

항공기 착륙거리의 여유분 산정에 관한 연구

A Study on the Allowances of Aircraft Landing Distance

노건수*, 김웅이*⁰

Kun-Soo Noh*, Woong-Yi Kim*⁰

요 약

운항의 여러 단계 중 착륙단계에서 조종사들이 많은 부담을 느낀다. 이는 조종사들이 항공기 속도를 줄이고 접지하여 완전히 정지하는 동안 착륙안전에 영향을 미치는 여러 요소가 있기 때문이다. 만일 착륙하는데 활주로 길이가 충분하다면 부담이 적을 수도 있다. 그러나 항상 그런 경우만 있는 것은 아니다. 따라서 착륙능력이 제한범위 내에 있는지 아닌지를 확인할 필요가 있다. 필요착륙거리는 시험비행 조종사에 의해 실증되어진 실제 착륙거리에다가 항공사의 평균적인 조종사들을 위한 여유분을 포함한 것이다. FAR의 AFM(항공기 비행규정) 인가는 건조 및 습윤 활주로에서 수동착륙을 기반으로 한다. 기타 다른 활주로 조건에서는 인가가 필요하지 않다. JAR에서는 방설/윤활활주로에서도 정해진 여유분을 포함시키도록 규정하고 있다. 자동착륙은 인가사항이 아니므로 실제착륙거리만 제공된다. 본 논문에서는 각 활주로 조건에서 포함된 거리 여유분을 분석하고자 한다. 또한 특정한 활주로 조건에서 여유분이 규정되어 있지 않은 경우 대안을 제시하고자 한다.

Abstract

Among the phases of flight operations pilots feel much pressure in landing segment. There is a number of factors affecting landing safety while pilots reduce aircraft speeds and make a touchdown and stop completely. If runway length is sufficient for landing, there maybe is no problem. But it is not the case all the time. So it is necessary to confirm whether landing performance is within limits or not. Required landing distance is actual landing distance demonstrated by flight test pilot plus allowances for average airline pilots. FAR(Federal Aviation Regulations) AFM certification is based upon manual landing for dry and wet runway. Other runway conditions are not the certification basis. JAR dictates even contaminated/slippery runway is included by prescribed allowances. Automatic landing is not certification basis, so actual landing distances are provided. In this paper I would like to analyze distance allowances included in each type of runway condition. In addition there is no regulation about allowances for specific runway condition, I would suggest adequate allowances for that case.

Key Words : Landing segment, Allowances, AFM, Certification basis, Joint Airworthiness, Requirements.

I. 서 론

항공기 운항에서 착륙구간은 조종사가 상당히 부

* 한서대학교 항공교통학과(Dept. of Air transportation, Hanseo University)

· 제1저자(First Author) : 노건수(Noh Kun-Soo)

0 교신저자(Corresponding Author) : 김웅이(Kim Woong Yi, Tel:+82-41-671-6223, email : wykim@hanseo.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 5월 28일 · 심사(수정)일자 : 2013년 5월 28일 (수정일자 : 2013년 6월 23일) · 게재일자 : 2013년 6월 30일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.3.279>

