<論文>

항공기 객실 내 오존농도의 규제와 적합성 입증방안에 대한 연구

최주원*, 박종혁*, 김일영*, 곽영필**

A study on the regulation and means of compliance for the ozone concentration in the cabin

J. W. Choi*, J. H. Park*, I, Y. Kim*, Y. P. Kwak**

목 차

Ⅰ. 서 론
Ⅱ. 오존의 발생 및 인체에 미치는 영향
Ⅲ. 객실 오존농도에 관한 기술적 요구조건의 분석
Ⅳ. 객실 오존 농도에 대한 적합성 입증방법 및 평가방법
Ⅴ. 결 론

Abstract

This study is to identify the hazard of ozone and to evaluate ozone effect that is flowed into the cabin when the airplane is flying at high altitude.

For this purpose, it is studied that how ozone is generated in the air, what the effect on human body is due to the cabin ozone and what the design criteria is considering or preventing the ozone hazard.

And, finally the regulations and means of compliance are studied and introduced to assure that the aircraft satisfies the design criteria related to ozone

Key Words : Ozone(오존), Type certificate(형식증명), MOC(적합성 입증방법), Cabin air(객실 공기), Recirculation(재순환), FAR

* 한국 항공우주연구원 품질인증센터
** 건설교통부 항공안전본부

I. 서 론

지구상에 존재하는 전체 오존의 90%는 지상 약 10~50km 사이에 있는 성층권 내에 고 밀도로 밀집되어 존재하며, 나머지가 대류권내에 산재해 있다. 오존은 성층권 상부에서 산소분자(O_2)들이 태양으로부터 오는 강한 자외선 에너지를 흡수해 산소원자(O)로 분해된 뒤 성층권으로 내려와 그곳에 있는 산소분자(O_2+O)와 결합해 만들어지며, 이 오존분자(O_3)는 자외선 에너지를 흡수하여 다시 산소원자로 분해되는 가역반응을 되풀이하게 된다. 성층권에서는 매일 3억t의 오존이 생성되며, 동시에 같은 양의 오존이 자외선으로 인해 파괴된다. 오존층은 태양광선 중 생물체에 해로운 자외선을 95~99%정도 흡수하여 지구상의 인간과 동식물의 진화에 도움을 주었으며, 현재도 생명 보호역할을 계속 해주고 있음은 잘 알려진 사실이다. 이렇게 이로운 오존이 인체에 직접적으로는 어떠한 영향을 미칠까? 그리고, 지상 약 10km 상공의 오존 농도가 높은 지역을 비행하는 항공기 객실 내의 오존 농도는 어떻게 되며, 장시간 비행하는 탑승자들에게 어떠한 영향이 미칠까? 이에 대한 기술적인 규정 내지는 설계요건은 있는가? 등에 대한 국내의 체계적인 연구가 미비하여, 기초 연구를 시작하게 되었다.

여기에서는 오존의 발생원리, 인체에 미치는 영향, 우리나라 및 항공 선진국들의 오존에 대한 설계요건 그리고, 감항당국이 인정하는 설계요건에 대한 일반적인 적합성 입증방법 등에 대한 연구 결과를 소개하기로 한다.

II. 오존의 발생 및 인체에 미치는 영향

2.1 개 요

오존은 무색, 자극성 냄새를 가지는 분자로서, 강한 산화력을 가지고 있다. 오존은 산화제, 살균제, 탈취제 등으로 이롭게 사용될 수 있지만, 반대로 인체에 나쁜 영향을 줄 수 있는 양면성을 가지고 있다. 특히 오존의 생성과 파괴 시 태양 광선으로부터 자외선을 흡수하는데 성층권에 오존층이 형성되어 있어서 지구의 생명활동을 보호하고 있다. 최근 CFC(Chloro Fluoro Carbons) 등의 촉매제의 사용과 지구 온난화에 의해 성층권의 오존층이 파괴되고 있어 국제적인 관심의 대상이 되고 있으며, 인체에 대한 오존의 직접적인 악영향이 밝혀짐에 따라, 항공 선진국들에서는 항공기 인증 시, 객실내의 오존 농도에 대한 규제요건들을 설정하고 있다.

2.2 오존의 특성

오존(O_3)은 산소(O_2)와 산소원자(O)가 합쳐져서 형성된 물질로 강력한 산화물질이며 산화 반응력이 강해 접촉하는 물질을 산화시켜 손상을 준다. 오존은 18세기에 처음 알려졌으며, 근래에 들어서는 1970년 폴 크루첸(Paul Crutzen) 박사가 처음으로 오존층의 존재를 이론적으로 제시하였다. 그는 또 오존층이 질소산화물과 반응하여 파괴된다는 점을 입증하여, 당시 미국에서 추진 중이었던 SST(Supersonic Transport)개발을 중단하게 하는 계기를 만들기도 하였으며, 이러한 공로로 그는 1995년 노벨 화학상을 수여 받았다.

오존의 물리적 특성은 공기보다 약간 무거우며, 물에는 잘 녹지 않는다. 화학적 특성은 다음 <표 1>과 같다. 오존의 양을 나타내는 단위에는 밀도를 나타내는 방법과 농도를 나타내는 방법의 두 가지가 있는데, 밀도를 나타내는 단위는 Dobson unit(DU)으로 단위 cm^3 당 오존 분자의 개수를 나타낸다. 1DU는 약 27,000,000개/cm^3 이다. 미국의 경우, 오존의 밀도는 300DU이고 밀도가 가장 낮은 남극의 경우 최소 117DU 정도가 된다. 농도를 측정하는 단위는 PPM(Parts per million)이나 PPB(Parts per billion)를 사용한다.

