Original Article

https://doi.org/10.12985/ksaa.2020.28.2.029
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

항공기 지상 활주 연료소모량 예측모델 사례연구 (A380 중심)

장성우*, 이영재**, 유광의***

A Case Study of Aircraft Taxi Fuel Consumption Prediction Model (A380 Case)

Sungwoo Jang*, Youngjae Lee**, Kwang Eui Yoo***

ABSTRACT

In this paper, we established a prediction model of fuel consumption at the aircraft's taxi operation. To look for countermeasures to reduce fuel consumption and carbon emissions, Airbus A380's actual ground taxi data was used. As a result, the number of stops or turnings during the taxi operation was not related to fuel consumption. It was confirmed that the amount of fuel consumption in the taxi operation was the taxi time and the thrust change. It can be confirmed that ground control optimization, which is the result of close cooperation between the control organization and the airline, is absolutely necessary to reduce taxi time and minimize the occurrence of thrust change events.

Key Words : Taxi Operation(지상활주), Fuel Consumption(연료소모량), Carbon Emission(탄소배출), Prediction Model(예측모델), A380, Taxi Time(지상활주 시간), Thrust Change (추력 변화량)

Ⅰ. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

항공사 운영비용의 30% 정도가 유류비용이기 때문에[1] 항공기 운항연료를 절감하는 것은 항공사의 이윤 성과에 큰 영향을 미친다. 항공기 운항 연료의 상당부분은 공중 비행단계에서 소모되므로 공중 비행단계에서 연료소모량을 줄이는 것이 중요하지만[2], 공항지역에서 연료 소모를 줄이는 것은 연료비 절감뿐만 아니라, 공항지역의 공기 질을 유지하는 데에도 영향을 미치므로 중요성을 무시할 수 없다.[3] 본 연구의 목적은 항공기 지상 활주 단계에서 연료소모량 예측모델을 수립하여, 연료소모량 및 탄소배출량에 영향을 미치는 항공기 기동 변수를 확인하여 항공사의 대응방안과 지상관제의 협조 사항을 확인하는 것이다. 물론, 항공기 제작사의 매뉴얼에 항공기 기동 단계별 연료 소모 예측치가 제시되지만, 항공기 운항에 따라 실제로 발생하는 연료 소모량은 구체적인 항공기 제어(control) 행태에 따라 변할 수도 있다는 의문을 확인하기 위해 본 연구가 시도되었다.

따라서, 본 연구는 실제 항공기 운항의 세부적 기동 단계마다 연료 소모량을 측정한 사례 자료를 수집하여

Received: 06. May 2020, Revised: 15. Jun. 2020, Accepted: 15. Jun. 2020
* 한국항공대학교 항공교통학 이학박사
** 건국대학교 항공우주공학 박사과정
*** 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수
연락저자 E-mail : keyoo@kau.ac.kr
연락저자 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

1) Tom Fodor (IATA), Collaboration for Improved Flight Efficiency, 2015
2) Ben Daley, Air Transport and the Environment, Ashgate, 2010
3) 유광의, 강윤주; 항공환경과 기후변화 (2015)

통계 모델을 도출하였다. 본 연구가 선정한 대상 기종은 에어버스사의 A380이다. 즉, A380 항공기가 인천공항에서 수행한 운항실적 자료를 이용하여 예측모델을 도출하였다. 비행 단계 (in-flight phase)에서의 연료절감과 탄소저감 방안은 많이 연구되었지만[4)5)6)7)], 지상 활주 단계의 연료소모량 변화에 관한 연구는 많지 않아 본 연구의 공헌이 기대된다.

