
 2) 통상 사망자 발생 및 항공기 파손정도가 심한 상태를 사고(Accident)라 하고, 부상자 발생 및 파손정도가 약한 상태를 준사고(Incident)로 분류한다.

그러나 약 2%는 120노트 이상의 속도에서 이륙단념을 수행하였고, 이 경우 대부분 활주로 내에서 정지하지 못하거나 준사고(Incident)로 이어졌다. 본 고찰은 이륙단념에 대한 미연방 항공청(Federal Aviation Agency: FAA)인증기준과 실제 운항시의 차이점을 분석하여 이륙단념을 보다 안전하게 수행할 수 있는 방안을 제시해 보고자 한다.

II. 이륙단념 인증기준

1. 이륙결심속도(V1)

V1-정지

최대정지속도



V1-진행

최소진행속도



<그림 1> 이륙결심속도(V1)의 두 가지 개념

민간 운송용항공기는 안전성을 확보하기 위해 이륙시 치명적 조건(critical conditions)에서도 안전하게 운항을 할 수 있어야 한다는 전제하에 항공기 성능조건을 정해놓고 있다. 이 치명적인 조건이란 엔진 한 개가 고장나는 경우로 가정하는 것인데, 이런 경우 이륙을 계속할 수도 있고 활주로 내에서 정지할 수도 있다. 이 두 가지 상황을 결심하는 기준속도를 이륙결심속도(takeoff decision speed: V1)라고 한다. V1이란 그 속도에서 정지 조작이 시작되지 않았으면, 이륙을 계속해야 하는 속도로 정의된다. 따라서 이 속도는 주어진 중량 및 활주로조건에서 성공적인 정지 또는 이륙을 계속할 수 있는 두가지 성능을 동시에 충족시키는 한 개로 표시된 속도이다. V1 개념에 있어서 중요한 가정은 이륙을 계속하거나 단념하는 결심이 기준속도인 V1에 도달하기 전에 이루어져야 한다는 것이다. <그림 1>에 나와 있는 바와 같이 미국 연방항공규정(FAR)³⁾에 나와 있는 이륙결심속도의 정의는 두가지 개념을 포함하고 있는데, 첫째는 가속-정지할 때의 최대속도이고, 둘째는 이륙-계속할 때의 최소속도라고 명시되어 있다.

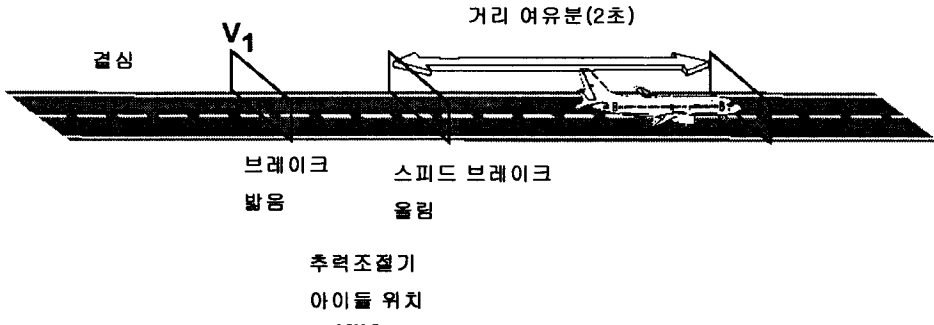
2. 가속-정지 거리 인증기준

가속정지거리(Accelerate-Stop Distance) 인증을 위한 시험비행에서 항공기 속도는 사건(event)⁴⁾이 발생하는 것으로 가정하는 지점까지 가속된다. V1은 이런 사건의 1초 후에 발생한다. 정지하기 위해 브레이크를 밟고, 추력조절기의 아이들(Idle) 위치⁵⁾, 스피드브레이크⁶⁾를 올림

3) Federal Aviation Regulation, Part 1

4) 이전에는 엔진이 고장나는 것으로만 간주했으나 현재는 포괄적 의미로 사용.