<표 1> 오존의 화학적 특성

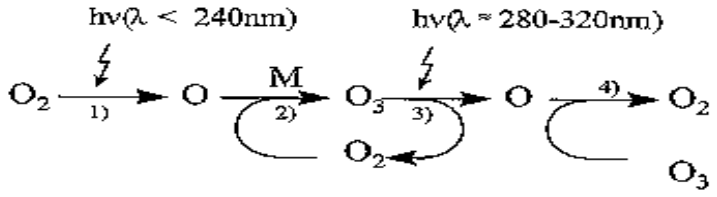
구 분	특 성
화학식	O_3
분자량	48.0
녹는점	-192.7℃
끓는점	-111.9℃
공기 상대밀도	1.658
증기압	0℃, 101kPa(760mmHg) : 2.14/*l* 25℃, 101kPa(760mmHg) : 1.96/*l*
용해도	0.494*ml*/100*ml* water, 0.052g/100g H_2O at 20℃
전환계수	1 ppm = 1960μg/m^3, 1 ppb = 1.96μg/m^3
대기 중 농도	40ppb, 연 증가율 0.5%

대기 중 오존 농도는 산업혁명 이전에 10ppb(ppb : 10억 분의 1)이었으나, 그 후 연 평균 0.5%씩 증가하여 현재는 약 40ppb를 유지하고 있다(Enoch and Honour, 1992).

2.2.1 오존의 생성과 파괴

오존이 생성되는 원인은 여러 가지가 있지만 중간 과정을 생략한 최종 화학식은 $3O_2 = 2O_3$이다. 오존의 생성에는 150nm~240nm의 자외선이 작용하고 오존의 파괴에는 280nm~320nm의 자외선이 관여한다. 이런 작용 때문에 오존에 의해 전혀 흡수되지 않는 320nm보다 큰 파장의 자외선을 UV-A, 오존을 파괴하며 흡수되는 280nm~320nm의 파장을 가지는 자외선을 UV-B, 오존을 생성하며 흡수되는 240nm 보다 작은 파장의 자외선을 UV-C 자외선이라 부른다.

O_2에 UV-C 자외선을 쪼여주면 2개의 산소 원자로 분해된다. 이렇게 분해된 산소 원자가 다른 산소 분자와 결합하여 오존을 형성하게 되는 것이다. 이렇게 생성된 오존에 UV-B 자외선을 쪼여주면 오존 분자는 O_2와 O로 분해되고 O가 O_3와 재결합하여 $2O_2$를 생성한다.

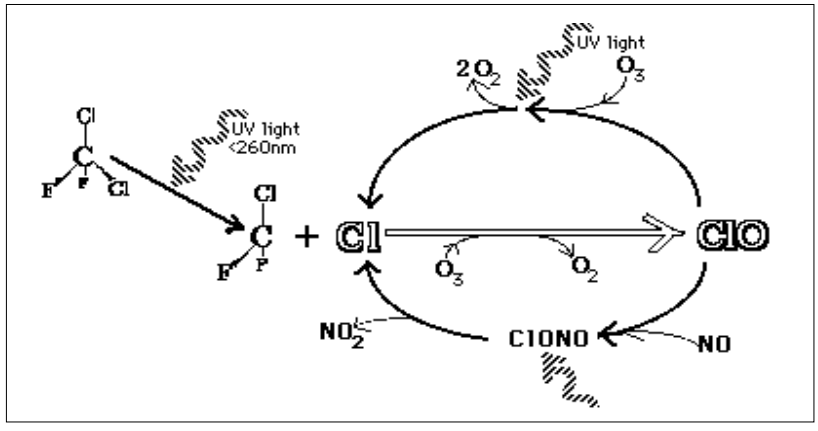


<그림 1> 오존의 생성과 파괴의 종합적 수식

생성하는 오존의 양에는 가해주는 빛의 강도와 산소 분자의 밀도가 관여하고 파괴되는 오존의 양에는 가해주는 빛의 강도와 오존의 밀도가 관여한다. 빛의 강도는 지표로부터 멀리 떨어질수록 강하고 산소분자의 밀도는 지표에 가까울수록 크다. 성층권의 오존층이 존재하는 고도는 바로 빛의 강도와 산소 분자의 밀도가 적절하여 생성되는 오존의 양과 파괴되는 오존의 양이 동적 평형을 이루는 높이이다.

2.2.2 오존의 생성과 파괴에 대한 촉매의 역할

촉매가 없는 환경에서 오존의 생성과 파괴는 성층권에서 평형을 이룬다. 오존의 생성에 관여하는 촉매에 관해서는 알려진 바가 없으나, 오존의 파괴에 관여하는 촉매에는 *F, Cl, Br, I* 등의 할로겐 족 원소들이 알려져 있다. 이 중 *Cl*은 오존층을 파괴하는데 있어 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 1분자의 *Cl*은 100,000개의 오존 분자를 분해할 수 있는 능력이 있는 것으로 알려져 있다. CFC류의 화합물들은 *Cl*과 *F*와 *C*를 포함하고 있는 물질들로 기본적으로 비활성이어서 냉매나 공업적인 용도로 많이 사용된다. CFC의 비활성 특성 때문에 CFC는 다른 분자들과 결합하거나, 분해되지 않고 *Cl*을 간직한 채 성층권까지 갈 수 있다. CFC는 성층권에서 260nm정도의 자외선 파장에 의해 *Cl*과 *F, C* 등으로 분해된다. *Cl*은 오존이 산소로 분해되는 데에 촉매로서 작용한다. 다음 그림은 이 과정을 나타내주고 있다.



<그림 2> 오존 분해의 CFC의 작용

<그림 2>에서의 CFC는 CFC-12이다. 자외선에 의해 CFC에서 *Cl*이 분해되어 나오면, 오존과 결합하여 *ClO*가 된다. *ClO*는 *NO*와 결합하여 *ClONO*가 되고 NO_2와 *Cl*로 분해된다. 즉, *Cl*은 전체 프로세스에서 양이 감소되지 않는 '촉매'일 뿐이다. CFC가 성층권에 도달하는 시간은 15년 정도 걸리며, 도달 후 오존에 영향을 미치며 머무르는 시간은 약 50년~200년 정도이다. 이 시간동안 지속적으로 오존을 파괴하는 것이다.

