

# 5,200톤 재하 시험장비의 성능 검증에 관한 연구

김광영\* · 최영호\*\* · 함영복\* · 최병오\*\*\* · 이동하\*\*\*\*

## A Study on the Performance Certification of 5,200ton Compression Load Tester

Kwang-Young Kim, Young-Ho Choi, Young-Bog Ham, Byung-Oh Choi, Dong-Ha Lee

**Key Words** : hydraulic jack(유압잭), compression load(압축하중), loadcell(로드셀), compression tester(압축시험), structure deformation(구조물 변형).

### Abstract

In case of high capacity load force as millions of tons, it is difficult to measure the force with load cell. But we can measure and calculate the force with applied pressure and ram area of hydraulic jack. The 5,200 ton compression load tester is composed of thirteen hydraulic jack with 400 ton capacity.

This paper explains the method of measuring the vertical compression load and provides characteristics of unit jack, and displacement of upper structure under maximum load condition.

### 기호설명

- $A_P$  : piston cross section area of hydraulic jack[cm<sup>2</sup>]
- $P_S$  : supply pressure of jack[kgf/cm<sup>2</sup>]
- $P_r$  : return pressure of jack[kgf/cm<sup>2</sup>]
- $P_L$  : load pressure of jack[kgf/cm<sup>2</sup>]
- $\delta_{vmax}$  : maximum displacement of upper structure[mm]
- $F_{VL}$  : vertical compression load of hydraulic jack[kgf]
- $\Sigma F$  : summation of compression load[kgf]
- $\Sigma F_{Vmax}$  : maximum vertical load of jacks[kgf]

### 1. 서론

콘크리트 시편, 교량지중용 받침(Bridge Bearing) 등의 고하중을 받는 부품의 압축 시험에 사용되는 5,200톤 재하 시험장비의 성능을 검증하기 위해 로드셀(load cell)을 이용한 직접측정 시험을 실시하는 것이 가장 간단한 방법이나, 총재하 하중 5,200톤을 직접측정 하는데 적합한 로드셀이 준비되기 어려므로, 400톤급 유압잭 총 13개의 조합과 압력변화에 의해 재하 하중을 가변 하는 장비임을 고려하여 유압에 의한 힘 측정방법<sup>(1),(2),(3)</sup>이 이용될 수 있다.

“최신계측공학”<sup>(1)</sup>에 소개된 유압식 힘 측정 방법은 피스톤과 실린더 장치를 이용하여 측정되며, 이 형식의 하중계는 2268ton<sub>r</sub> (5,000,000lbf, 22.2MN)까지 측정이 가능하며, 지시치의 ±1/2%, 용량의 ±1/10%의 정확도를 얻을 수 있으며, 유압유의 온도 변화가 10°F당 약 1/4% 오차가 발생한다.

“Testing fluid power component”<sup>(2)</sup>에 소개된 이론은 유압 실린더가 힘을 생성하기 위해 사용되며 그 힘은 압력×실린더의 단면적이 되고 결과적으로

\* KIMM 산업기술연구부 선임연구원  
 \*\* 금오공과대학교 대학원 기계공학과  
 \*\*\* KIMM 산업기술연구부 책임연구원  
 \*\*\*\* (주)에스코테크놀로지 대표이사

공급되는 압력 측정에 의해 그 힘을 측정할 수가 있다.

“대용량 힘표준 확립”<sup>(3)</sup>에서는 유압배출장치와 실하중을 조합한 유압식 힘 표준기(force standard machine with hydraulic multiplication)와 빌드 업(build-up)기법을 이용한 힘표준기로 대용량 힘 표준을 유지 및 보급하고 있다. 이것의 원리는 실하중 힘은 유압 피스톤-실린더 시스템에 의해서 발생하는 힘과 평형상태에 있고, 피스톤의 가속도가 0이면 양쪽 힘은 같아진다. 오차요인들을 종합해 볼 때 유압식 힘 표준기의 불확도는 제작되는 표준기의 성능에 따라  $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$  일 것으로 추정되며, 이것의 용량은 2.2 MN (224.33ton<sub>r</sub>, 494, 560lbf)이다.

