

민항기 비행운 저감 인증을 위한 비행운 예측 기초 모델 개발

최준영¹ · 최재원¹ · 김혜민^{1,†}¹한국교통대학교 항공기계설계학과Development of a Basic Contrail Prediction Model for the Contrail Reduction
Certification of Commercial AircraftJun-Young Choi¹, Jae-Won Choi², Hye-Min Kim^{1,†}¹Department of Aeronautical Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation

Abstract

Contrails are line-shaped clouds formed by the condensation of water vapor from the interaction of exhaust gas from aircraft engines and the high-altitude atmosphere. Contrails are known to aggravate global warming by creating a greenhouse effect by absorbing or reflecting radiation emitted from the Earth. In this study, development of a model that can quantitatively predict the contrail occurrence was conducted for the reduction of contrail, which is likely to form an aircraft certification category in the future. Based on prior research results, a model that can predict the occurrence of contrail between Tokyo and Qingdao was developed, in addition to proposing improved flight altitude that can minimize the occurrence of contrail.

초 록

비행운은 항공기 엔진에서 발생하는 배기가스가 고고도의 공기와 혼합되어 수증기가 응결되면서 생성되는 구름이다. 비행운은 지구에서 방출되는 복사선을 흡수하거나 반사시키는 방식으로 온실효과를 만들어 지구 온난화를 악화시키는 것으로 알려져 있어 지구 온난화 극복을 위해서는 반드시 저감되어야 한다. 본 연구를 통해 비행운 발생을 정량적으로 예측할 수 있는 모델을 개발하고, 이를 통해 향후 항공기 인증 항목이 될 가능성이 있는 항공기의 비행운 저감 규제에 대비하고자 한다. 연구에서는 기존 선행 연구 결과를 바탕으로 도쿄-칭다오 간 항로를 비행하는 항공기의 비행운 발생을 예측하는 모델을 개발하고, 비행 고도를 일부 변경하여 비행운 발생을 최소화할 수 있는 향상된 비행고도를 제안하고자 한다.

Key Words : Contrail(비행운), Atmospheric Humidity(대기 습도), Atmospheric Temperature(표준대기온도), Propulsive Efficiency(추진효율), Flight Altitude(비행고도)

1. 서 론

1.1 비행운의 정의

비행운은 항공기 엔진 배기에서 분출되는 고온의 가스가 차가운 대기와 만나 형성되는 길게 뻗은 띠 모양의 구름이다. 항공기 배기에서는 연료의 연소 부산물로 수증기가 발생하게 되는데 이 수증기가 항공기 주위의 차가운 대기에 방출되면 급속한 액화가 진행되어

비행운이 형성된다. 비행운은 일반적으로 상공 8000 m 이상에서 생성되나 계절이나 지리적 위치에 따라 생성 고도가 변하기도 하며, 매우 추운 기후에서는 지상에서도 발생할 수 있다[1].

비행운은 항공기 역사 초기부터 중요하게 다루어졌는데 특히 비행운 발생 시 항공기가 광학적으로 뚜렷하게 식별되므로 군용 항공기에서 비행운의 발생 여부는 매우 중요한 이슈였다. 일례로 2차 세계대전 당시에는 전투기에서 발생한 비행운이 전투기의 항로를 노출해 적 항공기에 추적 및 요격당하는 사례가 발생하였다[2].



Fig. 1 Contrail formation

1.2 군용 항공기의 비행운 저감 사례

이에 따라 각국에서는 군용 항공기의 비행운 발생을 억제하기 위한 이론적, 실험적 연구를 다수 수행하였다. Schumann U. 등은 연료 변경을 통해 엔진에서 발생하는 수증기량을 변화시키고, 불순물 생성량을 저감하여 비행운을 저감하는 방법을 제시하였다[3]. 등유(Kerosene)와 액체 수소연료(LH2)의 비행운 생성 비교 실험에서 등유 연소 시 생성되는 수증기량은 수소연료에 비해 적으나 Soot 등의 불순물로 인해 수증기 응집 시 활발하게 진행되어 생성된 비행운의 가시성이 증가함을 확인하였다. Anderson C. 등은 클로로술폰산을 엔진 배기에 분사하여 비행운을 저감하는 연구를 수행하였다[4]. 클로로술폰산은 항공기 엔진 배기에 분사 시 열에 의해 염화수소(hydrogen chloride)와 삼산화황(sulfur trioxide)으로 분해하게 되며, 삼산화황의 흡습성으로 인해 엔진으로부터 형성된 수증기가 다수의 미립 액적 형태로 유도되어 관측 가능한 비행운 생성이 억제되었다. 그러나 클로로술폰산은 독성이 매우 강한 물질로 최근에는 사용이 금지되었다. Noppel G. 등은 엔진의 추진 효율이 다른 두 항공기의 비행운 생성량을 비교하는 실험을 통해 엔진의 추진 효율이 낮을수록 항공기 비행운 생성을 억제할 수 있다는 것을 확인하였다[5]. 이러한 다수의 선행 연구에도 불구하고 최근에는 비행운 저감 관련 연구가 부재한 실정인데, 이는 현대전에서 군용 항공기의 탐지가 레이더 등을 통한 비가시 거리에서 이루어짐에 따라 피탐지 목적의 비행운 저감은 큰 의미가 없어졌기 때문이다.