2.3 오존의 신체에 대한 영향

근래에 들어서 오존에 관한 관심이 세계적으로 대두되면서 오존 자체가 인체에 미치는 직접적인 영향에 대하여 많은 연구들이 수행되었다. 오존은 강한 산화력으로 인하여 직접적인 호흡 시 호흡기 계통에 치명적인 손상을 줄 수 있다. 농도가 낮고 짧은 시간 노출될 경우에는 가벼운 기침 등의 증상만이 나타나지만, 장기간 노출될 경우에는 신경계통까지 영향을 미칠 수 있는 것으

로 나타났다. 이러한 원인은 아직 명확하게 밝혀져 있지 않지만, 단백질의 변형과 지방의 과산화(Peroxidation)에 의한다는 두 가지 설이 제시되고 있다.

2.3.1 단백질의 변형

단백질은 인체를 구성하는 가장 기본적인 물질로서 인체의 기본단위인 세포의 막을 구성하는 성분이기도 하며, 또한 생명활동에 필수적인 여러 가지 생화학적 반응을 매개하는 효소의 구성성분이기도 하다. 그런데, 강력한 산화제인 오존은 산화작용을 통하여 단백질을 변성시킴으로써 독성작용을 나타낸다. 설프히드릴(Sulfhydryl)계의 물질은 우리 몸의 세포 내에 존재하는 여러 효소와 단백질을 구성하는 성분이며, 동시에 세포 내에서 환원제로 이용되기도 하는데, 오존은 세포막에 있는 막 표면 단백질들의 설프히드릴기에 작용해서 이들을 연결시킴으로써 세포막의 구조를 변화시켜 세포막을 약화시킨다. 또한 오존은 막구조를 지탱하고 있는 단백질들을 분해하여 세포막을 약화시키기도 한다. 그 외에도 오존은 여러 가지 작용을 하는 효소들의 구조도 변형시켜 효소에 의해 일어나는 여러 가지 기능에 장애를 초래한다.

2.3.2 지방의 과산화

오존은 체내의 불포화지방산과 반응하여 독성작용을 나타낸다. 일반적으로 불포화지방산은 세포막을 구성하는 중요한 성분중의 하나이며, 폐의 조직을 덮고있는 액체에도 다량 함유되어 있다. 먼저 인체에 흡입된 오존은 불포화지방산과 반응하여 지방의 과산화를 일으킨다. 이 과정은 오존이 산의 에틸렌 그룹과 반응하여 과산화물을 형성하는 과정에 근거를 두고 있다. 이렇게 분해된 결과 자유기가 형성되고 이렇게 형성된 자유기는 다시 다른 불포화지방산의 과산화를 촉진시킨다. 이러한 분해과정에서 생겨나는 산물들은 과산화수소와 알데히드 등인데 이들 물질이 직접적으로 세포에 독성작용을 일으키는 것으로 알려져 있다. 또한 세포막을 구성하는 지방산들이 과산화되어 막의 구조가 약해져서 세포 손상을 받기도 한다.

2.4 오존이 인체에 미치는 증상

오존에 반복적으로 노출되면 폐에 비가역적 손상이 초래될 수 있다. 오존이 비록 낮은 농도일지라도 흡입하게 되면 가슴통증, 기침, 매스꺼움, 인후자극, 충혈과 같은 다양한 건강문제를 야기한다. 또한, 기관지염, 심장병, 폐 기종, 천식을 악화시킬 수도 있다. 건강한 사람도 또한 오존에 노출되면 호흡의 곤란을 경험한다. 항공기 객실 내의 오존 농도가 높은 경우, 단기적으로는 가벼운 기침 등의 증상이 있을 수 있고, 장기간 노출되는 승무원들 같은 경우에는 폐호흡 용량을 감소시킬 수도 있다.

2.4.1 오존이 호흡기에 미치는 증상

오존의 산화력은 호흡기에 강력한 자극원으로 작용하기 때문에, 오존에 노출되었을 때 일차적으로 영향을 받는 기관은 호흡기이다. 일반적으로 1~2시간 동안 고농도의 오존을 흡입하게 되면 호흡기에서 여러 가지 변화와 증상들이 유발되는데 이들이 완전히 가라앉아 정상을 되찾는 데에는 수일의 시간이 소요된다. 오존에 노출되었을 때 생기는 급성증상들은 기침, 숨참, 숨을 깊이 들이 마실 때의 통증 등이다. 이러한 증상들에 뒤이어 폐기능 상의 지표에도 변화가 온다. 고농도의 오존에 노출된 사람들은 일반적으로 노력성 폐활량(사람이 의식적으로 최대한 들이쉴 수 있는 흡기량), 일초율(1초간 내쉴 수 있는 최대호기량과 노력성 폐활량의 비율) 등이 감소한다.

고농도의 오존에 노출되었을 경우에는 숨을 얕게 쉬고, 그 결과 부족하게 되는 산소를 보충하기 위해서 1분간의 호흡수가 많아진다. 오존은 호흡기 가운데서도 주로 소 기관지에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 오존은 만성 호흡기질환에 일시적인 자극을 주는데 특히 천식에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

2.4.2 오존이 신경계통에 미치는 증상

오존은 중추신경계에도 영향을 미쳐 그와 관련된 증상들이나 행동 상에 여러 가지 변화를 초래하기도 한다. 따라서 고농도의 오존에 노출되었을 때는 두통과 의식이 불분명해지는 것 등의 신경계통의 증상이 나타날 수 있다. 외국의 사례에서도 오존의 농도와 두통발생 사이에는 일정한 상관관계가 나타나는 것으로 알려져 있다.

