



항공기 이륙중량 추정을 위한 관련 요인 분석 (B737-800을 중심으로)

Analysis of Associated Factors for Aircraft Takeoff Weight Estimation (Based on B737-800)

이승표¹ · 구성관^{2*}

¹한서대학교 일반대학원 항공운항관리학과 박사과정

²한서대학교 항공산업공학과 교수

Seung-Pyo Lee¹ · Sung-Kwan Ku²

¹Department of Flight Operation and Management, Hanseo University Graduate School, ChungNam-do, 32158, Korea

²Department of Aerospace Industrial and Systems Engineering, Hanseo University, ChungNam-do, 32158, Korea

[요 약]

이륙중량은 항공기의 탄소 배출량과 연료 소모량을 추정할 때 정확도를 향상시킬수 있는 중요한 열쇠이다. 하지만 이륙중량은 항공사의 경영전략을 유추할 수 있는 민감한 유상하중 정보가 포함되어 있어 외부 유출이 불가능하다. 선행연구에서 이륙중량을 추정할 수 있는 몇 가지 모델이 제시되었지만, 연구자는 알 수 없는 조종사가 설정하는 변수들에 의해 연구의 한계가 존재한다고 지적한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 통제할수 있는 방법을 제시하기 위해 이륙중량과 연관된 여러 변수를 확인하였다. 그중 이륙중량의 정확도를 향상시킬수 있는 변수를 선별하였고 이를 상용화된 ADS-B 정보에 적용하여 추정 방법을 제시한다. 제시하는 추정 식은 평균적인 이륙중량을 추정하는 것이 아니라 이륙중량 범위 내의 모든 구간에서 추정을 할 수 있다.

[Abstract]

Take-off weight is a key factor for improving accuracy when estimating an aircraft's carbon emissions and fuel consumption. However, the takeoff weight contains sensitive payload information that can infer the airline's management strategy, making it impossible to leak it outside. Although several models for estimating takeoff weight have been presented in previous studies, the researcher points out that there are limitations of the study caused by variables at the pilot's discretion. In this paper, several variables related to takeoff weight are identified to suggest a way to control these limits. Among them, variables that can improve the accuracy of takeoff weight are selected and an estimation equation is presented by applying them to ADS-B information. The proposed estimation does not estimate the average takeoff weight but has the advantage of being able to estimate all ranges of the takeoff weight.

Key word : CORSIA, Aircraft fuel consumption, Carbon emission, Takeoff weight estimation. ADS-B.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.658>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 30 September 2023; Revised 12 October 2023
Accepted (Publication) 26 October 2023 (30 October 2023)

*Corresponding Author, Sung-Kwan Ku

Tel: +82-41-671-6246

E-mail: skku@hanseo.ac.kr

I. 서론

국제항공탄소상쇄감축제도(CORSIA; carbon offsetting and reduction scheme for international aviation)는 국제선 운항으로 인하여 배출된 가스양을 특정 수준으로 동결하는 제도이다. 국제민간항공기구(ICAO; international civil aviation organization)에서는 CORSIA 제도 시행을 위하여 탄소 배출량을 추정할 수 있는 CERT (CO₂ estimation and reporting tool) 를 제공한다[1]. CERT는 탄소 배출량 추정을 위하여 항공기 기종 정보와 비행시간만을 필요로 하지만 항공기 이륙중량과 같은 성능적 요소는 적용할 수가 없다. 항공기 성능적 요소인 상승률은 항공기 무게에 제한받는데 이 상승률이 낮으면 총 비행시간이 증가하여 연료 소모량 증대를 초래한다. 항공기 이륙중량을 기존의 연료 소모량 추정 Tool에 적용할 수 있다면 연료소모량과 탄소 배출량 추정의 정확도를 높일 수 있지만 승객 수나 화물량과 같은 유사하중의 무게 정보는 항공사의 영업전략이 포함되어 있어 외부 유출이 불가능하다.

선행연구에서는 이륙 중 항공기의 가속도 정보를 활용하여 평균적인 이륙중량을 추정하였지만, 연구자가 알 수 없는 조종사의 결정에 의한 설정을 파악할 수 있다면 추정의 정확도를 높일 수 있다고 연구의 한계를 지적하였다[2]. 본 연구는 한계로 지적된 조종사 임의의 항공기 설정을 ADS-B의 속도 데이터를 이용하여 추정하는 법을 제시한다. 정보 획득이 용이한 ADS-B 데이터를 이용하여 조종사의 결정을 추정하고 이를 통해 이륙중량 추정의 정확성을 높이는 방법을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 선행연구 검토 및 이론적 배경을 설명하고, 3장에서는 이륙중량 추정을 위한 ADS-B 활용방안을 설명한다. 4장에서는 V₂ speed와 결정 변수 간 상관관계를 분석하고 이륙중량 추정 식을 도출하며, 5장에서는 본 연구의 결론에 관해 설명한다.