1.3 비행운의 환경 문제

최근 들어 비행운은 지구 온난화에 심각한 영향을 끼친다는 사실이 밝혀졌다. 미 항공우주국(NASA)에 따르면 비행운이 현재 유럽과 미국 하늘 전체 구름량의 0.5% ~ 2%를 차지하고 있다고 보고하였으며 이러한 추세가 지속된다면 비행운으로 인한 지구 온난화 효과가 기존 예측 대비 2050년에는 3~4배 정도 증가할 것이라고 전망하였다[6]. 현재는 사안의 심각성을 인지한 학자들을 중심으로 민항기에서 발생하는 비행운을 저감하여 지구 온난화를 예방하는 방안이 기초적 수준에서 논의되고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 항공기의 비행운을 저감하기 위한 다양한 방안이 제시 되었으나, 기존 연구에서 수행되었던 화학 물질 분사, 항공 연료 변경 등은 환경 오염 및 현실성 측면에서 배제될 가능성이 높다[7]. 민항기에 적용할 수 있으면서도 가장 현실적인 비행운 저감 방안은 고도변경을 포함한 항공기의 항로 변경이다. 독일 린 덴 베르크 연구팀은 라디오존데 데이터를 이용하여 비행운이 형성되기 쉬운 대기 구간을 분석하였으며 대부분의 비행운은 대류권 상층부와 성층권 하층부 사이 구간에서 생성됨을 확인하였다[8]. 따라서 민항기 운용 과정 중 비행운 생성 구간을 회피하여 고도를 변경하는 방법으로 비행운을 저감할 수 있을 것이라 기대된다. 하지만 현재 국내에서 항공기 비행운 저감 관련 연구는 부재하며 고고도 기상자료도 매우 부족한 형편이다.

1.4 연구 목적

본 연구에서는 선행연구에서 제시된 비행운 발생 모델을 바탕으로 민항기의 비행 중 비행운 발생을 예측하는 모델을 개발하는 데 그 목적이 있다. 항공기 경로는 우리나라 상공에서 30,000 ft 이상으로 비행하는 일본-중국 항로의 항공기를 선정하여 모델의 검증 및 해석을 진행하였다. 구성된 모델을 활용하여 민항기의 운항 중 비행운 발생 정도를 예측하고 이를 최소화 할 수 있는 비행고도를 제안하고자 한다. 본 연구를 통해 개발된 모델은 향후 규제 가능성이 있는 비행운의 생성을 효율적으로 저감하기 위한 기초적인 연구 자료로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 비행운 발생 예측 모델 구성 및 검증

2.1 비행운 발생 이론

비행운 발생은 엔진 후류 조건, 항공기 주위 대기 조건, 후류 내 입자의 종류 및 분포 등의 영향을 받다고 알려져 있으며, 이 중 후류 내 입자에 의한 영향성은 이론적으로 정확히 확립되지 않았으므로 본 연구에서는 엔진 후류 및 주위 대기 조건을 주요한 변수로 하여 비행운 발생 모델을 개발하고자 한다[9].

Figure 2는 비행운의 형성원리를 열역학적으로 나타낸 온도-수증기 압력 그래프이다[5]. 그래프에서는 액체 상태의 물(실선/적색)과 얼음(실선/청색)의 포화선 및 항공기 엔진 배기(E)와 대기조건(A)을 직선으로 연결한 혼합 선(Mixing Line: 점선)이 나타나 있다. 이때 엔진 배기는 대기 조건까지 단열팽창 과정을 거친다고 가정한다. 혼합 선이 얼음 포화 곡선의 접선이 되는 지점에서의 온도(T_C)를 임계온도라고 한다. 비행운이 발생하기 위해서는 그래프의 혼합 선이 임계온도보다 높아져 얼음 포화 곡선의 왼쪽 영역에 도달하여야 한다(Contrail 마크 된 A-E 점선). 따라서 이를 위해서는 동일한 대기조건(A)에서 혼합선의 기울기가 일정 이상으로 증가하여야 한다. 이때 혼합선의 기울기(G)는 다음으로 알려져 있다[5].

$$G = \frac{EI_{H_2O} \cdot p \cdot C_p}{\varepsilon \cdot Q \cdot (1 - \eta)} \quad (1)$$

이 식에서 EI_{H_2O} 는 물의 Emission index, P는 대기 압력, $\varepsilon = R_{air}/R_{water}$ 는 기체상수비, C_p 는 정압비열, Q는 해당 연료의 발열량, η 는 엔진 전 효율을 의미한다[1, 6]. 본 식을 통해 볼 때, 항공기 엔진 측면에서 비행운을 억제하기 위해서는 G가 감소하여야 하므로 엔진의 효율, 대기 압력 및 Emission index가 낮아져야 하고, 사용 연료의 발열량은 많아야 한다[5].

