

유압펌프 신뢰성 평가 방법 Reliability Evaluation Method for Hydraulic Pump

정동수 · 김도식
D. S. Jung and D. S. Kim

1. 서 론

유압펌프는 유압시스템을 적용하고 있는 모든 기계장비에 주요부품으로 사용되고 있는 만큼 완제품인 기계장비의 신뢰성을 증진시키기 위하여 높은 신뢰성이 요구되고 있다¹⁾. 신뢰성은 기계장비에서 요구하는 보증수명 동안 현장에서 고장이 발생하지 않고 유압펌프의 성능과 기능을 유지하는 것이므로 작업조건을 부여한 시험환경에서 시험평가를 통하여 검증이 된다. 용량이 가변되는 유압펌프인 경우는^{2~3)} 유량, 압력, 동력 등 한 개 이상의 제어기능들을 내장하고 있기 때문에 사용 요구조건에 따라 시험항목, 시험방법, 그리고 평가기준이 다소 다르게 개발된다.

신뢰성 평가는 현장고장 및 고장모드 분석을 통하여 고장에 영향을 미치거나 평가에 기준이 되는 시험항목들로 선정되며 크게 성능시험, 수명시험, 그리고 환경시험으로 구성된다.

본 해설에서는 시험평가 기준, 무고장 시험시간, 가속수명시험 등 압력보상형 유압펌프의 신뢰성 평가에 필요한 절차와 방법들에 관하여 소개한다.

2. 신뢰성 평가 절차

2.1 시험평가 기준

시험항목 및 평가기준은 KS 규격과 ISO, JIS, SAE, NFPA, MIL등 국제규격을 참고하고 수집된 현장고장으로부터 고장분석을 통하여 개발된다. 품질기능전개(QFD), 고장나무분석(FTA), 고장모드 및 효과분석(FMEA), 고장 물리분석 등을 이용하여 품목의 주요 고장모드와 스트레스 인자를 찾는다. 유압펌프의 주요 고장모드는 효율저하, 누설, 소음, 진동, 고착 등으로 나타나고 있으며 지금까지 알려진 주요 스트레스 인자는 압력, 속도, 온도, 오염물질 등이다.

시험평가 안을 작성할 때 다음과 같은 기본방침은 따른다. a) 가능한 국제성이 있는 것으로 한다. b) 신뢰성을 충분히 파악 및 해석하여 가능한 시험방법 및 안정성을 확보할 수 있는 요구 성능으로 한다. c) 국가기준으로의 이행을 전제로 하므로 기술적 수준이 높은 것으로 한다. d) 필요성이 높은 것으로부터 취급한다.

표 1 압력보상형 유압펌프의 시험항목

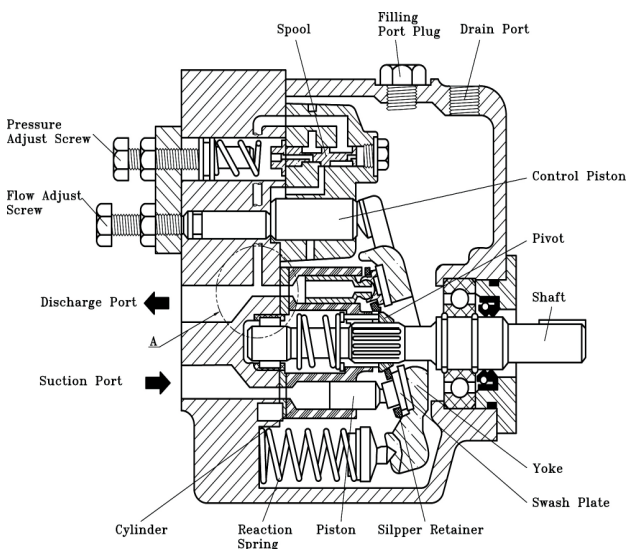


그림 1 압력보상형 유압펌프의 내부구조

No	시험 항목	시 험 규 격					
		KS	JIS	SAE	NFPA	ISO	MIL
1	배제용적 시험	○	○	×	×	△	×
2	유량-압력 특성 시험	○	○	×	×	○	○
3	캐비테이션 시험	○	○	○	×	○	×
4	효율 시험	○	○	○	×	○	×
5	부하 동특성 시험	×	×	×	○	×	△
6	맥동 시험	×	×	×	○	×	○
7	소음 시험	×	○	×	×	×	○
8	가진 시험	○	×	○	×	×	○
9	저온 시험	×	×	×	×	×	○
10	고온 시험	×	×	×	×	×	○
11	습도 시험	○	×	×	×	×	○
12	수명 시험	×	×	×	△	×	×