빌드 업 방식 힘표준기 원리는 실하중에 의해 발생된 힘을 여러 개의 힘 센서를 병렬로 조합한 빌드 업 시스템을 기준용 표준기로 하여 교정대상 힘 측정기와 간접비교하는 방법이다. 한국표준과학연구원(KRISS)이 보유하고 있는 빌드업방식 힘 표준기의 용량은 10 MN (1020ton<sub>r</sub>, 2,248,000 lbf)이며, 불확도는  $1 \times 10^{-3}$  이내이다.

본 연구는 앞에서 소개한 세가지 방법의 공통적인 유압잭에 걸리는 압력( $P_L = P_s - P_r$ )과 실린더의 단면적의 곱으로 부과되는 하중을 구할 수 있으며, 총부하 하중은 단일 유압 잭에 걸리는 각각의 하중 총합으로 계산할 수 있다. 그러므로 유압 잭의 부하 압력을 측정함으로써 실제 부하하중을 측정 할 수 있으며, 5,200톤의 최대 재하 하중 시험 지침을 수립하여 최대 재하 하중의 단계별 인가시험 및 시험 결과를 통해 5,200톤 재하 시험장비의 성능을 검증 하는데 그 목적이 있다.

## 2. 기초이론

### 2.1 유압 잭의 원리

단일 잭의 외형 및 치수는 Fig. 1에 나타나 있다. 이때 유압 잭에 걸리는 수직 재하력( $F_{VL}$ )은

$$F_{VL} = A_p \times P_L \quad (1)$$

이다. 이때  $A_p$ 는 잭 피스톤 단면적이고,  $P_L$ 은 잭의 부하압력( $P_1 - P_2$ )이다. 하나의 잭으로 가할 수 있는 수직 재하 하중은

$$F_{VL} = 572.56 [cm^2] \times 700 [kgf/cm^2] = 400,792kgf \approx 400ton_f$$

이다. 또한 Fig. 2와 같이 대차(Metal plate)에 작용하는 총 부하 하중은

$$\sum F = F_{VL1} + F_{VL2} + F_{VL3} + \dots + F_{VL13} \quad (2)$$

으로부터, 총부하 하중은

$$\sum F = 400ton_f \times 13 = 5,200ton_f \text{ 으로 된다.}$$

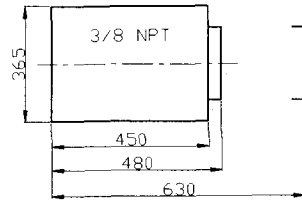


Fig.1 Dimension of hydraulic jack

Table 1은 단일 유압 잭의 사양을 나타내 주고 있으며, 시험기에 사용된 단일 유압 잭의 성능은 한국표준과학연구원의 빌드 업 방식의 힘표준기로 약 400ton<sub>r</sub> 성능검증을 받은 유압잭이다.

Table 1 Specification of vertical hydraulic jacks

NO	Item	Specification
1	Diameter of ram ( $A_p=572.56cm^2$ )	270 mm
2	Stroke of jack	150 mm
3	Max. working pressure	700 Kgf/cm <sup>2</sup>
4	Number of jacks	13 ea

Fig.2는 실제 장비의 유압 잭의 배치를 나타내 주고 있으며 13개의 유압잭이 대차에 힘을 가하므로 대차에 걸리는 힘은 총 5,200ton<sub>r</sub>이다.