동일한 엔진 후류 조건 일 때에도 항공기 주위 대기 조건이 비행운 생성에 영향을 미칠 수 있다. Eq. (2)는 항공기 주위 대기의 상대습도에 따른 비행운 형성의 임계온도 변화를 나타낸다. 여기서 T_M 은 상대습도가 100 %일 경우의 임계온도, e_{sat} 은 상변화 그래프에서의 포화 곡선 함수, U는 상대습도를 의미한다[7]. 위 식에 따르면 임계온도는 항공기 주위 대기 습도가

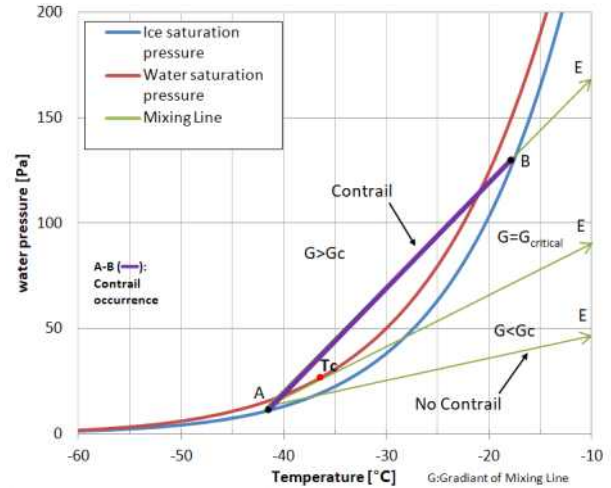


Fig. 2 Phase diagram with the mixing line

감소할수록 (Fig. 2의 A 점이 아래로 내려갈수록) 더 낮아지게 되며 이에 따라 비행운 생성 확률이 감소하게 된다.

$$T_C = T_M - \frac{[e_{sat}(T_M) - U \cdot e_{sat}(T_C)]}{G} \quad (2)$$

항공기 주위 대기 습도는 비행운의 성질도 결정짓게 되는데, 습도가 낮은 경우에는 비행운의 지속시간이 짧은 단기 비행운(Short lived contrail)이 발생하지만, 습도가 높은 경우에는 지속 비행운(Persistent contrail)이 발생하여 오랜 시간 동안 비행운이 유지되고, 지속 비행운(Persistent contrail)이 기류를 만나 주변으로 길게 확산하는 경우도 발생하는데 이를 지속 확산 비행운(Persistent spreading contrail)이라고 한다. 각 비행운은 Fig. 3과 같은 형태로 나타난다. 비행운의 지속시간을 고려할 때, 향후 비행운 발생 주요 규제 대상으로는 지속 비행운과 확산 비행운이 포함될 것으로 생각된다.



Fig. 3 (Left)Short-lived, (Mid)Persist, (Right)Persist spreading contrail

2.2 다양한 운항 조건에서 비행운 발생 모델

앞서 확인한 비행운 발생 이론을 바탕으로 민항기의 비행운의 생성 여부에 대해 모델링을 수행하였다. 모델 구성을 위해서는 앞선 Eq. (1)에 제시된 다양한 값들이 필요하나 일반적으로 이는 측정이 매우 어려우므로 아래와 같은 몇 가지 가정이 사용되었다.

1. 통상적으로 민항기는 항공용 JET A-1을 연료로 사용하므로 Eq. (1)에 제시된 Water emission index와 발열량은 연료의 제조사 및 품질에 관계없이 모두 동일하다고 가정.

2. 비행운 발생 모델링을 위해서는 대기 연직방향의 온도, 압력, 습도분포에 대한 자료가 있어야 하나, 관측 자료가 매우 부족한 실정이므로 관련 자료는 다음의 방법으로 획득함.

- 대기 연직방향 온도 : ISA 표준 대기 온도
 - 대기 연직방향 압력 : ISA 표준 대기 압력
 - 대기 연직방향 습도 : Create a monthly/seasonal mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset (미국 NOAA Physical Science Laboratory 제공)
 - 계절 별 온도 및 상대습도 변화 : 날씨누리(대한민국 기상청)
3. 모델링 조건은 온도변화를 고려하여 볼 때 C_p 변화량은 대기 조건에 따른 변화가 매우 작으며, 따라서 상수(1,004 J /kg·K) 로 가정.
4. 엔진 전 효율은 Cruising 중의 최대 효율 데이터를 사용하였으며, 순항 중 효율의 변경은 없다고 가정

