

대부하 구동/제어 시스템 성능예측 프로그램을  
이용한 제어시스템 단순화 연구

The Study on Control System Simplification of Underdeveloping  
Heavy-Load Driving System Using Developed  
Performance-estimation program

최근국\*, 이만형\*\*, 윤강섭\*\*\*, 서동연\*\*\*\*, 박상우\*\*\*\*

\*부산대학교 대학원/삼성항공 (Tel:0551-60-6743; Fax:0551-60-6827)

\*\*부산대학교 제어기계공학과 (Tel:051-510-1112; Fax:051-512-9049)

\*\*\*부산대학교 대학원 (Tel:051-510-1456; Fax:051-5129835)

\*\*\*\*삼성항공 (Tel:0551-60-6743; Fax:0551-60-6827)

**Abstracts** In this study, underdeveloping heavy-load driving servo control system, which are composed of controller, electro-hydraulic servo-valve, hydraulic motor, reduction gear box, turret slew bearing and turret structure, are investigated to simplify the control system. To estimate the effect of each component, modeling and simulation of linear and nonlinear system are carried out. In the first stage, to prove the reliability of performance estimation program, simulation results are compared with experimental results. In the second stage, the effect of each component of control system is evaluated and then a simplified control system is suggested.

Keywords: Heavy-load, Electro-hydraulic, Servo control system, control system simplification

1. 서론

전기유압 서보밸브를 이용한 서보제어시스템은 그 특성상 수치제어 공작기계 및 비행제어, 대형부하의 고출력 화기제어 시스템 등에 적용되고 있다.

전기유압 서보제어시스템은 고유의 비선형성으로 인하여 제어 장치 설계에 어려움이 있고 유압동력공급장치 등 복잡한 부수장치의 구비를 수반하며, 유압동력 변환시 에너지 효율저하 등으로 인하여 적용범위가 다소 좁아지고 있으나 제한된 공간하에서 대부하의 고출력 정밀제어를 요구하는 분야에서는 작은 제적의 액츄에이터로 고출력을 실현시킬 수 있는 유압서보 제어시스템에 지속적으로 사용되어 오고 있다.

본 연구에서는 대부하 구동/제어 시스템에 대한 수학적 모델을 확립하고 동특성을 정성적으로 분석하였다. 또한 비선형 실제 시스템의 거동을 조사하기 위하여 시스템에 내재되어 있는 비선형 요소들을 가능한 수학적 모델로 구성하였다. 실제 시스템과 유사한 거동을 나타내는 시뮬레이션 프로그램을, 현재 개발 중인 대부하 시스템에 적용하여 개발장비의 시험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 성능예측 가능성에 대한 신뢰성을 검증한 후 개발 중인 장비의 구동/제어시스템의 단순화를 위한 구동제어 구성요소들의 효과를 정성적으로 분석하여 시스템의 단순화 및 성능향상방안을 제시하고자 한다.

2. 시스템 분석 및 모델링

본 연구의 대상인 대부하 구동제어 시스템은 구동제어기, 유압증폭부, 유압구동부, 부하로 구성되며 시스템의 개략적인 구성도는 그림 1과 같다.

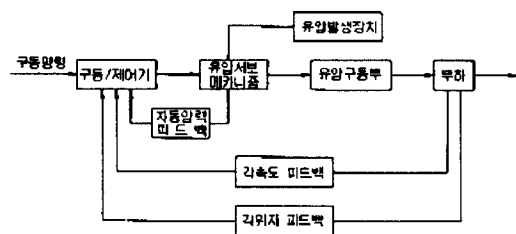


그림1. 대부하 구동제어시스템 구성도

2.1 선형 모델링 및 동특성 분석

2.1.1 선형 모델링

대부하 구동제어 시스템의 각 구성품별 수학적 모델링 결과를 종합하고 대부하 구동제어 시스템의 관성 및 동적 거동에 사용된 유압서보밸브의 시정수가 0.0035 sec인 점을 고려하여 서보밸브를 1차 지연요소가 아닌 비례제어 요소로 모델링하여 그림 2와 같이 블럭다이어그램을 구성할 수 있다. 개발 중인 대부하 구동/제어 시스템에 사용된 부품들의 특성치를 모델링하여 입력할 경우 그림2는 그림3과 같은 수학적 모델이 된다.

