Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 8 pp. 239-245, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.8.239
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

헬기용 블래더형 축압기 조립체의 가속수명시험 설계

김대유, 허장욱*
금오공과대학교 기계시스템 공학과

Accelerated Life Test Design of Bladder Type Accumulator Assembly for Helicopter

Dae-Yu Kim, Jang-Wook Hur*
Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

요 약 최근 무기체계의 개발에서 핵심부품 • 구성품의 신뢰성 시험이 국방전력발전 업무훈령 규정에 반영되고 각 종 부품의 복잡도의 증가로 인하여서 신뢰성의 중요도가 강조되고 있고 그에 따라서 신뢰성 시험의 중요성 또한 강조되고 있다. 또한 핵심 구성품의 수명시험 비용과 기간을 단축하기 위해서는 가속수명시험 기법의 적절한 적용이 요구되어 있다. 그러므로 본 논문에서는 헬기에 장착되는 블래더형 축압기를 대상으로 한 신뢰성시험 설계 방법을 연구하고 신뢰성 시험 설계에 필요한 프로세스를 제시 하였다. 축압기의 신뢰성 시험을 설계하기 위해 고장률예측, 고장모드 영향 분석, 고장나무분석 등의 기법을 이용하여 주요 고장모드와 고장 메커니즘을 조사하고 2-Stage QFD를 통하여서 각 고장모드의 우선순위 및 중요도를 체크함과 동시에 주요 스트레스 인자를 분석하여 적절한 가속 모델을 선택했다. 그리고 필요 시료 수와 신뢰도 수준 및 각각의 스트레스 조건에 따라서 무고장 시험 설계법을 참고하여 정상상태의 신뢰성시험을 설계하였고 또한 선택한 가속 모델을 사용하여 계산한 가속계수에 따라 가속 수명시험시간을 계산하였다.

Abstract The importance of reliability in the development of weapons systems and reliability tests has been emphasized recently. Therefore, this study evaluated a reliability test design method of a bladder type accumulator and proposed a process for reliability test design.
To design the reliability test of the accumulator, the main failure modes and failure mechanisms were investigated, and the main stress factors were analyzed to select the appropriate acceleration model. A steady - state reliability test was designed according to the number of samples, and the reliability level and accelerated life test time were calculated according to the acceleration factor computed using the selected acceleration model.

Keywords : Accelerated Life Test, Accumulator, Failure Mode Effect & Analysis, Fault Tree Analysis, Reliability Test, Risk Priority Number

1. 서론

군용 및 민수용 헬기는 지상장비와 달리 고장이나 파손시 인명 및 재산에 막대한 피해를 초래하기 때문에 수명시험은 매우 중요하다. 따라서 최근 군용 헬기를 포함한 무기체계의 경우 핵심 구성품은 일반적으로 수명시험을 수행하고 있으며, 이를 통해 신뢰성을 보증토록 하고 있다. 신뢰성 시험 수행을 위해서는 먼저 신뢰성 시험 설계 시 요구되는 사전 자료를 수집하여야 하며, 자료수집 대상으로는 정상시험, 고장모드 및 고장메커니즘의 종류, 신뢰성 요구조건 등이 있다[1].

또한 최근 급속한 기술의 발전은 복잡한 복합시스템의 출현을 독려하고 있으며, 이로 인해 수명시험의 중요성은 더욱 강조되고 있다. 그러나 수명시험이 많은 비용

본 논문은 2017년도 금오공과대학교 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구 결과임(2017-104-118)
*Corresponding Author : Jang-Wook Hur(Kumoh National Institute of Technology)
Tel: +82-054-478-7399 email: hhjw88@kumoh.ac.kr
Received May 16, 2018 Revised June 25, 2018
Accepted August 3, 2018 Published August 31, 2018

과 장기간이 소요되기 때문에 개발업체에서는 많은 부담을 가지고 있으며, 이로 인해 시험대상 품목 선정 등에 있어서 소극적인 자세를 취하고 있다.

핵심 구성품의 수명시험 비용과 기간을 단축하기 위해서는 가속수명시험 기법의 적절한 적용이 요구되고 있으며, 이와 관련하여 많은 연구가 수행되고 있으나[2, 3], 군용 무기체계의 경우에는 관련 규정에 신뢰성 시험 중 수명시험 항목에 가속수명시험이 배제되어 있는 등 제반 여건이 미흡한 실정이다[4].