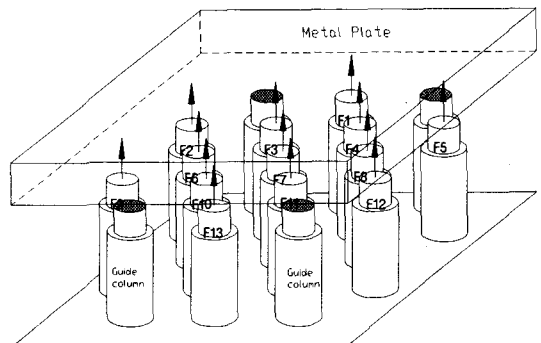


Fig. 2 Arrangement schematic of hydraulic jack

## 3. 시험장비

### 3.1 장비의 구성 및 제원

최대 5,200톤의 수직 재하 시험에 건널 수 있는 철근 콘크리트 구조물과, 400톤급 13개의 유

압재과, 유압 잭에 압력을 부가하는 유압펌프 3대로 구성되어있고, 하나의 유압펌프에 4개~5개의 유압 잭이 연결되어있다. 가압은 방향 조절밸브와 압력 조절밸브에 의해 자유롭게 조절할 수 있다.

### 3.2 장비의 형상

Fig. 3은 시험의 대상이 되는 재하 시험기의 외형을 나타내며, 이 구조물은 "Pre/Post Tensioned Reinforced Concrete Rahmen"구조를 가진다.

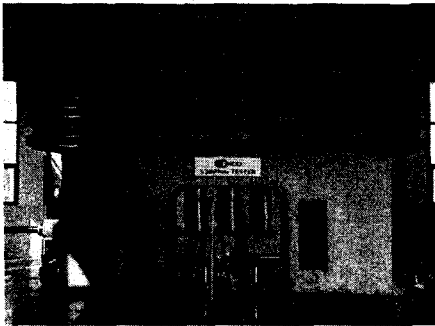


Fig. 3 5,200ton compression load tester

### 3.3 유압 펌프 유니트

Fig.4는 유압 잭에 유압동력을 공급해 주기 위한 700kgf/cm<sup>2</sup> 고압토출 펌프를 나타내주며, ①은 압력센서 인디케이터, ②는 교류전동기, ③은 귀환 압력 지시계, ④는 공급 압력 지시계, ⑤는 수동 압력조절 밸브 유니트, ⑥은 압력센서, ⑦은 유량조절 밸브를 나타낸다.

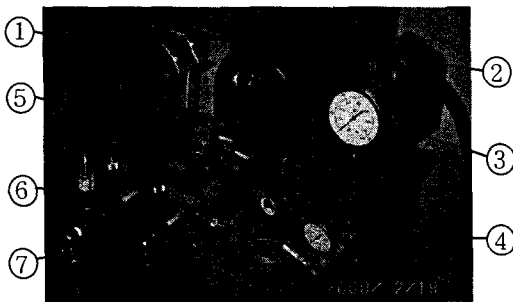


Fig. 4 Hydraulic power unit for load tester

Fig. 5는 각 펌프 A, B, C에서 공급되는 고압측 압력센서와 리턴되는 저압측 압력센서가 설치되어 각 유압 잭과의 연결상태를 나타낸다.

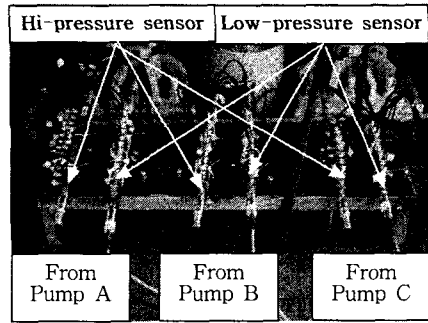


Fig. 5 Hydraulic pressure distribution and pressure sensor connecting

Table 2는 가압 하중에 따른 유압잭의 연결상태를 나타내고 있다.

Table 2 Connecting condition of hydraulic jack according to load range

Pressurized diameter(mm)	Load range(ton)	Connected Jack
D ≤ 800	V ≤ 400	7 (1개)
600 ≤ D ≤ 1800	V ≤ 2,000	3-4-7-10-11 (5개)
600 ≤ D ≤ 1800	V ≤ 2,800	3-4-6-7-8-10-11 (7개)
1200 ≤ D ≤ 2050	V ≤ 4,000	2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12(11개)
1400 ≤ D ≤ 2050	V ≤ 5,200	all jack (13개)

Table 3은 각 펌프에 연결된 유압 잭의 상태를 나타내며, 부하 하중 크기에 따라 Mode별로 구분하여 하중을 부가할 수 있다.