1.2 항공기 지상 활주 단계 기동과 연료 소모

이륙하는 항공기는 게이트에서 출발하여 활주로 말단까지 지상 활주 이동을 해야 하고, 도착하는 항공기는 착륙 후 활주로를 이탈하여 항공기 계류지점 (여객기의 경우 게이트)까지 지상 활주 이동을 하게 된다. 지상 이동체계는 항공기 이동지역의 안전확보와 항공기 이동 효율성을 고려하여 설계된다.[8)]

항공사는 지상 활주 이동 시, 쌍발기의 경우에는 1개 엔진을 shutdown하여 연료 소모를 줄이려고 한다.[9)] 자체 엔진을 가동하여 동력을 얻지만, 부분적으로는 Taxi bot과 같은 견인 장비 때문에 이동 동력을 얻기도 한다.[10)] 엔진 가동을 자제하여 연료 소모를 줄이고, 엔진 배출가스에 의한 공기 오염도 줄이기 위한 노력이 시범적으로 시행되고 있다. 어떻든, 지상 활주 중 연료 절감은 항공사나 공항의 관심사 중의 하나로 인식되고 있다.

대형 공항의 경우, 많은 항공기가 동시에 지상 이동을 하게 되므로 지상 이동 경로가 복잡하고 조종사들은 관제사의 지시에 따라 주어진 경로를 주행해야 하며, 속도의 가감과 방향전환, 충돌 방지를 위한 대기 등이 빈번하게 발생한다. 상기와 같은 지상 활주 중의 항공기 기동 방식에 따른 연료소모량을 이해하는 것은 항공사의 연료 효율성 정책이나 공항의 운영 효율성과 환경 보존 확보 전략에 필요하다. 본 연구는 항공기 운항 중 지상 이동단계에서 실제 발생한 연료소모 데이터를 이용하여 항공기 기동, 조작에 따른 연료소모 변화 모델을 도출하여 지상 활주 중 연료 소모량에 영향을 미치는 요인을 식별한다. 사례연구로서 A 항공사의 A380(에어버스사 제작) 기종의 운항실적 자료를 이용하여 지상 활주 단계의 예측모델을 제시하였다.

Table 1. Aircraft and engine specification

기종	엔진 형식	엔진 추력 (LBf)	최대이륙중량 (Lbs)
A380	RR Trent970	70,000×4	1,254,429

〈출처: Airbus Company, A380 Airplane Flight Manual〉.

1.3 연구방법

1.3.1 사례 항공기의 일반 제원

A380의 항공기와 엔진 형식은 Table 1과 같다. 70,000 LBf 추력의 엔진이 네 개가 장착되어 있으며, 최대이륙중량은 1,254,429파운드로 569톤에 달한다.

1.3.2 지상 활주 연료 소모

제작사 FCOM (flight crew operating manual)에서는 A380 항공기의 지상 활주 중의 연료소모율은 분당 88파운드라고 명시하고 있다. 지상 활주 연료소모량은 이륙 직전까지 사용이 예상되는 양으로, 엔진 시동 시, 지상 활주 시, 그리고 보조동력장치 (APU, auxiliary power unit) 사용 시의 연료 소모를 포함한다. 지상활주 연료소모량은 평균 지상활주 시간과 평균 연료소모율을 가정하여 산정하였다.[11)]

1.3.3 분석 방법

A 항공사 A380의 2015년~2016년 기간 동안 인천출발 편 운항실적 자료 중, 32편의 OQAR 자료를 통해 parameter를 추출하여 본 연구에 사용하였다. 통계분석은 Microsoft Excel 프로그램의 다중선형회귀분석을 이용하였다.

II. 본 론

2.1 기존 문헌 조사

4) 장성우, 유광의; 기종별 연료 효율성 모델 수립과 연료효율 향상을 위한 항공사의 대응방안 연구 (2019).
5) Airbus, Getting to Grips with Fuel Economy (2004).
6) Boeing, Training Materials regarding Fuel Conservation (2014).
7) IATA, Guidance Material and Best Practices for Fuel and Environmental Management (2011).
8) Wells, A. and Youn, S., Airport Planning & Management, 5th ed. p. 123.
9) https://blog.naver.com/fltops/221706339036
10) https://www.iai.co.il/p/taxibotyy
11) Airbus Company. A380 Flight Crew Operating Manual, Taxi Fuel (PER-IFT-FPL-MRF/10 Aug 13).

