노후 항공기 관리방안

How to Manage Aging Aircraft

최세종[1], 김천용[2]
광주대학교[1], 호원대학교[2]

초 록

최근 5년간 발생한 국적 항공기 사고 23건 중 헬기사고가 16건으로 전체 항공사고의 70%를 차지한다. 현재 국내에서 고정익 항공기 549대, 회전익 항공기 186대가 각각 운영(군·경찰 보유헬기 제외)되고 있음을 감안하면 회전익 항공기 사고가 훨씬 높은 편이며, 고정익 항공기 가동시간에 비하여 가동률이 매우 낮은 회전익 항공기를 고려하면 비행시간당 항공기 사고 비율은 회전익 항공기가 월등하게 높은 편이다. 또한 고정익 항공기의 평균기령은 10.9년인데 비하여 산림항공본부를 비롯한 헬기운영업체에서 운영 중인 회전익 항공기의 평균기령은 18.9년으로 회전익 항공기가 전체적으로 노후화 되어 있으나, 국적항공사에 운영 중인 노후 항공기 관리프로그램을 회전익 항공기 운영사에서는 운영하지 않고 있다. 따라서 본 연구를 통하여 노후 항공기 운영현황을 검토하여 노후 회전익 항공기 운영기준을 수립하고 노후 회전익 항공기의 정비프로그램을 정립하여 회전익 항공기의 지속감항성을 확보할 수 있는 방안과 수명주기 설정을 마련하고자 한다.

1. 서 론

노후 항공기(Aging Aircraft)란 최초 설계수명을 넘긴 항공기의 총칭이다[1]. 우리나라의 경우 현재 운영되고 있는 고정익 항공기 549대의 평균기령은 10.9년인데 비하여 산림항공본부를 비롯한 헬기운영업체에서 운영 중인 회전익항공기 186대의 평균기령은 18.9년이다. 또한 우리나라 국토교통부에서 노후 항공기로 분류하는 20년을 초과하는 고정익항공기는 11%인 59대인데 비하여, 회전익 항공기는 47%인 89대에 이르고 있다[2].

최근 5년간 발생한 국적 항공기 사고는 23건 중 헬기사고가 16건으로 전체 항공사고의 70%를 차지한다. 현재 국내에서 각각 운영(군·경찰 보유헬기 제외)되고 있음을 감안하면 헬기사고가 훨씬 높은 편이며, 대형항공기 가동시간에 비하여 가동률이 매우 낮은 헬기를 고려하면 비행시간당 항공기 사고 비율은 헬기가 월등하게 높은 편이다.

반면에 국적항공사에서 운영 중인 노후 항공기 관리프로그램을 회전익 항공기 운영사에서는 운영하지 않고 있다. 따라서 본 연구를 통하여 노후 항공기 운영현황을 검토하여 노후헬기를 포함한 노후 항공기 관리방안을 마련하고자 한다.

Table 1. Age of Aircrat in Korea

기령	항공기 종류		계
	고정익 항공기	회전익 항공기	
3년미만	97	10	107
3년이상 5년미만	48	2	51
5년이상 10년미만	121	25	146
10년이상 15년미만	129	28	157
15년이상 20년미만	95	34	130
20년이상 25년미만	32	31	63
25년이상 30년미만	4	24	28
30년이상	23	32	56
합계	549	186	738

2. 이론적 배경

2.1 노후 항공기 기준

노후 항공기에 대한 일반적인 정의가 존재하지 않으나 호주 항공안전청 (Australia CASA)은 노후 항공기를 다음과 같이 정의하였다.

항공기가 제작사에서 인도되어 비행을 시작하는 순간부터 모든 항공기는 노후 항공기 범위에 들어간다. 그러나 노후 항공기에 대한 용어는 일반적으로 제작 후 사용시간이 중요한 의미를 갖고 동일한 부류의 항공기 평균보다 많은 경우 의미를 갖는다[3].

