

# 굴삭기 시뮬레이터의 설계 Design of Simulator for the Excavator

김동수 · 배상규 · 김정수

D. S. Kim, S. K. Bae and J. S. Kim

**Key Words** : Excavator(굴삭기), Simulator(시뮬레이터), FEM(유한요소해석), Dynamics Analysis(동역학 해석)

**Abstract** : Recently, the cylinder of the excavator is applied in the various environment. So, we need the development of the simulator for the excavator. The simulator has the effects of the decrease of the cost and improvement of the cylinder's performance. In this paper, we design the simulator for the excavator and makes an analysis of the dynamics and structure. The simulator was applied to the excavator's models of 10ton, 20ton and 30ton because we built the data base of a real excavator's cylinder of information in the experiment. And we used the FEM analysis for the comparative study on the characteristics.

## 1. 서 론

최근 굴삭기의 실린더는 고압화, 소형경량화 등의 환경변화와 더불어 끝 단부 충격완화용 쿠션 기능강화 및 이음방지 등 고기능성에서부터 여러 사용 환경에 적응하는 연결 장치의 부착 등 다양한 사용조건에 대응요구에 직면하고 있다. 이런 환경변화는 차량의 사용조건에 적합한 최적의 성능을 갖춘 실린더의 개발 필요성을 절실하게 요구하고 있다. 다양한 환경 변화에 따른 최적 성능 실린더의 개발에 있어서 실차를 이용한 테스트는 비용과 장소, 시간 등의 제약 조건이 따르게 됨으로 최근에는 실제 차량의 구조 및 역학적 해석이 고려되어 그와 유사한 환경을 제공하는 시뮬레이터를 개발하여 테스트 장비로 활용하고 있다. 현재 일본의 선진 실린더 메이커에서는 실차에서의 파라미터(질량 특성과 중심 위치 등) 정보를 시뮬레이션 시스템에 입력하여 실린더 개발시 제품이 실차에서 완벽한 성능을 발휘하도록 하고 있다.<sup>1~2)</sup>

본 연구에서는 굴삭기용 시뮬레이터를 개발함에 있어서 실제 굴삭기 차량의 데이터를 바탕으로 하여 동역학적 해석과 더불어 시뮬레이터를 구조적 해석을 수행 하였다.

## 2. 굴삭기용 시뮬레이터의 구조 해석 및 설계

굴삭기용 시뮬레이터는 실차의 데이터를 바탕으로 다양한 환경조건에서 테스트가 가능하도록 설계 되어야 한다. 따라서 시뮬레이터의 구조 해석을 통한 설계로부터 다양한 환경 구현에 따른 안정성을 확보 하도록 하였다.

본 연구에서는 실차를 유사하게 구현한 시뮬레이터의 암, 붐, 베이스 플레이트를 유한 요소법을 이용하여 최대 하중조건에 대한 안정도를 판별하고 분석 하였다.

Fig. 1은 구현된 시뮬레이터의 설계를 나타낸다.

본 설계는 실제 굴삭기의 암, 붐 실린더의 위치 및 부하를 동역학적으로 고려하여 하중과 실린더 위치의 조절이 가능하도록 구현하였다.<sup>3~4)</sup>