담을 느끼는 구간이다. 공중에서 속도를 줄여가면서 안전하게 접지하고 활주로 내에서 완전히 정지시키는 동안에 영향을 미치는 변수가 많다. 항상 활주로 길이가 충분하다면 부담이 적겠지만 그렇지 않은 경우도 많으므로 해당 조건에서 활주로길이의 여유분이 어느 정도인지를 확인하면서 착륙성능을 계산하는 것이 필요하다. 항공기 비행규정(AFM: Airplane Flight Manual)의 성능(performance)편에 나와 있는 항공기 착륙거리(landing distance)는 항공기제작사의 시험비행 조종사가 수행(demonstration)한 결과에다가 항공사의 평균적 조종사와의 기량차이를 보정한 것이다. 즉, 실제 착륙거리(actual landing distance)에다가 여유분(allowances)을 포함한 필요 착륙거리(required landing distance)를 제공한다. FAR의 AFM 인가사항은 수동착륙(manual landing)을 기준으로 건조 활주로(dry runway)와 습윤 활주로(wet runway)에만 여유분을 포함하도록 규정되어 있으며[1], JAR[1]에는 빙설/윤활활주로(contaminated/slippery runway)에도 여유분을 포함하도록 규정되어 있다. 자동 착륙(automatic landing)은 인가사항이 아니므로 실제 착륙거리를 보충자료로 제공한다. 따라서 본 논문에서는 착륙형태 별로 실제착륙거리가 어떻게 산출되며, 이를 기준으로 하여 여유분을 포함한 필요착륙거리와의 관계를 살펴보고자 한다. 또한 활주로 상태에 따른 여유분 포함여부를 살펴보고, 규정에 의해 포함되지 않은 경우 적정한 여유분을 제안하고자 한다.

II. 실제 착륙거리 산출 기준

2-1 수동착륙

2-1-1 실제 착륙거리

항공기가 활주로 시단 상공 50피트에서 완전히 정지하는 지점까지를 실제착륙거리라고 한다. 이 거리는 다음의 조건을 가정한다[2].

- ① 착륙속도(VREF)는 $1.23 VS_1-g^2$ 또는 $1.30 VS$

1) Joint Airworthiness Requirements: 유럽통합 감항요건
 2) 계수 1.23은 fly-by-wire 항공기에만 적용되며, VS는 실속속

FAR을 기준으로 한다.

- ② 조종사가 최대 수동 제동(maximum manual braking)을 하며, Anti-skid system³⁾이 작동된다.
- ③ 지상 스포일러(ground spoilers)가 작동된다.
- ④ 역추진 장치(reverse thrust) 사용을 고려하지 않는다.⁴⁾

2-1-2 착륙단계 구분

수동착륙은 조종사가 수동으로 착륙조작 및 제동조작을 수행하는 것을 말한다. 활주로 시단(threshold)을 50피트로 통과하며, 착륙단계는 다음의 3가지로 구분할 수 있다.

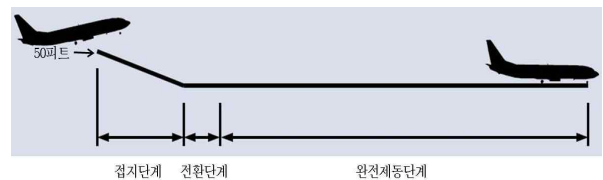


그림 1. 착륙단계 구분
 Fig 1. Landing stage segment

- ① 접지단계(Flare) - 50피트에서 접지(touchdown)까지의 구간
- ② 전환단계(Transition) - 접지에서 완전제동형태(full braking configuration)까지의 구간
- ③ 완전제동구간(Full Braking Section) - 완전제동형태에서 정지(stop)까지의 구간

2-1-3 접지단계

활주로 시단 50피트에서 접지점까지의 시간을 측정한다. FAA AC 25-7B에 의거하여 4~6 ft/s의 접지율 및 접근각 -3도를 목표로 40회 이상의 착륙을 수행하여 도출된 시간은 4.3~5초이다. 항공기 모델에 따라 약간

도(stall speed)임. 원래의 실속속도 기준을 VS FAR 이라 하고, 1986년 이후에 생긴 1 g(중력가속도)를 기준으로 한 실속속도를 VS 1-g 라고 함.

3) 미끄럼방지 시스템. 속도를 감지하여 바퀴가 미끄러지지 않도록 하여 제동을 원활하게 하는 장비.

4) FAR에는 설빙/윤활활주로에서의 실제착륙거리가 인가사항이 아니므로 역추진장치를 최소위치인 detent position 까지 사용함.