2.4.3 오존이 감각기에 미치는 증상

오존은 자극성이 강한 기체이기 때문에 인체의 예민한 부분을 자극한다. 오존 자극에 의한 영향은 눈이나 코와 같이 외부 자극을 받아들이는 감각기에 우선적으로 나타난다. 일반적으로 눈이 자극감을 느끼는 오존의 농도는 200μg/m^3(0.10ppm : 대기환경기준 1시간 평균치)로 이 농도 이하에서는 특별한 자극증상이 나타나지 않는다. 또한 오존은 눈의 기능에도 영향을 미친다. 오존에 노출된 피험자들을 대상으로 시력의 여러 가지 측면에 대해 검사를 실시한 결과 암순응상태에서 시력의 예민도가 많이 감소하였고, 주변 시야는 넓어졌으며, 외안근의 균형에 변화가 일어났고 야간시력이 약해졌다. 그리고 오존의 농도를 보다 높였을 때에는 집중력이 감소된다고 호소하는 경우도 있었다. 통상적으로 오존의 냄새를 느낄 수 있는 한계는 15~40μg/m^3(0.008~0.02ppm)정도로 알려져 있다. 오존농도가 100~900μg/m^3(0.05~0.45ppm)일 때 오존농도가 증가함에 따라 눈의 자극증상도 함께 증가하는 데 호흡기 자극증상, 두통, 기침, 가슴의 답답함 등도 모두 시간당 오존의 최고 농도 치와 관계가 있다.

<표 2> 오존농도 및 노출시간별 증상

농 도 (ppm)	폭 로 시 간	인체 및 실험동물에 미치는 영향
0.02	5 분	냄 새 감 지
0.03 ~ 0.3	1 시간	운동선수(달리기) 기록저하
0.05 ~ 0.1	30 분	불 안
0.05 ~ 0.2	-	코 및 인후 자극
0.05 ~ 0.6	1 시간	천식환자의 발작빈도 증가
0.08	3 시간	동물(쥐)의 세균감염, 감수성 증가
0.1	30 분	두통, 눈자극
0.1	1 시간	시각장애, 폐포내 산소확산력 저하
0.1	2 시간	폐동맥 산소분압 증가
0.1<	24시간	눈자극 증상증가
0.1 ~ 0.25	30 분	호흡수 증가
0.2	1 시간	동물(쥐)의 적혈구 변형
0.2	6 시간	동물(쥐)의 자율운동감소

농 도 (ppm)	폭 로 시 간	인체 및 실험동물에 미치는 영향
0.2 ~ 0.8	-	눈 자극
0.3	-	호흡기 자극, 가슴압박
0.3	5 분	호흡량 증가
0.34	2 시간	동물의 호흡량 증가
0.35	3 - 6 시간	시력감소
0.37 ~ 0.75	2 시간	호흡량 현저히 감소
0.4	2 - 4 시간	기도저항 증가, 호흡량 감소
0.5	2 시간	폐 기능 저하
0.5	6 시간	기도저항의 증가와 폐 기능의 현저한 감소
0.5	2 - 6 시간	동물(쥐)의 폐 세포 팽창
0.6 ~ 0.8	2 시간	기관지 자극, 폐 기능 저하, 폐 확산능력의 현저한 감소
0.8 ~ 1.5	-	폐 충 혈
0.9	5 분	기도저항의 심각한 감소
1	6 시간	동물(쥐)의 사망률 증가
1.5 ~ 2.0	2 시간	심한 피로, 가슴통증, 기침
9	-	급성 폐부종

*참고문헌 8. 참조

Ⅲ. 객실 오존농도에 관한 기술적 요구조건의 분석

3.1 객실 내 오존농도에 대한 요구조건

자연적인 오존은 권계면(tropopause : 대류권과 성층권의 경계면)에서 산소분자와 자외선의 작용으로 존재하며, 그 량 및 분포는 위도, 경도, 계절 및 날씨에 따라 변화한다. 북반구에서 가장 높은 오존의 집중은 일반적으로 겨울 및 봄에 고고도, 고위도지방에서 나타난다. 1976년에 이 지역을 정기 운항하는 미국의 항공사 승무원들은 눈 자극, 기침, 코 자극 그리고 가슴 통증 등을 호소하였으며, 연구결과 이러한 증상들은 오존 때문인 것으로 나타났다. 이에 미국의 FAA(Federal Aviation Administration)에서는 오존에 대한 규정을 제정하여 1980년 1월에 FAR(Federal Aviation Regulation) [13]Part 121.578 그리고 [14]Part 25.832에 적용하였으며, 우리나라의 경우에도 항공법 제15조와 제17조에 의거한 형식증명 및 감항증명을 위한 [15]기술기준에 오존에 대한 요건을 포함하고 있다.

3.2 미국 및 우리나라의 기술요건

우리나라 수송급 항공기의 기술기준은 미국의 기준을 기본으로 제정되었으며, 오존에 대한 요건 역시 미국의 기준과 동일하다. 다음은 기술기준 제3부의 오존에 대한 규정이다.

13) FAR Part 121 : Operating Requirements : Domestic, Flag, and Supplemental Operations
14) FAR Part 25 : Airworthiness Standards : Transport Category Airplanes
15) 기술기준: 항공기 항행안전을 확보하기 위한 기술상 기준(1993년 제정, 항공법 제15조 제5항 관련)

항공기 기술기준 제3부 감항분류 수송(T)류인 비행기에 대한 기술기준

***제4장** 설계 및 구조*

***4.8** 환기계통 및 난방계통*

***4.8.1A** 객실의 오존농도*

***4.8.1A.2** 비행중의 객실의 오존농도가 다음의 값을 넘지 않는 것이 증명되어야 한다.*

가. 기압고도 9,750m(32,000ft) 이상의 비행에 있어서는 비행 중 어떠한 때에도 해면상 기준으로 환산해서 용적의 0.25ppm(100만분율)

나. 기압고도 8,230m(27,000ft) 이상의 비행에 있어서는 3시간의 시간평균으로 해면상으로 환산해서 용적의 0.1ppm(100만분율)