○ : 직접관련규격, △ : 간접관련규격, × : 관련규격 없음

표 1은 성능시험 7개, 환경시험 4개, 수명시험 1개로 구성된 압력보상형 유압펌프에 대한 신뢰성 시험항목들과 국제규격들과의 관련성을 보여주고 있다. 시험결과와 유효성을 유지하기 위해서 시험장비의 사양은 최소한 제품사양의 5배를 초과하지 않아야 한다. 그리고 시험장비에서 측정된 데이터는 일정한 반복성을 유지하여야 한다.

표 2 성능시험 평가기준

시험 항목	평가 기준
배제용적 시험	토출유량은 이론 토출유량의 98 % 이상이어야 한다.
유량-압력 특성 시험	정격압력까지 토출유량은 이론토출유량의 95 % 이상이어야 하며 최대 압력에서 유량은 정격 토출유량의 10 % 이하이어야 한다.
케비테이션 시험	흡입압력은 0.075 MPa(절대압력) 이상 이어야하며 진동 및 소음이 없어야 한다.
효율 시험	최대 효율영역에서 용적효율 95 % 이상, 기계효율 90 % 이상, 전효율 85 % 이상이어야 한다.
부하 동특성 시험	토출유량의 변화시간이 300 ms 이내 이어야 한다.
맥동 시험	맥동폭은 설정압력의 ±7 % 이내이어야 한다.
소음 시험	80 dB(A) 이하이어야 한다.

표 3 가진시험 조건

주파수 범위 Hz	주기 min	가속도 m/s^2	진폭 mm	시험 시간회	가진 방향
1~150	1	50	15 (최대)	10	3축

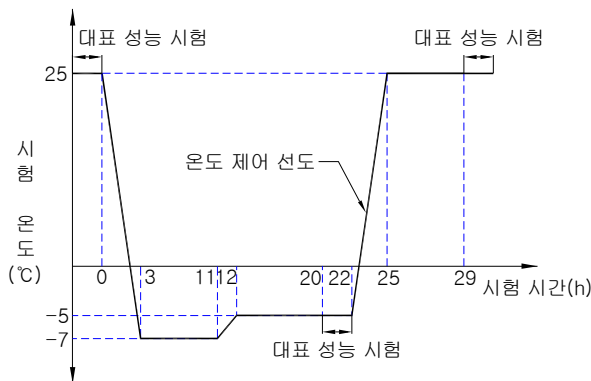


그림 2 저온시험 주기 및 절차

표 2는 각 성능시험 항목에 대한 평가기준을 보여주고 있으며 표 3은 가진 시험의 시험조건을 보여주고 있다. 그리고 그림 2~4는 고온, 저온, 습도 시험에 대한 시험주기와 절차를 보여주고 있다.

각각의 환경시험에서는 환경조건을 부여한 후에 대표성능시험인 효율시험을 실시하게 되며 효율시험의 평가기준을 만족하여야 한다.