씩 다르며 이 중 인가된 하나의 시간 값을 사용한다.

$$\text{공중거리(air distance)} = \text{접지시간}50\text{-TD} \times \text{평균 속도(Vavg 50-TD)} \quad (1)$$

- 접지시간 50-TD : 활주로서단 50피트 높이에서 접지(touchdown)할 때까지의 시간.
- 평균 속도(Vavg 50-TD) : 활주로서단 50피트 높이에서 접지(touchdown)할 때까지의 평균 속도.

VREF 5)으로 접근하여 30피트 정도에서 속도를 감소시키기 위해 기수를 약간 올리는 조작(flare)을 취하기 때문에 접지는 더 낮은 속도에서 이루어진다. FAA, JAA AFM의 건조/윤활활주로 에 대한 속도비율은 $VTD / VREF \cong 0.99$ 을 적용한다. JAA 는 빙설/윤활활주로는 대해 접지시간 7초를 적용한다. ($VTD / VREF = 0.93$)

다음의 조건일 때 공중거리(air distance)를 구해보면 다음과 같다.

- 조건 : $VREF=131 \text{ ktas}$, $VTD / VREF = 0.99$,
 $VTD = 130 \text{ ktas}$, 접지시간 50-TD 은 4.5초,
 $Vavg 50\text{-TD} = 130.5 \text{ ktas}$, 바람 없음.
 공중거리 = $4.5 \text{ s} \times (130.5-0)\text{ktas} \times 1.6878 \text{ ft/s/kt} = 991 \text{ feet}$

FAR 적용 항공사는 747을 제외한 기종의 공중거리에 대해 고정값 1,000 피트를 사용하나, 747만 1,200 피트를 적용한다. JAROPS6) 적용 항공사는 모든 기종의 공중거리에 대해 고정값 1,000 피트를 적용한다.

2-1-4 접지 후 전환단계

수동조작으로 실증된 시험비행시간 또는 1초 중 긴 시간을 적용한다. 조작은 바퀴브레이크를 밟고 수

5) 착륙속도(landing reference speed: Vref)란 활주로 시단(threshold) 50피트 상공을 통과하는 속도로 착륙의 기준이 된다.
 6) Joint Airworthiness Requirements-Operations. FAR Part 121과 유사한 Operations Certifications 내용을 포함하고 있음. 미국의 FAA에 해당하는 유럽통합기관이 JAA이고, 미국 FAR에 해당하는 유럽규정이 JAR이다. 현재 JAA는 EASA(유럽항공안전청)으로 이행되고 있음.

동으로 스포일러를 작동하며, 자동스포일러 작동은 여유분으로 둔다.

2-1-5 완전제동단계

건조활주로에서 최대수동제동을 기준으로 한다. 역추진 장치(reverse thrust) 사용을 포함하지 않는다. 시험비행에서 정지거리를 측정된 후, 측정된 정지거리 내에서 항공기를 제동시키기 위해 필요한 제동력을 계산한다.

2-1-6 지상 감속을

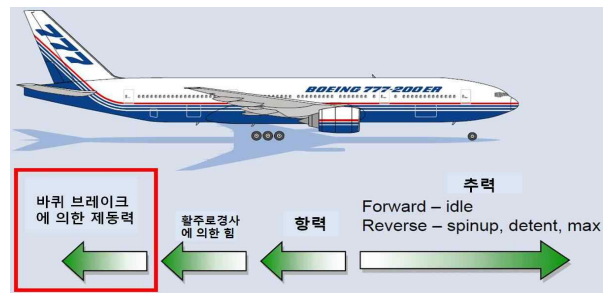


그림 2. 지상감속시 작용하는 힘
 Fig 2. The forces of Ground deceleration

지상에서 감속할 때 작용하는 힘으로 감속율을 표시하면 다음과 같다.