II. 선행연구 검토 및 이론적 배경

2-1 선행 연구 검토

Yashovardhan S. Chati는 비행기록장치(Flight data record)정보를 바탕으로 가우시안 프로세스 회귀법(Gaussian process regression)을 활용하여 이륙중량을 추정하였다. 항공기의 이륙 중 가속도 정보와 실제 항공기 운항 데이터를 이용하여 분석하였지만, 항공기의 가속도는 조종사가 설정하는 엔진 추력에 따라 변하기 때문에 선행연구에서는 이륙중량의 평균값을 추정하였다. 엔진 추력 정도와 활주로 마찰계수를 연구에 포함한다면 이륙중량을 더 정확히 예측할 수 있다고 한다[2].

Sandro Salgueiros는 ADS-B와 ASDE-X 데이터를 이용하여 이륙중량을 예측하는 방법을 제시하였다. 이륙 후 ADS-B를 통해 습득된 초기 상승 속도와 고도 정보를 활용하여 이륙중량을 예측하였다. 기본적으로 가벼운 항공기와 무거운 항공기

의 상승률이 다르고, 조종사의 추력 설정에 따라 상승률이 다르지만, 실제 항공기의 운항 데이터를 분석하여 이륙중량을 추정하는 방법을 제시하였다[3].

이학태는 항공기 이륙중량 추정을 위하여 비행계획서(Flight plan)와 항공기 성능 데이터를 활용하였다. 이륙중량 추정 알고리즘은 항공기 설계에 일반적으로 사용되는 항공기 무게 추정 절차와 Constant-altitude-cruise range 방정식을 조합하였다[4].

본 연구에서는 조종사만이 알 수 있는 Flap 설정을 상용 ADS-B의 속도 정보를 이용하여 추정하는 방법을 제시하고 조종사의 엔진 추력 설정에 영향을 적게 받는 요소들을 활용하여 이륙중량을 추정하였다. 추정 식은 평균적인 값을 추정하는 것이 아니라 이륙중량 모든 범위 내에서의 값을 추정한다.

2-2 이론적 배경

여객 항공기는 최대 추력을 사용하여 이륙해야 하는 경우가 있다. 탑승객이 많은 상태에서 높은 연료 탑재량을 필요로 하는 장거리 비행의 경우, 활주로 끝단에 장애물이 있어 장애물 상공을 충분한 높이로 상승해야 하는 경우, 짧은 활주로나 상승률을 악화시키는 덩고 습한 상태에서 이륙해야 하는 경우가 있다. 하지만 이러한 조건을 충족하는 상태에서 비행하는 경우가 적어 반드시 최대 추력을 사용해야 하는 경우도 드물다. 추력을 낮추어 이륙하게 되면 몇 가지 장점이 있다. 엔진 내구성에 영향을 주는 엔진 내부의 온도와 압력을 낮출 수 있고 터빈의 회전수를 줄여 정비 주기를 연장시킬 수 있다. 이는 정비 비용의 감소로 이어지고 연료 소모량도 줄일 수 있어 비용적인 장점을 끌어낼 수 있다. 이러한 이유로 항공사는 엔진 추력감소이륙(Takeoff thrust reduction)을 실시한다.

엔진 추력감소이륙(Takeoff thrust reduction)에는 두 방법이 있다[5]. ATM (assumed temperature method)와 엔진 최대추력 제한(Engine thrust deration) 방법이 있다. ATM(assumed temperature method)은 조종사가 항공기 운항 전 공항 온도를 컴퓨터 입력하여 이륙 시 계산된 추력이 나올 수 있도록 해야 하는데 실제 공항 온도보다 높은 온도를 입력하여 의도적으로 낮은 추력을 내게 하여 이륙하는 방법이다. 엔진 최대추력제한은 엔진 추력을 조종사가 3단계로 설정할 수 있게 하는 것이다. B737-800의 경우 엔진 추력 등급은 26,300 lb, 24,200 lb, 22,700 lb의 3단계로 구성되는데 운영 편의상 26K, 24K, 22K로 표기한다. 항공기 이륙중량이나 활주로 길이, 장애물의 유무 여부, 기상 조건에 따라 엔진 최대 추력인 26K 대신 24K나 22K로 낮추어 이륙하는 방법이다.

III. 이륙중량 추정을 위한 ADS-B 활용

본 연구에서는 이륙중량 추정을 위해 상용화된 ADS-B 정보를 활용하였고 정확한 추정을 위하여 비행 특성을 고려한

비행 구간을 특정할 필요가 있었다. 이를 위해 이륙중량과 시간상으로 일치하는 Takeoff roll(이륙 활주) 및 Initial climb(초기 상승) 구간을 선정하였으며 ADS-B 데이터 중에서는 항공기의 지시속도(Indicated speed)를 활용하였다.

ADS-B의 속도 정보를 활용하여 이륙중량을 추정하기 위해서는 항공기의 이륙속도에 관하여 이해가 필요하다. 항공기 이륙속도는 항공기 이륙 시 조종사들이 사용하는 기준점이 되는 것으로 예를 들어 이륙 중 엔진 정지와 같은 비상 상황에서 조종사들이 취해야 하는 행동의 시간적 기준을 제시하거나, 항공기를 부양시켜야 하는 시점을 제시하기도 하고, 초기 상승시 상승기동의 기준점이 되기도 한다.