Table 3 Connecting condition of jack with pump

Mode	Number of jacks	Pump A	Pump B	Pump C
1	5	4-7	10-11	3
2	7	4-7-8	10-11	3-6
3	11	4-5-7-8	10-11-12	2-3-6-9
4	13	4-5-7-8	10-11-12-13	1-2-3-6-9

Fig. 6은 실제 시험장비의 유압잭 배치도를 나타내며, 점선과 같이 펌프 A, B, C와 유압잭을 그룹화시켜 연결된다.

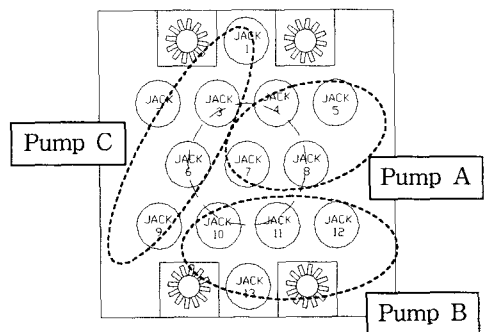


Fig. 6 Hydraulic jack arrange of tester

### 3.4 자동 계측 시스템

#### 3.4.1 데이터 획득 장치

Fig. 7과 같이 최대 8 채널에 할당된 센서들로부터 데이터는 데이터 획득 A/D 보드에 의해 수집됨과 동시에 프로그램에 의해 그래프 및 수치로 표시되고 연속적으로 파일로 저장된다.

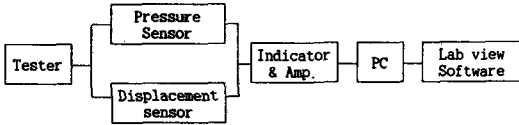


Fig. 7 Block diagram of data acquisition

#### 3.4.2 계측용 센서류

Table 5는 측정에 사용된 센서류의 사양을 나타내며, 검교정이 이루어진 상태로 사용되었다.

Table 5 Specification of sensor for measurement

NO	Sensor	Model	Maker	Range	Accuracy
1	Displacement sensor	PY2	GEFRAN ELETTRONICA	10~50mm	±0.1%
2	Displacement sensor	LF II	DATA INSTRUMENT	150~1200mm	±0.1%
3	Pressure sensor	FRG	SENSOTEC (고압용, 장급속)	10,000psi	±0.25%
4	Pressure sensor	FRG	SENSOTEC (저압용, 귀환속)	10,000psi	±0.25%

### 3.5 유압 시스템 회로도

Fig. 8은 펌프 A, B, C에 따른 잭 연결 유압 회로도를 나타낸다.

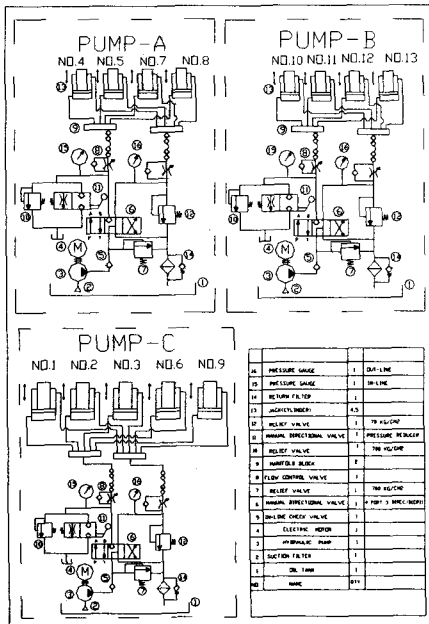


Fig. 8 Hydraulic circuit of load tester

## 4. 시험방법 및 결과

### 4.1 단위 잭의 무부하 전진속도 실험

13개의 단위 잭 별로 각각의 가공 및 조립 특성에 따라 무부하 상태에서의 내부저항에 의한 부하 압력이 어느 정도인지, 개별적 전진 속도는 정량적으로 얼마인지를 측정하여 단위잭들의 고유 특성을 확인하였다.