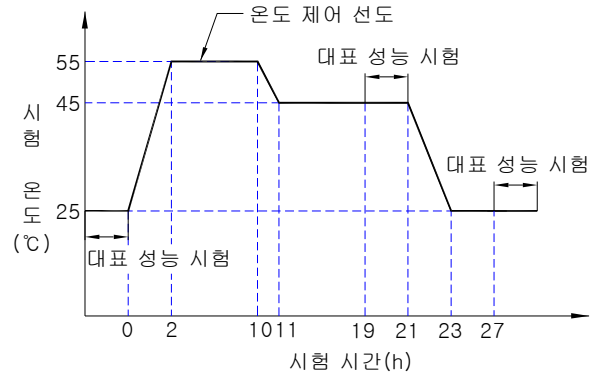


그림 3 고온시험 주기 및 절차

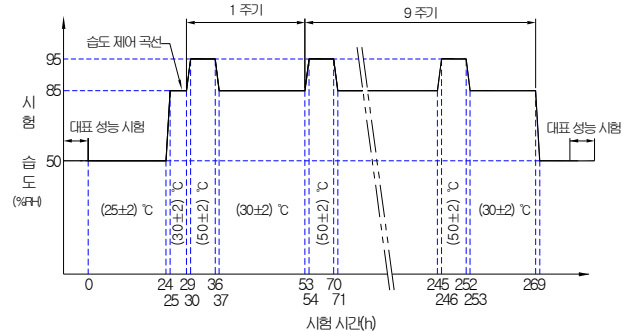


그림 4 습도시험 주기 및 절차

2.2 무고장 시험시간

공작기계에 적용되는 압력보상형 유압펌프에 보증수명 (B_{10} 수명 10,000시간)과 아래와 같은 신뢰성 조건이 주어지면 무고장 시험시간 (t_n)이 산출된다. a) 수명분포는 형상모수 (β)가 3.0인 와이블 (Weibull) 분포를 따른다⁴⁾. b) 신뢰수준은 80 %로 한다. c) 시험 시료는 10대로 한다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

$$= 10,000 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.8)}{10 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{3.0}}$$

여기서 t_n : 무고장 시험 시간,

- n : 시료수
- B_{100p} : 보증 수명
- CL : 신뢰 수준
- p : 불신뢰도
- β : 형상 모수

압력보상형 유압펌프의 요구수명(10,000시간)을 보증하기 위해서는 식(1)에 의하여 산출된 11,500시간 동안 10대 모두 고장이 없어야 한다.

2.3 가속 시험

제품의 개발주기가 점점 단축되는 시대적 상황에 대응하고 글로벌 시장에서 제품의 경쟁력을 확보하기 위하여 기업들은 단기간에 높은 신뢰도를 갖춘 제품을 개발하는데 노력하고 있다. 수명시험 혹은 내구시험은 사용조건에서 제품의 신뢰도를 평가하는 하나의 시험기술로 사용되지만 많은 시간과 비용이 필요하다. 가속시험은 제품의 신뢰도가 증가할수록 늘어나는 시험시간 문제를 해결하기 위해 인위적으로 제품의 수명을 단축시키는 시험방식이다⁵⁾. 그림 5와 같이 사용조건보다 가혹한 조건에서 짧은 시간에 제품의 고장을 발생시켜 얻은 수명데이터를 가지고 신뢰성을 평가한다.

앞서 언급된 바와 같이 그림 5의 두 조건에서 각각 고장이 발생되며 다음과 같은 식이 성립한다.

$$P_u^\lambda L_u = P_t^\lambda L_t = C \quad (2)$$

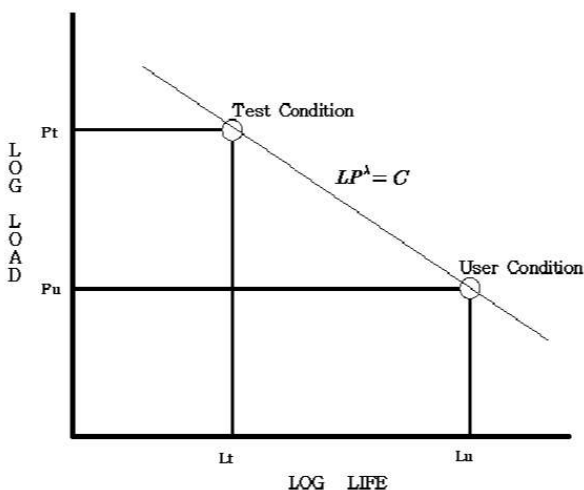


그림 5 부하-수명 곡선

현장 운영조건으로부터 그림 6과 같은 변동부하와 사용시간을 조사한 후 Palmgren-Miner's Rule

을 이용하여 그림 7과 같이 한 개의 등가부하와 한 개의 시험시간으로 표현되는 등가 손상효과를 계산한다.

