

# 유압모터 길들이기 자동시험 제어기 개발

## Development of the Auto-Aging Test Controller for a Hydraulic Motor

정규홍<sup>1\*</sup> · 신대영<sup>2</sup> · 서동진<sup>3</sup>

Gyu Hong Jung, Dae Young Shin and Dong Jin Seo

Received: 05 Oct. 2015, Accepted: 09 Nov. 2015

**Key Words** : Hydraulic Motor(유압모터), Electro-Proportional Pressure Reducing Valve(EPPR 밸브), Motor Aging (모터 길들이기), Hydraulic Motor Stuck(유압모터 고착)

**Abstract:** Because heavy-duty construction vehicles such as excavators are required for good engine-room cooling capacity, a hydraulic gear motor is adopted in the cooling fan drive mechanism to actively control the output speed, instead of adopting the conventional ON/OFF type belt drive. While gear motors are normally limited to 140bars of operating pressure, those for the cooling fan are capable of operating at continuous pressures of up to 220bars. After assembly, all gear motors for high pressure must pass an aging test which is a kind of the wearing process between the gear teeth and motor housing. During the aging process with gradual pressure increments, gear sticking sometimes occurs due to abnormal wear, resulting in defects. This paper focuses on a gear-sticking free aging test controller that is designed together with the knowledge of an experienced operator and the analysis results of experimental data of the gear jamming phenomenon. From the aging experiment, it is demonstrated that the developed controller that can alter the setting pressure of the load pump is effective for stabilizing the abrupt increase in the motor input pressure, thus preventing the hydraulic motor from stopping. This is expected to be helpful for the reduction of defects and increase in productivity.

### 기호 설명

$N_{pmp}$ : Main pump speed, rpm  
 $N_{mtr}$ : Gear motor speed, rpm  
 $p_{fmi}$ : Fan motor input pressure, bar  
 $p_{lpo}$ : Load pump output pressure, bar  
 $p_{ref}$ : Fan motor input pressure reference, bar

$p_{err}$ : Pressure error(=  $p_{ref} - p_{fmi}$ ), bar  
 $v_{lpo}$ : Amplifier input voltage for load pump proportional relief valve, volt  
 $V_{Dm}, V_{Dp}$ : Volumetric displacement of gear motor, load pump, cc/rev  
 $T_{fm}, T_{fp}$ : Friction torque in gear motor, load pump, Nm

### 1. 서론

굴삭기와 같은 건설기계의 엔진룸은 공간이 협소하여 열교환기의 크기가 제한되고 엔진냉각뿐만 아니라 유압시스템의 오일쿨러도 냉각해야하므로 높은 효율의 방열장치가 요구된다.<sup>1-2)</sup>

특히, 주행보다 작업을 위주로 하는 건설기계는 주행풍이 없는 상태에서 오로지 냉각 팬에 의해 엔진

\* Corresponding author: ghjung@daejin.ac.kr  
 1 Department of Computer Aided Mechanical Design Engineering, Daejin University, Gyeonggi 11159, Korea  
 2 KITECH, Gyeongbuk 38430, Korea  
 3 Daehyun hydraulics, Gyeonggi 11448, Korea

Copyright © 2015, KSFC  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

룸에서 발생하는 열을 외부로 방출시켜야 하므로 엔진룸의 방열성능이 중요한 설계항목이다. 일반적으로 냉각 팬을 구동하는 방식으로는 냉각시스템 온도에 따라 팬 클러치를 이용하여 ON/OFF하는 방식이 있으나 혹서기 작업 시에도 안정적인 냉각성능을 유지하기 위하여 최근에는 유압모터를 이용하여 냉각 팬을 능동적으로 구동하는 방식이 적용되고 있다.

Fig. 1은 건설 중장비용 엔진에 적용되는 냉각 팬을 나타내며 유압모터 구동방식에서는 엔진온도에 따라 적절하게 팬 속도를 조절함으로써 동력효율과 냉각성능 향상을 동시에 구현할 수 있다. 냉각 팬을 구동하는 유압모터는 외접기어모터로 통상적인 기어모터의 최대 작동압력은 140bar이지만 외형크기를 작게 하면서 높은 동력효율을 얻기 위하여 220bar의 최대 작동압력으로 설계되어 있다.<sup>3)</sup>

