

항공기 연료탱크 폭발방지를 위한 방안 연구

김성겸*

Investigation of means for protecting fuel tank explosion

Seung-Kyem Kim*

Abstract

Fuel tank design requires special care because tank explosion can cause critical event with high possibility and cause of recent explosion accidents haven't been found out definitely. In this study, cause of fuel tank explosion was reviewed and several design considerations to minimize explosion possibility were introduced.

초 록

연료탱크 폭발은 치명적인 사고로 이어질 가능성이 매우 높고, 최근에 발생한 사고들의 경우 확실한 원인 규명이 이루어지지 않았다는 점에서 연료탱크 계통의 설계시 각별한 주의가 요구된다. 본 연구에서는 연료탱크 폭발의 원인들에 대해 살펴보고 폭발 가능성을 최소화하기 위한 설계 방안을 제시하고자 한다.

키워드 : 연료탱크(fuel tank), 발화성(flammability), 점화원(ignition source)

1. 서 론

1996년, 7월 17일 JFK 공항을 이륙해 상승 중 이던 TWA 800편(보잉 747-131)이 공중에서 폭발하여 탑승객 230명 전원이 사망하는 사고가 발생했다. 이후 NTSB의 주도하에 사고원인에 대한 면밀한 조사가 이루어진 결과 중앙연료탱크(CWT : Center Wing Tank)에서 발생한 폭발이 항공기 추락의 원인이었음을 밝혀냈지만, 폭발을 유발한 원인에 대한 확실한 규명을 하지 못한 채 2000년 공식적인 사고조사가 종결되었다.

한편 미연방항공국(FAA)에서는 이 사고에 대

한 후속조치로서 연료탱크 폭발방지에 대한 감항 기준을 보완하였으며 기존의 형식증명 소지자에 대해서는 보완된 관련 감항기준에 대하여 연료탱크계통 설계의 안전성에 대한 전면적 재평가를 수행하고 해당 기준에 대한 적합성을 입증하지 못한 경우에는 설계변경을 하도록 지시하였다.

연료탱크 폭발은 기록상으로 그리 빈번하게 하는 사건은 아니나, 일단 발생하게 되면 보통의 경우 TWA 800의 사고사태와 같이 치명적인 사고로 이어질 가능성이 매우 높고, 최근에 발생한 사고들의 경우 확실한 원인 규명이 이루어지지 않았다는 점에서 연료탱크 계통의 설계시 각별한

* 항공인증그룹/skykim@kari.re.kr

주의가 요구된다.

본 연구에서는 미연방항공청(FAA)의 연구사례를 중심으로 연료탱크 폭발의 원인들에 대해 살펴보고 폭발의 위험성을 최소화하기 위한 설계 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 연료탱크 폭발 사고 사례

기록에 의하면 1960년 이후로 총 16건의 연료탱크 폭발 사고가 발생하였으며 이로 인해 사망자 총 541명, 항공기 전손대수 11기의 손실이 발생하였다. 항공기 설계기술의 발달과 과거 사고 사례에 대한 연구결과를 바탕으로 한 개선조치 등을 통해 과거에 비해 연료탱크 폭발 사고 발생율은 계속 감소하는 추세이기는 하나, 운항항공기 수가 꾸준히 증가하는 관계로 사고 발생건수 자체는 일정 수준으로 유지되고 있는 상태이다.

이해를 돕기 위해 아래에 과거 연료탱크 폭발 사고사례를 정리해 보았다.

표 1. 연료탱크 폭발 사고 사례

년도	기종	운항단계	점화원	연료탱크 위치 ¹⁾	연료형식
1963	707	비행중	낙뢰	W	JP-4/Jet A
1965	707	비행중	화재 ²⁾	W	Jet A
1967	727	정비	정전기	C	Jet A
1970	DC-8	비행중	화재 ²⁾	W	JP 4
1970	727	급유	정전기	C	Jet A
1970	727	급유	정전기	C	Jet A
1973	DC-8	급유	불명	W	JP-4/Jet A
1974	DC-8	정비	불명	W	JP-4
1976	747	비행중	낙뢰	W	JP-4/Jet A
1982	DC-9	주기	불명	FA	Jet A
1989	Beechjet 400	급유	정전기	RA	Jet A/JP-4
1990	727	비행중	테러	C	Jet A
1990	747-200	비행중	화재 ²⁾	W	Jet A
1990	737-300	push back	불명	C	Jet A
1992	707	비행중	화재 ²⁾	W	Jet A
1996	747	비행중	불명	C	Jet A