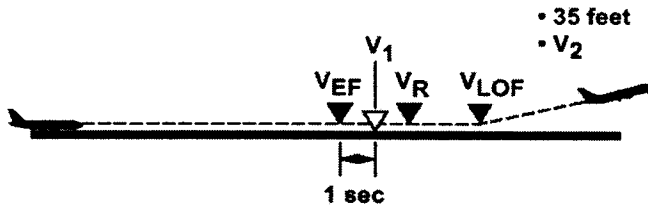
등을 여러 번 수행한 평균시간을 계산하여 가속-정지거리를 산출한다. <그림 2> 에서와 같이 사건발생과 사건발생을 조종사가 인지한 사이의 시간을 1초로 가정한다. 그리고 나서 조종사 반응시간에 대한 여유분을 주기 위해 추가로 2초에 해당하는 거리를 더 준다.⁷⁾ 항공기 비행규정(Airplane Flight Manual)의 가속-정지(Accelerate - Stop) 성능자료는 임무조종사가 이륙을 단념하는 첫 번째 조작을 V1에서 시작하는 것을 근거로 하고 있다.



<그림 2> 가속정지거리 인증기준

3. 가속-진행 거리 인증기준

<그림 3>에 나와 있는 바와 같이 가속진행거리(Accelerate-Go Distance) 인증을 위한 시험비행에서 항공기는 가장 치명적(critical)인 엔진이 고장나는 속도(V_{EF})⁸⁾까지 가속된다. 이 속도의 1초 후가 V₁ 이다. 가속진행거리는 엔진이 고장난 후 항공기를 계속 가속하여 35 피트(10.7 미터)의 고도를 이룰 때까지의 거리를 말한다.⁹⁾



<그림 3> 가속진행거리 인증기준

7) FAA Advisory Circular 27-7A, 개정 1

8) Engine Failure Speed: 엔진고장속도

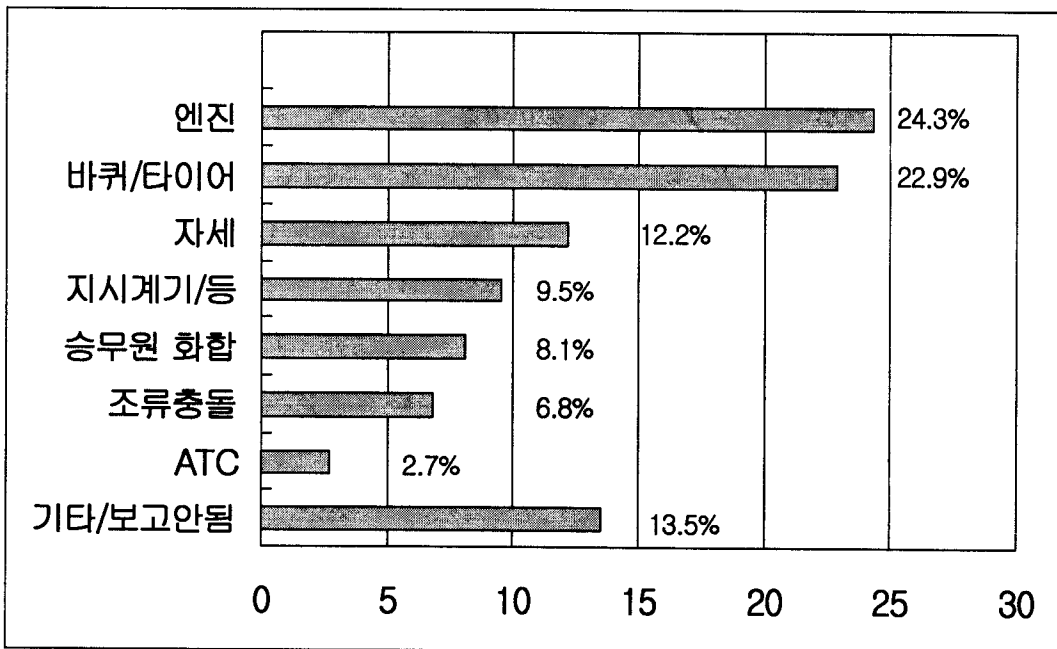
9) V₁ 이후 V_R 은 이륙전환속도, V_{LOF} 는 Main Gear 가 부양하는 속도, V₂ 는 규정된 고도를 이루는 이륙안전속도.