***4.8.1A.2** 이 항에 있어서 해면상 환산이란 25℃, 760mm 수은주의 상태를 말한다.*

***4.8.1A.3** 비행기의 운용수준 및 성능한계에 근거한 해석 또는 시험에 의해 다음의 "가"항 또는 "나"항에 적합하다는 것이 증명하여야 한다.*

가. 4.8.1A.1 항의 한계를 넘는 객실 오존농도로 되는 고도까지 비행기가 운용되지 않을 것

나. 오존제어장치를 포함 비행기의 환기장치가 4.8.1A.1항의 한계 이하로 객실 내의 오존 농도를 유지할 것

3.3 오존에 관한 기술요건의 분석

오존에 관한 규정은 0.25ppm이 최대 값(이하 "OZMAX")으로서, 32,000ft 이상의 비행에서 어떤 때에도 객실 내의 오존 농도가 이 값을 초과하지 않아야 한다는 것이며, 27,000ft 이상의 비행에서는 3시간 평균값(Time weighted average 이하 "OZTWA")이 0.1ppm을 초과하지 않아야 한다는 것이다. 즉, 이 두 가지 요건을 동시에 만족해야 규정에 적합한 것이다. 대기중의 오존 농도는 27,000ft 보다 32,000ft에서 더 높게 됨으로, OZTWA 규정은 OZMAX 규정을 포함하기도 하는 것이다. 단지, OZMAX 수치는 순간적인 최대 수치를 의미하는 것이고, OZTWA 수치는 비행중의 3시간 평균 수치를 의미하는 것이다. 일반적으로 객실 오존 농도의 최대 수치는 항공기가 순항단계에서 하강 단계로 넘어가는 동안 엔진 출력을 줄이게 됨으로 블리이드 공기의 온도가 낮게 된다. 이때 순간적으로 객실 내로 유입되는 공기 중의 오존 농도가 높아지는 것으로 알려져 있다. 또한, 규정에 제시된 수치는 해면 상 기준(Sea level equivalent : 25℃, 760mm 수은주 상태)으로 환산하여 비교하도록 하고 있다. 이것은 농도의 단위인 ppm이 밀도와는 달리 특정 공간에 존재하는 분자량을 측정하기가 힘든 상대적인 수치이기 때문에, 기준점인 해면 상의 수치로 환산하도록 하는 것이다.

비행 중 객실 내의 오존 농도를 줄이는 방법에는 대기의 오존이 객실로 유입되는 량을 줄이는 방법과 오존의 농도가 작은 항로를 따라 비행하는 방법이 있다. 이 두 가지 모든 경우에 있어서 기내의 오존 농도를 측정하고 계산하는 방법이 필요하게 된다. 이에 대한 내용은 다음 장에서 제시한다.

Ⅳ. 객실 오존 농도에 대한 적합성 입증방법 및 평가방법

4.1 관련 규정에 대한 적합성 입증방법

미국의 수송급 항공기는 오존 규정에 대한 적합성을 입증하여야 항공기 자체 형식증명(Type Certificate)이 발행되고 사업이 가능하다. 또한, 감항당국은 이를 인정하는 적합성 입증방법을 AC(Advisory Circular)로 제시한다. 적합성 입증은 다음의 하나 또는 이들의 조합이 될 수 있다.

가. 비행항로, 항공기의 형식, 대기 오존 통계표, 실제 측정결과에 근거한 해석

나. 객실 내 오존 절감을 위하여 STC(Supplemental Type Certificate) 하에서 운송 사업자가 항공기를 개조하였거나, 항공기 제작자가 발행한 SB(Service Bulletin)에 적합한 경우

다. 기준치 이하로 객실 내의 오존농도를 줄이기 위해, 항공기 제작자가 항공기를 개조 또는 설계 변경을 한 경우

라. 기준치 이하로 객실내의 오존농도를 줄이기 위하여, 항공기 운항 중 재순환시스템(Recirculation)을 사용 또는, 고압축단계공기(Higher stage bleed air)를 여압계통으로 사용

마. 기준치 이하로 객실 내의 오존농도를 줄이기 위하여, 항공기 운항 중 항로 및/또는 비행고도를 조절하는 비행계획 절차 수립

4.2 적합성 입증 세부사항

감항 당국이 인정하는 오존 규정에 대한 적합성 입증방법은 크게 해석, 부가 형식증명(STC), 항공기 개조, 항로변경 그리고, 재순환(Cabin air recirculation) 시스템의 사용과 고온의 블리드 공기를 사용하는 방법이 있음을 언급하였다. 객실 내의 오존 농도 절감 방법에는 공조장치에서 필터를 이용하여 기내로 흡입되는 공기 중의 오존 유입량을 줄이는 방법과 오존 분자가 고온에서는 분해되는 원리를 이용하여 고 압축단계의 고온 블리이드 공기를 사용하는 방법. 그리고, 대기중의 오존 농도가 작은 항로를 비행하는 방법 등이 있다. 규정에서는 비행 중의 오존 농도 기준을 해면 상 기준(Sea level equivalent)으로 환산하여 고도에 따라 0.25ppm 그리고 0.1ppm이하로 됨을 증명하도록 하고 있다. 본 연구에서는 관련 자료들에 근거하여 비행 중 객실의 오존 농도를 해면 상 기준으로 산출하는 방법과 적합성 입증방법 중에서 비행항로, 항공기의 형식, 대기 오존 통계표, 실제 측정결과에 근거한 해석방법에 대하여 제시한다.

