

비행운 저감 기술 동향

최재원¹ · 옥권우¹ · 손명진¹ · 김혜민^{1,†} · 양계병² · 김지현² · 조하나²¹한국교통대학교 항공기계설계학과²국방과학연구소 제 7연구본부

A Trend for the Contrail Reduction Technology

Jaewon Choi¹, Gwonwoo Ock¹, Myeongjin Son¹, Hyemin Kim¹,Gybyeong Yang², Ji Hyun Kim², Hana Cho²¹Department of Aeronautical Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation²7th R&D Institute, Agency for Defense Development

Abstract

Contrail is type of clouds which are formed by a condensation of water vapour from the aircraft exhaust when the aircraft is flying the cold atmosphere. Since contrails have considerable effect on greenhouse-effect and military stealth efficiency, researches about contrail avoidance technology has been conducted for decades. However, none of the previous researches concerning contrail avoidance was carried out in Korea. Thus, review of the previous study regarding contrail reduction is absolutely needed. In this paper, researches conducted by several countries are categorically introduced, and practicabilities of their methods are analyzed. This paper also suggests some practical and systematized way to conduct future researches about contrail avoidance.

초 록

비행운은 항공기가 차가운 대기를 비행할 때 엔진 배기의 수증기가 응축하여 발생하는 구름을 말한다. 비행운은 지구 온난화의 원인중 하나로 지목되고 있으며 군사적으로는 항공기 스텔스 기술과 연관되어 있으므로, 이를 저감하기 위한 관련 연구가 진행되었다. 그러나 우리나라의 경우 관련 연구가 전혀 진행되지 않은 실정이므로, 연구 수행을 위한 기초자료로써 선진국의 비행운 저감 기술 사례를 집중적으로 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 선진국에서 수행되었던 비행운 저감 기술 동향을 카테고리 별로 파악하고, 제시된 각 기술들의 타당성과 실현 가능성을 분석하였다. 또한 관련 기술의 적용 및 상용화를 위한 방향을 제안하였다.

Key Words : Contrail (비행운), Water Vapour (수증기), Condensation (응축), Cloud (구름), Crystallization (결정화), Nuclei (응결핵)

1. 서 론

비행운(Contrail)은 항공기가 차가운 대기를 비행할 때 엔진 배기의 수증기가 응축하여 발생하는 구름을 뜻하며, 일상생활에서 빈번하게 관찰 가능하다. 항공기

엔진 배기가스는 대부분 이산화탄소와 수증기로 이루어져 있는데, 배기가 항공기 주위의 차가운 대기를 만나 응결하여 긴 띠 형태의 구름인 비행운이 형성된다 [1,2].

비행운은 항공기 개발 역사 초기부터 관찰되었는데, 대부분의 경우 항공기 임무 및 대기환경에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 군사적인 측면에서 비행운은 항공기 뒤편으로 자취를 남기게 되므로, 항공기의 피탐지성에 악영향을 미치게 된다. 일례로 2차 대

Received: Mar. 02, 2018 Revised: Apr. 13, 2018 Accepted: Apr. 19, 2018

† Corresponding Author

Tel: +82-43-841-5838, E-mail: enok2695@ut.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering



Fig. 1 Ground view of contrail.

전에서는 고고도의 항공기를 파악하기 위해 비행운을 관찰하였다. 비행운 발생으로 인한 항공기 피탐지성 감소는 현대에도 동일하며, 군용 항공기의 생존성을 감소시키는 요인으로 지목되고 있다[3].

비행운은 지구 온난화에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다[4]. 비행운은 지표면에서 우주로 발산되는 장파복사를 흡수하여 대기 온도를 높이고, 지구 온난화를 촉진시킨다. 미국항공우주국(NASA)은 최근 유럽과 미국 하늘의 0.5%~2% 정도가 비행운으로 뒤덮여 있으며 이는 북반구의 대기 온도를 0.01~0.1℃ 정도 상승시키는 효과를 갖고 있다고 보고했다[5].