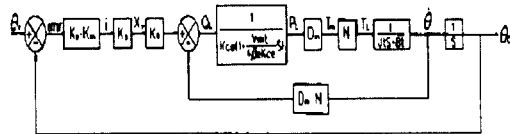


그림2. 대부하 구동제어시스템 블럭다이아그램

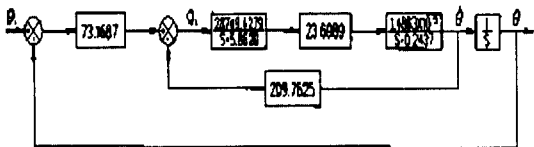


그림3. 대부하 구동제어시스템 모델 블럭다이아그램

### 2. 1. 2 동특성 분석

선형 공칭시스템에 대한 동특성분석을 위해 먼저 시간응답 영역에서의 과도 응답을 분석하고 다음으로 주파수영역에서 주파수 응답 특성을 분석하여 대부하 구동/제어시스템의 동특성을 파악하고자 한다.

#### 2. 1. 2. 1 과도응답 특성

그림 3의 모델 블럭다이아그램에서 선형 공칭시스템의 과도응답 특성을 분석하기 위해 우선 페루프시스템의 근과 고유진동수를 고찰하고, 개루프 게인의 변화에 따른 근의 궤적을 고찰하여 동특성 변화 경향을 파악하고, 스텝입력에 대한 응답을 고찰하여 대부하 구동/제어 시스템의 과도응답특성을 분석하고자 한다. 우선 페루프 극점은 3개로서 실수근인  $-0.3489$ 와 복소공액근인  $-2.8784 \pm 45.9922i$ 로서 과도응답은 실수근인  $-0.3489$ 에 의해 지배적인 영향을 받으므로 시스템의 각위치 응답은 오버슈트 없이 명령을 추종하는 1차 지연요소의 응답이 예상된다. 따라서 시스템의 고유 각진동수 ( $46.08 \text{ rad/sec}; 7.33 \text{ Hz}$ )와 감쇠계수 ( $0.0625$  수준으로 단순 2차 시스템의 경우 감쇠계수 범위가  $0.48 \sim 0.52$ 임을 감안할 때 매우 작음)는 선형공칭 시스템의 과도응답에 거의 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.

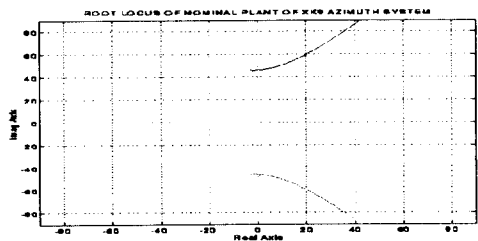


그림 4. 선형 공칭시스템의 근궤적 선도

개루프 게인의 변화에 따른 근궤적은 그림 4와 같고, 3개의 극점은 시스템이 안정한계(개루프 이득  $K < 17.5$ ) 내에 있을 때 개루프 게인의 증가에 따라 실수근은 S-평면에서 '-' 방향으로 이동하고 복소 공액근은 S-평면에서 '+' 방향으로 이동하게 되어

점점 오버슈트가 있는 2차 지연 시스템의 과도응답 형태로 동특성이 변해 갈 것으로 추측된다.

개루프 이득이 적을 경우 ( $K < 5$ )에는 실수근의 영향이 크므로 1차 지연요소의 응답형태가 나타나고, 큰 경우 ( $K > 9$ )  $-2.8784 \pm 45.9922i$ 에서 출발하는 복소공액 극점의 영향을 받아서 오버슈트가 있는 2차 지연시스템의 응답형태가 예상된다.

선형 공칭시스템에 대한 응답은 그림 5와 같고 근궤적선도의 분석 내용과 같이 공칭시스템의 응답(그림 5-a)은 1차 지연 요소의 형태로 오버슈트가 없고 정상상태 오차는 0 (Zero)가 되고, 정상상태 도달시간이 16 초 정도로 개발목표 (7.5초) 대비 매우 느린 응답을 보여주고 있다.

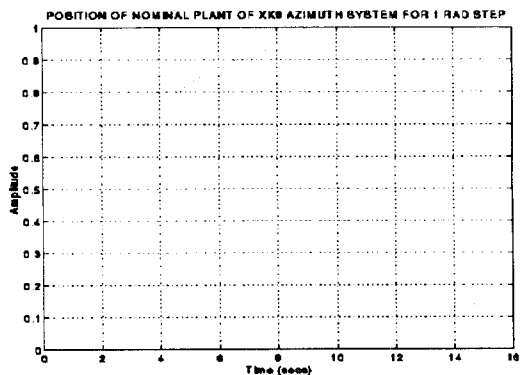


그림 5-a. 선형 공칭시스템의 스텝입력에 대한 응답

개루프 게인을 5로 했을 경우 응답(그림 5-b)은 1차 지연요소의 형태는 유지하나 초기에는 복소공액극점의 영향으로 응답이 다소 요동하고 있음을 볼 수 있다. 아직 오버슈트는 없고 정상상태 오차는 0, 정상상태 도달시간은 3초 정도로 개발 목표대비 빠른 응답을 보여준다.