$$\sum \text{Forces(힘)} = \text{Mass(질량)} \times \text{Acceleration(가속도)}$$

$$\text{Thrust} - \text{Drag} - \text{Brake Force} - \text{Fslope} = \text{Mass} \times \text{Acceleration} \quad (2)$$

$$T - D - \mu B(W-L) - W \sin \Phi = \frac{W}{g} a \quad (3)$$

$\sin \Phi$ 가 작은 각이라 Φ radians 으로 표시할 수 있다.

$$T - D - \mu B(W-L) - W \Phi = \frac{W}{g} a \quad (4)$$

$$a(\text{가속도}) = \frac{W}{g} [T - D - \mu B(W-L) - W \Phi] \quad (5)$$

아래의 표를 이용하여 착륙거리를 계산하여 보면,

공중거리는 위의 예에서 언급한 991 피트이고, 지상 거리는 2,210 피트이므로 착륙거리는 두 개를 합하여 3,201 피트가 된다.

표 1. 지상 감속을 및 지상거리 산출 예
Table 1. Example of Calculating the deceleration rate of the ground and the ground distance

조건: 활주경사=0, 바람=0, 중량= 198,000 lb, 스포일러 올림, CD=0.2293, CL=-0.134, μB= 0.38

Ground Speed	Total Thrust	Dynamic Pressure	Drag	Lift	W-L	FB	Force Slope	Accel ft/s ²	Accel kt/s	Distance	Total Distance
130	800	57.22	7040	-14951	212951	80921	0	-11.7	-6.9	215	215
123	936	51.28	6310	-13399	211399	80332	0	-11.5	-6.8	215	511
113	1132	43.28	5326	-11310	209310	79538	0	-11.2	-6.7	296	798
103	1328	35.97	4426	-9398	207398	78811	0	-11.0	-6.5	277	1075
93	1524	29.33	3611	-7663	205663	78152	0	-11.4	-6.7	250	1325
83	1720	23.36	2801	-6105	204105	77560	0	-11.0	-6.5	224	1549
73	1916	18.08	2090	-4724	202724	77035	0	-10.8	-6.4	204	1753
63	2112	13.47	1486	-3519	201519	76577	0	-10.5	-6.2	183	1936
53	2308	9.54	1073	-2492	200492	76187	0	-10.3	-6.1	159	2095
43	2504	6.28	748	-1641	199641	75864	0	-10.1	-6.0	135	2230
33	2700	3.70	503	-968	198968	75608	0	-9.9	-5.9	108	2338
23	2896	1.80	301	-471	198471	75419	0	-9.8	-5.8	81	2419
13	3092	0.58	161	-151	198151	75287	0	-9.7	-5.8	53	2472
0	3347	0.00	0	0	198000	75240	0	-9.6	-5.7	25	2500

2-2 자동착륙

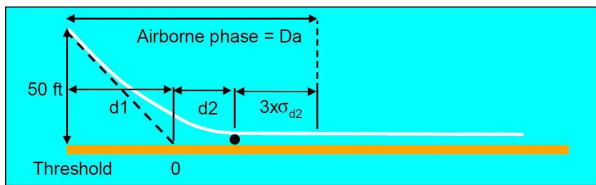


그림 3. 자동착륙의 공중단계
Fig 3. Airborne phase of automatic landing

자동착륙 시 CAT II/CAT III 접근은 VREF + 5 kt 속도를 기준으로 한다. 자동착륙 시의 필요착륙거리는 자동착륙 시의 실제착륙거리에 1.15배를 하도록 규정되어 있다. 자동착륙 시의 필요착륙거리가 수동 착륙시의 필요착륙거리보다 클 경우에는 반드시 이 거리가 확보되어야 한다. 건조활주로에서 자동착륙 시의 실제착륙거리(Actual Landing Distance)는 다음과 같이 정의된다.

$$ALD = (Da + Dg) \tag{6}$$

여기서, Da 는 공중단계의 거리이고 Dg는 지상단계의 거리이다. 공중단계 Da는 활주로시단(threshold)에서부터 glideslope⁷⁾ 지점까지의 거리(d1)에다가