앞서 언급한 내용을 토대로 비행운 저감 기술은 상용기와 군용기 모두에게 매우 중요한 문제이며, 이에 따라 외국에서는 다양한 측면에서 비행운을 감소시키기 위한 연구를 수행하였다. 그러나 현재 우리나라에서는 비행운 저감 관련 기존 연구가 전무한 실정이므로, 비행운 저감 연구를 수행하기 위해서는 먼저 선진국의 비행운 저감 기술 동향 및 전략을 파악할 필요가 있다.

본 논문은 선진국의 기존 비행운 저감 기술 동향을 파악하고 기술 상용화 가능성을 검토하여, 향후 국내 비행운 저감 기술 연구를 위한 기초 자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

2. 비행운 형성 원리

비행운은 항공기 엔진으로부터 생성된 수증기 및 불순물이 저온의 고고도 환경에서 응축/결빙되어 액적으

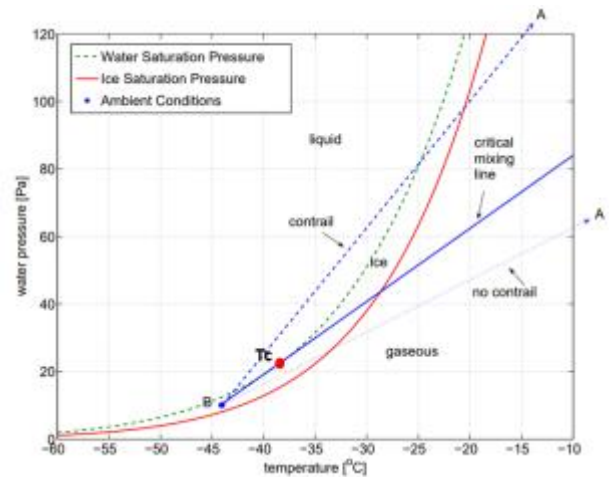


Fig. 2 Phase diagram with the mixing line[1].

로 결정화되어 구름형태를 이루는 것을 말한다. 비행운의 종류는 비행운의 형상에 따라 단기 비행운(Short lived contrail), 지속 비행운(Persistent contrail) 및 지속 확산 비행운(Persistent spreading contrail)으로 나누어지는데, 이는 항공기 주위 대기 상태에 따라 결정된다. 만약 대기가 수증기에 대해 충분히 포화되지 않은 상태라면 항공기 배기에서 발생한 비행운은 곧 대기 중으로 증발하여 비행운의 길이가 제한되는데, 이를 단기 비행운(Short-lived contrail)이라고 한다. 반면 대기가 수증기에 대해 포화상태라면 비행운은 항공기 후방으로 선처럼 길게 생성되며 장기적으로 지속된다. 이러한 비행운을 지속 비행운(Persistent contrail)이라고 하며, 여기서 기류에 의해 확산되어 권운으로 진화한 비행운을 지속 확산 비행운(Persistent spreading contrail)이라고 한다[2].

Figure 2 는 비행운의 형성원리를 열역학적으로 나타내는 온도-수증기 압력 그래프이다[1]. 그래프에서는 액체상태의 물(곡선/점) 및 얼음(곡선/빨강)의 포화선과 항공기 엔진에서 배기가스가 배출될 때의 노즐 출구 조건(A)과 대기조건(B)을 직선으로 연결한 혼합선(mixing line; 파랑색/실선 및 점선)이 나타나 있다. 혼합선이 물 포화곡선의 접선이 되는 지점에서의 온도(Tc)를 임계온도라고 한다.