항공관련자는 노후 항공기를 정의하는데 있어서 노후 항공기의 기준을 단순한 달력을 기준으로 한 기령을 기준으로 할 것인지 아니면 비행시간이나 비행횟수와 같이 항공기 운용자료를 기준으로 할 것인지 고민해왔다. 항공기 노후화로 인하여 안전에 가장 영향을 주는 항목은 항공기의 부식, 피로손상 등과 같이 항공기 안전에 심각한 영향을 주는 항목에 근거를 하고 있다. FAA와 AAWG(Airworthiness Assurance Working Group)는 달력 기준 기령은 부식과 같은 환경적 요인의 손상에 더 좋은 지침이고, 운용자료는 WFD와 같은 피로손상에 더 좋은 지침이라고 결론을 내렸다[4].

2.2 노후 항공기 사고

항공기가 노후화됨에 따라 기체구조의 건전성 확보는 매우 중요한 문제가 되었다. 1988년에 발생한 Aloha 항공사의 B737기 사고는 항공기 노후화로 인한 대표적인 기체구조 파괴 사례이다. 하와이 제도의 섬 사이를 운항하던 항공기의 객실 동체 윗부분이 뜯겨져 날아가 버렸고 사망자도 있었지만 다행이 사고항공기는 비상착륙에 성공하였다. 이 사고는 기체구조물을 이루고 있는 표피와 프레임의 부식 및 균열을 탐지하고 평가할 수 있는 검사기술의 필요성을 부각시켰다[5]. 이후 노후 항공기에 대한 감항성과 안전성을 확보하기 위하여 많은 조치가 취해졌다. 미국에서는 FAA를 중심으로 노후 항공기에 대한 연구 프로그램이 시작되어 항공기 제작사, 항공사, 정비조직, 감항당국이 Aloha 항공 사고에서 발견된 부식과 WFD(Wide spread Fatigue Damage)와 같은 노후 관련 항목에 대한 관심을 가지고 이를 해결하는 방법을 찾으려고 AAWG을 구성하였다[4].

1996년에 대서양 상공에서 발생한 TWA 800 비행편의 B747 항공기 폭발사고는 항공기 Airing 계통의 노후화에 대한 관심을 끌기에 충분했다. 25년된 B747 항공기 폭발사고는 연료탱크 내의 전기배선이 노후화되어 연료탱크 내에서 전기 스파크를 일으켜 폭발된 사고로 탑승자 전원이 사망하였다. 이를 계기로 FAA는 노후 항공기 관리프로그램을 구조물 중심에서 항공기 배선을 포함한 비구조물까지 확대하였다.

2.3 항공기 기체설계 발전과정

항공기 기체 설계 발전 과정을 보면 1950년대에는 Fail-safe 개념에서 시작하였고, 1970년대에는 손상허용설계 (Damage Tolerance Approach) 개념으로 발전하였으며, 1980년대에 WFD(Widespread Fatigue Damage)라고 불리는 광범위분포 피로손상 개념으로 발전하였다. Fail-safe 개념은 우발적인 손상과 부식이 발생하여 성능저하가 발생하더라도 잉여분의 구조물에 의존하여 안전을 확보하는 방식이다. 이는 구조물의 손상을 허용하지 않는 방법으로 설계 수명 내에서 균열 등의 손상이 발생하지 않아야 한다[6].

손상허용설계 개념은 항공기 설계수명 이내에서 심각한 피로, 부식, 손상이 발생하여도 손상이 탐지될 때까지 기체의 나머지 부분이 파손이나 구조에 영향을 미칠만한 소성변형 없이 하중을 견딜 수 있도록 설계하는 방식이다. (Brewer 1996) 이는 초기의 손상에 대하여 균열진전을 허용하지 않는 방법과 균열진전을 허용하되 설계수명 내에서 임계균열 길이까지 성장하지 않고 잔류강도가 요구조건을 만족시키고 있음을 보이는 방법이 있다. 금속재 구조물은 초기균열을 가정하여 입증하고 복합재 구조물은 충격 및 인위적인 손상을 구조물에 적용하여 설계수명 내에서 손상이 진전하지 않음을 입증한다.