이륙 시 사용되는 속도들은 다양한 요소에 의해 결정되는데 그중 항공기 이륙중량이 많은 부분을 차지하고 있다. 본 연구에서 이륙속도와 이륙중량 및 그 외 변수들과의 관계를 분석하고 이를 다시 이륙중량을 추정하기 위하여 이륙속도를 이용한 식을 도출하였다. 이륙속도, 이륙중량, 그 외 변수들과의 관계는 항공기 제작사에서 제공하는 교범인 Boeing사의 B737-800 Flight planning and performance manual (이하 “Boeing manual”)을 활용하였다[6].

3-1 이륙속도의 이해 및 이륙중량 추정을 위한 변수 선택

항공기 이륙 시 이륙성능 산출을 위하여 대부분 V_1 , V_R , V_2 speed가 사용된다. Boeing manual에서는 이 속도를 계산하기 위해 여러 종류의 Table을 제공하는데 이 Table 들은 먼저 활주로 표면 상태를 나타내는 Dry runway와 Wet runway로 구별되며 그 Table은 다시 엔진 추력(26K, 24K, 22K)을 기준으로 표 1과 같이 구분되어 진다. 표 1에서 명시하듯이 항공기 이륙속도는 대부분 항공기 이륙중량을 근거로 산출이 시작되며 이륙 시 사용될 엔진 추력 설정(26K, 24K, 22K)과 Flap 설정에 의해 변화된다.

다음은 이륙중량 추정 연구에 부합하는 속도 변수를 선택하기 위하여 각각의 이륙속도(V_1 , V_R , V_2 speed)에 관해 확인해 보았다[7]. V_1 speed (이륙결정속도)는 실제 항공기가 이륙 활주 중 엔진 고장으로 인하여 조종사가 즉각적으로 이륙단념을 하고 항공기에 제동을 시작해야 하는 기준점이다. 이 속도는 이륙하는 항공기에 문제가 생기지 않는다면 외부인은 인지할 수 없는 속도이기 때문에 변수 선택에서 제외하였다. V_R speed(이륙전환속도)는 항공기가 부양하는 속도로 조종사의 조작 방법 및 기상 변수에 영향을 많이 받고 상용 ADS-B 데이터로는 그 항공기 부양 시점을 특정하기 어려워 본 연구에서는 배제하였다. V_2 speed (안전이륙속도)는 V_1 speed (이륙결정속도) 이후 엔진 고장이 발생하여도 안전하게 이륙이 가능한 최소 속도이다. 엔진 고장이 아닌 정상적인 상황으로 이륙하면 항공기는 V_2 speed + 20 kts을 유지하며 상승한다.

본 연구에서는 이륙중량 추정을 위하여 V_2 speed를 변수로 사용한 이유는 다음과 같다. 첫 번째로 B737-800 항공기는 정상 상황에서 이륙 후 초기 특정 고도까지 V_2 speed + 20 kts을

표 1. 26K, Dry runway에서의 이륙속도 예시

Table 1. Sample of takeoff speed for 26K on dry runway

Weight (1000 kg)	FLAPS 1			FLAPS 5		
	V1	VR	V2	V1	VR	V2
90	169	171	175	161	163	168
85	163	166	171	157	159	164
80	158	160	167	152	154	160
75	153	155	162	147	148	156
70	147	149	158	141	143	152
65	141	143	153	135	137	147
60	135	136	148	129	131	143
55	128	129	143	123	124	137
50	121	122	137	116	117	132
45	113	114	131	109	110	126
40	105	106	125	101	102	120

유지하며 일정한 속도로 상승하기 때문에 상용화된 ADS-B 데이터에서도 V_2 speed를 특정할 수 있기 때문이다. 두 번째로 이륙속도(V_1 , V_R , V_2 speed)는 항공기 무게, Flap 설정, 엔진 최대 추력제한의해 결정된 후 온도, 압력고도, 활주로 경사도, 풍속, Stopway, clearway, V_{MCG} 에 의해 보정되는데 V_2 speed는 V_1 speed와 V_R speed에 비해 보정 해야 하는 변수의 개수가 적기 때문이다. 이 2가지 사유로 본 연구에서는 V_2 speed가 이륙중량 추정에 부합하여 변수로 선택하였다.

3-2 이륙중량 추정을 위한 V2 speed 변수의 이해와 관계 분석

Boeing manual에서는 V_2 speed를 결정하기 위하여 5개의 변수를 고려해야 한다고 명시하고 있다[5]. 그 5개의 변수로는 항공기 이륙중량이 있으며 그 외 조종사 판단에 의한 Flap 설정과 엔진 최대추력제한이 있고 환경적 요소인 공항온도와 압력고도(Pressure altitude)가 있다.