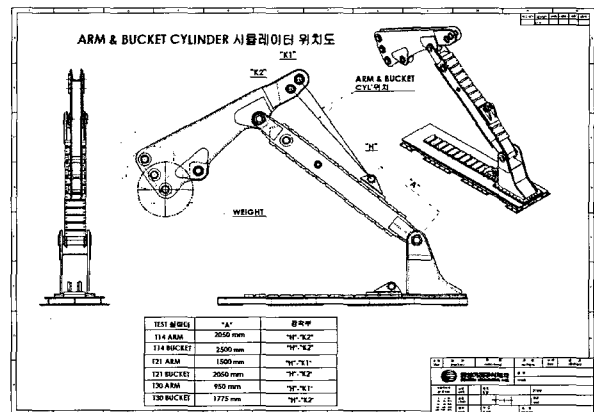


Fig. 1 Design of the Simulator

접수일 : 2006년 8월 5일

김동수(책임저자): 한국기계연구원 정보장비연구센터

E-mail : kds671@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7152

배상규, 김정수 : 한국기계연구원 정보장비연구센터

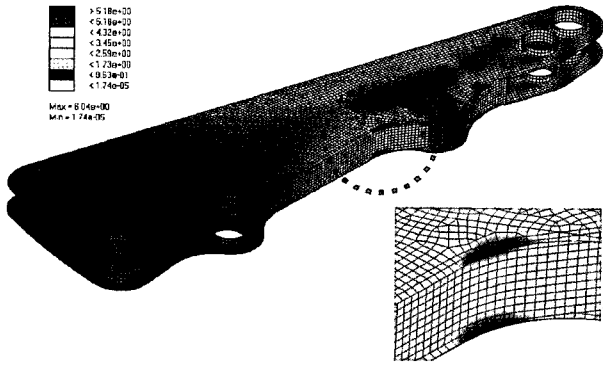


Fig. 2 FEM Analysis of ARM Frame

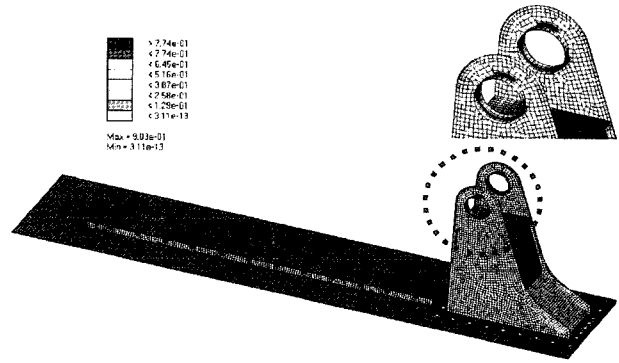


Fig. 4 FEM Analysis of Base Plate

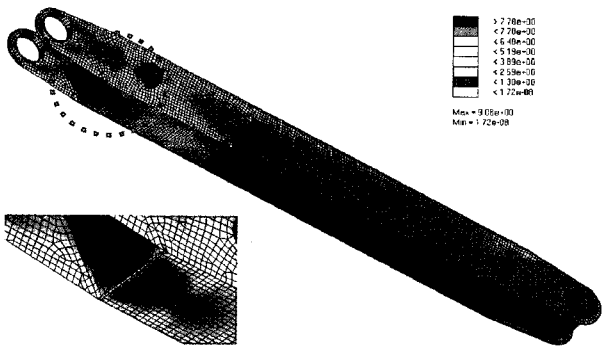


Fig. 3 FEM Analysis of BOOM Frame

### 2.1 유한 요소법을 이용한 구조해석

유한 요소 전후 처리 전용 S/W인 Hypermesh를 사용하여 모델링 하였고 유한 요소 해석 S/W인 ANSYS를 사용하여 구조를 해석하고 분석 하였다.

셸 요소는 SHELL63이며 셸 요소의 크기는 평균 20mm로 하였다. Fig. 2는 시뮬레이터 암에 대한 구조 해석 결과이다. 요소 개수는 19,832개, 절점 수는 19,687개이다. 종단에 운반 하중 10ton에 대해 반대편 종단에서의 유압 실린더 힘을 고려하였다.

최대응력이 실차 재현 시뮬레이터의 암과 붐이 인접하여 구동하는 부위 근처에서 59,232kPa로 발생하였다. 이는 재료 SWS490의 항복응력인 313,812kPa의 18.9%에 해당하며 안전계수로 환산하면 5.3이므로 구조 강도 측면에서 안전하다고 할 수 있다.

Fig. 3은 시뮬레이터의 붐에 대한 구조해석 결과이다. 요소 개수는 17,536개, 절점 수는 17,535개이다. 하중은 운반 하중 10ton과 시뮬레이터 암의 중량을 포함한 11.478ton을 밀어 올리는 유압 실린더의 힘을 고려하였다. 최대응력은 89,044kPa으로 실차 재현 시뮬레이터 암과 붐의 연결된 부위 아래쪽 브라켓(bracket)에서 발생하였으며 SWS490의 항복응력인 313,812kPa보다 낮은 수준이므로 구조해석 측면에서 안정하다고 할 수 있다.