비행운이 발생하기 위해서는 그래프의 혼합선이 임계온도보다 낮아져 물 포화곡선의 왼쪽 영역에 도달하여야 한다(contrail 표시된 점선 A-B). 따라서 동일한 대기조건(B)에서 혼합선이 물 포화곡선의 왼쪽 영역에

도달하기 위해서는 혼합선의 기울기가 일정 이상으로 증가하여야 한다. 비행운이 발생할 수 있는 최소 기울기를 가진 혼합선을 임계혼합선(Critical mixing line - Critical mixing line 표시된 실선 A-B) 이라고 하며 혼합선의 기울기(G)는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다[3,6].

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

이 식에서 EI_{H_2O} 는 물의 배출지수(emission index), P 는 대기 압력, $\varepsilon = R_{air}/R_{water}$ 는 기체상수비, C_p 는 정압비열, Q 는 해당연료 발열량, η 는 엔진 추진효율을 의미한다[3,6]. 식 (1)을 통해 확인 가능하듯 항공기 엔진의 추진효율을 낮추거나 낮은 배출지수(emission index) 값을 가진 연료를 사용함으로써 열역학적으로 비행운 형성을 억제할 수 있다[1]. 여기서 물의 배출지수는 각 연료마다 정해진 고유의 값이며 연료의 연소로부터 배출되는 물의 양을 나타낸다. 이는 배기와 대기의 수증기 질량농도의 차, 엔진을 통과하는 공기와 연료의 유량비를 통해 구할 수 있다.

동일한 엔진 후류조건 (A)에서 비행운 형성은 항공기 주위 대기조건(B)에 의해서도 영향을 받는다[7,8]. 식 (2)는 상대습도에 따른 비행운 형성의 임계온도 변화를 나타낸다[9,10].

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

T_M 은 상대습도가 100%일 경우의 임계온도, e_{sat} 은 상변화 그래프에 나타난 포화곡선 함수, U 는 상대습도를 의미한다[9,10].

이 외에도 비행운 형성에 영향을 주는 다른 요소는 검댕(soot)과 황산화물 같은 불순물이다[11,12]. 검댕(soot)과 황산화물은 비행운의 응집핵 역할을 하여 수증기의 응축을 촉진시키며, 열역학적 추정온도보다 높은 온도 구간에서 비행운을 발생시킬 수 있다[12].

3. 비행운 저감 기술동향

3.1 비행경로 변경

비행운을 저감시키기 위한 가장 기본적인 방법으로 비행경로를 변경하는 방법이 있다. 앞서 설명한 바와 같이 비행운 형성은 항공기 주위 대기조건에 따라 결정되므로, 비행운 형성을 저감하기 위해 항공기 비행경로를 변경하는 방법을 고려할 수 있다[1,2].

비행경로 변경 관련 이전 연구들 중 가장 많이 제시된 방법은 비행고도를 낮추는 방법이다. 비행운이 형성되기 위해서는 항공기 주위 온도가 충분히 낮아야 하고, 상대습도가 높아야 한다. 그러나 비행고도를 낮추면 항공기 주위 대기 온도가 증가하게 되므로 비행운 결정 입자가 충분히 응축되지 못하게 되며, 비행운 발생이 저감된다[1,13].

비행고도 변경에 관한 연구 사례로 독일 린텐베르크에서 진행된 연구를 들 수 있다[14]. 이 연구에서는 라디오존데(Radiosonde)데이터를 이용하여 비행운이 형성되기 좋은 얼음 과포화 대기 구간을 탐색하고, 해당 구간의 비행을 최대한 회피하는 방법을 통해 비행운을 저감시키는 방법을 제시했다. Figure 3은 독일 린텐베르크에서 라디오존데를 이용하여 2000년 2월부터 2001년 4월 까지 조사한 대류권과 성층권 하층부의 상대습도분포자료이다. 그래프를 통해 확인 가능하듯 대류권 상층부와 성층권 하층부 사이 구간에서 얼음 과포화대기가 형성되어 있으므로 얼음과포화대기가 최대치인 권계

