

PC 와 I/O 인터페이스 보드를 이용한 유압식 하역장치의 실시간 모의시험기 개발

이성래*

Development of a Hydraulic Loading System Real-Time Simulator Using a PC and I/O Interface Board

Seong-Rae Lee

Key Words: Hydraulic Loading System(유압식 하역장치), Real-Time Simulator(실시간 모의시험기), I/O Interface Board(입출력 인터페이스 보드)

Abstract

The hydraulic loading system real-time simulator using a PC and I/O interface board is developed to simulate the dynamic characteristics of hydraulic loading system in real time. The simulator receives the digital on-off control signals generated by the operator through the D/I channels, updates the state and output variables of the hydraulic loading system responding to the input signals and draw the moving pictures of the lift cylinder, lift arm and loading box on the PC monitor in real time. Also, the operator can observe the displacement and pressure of cylinder, the rotational angle, reaction force, and safety factors of lift arm representing the operation of hydraulic loading system through the PC monitor in real time. The real-time simulator can be a very useful tool to design industrial dynamic systems and feel the goodness of the system operation since the operator can observe the moving pictures of the operating system in real time as he operates the real time simulator.

기호설명

- b_l : 리프트 실린더 작동시의 점성마찰계수
- $C_{iss1}, C_{iss2}, C_{is1r}, C_{is2r}$: 리프트실린더 저속작동용 방향 변환밸브의 유량계수
- F_b : 리프트 실린더 로드의 끝점 반력
- F_{lr} : 리프트 실린더 작동시의 클롱 마찰력
- F_{O-left}, F_{O-up} : 리프트 암의 회전축 점(차량 프레임 연결점) O 에서의 반력의 수평좌측방향 성분 및 수직 상단방향 성분
- M_l : 리프트 실린더 작동시의 관성질량
- P_{lh}, P_{lr} : 리프트 실린더의 헤드측 및 로드측 압력
- P_s : 펌프 토출압력
- Q_{lfv}, Q_{lsv} : 리프트실린더 고속작동용 및 저속작동용 방향변환밸브로 빠져나가는 유량
- Q_{lh}, Q_{lr} : 리프트 실린더의 헤드측으로 유입되는 유량 및 로드측에서 밸브로 유입되는 유량
- Q_{lss1} : 공급포트에서 포트 1로 흐르는 유량
- Q_{lss2} : 공급포트에서 포트 2로 흐르는 유량
- Q_{ls1r} : 포트 1에서 귀환포트로 흐르는 유량
- Q_{ls2r} : 포트 2에서 귀환포트로 흐르는 유량
- Q_p : 펌프의 토출유량
- Q_{rv} : 릴리프 밸브로 빠져나가는 유량
- Q_{sv} : 지지대실린더 방향변환밸브로 빠져나가는 유량
- SF_{Ax}, SF_{Ox} : 리프트 암의 체인 연결점에서 거리 x 만큼 떨어진 상단보 및 리프트 암의 회전축 점에서 거리 x 만큼 떨어진 하단보의 안전계수
- S_y : 항복 강도