Fig. 4는 시뮬레이터의 암과 붐을 받치는 베이스 플레이트에 대한 구조해석을 수행한 결과이다. 암과 붐의 중량과 운반 하중을 모두 포함하여 13.248ton에 대한 하중 조건을 적용하였다. 최대응력은 실차 재현 시뮬레이터 베이스 플레이트 위 끝부분에 8,855kPa으로 나타나서 SWS 490의 항복응력(313,812kPa)을 초과하지 않았고, 35.6의 안전 계수를 나타내므로 구조강도 측면에서 매우 안전하다고 할 수 있다.

### 3. 굴삭기용 시뮬레이터의 동역학적 해석

시뮬레이터는 다양한 조건에서의 테스트가 가능해야 하므로 최근에 주로 사용되는 굴삭기의 실차 모델의 다양한 적용이 가능해야 한다. 따라서 본 연구에서는 T14(10ton), T21(20ton), T30(30ton)급의 굴삭기 모델의 하중과 유사하게 구현한 시뮬레이터의 동역학을 분석하고 해석함으로써 해서 유압실린더의 다양한 테스트에 적용이 가능하도록 구현하였다.

#### 3.1 시뮬레이터의 동역학적 해석

Table 1에는 각 굴삭기 모델에 따른 질량을 나타낸 것이다. 시뮬레이터의 부하 하중 선정은 200kg의 배수를 적용하여 배수에 따라 하중을 추가 할 수 있도록 구현 하였다.

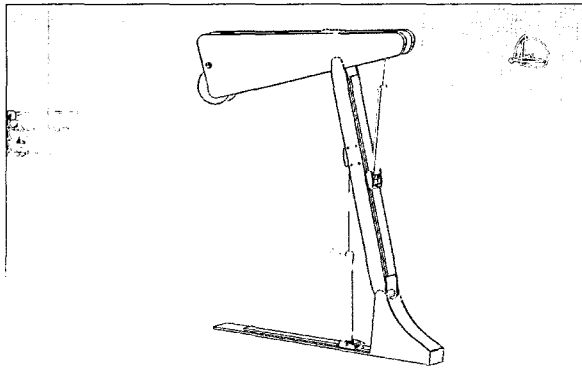
Fig. 5는 시뮬레이터의 암 실린더와 붐 실린더에 대한 동역학 모델링을 나타낸 것이다. Fig. 6은 굴삭기의 동역학 해석을 위해 실제 굴삭기의 형상을 모델링 한 것이며, Fig. 7은 시뮬레이터의 유압 실린더의 거리 구동을 보여주고 있었다. 이러한 거리 구동에 따른 유압 실린더의 작동 힘을 Fig. 8에서 나타내고 있다.

Table 1 Weight of the Excavator

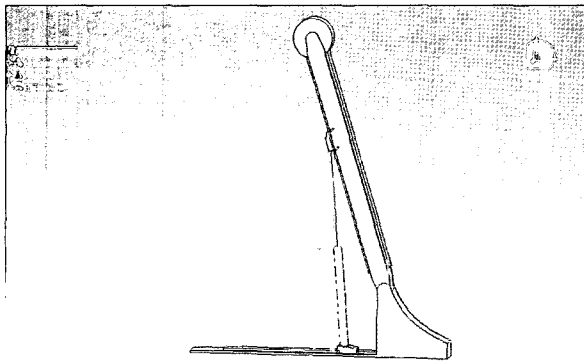
Object	Mass(kg)		
	T14	T21	T30
Boom	1662	1662	1662
Arm	1276	1276	1276
Weight	200×X	200×X	200×X
Boom Cylinder	119	174	253
Arm Cylinder	140	239	331

Table 2 Equivalent Mass of the Excavator

Model	Cylinder	Cylinder force(N) (experiment)		Cylinder force(N) (simulator)		Number of mass (200kg)
		Extract	Retract	Extract	Retract	
T14	Boom	87,234	99,044	5,952	98,413	6
	Arm	73,895	97,789	46,451	97,850	17
T21	Boom	184,736	238,473	149,018	240,790	16
	Arm	45,856	56,469	33,661	51,377	12
T30	Boom	314,458	317,893	119,565	336,166	24
	Arm	60,224	74,226	66,268	73,923	14



(a) Dynamics Modeling of ARM Cylinder



(b) Dynamics Modeling of BOOM Cylinder

Fig. 5 Dynamics Modeling of Simulator

시뮬레이터의 압과 뮴 실린더가 실제 굴삭기에 가해지는 실린더와 유사한 부하를 얻기 위해서 실제 작동되는 굴삭기의 각 실린더의 최대, 최소 힘과 유사한 힘이 작용하도록 시뮬레이터의 등가 질량을 T14, T21, T30에 대하여 각각 구하였고 Table 2는 그 결과를 나타내고 있다.