광범위분포 피로손상은 다중 접합 구조물에서 동시에 다량의 균열(crack)이 광범위하게 발생하는 피로손상으로 구조물이 손상의 범위를 벗어나 있는 상태이다. 항공기 표피 접합부위의 경우 많은 리벳이 장착되어 있는 리벳 구멍을 따라서 작은 피로 균열이 발생하고 이러한 균열이 인접한 구멍으로 확산

되어 최종적으로 많은 작은 균열이 항공기 접합부위의 강도를 기준 이하로 떨어뜨리게 된다[7].

부식(Corrosion)은 주위 환경조건의 영향에 의해 금속재료에 화학반응이 수반되어 전기화학적 열화가 생기는 현상을 말한다. 항공기는 장시간동안 다양한 환경에 노출되는데 특히 염분과 습기는 부식에 결정적 역할을 하며 재료의 강도를 저하시키고 피로수명을 단축시키는 원인이 된다. 부식은 항공기 피로수명에 중요한 역할을 하므로 항공기 부식에 대한 정량적 피로수명 모델을 개발하고 이러한 모델에 따라서 부식을 점검하도록 정비프로그램을 만들어 적절한 검사주기를 만들어야 한다[8].

MIL-HDBK-729[9]에서는 금속재료의 부식과 부식방지대책에 대하여 상세히 기술하고 있다. 부식을 검사하는 방법은 외부는 육안검사를 실시하고 내부는 방사선을 투시법, 와전류 시험, 초음파 두께 측정으로 검사를 실시한다.

[그림 1]은 항공기 구조에서 부식에 취약한 부위를 보여준다.

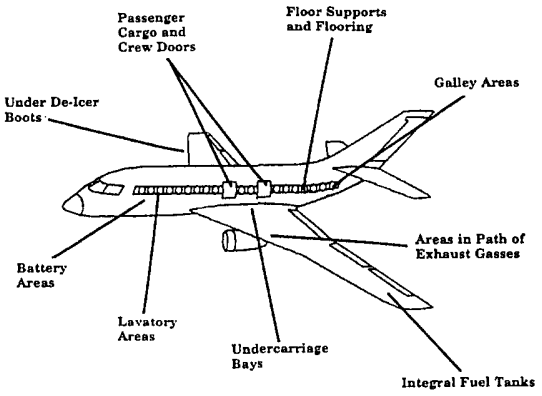

Fig. 1 Corrosion Susceptible Area [5]

항공기는 이륙하여 고고도에서 비행을 하면서 여압에 의한 압력을 동체 전체에 받고 착륙하는 과정에서 가압과 감압이 반복되므로 동체의 원주 방향으로 높은 응력이 발생하므로 피로균열이 동체 전체에 걸쳐 동시다발적으로 나타난다. 특히 동체 표피는 돌출부에 의한 항력을 줄이기 위하여 접시머리 리벳을 장착하도록 동체표피에 날카로운 모서리를 가진 countersink를 만드는데 이 모서리 부위에 피로균열을 발생시키는 응력집중이 된다[10].

[그림 2]는 항공기 구조에서 부식에 취약한 부위를 보여준다.

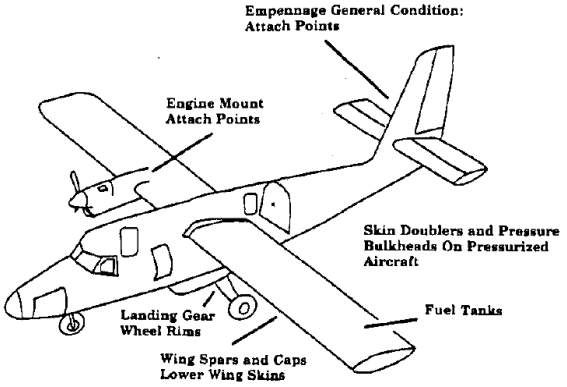

Fig. 2 Crack Susceptible Area [5]

회전익 항공기는 자체적으로 회전하는 복잡한 동적 구성품을 가지고 있어 피로수명에 대한 특징이 고정익 항공기 동체보다는 항공기 엔진 시스템과 유사성을 많이 가지고 있으며. 회전익 항공기의 피로수명 평가는 FAR 27/29와 AC 27/29에 제시되어 있다.