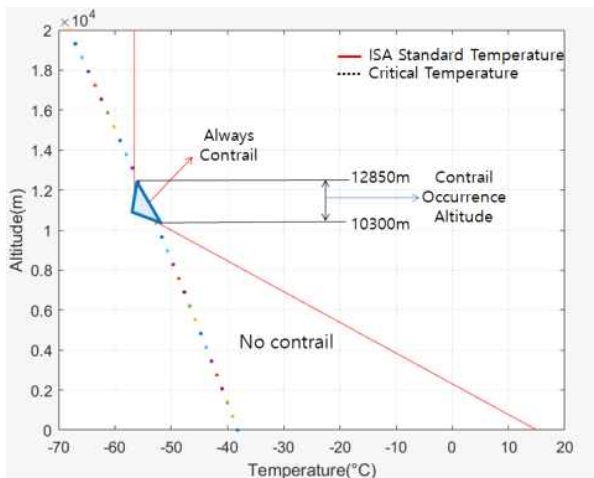


Fig. 4 Modeling of contrail occurrence altitude in September

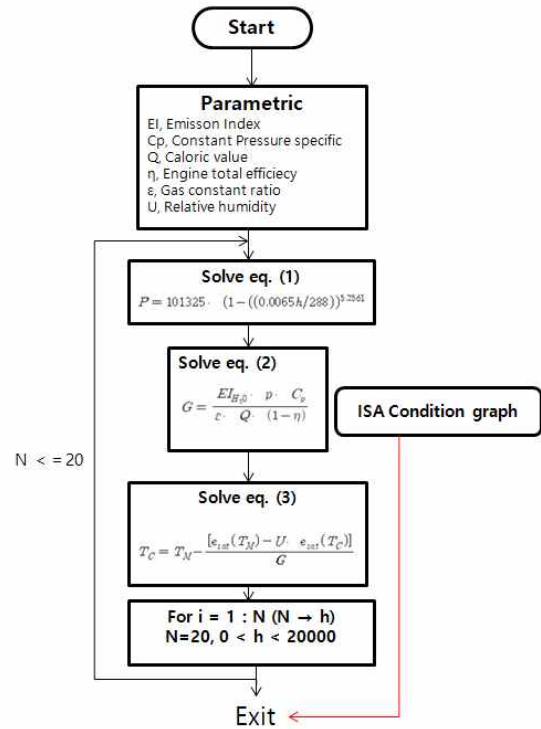


Fig. 5 Matlab flow chart

주어진 자료를 이용해 비행운이 생성되는 고도 범위를 계산할 수 있다. Figure 4는 엔진 효율 0.25인 항공기가 9월 평균 대기 조건에서 비행할 때 임계온도와 표준대기온도를 그래프로 나타낸 것이다. 앞서 주어진 데이터를 바탕으로 하여 특정한 대기 조건에서 고도변화에 따른 임계온도를 반복계산을 통해 도출할 수 있으며, 이를 표준대기조건의 연직 온도와 비교하여 연직 온도가 T_c 의 좌측에 위치하는 범위에서 비행운이 발생한다고 결론지을 수 있다[10]. Figure 4 조건에서는 특정고도(10300 ~ 12850 m)를 비행하는 항공기에서 비행운이 생성될 수 있으며, 항공기의 통상 운용 고도를 고려할 때 항공기가 10000 m 이상의 고도로 비행할 경우 모두 비행운이 생성된다고 결론지을 수 있다. 일련의 계산과 분석들은 MATLAB 프로그램을 통해 진행되었으며 계산 절차는 Fig. 5에 제시되어 있다.

2.2.1 대기 조건에 따른 비행운 형성고도 변화

주어진 가정을 바탕으로 각종 대기 조건에 따른 비행운 형성 고도를 확인하였다. 먼저 다양한 계절 조건

의 기상 데이터를 수집하여 계절별, 날씨별 비행운 생성 모델링을 수행하고자 하였다. Table 1은 우리나라의 계절별 지상 온도 및 평균 습도 변화를 나타낸 표이며 Table 2는 월 별 연직 방향의 상대습도를 나타낸 도표이다. 본 데이터는 날씨 누리(대한민국 기상청) 및 NOAA Physical Science Laboratory(미국)로부터 획득하였다. 앞서 설명한 바와 같이 현재 연직 대기 조건을 정확히 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 본

Table 1 Seasonal temperature and relative humidity (2019)

Season	Temperature	Relative Humidity
12~2	-9.4~8.5	24.6~45.9 %
3~5,9~11	-4.6~33.4	27.6~68 %
6~8	14.1~36.8	34.8~78.7 %

Table 2 Relative humidity by altitude and seasons (%)

고도 (km)	5	7.5	10	12.5	15	17.5
Jan	31.5	27.6	30.0	28.9	26.6	19.6
Feb	39.7	38.3	40.6	38.8	35.9	33.0
Mar	42.0	35.6	35.5	34.2	32.7	27.8
Apr	51.9	41.8	38.1	33.7	33.6	34.4
May	43.1	33.1	30.2	31.0	35.9	39.0
Jun	67.9	51.2	41.1	34.8	36.2	42.3
Jul	78.7	65.8	55.1	45.7	40.0	49.5
Aug	70.6	52.1	44.2	40.1	39.4	46.1
Sep	68.0	51.8	48.9	49.5	47.6	49.3
Oct	50.1	32.5	33.8	33.5	33.3	35.9
Nov	42.3	32.2	31.9	30.4	29.9	27.6
Dec	45.9	32.4	31.1	30.6	30.5	24.6

연구에서는 지상 조건을 바탕으로 연직 대기 온도 조건은 ISA 기준, 습도조건은 Table 2의 데이터를 사용하여 대기 특성을 추정하였다. 엔진 효율을 동일하게 설정하기 위해 현재 국내에서 가장 많이 보유하고 있는 기종인 Boeing 사의 737-800 기종의 엔진 효율을 대입하여 계산하였다.

Figure 6은 계절 평균 기온 및 습도에 따른 비행운 생성 고도 변화를 나타낸다. 그래프에서 확인할 수 있듯 대기가 차갑고 건조한 겨울철 (보라색 실선)은 비행운 형성 고도가 10500 m 이상으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면 온도가 증가하고 습해지는 여름철 (하늘색 실선)에는 비행운 생성 고도가 10000 m 정도