1) W : Wing C : Center RA : Rear Aux FA : Fwd Aux

2) 화재 : 엔진분리로 인한 화재

2.2 연료탱크 폭발 조건

연료탱크 내부에서 폭발이 일어나기 위해서는 첫째, 탱크 내부의 빈 공간(ullage)에 적정 농도의 연료 증기(fuel vapor)와 산소가 혼합되어 있어서 발화가 가능한 상태에 있어야 하고, 둘째 적정수준의 발화 에너지를 제공할 수 있는 점화원(Ignition Source)이 존재하여야 한다. 따라서 연료탱크 폭발을 방지하기 위한 방안은 연료탱크 내부의 발화가능성을 낮추거나 혹은 점화원을 제거하는데 초점이 맞춰진다.

이와는 다른 접근방식으로 충분한 구조적 안전여유를 두거나 폼(foam)을 설치하는 방식으로 내부 폭발 충격을 적절히 흡수할 수 있도록 연료탱크를 설계하는 방안이 있다.

2.3 발화가능성

발화가능성(flammability)에 있어 가장 중요한 인자는 연료탱크 내부의 연료증기와 산소의 혼합비이며 연료의 종류에 따라 발화가 가능한 혼합비의 범위를 정할 수 있다. 이 비율은 다시 항공기의 운항고도와 연료의 온도의 함수로 표현될 수 있기 때문에 발화가능성을 논할 때에는 아래와 같은 고도-온도 발화가능 영역선도를 사용한다.

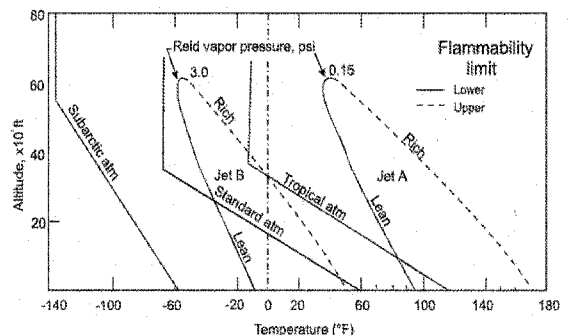


그림 1. 발화가능 영역선도

발화가능 영역선도의 왼편은 연료 증기의 농도가 너무 낮은 영역이고 오른편은 산소의 농도

가 충분치 못하여 발화가 불가능한 영역을 나타낸다. Jet A의 보다 휘발성이 높은 Jet B의 경우 동 고도에서 더 낮은 온도조건에서 발화가 가능함을 볼 수 있으며 특히 표준 대기 조건에서 발화 가능성이 높기 때문에 일부 국가(오스트레일리아 등)에서는 항공기 연료로 Jet B를 사용하는 것을 금지하고 있다.

2.3.1 발화위험율

발화위험율(Flammability Exposure)은 항공기의 총 운항시간 중 연료탱크 내부의 조건이 발화 가능한 상태에 있게 되는 시간의 비율로서 정의되며 점화원을 고려하지 않는다면 연료탱크 폭발 가능성은 발화위험율에 비례하게 된다. 따라서 연료탱크 폭발과 관련한 안전성을 보증하기 위해서는 발화위험율을 일정 수준 이하로 낮추는 것이 요구되며 이러한 요구조건은 개정된 미연방 감항기술기준 FAR 25.981(c)항에 다음과 같은 형태로 제시되어 있다.

FAR 25.981 Fuel tank temperature

(c) The fuel tank installation must include either --

(1) Means to minimize the development of flammable vapors in the fuel tanks

2.3.2 중앙연료탱크의 특수성

현재 항공 연료로서 널리 사용되는 Jet A는 낮은 휘발성으로 인해 앞서 연료탱크 내부의 조건이 외기조건과 평형을 이루는 것으로 가정하였을 경우에는 매우 낮은 발화가능성을 갖는다(그림2). 특히 주위에 특별한 열원이 없어 내부 온도가 충분히 낮은 수준으로 유지되는 날개 연료탱크의 경우, 현재 운용되고 있는 항공기들의 평균 발화유위험율은 약 3~6% 정도로 추정되고 있다.