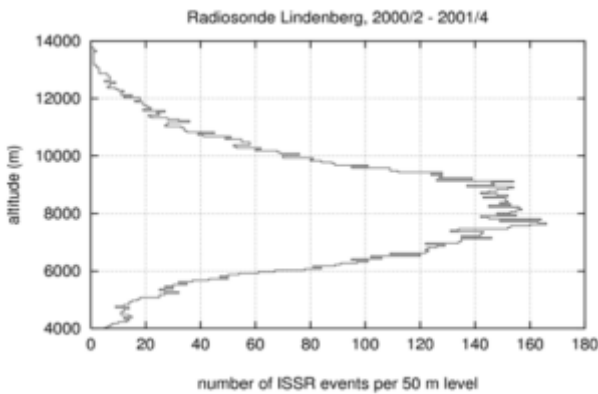


Fig. 3 Ice super-saturation over Lindenberg: vertical distribution of ice super-saturated layers[14].

*ISSR(Ice Super-Saturation Region)

면 아래(대부분의 중위도에서 9000m-flight level 290)에서의 비행을 회피하는 것이 비행운 저감에 있어 매우 효과적일 수 있다고 보고했다. 또한 이 연구에서는 고도를 계속 낮춰 비행하는 것보다 주위환경 변화에 따라 즉각적으로 고도를 변경하는 것이 더욱 효과적이라고 보고했다. 항공기 고도 변경을 통한 비행운 저감 전략을 이용한 주요 항공기는 U-2 정찰기를 들 수 있다. U-2 정찰기는 항공기에 탑재된 후방 미러(Rear's view mirror)를 통해 조종사가 비행운을 육안으로 확인하고, 비행운 확인 시 고도를 변경하는 방법으로 비행운을 저감하였다.

항공기 비행경로 변경을 통한 비행운 저감 방법의 단점은 저고도에서의 비행은 항공기의 연료 소비율을 증가시키고, 이산화탄소 배출 또한 증가되는 점이 있다. 또한 복잡한 비행교통을 예측 및 분석하는 장치가 개발되어야 하며 비행운을 감지할 수 있는 센서가 추가적으로 필요하다[2,14].

3.2 엔진변경

식 (1)을 통해 확인한 바와 같이 비행운의 형성은 항공기 엔진의 추진 효율(η)의 영향을 받는다. 비행운을 저감하기 위해서는 항공기의 추진 효율을 감소시켜야 하는데, 이는 추진 효율이 혼합선의 기율기와 반비례 관계를 갖기 때문이다.

Figure 4 는 엔진 효율이 서로 다른 두 항공기(A340/B707)가 동일한 고도에서 비행할 때 비행운 발생 여부를 관찰한 사진이다. A340의 경우 추진 효율이 높은 터보팬 엔진을 사용하므로 비행운이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면 B707 은 추진 효율이 상대적으로 낮은 터보제트 엔진을 사용하므로 엔진 배기 온도가 상대적으로 높아 비행운이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 다음의 실험결과는 항공기 엔진의 추진 효율과 비행운 형성의 상관관계를 열역학적으로 설명한 앞선 내용과 일치한다[6].

항공기 엔진의 추진 효율을 낮출 경우 비행운 형성을 억제할 수 있으나, 이에 따른 연료 소비 증가, 이산화탄소 배출량 증가, 항공기의 전반적 성능 저하라는 부작용이 따르게 된다. 이러한 부작용을 완화하기 위하여 언덕티드 팬(Unducted fan) 엔진, 중간냉각 열교환(Intercooled recuperated) 엔진, 가변 가이드 베인



Fig. 4 Left: B707 with relatively low propulsion efficiency. Right: A340 with relatively high propulsion efficiency[6].

(Various guide vanes; 이하 VGVs) 등의 개념이 제시되었다[1,9].

언덕티드 팬(Unducted fan) 엔진과 중간냉각 열교환(Intercooled recuperated) 엔진은 추진 효율을 낮추면서도 상대적으로 높은 전 효율을 유지하도록 설계하여 연료 소비 증가 문제를 일정 부분 해소하였다. 그러나 설계의 복잡성 및 신뢰성 문제로 상용화 되지 못한 엔진이며 비행운 형성 억제에 큰 영향을 끼치지 못할 것으로 평가하고 있다[1].