Fig. 8과 같이 단위 잭이 조립 및 설치된 상태에서 잭의 로더부 압력, 작동유 탱크로의 귀환유저항 등으로 인해 무부하 상태에서 리턴 압력은 7 kgf/cm<sup>2</sup> 이상 나타났다. Table 6에서와 같이 잭 양단간의 압력차(부하압력)와 피스톤의 행정속도의 최대, 최소치를 측정한 결과, 최대 행정속도는 잭 8에서 1.06[mm/sec]이며, 이때의 부하 압력은 P<sub>L</sub>=181.15[Kg/cm<sup>2</sup>]이다. 최소 행정속도는 잭 12에서 0.87[mm/sec]이며, 이때 부하 압력은 171.73[Kg/cm<sup>2</sup>]이다.

Table 6 Unload extend test for unit jack

Jack No.	Ps [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Pr [Kg/cm <sup>2</sup> ]	PL [Kg/cm <sup>2</sup> ]	V <sub>s</sub> [mm/s]	Oil temp. [°C]
1	269.06	7.29	261.77	0.9591	17
2	235.29	7.13	228.16	0.9476	18
3	221.55	7.27	214.28	0.9547	16
4	255.88	10.78	245.1	1.0533	17
5	234.24	9.70	224.54	1.0526	21
6	211.23	8.20	203.03	0.9905	16
7	185.44	10.52	174.92	1.0453	21
8	190.67	9.52	181.15	1.0569	23
9	239.49	8.46	231.03	0.9540	13
10	181.42	8.65	172.77	0.8840	15
11	168.84	8.23	160.61	0.8933	19
12	179.43	7.70	171.73	0.8750	20
13	137.30	7.99	129.31	0.9271	20

#### 4.2 전체 잭의 무부하 동조실험

펌프 A, B, C에 각각 연결된 13개의 잭을 동시에 무부하 상태로 가동시킬 경우에 속도편차와 행정변위 편차가 최대 어느 정도까지 차이를 나타내는지 알아보고 속도 편차나 행정변위 편차가 대차를 이동시킴에 있어 틸팅의 영향을 평가하기 위함이다. 무부하 전진 속도 시험결과에서와 마찬가지로 Table 7에서와 같이 잭 13과 잭 1이 가장 심한 행정변위 및 행정속도 편차를 가짐을 알 수 있으며, 최대 행정변위 편차( $\Delta S_{T\_max}$ )는 잭 13(139.55)-잭 1(74.8)=64.75 [mm]이고, 최대 행정속도 편차( $\Delta V_{s\_max}$ )는 잭 13(0.2988)-잭 1(0.1602) = 0.1386[mm/sec]으로 나타났다. 이러한 행정변위 편차와 행정속도 편차는 무부하 상태로 동시에 전진할 때 발생하는 문제이고, 전체 잭이 대차에 밀착되어 부하를 받고 있는 상태이므로 실제 하중 재하시는 문제가 되지 않는다.

Table 7 Unload synchronize test for all jack

Jack No.	$S_T$ [mm]	$V_s$ [mm/s ec]	$P_s$ [Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> ]	$P_r$ [Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> ]	$P_L$ [Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup> ]	Oil temp. [°C]	
PUMP A	4	105.3	0.2255	49.455	11.349	38.095	20
	5	101.2	0.2167				
	7	136.1	0.2914				
	8	128.5	0.2751				
PUMP B	10	112.0	0.2398	46.039	10.588	35.451	19.5
	11	111.5	0.2387				
	12	98.8	0.2115				
	13	139.55	0.2988				
PUMP C	1	74.8	0.1602	52.362	10.014	42.347	19
	2	86.25	0.1847				
	3	94.85	0.2031				
	6	112.35	0.2505				
9	108.25	0.2318					

#### 4.3 각 모드별 재하실험

본 장비의 재하 시험에서 재하력 산출시 부하 압력은 피스톤부의 압력과 로더부의 압력의 차압으로 산출하였고, 구조물의 수직변형량은 구조물 좌우 중앙부에서의 수직방향 거동을 변위센서로 전방, 후방의 두 곳에서 측정하였다.