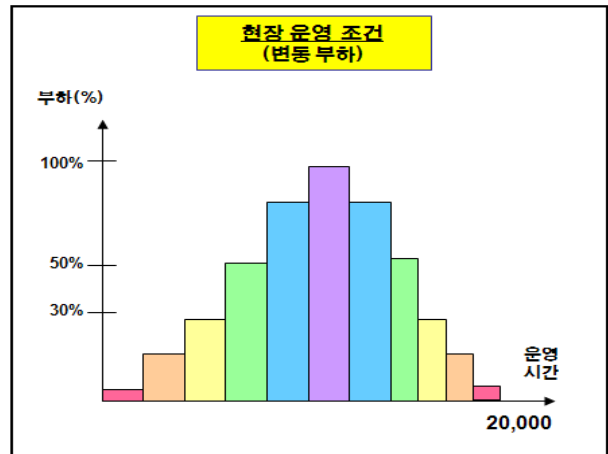


그림 6 현장 운영조건

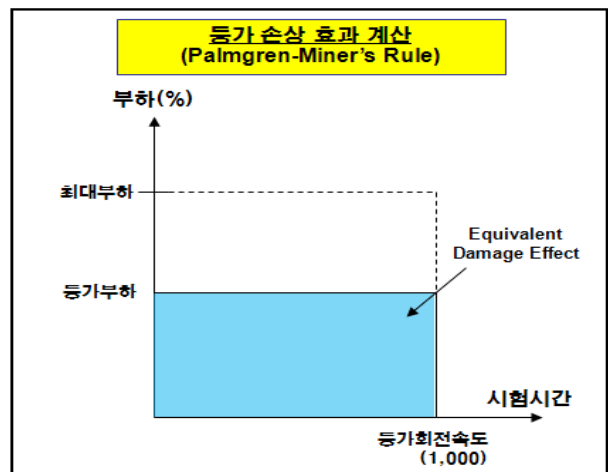


그림 7 등가 손상효과 계산

식(3)의 변동부하와 사용시간에 의한 전체 누적손상은 식(5)와 식(6)의 압력과 속도의 등가손상효과와 동일함을 의미하고 있다.

$$P_1^\lambda L_1 + P_2^\lambda L_2 + P_3^\lambda L_3 + \dots + P_k^\lambda L_k = D \quad (3)$$

$$P_e^\lambda (L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_k) = D \quad (4)$$

$$P_e = \left(\frac{P_1^\lambda L_1 + P_2^\lambda L_2 + P_3^\lambda L_3 + \dots + P_k^\lambda L_k}{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_k} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (5)$$

$$n_e = \frac{P_1^\lambda n_1 t_1 + P_2^\lambda n_2 t_2 + P_3^\lambda n_3 t_3 + \dots + P_k^\lambda n_k t_k}{P_e^\lambda T} \quad (6)$$

여기서 $L=nt$. (L : 사이클, n : 회전수, t : 시간)

시험조건과 평균사용조건을 고려하여 동작기계에 사용되는 유압펌프의 가속계수(AF)를 결정한다. 유압펌프의 고장부품은 주로 회전체이며 피로에 기인하므로 식(7)의 지수인 m은 8로 널리 알려져 있다⁶⁾. 무고장 가속시험시간은 식(7)로부터 산출된 가속계수(약 11)와 무고장 시험시간(약 11,500)으로부터 약 1,000시간 정도가 된다.

$$AF = \left(\frac{P_{test}}{P_e} \right)^m \times \left(\frac{\omega_{test}}{\omega_e} \right) \quad (7)$$

$$= \left(\frac{21}{16} \right)^8 \times \left(\frac{2200}{1800} \right)$$

여기서 P_{test} : 시험압력 (MPa)
 P_e : 누적등가 사용압력 (MPa)
 ω_{test} : 시험속도 (rpm)
 ω_e : 누적등가 사용속도 (rpm)

시험시료 10대를 그림 8과 같은 수명 사이클로 1,000시간 가속시험을 실시하여 10개 모두 고장이 없으면 신뢰 수준 80%에서 B_{10} 보증수명 10,000시간을 보장한다.

성능열하의 추세를 확인하기 위해서 수명시험 0%, 수명시험 50%, 수명시험 100%에서 각각 효율 시험을 실시한다.