지상 활주 연료소모량 관련 기존 연구를 문헌조사함으로써 본 연구의 적절성과 연구결과에 대한 합리적인 평가가 가능하도록 하겠다. Khadilkar (2011)은 항공기의 이륙활주 중 연료 소모 예측 연구를 하였다. 항공기의 지상 활주 단계는 총 연료 소모의 일정한 부분을 차지하며, 공항 근처의 이산화탄소 배출에도 영향을 미친다고 설명하였고, 지상 활주 연료소모량을 추정하기 위한 모델을 구축하여 연료소모량과 이산화탄소 배출량의 원인을 확인하고자 하였다.[12)]

방법론으로 회귀분석을 사용하였는데, 지상 활주 연료 소모의 원인인 지상 활주 시간, 정지횟수, 방향전환 횟수를 포함하여 세 개 요인을 선형 함수로 모델을 수립하였다. 연구의 초기 가설은 아래와 같다.

"지상 활주에서의 총 연료 소모는 지상 활주 시간, 정지횟수 및 방향전환 횟수의 함수일 것이다. 그중 지상 활주 시간이 연료 소모의 결정적 요인일 것으로 예상하였다. 또한, 엔진의 추력을 일정하게 유지하는 경우, 연료 소모에 대한 지상 활주 시간의 영향은 선형이 될 것으로 예상하였다. 항공기가 정지 후 움직일 때 추력이 필요하기에 정지횟수도 연료 소모에 영향을 줄 것으로 예상하였다. 마찬가지로, 방향전환은 추력 설정을 조정해야 하므로 방향전환 횟수도 선형으로 예측하였다." 즉, 항공기의 속도 변화를 정지횟수 산정에 참조하였고, 항공기의 Heading 변화를 방향전환 횟수 산정에 참조하였다.

마지막으로, 엔진의 SFC (specific fuel consumption)와 외기온도와의 관계를 이용하여, 식 (1)[13)]과 같은 모델을 수립하였다. 여기서, f는 총 연료소모량, t는 총 지상 활주 시간, n_s는 정지횟수, n_t는 방향전환 횟수이다 (a_1은 상수). 즉, 연료소모량은 활주시간, 정지횟수, 방향전환 횟수의 함수이며, 외기온도가 높아지면 추가 소모되는 것까지 고려하였다.

$$\frac{f}{\sqrt{T_{amb}}} = a_1 + b_1 \cdot t + c_1 \cdot n_s + d_1 \cdot n_t \qquad (1)$$

통계분석 결과, 지상 활주 시간이 연료 소모의 결정 요인임을 의미하였고, 정지횟수의 유의성은 항공기 유형에 따라 다르게 나타났다. 명확한 관계를 나타내는 기종도 있으나, 관계가 거의 없는 기종도 있었다. 모델에서 지상 활주 시간이 지배적임을 고려할 때, 연료 소모에 대한 방향전환 횟수의 효과는 무시할만하다고 할 수 있다.

추력 설정 프로파일을 고려할 때, 연료소모율의 증가를 동반하지 않은 정지 후 가속 이벤트는 추력 설정의 변경도 동반하지 않는 것을 발견했다. 따라서 결과 차이는 조종사 행동의 차이로 인한 것이라고 결론을 내렸다. 실제로, 조종사가 지상 활주 중 항공기의 Throttle (연료 조절기)을 조작 시, 속도 변화를 위해 급격하게 조작하는 때도 있는가 하면, 부드럽게 조작하는 때도 연료 소모 변화에 영향을 미칠 수 있다.