반면에, 연료탱크 주위에 공기조화계통과 같은 잠재적인 발열원이 위치하여 가열이 이루어지는 중앙연료탱크(CWT : Center Wing Tank)의 경우, 날개 연료탱크보다 높은 온도 상태에 있게

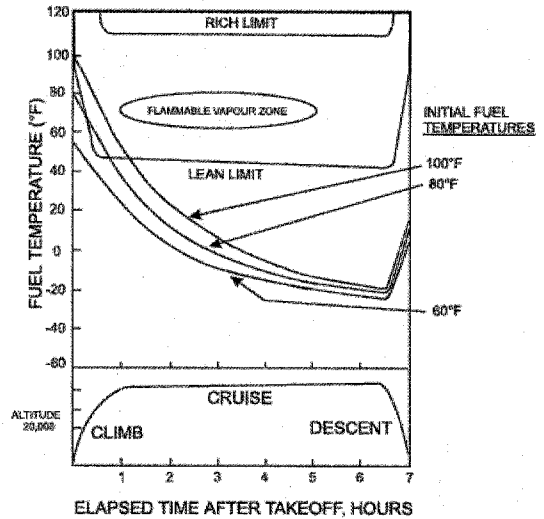


그림 2. 비행고도-시간에 따른 Jet A 연료의 온도변화와 발화가능성(날개 연료탱크)

되고 따라서 상대적으로 높은 발화위험율(15%~35% 범위)을 나타낸다.

이러한 사실은 통상적으로 중앙연료탱크의 운용시간이 날개에 위치한 연료탱크에 비해 상대적으로 낮고 중앙연료탱크와 날개 연료탱크의 내부 구조가 유사하여 점화원의 수와 종류에 별 차이가 없음에도 불구하고 비슷한 비율로 사고가 발생한 사실을 보여주는 표 1에서도 확인할 수 있다. 특히 날개 연료탱크의 폭발이 모두 낙뢰, 엔진화재 등의 외부적 요인에 기인하는 점을 감안하면 내부 점화원에 의한 폭발 위험성은 중앙연료탱크가 현저히 높다고 할 수 있기 때문에 연료탱크 폭발과 관련한 안전성 평가는 중앙연료탱크에 더 큰 비중을 두고 이루어진다.

2.3.3 발화위험율 최소화 방안

발화위험율을 낮추기 위한 방안으로는 연료탱크 내부의 산소 농도를 낮추는 방법과 가연성 연료 증기의 생성을 억제하는 방법이 있다. 발화위험율을 평가할 때에는 날개연료탱크(unheated wing tank)의 발화위험율을 평가 기준으로 삼는다. 다음과 같은 방안들이 발화위험율을 낮추는

데 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 평가되고 있다.

■ 산소 농도를 낮추는 방법

대표적인 방법으로 군용기에 널리 사용되고 있는 inerting이 있다. 이 방법은 비활성기체를 주입함으로써 산소의 비율을 강제적으로 낮추는 것으로서 민간 운송용 항공기의 경우 탱크 내의 산소 농도가 10% 이하로 유지될 수 있다면 별도의 추가적인 입증없이 연료탱크 폭발과 관련한 안전기준을 만족하는 것으로 평가한다. 비용과 연료계통에 대한 부작용 측면에서 inerting에 가장 적합한 것으로 평가되는 가스는 질소이며, 질소가 아닌 이산화탄소 등을 사용하는 경우 연료에 용해되는 inerting 가스가 연료계통의 성능에 미치는 영향에 대한 평가를 수행해야 한다. 또한 항공기가 상승함에 따라 연료탱크 내부의 압력이 낮아지면서 연료에 용해되어 있던 산소가 급속히 배출되어 산소농도가 증가하게 되므로 입증/평가시 이러한 점을 고려해야 한다.

inerting 방식은 일반적으로 다음과 같이 세 가지로 분류된다.

- 용기에 저장된 inerting 가스를 이용
- 블리드 에어에서 inerting 가스 직접 추출, 통상 블리드 에어의 1~2% 사용
- 지상에서 inerting 가스 주입

■ 가연성 연료 증기의 생성 억제

기본적으로 연료탱크와 인접하여 열원이 위치하지 않도록 해야 하며, 이것이 불가능 할 경우에는 단열재를 사용하거나 환기/냉각 등의 방법으로 과도한 열이 연료탱크로 전달되는 것을 방지함으로써 연료의 증발율을 억제하도록 해야 한다. 필요한 경우 강제적으로 연료탱크 내부를 환기시킴으로써 연료 증기의 농도를 희박하게 유지하여 발화가능성을 낮출 수 있다.

연료 증기의 생성은 탱크 내부의 온도와 압력 이외에도 연료의 요동(agitation), 미스팅(Misting),

슬로싱(Sloshing) 등에 크게 영향을 받는다. 따라서 탱크 내부에 배플을 설치하거나, 연료펌프의 냉각에 상용된 연료가 탱크의 바닥부분을 통해 재유입되도록 하거나, 저속 급유노즐을 사용하는 등의 방법을 통해 요동, 미스팅, 슬로싱의 영향을 최소화하는 것도 효율적인 방법이 될 수 있다.