* 건양대학교 기계공학과

V_{lh}, V_{lr} : 리프트실린더 헤드측 및 로드측 제어부피
 V_{lho}, V_{lro} : $x_l=0$ 일 때의 리프트 실린더내 헤드측 및 로드측 초기 작동유 부피
 V_{lpipe}, V_{lrpipe} : 리프트 실린더 헤드측 및 로드측에 연결된 파이프 내의 작동유 부피
 V_s : 펌프 출구와 밸브 사이의 작동유 부피
 $W/2$: 적재함의 무게에 의해 한 개의 리프트 암에 걸리는 수직아래방향 부하
 x_A : 리프트 암의 체인 연결점의 x 좌표
 x_B, y_B : 리프트 암과 리프트 실린더 로드의 연결점의 x, y 좌표(리프트 암의 선회점을 기준으로 하여 왼쪽 및 위 방향으로 설정)
 x_i : 리프트 실린더 피스톤 변위(완전 수축시 0, 완전 팽창시 s_i)
 β : 작동유 체적탄성계수
 Ψ : 선분 CB(리프트 실린더)의 음의 x 축(오른쪽 방향 수평선)에 대한 반시계방향 각도
 $\sigma_{Ax-max}, \sigma_{Ox-max}$: 리프트 암의 체인 연결점에서 거리 x 만큼 떨어진 상단보 및 리프트 암의 회전축점에서 거리 x 만큼 떨어진 하단보의 합성 최대 수직응력(at $y=+-h/2$)
 $\tau_{Ax-max}, \tau_{Ox-max}$: 리프트 암의 체인 연결점에서 거리 x 만큼 떨어진 상단보 및 리프트 암의 회전축점에서 거리 x 만큼 떨어진 하단보의 합성 최대 전단응력(at $y=0$)

1. 서론

유압식 하역장치의 실시간 모의시험기⁽¹⁾는 하역장치의 동특성을 실시간으로 모사하는 것으로서 유압식 하역장치의 동특성을 미분방정식이나 대수적인 식으로 표현하여 그 해를 PC 내에서 실시간으로 구하고 그 결과를 동적영상이나 수치로써 PC 모니터에 나타내는 것이다. I/O 인터페이스 보드⁽²⁾에 내장되어 있는 디지털 입력포트(D/I)를 통해 사용자의 방향변환밸브 조작신호(리프트 암 저속작동밸브 조작신호, 리프트 암 고속작동밸브 조작신호, 지지대 작동밸브 조작신호)를 받아 들이고 입력신호를 참조하여 유압식하역장치의 상태변수나 출력변수를 계산하며 계산된 상태변수와 출력변수는 실시간에 맞춰서 PC 모니

터에 숫자로 나타내거나 하역장치의 움직이는 모습을 그림으로써 나타낸다. 유압식 하역장치의 구성부품인 유압공급장치, 리프트 암 저속작동용 방향변환밸브, 리프트 암 고속작동용 방향변환밸브, 지지대 작동용 방향변환밸브, 리프트 실린더, 지지대 실린더, 리프트 암 등에 대한 수학적 모델식을 유도하고 C-언어로 실시간 프로그램을 작성하여 모의시험기를 구성하였다. 실시간 모의 시험기에 의해 PC 화면에 나타난 작동 모습은 실제 하역장치를 작동시킬 때의 모습과 잘 일치하였다.

2. 유압식 하역장치의 수학적 모델

유압식 하역장치는 그림 1에 나타난 것처럼 차량 화물칸 뒤에 설치된 리프트 암을 유압의 힘으로 회전시켜서 체인으로 연결된 적재함을 차량 화물칸에 실거나 지면으로 내리는 작업을 수행한다. 리프트 암을 회전시키는 리프트 실린더는 화물칸 바닥에 수평으로 설치되어 있으며 적재함을 싣고 내릴 때 발생하는 차량의 흔들림을 방지하기 위한 지지대 실린더는 차량 오른쪽 끝에 수직 방향으로 설치되어 있다. 유압장치 회로도에는 그림 2와 같으며 유압공급장치, 리프트 실린더 저속작동용 방향변환밸브, 리프트 실린더 고속작동용 방향변환밸브, 지지대 실린더 작동용 방향변환밸브, 리프트 실린더, 지지대 실린더, 리프트 암 및 적재함 부하 등으로 구성된다. 유압식 하역장치에 대한 실시간 모의시험기를 제작하기 위해서는 먼저 유압식 하역장치에 대한 정확한 수학적 모델식⁽³⁾이 필요하다.