III. 실제 운항 분석

1. 이륙단념에 관한 기존 연구

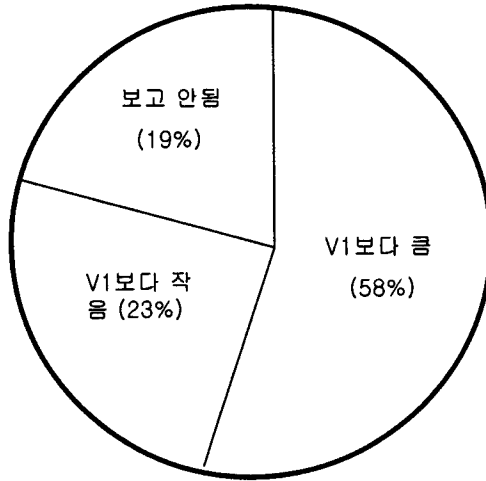
1985년에 미국 항공우주국(NASA)에 의해 운용되는 Convair 990 항공기(이륙중량 200,000 파운드의 4발 엔진 민간항공기)가 이륙조작 중 타이어 파열로 인하여 이륙단념을 수행하는 과정에서 화재가 발생하여 파손되었다. 19명의 승객 및 승무원 전원은 부상없이 무사하였으나, 이 사고는 NASA가 이륙단념에 대한 연구를 시작하도록 하는 계기가 되었다. 미국 보잉사에서 1959년부터 1990년까지 이륙단념에 관련된 사고와 준사고에 대한 조사를 시작했다. 먼저 보잉사의 조사는 이륙단념 절차수행 중 실패한 74건에 대해 조사하였고, 그 다음으로 활주로이탈(overrun) 원인에 대해서도 조사하였다. V1 인증이 엔진고장을 가정한 것이고, 또한 모의비행장치 훈련도 대체로 엔진고장에 치중하여 실시하였음에도 불구하고, <표 3>에 나타난 바와 같이 추력의 비정상으로 인한 이륙단념이 전체 중 24% 만 해당된다는 것이 이 조사에서 증명되었다. 나머지는 바퀴와 타이어 문제로 인한 이륙단념이 23%를 차지했고, 그 외에 항공기자세 부적절, 승무원간의 비협조, 조류 충돌, ATC 위반 및 기타사항이 이륙단념 건수의 53%를 차지했다. 더욱이 이러한 사고의 54%가 승무원이 그 원인을 제대로 판단하지 못하여 발생했다고 밝혀졌다. 보잉사는 조사한 74건의 이륙단념 사건 모두가 활주로 이탈을 초래했기 때문에 이에 대한 원인을 별도로 조사하였다.

<표 3> 이륙단념의 주요 수행원인 (자료 : 미국 보잉사)



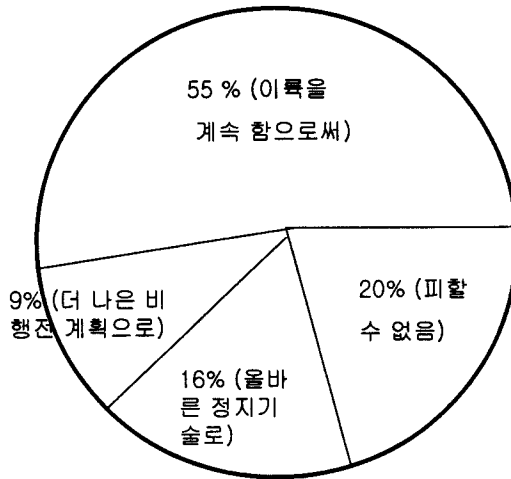
% 비율 (총 74건 중)

<표 4> 이륙단념 시작 속도 (자료 : 미국 보잉사)



<표 4> 에서 나타난 바와 같이, 활주로 이탈의 반 이상(58%)이 V1을 지나서 이륙단념이 시작되었다는 것은 주목할 만한 점이다. 또한 <표 5> 에서 보듯이, 이륙단념 사고/준사고의 약 80%는 실제로 피할 수 있었던 것으로 나타났다.