VGVs 설치를 통한 비행운 저감 방법은 터빈 입구 온도(Turbine inlet temperature ; 이하 TIT)를 임의로 높여 항공기의 효율을 일시적으로 낮춤으로써 비행운을 저감하는 것이 목표이다. VGVs를 사용하여 터빈 입구 온도를 증가 시켰을 때 비행운이 형성되는 임계 온도가 평균 1.5K 낮아지는 것을 시뮬레이션을 통해 증명하였다. 하지만 터빈 입구온도가 너무 높아질 경우 터빈재료가 고온을 견딜 수 없고, VGVs 설치로 인한 페널티 대비 비행운 저감 효과가 극히 낮다고 보고하고 있다[9].

3.3 연료성분 변화

연료 또는 연료 내부 첨가제를 통해 엔진에서 발생하는 수증기량을 변화시키고, 불순물 생성을 저감하여 비행운 형성을 억제할 수 있을 것으로 기대되어 왔다. 연료성분이 변화할 때 식 (1)의 혼합선 기율기 (G)에서 배출지수(Emission index- EI_{water})와 연료 발열량(q_{net}) 이 변화하게 되는데, 배출지수를 낮추고, 높은 발열량 연료를 사용하면 혼합선의 기율기가 완만해져 비행

Table 1 Provide energy specific emission index values for each fuel[15].

Kerosene	LH2	Methane
0.029 kg/MJ	0.075 kg/MJ	0.045 Kg/MJ

운 발생 확률이 낮아진다. 여기서 EI_{water}/q_{net} 를 에너지 비 배출지수(Energy specific emission index)라고 정의한다[11]. Table 1은 각 연료별 에너지 비 배출지수 값을 나타낸다[15].

연료 내 성분에 의해 발생하는 에어로졸 입자 및 황 성분은 액적이 응결될 때 응결핵 역할을 하여 비행운의 형성을 촉진시킨다[15]. 따라서 연료 내 관련 성분을 제거하여 비행운을 저감하는 초저황 연료, 액체 수소연료, 연료첨가제 방법이 제시되었다. 초저황 연료의 경우 황의 농도는 전체 연료대비 백만분의 1보다 적은 양이 들어가 있으며 황 첨가제가 포함되지 않은 FT 합성 파라핀 연료(Fischer-Tropsch synthetic paraffin fuel)를 사용하거나, 기존의 항공 연료에서 황 제거장치를 이용하여 황을 제거하는 방법이 제시되었다[12]. 그러나 연료 중 황 성분 제거를 통한 비행운 저감 방법이 그다지 효과적이지 못하다는 반론도 타 연구자들에 의해 제기되었다[11,16].

액체 수소연료(LH₂)는 기존의 항공 연료에 비해 약 2.6배의 물을 배출하나, 에어로졸(aerosol)이 억제되므

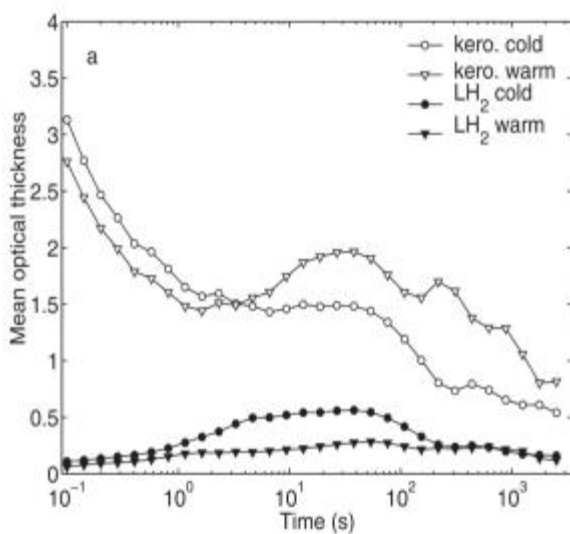


Fig. 5 Average optical thickness. warm: low altitude. cold: high altitude[17].

