

論文

회전익기 연료펌프 안전성 평가 분석

이정훈*, 박장원**

Safety Assessment Analysis of the Rotorcraft Fuel Pumps

Junghoon Lee* and Jang-Won Park**

ABSTRACT

The system and components for aircraft are required the design data on which the safety requirements are properly reflected for their certification. This paper presents the procedure and results of a safety assessments analysis for the rotorcraft fuel pumps in order to confirm and verify them. The fuel pumps design assessment must be performed, including a detailed failure analysis to identify all failures that will prevent continued safe flight or safe landing. In order to assess the fuel pumps design safety, not only system safety hazard analysis and but FTA(Fault Tree Analysis) for proofing the safety objective of the fuel pumps are performed. The results of the safety assessment for fuel pumps validate that no single failure or malfunction could result in catastrophic failure or critical accidents of the rotorcraft.

Key Words : Safety Assessment Analysis(안전성 평가 분석), Rotorcraft(회전익기), Fuel Pump(연료펌프), Fault Tree Analysis(고장 트리 분석), Failure Rate(고장률), Failure Mode Ratio(고장유형비)

1. 서 론

민간 항공기는 '항공법'에서 항공기가 안전하게 비행할 수 있는 성능, 즉 감항성을 최소의 기준으로 개발된다. 이와 달리, 군용 항공기는 군요구성능과 기능을 목적으로 개발되어 방위사업법에 따라 체계적인 시험평가로 전투용 적합판정을 한다. 그러므로 이에 대한 체계적인 비행안전성 확보 방안이 요구되었으며, 이에 따라 2009년에 '군용항공기 비행안전성 인증에 관한 법률'이 제정되어 공포되었다.

군용항공기 개발사업 시에는 항공기의 비행안

전성을 확보하기 위하여 설계, 제작, 시험 등에 적용하는 일반적 기술로 '표준감항인증기준'에 따라 항공기를 개발해야 한다. 이에 따라 군용항공기는 체계 및 구성품에 대하여 안전성을 확보해야 하며, 이에 대한 안전성 평가가 요구된다.

한국형헬기(KUH, Korean Utility Helicopter) 민군겸용핵심구성품 개발사업을 통하여 국내 최초로 독자기술로 개발된 회전익기용 연료송압펌프에 대하여 최적설계 및 해석에 대한 연구가 수행되었다.^[1]

또한 항공기용 연료이송펌프의 기어부 설계에 대한 연구를 통하여 연료펌프 개발에 대한 기반을 확립한 바 있고^[2] 회전익기용 연료송압펌프 모터조립체 설계에 대한 연구를 수행하였다.^[3] 본 연구는 국내 최초로, 독자기술로 개발된, 민군겸용핵심구성품의 하나인, 회전익기용 연료펌프에 있어서 안전성 평가에 대한 일련의 과정과 그 결과를 다루고 있다.

2013년 05월 27일 접수 ~ 2013년 06월 21일 심사완료
논문심사일 (2013.05.31, 1차), (2013.06.12, 2차)

* 한국항공우주연구원

** 한화테크엠

연락처, E-mail : kariere@kari.re.kr

대전시 유성구 어은동 과학로 115번지

II. 안전성 설계 기준

항공기용 연료펌프는 기능상실 또는 고장이 항공기, 타구성품 및 운용요원에 심각 또는 치명적 위험을 끼치지 않도록 설계되어야 하고 이는 MIL-STD-882D에 따른 안전성 원리 적용을 통해 달성되어야 한다.^{[4][5]} 단일고장(Single Failure)이 안전한 비행 및 착륙을 방해하거나 또는 승무원의 능력저하를 발생하는 치명적인 상태를 유발하지 않도록 고장안전(Fail-Safe) 또는 안전수명(Safe-Life) 개념으로 설계되어야 한다.