##### 4.3.1 Mode 2에서의 재하실험

Fig. 9와 같이 Mode 2에서의  $\Sigma F_{Vmax}$ 는 2,024,118[kgf]이고,  $\delta V_{max}$ 은 0.8091[mm]이며, 재하력 측정 오차범위는  $\Sigma F_{Vmax} \pm 8,000$ [kgf], 구조물 변형량 측정 오차범위는  $\delta V_{max} \pm 1.6$ [ $\mu$ m]으로 나타났다.

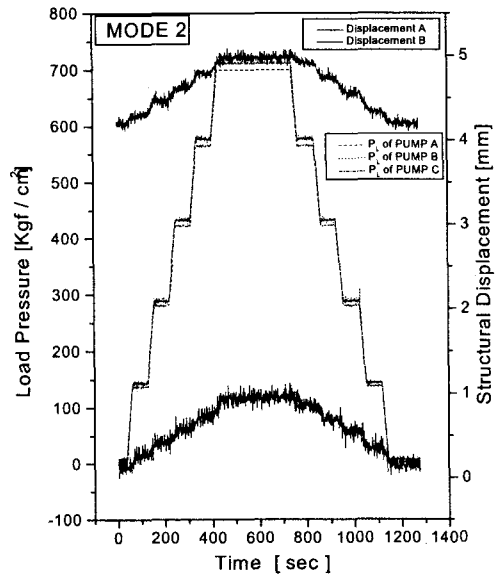


Fig. 9 Result of test for Mode 2

##### 4.3.2 Mode 3에서의 재하실험

Fig. 10과 같이 Mode 3은  $\Sigma F_{Vmax}$ 는 2,831,028[kgf]이며,  $\delta V_{max}$ 는 1.173[mm]이며, 재하력 측정 오차범위는  $\Sigma F_{Lmax} \pm 11,200$ [kgf]이고, 구조물 변형량 측정 오차범위는  $\delta V_{max} \pm 2.4$ [ $\mu$ m]이다.

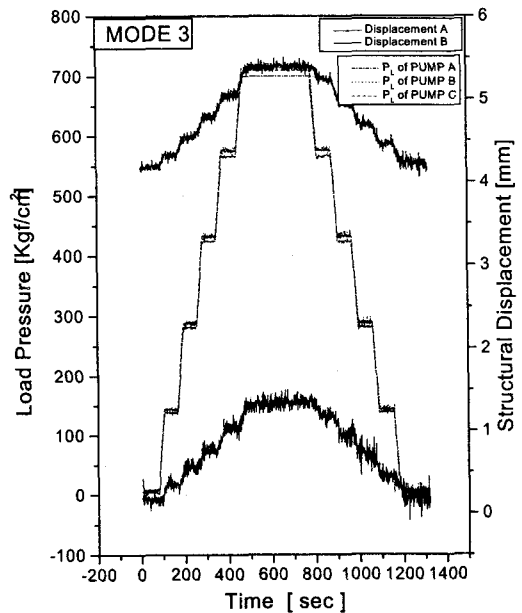


Fig. 10 Result of test for Mode 3

### 4.3.3 Mode 4에서의 재하시험

Fig. 11과 같이 Mode 4의  $\Sigma F_{Vmax}$ 는 4,450, 725 [kgf]이며,  $\delta v_{max}$ 는 2.3072[mm]이며, 재하력 측정 오차범위는  $\Sigma F_{Vmax} \pm 16,000$ [kgf]이며, 구조물 변형량 측정 오차범위는  $\delta v_{max} \pm 4.6$ [ $\mu$ m]이다.