<표 5> 이륙단념 사고방지 대안 (자료 : 미국 보잉사)



2. 현행 이륙단념 절차

이륙단념 결심은 기장만이 할 수 있으며, 기장은 V1 속도까지 제동조작을 시작할 수 있도록 결심하여야 한다. 속도가 80노트 이전에는 시스템 고장, 비정상적 소음 또는 진동, 타이어 고장, 비정상적으로 느린 가속, 엔진 고장, 엔진 화재, 부적절한 항공기자세 경고, 예상된 윈드쉬어

비정상적으로 느린 가속, 엔진 고장, 엔진 화재, 부적절한 항공기 자세 경고, 예상된 윈드쉬어(Wind Shear) 경고, 또는 비행하기에 안전치 못하거나 비행 불가능한 경우에 반드시 이륙단념을 하도록 되어 있다. 그리고 80노트 이후에는 엔진 고장/화재, 예상된 윈드쉬어 경고, 또는 비행하기에 안전치 못하거나 비행 불가능한 경우에 이륙단념을 하도록 규정되어 있다.¹⁰⁾ 현재 한국내의 항공사들이 사용하는 표준절차는 항공기제작사에서 만든 항공기 비행규정(AFM)의 속도표(Speed Card)에서 V1 속도를 찾아 사용한다. 이 속도표에는 항공기의 무게와 고양력장치인 플랩의 사용 정도에 따라 적절한 속도들이 선정되어 있다. 그러나 이러한 속도들은 FAA 가 인정하는 최소한의 시간만을 포함하고 있다. 더불어 V1에 대한 정의가 “이륙결심속도(Takeoff Decision Speed)”라고 언급되어 있다. 그러나 이 용어는 항공기가 그 속도까지 가속되어, 그 속도에서 이륙을 계속할 것인가 아니면 단념할 것인가를 결정한 이후 조작을 취해도 성공할 수 있을 것 같은 의미를 내포하고 있는 듯 하다.