2.1 유압공급장치

유압공급장치는 작동유 탱크, 일정유량형 펌프, 릴리프 밸브 등으로 구성된다. 펌프에서 토출된 유량은 방향변환밸브 쪽으로 보내지며 릴리프 밸브에 의해 펌프의 토출 압력이 제한된다. 펌프 토출압력은 다음과 같은 연속방정식에 의해 구해진다.

$$dP/dt = [\beta/V_s][Q_p - Q_{rv} - Q_{lsv} - Q_{lrv} - Q_{sv}] \quad (1)$$

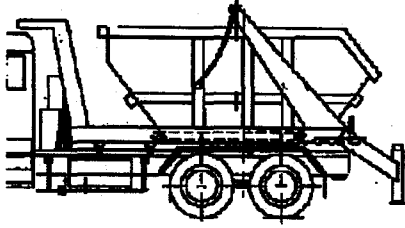


Fig. 1. The schematics of hydraulic loading system.

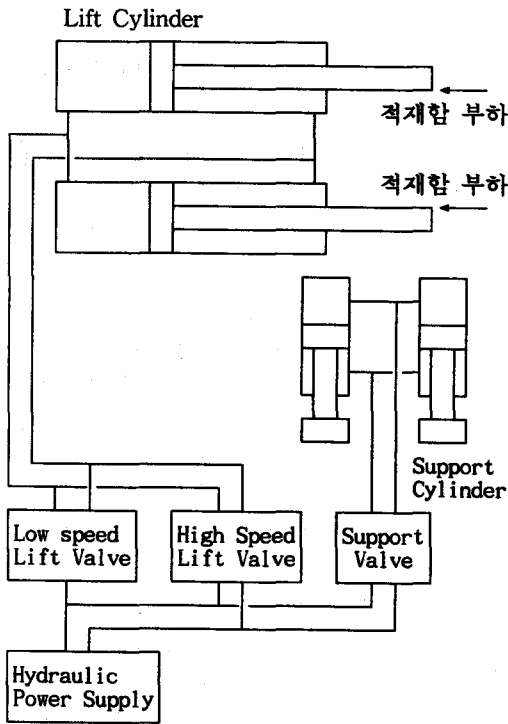


Fig. 2. The schematics of hydraulic system.

2.2 리프트 실린더 저속작동용 방향변환밸브

밸브를 통과하는 유량식은 크게 4개의 식으로 표현된다.

$$Q_{Iss1} = \text{sign}(P_s - P_{lh}) \cdot C_{Iss1} \cdot |P_s - P_{lh}|^{1/2} \quad (2)$$

$$Q_{Iss2} = \text{sign}(P_s - P_{lr}) \cdot C_{Iss1} \cdot |P_s - P_{lr}|^{1/2} \quad (3)$$

$$Q_{Is2r} = C_{Is2r} \cdot P_{lr}^{1/2} \quad (4)$$

$$Q_{Is1r} = C_{Is1r} \cdot P_{lh}^{1/2} \quad (5)$$

밸브를 통과하는 유량은 리프트 실린더의 헤드

측으로 유입되는 유량 Q_{lh} , 로드측에서 밸브로 유입되는 유량 Q_{lr} , 유압공급장치에서 밸브로 공급되는 유량 Q_{Iss} 과 다음과 같은 관계식이 성립된다.

1) 밸브위치: 전진 ,

$$Q_{lh} = Q_{Iss1}, Q_{lr} = Q_{Is2r}, Q_{Isv} = Q_{Iss1} \quad (6)$$

2) 밸브위치: 후퇴

$$Q_{lh} = -Q_{Is2r}, Q_{lr} = -Q_{Iss2}, Q_{Isv} = Q_{Iss2} \quad (7)$$

2.3 리프트 실린더 고속작동용 방향변환밸브

리프트 실린더 고속작동용 방향변환밸브의 유량식은 저속작동용 방향변환밸브의 유량식과 동일하며 단지 밸브 유량계수의 값이 다를 뿐이다.