두 번째 모델은 정지횟수와 방향전환 횟수를 제외하고, 가속 이벤트 수를 독립변수로 추가하였다. 이에 대한 두 가지 독립변수는 1개 기종을 제외한 연구한 모든 항공기 유형에 대해 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다.

두 개의 회귀 모형을 통해 얻은 결과로, 총 지상 활주 시간이 연료 소모의 주요 원인으로 나타났다. 즉, 지상 활주 시간과 함께 기종별 연료소모율의 정확한 추정은 지상 활주 연료 소모의 합리적이고 정확한 추정을 제공할 수 있다. 또한, 이전 연구에서 가정한 내용과 달리 정지횟수 또는 방향전환 횟수 자체가 반드시 연료소모율을 필연적으로 증가시키지 않으므로, 총 지상 활주 시간 이상으로 많은 공헌을 하지는 않는다. 이것은 추력 변화 없이도 정지 후 가속 또는 방향전환이 가능함으로 설명하였다. 정지 후 가속 또는 방향전환은 엔진 추력의 증감 없이, 제동장치의 혹은 Nose Wheel의 조작만으로도 가능하다고 보았다.

그러나 가속 이벤트는 연료 소모에 적지만, 통계적으로 유의하였다. 이러한 효과를 포함하면 지상 활주 연료소모율을 정확하게 추정할 수 있으며, 지상 활주 운영 최적화에서도 고려될 수 있다고 하였다.

2.2 지상 활주 연료소모량 모델 도출

2.2.1 지상 활주 연료소모량 모델(1)

2.1에 언급한 선행 연구자의 첫 번째 모델 해석 결과는 지상 활주 시간이 연료 소모의 결정 요인이었고, 정지횟수의 유의성은 항공기 유형에 따라 다르게 나타났다. 명확한 관계를 나타내는 기종도 있으나, 관계가 거의 없는 기종도 있었다. 단, A380 기종 연구 결과가 없었기에, 선행 연구자의 같은 연료소모량 모델 속에

12) Harshad Khadilkar, Estimation of Aircraft Taxi-out Fuel Burn using Flight Data Recorder Archives (2011).
13) Harshad Khadilkar, Estimation of Aircraft Taxi-out Fuel Burn using Flight Data Recorder Archives (2011).

A380 실적자료를 반영하여 그 결과를 해석하고자 한다.

본 연구는 앞에서 소개한 사례 자료인 A 항공사 A380 기종 항공기의 인천공항 출발 편 운항실적 데이터를 활용하여 지상 활주 중 연료 소모 행태를 추정하였다. 지상 활주 시간, 정지횟수, 방향전환 횟수를 독립변수로 하고, 지상 활주 연료소모량을 종속변수로 하는 회귀분석 결과를 본 연구의 모델로 채택하였다.

Fig. 1, Fig. 2와 같이 지상 활주 시간에 따른 속도 변동과 Heading 변화를 이용하여 정지횟수와 방향전환 횟수를 구하였다.

Table 2~4에서 확인한바, 항공기 지상활주 연료소모량 예측모델(1)의 적합성은 만족하였으나, 개별 회귀계수의 적합성은 만족하지 못하였다.

조정된 결정계수는 0.97로, 모델의 설명력은 97%이다. 모델 분산분석의 F값은 0.00으로 0.05보다 작기에 모델이 적합하다고 보았다. 단, 개별 회귀계수의 분산분석 결과, 정지횟수의 회귀계수와 Y절편 (상수)의 P값은 0.05보다 크기에 적합하지 않았다. 통계적으로, 항공기 지상활주 연료소모량 예측모델(1)은 채택하지 않았다.

2.2.2 지상 활주 연료소모량 모델(2)

2.1에 언급한 선행 연구자의 두 번째 모델은 정지횟수와 방향전환 횟수를 제외하고, 가속 이벤트 수를 독립변수로 반영하였고, 두 가지 독립변수는 (하나를 제외한) 모든 항공기 유형에 대해 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다. 단, 이벤트 수보다는 이벤트 발생의 지속 기간이 더 큰 의미가 있다고 판단하여, 본 연구는 이벤트 수 대신에 지상 활주 시간과 추력 변화량 (세기와 지속시간 반영)의 두 가지 독립변수로만 지상 활주 연료소모량 예측모델을 수립하였다.