Boeing manual은 이륙속도를 산출하기 위하여 먼저 Dry runway와 Wet runway table을 제공하는데 V_2 speed는 V_1 , V_R speed와는 다르게 Dry와 Wet runway table의 차이가 없어 본 연구에서는 Dry runway table을 적용하였다. 그 후 표 1과 같이 엔진 최대추력제한 별로 정리된 Table을 사용한다. 표 1에 표시되어 있듯이 항공기 이륙속도(V_1 , V_R , V_2 speed)는 항공기 이륙

표 2. V_2 speed 보정 예시

Table 2. Sample of V_2 speed adjustment

Temp (°C)	V2 (Dry, 26K)						
	Pressure altitude (1,000 ft)						
	-2	0	2	4	6	8	10
70	-3	-3					
60	-2	-3	-3	-4			
50	-2	-2	-3	-3	-4	-5	-6
40	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-5
30	0	0	-1	-2	-2	-3	-4
20	0	0	-1	-1	-2	-3	-3
-60	0	0	-1	-1	-2	-2	-3

중량을 근거로 산출이 시작되며 이륙 시 사용될 Flap 설정에 따라 결정한다. 사용될 V₂ speed가 결정되면 표 2와 같은 Table 을 이용하여 공항온도 및 압력고도를 적용하여 보정 한다.

IV. V₂ speed와 변수간 관계 분석 및 연구순서

그림 1은 V₂ speed 산출을 위하여 항공기 이륙중량, 외부온도, 압력고도, Flap 설정, 엔진 최대추력제한의 관계를 종합한 표이다. 그림 1의 종합된 표를 통해 V₂ speed와 이에 영향을 미치는 변수간의 상관관계를 확인하였다. 분석을 위하여 독립변수 X₁은 이륙중량(Wt)을 100 kg 단위로 지정하였다. X₂는 환경적 변수인 외부온도(Temp)를 섭씨단위로 나타내었고 X₃에는 압력고도를 100 ft단위로 지정하였다. X₄와 X₅는 조종사의 판단에 의해 결정되는 Flap 설정과 엔진 최대추력제한을 설정하였다. 종속변수 Y는 V₂ speed (kts)를 설정하였다. 5개의 독립변수와 종속변수의 상관관계를 확인한 결과 r값은 0.8을 넘지 않아 독립변수 간 다중공선성은 없는 것으로 확인되었다.

연구순서는 먼저 Flap과 V₂ speed와의 관계를 분석하였다. V₂ speed를 이용하여 이륙중량을 추정하는 것이 이 연구의 목적인데 Boeing manual에서 제공하는 V₂ speed 산출표는 Flap 설정 별로 따로 표기되어있어 이륙중량 추정 식도 Flap 설정 별 따로 도출해야 한다. 이 때문에 조종사의 결정에 의한 Flap 설정을 추정하는 것이 연구의 첫 번째 순서이다. 두 번째로 V₂ speed와 이륙중량(Wt)과의 관계를 분석하였고, 세 번째로 엔진 최대추력제한과의 관계를 연구하였다. 네 번째로 환경적 요소인 온도 및 압력고도와 V₂ speed간 관계를 분석하였다. 마지막으로 이륙중량 추정 식을 도출하였다.

4-1 V₂ Speed와 Flaps 관계 분석을 통한 Flaps 설정 추정

표 3은 Flap 변화량과 V₂ speed의 상관관계를 나타내는데 상관관계수 r 값은 -0.094로 관계성이 미미하다는 것을 나타내고 있다. 대부분의 B737-800 조종사들은 Flap 5를 사용하여 이륙하는데 이륙중량 추정 식의 정확도를 높이기 위해 Flap 1의 설정도 연구하였다. 또한 본 연구에서는 조종사의 판단에 의한 Flap 설정도 외부인이 추정할 수 있도록 방법을 제시하였다.

대부분의 B737-800 조종사들은 Flap 5로 이륙하는데 만약 Flap 1 설정으로 이륙을 가정하였을 경우 V₂ speed에는 어떠한 변화가 있는지 알아보았다. 그림 2는 Flap 설정에 따른 V₂ speed의 차이를 그래프로 나타내었다.

조건은 26K, 24K, 22K의 엔진 최대추력제한 단계별로 Flap 5에서 Flap 1로 변화 시 V₂ speed의 변화량을 평균 내었다. 결과는 5.6 kts으로 즉, 통상적으로 사용하는 Flap 5에서 Flap 1로 변경하여 이륙하면 V₂ speed는 평균 5.6 kts 증가한다는 것을 확인하였다. 항공기 이륙 당시 ADS-B를 통해 습득된 V₂ speed가 Flap 5를 사용했는지 Flap 1을 사용했는지를 알기 위해서는 비행 구간별 평균 V₂ speed와 이륙중량을 특정해야 한다.