### 3.2 실차 구동 실험

시뮬레이터가 실차와 동일한 환경에서 실린더를 평가 되도록 하기 위해서는 실차가 실제 구동 시 나타나는 실린더의 작동과 동일한 구동을 보여야 한다. 따라서 본 연구에서는 T14, T21, T30의 각 실차에 대하여 실제 구동 시 실린더의 압력, 속도, 위치를 측정 하였다.

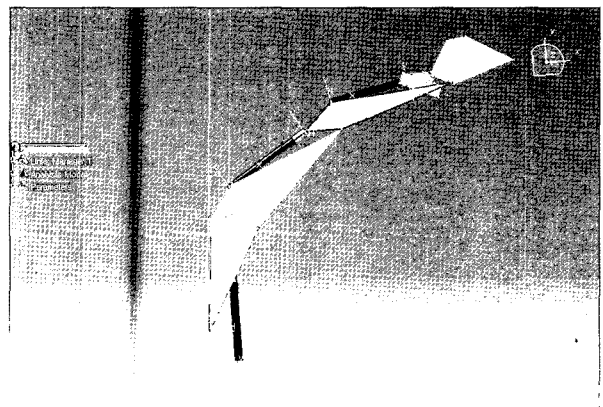


Fig. 6 Dynamics Modeling of Excavator

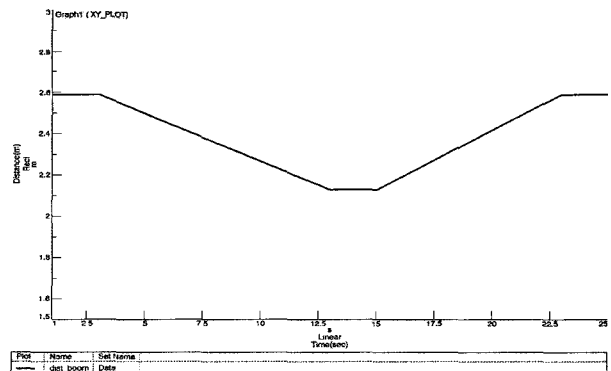


Fig. 7 Position of the Cylinder

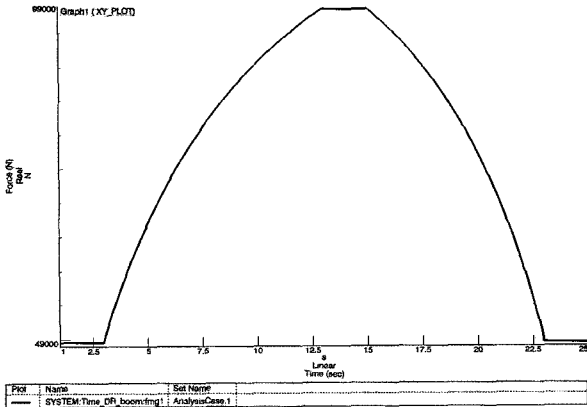


Fig. 8 Force of the Cylinder

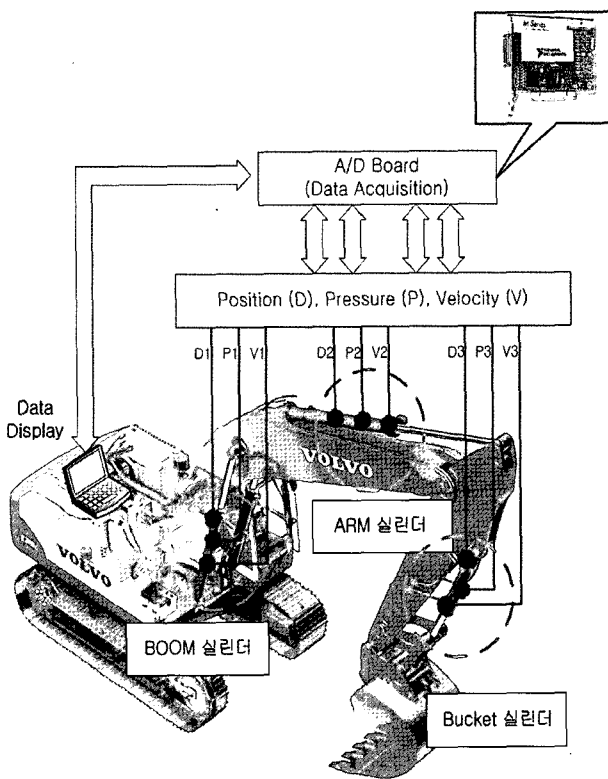


Fig. 9 Experiment in the Real Excavator