따라서 본 연구에서는 헬기용 핵심 구성품으로 블래더형 축압기를 대상으로 신뢰성 시험 수행을 위한 파라미터를 산출하기 위한 고장률 예측, FTA 및 FMEA를 통하여 주요 고장모드와 고장 메커니즘을 조사하였으며, 2-Stage QFD를 통하여 주요 스트레스 인자를 도출하여 가속모델에 따른 가속수명시험을 설계하였고, 이를 통하여 신뢰성 시험 추진방법을 제시하였다. 그리고 가속 조건과 신뢰수준에 따른 시험시간을 계산함으로써 시험시간에 영향이 큰 파라미터들을 산출하였다.

2. 블래더형 축압기의 고장 메커니즘

2.1 블래더형 축압기의 기능과 형상

헬기에 장착되는 축압기는 유압시스템의 충격과 진동을 흡수하고, 유압유의 온도 변화에 따른 부피변화를 제어하며, 유압펌프 고장시 저장된 오일을 공급하여 일정한 유량을 유지하는 등의 기능을 수행하는 헬기의 핵심 구성품 중 하나이다.

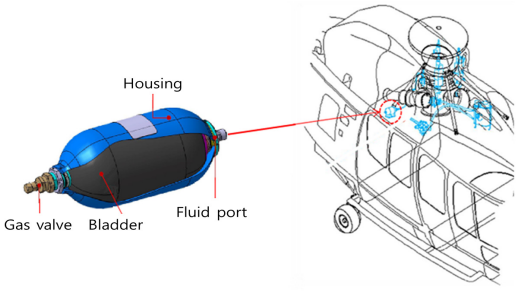

Fig. 1. Accumulator components and installation locations

2.2 고장률 예측

축압기 중 비교적 소형으로 효율이 높은 블래더형 축압기의 경우 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 블래더, 하우징, 가스밸브 및 유압포트로 크게 구분할 수 있으며, 기체(질소)와 유압 사이가 완전히 분리된 형태로 되어 있다. 축압기의 재질은 고무(HNBR)를 사용하는 블래더를 제외하고, 모든 부품은 스테인레스 강을 적용하고 있으며, 블래더형 축압기 운용간 유압은 0.98~14MPa, 질소는 3.5MPa이다.

고장률은 임의의 시간 구간 내에서 실제 동작중인 부품의 모집단에 대한 고장 횟수의 비율로 정의하며, 이는 실제로 장비가 운용을 시작한 후 고장이 일어날 수 있는 시점을 의미한다.

고장률 Z(t)는 고장 분포에 따라 여러 가지 형태로 표현될 수 있으나, 일반적으로 고장률이 지수분포를 갖는다고 가정하면 $Z(t) = \lambda$로 나타낼 수 있다.

이 때, 신뢰도의 척도는 고장률의 역수로서 MTBF로 정의할 수 있으며, ARW(Airborne Rotary Wing) 환경조건과 38℃ 온도조건을 대상으로 Relex 2011을 사용하여 분석하였다. 축압기 조립체에 대한 고장률 및 MTBF는 분석결과 각각 21.9192와 45,622H가 계산되었으며, 고장률 예측 상위 5개 부품을 Table 1에 나타내었다. 표로부터 블래더가 가장 높은 고장률을 나타내었고, 유니온, 유체포트, 포핏이 동일한 고장률로 예측되었으며, 이러한 결과는 FTA의 Critical Path에서 주요 고장모드를 나타내는 부품과의 비교를 통해 수명시험 항목 선정의 기준자료로 사용하였다.

Table 1. Top five parts of accumulator prediction failure rate

Name	Failure Rate	MTBF(H)
Bladder	10.76728	92,874
Union	1.42986	699,369
Poppet	1.42986	2,000,000
Plate	1.42986	2,000,000
Valve	0.61280	2,000,000

2.3 고장모드 및 영향 분석(FMEA)

FMEA(Failure Mode Effect & Analysis)는 체계 또는 체계의 하위 수준에서 잠재적인 고장유형을 검토하고, 체계의 성능에 미치는 고장의 영향을 평가하는 기법으로 귀납적 논리 과정을 사용한다.