그림 1. V₂ speed와 연관된 변수 표

Fig. 1. Table of V₂ speed and associated factors

	X1	X2	X3	X4	X5	Y
	Wt(100 kg)	Temp(C)	P.Alt(100 ft)	Flaps	Deration	V2(kts)
1	800	0	0	1	22	165
2	800	0	0	1	24	166
3	800	0	0	1	26	167
4	800	0	0	5	22	159
5	800	0	0	5	24	159
6	800	0	0	5	26	160
7	800	0	20	1	22	165
8	800	0	20	1	24	166
643	600	10	40	1	22	146
644	600	10	40	1	24	146
645	600	10	40	1	26	147
646	600	10	40	5	22	140
647	600	10	40	5	24	141
648	600	10	40	5	26	142
1345	400	40	80	1	22	120
1346	400	40	80	1	24	120
1347	400	40	80	1	26	121
1348	400	40	80	5	22	115
1349	400	40	80	5	24	115
1350	400	40	80	5	26	116

표 4는 166편의 실제 비행 데이터를 근거로 30 min 단위로 비행 구간별 평균 V₂ speed와 이륙중량을 나타낸다. 제출된 비행 계획서를 통해 연구 대상 비행편의 예상 비행시간을 파악하고 표 4를 통해 특정된 V₂ speed를 약 5 kts 이상 초과하였다면 조종사가 Flap 1을 사용했다는 것을 추정할 수 있다.

표 3. V₂ speed와 Flap 설정의 상관관계 분석

Table 3. Correlation analysis of V₂ speed and Flap setting

	Flap setting	V2 Speed (kts)
Flap Setting	1	
V2 Speed (kts)	-.094	1

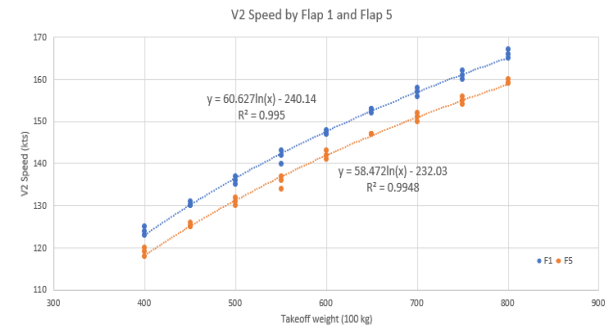


그림 2. Flap 1과 Flap 5의 V₂ speed 차이

Fig. 2. V₂ Speed difference between Flap 1 and Flap 5

표 4. 비행구간별 Flap 5 평균 V₂ speed와 이륙중량

Table 4. Flap 5 average V₂ speed and takeoff weight by flight time segment

Flight Time	Flap 5, Average V ₂ speed	Average Takeoff Wt
~ 1 : 00 min	142. 2 kts	60,176 kg
1 : 00 ~ 1 : 30	142.3 kts	61,489 kg
1 : 30 ~ 2 : 00	143.0 kts	63,038 kg
2 : 00 ~ 2: 30	143.8 kts	64,700 kg
2 : 30 ~ 3 : 00	146.4 kts	67,200 kg
3 : 00 ~ 3 : 30	148.3 kts	68,800 kg
3 : 30 ~ 4 : 00	149.0 kts	68,700 kg
4 : 00 ~ 4 : 30	150.9 kts	71,140 kg
4 : 30 ~ 5 : 00	152.2 kts	72,320 kg
5 : 00 ~ 5 : 30	153.6 kts	74,300 kg
5 : 30 ~ 6 : 00	156.4 kts	76,771 kg
6 : 00 ~	156.0 kts	77,000 kg

표 5. V₂ speed와 이륙중량과의 상관관계 분석

Table 5. Correlation analysis of V₂ speed and takeoff weight

	Wt (100 kg)	V ₂ Speed (kts)
Wt (100 kg)	1	
V ₂ Speed (kts)	.712	1

4-2 V₂ speed와 이륙중량(Takeoff weight) 상관관계 분석

표 5는 V₂ speed와 이륙중량(Wt)과의 상관관계를 나타낸다. V₂ speed 결정에 항공기 이륙중량이 가장 영향력이 있는 변수임을 확인하였고 그 값은 0.712로 이륙중량이 증가하면 V₂ speed도 증가하는 양의 상관관계를 나타낸다. Boeing manual에서 제시하는 이륙성능에 관련된 V₂ speed 산출표는 Flap 설정 별로 분리되어 있어 앞 단락에서 제시한 Flap 설정을 먼저 추정 후 이륙중량과 엔진 최대추력제한 사항을 조합하여 순서대로 적용해야 한다.

4-3 V₂ Speed와 이륙 최대추력제한(Takeoff thrust deration)의 상관관계 분석

이륙중량 추정을 위해서는 V₂ speed와 연관된 변수 중의 하나인 엔진 추력을 파악하는 것이 중요하다. 조종사는 항공기 무게를 고려하여 엔진 추력을 설정하는데 대부분 엔진 추력을 낮추어 이륙한다. 이러한 방법을 엔진 추력감속이륙이라 한다 [5]. 엔진 추력감속이륙에는 ATM(assumed temperature method)과 엔진 최대추력제한 두 가지 방법이 있으며 2가지 방법 중 1가지 방법만을 적용하기도 하고 2가지 방법을 동시에 적용하기도 한다.