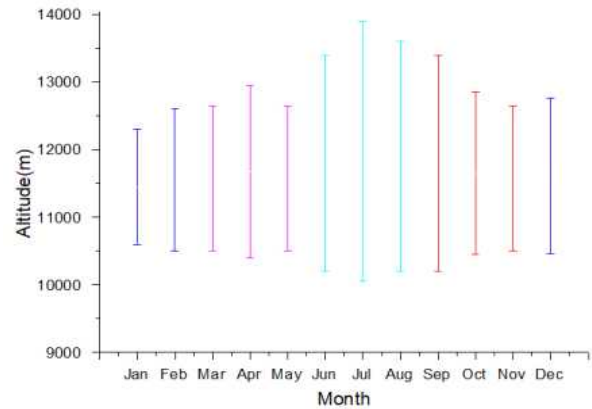


Fig. 6 Seasonal contrail formation of B737-800

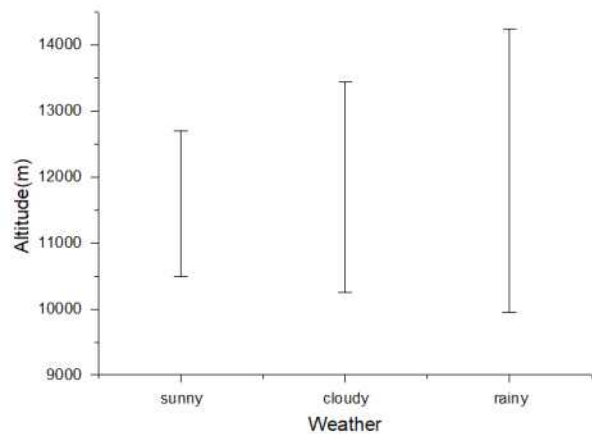


Fig. 7 Contrail occurrence altitude of B737-800 by Weather in July

로 하강하였다. 이를 통해 같은 고도에서 비행하는 항공기라도 계절에 따라 비행운이 생성되는 고도가 달라지기 때문에 계절별로 적절한 고도 하강을 통해 비행운 생성을 최소화 할 수 있다는 것을 알 수 있다[11]. 특히 여름에 발생하는 비행운의 경우 주위 대기 상태가 대부분 수증기 포화지역에 있어 Persistent contrail 형태로 나타나는 경우가 많다. 따라서 여름철에 더욱 적극적인 비행운 저감 전략을 수립한다면 지구 온난화 방지에 효과적인 대응을 할 수 있을 것으로 생각된다.

Figure 6은 월별 평균대기 조건을 사용하였으므로, 같은 월에서 기상 변화에 따른 비행운 발생 조건 변화를 확인할 수는 없다. 기상 조건에 따른 비행운 형성의 변화를 확인하기 위해 7월 중 맑은 날, 흐린 날, 비오는 날 조건에서 비행운 생성 고도 변화를 확인하여

Fig. 7의 그래프로 나타내었다. 맑은 날의 경우 비행운 생성 고도가 10500 m 정도를 유지하였으나, 비 오는 날 고도가 10000 m 아래로 감소함을 확인하였다. 이는 대기의 습도 증가로 인한 비행운 형성 임계온도의 증가 때문이다. 다만 흐린 날, 비 오는 날 조건의 경우 이미 대기에 많은 양의 구름이 있을 것으로 생각되므로, 맑은 날 조건에 비해 상대적으로 비행운 저감 효과가 미미할 것으로 생각된다.

2.2.2 추진 효율에 따른 비행운 형성고도 변화

항공기의 엔진 효율은 엔진 배기가스의 초기 온도 조건(T_a)을 결정짓는 사항으로 이에 따른 비행운 형성 고도의 변화가 발생한다[12]. 따라서 민항기의 통상적인 순항 엔진 효율 범위에서 효율 변화에 따른 비행운 발생 고도변화를 Fig. 8과 같이 나타내었으며 다양한 민항기의 비행운 발생 범위를 그래프 내(회색 영역)에 표시하였다.

그림에서 볼 수 있듯이, 엔진 효율이 0.1 변화함에 따라 비행운 생성 고도는 1000 m 이상 증가하는 것을 확인할 수 있다. 일례로 엔진 효율이 0.4이고 이에 따라 비행운 생성 고도는 현재 국내에서 운용하고 있는 A350-800의 경우 9950 m ~ 14350 m 수준이다. 반면 상대적으로 엔진 효율이 낮은 B737-800의 경우 비행운이 생성되는 최저고도가 A350-800에 비해 400 m 이상 높은 것을 알 수 있다. 즉, 엔진의 효율이 높은 항공기일수록 비행운 형성 고도가 낮아지기 때문에 비행운 저감을 위해 더욱 적극적인 고도 하강이 필요하다고 할 수 있겠다.

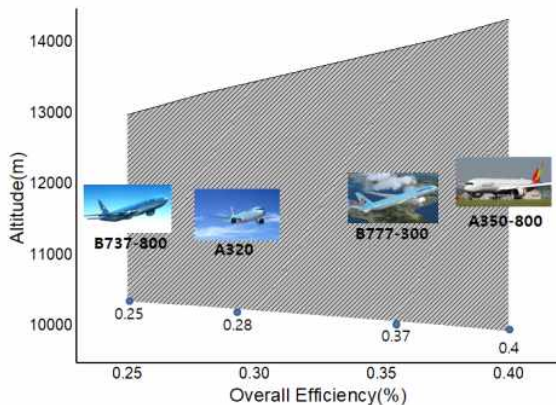


Fig. 8 Contrail occurrence altitude by propulsion efficiency

3. 도쿄-칭다오 항로 구간에서 비행운 발생 예측 모델링 및 저감 전략

구성된 비행운 생성 예측 모델을 이용하여 도쿄-칭다오 항로를 비행하는 항공기에서 발생하는 비행운을 예측해 보았다. 특별히 이 구간을 선정한 이유는 일본-중국 항로는 국제선으로 비행횟수가 많고 비행고도가 높아 비행운 저감 기술 도입 시 그 효과가 클 것으로 예상되기 때문이며, 두 번째로는 비교적 단거리 항로이므로 비행 구간 및 시간에 따른 기상 편차가 다소 적어 단일 기상 조건을 대입하여도 정확성이 높기 때문이다. 마지막으로 대부분의 순항구간 중 많은 부분이 우리나라를 통과하는 구간이므로 적절한 기상 데이터의 획득이 용이하기 때문이다.