원하지 않는 사건(Undesired Event) 또는 고장상태(Failure Condition)는 정량적, 또는 정성적 안전성 목표(Safety Objective)를 달성하도록 설계되어야 한다. 연료펌프는 승압펌프와 이송펌프로 구분되어 안전성 설계 목표를 설정하는데, Table 1과 같이 원하지 않는 사건에 대하여 승압펌프는 ‘펌프에 의하여 제공되는 압력의 손실이나 저하’를, 이송펌프는 ‘이송능력 상실과 ‘부주의한 연료이송(Inadvertent Fuel Transfer)’을 각각 원하지 않는 사건으로 하여 이에 대하여 각각 1.5×10^{-4} 을 안전성 목표로 설정하였다.^{[6][7]}

Table 1. 안전성 설계목표

품명	Undesired Events	Safety Objective (Failure Rate/FH)
승압 펌프	Loss or degraded pressure provided by pump	1.5×10^{-4}
이송 펌프	Loss of transfer ability	1.5×10^{-4}
	Inadvertent fuel transfer	1.5×10^{-4}

III. 연료펌프의 구성

연료펌프는 연료계통의 구성품으로, 그 기능에 따라 연료승압펌프(FBP, Fuel Boost Pump)와 연료이송펌프(FTP, Fuel Transfer Pump)로 구분된다.

3.1 연료승압펌프

연료승압펌프는 연료탱크 내에 장착되며, 항공기의 고도변화나 자세변화는 물론, 급격한 기동, 가속을 포함한 모든 비행조건에서도 엔진부에 일정량의 연료를 일정한 압력으로 지속적으로 공급하는 기능을 담당한다.^[7] 연료승압펌프는 모터 조립체, 임펠러 조립체, 몸체 조립체로 구성된다.^[8]

3.1.1 상부 몸체

연료승압펌프의 상부 몸체는 임펠러가 장착되는 하우징부로, 임펠러에서 유량 및 압력을 발생시키기 위한 볼트류가 포함된다. 또한, 모터 조립체와 연결되는 부위로서 구조적 안정성을 지녀야 한다.

3.1.2 하부 몸체 조립체

연료승압펌프의 하부몸체 조립체는 연료펌프가 가혹한 비행조건에서 구조적 안정성을 가져야 하며, 임펠러 지지대가 있어 임펠러가 회전시 압력이 감소하는 것을 막아준다. 또한 연료펌프를 탱크 내 원활하게 장착하기 위해서는 ICD (Interface Control Document) 형상을 만족해야 한다.

3.1.3 임펠러 조립체

연료승압펌프의 임펠러 조립체는 형상에 따라 모터 회전수 및 동력이 결정되는데, 요구되는 유량과 압력을 발생시키기 위해서는 최적의 설계가 필요한 부분이다. 또한 임펠러는 회전 에너지를 유동 에너지로 바꾸어 주는 역할을 수행한다.

3.1.4 모터 조립체

연료승압펌프의 모터 조립체는 임펠러를 구동시키기 위해 전기에너지를 회전에너지로 바꾸어 주는 기능을 하는 조립체로, 내구성을 향상시키기 위해 BLDC(BearingLess Direct Current) 방식의 모터가 사용된다. 모터 조립체는 모터 회전부, 고정자부, EMI Filter를 포함한 모터 드라이브로 구성된다.

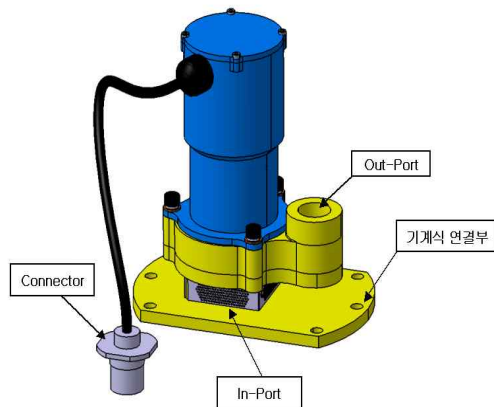


그림 1 연료승압펌프 전체 형상도

3.2 연료이송펌프

연료이송펌프는 두 개의 주연료탱크 사이에 장착되며, 필요시 연료를 이송함으로써 항공기의 고도변화는 물론 급격한 기동 및 자세변화, 가감속 등 모든 비행조건에서 연료송압펌프가 안정적인 역할을 수행할 수 있도록 연료를 배분하고, 연료를 사용함에 따른 기체의 CG 변화를 조정하여 기체의 안정성을 유지하는 기능을 수행한다.^[7]