V₂ speed by engine thrust deration (Flaps 1)

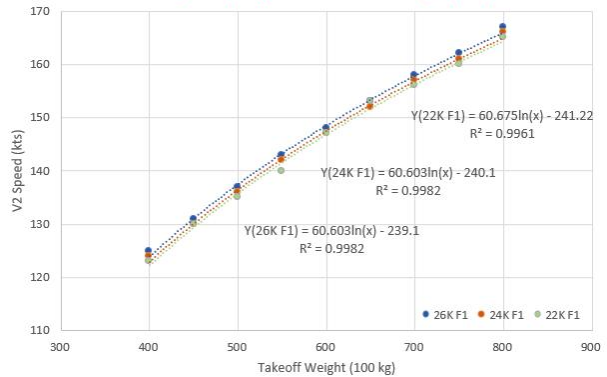


그림 3. 엔진 최대추력제한에 따른 V₂ Speed 변화량 (Flap 1)
Fig. 3. V₂ speed with engine thrust deration (Flap 1)

V₂ speed by engine thrust deration (Flaps 5)

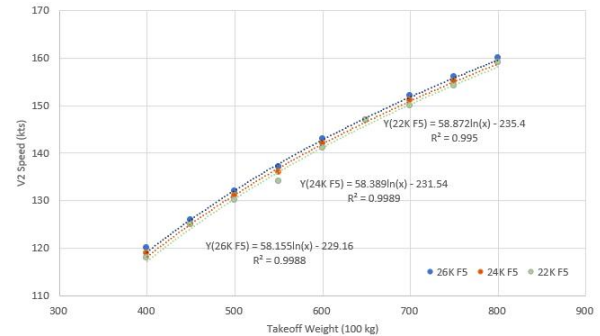


그림 4. 엔진 최대추력제한에 따른 V₂ speed 변화량 (Flap 5)
Fig. 4. V₂ speed with engine thrust deration (Flap 5)

Boeing manual의 항공기 성능 Table에서는 V₂ speed 결정에 ATM(assumed temperature method)은 영향이 없고 엔진 최대추력제한만이 영향을 미친다고 명시하고 있다. 이에 본 단락에서는 V₂ speed를 결정하기 위한 요소로는 ATM(assumed temperature method)은 제외하고 엔진 최대추력제한만을 고려하였다.

전 단락에서 Flap과 V₂ speed의 관계를 연구한 결과 Flap은 단계별로 별도로 진행해야 한다고 설명하였다. 이와 마찬가지로 엔진 최대추력제한 또한 V₂ speed와의 상관분석을 위해서는 먼저 Flap 1과 Flap 5로 나누어 분석을 해야 한다. 그림 3은 Flap 1을 기준으로 이륙중량 대비 V₂ speed의 변화량을 표시한 것이고 그림 4는 Flaps 5를 기준으로 이륙중량 대비 V₂ speed의 변화량을 그래프로 표시한 것이다.

각각의 그림은 엔진 최대추력제한 단계별로 V₂ speed 차이는 낮다는 것을 나타내고 있다. Flap 1의 경우 엔진 최대 추력 26K에서 최소추력 22K로 변화 시 V₂ speed 변화량은 1.66 kts인 것을 확인하였고 Flap 5의 경우 1.67 kts인 것을 확인하였다. 계산 방법은 Boeing manual에서 제시하는 table에 명시된 이륙중량별 V₂ speed를 산술적으로 차이를 계산하고 평균을 내었다.

표 6. V₂ speed와 이륙중량 범위

Table 6. Range of V₂ speed and takeoff weight

	Takeoff Wt	Flap 1 V ₂ speed	Flap 5 V ₂ speed
Max Takeoff Weight flight	79,000 kg	164 kts	158 kts
ICN-GMP Ferry flight	44,000 kg	126 kts	122 kts
Difference (Δ)	35,000 kg	38 kts	36 kts

표 7. V₂ speed와 엔진 최대추력제한 상관관계

Table 7. Correlation analysis of V₂ speed and engine thrust deration

	Engine Deration	V ₂ Speed (kts)
Engine Deration	1	
V ₂ Speed (kts)	.020	1

1.66 kts와 1.67 kts의 값이 V₂ speed 범위 내 미치는 영향을 알아보기 위해 V₂ speed의 가능 범위를 확인하였다. 표 6은 총 이륙중량 범위에 상응하는 V₂ speed 범위를 나타낸다. 최대의 이륙중량 조건은 인천공항에서 최대 이륙중량으로 이륙할 경우를 선정했고 최소 이륙중량은 탑승객 없이 정비 목적으로 인천-김포 구간을 Ferry flight 하는 경우를 알아보았다. 기상 조건은 Dry runway, Wind calm, 20°C, 1013 hpa의 상황이며 A 항공사의 실제 Flight plan을 근거로 산출하였다.