Table 2. FMEA Results of RPN failure modes

RPN rank	Failure mode	Failure parts	Failure effects	RPN
1	Broken	Bladder	The function of preventing internal leakage of nitrogen gas in the accumulator is lost.	70
2	Broken	Housing	The function to store hydraulic oil in the accumulator is lost.	42
3	Broken	Fluid port	The function to store hydraulic oil in the accumulator is lost.	42
4	Leaking	Bladder	The function of preventing internal leakage of nitrogen gas in the accumulator is lost.	40
5	Seized	Bladder	The function of preventing internal leakage of nitrogen gas in the accumulator is lost.	40

이 접근법은 체계의 최하위 수준에서 시작하여 체계 성능에 미치는 최종 영향을 결정하기 위해 상위 수준으로 올라가면서 “bottom up” 방식으로 분석하며, 체계 설계가 완료된 이후보다는 체계 설계의 초기에 적용하는 것이 효과적이다.

FMEA를 통해 계산되는 RPN(Risk Priority Number)은 잠재 고장모드에 대한 기대위험의 예측치이며, 심각도, 발생도 및 검출도의 곱으로 나타낼 수 있다.

블래더형 축압기의 FMEA에서 RPN이 가장 높게 나타난 상위 5개 고장모드에 대한 결과를 Table 2에 나타내었으며, 고장모드 중 블래더 파손이 가장 높은 RPN을 갖는 것으로 식별되었다[5, 6].

2.4 고장트리 분석(FTA)

FTA(Fault Tree Analysis)는 바람직하지 못한 하나의 특정 사건을 정의하고 사건을 일으킬 수 있는 모든 가능한 고장을 결정하는 기법이며, 구체적으로 치명적인 상위 사건을 유발할 수 있는 고장을 식별하는데 초점을 두고 있다.

블래더형 축압기의 FTA 수행은 FMEA상에서 가장 높은 RPN을 갖는 고장모드인 블래더 부서짐의 고장영향을 정상사상으로 Fig. 2와 같이 나타내었다.

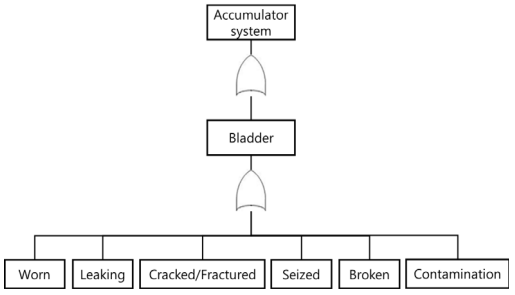

Fig. 2. FTA of Top-level RPN

3. 가속모델 및 가속수명시험 설계

3.1 주요 스트레스 선정

FMEA 및 FTA 수행결과 도출된 고장모드 중 축압기의 성능에 영향을 미치는 스트레스 인자를 식별하기 위하여 QFD(Quality Function Deployment)를 수행하였다. QFD 1단계에서는 Table 3과 같이 블래더, 유체포트 및 하우징에 대한 각각의 고장과 온도, 진동, 압력, 먼지 및 충격의 관계를 나타내고 있다.

표에서 RPN scale은 각각의 RPN에 대해 최대 RPN을 나타낸 70으로 나눈 값으로, 잠재 고장모드의 기대위험 예측치가 상대적으로 어느 정도를 나타내는지를 표시하고 있다. 또한 Score는 고장모드별 고장발생시 상대적인 영향성 (◉ 9점, ○ 3점, △ 1점)을 계산한 것이며, RPN score는 RPN scale과 Score의 곱을 나타내고, 부품의 고장원인이 어떤 잠재 고장모드로 나타나는지를 수치로 표시한 것이다.

2단계에서는 효과적인 시험방법을 결정하는 매트릭스로써 1단계에서 우선적으로 개선해야 할 부품의 고장모드/메커니즘을 확인하였다. 표에서 시험점수(Test score)는 Table 4에서 산출한 RPN score와 고장모드별 고장발생시 상대적인 영향성(◉ 9점, ○ 3점, △ 1점)을 곱한 것이며, 시험순위(Test rank)는 시험설계의 고려사항을 반영하여 효과적인 시험방법을 결정토록 우선순위를 표시하고 있다[5, 6].

주요 스트레스 인자 도출 결과 고온이 가장 큰 영향을 미치는 인자로 식별되었고, 이와 관련된 주 고장모드 및 메커니즘은 온도에 의한 블래더의 부서짐이며, 고장영향은 블래더형 축압기의 질소가스 내부 누설 방지기능의 상실이다[7, 8].