Fig. 2는 외접기어모터 입구 측에 작용하는 고압에 의해 발생하는 추력과 기어 축 변형으로 기어치 끝이 하우징에 맞닿아 마모가 발생하는 상태를 나타낸다. 저압용 모터는 마모량이 작으므로 모터가 조립되면 제작이 완료되지만 고압용 모터는 고압에서의 마모량이 크므로 조립된 모든 모터를 최대 작동압력에서 작동시키는 길들이기 시험을 필수적으로 수행해야 한다.<sup>4)</sup> 길들이기 시험은 모터 작동압력을 저압에서부터 서서히 증가시켜 최대 작동압력까지 변화시키는 단순한 과정이지만 작동압력이 증가할 때 마모가 비정상적으로 크게 발생하면 과부하에 의해 모터 회전이 정지하는 고착현상이 나타나게 되며 불량품으로 처리된다. 따라서 고압용 기어모터의 불량률을 낮추기 위해서는 길들이기 시험 중 발생하는 고착현상의 원인을 분석하고 개선방안을 수립해야 한다. 이를 위해서 유압모터 핵심부품의 가공품질을 향상시키고 조립공차 등을 개선함으로써 마모량을 줄이면서 마모량의 산포가 일정하게 되도록 공정을 관리하는 연구가 수행된 바 있다.<sup>5)</sup>



Fig. 1 Cooling fan of heavy-duty engine

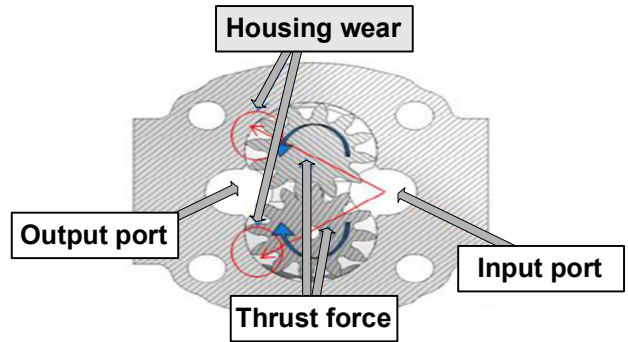


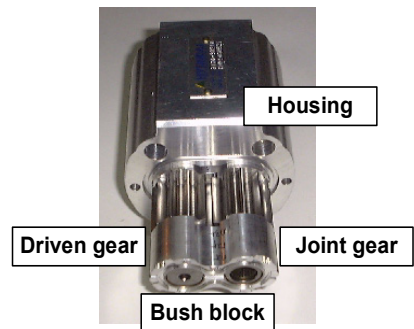
Fig. 2 Housing wear by heavy side loading

본 연구에서는 고압용 유압모터 길들이기 시험도 일련의 제작과정으로 파악하여 모터 작동압력을 서서히 증가시키는 작업과정에서 고착현상이 발생하는 순간을 감지하여 모터가 정지하지 않도록 모터에 작용하는 부하를 감소시키는 방식으로 길들이기 시험을 수행함으로써 불량품을 방지할 수 있는 개선방안을 제시하였고 시험을 통해 성능을 입증하였다.

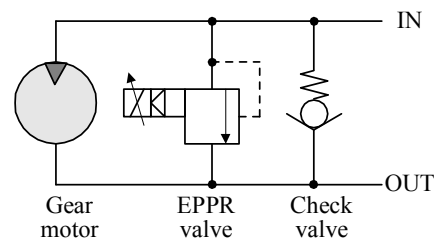
## 2. 길들이기 시험

### 2.1 외접기어 유압모터

Fig. 3(a)는 시험대상인 냉각 팬 구동용 유압모터의 분해된 사진을 나타내고 Fig. 3(b)는 내부 유압회로이다. 외접기어모터의 주요 부품은 구동 및 피동기어와 두 개 기어의 회전축이 삽입되는 부시 블록(bush block)



(a) Photo



(b) Internal circuit

Fig. 3 External gear motor

과 두 부시(du bush), 모터 하우징(housing)으로 구성되며 하우징에 조립되는 리어 커버블록(rear cover block)에는 체크 밸브와 전기적인 신호로 모터 구동 압력을 조절함으로써 냉각 팬 회전속도를 조절하는 기능의 EPPR 밸브가 장착된다. 길들이기 시험에서는 모터에 장착되는 EPPR 밸브는 사용하지 않고 길들이기 시험기에 설치된 릴리프밸브로 모터 입구압력을 조절한다.