3. 노후 항공기 수명

3.1 노후 항공기 수명연장

항공기의 수명연장을 위해서 여러 가지 검사방법과 항공기 관리프로그램이 개발되고 있다. 항공기 안전을 위협하는 기체구조 손상의 주요 원인으로는 부식과 피로파괴가 있다. 이러한 부식과 피로파괴를 탐지하도록 다양한 형태의 비파괴검사 방법을 사용하고 있으며, 항공기 관리프로그램으로는 기체구조 Aging Program, 항공기 Wiring Aging Program 등이 있다.

내구수명은 목표하는 기간동안 구조물이 피로 등에 의한 손상을 견딜 수 있는 능력으로 항공기 안전과 직접적인 연관성이 적은 부위에 적용한다. 반면에 손상허용 수명은 손상 시 항공기 및 인명 손실이 예상되거나 사전에 발견되지 못할 경우 항공기 손실이 예상되어 구조물의 안전에 직접적인 영향을 주는 부위에 적용한다[11].

장기운영 항공기 구조물의 경우 예상치 못한 시점에서 균열이 발생하게 되면 점검을 위하여 항공기 운항을 금지시켜야 하는 관계로 많은 비용이 소요된다. 따라서 효율적인 점검주기를 설정하기 위하여 위험도평가 수행이 필요하다[1]. 현재의

항공기 설계 개념은 고정된 초기 균열 크기를 산정하여 초기 균열 성장에 따른 임계균열 길이를 계산하고 검사주기를 판단하는 결정론적 해석기법을 사용하고 있다. 결정론적 해석기법 대신 확률론적 해석기법을 적용하면 특정 시점에서 탐지가능 초기균열 크기 분포를 이용하여 파손확률을 계산하고 위험도 평가를 수행하여 초기 검사시기 및 검사주기 변경 등의 개선을 도출할 수 있다[12].

확률론적인 해석기법은 항공기 운영 중 발견된 구조물의 결함분포를 이용하여 초기피로품질의 주요 척도인 초기균열크기를 구하고 이를 바탕으로 균열성장에 의한 사용수명을 예측하는 방법이다. 특히 확률론적 기법은 항공기를 장기적으로 운영하면서 발생되는 각종 결함자료를 바탕으로 향후 결함발생 파손확률(POF, Probability of Failure)을 예측하고, 위험도 평가 결과에 따라 결합률을 안전 제한치 이하로 관리를 할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 이러한 파손확률을 이용한 위험도평가는 항공기 기체, 엔진 등 다양한 부품에 적용할 수 있다[12].

김근원(2012)은 확률론적 해석기법을 활용하여 장기운영 항공기 Wing Spar 부품 균열에 대하여 확률론적 위험도평가를 수행하여 항공기 구조물의 점검주기 개선을 위한 위험도평가 모델을 제시하였다. 제시된 모델은 초기검사시간을 1,600시간에서 2,200시간으로 600시간 증가가 가능하고, 검사주기는 기존 300시간에서 1,000시간으로 연장하여도 항공기 안전운영이 가능한 것으로 분석되었다.

3.2 경제수명 결정기법

장비의 경제수명을 결정하는 방법은 장비의 구조물 수명, 핵심 부품 수명, 부품 고장률에 기반한 수명, 손상허용해석에 의한 수명 등과 같은 물리적 관점에서 수명을 결정하는 방법과 누적유지비, 평균 시스템 비용, 연간등가비용과 같은 경제적 관점에서 수명을 결정하는 방법이 있다.

장비의 기계적 구조물 수명에 따라서 결정하는 방법은 장비의 기본골격인 기체구조의 내구성에 근거하여 결정하는 방법이고 장비의 핵심부품에 근거하여 수명을 결정하는 방법은 장비를 구성하는 핵심부품의 구성비율이 장비 가격의 상당 부분을 차지하는 제품의 수명을 결정하는 방법에 주로 활용된다.