Table 3. Results of Accumulator 2Stage QFD Level 1

Failure site	Bladder						Fluid port	Housing		
Failure mode / Failure cause	Broken	Leaking	Seized	Worn	Contamin-ation	Cracked/ Fractured	Broken	Broken	Cracked/ Fractured	Aged/ Deteriorated
RPN	70	40	40	40	40	40	42	42	24	24
RPN scale	1.0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3	0.3
Temperature	◉	○	○	○		○				
Vibration	○	○		○		○	△	○	○	
High pressure	○	△				△	△	△	△	
Dust					○					○
Mechanical shock	○	○	○	△		○	○	○	○	
Score	18	10	6	7	3	10	5	7	7	3
RPN score	18.0	5.7	3.4	4.0	1.7	5.7	3.0	4.2	2.4	1.0

Table 4. Results of Accumulator 2Stage QFD Level 2

Failure mechanism / Test Items			Gas leakage	Discharge flow rate	Pressure resistance	Vibration	High temperature
Parts	Failure mode	RPN Score					
Bladder	Broken	18.0	○		○		◉
	Leaking	5.7	△				○
	Seized	3.4	△				○
	Worn	4.0	△		○		○
	Contamination	1.7				○	
	Cracked/Fractured	5.7					○
Fluid port	Broken	3.0			△	△	
Housing	Broken	4.2		○	△	○	
	Cracked/Fractured	2.4		○		○	
	Aged/Deteriorated	1.0		○			
Test score			67.1	22.9	73.2	27.9	218.6
Test rank			3	5	2	4	1

3.2 가속모델

가속수명시험은 사용조건보다 가혹한 환경(온도, 습도, 진동, 전압 등) 수준에서 시험하여 고장을 가속시키는 시험으로 가속조건에서 관측된 데이터로부터 수명과 스트레스의 관계식을 추정하게 된다. 가속수명시험 모형은 수명분포와 수명-스트레스 관계로 이루어져 있고, 수명분포는 지수분포, 와이블분포 및 대수정규 분포 등이 있으며, 수명-스트레스 관계는 아레니우스, 역거듭제곱 및 아이링 방식으로 분석이 가능하다.

FMEA, FTA 및 QFD를 통해 블래더형 축압기는 블래더의 고온 열화가 취약한 것으로 식별되었기 때문에 가속인자로는 온도가 가장 적합하다. 일반적으로는 온도를 파라미터로 하는 수명-스트레스 관계는 식 (1)에 나타낸 바와 같이 아레니우스 모델이 주로 사용되고 있다[9].

$$L = A\exp(\frac{E_a}{kT}) \quad (1)$$

여기서, L은 수명, T는 절대온도, k는 볼츠만 상수, E_a는 활성화 에너지, A는 제품의 구조 및 시험방법에 따른 상수이다.

식 (1)에 대해 정상상태의 절대온도(T_s)와 가속상태에서의 절대온도(T_a)를 반영하여 정리하면 식 (2)와 같

이 표현할 수 있으며, 블래더 열화 고장메커니즘의 활성화에너지, 형상모수 및 볼츠만 상수는 Table 5와 같다[10 - 12].

$$A_f = \exp[\frac{E_a}{k} \bullet (\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_a})] \quad (2)$$

Table 5. Characteristic value of deterioration failure mechanism

Activation energy	Shape parameter	Boltzmann constant
0.06745 eV	5.2463	8.6173×10^{-5} eV/K

3.3 MTBF 보증시험

시험기간의 단축을 위하여 무 고장 합격기준을 사용하는 것은 허용 고장수를 "0"로 채택한다는 것을 의미하고 있으며, 짧은 시험기간을 사용하는 대신 완벽한 신뢰성을 보증한다는 의미로 해석된다.

무 고장 시험방식은 요구수명을 주어진 신뢰수준으로 보장하는 시험방식들 중에서 적용이 비교적 수월하며, 상대적으로 시험시간이나 시료 수가 단축된다는 장점을 갖는다.

수명을 보증하기 위한 무 고장 합격기준을 적용하는 시험에서는 규정된 사용수명과 신뢰수준을 만족하는 시료 수 n과 무 고장 시험시간 T를 결정하게 된다.

동일한 신뢰수준으로 백분위수명을 보증하는 무 고장 시험방식에는 다양한 (n, T) 조합이 존재하며, 와이블 분포에서 형상모수와 신뢰수준, 합격판정계수 및 샘플수가 정해질 때에 식 (3)과 같이 카이제곱 분포표를 통하여 보증하고자 하는 시험시간(t)을 도출할 수 있다[13, 14].

$$t \geq [\frac{\chi^2_{1-\alpha,\,2(k+1)}}{2 \bullet n \bullet \ln(\alpha)^{-1}}]^{\frac{1}{\beta}} \times MTBF \quad (3)$$

여기서, α는 신뢰수준, k는 합격판정계수, β는 형상모수, n은 시료의 수, MTBF는 신뢰도 예측값을 의미한다.