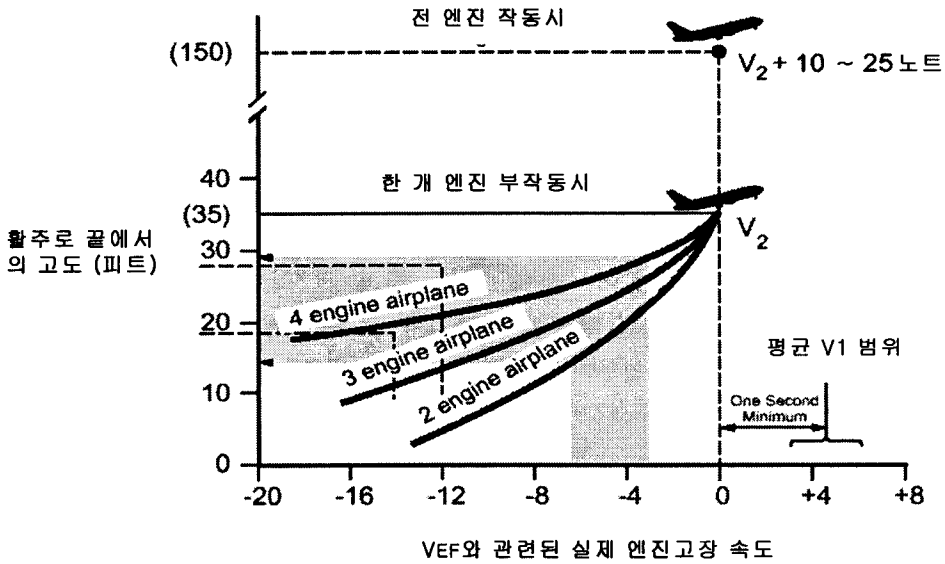
3. 이륙단념절차 대안

1970 년대에 미국 보잉사에서 모의비행장치로 수행한 연구에 의하면 엔진 화재나 고장을 제외한 상황에서는 조종사가 이륙단념을 수행하는데 3초에서 7초가 소요되는 것으로 나타났다.¹¹⁾ 이것은 고속에서의 이륙단념이 활주로이탈의 가능성이 높다는 것을 의미한다. 왜냐하면 엔진고장의 경우 이륙단념 수행에 3초 정도가 걸린다면, V1 부근에서 엔진고장이 발생하는 경우 V1 을 지나서 이륙단념 조작을 수행할 가능성이 크다. 만일 V1 을 1초 지나서 제동조작을 시작하게 되면 활주로 끝에 도달했을 때 항공기속도가 50노트 정도(시속 80 킬로미터)가 되고, 2초 지나서 제동조작을 하게 되면 70노트(시속 112 킬로미터) 정도가 된다. 이것은 제동조작이 약간만 늦게 시작되어도 감속이 제대로 되지 않아 활주로 끝에 도달했을 때의 항공기속도가 상당히 높은 속도임을 보여주고 있다.¹²⁾ 또한 V1은 이륙계속에 대한 성능도 충족시켜야 하는 양면성이 있다. 건조한 활주로에서 V1 1초 전에 엔진이 고장나고 이륙계속시 35 피트를 이루어야 한다. <그림 4>에서는 V1 이 1초 보다 더 먼저 고장이 나는 경우 도달되는 고도를 보여주고 있다. 예를 들어, V1 - 4 노트인 경우(즉, 엔진이 V1 2초 전에 고장나는 경우)는 쌍발엔진 항공기가 활주로 끝에서 20 피트의 고도를 이루고, 3발엔진 항공기는 25 피트, 4발엔진 항공기는 30피트 정도를 이룬다. 이것은 엔진이 미리 고장나서 가속하는 데 거리가 더 필요하기 때문이다. 또한 엔진이 고장나지 않은 경우는 활주로 끝을 150 피트의 고도로 통과하게 된다. 이륙단념절차 개선에 관한 문제는 이륙단념과 이륙계속의 위험도에 대한 비교문제이다. 이륙계속의 경우가 더 안전여유분이 있다는 것에 주목할 필요가 있다. 항공기 비행규정에 나와 있는 대로 엔진이 V1 이전에 고장나서 이륙을 계속 하는 경우 활주로 끝에서 35 피트 고도를 이루게 된다.

10) Boeing 747-400 Operations Manual

11) Boeing Aero Magazine 11, Rejected Takeoff Studies, July 2000

12) Boeing Airliner OCT-DEC, 1986



<그림 4> 이륙결심속도 감소 적용시 도달 고도
(자료 : 대한항공 Flight Operating Manual)

그러나 35 피트를 이루지 못하더라도 사고나 준사고에 반드시 연관되는 것은 아니다. 그러므로 이륙계속의 경우가 이륙단념보다 추가적 안전여유분이 더 있다고 할 수 있다. 따라서 이륙계속을 강조하고 이륙단념 시에도 적절한 조종사 반응시간을 보장해줄 수 있다면 보다 안전한 이륙단념 절차가 될 수 있을 것이다. 위에서 살펴본 내용을 종합하여 다음과 같은 이륙단념절차에 대한 대안을 제시해 보고자 한다. 첫번째로, 해당 속도표에서 V_1 을 구한 후에 여기에서 8 노트¹³⁾를 빼고 그 속도를 속도계에 설정한다. 이것은 이륙단념시 조종사 반응시간을 3초 정도를 보장하는 것이다. 이 경우 만일 엔진고장 상태에서 이륙을 계속한다면 활주로 끝에서 15 피트(쌍발엔진 기준)에서 25 피트(4발엔진 기준) 정도를 이루게 되는데, 이것은 <표 6>에 나와 있는 바와 같이 습윤활주로(Wet Runway), 윤활활주로(Slippery Runway) 및 오염활주로(Contaminated Runway) 상태의 기준과 같거나 약간 높게 되므로 큰 문제가 되지 않는다. 두번째로, 100 노트 이상에서 속도 불러주기(Call-out)를 추가한다. 100 노트 이상에서는 엔진의 고장/화재와 비행할 수 없는 급박한 경우에만 이륙단념을 하도록 한다. 현행 이륙단념절차 중 80 노트 불러주기는 고속도영역에 진입했다는 것을 알려주기에는 약간 낮은 속도이다. 원래 80 노트 불러주기는 인증된 항공기 성능이 80 노트까지는 이륙추력에 도달해야 하는 기준을 점검하도록 하기 위함이다. 현재 항공사에서 운용하는 운송용 항공기 중 제일 작은 기종이며, 최대 109명이 탑승할 수 있는 Fokker-100 항공기의 V_1 은 122 노트¹⁴⁾(중량 80,000 파운드 기준, 60명 탑승기준) 정도이다. 이 속도는 100 노트와 5초 정도의 여유가 있으며, 엔진 고장이 그 1초 전에 발생하는 것을 감안하면 6초의 반응

13) 초당 가속도가 4 노트 정도이므로 약 2초에 해당.