물리적 관점에서 항공기 수명산출 방법은 항공기의 구조물의 수명에 의한 수명산출 방법, 항공기의 주요 핵심 구성품 수명에 의한 수명산출 방법, 항공기 고장률을 기반으로 한 수명산출 방법, 손상허용 해석에 의한 수명산출 방법이 있다. 경제적 관점에서 항공기 수명산출 방법은 항공기 운용기간 누적유지 비용이 최초 투자비와 같아지는 시점을 항공기 수명으로 판단하는 누적유지비에 의한 방법이고, 평균투자비와 평균유비지의 합계로 이루어지는 평균시스템 비용이 최소가 되는 시점을 항공기의 경제수명으로 결정하는 평균시스템 비용법이 있다[13].

부품고장률을 기반으로 한 장비수명 산출방법은 부품의 고장으로 인한 누적부품 교체비용이 장비 획득가의 일정비율 이상이 되는 기간을 장비 수명으로 결정하는 방법이고 손상허용해석에 의한 장비수명 산출방법은 장비를 이루는 구조물에 손상이 있는 상태에서 손상의 허요이 불가능한 상태로 진전되는 기간을 예상하여 수명으로 산출하는 방법이다.

누적유지비에 의한 방법은 장비 운용기간의 누적 운용비용이 처음 투자비와 같은 시점을 장비 수명으로 결정하는 방법이고, 평균시스템에 의한 방법은 장비 평균투자비와 평균유지비의 합계인 평균시스템 비용이 최소가 되는 시점을 장비의 경제수명으로 결정하는 방법이다. 연간등가비용에 의한 방법은 평균시스템 비용의 평균 대신 연등가를 사용하여 연등가투자비와 연등가유지비가 최소가 되는 시점을 장비의 경제수명으로 결정하는 방법이다[12].

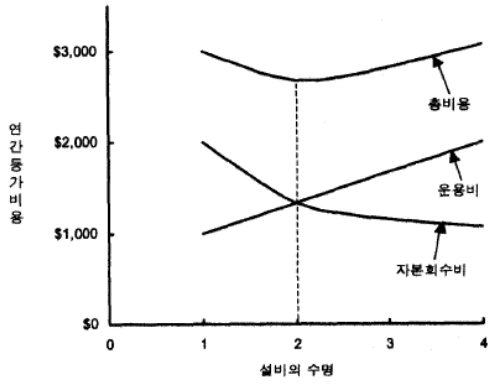

Fig 3. Age & Total Cost

항공기의 경제적 수명주기란 항공기의 총 연간 등가비용(Toatl Equivalent Annual Cost)를 최소로 하거나 총 연간등가순이익을 최대로 하는 기간으로 최소비용 수명기간 또는 최적대체 기간으로 표시한다. 기존 항공기를 대체할 때는 대체 항공기와 기존 항공기의 경제적 수명주기를 비교한다. 기존 항공기를 대체하는 경우는 기존 항공기의 부적합, 과다한 유지비, 효율체감에 도달, 진부화 및 상기 항목들이 복합적으로 작용하는 경우로 볼 수 있다. 그림 3은 연간등가운용비와 자본회수비 및 그 결과인 총 연간등가비용에 의해 경제적 수명을 나타내고 있다[14].

4. 실증 분석

4.1 노후 항공기와 안전

1959년부터 2012년까지 54년동안 발생한 세계 항공기 사고를 Flightglobal Ascend Online Database 자료와 Boeing Statistical Summary of Commercial Jet Airplae Accidents 자료를 기초로 분석한 Hansman의 연구에 따르면 항공기 기령 18년 이전까지는 항공기 인명사고와 항공기 기령과의 상관관계는 거의 없고, 20년이 지나면 약한 상관관계가 있으며, 27년이 지나면 상관관계가 있는 것으로 밝혀졌다[15].