로 비행운 저감에 효과적인 연료로 제시되었다.

Figure 5에서는 연료에 따른 비행운의 광학적 두께를 나타내고 있다. 액체수소 연료를 사용할 경우 발생하는 수증기량은 케로신 연료에 비해 증가하나, 응결핵이 거의 존재하지 않으므로 비행운 형성이 오히려 저감되는 것을 확인할 수 있다[17].

연료성분 변경 기술들의 단점은 항공기 연료를 교체해야 한다는 것이며, 이에 따라 엔진 연료계통의 변경이 필요한 경우가 발생할 수 있다는 점이다. 또한 관련 기술들은 이론 및 실험실 스케일에서만 검증되었으며, 실제 항공기 실험을 통해 증명되지 않았다는 단점이 존재한다.

3.4 배기 후처리

배기 후처리 기술의 기초적인 원리는 항공기 배기를 특정한 방법으로 처리하여 배기의 얼음 결정 형성에 영향을 주는 방법이다. 배기 후처리 중 가장 대표적인 방법은 화학 후처리와 초음파 후처리이며 카본 블랙(Carbon black)을 항공기 배기에 분사하여 비행운의 자취를 감추는 방법 또한 소개되었다[18].

화학 후처리는 배기 후처리 기술 중 가장 많은 실제 실험 사례들이 있어 효과가 검증된 방법이다. 화학 후처리의 기본적 원리는 엔진 배기에 특정한 화학약품을 분사하여 얼음 결정 입자들의 형성을 인위적으로 변화시키는 방법이다. 현재까지 알려진 연구 결과로는 비행운의 입자크기가 $5\mu m$ 보다 작아질 경우 관측이 불가능하며, 따라서 대부분의 화학 후처리 방식은 화학약품을 통해 얼음 결정의 크기를 $5\mu m$ 이하로 형성시키는 역할을 하게 된다[19].

화학 후처리에 사용되는 대부분의 화학약품은 주성분이 알코올로 구성된 혼합물이다[20,21]. 알코올에 적절한 비율의 계면활성제(surfactant), 무기성/유기성 혼합물(inorganic/organic compound), 부식 억제제 등을 첨가하여 사용되는데, 이렇게 완성된 화학 혼합물은 엔진으로부터 형성된 액적의 어는점을 급격히 낮추어 초응집(hypernucleation)현상을 촉진 시키며, 이에 따라 비행운 입자크기가 $0.2\mu m$ 이상으로 성장하는 것을 방지한다[20].

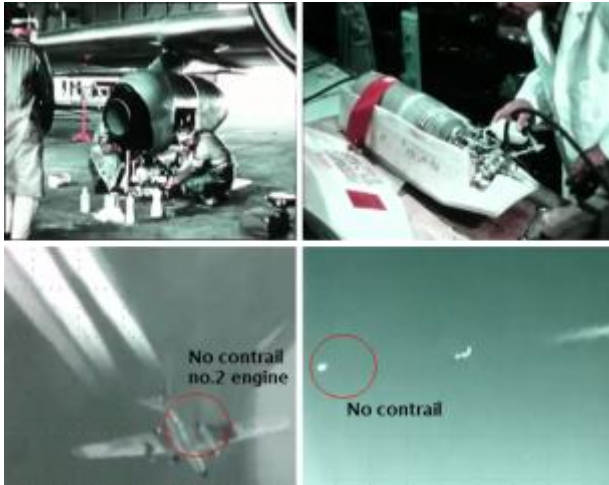


Fig. 6 Left: RB-57 Canberra in experiment of reducing contrail by chemical treating. Right: Ryan 147 model UAV in test for reducing contrail by chemical treating.