14) Fokker-100 Takeoff Weight Limitation Table

시간이 있는 것이다. 따라서 100 노트 이상에서는 엔진고장 이외는 이륙을 계속하도록 방침을 정하도록 한다. 첫 번째 항목과 연계하여 적용한다면, 122 노트에서 8 노트를 빼서 실제 V1으로 사용하는 경우에도 3.5 초의 여유가 있고 엔진고장으로부터 4.5 초의 여유가 있으므로 엔진고장시의 평균 반응시간인 3 초보다 여유가 있다.

<표 6> 활주로 상태별 이륙성능 산정 기준 (자료 : FAA Advisory Circular 91-6B)

항 목	활주로 상태	건조 활주로	습윤 활주로*)
역추진 장치		고려 안함	고려 함
활주로 끝 고도		35 피트	15 피트
제동계수 기준		건조 활주로	습윤 활주로
개방구역**) 포함 여부		포함 시킴	포함 안됨

주: *) 윤활(slippery), 오염(contaminated)활주로를 포함.

**) 항공정보간행물(AIP)¹⁵⁾ GEN 2.2 에서 clearway 에 대한 번역용어 사용.

이와 같이 이 두 가지를 함께 적용하게 되면 이륙단념 시에는 적절한 조종사 반응시간을 보장하여 사고를 예방하고, 또한 사고조사에서 나온 바와 같이 이륙을 계속 하었다면 방지할 수 있는 부분을 보장하기 위해, 100 노트에 대한 속도 불러주기(Call-outs)를 추가하여 고속도 영역에 진입했음을 알려주고, 그 이후에는 엔진고장/화재 이외는 이륙을 계속하도록 하면 이륙단념에 대한 사고예방을 할 수 있을 것이다. 세 번째로, 활주로 조건이 눈,비 또는 빙판져 있는 경우에는 V1 을 8 노트 감소하여 적용하지 않는데, 이것은 이런 조건에서 이륙계속시 규정고도가 15피트이기 때문에 적용하는 경우 활주로 끝에서 거의 부양이 안될 수도 있으므로 장애물통과에 문제가 될 수 있기 때문이다. 따라서 종합적으로 아래와 같은 이륙단념절차 대안을 제시하고자 한다.

- 1) V1을 해당 속도표에서 구한 후에 여기서 8노트를 빼고 그 속도를 속도계에 설정한다. 어떤 경우에도 8노트를 감한 속도가 최소지상조종속도¹⁶⁾(Ground Minimum Control Speed : VMCG) 이하로는 되지 않는다.
- 2) 이 새로운 속도가 지나기 전에 V1 이라고 불러주고 이륙을 계속한다.
- 3) 활주로나 눈, 비 또는 빙판져 있을 경우에는 8노트 감하는 것을 적용하지 않는다.
- 4) 100노트에서 속도를 불러주고, 100노트 이상에서는 단지 엔진의 고장이나 비행할 수 없는 상황과 같은 급박한 경우에만 이륙단념을 한다.
- 5) 이륙 중 상승성능을 높이는 절차(Improved Climb Method)에서도 8노트를 감해서 적용한다.

15) Aeronautical Information Publication. 국가에서 발행함.

16) 엔진고장시 방향타 만으로 방향을 유지할 수 있는 최소속도.

4. 이륙결심속도 적용시 기타 고려사항

항공기를 인증하는 시험비행 기준과 실제 운항과는 차이가 있을 수 있으므로, 다음과 같이 실제 경험에서 얻는 자료를 이용한다면 이륙단념을 안전하게 수행하는 데 도움이 될 수 있을 것이라고 생각한다.