본 장에서는 도쿄-칭다오 항로를 비행하는 항공기에서 발생하는 비행운을 정량적으로 확인하고 고도 하강을 통한 비행운 저감 효과를 예측하고자 한다.

3.1 모델 검증

구성된 모델을 검증하기 위해 실제 비행 중 비행운이 발생하는 항공편을 관찰하고 이때의 기상, 항공 데이터를 모델에 입력하여 비행운 형성 여부와 비행운 타입 등을 비교분석하였다. Figure 9는 2020년 10월 30일 오전 10시경 충주상공을 비행하는 SC 2408편의 실제 위치 정보 및 이를 지상에서 관측한 사진이다. 관찰당시 항공기의 비행고도는 10,700 m 지상 온도는 $^{\circ}\text{C}$, 상대습도는 66 %였다. 항공기 후류에 의해 Short lived contrail 타입의 비행운이 관찰되었으며, 이를 본 연구 모델로 검증하기 위해 모델에 당시 기상 상황 등을 입력하여 비행운 형성 여부 및 비행운의 형태를 실제 비행운 결과와 비교하였다.



Fig. 9 Flight route and observed short lived contrail of SC 2408 at 30th Oct, 2020

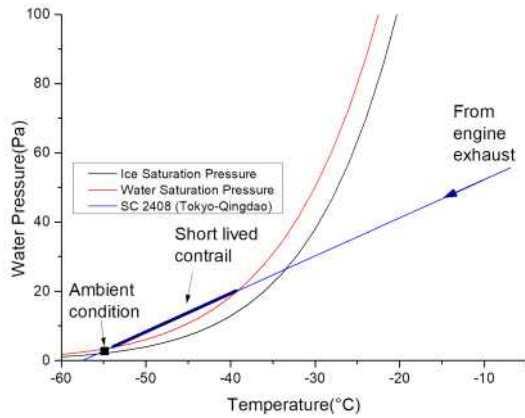


Fig. 10 Modeling of contrail occurrence (SC2408)

Figure 10은 결과를 얼음과 물의 Saturation Pressure 그래프와 함께 나타낸 그래프이다. 항공기 기종으로부터 추정된 Engine exhaust는 낮은 주위 온도 및 압력 조건으로 진행해 가는데, 이 때 비행운 발생 영역인 Water saturation curve를 일부 넘어가 비행운 발생 영역(진한 청색 실선)인 좌측에 위치하는 것을 볼 수 있다. 이후 대기 조건이 water saturation curve 우측에 위치하므로 Engine exhaust는 다시 비행운 형성영역에서 벗어나게 되며, 모델 상 결론으로는 Short lived contrail을 형성하는 것으로 나타났다. 이는 실제 관측 결과와 일치하는 결론으로 구성된 모델이 실제 비행운 형성을 적절히 예측할 수 있음을 검증하였다.

3.2 도쿄-칭다오 항로 비행운 발생 예측 모델링

도쿄-칭다오 항로에서 발생하는 비행운 발생 여부를 확인하기 위해 먼저 일자별 도쿄-칭다오 항로를 비행하는 항공기의 비행거리별 고도변화를 확인하는 작업을 수행하였다. Figure 11은 2019년 12월 2일 도쿄-칭다오 항로를 비행하는 산둥 항공 SC2048 (B737-800)의 고도 데이터를 나타낸 것이다. 이 데이터는 Flight radar 24에서 제공하는 데이터를 통해 획득하였다. 이를 통해 비행 당일 서울의 기온/습도/기압에 대한 비행 당일 비행운 발생 고도를 계산하였으며, 이를 항공기 고도 데이터와 비교하여 비행운이 생성되는지 여부를 확인하였다.

비행운 생성량을 정량적으로 표현하기 위해 전체 비행거리 중 비행운이 발생한 거리의 비율을 나타냈다.

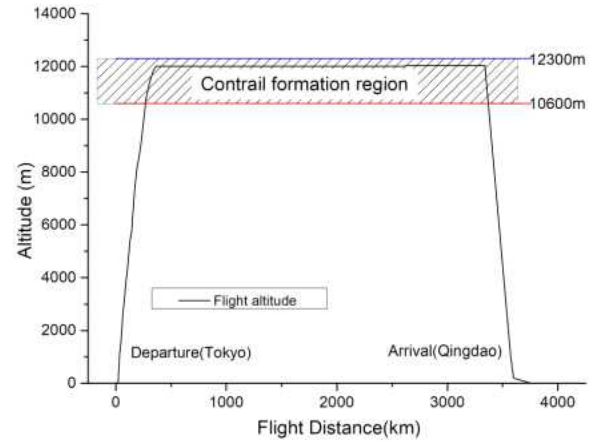


Fig. 11 Change of flight altitude (SC2408)