2.4 지지대 실린더 방향변환밸브

지지대 실린더 방향변환밸브의 유량식은 저속작동용 방향변환밸브의 유량식과 그 형태가 동일하다.

2.5 리프트 실린더

리프트 실린더의 헤드측 및 로드측에 있는 작동유의 압력은 다음과 같은 유량보존식(Continuity equation)을 적분함으로써 구할 수 있다.

$$dP_{lh}/dt = [\beta/V_{lh}][Q_{lh} - A_{lh}dx/dt] \quad (8)$$

$$V_{lh} = V_{lh0} + A_{lh}x_1 + V_{lhpipe} \quad (9)$$

$$dP_{lr}/dt = [\beta/V_{lr}][-Q_{lr} + A_{lr}dx/dt] \quad (10)$$

$$V_{lr} = V_{lr0} - A_{lr}x_1 + V_{lrpipe} \quad (11)$$

리프트 실린더의 피스톤에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{lh}A_{lh} - P_{lr}A_{lr} - b_1(dx/dt) - F_{fr} - F_b = M_1(d^2x_1/dt^2) \quad (12)$$

2.6 지지대 실린더

지지대 실린더의 헤드측 및 로드측에 있는 작동유 압력을 구하기 위한 식과 피스톤의 운동방정식은 리프트 실린더의 경우와 비슷하므로 생략한다.

2.7 리프트 암의 반력

그림 1에 나타난 것처럼 리프트 암의 하단은 차량에 힌지로 연결되어 있으며 암의 상단은 적재함과 체인으로 연결되어 있고 리프트 암을 밀고 당기는 리프트 실린더 로드와는 힌지로 연결

되어 있다. 리프트 암에 대한 자유물체도와 힘의 평형식을 이용하여 리프트 암의 반력을 구할 수 있으며 물론 그 반력은 리프트 암의 회전 각도에 따라 변한다.

리프트 암과 리프트 실린더 로드 연결점 B 에서의 반력 크기는 다음 식과 같으며 그 방향은 리프트 실린더의 길이방향으로서 실린더를 압축 시키는 방향이다.

$$F_b = (W/2) \cdot x_A / [\cos(\Psi) \cdot y_B + \sin(\Psi) \cdot x_B] \quad (13)$$

리프트 암의 회전축 점(차량 프레임 연결점) O 에서의 반력은 다음 식에 의해 구해진다.

$$F_O = [F_{O-left}^2 + F_{O-up}^2]^{1/2} \quad (14)$$

$$F_{O-up} = (W/2) - F_b \cdot \sin(\Psi) \quad (15)$$

$$F_{O-left} = F_b \cdot \cos(\Psi) \quad (16)$$

2.8 리프트 암의 응력

리프트 암의 단면은 속이 빈 직사각형이지만 그 단면의 크기가 선형적으로 변한다. 적재함의 무게나 리프트 암의 하단 힌지부위에서 발생하는 반력에 의해 발생하는 굽힘 모멘트, 압축력, 전단력에 의해 리프트 암의 단면에 수직응력 및 전단응력이 발생한다. 자세한 식의 유도는 생략하기로 하며 리프트 암의 상단부위와 하단부위에서의 응력에 대한 안전계수는 다음 식으로 표현된다.

$$SF_{Ax} = S_y / [\max(\sigma_{Ax-max}, 2\tau_{Ax-max})] \quad (17)$$

$$SF_{Ox} = S_y / [\max(\sigma_{Ox-max}, 2\tau_{Ox-max})] \quad (18)$$

3. 실시간 모의시험기의 구성

유압식 하역장치의 실시간 모의시험기는 그림 3에 나타난 것처럼 디지털 신호를 발생시킬 수 있는 핸드 레버, D/I, D/O, A/D 변환기, D/A 변환기 등과 같은 입출력 장치를 내장한 I/O 인터페이스보드와 PC 로 구성된다. 그림 3에 나타난 여러개의 S/W 모듈은 하드웨어가 아니며 C-언어로 프로그램된 함수이다. 적분 모듈은 미분방정식을 풀기 위한 모듈이며 적분 알고리즘으로서 Fixed Step Runge-Kutta 4th order method⁽⁴⁾를 채택하였다.