3.2.1 기어펌프 조립체

연료이송펌프의 기어펌프 조립체는 두 개의 기어 및 하우징으로 구성되며, 기어의 형상에 따라 연료이송펌프의 유량이 결정된다. 또한 브레이크 시스템 작동시 연료의 누설량과 내구성을 고려하여 기어를 설계한다.

3.2.2 모터 조립체

연료이송펌프의 모터 조립체는 기어를 구동시키기 위해 전기에너지를 회전에너지로 바꾸어 주는 기능을 하는 조립체로써 내구성을 향상시키기 위해, 역시 BLDC 방식의 모터가 사용된다. 연료이송펌프도 마찬가지로 모터 회전부, 고정자부, 모터 드라이브(EMI Filter 포함)로 구성된다.

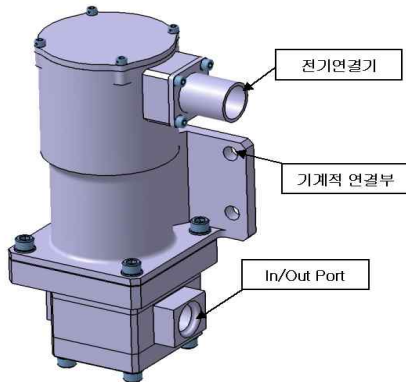


그림 2 연료이송펌프 전체 형상도

IV. 안전성 분석 및 평가

4.1 안전성 위험요소 분석

연료펌프의 안전성 위험요소 분석은 Table 2의 기능 부품 목록에 대하여 수행한다. 우선 기능 부품의 위험요소(Hazard) 항목을 설정하고, 각 위험요소 별로 부품/차상위품/완제품의 고장

영향성을 순차적으로 확인한다.^[9]

Table 2. 기능 부품 목록

기능부품목록			
번호	품명	기능명	기타
FE-1	연료송압펌프	연료 송압	4SET
FE-1.1	상부 몸체	임펠러 장착 및 모터 조립체와 연결	1EA
FE-1.2	하부몸체 조립체	임펠러 지지	1EA
FE-1.3	임펠러 조립체	유량 및 압력 발생	1EA
FE-1.4	모터 조립체	임펠러 구동	1EA
FE-2	연료이송펌프	연료 이송	1SET
FE-2.1	기어펌프 조립체	양방향으로 연료이송	1EA
FE-2.2	모터 조립체	기어 구동	1EA

확인된 완제품 영향성은 Table 3의 구성품 위험요소 심각도 분류 정의에 따라서 심각도 등급을 결정한다. 여기서, 기능 부품의 위험요소는 해당 기능에서 이미 알려져 있으며 발생 가능한 부품 고장유형에 기초하여 설정하고, 고장률 및 고장유형비(Failure Mode Ratio)는 FMECA(Failure Mode, Effects, and Critical Analysis)의 기능 부품에 대한 고장률 및 고장유형비다.

Table 3. 구성품 심각도 분류

Description	Category	Definition
Catastrophic	1	Loss of aircraft, or fatal injury directly or indirectly due to failure in the fuel tanks.
Critical	2	Loss or severely degraded performance or serious injury directly or indirectly due to failure in the system under analysis.
Marginal	3	Degraded performance or significant loss of safety margin directly or indirectly due to failure in the system under analysis.
Negligible	4	No degradation in performance

특히 고장유형비는 분석자의 판단에 의해 결정되는 경우가 있으며, 고장유형비가 0.0인 경우는 실제로 발생하지 않을 것으로 판단되는 고장유형으로 판단 근거는 SSHA 분석 양식에 상세히 기술한다.

위험요소의 발생빈도(Probability of Occurrence)가 산출되면 Table 4의 구성품 위험요소 발생확률 분류 정의에 따라서 발생확률 등급을 결정한다.