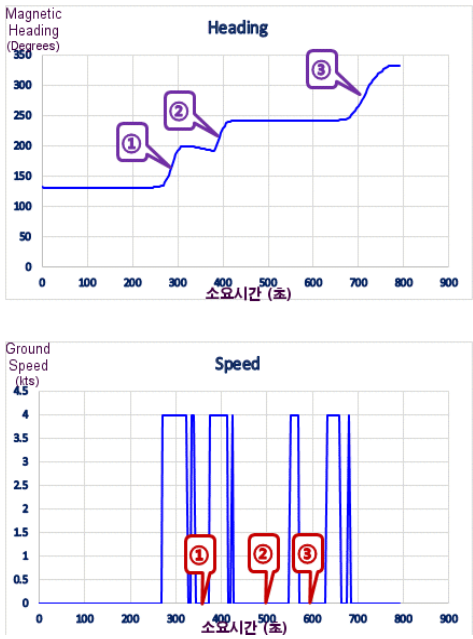

Fig. 1. Aircraft taxi fuel consumption prediction model(1) – Case #1

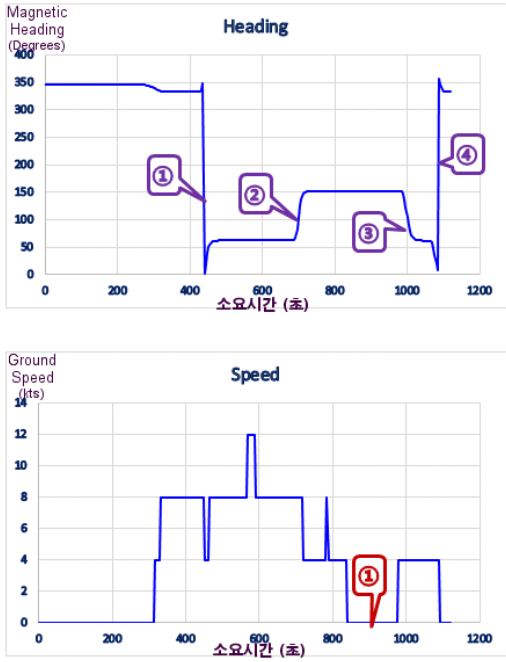

Fig. 2. Aircraft taxi fuel consumption prediction model(1) – Case #2

Table 2. Regression statistics: Model(1)

회귀분석 통계량	
다중 상관계수	0.99
결정계수	0.97
조정된 결정계수	0.97
표준 오차	91.49
관측수	32

Fig. 3, Fig. 4와 같이 Fuel Flow Deviation의 크기와 지속시간을 곱한 수치를 추력 변화량으로 정의하였다. 지상 활주 시간, 추력 변화량을 독립변수로, 지상 활주 연료소모량을 종속변수로 하는 회귀분석을 하였다.

Table 5~7에서 확인한바, 항공기 지상활주 연료소모량 모델(2)의 적합성과 회귀계수의 적합성을 만족하였다.