7) 정밀접근(Precision Approach)에서 수직으로 유도(3도)해 주는 장비로 보통 threshold에서 1000ft 지점의 우측에 설치되어 있음.

glideslope 지점에서부터 평균 접지지점(d2)까지의 거리를 더하고, 여기에 d2의 표준편차(σd2)의 3배를 더한 거리이다. glideslope 지점에서부터 평균접지점까지의 거리(d2) 뿐만 아니라 그에 해당하는 표준 편차(σd2)는 1000회의 모의시험비행 자동착륙의 결과로부터 통계적으로 설정된 것이다[3].

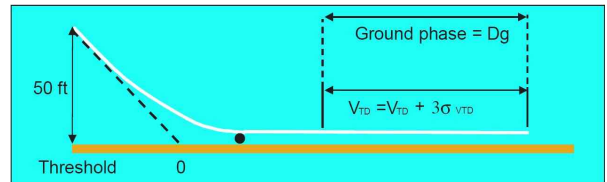


그림 4. 자동착륙 지상단계
Fig 4. Automatic landing stage of the ground phase

자동착륙의 지상단계 Dg는 수동착륙과 동일하게 결정되며, 접지속도는 평균접지속도(VTD)에다 이 속도의 표준편차(σVTD)의 3배를 더해준 것과 같다.

III. 필요 착륙거리 산출기준

필요 착륙거리(Required Landing Distance)는 실제 착륙거리에 여유분을 포함시키도록 규정한 착륙에 요구되는 활주로길이를 말한다. 이는 활주로상태에 따라 구분된다.

3-1 건조 활주로

건조활주로(dry runway)에 대한 필요착륙거리는 다음 요건을 충족하여야 한다. 터빈엔진 장착 항공기는 사용 가능한 활주로의 60% 이내에서 완전히 정지할 수 있어야 한다[4]. 즉, 실증 착륙거리에 1.67배를 하여 증가시켜야 한다. 활주로길이 전체로 보면 40%가 여유분인 것이다. 이는 활주로 시단(threshold)을 50 피트 이상 또는 VREF 속도 이상으로 통과하거나, 바람(배풍)에 의한 영향, 활주로 경사(downslope), 온도 영향을 고려한 것이다. 건조활주로에 대해서 역추진 장치(reverse thrust)에 의한 착륙거리 감소효과(5% 감소)는 포함되지 않으므로 40%의 여유분은 충분한 것으로 판단된다[5].

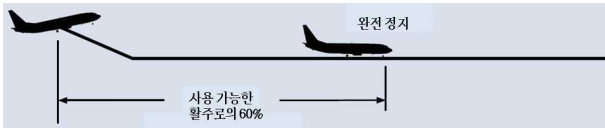


그림 5. 건조활주로의 필요착륙거리
Fig 5. Required landing distance for the dry runway

3-2 습윤활주로

습윤활주로(wet runway)에 대한 필요착륙거리는 시험비행이 필요 없이 건조활주로의 필요착륙거리에서 15%를 증가시킨다. 이 거리는 습윤활주로에서의 실제착륙거리에다 1.15배를 한 것과 거의 비슷한 값이다. 건조활주로의 여유분인 1.67배를 습윤활주로에 적용하면 필요착륙거리가 상당히 길어져서 운항에 제한을 받는 경우가 많을 것이다. 이는 운할활주로의 경우도 마찬가지다. 비가 와서 활주로는 젖어있기만 하면 운항이 제한되고, 눈이 와서 쌓이거나 약간만 녹아 있어도 운항이 제한되면 아마도 정상적인 운항을 하기가 어려울 것이다. 이런 경우 안전성과 경제성을 고려하여 타협점을 찾게 되는데 이것이 운할활주로의 습윤활주로에서의 1.15배 여유분과 역추진 장치 사용이다. 습윤활주로에서의 필요착륙거리는 건조활주로의 필요착륙거리에다 1.15배를 한 것에다 역추진 장치의 효과(9% 감소)를 고려한다면 적정하다고 여겨진다.