I/O 보드의 D/I 채널은 유압식 하역장치를 작동시키는 밸브의 작동신호에 해당하는 핸드레버

신호를 실시간으로 받아들이며 작동신호에 따라 방향변환밸브가 작동하여 리프트실린더나 지지대 실린더가 작동하여 리프트 암을 회전시키며 이에 따라 적재함을 차량 화물칸에 실거나 지면에 내리는 모의 작동을 실행시킨다. 작동기의 작동은 컴퓨터 프로그램에 의해 모의작동되는 것이지만 실시간으로 작동결과가 계산되기 때문에 실제 하역장치의 작동과 같을 수 있다. 아울러 유압식 하역장치의 출력변수나 상태변수 중에서 중요한 변수는 PC 모니터에 수치로 나타내거나 하역장치의 움직이는 모습을 동적그림으로 나타냄으로써 사용자가 하역장치의 모의적 작동을 실시간으로 관찰할 수 있다. 여기서 사용된 I/O 보드는 PCL812 보드로서 16개의 A/D 채널(최대 변환 주파수 30 kHz), 2 개의 D/A 채널, 16개의 D/I 채널, 16개의 D/O 채널로 구성된다.

실시간 모의시험기의 구성에 사용된 프로그램의 순서도는 표1에 자세히 나타나 있다.

실시간 모의시험기를 구성하는 일련의 과정은 다음과 같다.

- (1) 유압식 하역장치의 부품별 수학적 모델식 유도
- (2) 부품별 모듈 프로그램 작성(C 함수로 작성)
- (3) 부품별 모듈 프로그램의 조합 및 실행파일 만들기
- (4) 프로그램의 실행

4. 실시간 모의시험기에 의한 모의실험 결과

그림 5, 그림 6, 그림 7 및 그림 8은 실시간 모의시험기를 이용한 모의실험결과를 그래프로써 나타낸 것으로 리프트 실린더 저속작동용 핸드레버를 사용하여 리프트 암을 회전시킨 결과이다. 실시간 모의시험기에 사용된 상수값은 표 2와 같으며 각 부품에 대한 상수값은 각각 제작업체에서 제공하는 규격표를 참고하였다. 적분시간간격은 실제 유압식 하역장치의 동특성을 정확하게 모사할 수 있는 시간간격이어야 하며 0.001 초이면 정확하다는 것이 시뮬레이션 결과로써 입증되었으며 또한 핸드 레버의 작동신호를 감지하는

샘플링 주기는 0.05초로 선정하였다.

그림 5는 시간에 따른 리프트 암의 회전각과 리프트 실린더의 피스톤 변위를 나타낸다. 리프트 실린더가 완전히 후퇴한 상태에서의 리프트 암의 각도는 47.55도이며 리프트실린더가 완전히 전진한 상태에서의 리프트 암의 각도는 최대 185.63도이다.