Table 3. ANOVA - model conformity check: Model(1)

	자유도	제곱합	제곱 평균	F 비	유의한 F
회귀	3	8,802,759.5	2,934,253.2	350.5	0.00
잔차	28	234,382.0	8,370.8		
계	31	9,037,141.5			

Table 4. ANOVA - regression coefficient conformity Check: Model(1)

	계수	Table준 오차	*t* 통계량	*P*-값
Y 절편	-62.6	75.5	-0.8	0.41
Time	1.5	0.1	22.4	0.00
Stops	10.2	13.6	0.8	0.46
Turns	49.9	18.2	2.7	0.01

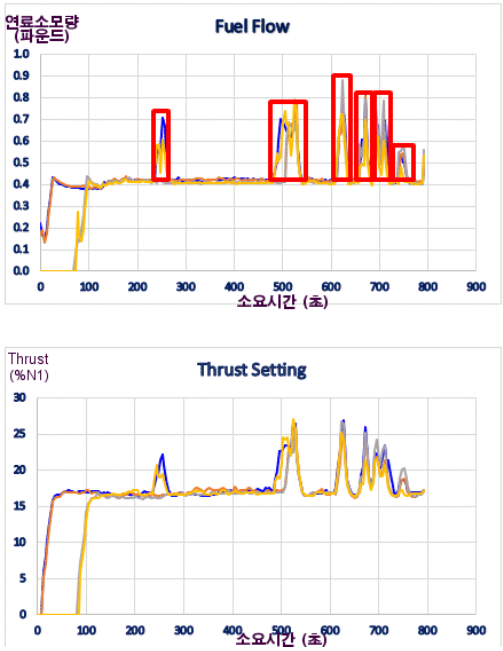

Fig. 3. Aircraft taxi fuel consumption prediction model(2) - Case #1

Fig. 4. Aircraft taxi fuel consumption prediction model(2) - Case #2

Table 5. Regression statistics: Model(2)

회귀분석 통계량	
다중 상관계수	1.00
결정계수	0.99
조정된 결정계수	0.99
표준 오차	45.21
관측수	32

조정된 결정계수는 0.99로, 모델의 설명력은 99%이다. 모델 분산분석의 F값은 0.00으로 0.05보다 작기에 모델이 적합하다고 보았다. 개별 회귀계수의 분산분석 결과, 회귀계수와 Y절편 (상수)의 P값 모두 0.05보다 작기에 각 회귀계수와 상수도 적합하다고 보았다. 통계적으로, 지상 활주 연료 소모의 요인은 지상 활주 시간과 추력변화량이 유의하다.

회귀계수 반영한 지상 활주 연료소모량 예측모델(2)는 Table 8과 같이 정의된다.

Table 6. ANOVA - model conformity check: Model(2)

	자유도	제곱합	제곱 평균	F 비	유의한 F
회귀	2	8,977,864.0	4,488,932.0	2,196.1	0.0
잔차	29	59,277.5	2,044.1		
계	31	9,037,141.5			

Table 7. ANOVA - regression coefficient conformity check: Model(2)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-값
Y 절편	-74.4	30.8	-2.4	0.02
Time	1.6	0.0	64.2	0.00
Thrust	1.1	0.1	10.8	0.00

Table 8. Aircraft taxi fuel consumption prediction Model(2)

모델	모델의 설명력 (R Square)
1.6×Time+1.1×Thrust-74.4	0.99

종속변수: 지상 활주 연료소모량 (파운드).
독립변수: Time (단위: 초).
독립변수: 추력 변화량 (단위: 파운드.초).

Table 9. Correlation analysis

	Fuel	Time	Thrust
Fuel	1		
Time	0.98	1	
Thrust	0.25	0.09	1

다중공선성 확인을 위해 상관분석을 한 결과, 지상 활주 시간과 엔진 추력 변화량의 상관관계 없음을 Table 9와 같이 확인하였다.

III. 결 론

지상 활주 연료소모량에 영향을 미치는 것은 지상 활주 시간과 추력 변화량 (Fuel Flow Deviation의 크기와 지속시간을 곱한 수치)이다. 따라서, 지상 이동단계에서 연료 소모량을 줄이기 위해서는 이동 동선의 복잡성 해소보다는 지상 활주 시간 단축이 필요하다. 지상 활주 시간 단축을 위해서는 공항지역 항공교통관제 기관의 효율적 교통량 관리가 필요하다. 최근에 도입하기 시작한 D-MAN (Departure Management)의 효과적인 적용은 불필요한 지상 지연을 예방하여 지상 활주 시간을 감축시키는 데 도움이 될 것이다.