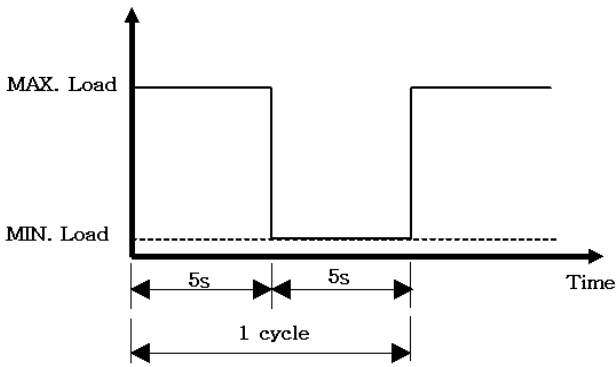


그림 8 수명시험 사이클 (2,200rpm)

3. 시험장비 구성

3.1 시험장비 설치방법

a) 축심의 엇갈림이 있어서는 안 된다. 설치 시에는 축에 무리한 힘이 가해지지 않도록 축이음 각 부분 진동의 허용치 내로 고정시킨다.

b) 축 하중 및 수직 하중은 펌프 제조업자가 지정하는 수치 이하로 한다.

c) 모든 구동축 및 축이음은 손가락이 들어가지 않도록 위험 방지용 보호덮개를 해야 한다.

d) 유량은 시험펌프에서 사용 파이프 직경의 5배에 해당하는 거리에서 측정한다

e) 사용되는 파이프들은 직선으로 배관하고, 일정한 직경의 파이프이어야 한다.

f) 사용되는 파이프나 피팅은 흡입 및 토출 포트 직경과 일치하여야 한다.

g) 가능한 한 수평배관을 원칙으로 한다.

h) 온도센서는 사용 파이프의 중심부에 위치시키고, 상부 방향으로 설치한다.

i) 측정 허용차 : 측정허용차는 다음에 따른다.

- 압력 : $\pm 1.0\%$ F.S 이내
- 온도 : ± 1.0 °C 이내
- 유량 : $\pm 2.0\%$ F.S 이내
- 입력속도 : ± 2 rpm 이내
- 입력토크 : 1.0% F.S 이내

3.2 시험장비 운용조건

주변 환경 조건을 달리 규정하지 않으면, 모든 시험은 다음의 환경조건 하에서 실시된다.

- 주변온도 : (23 ± 10) °C
- 상대습도 : (50 ± 30) %
- 작동유체 온도 : (55 ± 5) °C

작동유체는 ISO VG32 또는 ISO VG46 상당하여야 하며 작동유 청정도는 100 mL단위당 입자수로 NAS (8~9)등급 이어야한다.

3.3 성능 시험장비

성능 시험장비 구성은 유압펌프에 동력을 공급하는 가변형 전기모터, 전달토크를 측정하는 토크센서



그림 9 성능 시험장비



그림 10 수명 시험장비

및 속도센서, 흡입부의 압력과 온도를 측정할 수 있는 압력센서 및 온도센서, 토출부의 압력과 온도를 측정할 수 있는 압력센서와 온도센서로 구성되어지며, 펌프에 일정부하를 인가할 수 있는 릴리프밸브와 유량을 측정할 수 있는 유량센서로 구성된다.

3.4 수명 시험장비

수명 시험장비는 성능시험 후 고장이 없을 때 10대를 동시에 내구성을 시험할 수 있는 장비로서 10대의 유압펌프를 각각 설치하는 각각의 지그, 유압동력을 공급하고 통제하는 동력제어시스템, 그리고 시험시스템을 제어하고 시험데이터를 디스플레이 및 취득하는 계측장비시스템으로 구성된다.