Table 1은 유압모터의 작동사양을 나타낸다. 연속 작동 최대압력은 220bar이지만 순간작동 피크압력이 240bar이므로 길들이기 시험은 230bar까지 수행되며 길들이기 시험에서 모터고착에 영향을 미치는 주요 요인으로는 기어 축을 지지하는 부시 블록과 두 부시의 가공정도와 조립공차로 인해 결정되는 기어와 하우징의 간극으로 추정된다.

2.2 시험기 구성

유압모터 길들이기 시험기는 모터 구동에 필요한 유압을 발생시키는 메인펌프와 모터에 부하를 인가하는 기능의 부하 펌프로 구성되며 시험기 핵심기능과 관련된 유압회로는 Fig. 4와 같다. 고정 용량형 메인펌프는 가변속되는 모터에 의해 토출유량이 조절되고 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 는 수동 릴리프밸브(자동모드에서는 비례 릴리프밸브)로 설정된다. 여기서 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 는 릴리프밸브로 설정되는 최대 압력이므로 모터에 작용하는 부하가 충분히 큰 상태에서 만 유효하고 부하가 작은 경우에는 다음과 같은 토크 평형식으로 결정된다.

$$p_{fmi} V_{Dm} - T_{fm} = p_{lpo} V_{Dp} + T_{fp}$$

$$p_{fmi} = \frac{V_{Dp}}{V_{Dm}} p_{lpo} + \frac{T_{fm} + T_{fp}}{V_{Dm}} \quad (1)$$

유압모터 길들이기 시험에서 요구되는 부하는 모터 축에 유압펌프를 직결한 후 부하펌프 토출압력  $p_{lpo}$ 를 릴리프밸브로 조절하는 형태로 구현된다. 식 (1)로부터 부하펌프가 무부하인 상태(즉,  $p_{lpo} = 0$ )인 경우에도 펌프와 모터의 마찰토크로 인해 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 가 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 5(a)는 시험대상 유압모터를 부하펌프에 연결시키는 장착부와 수동으로 압력을 조절하는 릴리프 밸브를 나타내고 Fig. 5(b)는 시험기 작동상태와 관련된 데이터를 나타내면서 메인펌프 회전속도와 비례 릴리프밸브를 이용하여 압력을 조절하는 노브(knob)를 보여준다.

Table 1 Specification of hydraulic gear motor

Data	Unit	Value
Volumetric displacement	cc/rev	26.42
Max. continuous pressure	bar	220
Max. peak pressure	bar	240
Max. drain line pressure	bar	5
Max. speed	rpm	2,500
Min. speed	rpm	500
EPPR valve setting pressure	bar	200

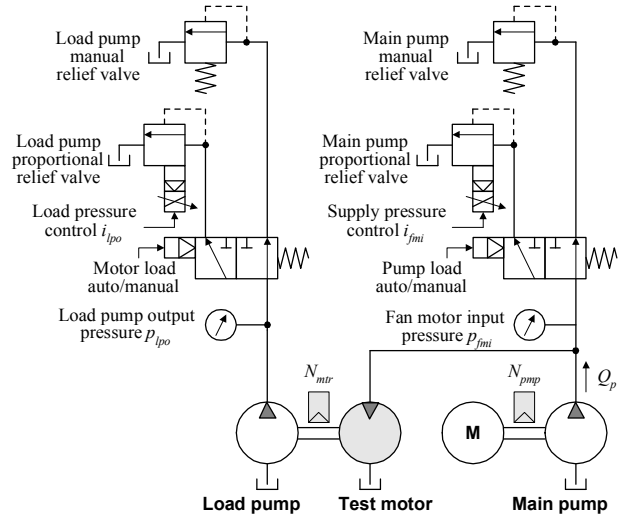
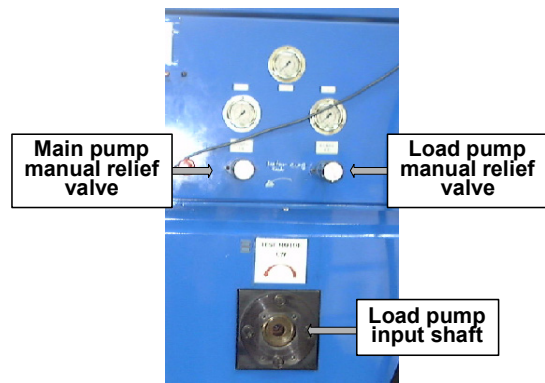
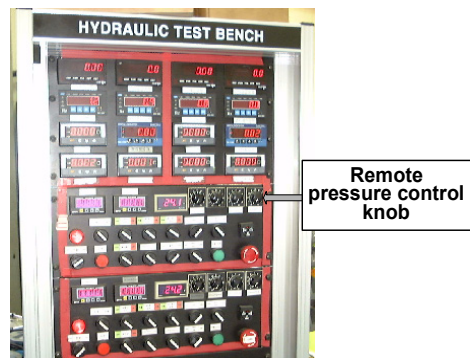