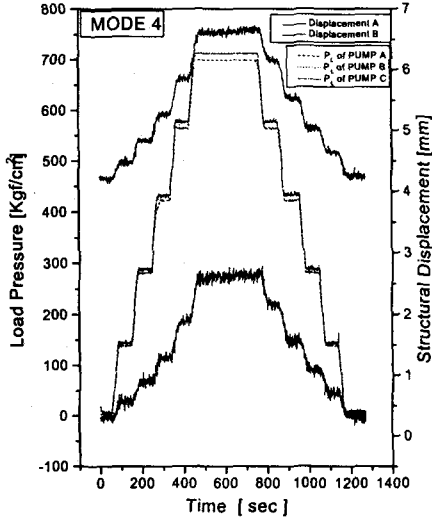


Fig. 11 Result of test for Mode 4

### 4.3.4 Mode 5에서의 재하시험

Fig. 12와 같이 Mode 5의  $\Sigma F_{Vmax}$ 는 5,266, 126[kgf]이며,  $\delta v_{max}$ 는 3.1628[mm]이며, 재하력 측정 오차범위는  $\Sigma F_{Vmax} \pm 20,800$ [kgf]이며, 구조물 변형량 측정 오차범위는  $\delta v_{max} \pm 6.2$ [ $\mu$ m]이다.

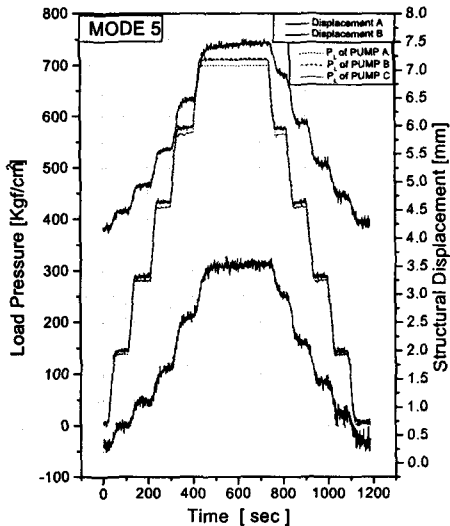


Fig. 12 Result of test for Mode 5

### 4.3.5 Mode별 구조물의 변위 측정

각 모드별 재하 하중에 따른 구조물 상부 프레임의 변위는 Table 7과 같다.

Table 7 Maximum load pressure and structure displacement for Mode

Mode No.	2	3	4	5
Connect of Jack	#3-#4-#7-#10-#11	#3-#4-#6-#7-#8-#10-#11	#2-#3-#4-#5-#6-#7-#8-#9-#10-#11-#12	#2-#3-#4-#5-#6-#7-#8-#9-#10-#11-#12-#13
Max. load force[kgf]	2,024,118	2,831,028	4,450,726	5,266,127
Max. displacement of structure [mm]	0.8091	1.173	2.3072	3.1628

## 5. 결론

수천톤의 재하시험 장비를 유압잭에 가해지는 압력 측정으로 검증 하기 위해 여러 조합으로 부하 하중을 인가하여 검증된 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 무부하 상태에서 단위 잭을 전진시킬 때에 각 잭별 특성에 의해 속도편차가 생긴다.
- (2) 모든 잭을 동시에 전진시키면 각각의 마찰 특성에 따라 속도편차가 생기며, 잭13과 잭1이 가장 심한 행정변위 및 행정속도 편차가 발생하지만 부하조건에서는 문제되지 않는다.
- (3) 잭의 부하압력에 따라 최대 재하력과 구조물의 수직 변형량이 발생되었으며, 13개의 단위 잭 모두에 부하압력(펌프 A 698.5kgf/cm<sup>2</sup>, 펌프 B 713.5kgf/cm<sup>2</sup>, 펌프 C 711.0kgf/cm<sup>2</sup>)을 인가하였을 때, 본 재하 시험장비의 최대 재하 가능한 하중은 5,266,127 $\pm$ 20,800kgf으로 나타났다.

따라서, 최대 재하력 범위 이내에서는 잭의 조합에 의해 부하하중을 원활하게 재하할 수 있는 검증된 장비임을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. 한용교, 이명호, 김재열 공역 "최신계측공학" 반도출판사, pp.408~429.
2. Robert A. Nasca, "Testing Fluid Power Component", Industrial Press. Inc. pp.106~109.
3. 강대임, "대용량 힘표준 확립", 제21권 제1호, 1997.4.1.