4.2.1 해석을 이용한 적합성 입증방법

신청자가 해석방법을 이용하여 적합성 입증을 할 경우, 사용하는 해석기법의 신뢰도가 84% 이상이 됨을 증명하여야 한다. 그리고 대기중의 오존농도는 계절별로 상이함으로 해석에 사용하는 오존데이터는 운항 지역별로 매 달을 기준으로 충분해야 하며, 해석은 대기 중의 오존농도, 실제 비행 측정치, 오존의 분해율 또는 이들의 조합을 근거로 수행되어야 한다. 오존의 분해율은 비행 중 대기의 오존농도와 객실의 오존 농도에 근거하여 동시에 결정한다. FAA는 항공기의 특성과 대기 중의 오존농도를 이용하여 다음과 같이 OZMAX와 OZTWA를 구하는 방법을 제시해 놓고 있다. 수식의 원리는 대기중의 오존이 엔진에서 압축되어 기내로 유입되는 오존의 유입비율(R: Retention ratio), 오존 컨버터의 오존 제거효율(E: Efficiency), 비행 항로상의 대기 오존 농도(OZ : Ozone), 그리고, 해수면 기준 수치로 환산하기 위한 공기 밀도 비의 조합이다.

◎ $OZMAX = (1-E)(OZ16)(R)(\frac{P}{P_0})$ ..... 수식 1) 오존 최대값

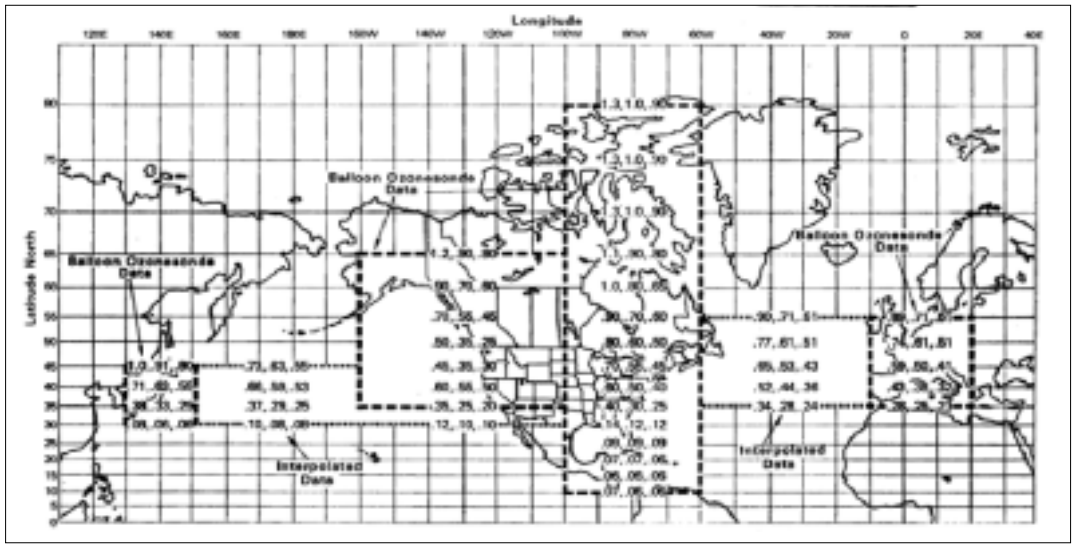
◎ $OZTWA = (1-E)(R)(\frac{P}{P_0})\left[\sum_{i=1}^{N}(OZ16)_i T_i / T_{FS}\right]$ ..... 수식 2) 오존 평균값

◎ $OZSLE = (P/P_0)(O_3)$ ..... 수식 3) 해수면 환산 값

* (P/P_0)는 객실 내의 압력과 해수면 압력의 비율로서, 고고도 비행 중의 오존 농도를 해수면 기준(Sea level equivalent : 25℃, 760mm 수은주)으로 바꿀 때 사용한다.

For P of	5000 ft	6000 ft	7000 ft	8000 ft
P/P_0 is	0.83	0.80	0.77	0.74

* R: Retention ratio로 대기중의 오존이 엔진과 공기조화장치를 통해 기내로 유입되는 비율이다. 일반적 수치는 Cabin air recirculation이 없는 경우 0.75~1.00이며, Cabin air recirculation 작동 시에는 0.4~0.6정도이다. 그러나, Retention ratio는 항공기 형식별로 상이하며, 동 형식 항공기의 경우 공기조화 장치의 Cabin air exchange 비율 등에 따라 상이하다.
* E: 항공기에 장착되는 오존필터 또는 촉매 컨버터의 효율로서, 기내로 유입되는 대기 중의 오존량을 줄여준다. 컨버터 또는 필터가 없는 항공기의 경우 E는 0으로 한다.
* T: 비행시간으로서, T_{FS}는 Total flight segment time이고, T18은 18,000ft 이상 비행한 시간을 의미한다. OZTWA 수식에서는 각 비행 단계 별로 상이한 오존의 량을 누적시켜 오존의 평균값을 계산할 수 있도록 한다.
* OZ16: 신뢰도 84% 이상의 대기 오존 농도 평균값을 의미한다. 이 자료는 FAA Report인 FAA-AEQ-77-13(Ozone Concentration By Latitude, Altitude, and Month)에 포함되어 있다. <그림3>은 지역별로 OZ16의 수치를 나타내는 지도이다.