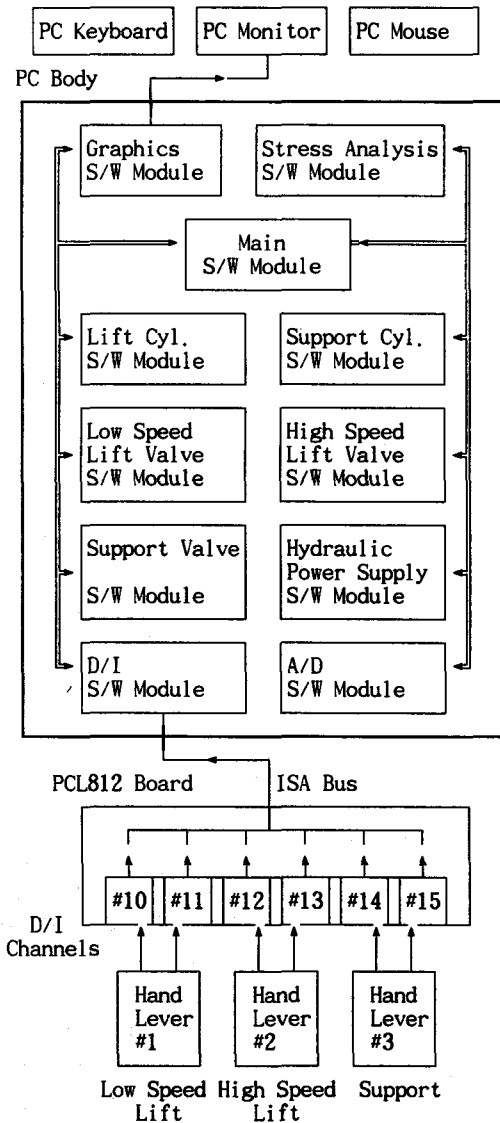


Fig. 3. The real-time simulator of hydraulic loading system

Table 1. Program flow of hydraulic loading system real time simulator.

include 문, define 문 정의, 전역변수 선언.
각종 함수 정의:
I/O 인터페이스 보드 초기화 함수.
A/D 샘플링 함수, D/I 입력 함수.
유압공급장치 함수.
리프트 실린더 저속작동용 방향변환밸브 함수.
리프트 실린더 고속작동용 방향변환밸브 함수.
지지대 작동용 방향변환밸브 함수.
리프트 실린더 함수, 지지대 실린더 함수.
적분 함수, 리프트 실린더 그리기 함수.
지지대실린더 그리기 함수, 리프트암 그리기함수.
리프트 암 응력해석 함수.
주함수 정의:
상수 및 변수 선언, 초기화 작업,
I/O 인터페이스 보드 초기화 함수 호출 등
do-while(1) loop 시작.
키보드입력키가 <ESC>이면 do-while(1) loop 탈출.
화면에 현재 절대시간(시간:분:초) 쓰기.
화면에 시뮬레이션 경과 시간(초) 쓰기.
while(1) loop 시작.
적분함수 호출.
시뮬레이션 상의 누적시간이 샘플링 간격시간과 같으면 while(1) loop 탈출.
리프트 실린더 변위에 따른 리프트 실린더 부하력과 리프트 암에 걸리는 반력 계산.
리프트실린더 저속작동용 방향변환밸브함수 호출.
리프트실린더 고속작동용 방향변환밸브함수 호출.
지지대 작동용 방향변환밸브 함수 호출.
유압공급장치 함수 호출.
리프트 실린더 함수 호출.
지지대 실린더 함수 호출.
while(1) loop 끝.
샘플링 간격시간만큼 시뮬레이션 경과시간 증가.
리프트 실린더 그리기 함수 호출.
지지대 실린더 그리기 함수 호출.
리프트 암 그리기 함수 호출.
리프트 암 응력해석 함수 호출.
중요한 상태변수나 출력변수를 파일에 쓰기.
A/D 샘플링 함수 호출. D/I 입력 함수 호출.
do-while(1) loop 끝.
마무리 작업.
주함수 끝.