2.4 점화원(Ignition source)

연료탱크 내부에 있는 전기/기계 시스템은 연료펌프, 연료량 측정 시스템(FQIS) 등이 있으며 이러한 시스템에서 발생하는 전기 아크, 필라멘트 히팅, 마찰에 의한 스파크 등이 발화를 유발하게 된다. 연료탱크 내부의 발화가능성을 정확히 예측하고 발화가 가능한 상태의 연료 증기를 제거하는 것이 쉽지 않기 때문에 통상적으로 연료탱크 내부에는 발화가 가능한 상태로 연료 증기/산소가 혼합되어 있다고 가정을 하여 안전성 평가를 수행하게 된다. 폭발의 충격을 견딜 수 있도록 연료탱크 내부에 폼(foam)을 설치하거나 구조적으로 충분한 안전여유를 두지 않았다면, 발화가 가능한 수준의 에너지를 방출하는 점화원의 발생은 고장조건에서 catastrophic으로 분류된다.

2.4.1 점화원의 형성을 최소화하기 위한 설계 방안

고장시 점화원으로 기능할 가능성이 있는 연료탱크 내부의 컴포넌트 및 시스템의 수를 최소화하고, 스파크나 아크가 발생하더라도 발화에는 이르지 않도록 연료탱크 내부 시스템에 공급되는 전기에너지의 양을 제한하는 방법이 점화원의 형성을 방지하기 위한 효율적인 방안이 될 수 있다. 구체적인 설계방안의 예는 다음과 같다.

- 연료온도 모니터링 또는 연료량 계측에 사용되는 전기배선을 최소화하도록 한다. 광섬유 등을 사용할 경우 연료탱크 내의 전기부품의 수를 감소시킬 수 있기 때문에 효과적이다.
- 연료펌프에 전원을 공급하는 배선이 되도록

연료탱크 내부를 지나지 않도록 한다.

연료펌프의 흡입구가 항공기의 자세에 관계 없이 항상 연료에 잠기도록 함으로서 dry running을 방지한다.

연료탱크 내부의 기기에 연결되는 전기배선에 일정 수준 이하의 전기가 공급되도록 함으로서 스파크가 발생하더라도 점화에 필요한 에너지를 발생하지 못하도록 한다. 통상적인 탄화수소 연료 가스가 점화되기 위해 필요한 최소 에너지는 200 마이크로 주울 내외로 알려져 있다.

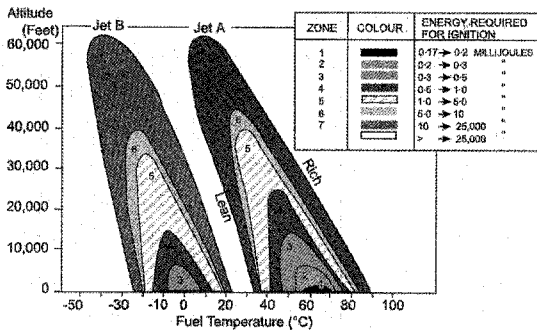


그림 3. 점화에너지에 따른 발화가능 영역선도

미세한 철선에 전류가 흘러 발열함으로서 점화가 일어나는 것을 방지하기 위해 전기 장치에 공급되는 전류의 크기를 일정 수준 이하로 제한한다. 필라멘트 가열에 의한 점화가 발생하기 위해 필요한 전류의 양은 60mA 정도로 알려져 있다.

3. 결 론

이상으로 항공기 연료탱크 폭발의 원인들과 이를 방지하기 위한 설계방안을 발화가능성과 점화원이라는 개념을 중심으로 살펴보았다. 연료탱크 폭발의 경우 대부분이 매우 치명적인 사고로 이어질 가능성이 높고, 확실한 원인 규명이 이루어지지 않은 사례가 많아 설계시 안전성을 확보하기 위한 철저하고 다각적인 노력이 요구 된다.

참 고 문 헌

1. Advisory Circular 25.981-2 "Fuel Tank Flammability Minimization", FAA, 2001.
2. Advisory Circular 25.981-1B "Fuel Tank Ignition Source prevention Guidelines", FAA, 2001.
3. Review of the Flammability Hazard of Jet A Fuel Vapor in Civil Transport Aircraft Fuel Tanks, FAA, 1998.
4. Aircraft Accident Report-TWA800, NTSB, 2000.
5. Fuel Tank Harmonization Working Group Final Report, ARAC, 1998.