Table 4. 구성품 위험요소 발생확률 분류

Description	Level	Qualitative Definition (Specific Individual Item)	Quantitative Definition (Probability per one FH)
Frequent	A	Likely to occur frequently.	0E-03/FH or greater
Probable	B	Will occur several times in the life of an item.	between 1.0E-03/FH to 1.0E-04/FH
Occasional	C	Likely to occur some time in the life of an item.	between 1.0E-04/FH to 1.0E-05/FH
Remote	D	Unlikely but possible to occur in the life of an item.	between 1.0E-05/FH to 1.0E-06/FH
Improbable	E	So unlikely, it can be assumed occurrence may not be experienced.	1.0E-06/FH or less

Table 5의 구성품 위험요소 평가 기준에 따라서 위험도를 HIGH/MEDIUM/LOW로 분류한다. 이후 위험도 판정 등급에 따라서 필요한 조치를 수행한다.

Table 5. 구성품 위험요소 평가기준

Risk Level	Risk Assessment Criteria
HIGH	Unacceptable -Immediate corrective action required
MEDIUM	Undesirable -Customer review/decision required
LOW	Acceptable -Acceptable with review

4.2 고장 트리 분석 (Fault Tree Analysis)

안전성 설계목표(Safety Objective)의 정량적 입증을 위해 고장 트리 분석(FTA)을 수행한다. FTA는 구성품의 고장 및 고장조합으로 원치 않는 사건(Undesired Event)이 유발되는 정량적 고장 발생률을 계산한다. 우선 원치 않는 사건을 최상위 사건(Top Event)으로 두고, 이를 유발시키는 모든 고장 및 고장간의 인과관계를 기능 품목의 고장유형(Failure Mode) 수준에 이를 때까지 고장 발생 경로를 확인하고 트리를 구성한다. 이때 고장 트리의 최하위에 입력되는 기능 품목 고장유형은 FMECA 분석의 해당 고장유형 기준으로 작성한다.

여기서, 최하위 고장유형에 입력되는 고장률(Failure Rate)은 고장유형비(Failure Mode Ratio)가 고려된 값을 사용하고, 고장노출시간(Failure

Exposure Time)은 2.0 비행시간을 기준으로 사용한다.

만약, 입증하여야 하는 원하지 않는 사건(Undesired Event)이 FMECA의 특정 고장유형에 한정되었거나 몇몇 고장유형을 단순 합산하여 산출 가능한 경우에는 FTA 분석을 반드시 수행하지 않고 간단한 테이블 작성에 의한 입증방법을 적용할 수 있다.

4.3 위험도 평가기준

구성품의 위험요소 위험도 평가는 Table 6에 나타낸 바와 같이 다음의 위험요소(Hazard)의 심각도(Severity) 및 발생확률(Probability) 정의, 그리고 위험도 평가 기준(Risk Assessment Matrix)을 적용하였다.^[9]

Table 6. 구성품 위험요소 심각도 분류

Description	Category	Definition
Catastrophic	1	Loss of aircraft, or fatal injury directly or indirectly due to failure in the fuel tanks.
Critical	2	Loss or severely degraded performance or serious injury directly or indirectly due to failure in the system under analysis.
Marginal	3	Degraded performance or significant loss of safety margin directly or indirectly due to failure in the system under analysis.
Negligible	4	No degradation in performance

V. 안전성 평가 결과

5.1 안전성 설계 요약

개발된 회전익기용 연료펌프는 다음의 일반적 안전성 설계 요구사항을 모두 만족하였고, 작동 및 운용시 안전을 위한 주의/경고/주기가 있는 경우 이를 확인 가능토록 표시하였다.^[6]

- 연료펌프는 MIL-STD-1472(Para.5.13. Hazards and Safety)를 만족하도록 설계되었고, 운용시 발생 가능한 인간공학적 위험요소가 최소화 되었다.
- 연료펌프는 OSHA (Occupational Safety and Health Standards, 1910.1000. Toxic Air Contaminates)를 만족하도록 설계되었고, 제작 및 운용시 위험물질(Hazardous Material)을 사용 및 발생하지 않는다.