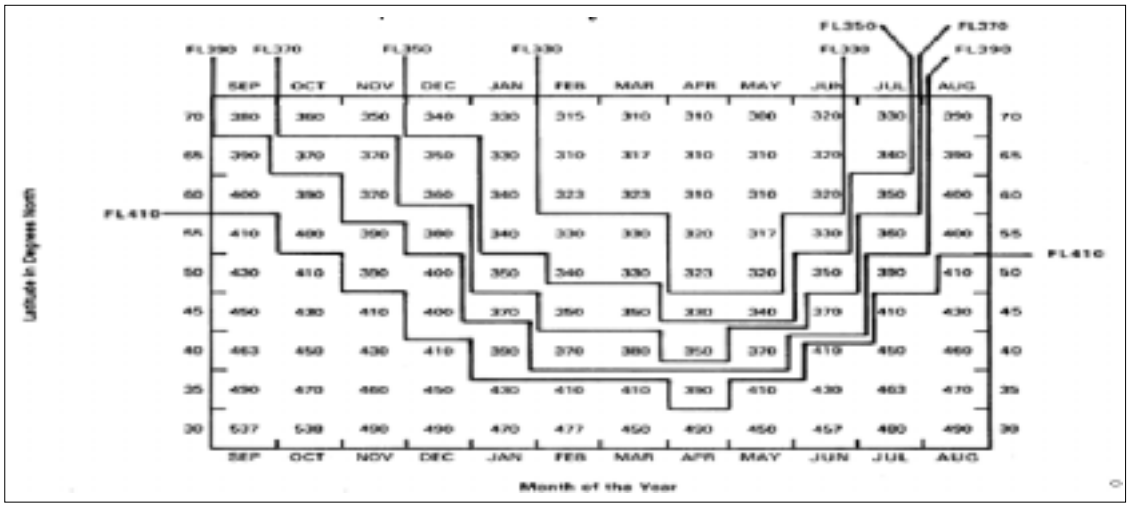


* Balloon Ozonesonde : ——— / Interpolates Data : -----

<그림 3> 2월 중 FL 370, 390, 410에서의 OZ16 수치 지도 표(참고자료 4. 참조)

4.3 규정에 대한 적합성 평가방법

오존 규정에 대한 적합성 평가방법은 명료하다. 비행 중 객실내의 최대 오존농도인 OZMAX (FL320 이상)가 해수면 환산 수치로 0.25ppm 이하여야 하며, 3시간 평균(FL270 이상) 농도가 해수면 환산 수치로 0.1ppm 이하인 것이 입증된다면 적합성이 성립된다. 그러나, 문제는 대기중의 오존 농도가 항로별로 다르며, 또한 같은 항로 내에서도 계절별로 상이하므로 이에 대한 적합성 입증 방법은 4.2.1에서 제시한 항공기 고유 특성과 계절별(기준: 월별) 대기중의 오존 수치데이터를 이용한 해석방법이 일반적이다. 이 방법의 특징은 항공기 적합성 입증을 위하여 여러 항로의 비행시험 없이도 가능하다는 것이다. 즉, 항공기의 고유 특성은 실험을 통하여 구하고, 나머지는 대기 자료를 이용하여 비교적 신뢰성 있는 결과를 손쉽게 구할 수 있다는 것이다. 적합성 검증 시 신청자의 오존 필터 효율(E)과 오존 Retention ratio(R)는 실험을 통하여 얻을 수 있는 항공기의 고유 수치임으로 이에 대한 실험의 적절성 여부, 계측 장비들의 정확도 및 Calibration 여부 등이 실험의 검증 시 주요 검토부분이다. 특히 오존 Retention ratio(R)는 지상실험을 통하여 구할 수도 있으며, 터빈엔진 추진 항공기의 경우에는 실험을 수행하지 않아도 R = 0.7로 하여 계산하는 것을 FAA가 인정하고 있다. 단지 R값을 Default 값인 0.7 이하로 하길 원한다면, 그때는 반드시 실험을 통하여 적용하는 것을 요구한다. 다음으로는 항공기의 고유 특성과 대기 자료를 이용한 계산인데, 주의점은 계산하려는 항로 내의 오존에 관한 자료가 없는 경우이다. 이때에는 가까운 두 부분과의 평균 수치(Linearly interpolation)를 이용하여 계산하는 것이 인정된다. FAA에서는 오존의 적합성 입증 시 대기 중의 오존 농도가 계절별로 상이한 특성을 고려하여, 특정 항로에서 매 달을 기준으로 산출된 결과를 요구하고 있다. 즉, 한 형식 항공기의 오존에 대한 적합성 입증은 많은 시험자료 또는 실험과 대기자료에 근거한 해석결과가 기준에서 요구하고 있는 수치 이하임이 확인되어야 가능한 것이다. <그림 4>는 FAA AC 120-38 내의 자료로 북미지역의 대기자료를 바탕으로 기준에 적합하기 위하여 오존 필터가 장착되어 있지 않은 항공기가 비행할 수 있는 최대 고도를 월 단위로 제시한 것이다.



<그림 4> 객실 여압고도 7,000ft, R=0.8, 오존필터를 장착하지 않은 항공기가 북미지역을 비행시 객실내의 오존 농도가 규정 이하이기 위한 최대비행고도(참고자료 3. 참조)

4.4 객실내의 오존 유입을 줄이는 방법

오존은 객실 내에서 자연 발생되지는 않는다. 비행하는 항로상의 대기에서 엔진의 여압계통, 공기조화 계통을 통하여 기내로 유입, 누적되는 것이다. 그러므로 Cabin Air Recirculation 장비가 장착되어 있는 항공기의 경우에는 객실에서 배출된 공기를 여과하여 재사용 하는 비율을 높이면, 외부 유입 오존의 농도는 낮아질 수 있다. 참고로 재순환 시스템이 적용된 항공기와 적용이 안된 항공기의 기종은 다음과 같다.

<표 3> 항공기 기종 별 재순환 시스템 장착여부

재순환 시스템이 없는 기종	
Boeing	727-100, 727-200, 737-100, 737-200
Lockheed	L1011-1/100, L1011-50
Mc Douglas	DC9-30, DC9-50, DC10-10
재순환 시스템을 채택한 기종	
Boeing	737-300, 737-400, 737-500 737NG, 747, 757, 767, 777
Airbus	300, 310, 320, 330, 340
Mc Douglas	DC9-80/MD80, DC10-40, MD-11

오존 컨버터(필터)는 촉매장치가 되어있어 외부의 오존이 기내로 유입될 때 오존을 산소분자와 원자로 변환시켜 준다. 보통 효율은 90%정도이며, 사용시간이 누적됨에 따라 80%대로 떨어지기도 한다. 오존 컨버터는 고가이기 때문에 항공기 판매 시 옵션사항으로 남겨두는 경우가 있다. 장착 필요성 여부는 규정에서 정해져 있지 않으며, 중요한 것은 비행 중 객실내의 오존 농도가 기준치 이하인지의 여부다. 오존은 특성 상 400℃ 이상에서는 전체 파괴가 일어남으로, 공기 압축 시 엔진의 고 단계 압축기에서 600℃이상 고온 고압으로 압축된 공기를 사용할 때에는 오존의 완전 파괴가 일어남으로 굳이 오존 컨버터(필터)가 필요하지 않을 수도 있다. 그러나, 이러한 경우 착륙준비 시 초기 하강단계에서 엔진출력을 줄일 때에 기온이 떨어져서 객실 내의 오존 농도는 0.2~0.5ppm 까지 상승할 수도 있다. <표 4> 및 <그림 5>는 PMA로 오존 컨버터를 제작하는 미 AVICA사 오존 컨버터의 공개 성능 자료이다.