Fig. 4 Hydraulic circuit for aging test equipment



(a) Manual relief valve for pressure control



(b) Control panel

Fig. 5 Hydraulic motor aging test equipment

### 2.3 길들이기 시험과정

유압모터 길들이기 시험의 최종목표는 모터 입구 압력  $p_{fmi}$ 가 최대압력인 230bar에 도달하는 상태에서 마모를 통해 기어와 하우징의 간극을 적절하게 유지하는 것이며 모터 입구압력은 부하펌프 출구압력  $p_{lpo}$ 에 의해 결정되므로 메인펌프 릴리프 압력은 230bar보다 높은 압력으로 일정하게 설정한 후 부하펌프 릴리프밸브를 이용하여 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 를 조절한다.

수동 길들이기 시험에서는 작업자가 부하펌프 릴리프밸브 노브, 또는 비례 릴리프밸브 전류  $i_{lpo}$ 를 조절하는 제어패널의 노브를 이용해서 모터 입구압력을 서서히 증가시키면서 과도한 마모로 인하여 모터 입구압력이 높아지면 신속하게 부하펌프 릴리프 압력을 해제하여 모터가 고착되는 현상을 방지한다. 길들이기 시험과정에서 발생하는 고착현상은 모터 입구압력이 증가하는 기울기와 밀접하게 관련된다. 즉, 압력증가 기울기가 클수록 기어와 하우징의 마모가 빠르게 진행되므로 고착현상이 발생하는 빈도가 높아지게 된다. 그러나 일단 길들이기 시험이 완료된 유압모터는 더 이상의 마모가 발생되지 않으므로 모터 입구압력의 변화기울기에 무관하게 안정적으로 작동한다.

Fig. 6은 D/A 컨버터를 이용해서 부하펌프 비례 릴리프밸브 설정압력을 조절하면서 모터 입구압력의 기울기를 1bar/sec로 수행한 길들이기 시험을 나타내며, 여기서 VoutEn은 D/A 컨버터 출력을 ON/OFF하는 변수이다. 부하펌프 출구압력  $p_{lpo}$ 에 비례하여 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 가 증가하고 순간적으로 D/A 컨버터 출력을 OFF 상태로 전환하면  $p_{lpo} \approx 0$ bar이고 모터 입구압력은 마찰토크에 의해 발생하는 낮은 압력으로 변화하면서 모터속도가 높아짐을 알 수 있다.

## 3. 시험 제어기 설계

### 3.1 제어기 하드웨어

길들이기 시험 자동화를 위해서는 수작업으로 조절하는 부하펌프 출구압력  $p_{lpo}$ 를 마이크로 컨트롤러에서 출력되는 전압으로 변화될 수 있도록 설계해야 한다. 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 Fig. 5 시험기의 속도 및 압력센서, 비례 릴리프밸브를 인터페이스하여 자동시험 기능을 구현하였다.

Fig. 7은 제작된 제어기 하드웨어를 나타내고 Fig. 8은 시험기와 인터페이스되는 신호사양을 나타낸다.

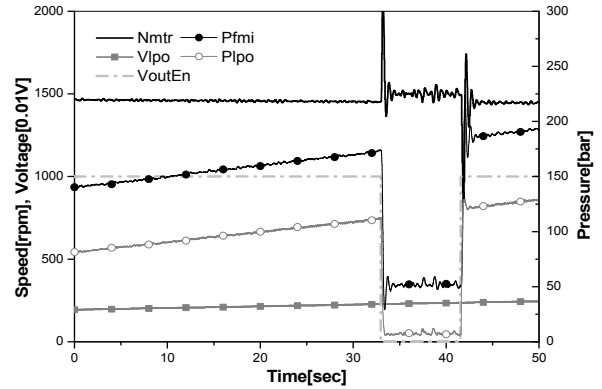


Fig. 6 Test data of aging process

제어기 하드웨어는 ATmega128 마이크로 컨트롤러와 신호조정(signal conditioning)회로로 구성되어 메인펌프와 모터 회전속도, 모터 입구압력과 부하펌프 출구압력을 측정하고 D/A 컨버터 출력전압으로 압력을 조절할 수 있도록 설계하였다. Fig. 9는 PC에서 수행되는 모니터링 프로그램으로 길들이기 시험과 관련된 제반 파라미터와 작동지령을 제어기로 송신하고 제어기에서 수집된 작동상태 데이터를 직렬통신으로 수신받아 모니터에 나타내거나 파일로 저장하는 기능을 담당한다.<sup>6-7)</sup>