시료 수가 각각 1개, 2개 및 3개일 때의 신뢰수준과 시험시간을 Table 6에 나타내고 있으며, 동일한 시료 수를 대상으로 신뢰수준을 향상하거나 동일한 신뢰수준을 대상으로 시료 수를 축소하려면 시험시간의 연장이 필요함을 알 수 있다.

즉, 시료 수가 1개일 때 신뢰수준 90%는 신뢰수준 60%에 비해 2,899H(약 16%)의 시험시간이 추가로 필요하고, 신뢰수준이 90%일 때 시료 수 1개는 시료 수 3개에 비해 3,401H(약 19%)의 시험시간이 추가로 필요함을 제시하고 있다. 그리고 시료수가 최소인 1개이고 신뢰수준이 60%의 경우 시험시간은 15,103H를 표시하고 있다.

Table 6. Test time according to the number of reliability test samples and confidence level

Number of samples	Confidence level	$t \geq [\frac{\chi^2_{1-\alpha,\,2(k+1)}}{2 \bullet n \bullet \ln(\alpha)^{-1}}]^{\frac{1}{\beta}}$	Test time(H)
1	0.6	4.190	41903
	0.7	5.021	50211
	0.8	6.086	60856
	0.9	7.715	77150
2	0.6	2.648	26475
	0.7	3.172	31724
	0.8	3.845	38450
	0.9	4.874	48745
3	0.6	2.024	20239
	0.7	2.425	24252
	0.8	2.939	29393
	0.9	3.726	37263

3.4 가속수명시험 설계

블래더형 축압기가 정상상태일 때의 온도는 38℃이고 최대 압력은 14MPa이며, 이때 온도만을 변화시켰을 때 식 (2)에 의한 가속계수를 Table 7과 Fig. 3에 나타내었다. 표와 그림으로부터 가속계수는 온도 증가에 따라 증대함을 알 수 있다.

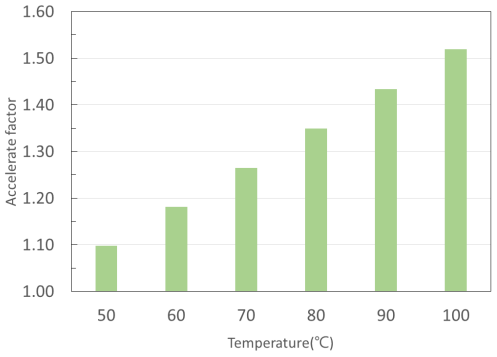

Fig. 3. Acceleration factor according to temperature change

Table 7. Accelerate factor according to temperature change

Temperature	50℃	60℃	70℃	80℃	90℃	100℃
Accelerate factor	1.09	1.18	1.26	1.34	1.43	1.51

신뢰수준과 시료 수 및 온도변화에 따른 가속인자를 고려하여 가속수명시험 시간을 Fig. 4. (a),(b)와 같이 나타내었다.

따라서, MTBF 보증시험을 가속수명시험으로 수행시에는 시료수가 최소인 1개이고, 최소 신뢰수준이 60%일 때, 시험온도가 100℃에서 최소 9,940H의 시험시간이 필요함을 알 수 있다.

3. 결론

헬기용 블래더형 축압기의 가속수명시험 설계를 위해 고장률 예측, FMEA, FTA를 수행하였으며, 이를 통하여 블래더형 축압기의 고장모드 및 메커니즘을 분석하여 가속인자 및 가속수명시험을 설계하였다.