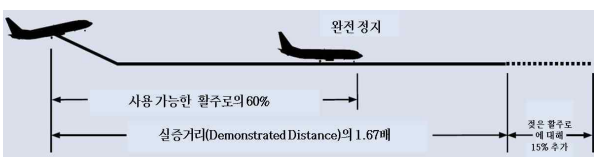


그림 6. 습윤활주로의 필요착륙거리
Fig 6. Required landing distance for the wet runway

3-3 운할 활주로

운할활주로(slippery runway)에서는 빙설(snow, ice, slush)때문에 타이어 대 지면 마찰이 감소한다. Boeing은 운할활주로는 인가받지 않은 조건으로 제동작용(braking action)에 의한 실제 착륙거리를 제공하고 있다[6]. 그러나 동일한 용어(good, medium, poor)를 사용하지만 Boeing은 실제 항공기를 이용한

항공기 제동계수(airplane braking coefficient)를 적용하고, 공항당국은 마찰측정 장비인 mu meter를 이용한다[7].

표 2. 제동작용 분류 대 항공기 제동계수 비교
Table.2. braking action vs braking coefficient

측정 마찰계수 (mu meter 장비)	항공기 제동계수 (실제 항공기 사용)	평가된 제동작용	ICAO 제동작용 등급
0.40 이상	0.2	양호(Good)	5
0.39 - 0.36		양호-보통 사이	4
0.35 - 0.30	0.1	보통(Medium)	3
0.29 - 0.26		보통-불량 사이	2
0.25 이하	0.05	불량(Poor)	1

이 두 방법은 측정객체의 중량 및 속도 차이로 인해 오차가 발생할 수 있으므로, 이를 이용한 항공기 중량 및 속도 조정에도 오차가 발생할 가능성이 있다. Boeing은 항공기 제동계수와 ICAO 제동작용 분류에 대한 연결적용을 항공사의 책임으로 전가하고 있는데, 운할활주로에서의 변수가 많아서 이 두 가지를 연결시키기가 어렵다는 이유 때문이다. 이런 이유로 Airbus는 제동작용(braking action)에 의한 착륙거리는 제공하지 않고 빙설깊이(contaminant depth)에 의한 실제 착륙거리만 제공한다[8]. 이 경우는 빙설 깊이와 운할활주로의 제동작용(braking action)을 연결시키기가 어려운 측면이 있다. FAA는 빙설/운할활주로는 여유분을 규정하고 있지 않으나, JAR-OPS는 빙설/운할활주로는 1.15배의 안전계수를 요구하고 있다[9]. 우리나라는 ICAO에 해당 규정이 없을 경우 FAA 규정을 준용하고 있으므로 빙설/운할활주로는 1.15배의 여유분을 확보하도록 규정하는 것이 필요하다. 빙설/운할활주로는 역추진 장치를 최대(maximum position)로 사용하는 효과(28%⁸⁾ 감소를 고려한다면 1.15배의 안전계수를 확보하면 적정하다고 판단된다[10].

8) A300-600 FCOM Vol 2. 에 있는 역추진 장치의 착륙거리 감소 효과는 5% on dry runway, 9% on wet runway, 28% on icy runway 임.

표 3. 운할활주로 실제착륙거리(B737-800)[11].