- 1) 만약 바람이나 기타 특별한 고려사항이 없을 때, 의심스럽다면 항상 가장 긴 활주로를 이용한다. 활주로의 길이는 안전을 확보하기 위해 가장 중요하다.
- 2) 초기 및 정기훈련 시에는 이륙계속/이륙단념(Go/No-Go)에 대한 선택의 중요성을 강조한다. 모의비행장치 훈련시에는 무풍상태와 항공기의 최대이륙중량인 상태 및 최소한의 짧은 활주로에서 훈련을 실시할 수 있도록 한다. 자신감이 있을 때까지 이러한 상태에서 반복 연습한다.
- 3) 모든 관련 간행물의 내용을 이해하고 일반적인 지식과 상식을 가미하도록 한다. 간행물(Jeppesen Charts 등)에 나와 있는 활주로를 길에서 항공기를 활주로에 정대시키기 위해 소요된 거리를 빼서 적용한다.
- 4) 무덥고 맑은 날은 현 상태보다 약간 높은 온도의 성능자료를 적용한다.
- 5) 활주로 경사와 활주로 중간의 구름이나 움푹 꺼진 부분에 대해 항상 유의하고 적절히 조치한다.
- 6) 오염된(Contaminated) 상태의 활주로 상에서 비행하게 될 것이라는 것을 항상 염두에 둔다. 조종사의 판단은 최악의 상태를 고려해야 한다. 즉, 건조하지도 매끈하지도 않은 활주로 상태와, 최소한의 짧은 활주로에서 조작하는 것에 대비를 하면, 기타 다른 조건에서의 운영은 더욱 안전하게 조작할 수 있을 것이다.
- 7) 브레이크와 타이어의 마모, 혹은 그 이전의 착륙시나 장시간의 활주에 의해 생성된 잔류 열로 인한 변화는 항공기성능 계산시 포함되지 않았다.
- 8) 모의비행장치로 시험해 본 결과 이륙단념 시에 최대 브레이크를 적용하는 조종사는 극히 일부에 불과하다. 항공기 인증시의 성능기준은 최대 브레이크를 사용하는 것이다.

IV. 결 론

이륙단념에 관한 문제를 해결하기 위해서는 해당 항공사 조종사들의 사건(Event)별 반응시간을 정확하게 측정하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 특별한 측정장비가 필요한데 현재 국내에서 운용되는 모의비행장치(Simulator)로는 측정이 불가능하기 때문에 외국의 특수장비를 임대하여 수행하여야 한다. 측정 후 어느 정도의 합리적인 반응시간을 보장하여 주는 절차보완이 필요하다. 실제로 엔진고장의 경우가 드물기 때문에 이런 경우를 대비하여 많은 돈을 투자하는 것은 비용 대 효과의 문제이다. 따라서 기존에 분석된 사고조사 자료와 현행 규정을 이용하여 어느 정도 안전을 보장할 수 있는 방안을 마련해 보는 것도 바람직한 일이라고 할 수 있겠다. 물론 이런 절차개선은 기존의 인증절차를 변경하는 것이기 때문에 항공당국의 인가를 받아야 함은 당연한 일이다.

참고 문헌

- (1) Boeing Company, "Rejected Takeoff Studies," Aero Magazine 11, July 2000.
- (2) U.S. National Transportation Safety Board, "Investigation Report: Runway Overruns Following High Speed Rejected Takeoffs," NTSB/SIR-90/02, Feb. 1990.
- (3) Boeing Company, "Takeoff Safety Training Aid," 1992.
- (4) FAR Part 1, "Definition and Abbreviations," 2000.
- (5) FAR Part 25, "Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes," 2000.
- (6) U.S. FAA Advisory Circular 27-7A, "Flight Test Guide for Certification of Transport Category Airplanes," 1998.
- (7) Boeing, "QRH, Non-normal Maneuvers," 747-400 Operations Manual, Dec. 2001.
- (8) Korean Air, "Flight Operating Manual," July 2002, Chap. 20.
- (9) Boeing Company Airliner, "Go/No-Go Philosophy," Oct.-Dec. 1986.
- (10) Fokker-100 AFM, "Takeoff Weight Limitation Table," 1993.