엔진 최대추력제한 변화에 따른 V₂ speed 변화량을 알아본 결과 Flap 1의 경우 26K에서 22K로 변경시 1.66 kts의 차이를 나타내었으며 이 수치는 총 V₂ speed 변화량인 38 kts 대비 4.7%이다. Flap 5 경우인 1.67 kts은 총 V₂ speed 변화량인 36 kts 대비 4.6%로 미미한 값을 의미한다. 또한 표 7에서 명시하는 V₂ speed와 엔진 최대추력제한의 상관계수 r 값이 0.020으로 낮은 값을 나타내고 있어 엔진 최대추력제한 변화는 V₂ speed 결정에 영향성이 낮다는 것을 확인하였다. 두 가지 이유로 본 연구에서는 3단계로 구성된 엔진 최대추력제한을 평균하여 V₂ speed 산출에 적용하였다.

V₂ speed 산출에 적용된 평균 엔진 최대추력제한 식은 Flap 단계별 항공기 이륙중량을 기준으로 하는 V₂ speed 값을 회귀 분석한 결과이다. Flap 1 설정 시 회귀분석 결과는 결정계수가 0.9919이고 표준 오차는 1.24 kts임을 확인하였다. 연구 대상 항공기가 Flap 1 설정으로 추정될 때 적용하는 V₂ speed 식(1)은 다음과 같다.

$$y = 0.1043x + 83.622 \quad (1)$$

여기서 x는 100 kg 단위의 항공기 이륙중량이고 y는 knots 단위의 V₂ speed이다.

Flap 5 설정 시 회귀분석 결과는 결정계수가 0.9904이고 표

준 오차는 1.3 kts임을 확인하였다. 항공기가 Flap 5 설정으로 추정될 때 적용하는 V₂ speed 식(2)은 다음과 같다.

$$y = 0.1006x + 80.259 \quad (2)$$

4-4 V₂ Speed와 외부온도 및 압력고도의 상관관계 분석

V₂ speed 값 산출 절차는 4-1. 단락에서 설명한 대로 먼저 Flap 설정을 추정하고 엔진 최대추력제한을 적용한 이륙중량 기준으로 V₂ speed 값을 도출한다. 그다음 온도와 압력고도(Pressure altitude)를 대입하여 보정 해야 한다. Boeing manual 에는 영하 60°C에서 영상 70°C까지의 온도가 보정 표에 명시 되어 있지만 실제 항공기 운항을 고려하여 영상 40°C 이하의 온도만을 고려하였고 10,000 ft 이하의 압력고도(Pressure altitude) 정보가 manual 보정 표에 제공되지만 실제 상황을 고려하여 8,000 ft 이하의 조건만을 선별하였다. 선별된 조건으로 온도 및 압력고도와 V₂ speed의 상관 관계를 분석하였고 표 8과 9는 각각의 분석내용이다. 온도와 압력고도에 관한 상관 계수 절대값은 0.18과 0.031이다. 하지만 본 연구의 목적인 V₂ speed를 이용한 이륙중량을 추정하기 위해서는 실제 운항 데이터를 통한 검증이 필요한데 실제 비행으로 수집된 데이터는 1,000 ft 미만의 공항이라서 고고도 공항 및 극한 온도에서의 데이터를 얻을 수 없는 것이 연구의 한계이다. 본 연구에서는 온도 및 압력고도 변수를 제외하였고 추후 많은 비행 데이터 습득을 통해 정밀한 추정 공식 유도가 필요하다.

4-5 이륙중량 추정을 위한 공식 도출

이륙중량 추정을 위해 V₂ speed와 그에 연관된 변수를 활용하여 공식을 도출하였다. 추정 식은 연구 대상 항공기의 Flap 설정에 따라 달라서 먼저 4-1 단락에 명시된 방법으로 Flap 설정을 추정한다.

표 8. V₂ speed와 온도의 상관관계

Table 8. Correlation analysis of V₂ speed and outside temperature

	Temp (°C)	V ₂ speed (kts)
Temp (°C)	1	
V ₂ speed (kts)	-.180	1

표 9. V₂ speed와 압력고도의 상관관계

Table 9. Correlation analysis of V₂ speed and pressure altitude

	P.Alt (100 ft)	V ₂ speed (kts)
P.Alt (100 ft)	1	
V ₂ speed (kts)	-.031	1

Flap 1 설정 추정 시 다음의 식을 적용한다.

$$S = 0.1043 Wt + 83.622 \quad (3)$$

식(3)에서 S는 knots 단위의 V₂ speed이고 Wt는 100 kg 단위의 이륙중량이다.

식(3)을 이륙중량(Wt)에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$Wt = \frac{S - 83.622}{0.1043} \quad (4)$$

Flap 5 설정 추정 시 다음의 식을 적용한다.

$$S = 0.1006 Wt + 80.259 \quad (5)$$

식(5)을 이륙중량(Wt)에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$Wt = \frac{S - 80.259}{0.1006} \quad (6)$$

V. 결 론

CORSIA(carbon offsetting and reduction scheme for international aviation)는 항공 분야에서 배출되는 탄소량을 통제하기 위해 2027년부터 참가국에게 의무 참여를 독려하고 있다. 탄소배출량은 연료소모량과 직접적인 연관이 있는데 탄소 배출량을 알기 위해서는 연료소모량을 추정해야 하며, 이를 위해서는 정확한 항공기의 이륙중량 정보가 필요하다. 하지만 이륙중량 정보는 항공사의 보안 사항이기 때문에 많은 선행 연구에서 이륙중량을 추정하는 모델을 제시하고 있다. 이러한 모델은 외부인이 알 수 없는 조종사의 선택에 의한 설정을 파악할 수 있다면 추정 모델의 정확도 향상시킬 수 있다고 연구의 한계로 지적하였으며 제시한 모델도 평균적인 이륙중량을 추정한다고 명시하였다.