### 3.2 기어 고착과정 분석

길들이기 자동시험 기능 구현을 위해서는 기존에 수행되고 있는 숙련된 작업자의 수동시험 과정을 면밀하게 분석하는 것 외에 기어 고착현상이 발생하는 순간에서의 작동상태를 분석하여 고착현상을 감지하고 이를 방지할 수 있는 기능을 설계해야 한다. 이를 위해서 부하펌프 비례 릴리프밸브 설정압력  $p_{lpo}$ 를 일정한 기울기로 증가시키면서 길들이기 작업을 수행하였으며 시험결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10(a)는 메인펌프 회전속도를 1,000rpm으로 유지한 상태에서 1.2bar/sec의 기울기로 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 를 증가시키면서 길들이기 시험을 수행한 결과이다. 부하펌프 비례 릴리프밸브 입력전압을 설정하면 지정된 기울기로 D/A 컨버터 출력이 증가하면서 설정된 전압에 도달하여 압력이 발생하는 기능을 이용하였으며 약 215bar의 압력에서 고착현상이 발생하였다. Fig. 10(b)는 기어고착이 발생하는 순간을 확대하여 나타낸 그림이다. 모터가 일정한 속도로 회전하는 도중 일시적인 마모량 증가로 부하토크가 상승하면 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 가 증가하고 모터속도가 저하