Fig. 9는 굴삭기 실린더의 압력, 속도, 위치 측정의 개념도이다. 측정은 데이터로그와 지시기를 사용하였고 측정 센서는 속도와 위치는 LVDT, 압력은 최대 1000bar의 압력 센서를 통하여 측정하였다.

Fig. 10은 T14 모델의 암 실린더의 전단과 후단의 실린더 압력을 측정한 것이다. 버킷을 접었을 때와 폼을 때의 2가지 경우로 쿠션 테스트를 수행하였고 포트 A는 암 실린더의 전단 압력이며 포트 B는 후단 압력을 나타낸다. Fig. 11은 암 실린더의 쿠션 테스트 시에 나타나는 암 실린더의 변위와 속도의 변화를 보여준다. 0~50초 sec 구간에서는 버킷

을 접은 상태의 결과이며 50~110초 구간은 버킷을 폼 상태에서의 결과이다.

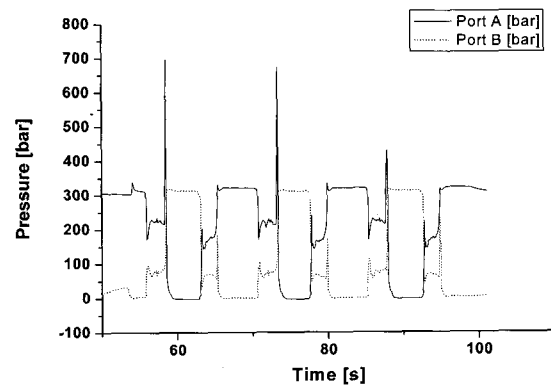
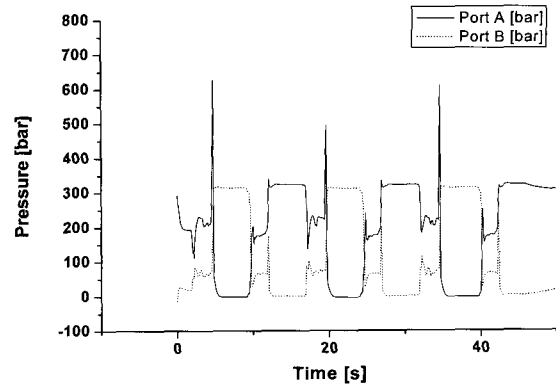


Fig. 10 The Pressure of the ARM Cylinder

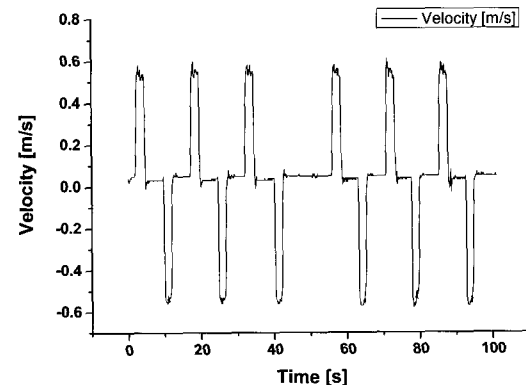
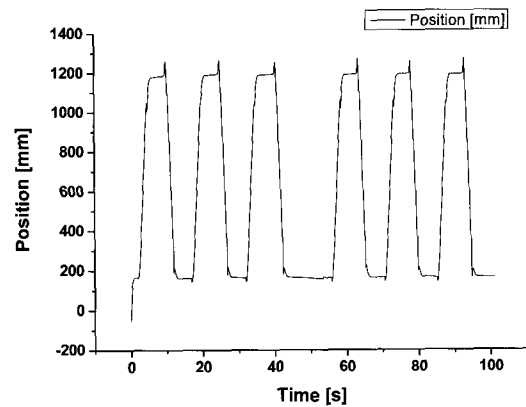