V. 결 론

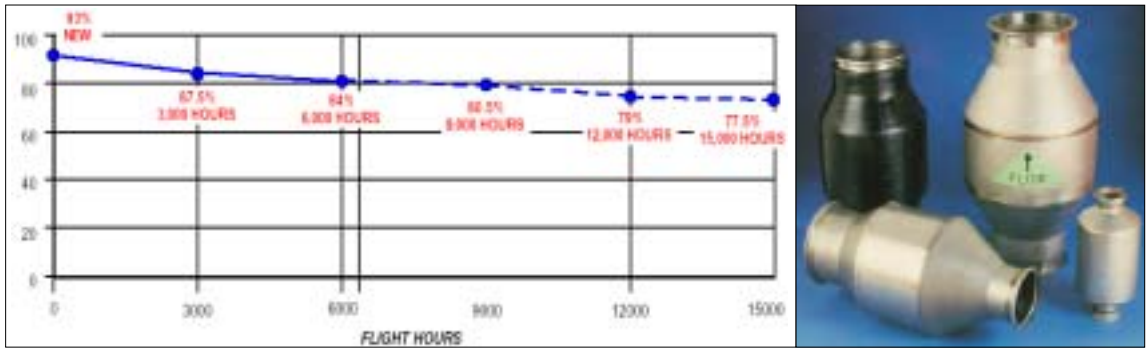
지금까지 오존의 생성과 소멸의 원리, 인체에 미치는 영향 그리고, 운송사업 항공기의 오존 관련 규정 및 이에 대한 적합성 입증 방법 등에 대해서 기술하였다. 항공기 기술기준이 공표되고 적용되고 있으나, 우리나라는 아직까지 항공기 개발 경험이 부족하여 일부 분야에 있어서 신청자의 적합성 입증방법이나 감항당국의 적합성 검증 방법 등의 노하우가 부족한 실정이다. 이에, 항공 엔지니어들에게 생소한 오존관련 사항들을 연구 조사하였다.

오존 자체가 인체에 직접적으로는 해롭다는 것은 일반적으로 알려져 있지만, 항공기 객실 내 오존의 유해성 여부는 미국과 유럽 사이에 아직 논란이 되고 있다. 미국공공산업위생학회(AGGIH)에서 권고한 오존의 최대허용농도는 0.1ppm으로 되어있으나, 이는 주 5일 40시간 노출을 기준으로 한 것이며, 초음속 항공기에 대하여 노출시간과 농도를 영국의학연구 위원회에서 조사한 바에 의하면 뚜렷한 기능장애가 나타나지 않았음을 밝히기도 하였다. 실제로 FAR Part 25에 해당하는 유럽 JAA(Joint Aviation Authority)의 JAR-25에는 오존에 관한 규정이 없다.

그러나, 우리나라의 기술기준에는 오존에 관한 규정이 포함되어 있음으로, JAR-25를 인증기준으로 설계된 외국 항공기의 국내 형식증명 승인 업무 수행 시, 이 부분에 있어서는 명확한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 아울러, 객실내의 공기조화계통은 조종사 및 승무원 그리고 승객이 직접적으로 영향을 받는 부분이며, 동시에 대기의 공기와 엔진의 압축기를 거치는 계통으로서, 항공선진국들에선 안전 및 승객의 건강을 위하여 많은 연구들이 진행되고 있는 분야이기도 하다.

<표 4> Max. Normal flow에서 오존 컨버터의 성능

Program	*Flow #/MIN*	*Temp. °F*	*Press' PSIG*	*Press' Drop*	*Ozone PPMV*	*Conv. Eff. %*	*WGT. lb*
B747	168	300	20	0.38	1.5	>93%	15.5
B767	88	380	40	0.38		>96%	11.0
DC-10	144	300	17	0.89		>97%	14.0
MD-11	144	300	17	0.89		>97%	14.0
A-320	93	392	35	0.48		>96%	11.0



<그림 5> 비행시간 별 오존 컨버터의 효율특성 Curve (AVICA사의 Public open data)

참 고 문 헌

1. FAR Part 25-Airworthiness Standards : Transport Category Airplane §25.832, FAA (Amendment 25-50, Jan./01/80)
2. FAA Advisory Circular 25-22, Certification of transport airplane mechanical systems (Mar./14/00) : Chapter 1, Section 4, 25.832 - Cabin ozone concentration
3. FAA Advisory Circular 120-38, Transport Category Airplanes Cabin Ozone Concent rations (Dec./10/80).
4. FAA Report, FAA-AEQ-77-13, Ozone concentration by latitude, altitude and month
5. ICAO Doc. 8984 - AN/895 : Manual of Civil Aviation Medicine
6. Proceedings of healthy buildings 2000, Vol. 1 : Investigation of cabin air quality in commercial aircraft (Hong Kong Polytechnic Univ.)
7. U.S. Environmental Protection Agency : Ozone good up high, Bad Nearby (EPA/451/K-97-002 Oct./97)
8. 오존의 이해와 대응 - 지표면을 중심으로 (국립환경 연구원 / 2001. 3)