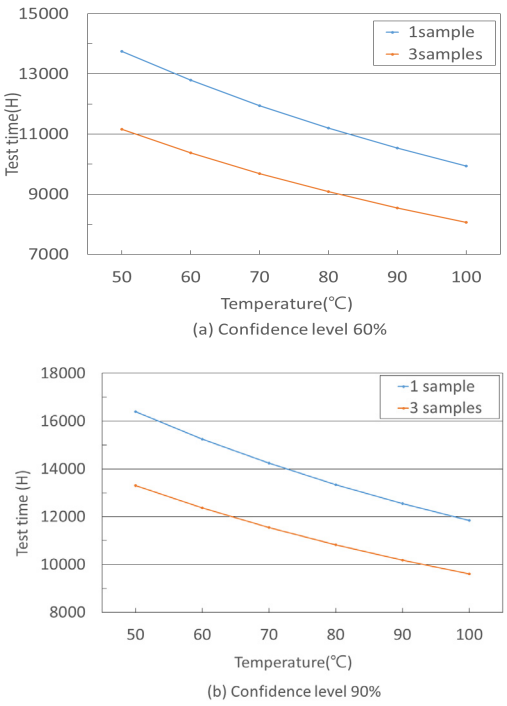

Fig. 4. Change of test time with increasing temperature

얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 블래더형 축압기의 가장 치명 품목은 블래더이며, 온도에 매우 민감함을 알 수 있다.
2) MTBF 보증시험의 경우 최소한의 시료 수량으로 신뢰수준 60%로 시험시 15,103H의 시험시간이 도출되었다.
3) 가속수명시험의 경우 최소한의 시료 수량으로 신뢰수준 60% 및 시험온도 100℃로 시험시 11,156H의 시험시간이 요구된다.

References

[1] Reliability in automotive and mechanical engineering, Bertsche, Bernd, pp.183-185, 2016.

[2] K. H. Lee, W. Y. Yun, “Accelerated Life Test Design for Vacuum Cleaner Motors”, *Journal of Applied Reliability*, Vol.9, No.1, pp.47-58, 2009.

[3] H. Eom, S. Wei, H. Kim, H. Lee, “A Study on Accelerated Life Test Method of Blower Motor”, *Proceedings of KSAE Annual Spring Conference*, pp.1619-1624, 2011.

[4] Department of Defense, Defense Force Development

Business instruction, pp.62-63, 2018.

[5] M. Seo, Y. Yoo, H. Lee, Y. Cho, “Oil hydraulic system diaphragm type accumulator for construction machinery”, *Proceedings of KSAE Annual Spring Conference*, pp.1041-1044, 2016.

[6] S. J. Lee, Y. K. Kim, C. H. Lee, H. W. Im, “How to determine reliability test items first through FMEA and QFD”, *Proceedings of the Korea Reliability Society Conference*, pp.74-81, 2016.

[7] M. S. Chang, D. C. Baek, J. H. Lee, J. W. Park, B. O. Choi, C. H. Ahn, “Reliability Analysis of Rubber Parts Using Accelerated Degradation Test”, *Proceedings of KSME Annual Spring Conference*, pp.13-13, 2017.

[8] Agency for Technology and standards, “Oil Hydraulic System-Bladder Type Accumulator”, pp.5-9, 2003.

[9] G. S. Yu, N. R. Lee, Y. H. Yeo, B. C. Lee, “Accelerated Life Prediction of the Rubber for Combat Boots”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.16, No.12, pp.8637-8642, 2015. DOI: https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8637

[10] G. C. Lee, Y. B. Lee, B. O. Choi, K. S. Lee, J. S. Choi, “A study of improving the life characteristic for hydraulic hose assembly”, *Proceedings of KSME Annual Spring Conference*, pp.526-529, 2014.

[11] C. S. Woo, H. S. Park, D. H. Joe, Y. S. Jeon, J. Y. Kim, “Useful Lifetime Prediction of Rubber Material by Using Accelerated Test”, *Proceedings of KSME Annual Spring Conference*, pp.264-265, 2010.

[12] J. Park, S. Lee, H. Jang, G. S. Kim, J. Yang, “Prediction of Characteristics Life of the Rubber Gasket”, *Journal of Applied Reliability*, Vol.10, No.4, pp.213-235, 2010. UCI: http://uci.or.kr/G704-SER000010073.2010.10.4.003

[13] A. Kleyner, J. Boyle, Demonstrating Product Reliability Theory and Application, pp.1-5, 2002.

[14] I. Y. Yang, J. G. Kang, S. W. Yu, G. T. Oh, Y. G. Na, “Development of Accelerated Life Test Method for Constant Electrical Potential Electrolysis Gas Sensor”, *Journal of Applied Reliability*, Vol.16, No.3, pp.180-191, 2016.
UCI: http://uci.or.kr/G704-SER000010073.2016.16.3.005

김 대 유(Dae-Yu Kim) **[정회원]**

- 2017년 2월 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 (공학학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 대학원

<관심분야>
신뢰성공학

허 장 욱(Jang-Wook Hur) **[정회원]**

- 1989년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1995년 9월 : 일본 동경공대(TIT) 기계우주공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 2012년 8월 : 국방부(육군 대령)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>
무기체계, 신뢰성 공학, 시스템 엔지니어링