그림 6은 시간에 따른 리프트 실린더의 헤드측 압력과 로드측 압력을 나타낸다. $t=5.4$ 초에서 적재함이 차량 화물칸 바닥에서 떨어져 상승하기 시작하며 이 때의 실린더의 헤드측 압력이 122 kgf/cm^2 까지 급격히 증가한다. 그 후 리프트 암은 시계방향으로 회전하며 $t=27.1$ 초에서 적재함이 지면에 닿으며 이 때의 로드측 압력은 259 kgf/cm^2 까지 상승한 후 급격히 감소한다. $t=37.2$ 초에서 적재함이 지면 바닥에서 떨어져 상승하기 시작하며 이 때의 로드측 압력은 304 kgf/cm^2 까지 급격히 상승한다. 그 후 리프트 암이 반시계 방향으로 회전하면서 $t=65.6$ 초에서 적재함이 차량 화물칸 바닥에 닿았으며 이 때의 헤드측 압력은 114 kgf/cm^2 까지 상승한 후 급격히 감소한다.

그림 7은 리프트 암의 회전각에 따른 리프트 실린더의 압축력과 리프트 암의 하단 힌지에서 반력을 그래프로 나타낸 것이다. 리프트 암의 회전각이 59.2 도일 때(적재함이 화물칸 바닥에 막 닿았을 때) 리프트 실린더의 압축력은 극대값 30438 kgf , 리프트 암의 하단 힌지에서 반력은 극대값 31396 kgf 이며 리프트 암의 회전각이 166.14 도일 때(적재함이 지면 바닥에 막 닿았을 때) 리프트 실린더의 압축력은 극대값 -51747 kgf , 리프트 암의 하단 힌지에서 반력은 극대값 54404 kgf 이었다.

그림 8은 리프트 암의 회전각에 따른 리프트 암의 상단 및 하단에서의 응력안전계수를 그래프로 나타낸 것이다. 리프트 암의 회전각이 59.2 도일 때 최소 안전계수는 암의 하단보에서 윗 부분에서 3.4 이었으며 리프트 암의 회전각이 166.14 도일 때 최소 안전계수는 암의 하단보에서 윗 부분에서 1.5 로 나타났다.

5. 결론

실제 유압식 하역장치를 제작하기 전에 설계의 타당성에 대한 확신을 주기 위해 실시간 모의시험기를 제작하게 되었다. 유압식 하역장치의 실시간 모의시험기는 PC 1대와 입출력 인터페이스 보드 1대로써 구성하였으며 실시간 모의시험기를 사용하여 하역장치의 작동 모습을 모니터 화면을

통하여 실시간으로 관찰하고 아울러 리프트 실린더의 헤드측 압력, 로드측 압력, 실린더 압축력, 리프트 암의 회전축에서의 반력, 리프트 암의 응력 안전계수 등과 같은 중요한 수치를 화면에서 볼 수 있도록 하였다. 유압식 하역장치를 직접 설계 및 제작한 중소기업체의 실무자는 설계 중에 실시간 모의시험기를 이용하였으며 모의시험기의 작동결과는 실제 하역장치의 실험결과와 비슷하게 나타났다.

후기

본 논문은 중소기업청, 충남도청, (주)한빛특장, 건양대학교에서 지원한 산학 컨소시엄 연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

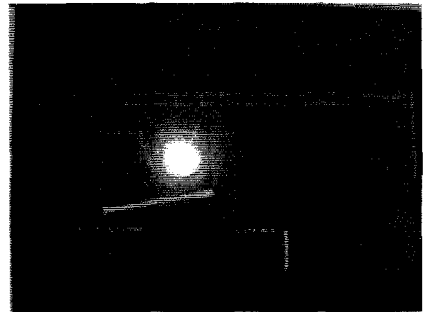


Fig. 4. The simulation results indicated on PC monitor of hydraulic loading system real-time simulator.

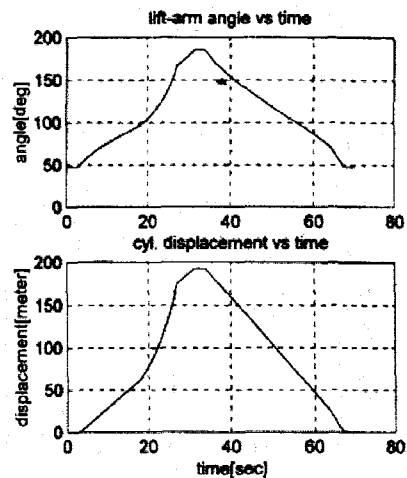


Fig. 5. The simulation results of real-time simulator (리프트 암의 회전각도와 리프트 실린더 변위).