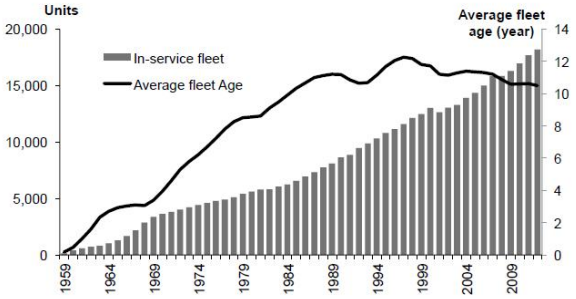

Fig 4. Growth of Fleet and Fleet Age

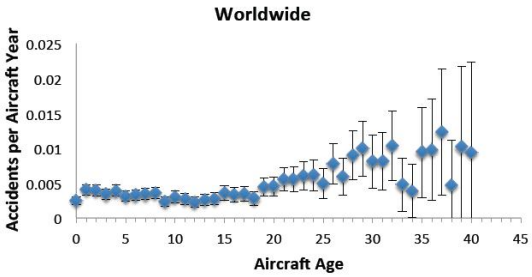

Fig 5. Accident per Aircraft Age

[그림 4]는 항공기 대수는 지속적으로 증가하지만 민간항공사가 운영하는 항공기의 기령은 1990년 이후 10~12년으로 운용되고 있음을 보여준다. [그림 5]는 항공기 사고율이 기령 20년까지는 대체적으로 일정하지만 20년 이후에는 완만하게 상승하여 기령과 사고율이 상호 연관이 있음을 보여주고 있다.

4.2 노후 항공기 관리방안

노후 항공기 관리는 노후 항공기를 퇴역시키고 새로운 항공기로 대체하거나, 노후 항공기에 추가적인 정비조치를 하면서 적절하게 관리는 하는 방안이 있다.

노후 항공기를 퇴역시키고 새로운 항공기로 대체하는 방안은 항공기의 경제수명과 함께 검토되는 사항이다. 민간 제트 항공기의 퇴역 시까지 평균 사용연수는 27.27년이고, 제작사에서 제작되어 인도된 항공기 중에서 25년이 지나서도 현재 사용되는 항공기는 60%이다. 민간용 제트 항공기가 퇴역되는 요인은 경제적 요인으로 항공기를 정비하고 운용하는 비용이 그 항공기를 이용하여 매출을 일으키는 비용보다 크기 때문이다. 또 다른 요인으로는 항공기 제작사에서 동 항공기 생산이 중단되어 항공기를 유지하기 위한 부품과 기술을 제공하는데 어려움이 있는 경우이다[16].

일반적으로 노후 항공기를 관리하는 방안은 노후 항공기에 대한 추가적인 정비조치를 취하면서 관리하는 방안이다. 이러한 노후 항공기를 관리하도록 FAA는 AASR (Aging Airplane Safety Rule)을 제정하고 항공기 운영자들이 이를 따르도록 하고 있다[17]. (14 CFR Part 119)

항공기 감항성은 항공기 구조물 파손이 가져올 잠재적 참사에 대한 구체적인 LOV (Limits of Validity)를 찾아내고 이에 대한 적절한 정비를 실시하여 보장할 수 있다. 적절한 LOV 한계에 도달한 항공기에 행할 적절한 정비는 이에 맞는 검사, 개조 및 부품 교체 등이 있다.

FAA는 1991년에 미국 의회를 통과한 노후 항공기안전법 (Aging Aircraft Safety Act)에 따라서 모든 항공사는 그들의 정비프로그램에 항공기 부식방지프로그램(CPCP)과 손상허용(Damage Tolerant) 기반 정비프로그램을 제정하고 승인을 받아 운용하고 이에 따라서 WFD 규정과 LOV 접근법을 실행하도록 하였다[18].

항공사는 손상허용 프로그램 조건을 만족하도록 항공기 구조물 정비 프로그램과 수리승인절차를 재평가 하도록 요구하였다. 재평가 절차는 당시까지 항공기에 수행된 수리 및 개조 작업 중 손상허용과 검사를 필요로 하는 항목을 재조사하여 관련 자료를 확보하고 이후에 수행되는 모든 구조물 수리 및 개조 작업은 손상허용 프로그램에 근거하여 작업을 하고 문서화하도록 요구하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 항공기 노후화에 대한 개념과 노후화로 인한 항공기 참사를 예방하기 위한 항공기 설계 개념 및 점검 방법, 그리고 대형항공기에 적용되는 노후화 프로그램을 살펴보았다.