모든 비행단계와 마찬가지로 지상활주 단계에서도 조종사의 항공기 이동 조작 행태는 활주연료 감축에 큰 영향을 미친다. 급격한 Throttle 조작 등으로 추력 변화량을 크게 함은 지양해야 한다.

공항 당국은 유도로 및 계류장 설계와 운영에 항공기 이동시간 단축을 고려하는 것이 필요하다. 게이트 배치와 배정에 안전운항과 함께 효율성이 고려될 수 있도록 해야 한다. 게이트 배정을 교통량에 따라 유연하게 적용하여 게이트로부터 활주로 말단까지의 이동거리가 최소화될 수 있도록 적시 적소 배정이 가능하도록 해야 한다.

본 연구는 매우 구체화한 사례연구로 연구 결과의 적용에 있어서 다음과 같은 제한사항이 존재한다: (1) 다른 기종 항공기는 다른 특성의 모델이 적절할 수 있다. (2) 동일 기종이라도 장착 엔진의 종류 혹은 항공사의 표준절차 등에 따라 차이가 발생할 수 있다. 또한, 분석에 사용한 통계자료수가 32개로 적어 모델 일반화에는 한계가 있다. 최소 100개 이상 또는 연간 자료를 분석하여 신뢰도를 강화함은 다음의 과제로 남기고자 한다.

참고로, 본 연구에서 도출한 모델 기준, A380 기종의 지상 활주시간 10분 동안의 연료소모량은 960파운드 (1.6×600)로 제작사에서 제시한 것보다 다소 높은 편이다. 이를 특정 항공사의 Taxi Out Fuel 산정에 보수적으로 적용할 수 있겠으나, 신뢰도를 강화함이 우선된다.

References

1. Airbus Company, A380 Flight Crew Operating

Manual, Taxi Fuel (PER-IFT-FPL-MRF/10 Aug. 13).
2. Airbus Company, A380 Airplane Flight Manual.
3. Airbus Company, Getting to Grips with Fuel Economy, 2004.
4. Ben Daley, Air Transport and the Environment, Ashgate, 2010.
5. Boeing, Training Materials regarding Fuel Conservation, 2014.
6. Collins, B., "Estimation of aircraft fuel consumption", Journal of Aircraft, 19.
7. Harshad, K., "Estimation of Aircraft Taxi-out Fuel Burn using Flight Data Recorder Archives", 2011.
8. IATA, Fuel Efficiency Program Implementation Guidance Material, 2011.
9. IATA, Tom Fodor, Collaboration for Improved Flight Efficiency, 2015.
10. International Civil Aviation Organization, International Standards and Recommended Practices, Annex 16, Environmental Protection: Aircraft Engine Emissions.
11. Jung, Y., "Fuel consumption and emissions from airport taxi operations", NASA Green Aviation Summit, 2010.
12. Yoo, K. E., and Kang, Y. J., "Aviation Environment and Climate Change", 2015.
13. Patterson, J., Noel, G., Senzig, D., Roof, C., and Fleming, G., "Analysis of departure and arrival proles using real-time aircraft data", Journal of Aircraft, 46(4), 2009.
14. Simaiakis, I., and Balakrishnan, H., "Queuing models of airport departure processes for emissions reduction", AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2009.
15. Jang, S., and Yoo, K. E., "New Fuel Efficiency Model Setup & Airline's Method to Enhance Fuel Efficiency", 2019.
16. Wells, A., and Youn, S., Airport Planning & Management, 5th ed. McGraw-Hill, 2004.
17. http://blog.naver.com/fltops/220904540814
18. http://blog.naver.com/fltops/220906724426
19. https://blog.naver.com/fltops/221706339036
20. https://www.iai.co.il/p/taxibotyy