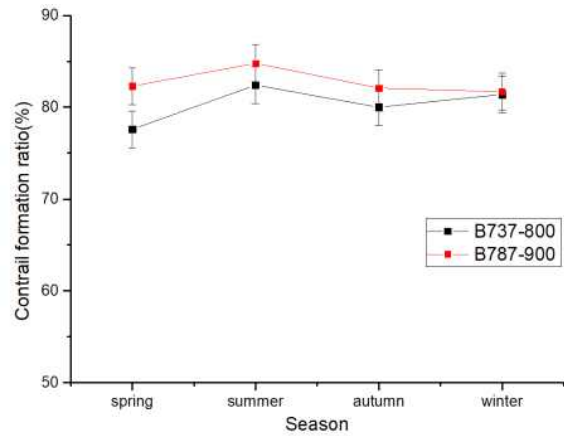


Fig. 12 Contrail formation ratio of B737-800 and B787-900 in various seasons

Figure 11을 통해 확인해 볼 때 SC2408편은 도쿄를 이륙한 후 곧바로 고도를 상승시켜 순항고도인 약 12000 m 에 도달하였으며 이후 조금씩 비행고도를 변화시키기는 하였으나 대부분의 구간에서 순항고도를 12000 m 이상으로 유지하다가 칭다오에 근접함에 따라 차츰 고도를 낮추어 하강 후 착륙하였다. 이 항공기의 비행경로에서 비행운이 발생하는 지역은 대부분 최고 고도인 순항지역이며 전체 비행경로 중 비행운이 발생하는 경로 비율은 약 82.4 % 로 확인되었다.

다음과 같은 방법으로 도쿄 - 칭다오 항로를 운행하는 대표적인 항공기인 B737-800과 B787-900의 비행운 발생 비율을 다양한 비행 조건에서 조사하였으며 그 결과는 Fig. 12와 같다. 그래프를 통해 볼 때 두 기종에서 전반적으로 여름철에 전체 경로 중 비행운

발생 경로 비율이 증가하였으며 B787-900의 경우 전체 경로 중 약 84 % 까지 증가함을 확인하였다. 이는 여름 및 초가을에 엔진 전 효율이 0.25 인 B737-800 기의 경우 비행운 생성 고도의 범위가 약 10500 m ~ 13000 m 에 분포하고 엔진 전 효율이 0.38인 B789 기의 경우 비행운 생성 고도의 범위가 약 10000 m ~ 14150 m 에 분포하고 있기 때문에 순항 고도 12000 m ~ 13000 m 로 운항하는 항공기의 비행운이 잘 발생하는 조건이라고 할 수 있다[13]. 봄, 겨울에는 비행운 발생 비율이 다소 감소하였으나, 비행경로 중 대부분이 12000 m 이상의 고도를 순항하는 구간이므로 비행운 발생 감소율 차이는 크지 않았다. 이를 통해 모든 계절 조건에서 순항고도의 조절을 통한 비행운 저감이 필요할 것으로 판단되었다.

3.3 고도 변경을 통한 비행운 저감 전략

민항기에서 비행운을 저감하는 가장 효과적인 방법은 비행 고도를 하강하는 방법이다. 앞서 확인된 비행운 발생 결과에서 비행고도의 하강에 따라 어느 정도의 비행운 저감을 기대할 수 있는지에 대한 결과를 나타내었다.

Figure 13은 Fig. 11의 고도경로에서 순항고도를 1.5 km 하강시켰을 때를 가정한 그래프이다. 확인할 수 있듯 기존 경로에서 순항고도를 1.5 km 하강시키는 것만으로도 비행운 미발생 구역으로 진입하게 된다는 결론을 얻을 수 있다. 이처럼 순항고도의 하강 시 별도의 조치 없이도 효과적으로 비행운을 저감할 수

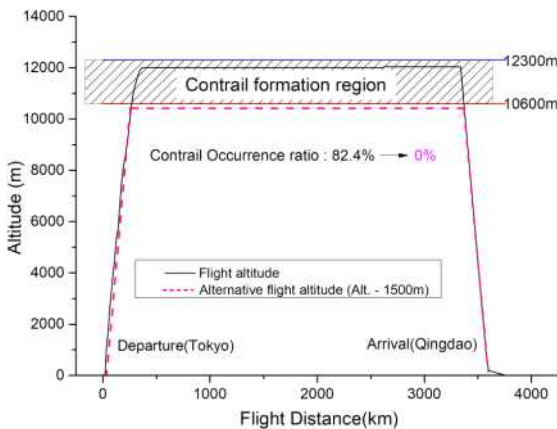


Fig. 13 Alternative flight altitude of SC2408 for reduction of contrail formation

있음을 확인할 수 있다.

계절에 따른 SC2048편의 비행운 발생 비율 및 현재 순항고도에서 고도를 1000 m, 1500 m 하강시켰을 때 비행운 발생 비율 변화를 Fig. 14와 같이 나타내었다. 고도 하강에 따라 비행운의 발생 비율이 감소하였는데, 1000 m 감소 시에는 비행운이 다소 감소하였으나, 1500 m 감소 시에는 모든 계절에서 비행운이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 현재 도쿄-칭다오 항로를 비행하는 항공기의 비행고도를 약 1.5 km 정도 낮춘다면 매우 효과적인 비행운 저감 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 고도 하강 시 항공기 연료가 추가로 소모되는 단점이 있으나 대안 경로로 제시된 10000 m 정도의 고도도 현재 민항기가 충분히 비행 가능한 고도이며 연료 소모율 증가율도 5 % 이내가 될 것으로 판단된다. 반면 1.5 km 내외의 고도 감소로 매우 높은 비행운 저감 효과를 거둘 수 있다는 점을 고려한다면 향후 비행운 저감 인증을 위하여 항공기 비행 고도 감소를 통한 비행운 저감을 적극적으로 고려할 만하다. 결과적으로 항공기 연료 소비율 증가와 비행운 저감 효과와의 상호관계를 적절히 고려하여 순항고도를 낮춘다면 최소한의 연료 소비율 증가로도 비행운을 효과적으로 저감시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서 도출된 모델은 단순화를 위해 다양한 가정을 사용한 한계점이 존재한다. 또한 연직방향의 기상은 일반인이 데이터를 획득하기 매우 어려운 부분이 있어 지표면의 기상 조건을 바탕으로 연직 방향의