참고문헌

(1) 이성래, "DSP카드 및 PC에 의한 유압서보장치의 실시간 모의시험기 개발," 대한기계학회 논문집 제23권, 제10호, pp.1702-1708, 1999.10.

(2) User's Manual, PCL-812PG Data Acquisition and Control Card, Advantech Co.

(3) H.E. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1967.

(4) J.L.Melsa, Computer Programs for Computational Assistance, McGraw-Hill Inc., 1970.

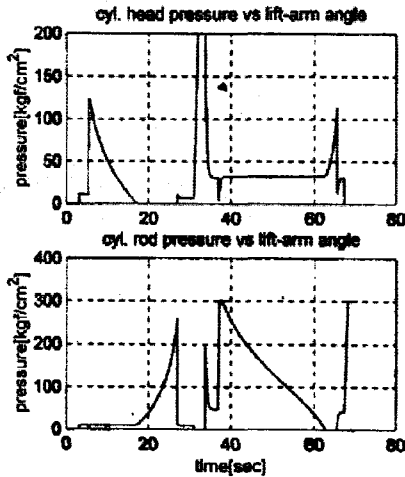


Fig. 6. The simulation results of real-time simulator (리프트 실린더의 헤드측 및 로드측 압력).

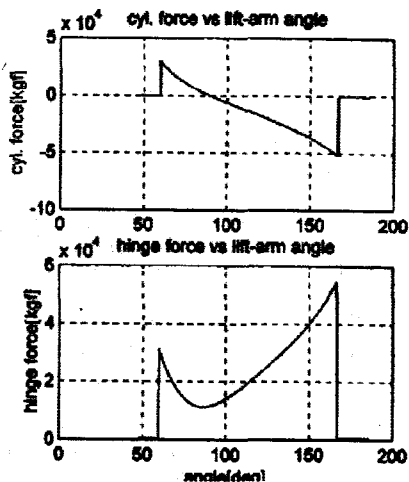


Fig. 7. The simulation results of real-time simulator (리프트실린더추력 및 리프트암의 하단힌지반력).

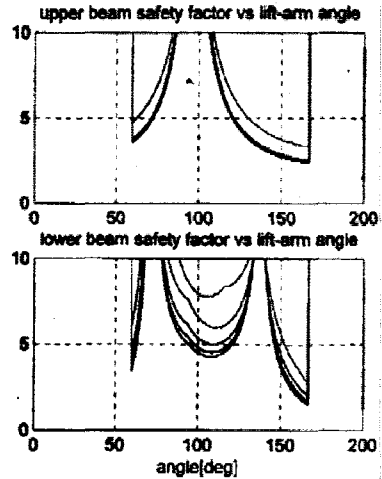


Fig. 8. The simulation results of real-time simulator (리프트 암의 상단 및 하단 단면의 안전계수).

Table 2. The system constants of real-time simulator of hydraulic loading system

Sampling interval:	0.05 sec
Integration method:	Runge-Kutta 4th order
Integration interval:	0.0005 sec
Pump flow rate:	1058 cm ³ /sec
Relief valve setting pressure:	260 kgf/cm ²
Hydraulic oil bulk modulus:	12000 kgf/cm ²
Slow lift valve flow coefficients:	253 (cm ³ /sec)/(kgf/cm ²)
Lift cylinder stroke:	192.5 cm
Lift cylinder piston diameter:	18 cm
Lift cylinder rod diameter:	9 cm
Lift arm rotational radius:	300 cm
Maximum Load:	23,000 kgf
Yield strength of lift arm material:	4400 kgf/cm ²