Table 3. The actual landing distance on slippery runway

BRAKING CONFIGURATION		REPORTED BRAKING ACTION			
		DRY	GOOD	MEDIUM	POOR
MAX MANUAL BRAKING		2780	3860	5210	6710
AUTOBRAKE SETTING 2		6120	6120	6280	7060
AUTOBRAKE SETTING 3		4840	4850	5400	6730
MAX AUTOBRAKE SETTING		3450	4020	5250	6720

CONDITIONS		ADJUSTMENTS			
WEIGHT	PER 10000 LB BELOW 130000 LB	-130	-210	-330	-460
	PER 10000 LB ABOVE 130000 LB	380	380	390	480
AIRPORT PRESSURE ALTITUDE	PER 1000 FT ABOVE SEA LEVEL	180	180	180	220
WIND	PER 10 KTS HEADWIND	-100	-180	-280	-420
	PER 10 KTS TAILWIND	1050	1050	1200	1740
APPROACH SPEED	PER 10 KTS ABOVE VREF	570	570	570	560
SLOPE	PER 1% DOWNHILL SLOPE	70	100	240	580
	PER 1% UPHILL SLOPE	-20	-30	-130	-320
*REVERSE THRUST	1 REVERSER INOPERATIVE	110	200	520	1110
	2 REVERSERS INOPERATIVE	110	440	1260	2920
	MAXIMUM REVERSE THRUST	0	0	-50	-120

Actual (unfactored) distances are shown. Based on flaps 40, VREF 40 approach speed, 2 engine detent reverse thrust. Landing distance required includes 1000 ft of air distance.

IV. 결 론

본 논문에서는 수동착륙의 경우 건조/운할활주로 의 필요착륙거리 여유분은 적정한 것으로 판단되나, 빙설/운할활주로에서의 여유분은 AFM 인가사항이 아니라서 실제착륙거리 만 제공되고 있는 것으로 분석되었다. 이 경우 JAROPS에서는 실제착륙거리의 1.15배를 요구하고 있지만, FAR에서는 그런 규정이 없다. 또한 JAROPS에서는 역추진 장치의 효과를 고려하지 않지만, FAR에서는 역추진 장치를 detent position 까지 사용하는 것이 고려되어 있다. 따라서 최소한도로 빙설/운할활주로에서의 안전계수를 1.15로 규정하는 것이 필요하다. 자동착륙의 경우 공중거리 는 내장된 프로그램에 의한 착륙이므로 시험비행 결과를 통계적으로 처리하여 99%의 신뢰도를 얻는 수치가므로 적정하다고 할 수 있겠다. 이제 우리나라 도 항공기 성능에서 FAR과 JAR의 차이점이 있는 경우 안전한 쪽으로 결정하여 항공법규(운항기술기준 등)에 포함시킬 필요가 있다.

Reference

[1] Boeing B737-800 Flight Planning and Performance Manual, 2010
 [2] FAA, FAR 25 Subpart B Flight. 25.125 Landing, 2012
 [3] Airbus, Aircraft Performance. Sec. E Landing, 2002
 [4] FAA, FAR 121.195, Airplanes: Turbine engine powered:

landing limitations: Destination airports, 2012
 [5] Boeing, B737NG Flight Crew Training Manual, Chapter 6. Landing, 2010
 [6] FAA, Advisory Circular 25-7B, Flight test guide for certification of transport category airplanes. Sec 2.19. Landing, 2011
 [7] ICAO, Annex 14 Aerodrome Attachment A, 2009
 [8] Airbus, A330 Flight Crew Operating Manual. Vol 2. Landing Performance, 2010
 [9] JAA, JAR-AWO(All Weather Operations), 2002
 [10] Airbus, A300-600 Flight Crew Operating Manual. Vol 2. 2.15.20, 2006
 [11] Boeing, B737-800 Quick Reference Handbook. PI Section, 2009

노 건 수 (Noh Kun Soo)



2005년 2월 : 한국항공대학교 대학원 항공교통학과(이학박사)
 1985년 ~ 2006년 : 대한항공 운항 훈련원 전문교관
 2006년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공교통학과 부교수
 관심분야 : 운항관리, 항공기성능

김 응 이 (Kim Woong Yi)



1998년 2월 : 한국항공대학교 항공 교통학과(이학석사)
 2009년 2월 : 한양대학교 교통공학과 (공학박사)
 2003년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공교통학과 부교수
 관심분야 : 항공화물, 항공교통