클로로술포산은 가장 많은 실제 사용사례가 보고된 화학약품이다. 작용원리는 화학 혼합물과 유사한 매커니즘을 가지고 있다. 클로로술포산이 항공기 엔진의 후미부분에서 열에 의해 염화수소(hydrogen chloride)와 삼산화황(sulfur trioxide)으로 분해되게 되며, 삼산화황의 흡습성으로 인해 엔진으로부터 형성된 액체를 다수의 미립액적형태로 유도하여 비행운의 관측이 불가능하게끔 한다[19].

클로로술포산은 B-2 폭격기와 F-177A 전투기에 실제로 적용되었으며, 그 외에도 RB-57 Canberra와 무인 항공기 Ryan 147 model과 같은 다양한 항공기를 통해 실험된 사례가 있다(Figure 6). 클로로술포산은 각종 실험과 실전 경험을 통해 비행운 억제에 확연한 효과가 있다는 것이 검증되었으나 강한 부식성과 높은 독성으로 인해 피부에 닿을 경우 심한 화상과 함께 손상을 일으키며 흡입할 경우 호흡기 점막 조직과 기도 상위부 조직에 내부 화상을 초래한다. 이러한 이유로 최근에는 클로로술포산 사용이 금지되었다. 앞에서 언급했듯이 화학 후처리 방법은 환경적인 문제가 발생할 가능성이 높다. 하지만 실제적으로 가능성이 가장 높은 방법이며, 연구가 더욱 진행된다면 비행운 감소효과가 매우 높을 것으로 기대된다.

또 다른 배기후처리 방안은 초음파 후처리이다. 초음파를 이용한 비행운 저감 기술은 화학 후처리와 달리

환경에 대한 악영향이 없다[1]. 초음파 후처리의 기본 원리는 발생한 액적에 초음파 에너지를 공급하여 증발을 촉진시키는 것이다. 그러나 초음파를 이용한 배기 후처리 방식은 실험적으로 증명된 사례가 거의 없고, 비행운에 많은 에너지를 전달하여야 하므로 항공기와 같이 제한된 전력 시스템을 가지고 있는 경우 사용이 매우 제한된다는 단점이 있다.

4. 결 론

본 연구를 통해 선진국의 비행운 저감 기술을 카테고리별로 분류하고 각각의 주요한 방법 및 특징을 확인하였다. 대부분의 기술은 이론적으로는 타당성을 가지나 실제 적용하기에는 경제적, 공학적 측면 등에서 어려움이 발생하였다.

본 연구의 내용을 바탕으로 항공기 비행운 저감의 중요도를 확인할 수 있었으며, 국내에서도 관련 연구를 진행하여 미래 군용 항공기의 스텔스성을 선진국 수준으로 갖추어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 '원격공중통제 및 전방위 저피탐 기술 구현용 시험기 개발'의 위탁연구(위탁과제명 : 항공기 비행운 감소 연구) 지원을 받아 수행되었음

References

- [1] Frank G. Noppel "Contrail And Cirrus Cloud Avoidance Technology", *PHD Thesis*, Cranfield University, Oct 2007.
- [2] F. Noppel and R. Singh, "Overview on Contrail and Cirrus Cloud Avoidance Technology", *Journal of Aircraft*, vol. 44, no. 5, pp. 1721-1726, Oct 2007.
- [3] U. Schumann, "On Condition for Contrail Formation from Aircraft Exhausts", *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 5, pp. 4-23, Feb 1996.
- [4] Eric J. Jensen, Owen B. Toon, Stefan Kinne, Glen W. Sachse, Bruce E. Anderson, K. Roland Chan, Cynthia H. Twohy, Bruce Gandrud, Andrew Heymsfield, and Richard