회전익기용 연료펌프는 항공기 및 운영자에 치명적 및 심각한 사고를 유발하는 단일고장이 없다. 이는 FMECA “고장유형, 영향 및 치명도 분석결과”를 통하여 입증되었다.^[10]

연료펌프는 Table 6에 나타난 바와 같이 개발 규격서 “안전성”부분의 안전성 목표인 UE-1 "Loss or degraded pressure provided by pump"와 UE-2 "Loss of transfer ability", UE-3 "Inadvertent fuel transfer"에 대해서 모두 만족하며, 이는 FTA 분석으로 입증되었다.^[11]

Table 6. 안전성 설계목표 평가

UE #	Undesired Events	Safety Objective (Failure Rate/FH)	Evaluation Result (Failure Rate/FH)
UE-1	Loss or degraded pressure provided by pump	1.5×10^{-4}	1.203×10^{-5}
UE-2	Loss of transfer ability	1.5×10^{-4}	8.564×10^{-5}
UE-3	Inadvertent fuel transfer	1.5×10^{-4}	8.251×10^{-5}

5.2 안전성 분석/평가 요약

연료펌프의 시스템 안전성 위험요소 분석 (SSHA) 결과 연료승압펌프 4개와 연료이송펌프 1개의 위험요소가 Table 7과 같이 평가되었다.

Table 7. 구성품 위험요소 평가 결과

Severity \ Probability	Catastrophic (1)	Critical (2)	Marginal (3)	Negligible (4)
Frequent (A)	HIGH	HIGH	HIGH	MEDIUM
Probable(B)	HIGH	HIGH	MEDIUM	LOW
Occasional(C)	HIGH	MEDIUM	LOW	LOW
Remote(D)	MEDIUM	MEDIUM	LOW	LOW
Improbable(E)	MEDIUM	LOW	LOW	LOW

아울러 비행 전/후 항상 연료펌프 기능 검사를 실시하는 것이 위험도를 추가적으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

VI. 결 론

민수 및 군용 항공기는 모두 인증을 위하여 체계 및 구성품에 대하여 안전성을 확보해야 하며, 이에 대한 안전성 평가가 요구된다. 국내 최초의 독자기술로 개발된 회전익기용 민군겸용핵심구성품의 하나인 연료펌프의 인증을 위하여 설계에 대한 안전성을 평가한 결과, 일반적 안전성 설계 요구사항을 모두 만족하였다.

참고문헌

[1] 이정훈, 황인희, 이대성, 김준태, 2008, "회전익기 연료승압펌프 설계," *한국항공우주학회 추계논문발표회*.

[2] 이정훈, 한귀선, 황인희, 이대성, 박장원, 신동우, 2008, "항공기용 연료이송펌프 기어부 설계," *한국항공우주학회 추계논문발표회*.

[3] 이정훈, 황인희, 2010, "회전익기 연료승압펌프 모터조립체 설계," *한국항공우주학회 추계논문발표회*.

[4] 88ZF1003, 2006, "연료승압펌프 상위요구도," *한국항공우주연구원*.

[5] 88ZF1004, 2006, "연료이송펌프 상위요구도," *한국항공우주연구원*.

[6] 88PR5108, 2008, "연료펌프 안전성 평가 보고서," *한국항공우주연구원*.

[7] 이정훈, 박장원, 2012, "항공인증을 위한 회전익기 연료펌프 안전성 평가 분석," *한국항공우주학회 춘계학술대회*.

[8] 88PR6816, 2007, "연료펌프 기본설계 및 해석 보고서," *한국항공우주연구원*.

[9] "Safety Design Requirement," MIL-STD-882D, Section A.4.3.3.

[10] 88PR6803, 2007, "연료펌프 FMECA 보고서 (1차)," *한국항공우주연구원*.

[11] 이정훈, 박장원, 2012, "항공인증을 위한 회전익기 연료펌프 안전성 평가 분석," *한국항공우주학회 춘계논문발표회*.