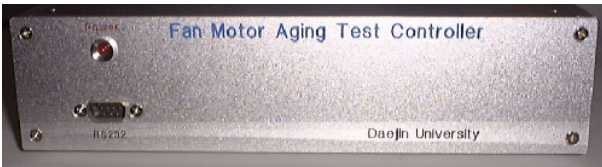


Fig. 7 Fan motor aging test controller

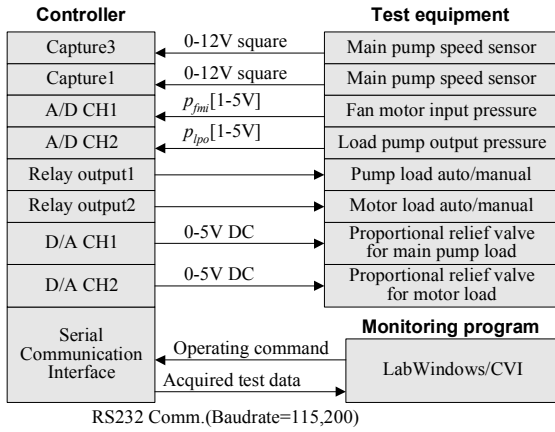


Fig. 8 Control signal interface

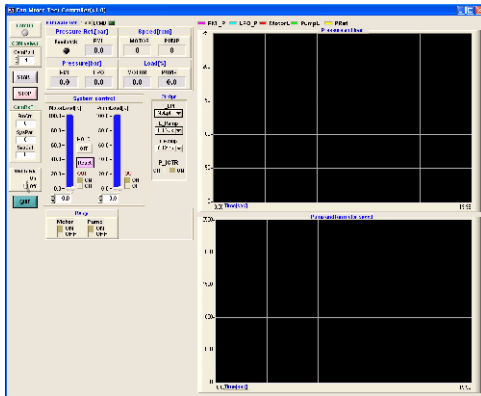


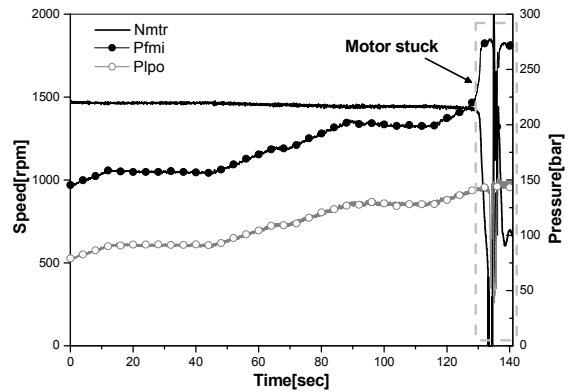
Fig. 9 Monitoring program main window

되면서 최종적으로 모터는 정지하고 모터 입구압력은 메인펌프 릴리프밸브 설정압력인 277bar까지 상승하게 된다. 이후 D/A 컨버터 출력전압을 제거하면 무부하 상태로 전환되어 모터회전이 재개되지만 다시 D/A 컨버터 출력을 ON으로 하면 모터 입구압력은 277bar까지 상승하므로 작동불량임을 알 수 있다. 이와 같은 길들이기 작업에서 마모량과 모터 입구압력에 따른 고착현상의 진행과정을 살펴보면 다음과 같음을 알 수 있다.

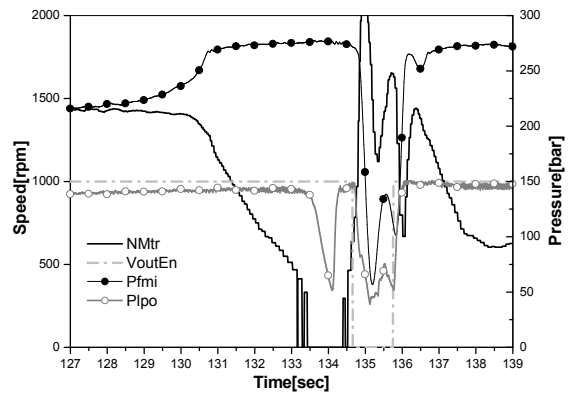
- (1) 길들이기 작업 중 비정상적인 마모량 증가로 모터에 작용하는 부하 증가
- (2) 모터 부하가 증가됨에 따라 회전속도가 저하되고 이에 따라 모터 입구압력  $p_{fmi}$  상승

(3) 모터 입구압력  $p_{fmi}$  상승으로 기어 회전축에 작용하는 추력이 증가하여 마모 가속

즉, 길들이기 작업에서 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 에 대한 마모량은 불안정한 특성을 가지며 압력상승에 의한 마모량 증가로 부하가 증가하여 회전속도가 감소하므로 모터 회전속도보다는 모터 입구압력



(a) Overall aging test process



(b) Magnified view of motor stuck

Fig. 10 Motor stuck during aging process

$p_{fmi}$ 로부터 비정상적인 작업과정을 판정하는 것이 적절함을 알 수 있다.

### 3.3 페루프 제어기 설계

길들이기 과정에서 발생한 고착현상을 분석한 결과로부터 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 에 대한 마모량 특성은 불안정한 시스템임을 확인하였으며, 이를 안정화시키기 위해서는 적절한 제어기가 적용된 페루프 제어시스템의 설계가 요구된다. 유압모터 불량률의 직접적인 원인은 길들이기 시험 중 과도한 마찰부하로 인하여 모터가 정지하는 것이므로 모터속도를 제어하는 방



식도 가능하지만 고착현상이 발생되기 시작하는 징후를 조기에 파악하기에는 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 이 적합하므로 압력제어방식으로 설계하였다.

Fig. 11은 유압모터 길들이기 시험에서 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 를 적분제어기로 제어하는 폐루프 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. 기준압력  $p_{ref}$ 는 무부하로 작동되는 최저압력에서 목표압력인 230bar까지 지정된 기울기로 변화되며, 측정된 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 와의 오차신호로부터 적분제어를 통해 부하펌프 비례 릴리프밸브에 인가되는 전압이 연산된다. 기준압력  $p_{ref}$ 의 기울기는 길들이기 소요시간과 안정성에 영향을 미치는 파라미터로 기준압력이 서서히 변화되는 작은 기울기에서는 길들이기 안정성이 양호한 반면에 작업시간이 길어지는 단점이 있고 기울기가 큰 경우에는 반대되는 특성을 갖는다. Table 2는 기준압력  $p_{ref}$ 를 200bar 변화시키는 경우에 압력변화 기울기에 따른 길들이기 작업소요시간을 정리한 결과이다.

#### 4. 성능시험

숙련된 길들이기 작업자의 경험과 모터 고착현상에 대한 분석결과를 바탕으로 설계된 제어기를 이용하여 길들이기 시험성능을 평가하였다. Fig. 12(a)는 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 를 77bar에서 230bar까지 상승시키면서 팬 모터 길들이기 작업을 자동으로 수행한 결과를 나타내며 각 구간 별 시험조건은 다음과 같다.