표 4 수명시험 전·중·후 효율시험(%) 결과

구분	시료 1	시료 2	시료 3	시료 4	시료 5	시료 6	시료 7	시료 8	시료 9	시료 10	
수명전	용적효율	97.4	98.6	98.1	97.6	97.9	98.5	98.7	97.3	98.2	97.1
	기계효율	91.5	91.9	91.3	92.4	92.1	92.2	91.6	91.1	90.9	91.3
	전효율	89.1	90.6	89.6	90.2	90.2	90.8	90.4	88.6	89.3	88.7
수명중	용적효율	97.1	97.9	98.0	97.2	97.1	97.6	98.1	96.8	97.5	96.4
	기계효율	91.1	91.2	90.5	91.4	91.3	91.1	90.5	90.8	90.5	90.6
	전효율	88.5	89.3	88.7	88.8	88.7	88.9	88.8	87.9	88.2	87.3
수명후	용적효율	96.9	97.5	97.6	96.5	96.2	97.3	97.6	96.2	97.1	96.1
	기계효율	90.6	90.4	90.2	90.6	90.8	90.8	90.3	90.4	90.2	90.3
	전효율	87.8	88.1	88.0	87.4	87.3	88.3	88.1	87.0	87.6	86.8

본 시험장비는 오랜 시간 시험이 수행되기 때문에 정밀계측장비의 파손이 우려되어 압력게이지만을 탑재하고 있다. 압력게이지가 피시험체에 각각 탑재되어있어 수명시험 중에 특정 유압펌프의 고장을 해당 압력게이지의 압력변화를 통하여 감지할 수 있다.

성능열하의 추세를 확인하기 위해서 수명시험 0%, 수명시험 50%, 수명시험 100%에서 효율시험을 실시하여 표 4와 같은 결과를 얻었다. 시료 10개 모두 비슷한 결과가 도출되었으며 다소 열하현상은 있었지만 모두 평가기준을 만족하였다.

4. 결 론

KS 규격과 국제적으로도 권위가 있는 ISO, JIS, MIL, ANSI, SAE 등 국제 규격과 선진 외국 규격을 참고하여 고장분석을 통하여 성능시험, 환경시험, 수명시험에 대한 시험항목 및 평가기준을 정립하였다.

신뢰성 기법에 의하여 유압펌프의 수명을 보증하기 위한 무고장 시험시간을 산출하였으며 동작기계에 적용되는 압력보상형 유압펌프에서 가속시험 기법을 적용하여 시험시간을 1,000시간으로 단축시켰다.

수명시험은 열하현상을 확인하기 위해서 수명시험 0%, 50%, 100% 에서 대표 성능시험인 효율시험을 실시하였다. 수명시험 전·후 성능저하도 거의 없어 신뢰수준 80%로 B_{10} 수명 10,000시간 보장을 확인하였다.

신뢰성 평가기술은 제품의 고장원인을 규명하고 개선내용을 보완설계에 반영함으로써 제품의 신뢰성을 향상시킨다. 더 나아가 시장경쟁력을 강화하여 수입대체 및 수출증대의 기반을 확보하며 유사 분야의 제품개발에도 폭넓게 응용되는 등 기술적인 파급효과가 매우 클 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) J. W. Evans and J. Y. Evans, "Product Integrity and Reliability In Design", 2001.
- 2) S. D. Kim, H. S. Cho and C. O. Lee, "Stability Analysis of a Load Sensing Hydraulic System", Proc Instn Mech Engrs, Vol. 202, No. A2, pp. 79~88, 1988.

- 3) A. YAMAGUCHI and T. ISHIKAWA, "Characteristics of Displacement Control Mechanisms in Axial Piston Pumps", Bulletin of the JSME, Vol. 22, No. 165, pp. 356~361, 1979.
- 4) W. Nelson, "Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures", Journal of Quality Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 140~146, 1985.
- 5) G. K. Hobbs, "Accelerated Reliability Engineering HALT and HASS", John Wiley & Sons Ltd., 2000.
- 6) W. Nelson, "Accelerated Testing; Statistical models, test plans, and data analysis", Wiley, 1990.

[저자 소개]

정동수(책임저자)



E-mail : jds667@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7154

1962년 6월 14일생.

2007년 충남대학교 기계설계공학과 박사.
1990년 한국기계연구원 입사, 시스템신뢰성 연구실에서 유압기기 연구개발 및 기계류 부품 신뢰성평가 수행. 유공압시스템학회, 대한기계학회등의 회원.

김도식



E-mail : dohsik@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7153

1967년 5월 5일생.

2007년 충남대학교 기계설계공학과 박사과정 수료. 1992년 한국기계연구원 입사. 시스템신뢰성연구실에서 변속기 설계기술 및 관련 신뢰성평가기술 연구.

대한기계학회, 유공압시스템학회 정회원