- C. Miake-Lye, "Environmental condition required for contrail formation and persistence", *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no. D4, pp. 3929-3936, Feb 1998.
- [5] Anne M. Thompson, Randall R. Friedl, Howard L. Wesoky, "Atmospheric Effects of Aviation: First Report of the Subsonic", *NASA*, May 1996.
- [6] Ulrich Schumann, Reinhold Busen, and Martin Plohr, "Experimental Test of the Influence of Propulsion Efficiency on Contrail Formation", *Journal of Aircraft*, vol. 37, no. 6, Dec 2000.
- [7] Eric J. Jensen, Owen B. Toon, Stefan Kinne, Glen W. Sachse, Bruce E. Anderson, K. Roland Chan, Cynthia H. Twohy, Bruce Gandrud, Andrew Heymsfield, and Richard C. Miake-Lye, "Environmental Conditions Required for Contrail Formation and Persistence", *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no. D4, pp. 3929-3936, Feb 1998.
- [8] Peter Spichtinger, Klaus Gierens, Ulrich Leiterer, and Horst Dier, "Ice Supersaturation in the Tropopause Region Over Lindenberg, Germany", *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 12, no. 3, pp. 143-156, Jun 2003.
- [9] Fredrik Haglind, "Potential of lowering the contrail formation of aircraft exhausts by engine re-design", *Swedish Defence Research Agency*, Dec 2007.
- [10] Mark L. Schrader, "Calculations of Aircraft Contrail Formation Critical Temperatures", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 36, no. 12, pp. 1725-1729, Dec 1997.
- [11] O. B. Popovicheva, N. M. Persiantseva, E. E. Lukhovitskaya, N. K. Shonija, N. A. Zubareva, B. Demirdjian, D. Ferry, and J. Suzanne, "Aircraft Engine Soot As Contrail Nuclei", *Geophysical Research Letters*, vol. 31, Jun 2004.
- [12] Carine Alcala-Jornod, Hubert van den Bergh, and Michel J. Rossi, "Can Soot Particles Emitted by Airplane Exhaust Contribute to the Formation of Aviation Contrails and Cirrus Clouds?", *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 17, pp. 1-1, 1-4, sept 2002.
- [13] Christine Fichter, Susanne Marquart, Robert Sausen, and David S. Lee, "The Impact of Cruise Altitude on Contrails and Related Radiative Forcing", *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 14, no. 4, pp. 563-572, Sept 2005.
- [14] H. Mannstein, K. Gierens, and P. Spichtinger, "How to Avoid Contrail Cirrus", *1st CEAS European Air and Space Conference*, Sept 2007.
- [15] A. Petzold, M. Gysel, X. Vancassel, R. Hitzenberger, H. Puxbaum, S. Vrochticky, E. Weingartner, U. Baltensperger, and P. Mirabel, "On the effects of hydrocarbon and sulphur-containing compounds on the ccn activation of combustion particles", *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, vol. 5 pp. 2599-2642, Dec 2005.
- [16] Alan Epstein and Richard C. Miake-Lye, "Ultra-Low Sulfur Fuel and Method for Reduced Contrail Formation", *U. S. Patent 20100122519 A1*, May 2010.
- [17] Linda Strom and Klaus Gierens, "First Simulation of Cryoplane Contrails", *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, no. D18, pp. AAC 2-1-AAC 2-13, Sept 2002.
- [18] M. Schirmer, "Hiding Condensation Trails from High Altitude Aircraft", *U. S. Patent 3289409 A*, Dec 1966.
- [19] Charles E. Anderson, Seymour J. Birstein, and Bernald A. Silverman, "Method and apparatus for suppressing contrails", *U. S. Patent 3517505*, Jun 1970.
- [20] Surjit Singh, "Method of Suppressing Formation of Contrails and Solution Therefor", *U. S. Patent 5005355 A*, Apr 1991.
- [21] Inge Konig-Lumer, Ulrich Schwenk, Rene Salvador, and Josef Kapfinger, "Agent for De-Icing and Protecting Against Icing-Up", *U. S. Patent 4358389*, Nov 1982.