① 낮은 압력에서는 압력 상승률이 높아도 고착현상이 발생되지 않으므로 기준압력  $p_{ref}$ 의 기울기를 0.6bar/sec로 변화시키는 구간이며 적분제어로 모터 입구압력이 기준압력을 잘 추종함을 알 수 있다.

② 고착현상 방지를 위해 기준압력  $p_{ref}$ 를 0.3bar/sec의 기울기로 서서히 압력을 증가시키면서 길들이기 작업을 수행하였다.

③ 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 가 180bar에 도달하였을 때 길들이기 안정화를 위해 90bar까지 낮추었다가 다시 올리는 과정으로 압력변화 기울기는 3bar/sec로 길들이기가 완료된 압력범위에서는 고착현상이 발생하지 않음을 알 수 있다.

④ 0.3bar/sec의 기울기로 길들이기 작업을 재개한 후  $p_{fmi} = 210bar$ 에 도달하였을 때 길들이기 안정화를 위해 기준압력  $p_{ref}$ 을 60bar까지 낮추었다가 다시 올리는 과정이다.

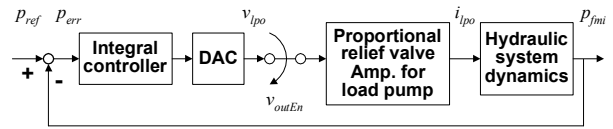
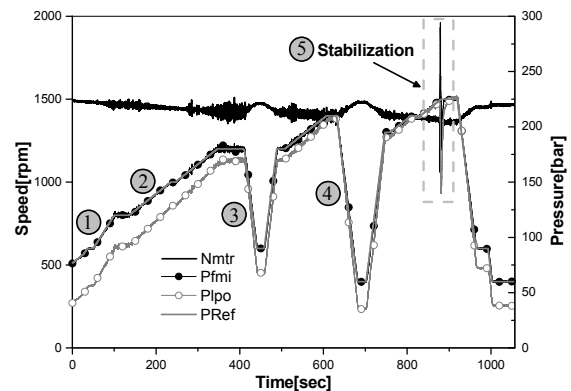


Fig. 11 Auto-aging control system block diagram

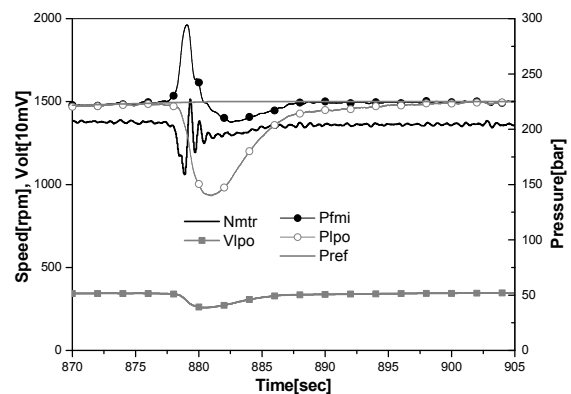
Table 2 Required aging time for pressure ramp

Reference pressure ramp [bar/sec]	Aging time [min]
0.3	11.1
0.6	5.6
1.5	2.2
3.0	1.1

⑤ 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 가 223bar에 도달하였을 때 비정상 마모에 의한 모터 입구압력이 급격히 상승하는 작동상태가 발생하였으나 적분제어기에서 부하펌프 비례 릴리프밸브에 인가되는 전압  $v_{lpo}$ 을 낮추어 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 이 기준압력  $p_{ref}$ 을 추종하도록 제어하여 시험대상 유압모터의 회전이 정지되어 고착되는 현상이 방지됨을 확인하였다(Fig. 12(b) 참조).



(a) Overall aging test process



(b) Magnified view of stabilization

Fig. 12 Auto-aging test process

Fig. 12의 길들이기 시험으로부터 펌프 방식으로 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 를 조절하면서 길들이기 시험을 수행한 결과 적분제어로 양호한 압력추종성을 나타내었고 모터회전이 정지하는 고착현상을 방지할 수 있음을 확인하였다. Fig. 12의 길들이기 시험 소요 시간은 약 920초로 15.3분이었다.