우리나라에서는 고정익 항공기에 비하여 회전익 항공기가 많이 노후화 되어가고 있으며 회전익 항공기의 사고 발생이 고정익 항공기에 비하여 빈번하게 발생하고 있다. 회전익 항공기의 높은 사고율이 항공기 노후화와 직접적인 연관관계가 있는지는 밝혀지지 않았으나 항공기 사고가 발생하면 노후화가 하나의 원인으로 추정을 하고 있다.

반면에 회전익 노후 항공기에 대한 정비프로그램은 구체적으로 개발된 것이 없어 사고가 발생시마다 관심이 되고 있는 회전익 노후 항공기에 대한 정비프로그램 개발되기를 기대한다.

참고문헌

[1] J. W. Lincoln, :Aginf aircraft - USAF experience and actions “, Proc. The First Joint DoD/FAA/NASA Conference on Aging Aircraft, July 1997, Ogdon, UT, (1997) in press.

[2] 국토교통부 항공정책실, “항공기 종류별 기령별 등록현황”, http://atis.casa.go.kr/, 2016. 4. 30

[3] Australian CASA, :Ageing Aircraft Management Plan “, 2012

[4] John Hansman, “Analysis of Impact of Aircraft Age on Safety for Air Transport Jet Airplanes”, MIT International Center for Air Transportation, MIT, Cambridge, 2014

[5] 권오양, “노후 항공기의 비파괴검사”, 비파괴검사학회지, Vol 19, No. 1, pp. 34~46.

[6] 김성준, 김태욱, “항공기 피로수명 입증방법 연구” 2016

[7] Robert S. Piascik, Scott A. Willard, Matthew Miller, “ The Characterization of WideSpread Fatigue Damage in Fuselage Structure “, NASA Technical Memorandum 109142, 1994

[8] 김위대, 부식을 고려한 항공기 재료의 부식피로 수명예측 연구, 한국항공주주학회지, 제35권 제2호, 2007, pp. 46~51

[9] MIL-HDBK-729, Military Standardization Handbook: Corrosion & Corrosion Prevention Metals, 1983

[10] D, Hagemaier, “Improved NDI techniques for aircraft inspection”. Nondestructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports and Aerospace Hardware, eds. R.D. Rempt and A.L. Broz. SPIE-2945, SPIE, Bellingham, WA, pp. 235-248 (1986)

[11] 김근원, 김용대, 신기수, “장기운영 항공기의 확률론적 위험도평가 접근에 관한 연구” 한국항공경영학회지 제10권 제2호, 2012, pp. 89-98

[12] 추맹철, 김성환, 신기수, “군용 항공기 경제수명 결정기법에 관한 연구”, 한국항공경영학회 2013년 춘계학술발표대회 논문집, 2013, pp. 583~597

[13] Hussam Kassem & Seifedine Kadry, “Stochastic Fatigue of a Mechanical System Based on the Technique of Probabilistic Transformation”, European Journal of Scientific Reserach, Vol.29 No.2, 2009, pp. 147~156
[14] 은희봉, 장조원, 최세종, “H대학교 훈련용 항공기의 경제적 수명주기에 관한 연구” 한국항공운항학회지 제10권 제1호, 2002, pp. 57~68
[15] John Hansman, “Analysis of Impact of Aircraft Age on Safety for Air Transport Jet Airplanes”, MIT International Center for Air Transportation, 2014
[16] Dick Forsberg, “ Aircraft Retirement and Storage Trends”, AVOLON, 2015
[17] FAA, “Aging Airplane Program : Widespread Fatigue Damage; Final Rule - 14 CFR Parts 25, 26, 121”, DOT, 2010
[18] Roxan M Pillo & Amos Hoggard, Complying with the Aging Airplane Safety Rule, AERO Quartery, 2 Quarter, 2010, Boeing, pp. 15~19.