Fig. 11 Position and Velocity of ARM Cylinder

Fig. 12는 붐 실린더의 전단 압력을 측정된 것이다. 붐 실린더는 압과 버킷의 상태에 따라 총 3가지 경우로 측정되었다. 압과 버킷을 접은 상태(0~70초), 압을 펴고 버킷을 접은 상태(70~150초), 압과 버킷을 편 상태(150~250초)의 3가지 상태 변화에 대해서 쿠션 테스트 시에 붐 실린더의 좌측과 우측 압력을 측정 하였다.

Fig. 13은 붐 실린더의 쿠션 테스트 시에 나타나는 붐의 좌측 실린더의 변위와 속도의 변화를 보여 준다. 0~70초 구간에서는 압과 버킷을 접은 상태의 결과 이며 70~150초 구간은 압을 펴고 버킷을 편 상태에서의 결과이다. 그리고 150~250초 구간은 압과 버킷을 편 상태에서 측정된 결과이다.

T21, T30의 모델도 이와 같은 방법으로 실험을 수행 하였고 그에 따른 결과를 도출하여 시뮬레이터의 동작 시 표준이 되는 데이터베이스로 활용이 되었다. 또한 쿠션 테스트 외에도 산업 현장에서 가장 많이 사용되는 T21 모델의 경우 실제 땅을 파고 고르는 작업 시에도 각 실린더에 작용하는 압력과 위치, 속도의 변화를 측정하여 가능한 시뮬레이터가 다양한 환경을 유사하게 표현하도록 구현하였다.

#### 4. 굴삭기용 시뮬레이터 제작

Fig. 14는 파워 유닛과 컨트롤 패널로서 시뮬레이터를 동작시키고 제어하는 역할을 수행한다. Fig. 15는 제작된 굴삭기 시뮬레이터를 나타낸다.

시뮬레이터는 테스트 하고자 하는 모델의 압 또는 붐 실린더에 대해 등가 질량을 시뮬레이터 끝단에 달고 실차 실험으로부터 얻어진 실차의 실린더 데이터를 바탕으로 동일한 구동을 하도록 제작 되었다.

#### 5. 결 론

기존에는 실린더의 성능을 측정하기 위해서는 단지 실린더를 반복 작동함으로써 얻어지는 결과로 평가를 하고 이를 활용하였다. 하지만 이는 산업 현장과 같이 다양한 환경 조건이 존재하는 상황에 대해서는 고려가 전혀 되지 않아 실제 개발된 유압 실린더의 적용 시 그 성능을 전혀 보장 할 수가 없었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 실제와 유사한 환경을 제공하는 굴삭기용 시뮬레이터를 개발 하였다. 본 연구에서 구현된 기술은 다음과 같다.