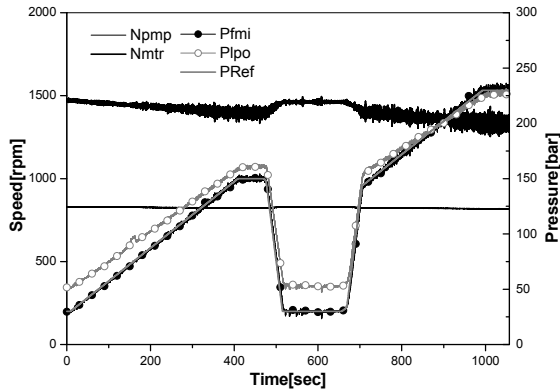


Fig. 13 Auto-aging without stabilization

Fig. 13은 또 다른 유압모터에 대한 자동시험결과이다. 메인펌프는 830rpm으로 일정하게 회전하는 상태에서 모터 입구압력  $p_{fmi}$ 를 30bar에서 230bar까지 변화시키면서 일시적으로 기준압력을 낮추는 길들이기 안정화를 1회 실시한 결과이다. 길들이기 전 과정에서 모터 입구압력이 급격하게 상승하는 작동상태는 발생하지 않았으며 부하가 클수록 모터 회전속도가 낮아져 용적효율이 저하되는 현상을 확인하였다. 길들이기 소요시간은 기준압력 기울기가 0.3bar/sec로 낮아 약 1000초로 16.7분이었다.

### 5. 결 론

건설기계용 엔진 냉각 팬 구동에 적용되는 외접기어 유압모터는 제한된 엔진룸에서의 방열성능을 향상시키기 위하여 능동적으로 팬 속도를 조절하는 기능을 담당하며 소형, 고효율을 목적으로 최대 압력 220bar의 고압으로 작동된다. 고압용 유압모터는 조립 후 기어와 하우징 사이의 마모를 통해 적절한 간극을 유지하는 길들이기 작업이 필수적인데 길들이기 작업 중 비정상적인 마모가 발생하면 모터가 정지하는 고착현상으로 불량품 처리된다. 현재의 양산 방식은 숙련된 작업자가 수작업으로 길들이기 작업을 수행하므로 기어고착에 따른 불량률이 다소 높고 길들이기 작업에도 많은 시간과 노력이 소요되는 단점이 있다.

본 연구에서는 고착현상을 방지하면서 유압모터 길들이기 작업을 자동화하기 위하여 기존에 사용되고 있는 길들이기 시험기의 설계를 검토하고 숙련된 작업자의 경험과 고착현상이 발생하는 시험결과를 분석하여 모터 구동압력을 펌프 제어하는 방식으로 길들이기 자동시험기능을 설계하고 마이크로 컨트롤러를 활용하여 구현하였다.

기존 길들이기 시험기에 설치된 센서와 비례 릴리프밸브를 설계된 자동시험 제어기와 인터페이스하여 길들이기 자동시험 기능을 평가한 결과 모터 입구압력 추종 및 안정화성능이 양호하고 이에 따라 비정상적인 마모가 일시적으로 발생하여도 모터가 고착되는 현상을 효과적으로 방지함을 확인하였다. 길들이기 자동시험은 기준압력의 기울기에 따라 길들이기 안정성과 작업소요시간이 결정되므로 향후에는 효과적인 길들이기 작업에 적절한 기준압력 궤적을 설계하는 것이 필요할 것으로 예상된다.

### 참고 문헌

- 1) K. J. Won, J. H. Choi, K. W. Nam, W. N. Kim and K. H. Lim, "To Improve Evaluation Process of Engine-Room Thermal Performance Using CFD Analysis", 2015 spring conference on Drive and Control, pp.73-74, 2015.
- 2) J. Y. Kim, K. N. Chung and J. G. Sim, "Cooling Analysis with Non-Uniform Flow Field for Construction Equipment", KSME autumn conference, pp.283-286, 2009.
- 3) Anthony Esposito, Fluid Power with Application, 4th edition, Prentice Hall, New Jersey, pp.278~279, 1991.
- 4) S. H. Kim, H. M. Son and J. C. Lee, "The effect of eccentricity between gear and housing in involute gear pump", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 6. pp.631-637, 2013.
- 5) D. Y. Shin, D. J. Seo, J. S. Yun, J. S. Jang, J. Y. Oh and B. Y. Choi, "Effect on the Wear Properties Inside Housing of Hydraulic Motors", KSFC 2014 autumn conference, pp.71-75, 2014.
- 6) ATMEL, ATmega128 datasheet, 2005.
- 7) G. H. Jung and G. H. Lee, "A Development of Proportional Control Solenoid Valve Performance Tester for Automatic Transmission", Journal of KFPS, Vol. 3, No. 4, pp.21-28, 2006.