본 연구에서는 항공기 이륙중량을 추정하기 위하여 항공기 제작사의 운영규범을 활용하였다. 이륙중량과 관계 계수가 높은 변수를 식별하고 이를 이용하여 이륙중량 추정 식을 도출하였다. 추정을 위하여 사용된 변수는 V₂ speed로서 ADS-B를 활용하여 확인이 가능하고 다른 속도 변수에 비해 영향을 받은 요소가 적어 선택되었다.

V₂ speed에 영향을 주는 요소는 이륙중량, Flap 설정, 엔진 최대추력제한, 온도, 압력고도 5가지가 있고 이중 이륙중량이 가장 큰 영향을 미친다. 이륙중량을 추정하는 절차는 먼저 항공기의 사용된 Flap 설정을 추정해야 한다. 대부분의 B737-800

항공기는 Flap 5로 이륙을 실시하는데 실제 비행 데이터를 근거로 계산된 비행 구간별 V₂ speed 평균보다 5 kts 이상이 높다면 Flap 1 이륙으로 추정할 수 있다. 엔진 최대추력제한 변수의 경우에도 V₂ speed가 가장 영향을 적게 받기 때문에 평균의 Engine deration 식을 이용하여 추정 식을 제시하였다.

선행연구의 한계였던 조종사의 판단에 의한 설정, 예를 들어 Flap과 엔진 추력감소이륙과 같은 변수를 통제할 수 있다는 것이 본 논문의 주요 사항이라 할 수 있다. 본 연구의 추정 식을 활용하면 평균적인 이륙중량을 추정하는 것이 아니라 이륙중량 범위 내의 모든 구간에서 추정을 할 수 있다는 이점이 있다. 하지만 ADS-B로부터 얻은 V₂ speed 정보의 균일성 및 송신 여부, 기종별 ADS-B 송신 특성, Gust wind 영향에 의해 초기 상승 시의 V₂ speed 편차가 존재하므로 많은 데이터 분석을 통해 더 정밀한 연구가 필요하다.

Acknowledgements

본 연구는 국토교통부 데이터 기반 항공교통관리 기술 개발 사업 연구비 지원 (과제번호 : RS-2021-KA163373)에 의해 수행되었습니다. 지원 기관에 감사드립니다.

References

- [1] ICAO Environmental protection. ICAO CORSIA CO₂ Estimation and Reporting Tool (CERT) [Internet]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CERT.aspx>
- [2] Y. S. Chati and H. Balakrishnan, "Modeling of Aircraft Takeoff Weight Using Gaussian Processes," *The Journal of Air Transportation*, Vol. 26, No. 2, pp. 78, April. 2018.
- [3] S. Salgueiro and R. J. Hansman, "Aircraft Takeoff and Landing Weight Estimation from Surveillance Data," in *IAA SciTech Forum*, San Diego, CA & Virtual, pp. 10, 2022.
- [4] H. Lee and G. B. Chatterji, "Closed-Form Takeoff Weight Estimation Model for Air Transportation Simulation," *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Fort Worth, Texas, pp.1, 13, 2010.
- [5] W. Blake, Jet Transport Performance Methods, *Boeing*, pp. 27-1 – pp.27-20, 2009.
- [6] Flight operations engineering boeing commercial airplane group, Flight Planning and Performance Manual, *Boeing*, pp. 1.2.35-36, 1.3.37-38. 1.3.77-78, 2010.
- [7] Ministry of Land Infrastructure and Transport, Korean Airworthiness Standard, Part. 1, General. *Ministry of Land Infrastructure and Transport*, pp. 1-7, 2009.



이 승 표 (Seung-Pyo Lee)

2021년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 일반대학원 항공운항관리학과 박사과정
2017년 8월 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 이학석사
2003년 8월 : Embry-Riddle Aeronautical University(FL, USA) Aeronautical Science 졸업.
2014년 8월 ~ 현재 : 제주항공 근무. 현 B737 기장
※ 관심분야 : 항공운항관리, 항공교통관리, 항공교통 시뮬레이션.



구 성 관 (Sung-Kwan Ku)

2017년 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 이학박사
2009년 9월 ~ 2014년 2월 : 한국산업기술시험원 기계시스템본부 연구원
2015년 6월 ~ 2016년 8월 : Virginia Tech 방문 교수
2014년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공산업공학과 부교수
※ 관심분야 : 항공교통, 시험평가인증, 시스템분석, 시뮬레이션, 안전성평가