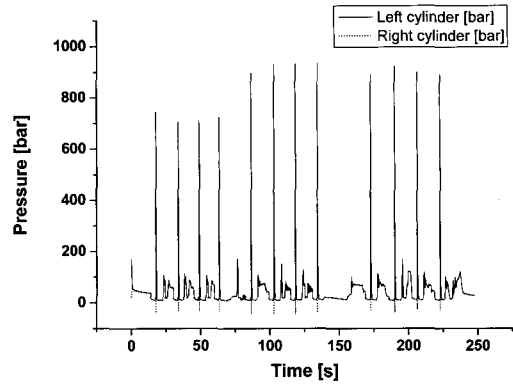


Fig. 12 The Pressure of BOOM Cylinder

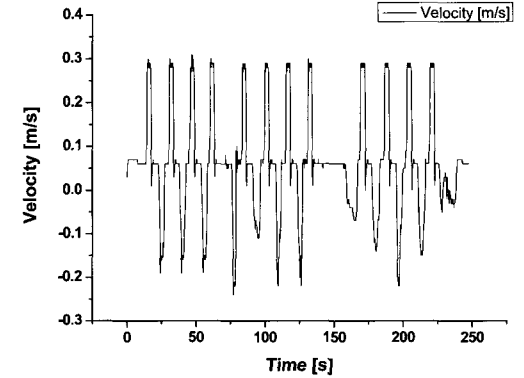
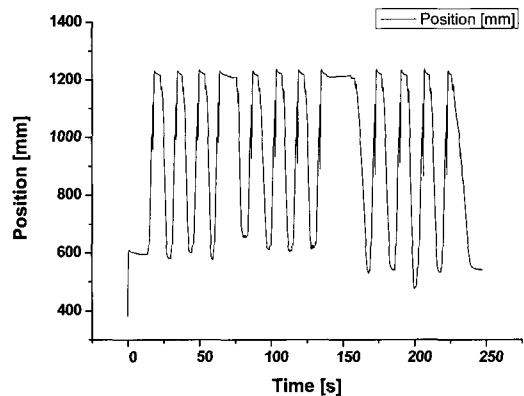


Fig. 13 Position and Velocity of BOOM Cylinder

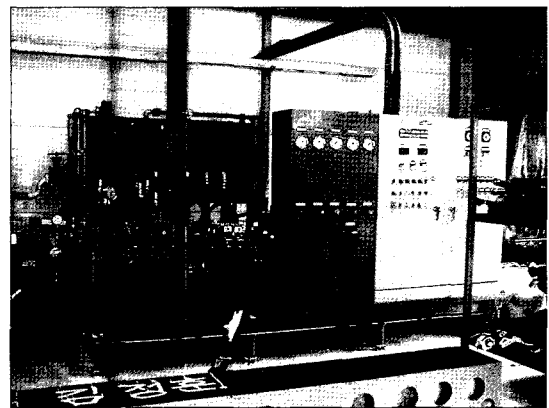


Fig. 14 Power Unit and Control Panel

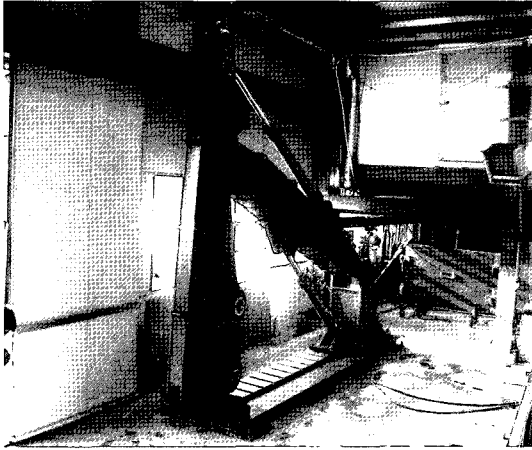


Fig. 15 Simulator for the Excavator

향후 다양한 데이터베이스구축을 통해서 굴삭기용 실린더의 성능 향상을 위해 많은 시험 환경 제공을 위한 연구가 수행 될 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 부품소재 종합지원 기술 과제인 “굴삭기용 유압실린더의 실차재현 Simulator 기술지원 개발” 과제의 연구비 지원으로 수행된 연구결과와 일부입니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 시뮬레이터의 유한요소 해석을 통해 안정성을 확보하였다. 10ton, 20ton, 30ton급의 굴삭기의 환경을 모두 구현함에 있어서 높은 안정성을 가지고 있었다.
  - 2) 실차와의 동일한 모션 및 부하 조건 재현을 위해 시뮬레이터와 실차의 동역학적 모델링을 하였고 그에 따라 시뮬레이터의 등가 질량을 산출하여 적용가능토록 하였다.
  - 3) 실차 환경을 재현하기 위해서 각 실차 모델의 쿠션 테스트에 대한 실린더의 위치, 속도, 압력변화의 데이터베이스를 구축 하였다.
  - 4) 실차와 동일한 환경과 유사한 움직임이 재현 가능한 굴삭기용 시뮬레이터를 개발 하였다.
- 1) 고정훈, 손권, 유창훈, “굴삭기를 위한 주행 시뮬레이터 프로그램,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집 , pp. 608~613, 1998.
  - 2) 권성수, 손권, 권병희, “굴삭기 시뮬레이터의 운동 시스템”, 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 554~559, 1998.
  - 3) Rollin Christianson, Eric P Hamkins, Thomas M Sagaser, “Perforamnce optimization of compact excavator with open-center hydraulic circuit”, SAE TP 972769, pp. 140~189, 1997.
  - 4) Taku Murakami, Michio Ota, “Precison angle sensor unit for construction machinery”, SAE TP 972782, 1997.