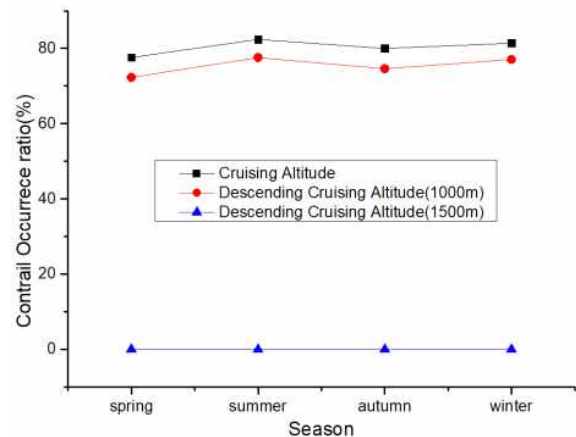


Fig. 14 Change of contrail occurrence ratio by descending cruising altitude

기상을 추정하는 방식을 사용하였다.

향후 비행운 연구 시 이러한 한계점이 개선된다면 더욱 높은 정확도로 비행운 발생을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지구 온난화에 큰 영향을 미치는 비행운 발생을 저감하기 위해 비행운 발생 예측 모델을 구축하고 이를 활용하여 민항기의 비행운 발생 및 저감 방안을 정량적으로 확인하였다. 본 연구를 통해 확인된 사항은 다음과 같다.

1. 비행운 생성 고도는 계절, 날씨, 항공기 추진 효율 등에 따라 변화하였으며, 이를 비행운 발생 모델을 통해 추정 가능하였다.
2. 도쿄-칭다오 항로에서 전체 항로 중 비행운 발생 비율은 약 80 % 에 육박하였다. 특히 여름의 경우 비행운 발생 비율이 85 % 에 이르러 적극적인 비행운 저감이 요구되었다.
3. 순항 고도 감소를 통한 비행운 저감 효과가 뛰어난 것으로 확인되었다. 순항 고도를 약 1500 m 감소할 경우 대부분의 비행운을 저감할 수 있는 것으로 파악되었다.

본 연구를 기반으로 한 정밀한 비행운 생성 모델이 구축된다면 향후 발효될 가능성이 있는 항공기 비행운 저감 인증을 효과적으로 대응할 수 있을 것이다.

References

- [1] J. Eric, "Environmental Conditions Required for Contrail Formation and Persistence," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 103, pp. 3929-3936, Sep 1997.
- [2] F. Noppel and R. Singh, "Contrail Avoidance in The Aircraft Design Process," *The Aeronautical Journal*, vol. 112, pp. 733-737, Dec 2008.
- [3] U. Schumann, "On Condition for Contrail Formation from Aircraft Exhausts," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 5, pp. 4-23, Feb 1996.
- [4] E. Anderson, "Method and apparatus for suppressing contrails," US Patent 3,527,505, Jun 1970.
- [5] F. Noppel and R. Singh, "Overview on Contrail and Cirrus Cloud Avoidance Technology," *Journal of Aircraft*, vol. 44, pp. 1721-1726, Oct 2007.
- [6] A. Thompson, R. R. Friedl, H. Wesoky, "Atmospheric Effects of Aviation: First Report of the Subsonic," NASA, May 1996.
- [7] F. Noppel, "Overview on Contrail And Cirrus Cloud Avoidance Technology," *Journal of Aircraft*, vol. 44, pp. 1721-1726, Oct 2007.
- [8] O. B. Popovicheva, N. M. Persiantseva, E. E. Lukhovitskaya, N. K. Shonija, O. B. Popovicheva, N. A. Zubareva, B. Demirdjian, "Aircraft Engine Soot As Contrail Nuclei," *Geophysical Research Letters*, vol. 32, p. L11104 Jun 2004.
- [7] C. Alcala-Jormod, H. van den Berch, and M. J. Rossi, "Can Soot Particles Emitted by Airplane Exhaust Contribute to the Formation of Aviation Contrails and Cirrus Clouds?," *Geophysical Research Letters*, vol. 29, pp. 1-1, 1-4, Sep 2002.
- [10] L. S. Mark, "Calculations of Aircraft Contrail Formation Critical Temperatures," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 36, pp. 1725-1729, Dec 1997.
- [11] C. Fichter, "The Impact of Cruise Altitude on contrails and Related Radiative Forcing," *Meteorologische Zeitschrift* vol. 14, pp. 563-573, Sep 2005.
- [12] F. Haglind, "Potential of lowering the contrail formation of exhausts by engine re-design," *Aerospace Science and Technology*, vol. 12, pp. 490-497, Dec 2007.
- [13] U. Schumann, "Experimental Test of the influence of Propulsion Efficiency on Contrail Formation," *Journal of Aircraft*, vol. 37, pp. 1083-1087, Dec 2000.