개루프 게인을 9로 했을 경우 응답(그림 5-c)는 감쇠고유진동수로 요동이 확연히 드러나고 있으며 정상상태 안정이 보장되지 않고 있음을 알 수 있다.

그림 5를 분석한 결과 제어시스템 설계시 비례게인의 증폭한계를 5 이하로 할 필요가 있음을 알 수 있다.

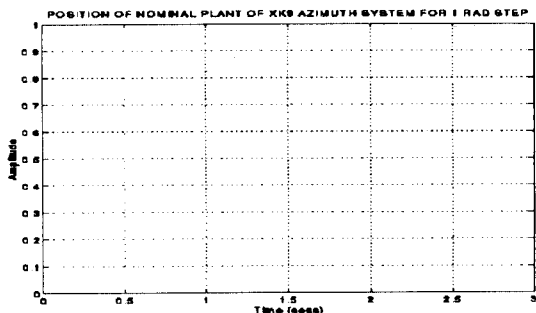


그림 5-b. 선형 공칭시스템의 스텝입력에 대한 응답

#### 2. 1. 2. 2 주파수 응답특성

그림 6은 페루프 전달함수의 보드선도로서 그림으로부터 DC 게인 ( $M$ )은 0 dB로서 정상상태 오차는 0이됨을 알 수 있고, 대

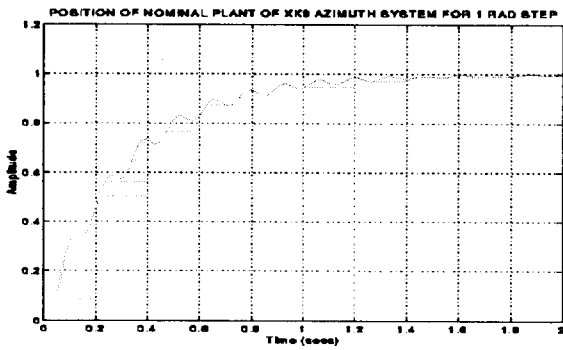


그림 5-c. 선형 공칭시스템의 스텝입력에 대한 응답

역폭  $\omega_b = 0.4 \text{ rad/sec}$  (0.064 Hz) 중량 16 톤, 관성량 90,000 kg-m<sup>2</sup>를 고려할때, 타당한 값으로 사료된다. 공진최대값(M)은 시스템 고유의 저감도로 인해 -25 dB 수준으로 시스템의 동특성에 영향을 주지 못하고 있다. 감쇠고유 진동수 (45.99 rad/sec)는 감쇠계수가 적어서(0.0625) 거의 시스템 공진주파수 (46.08 rad/sec)에 근접해 있으며 선회서보 시스템은 본질적으로 매우 안정된 특성을 보유하고 있다.

분리도(COR)는 공진이후 -80 dB/dec로 일반적인 설계기준<sup>[3]</sup> -60 dB/dec를 초과하고 있으므로 제어시스템 설계시 그 이상으로 높여줄 필요가 있다.

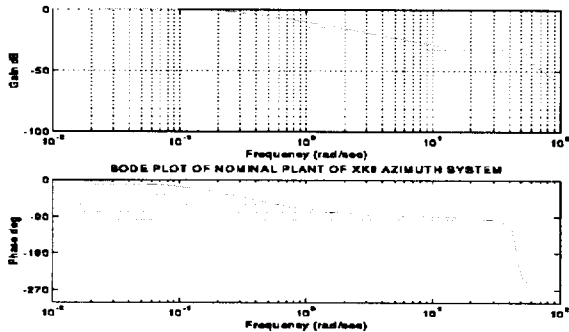


그림 6. 선형 공칭시스템의 페루프전달함수의 보드선도

그림 7은 개루프 전달함수의 보드선도로서 그림으로 부터 게인교차 주파수  $\omega_g = 0.35 \text{ rad/sec}$  (0.056 Hz) 이고 위상교차 주파수는 46.1 rad/sec (7.34 Hz)이며 이득여유는 17.5 dB이고 위상여유는 89.9° 로서 이러한 이득여유와 위상여유는 모델링 오차와 외란에 대한 상대안정도를 보장해주는 설계기준치<sup>[3]</sup> (이득여유의 경우 2~10 dB, 위상여유의 경우 30~60°)를 넘고 있으므로 이에대한 안정도는 보장된다고 판단할 수 있다.

## 2.2 비선형 모델링 및 성능예측

본 연구대상인 대부하 구동/제어 시스템에 대한 비선형 모델링은 당사와 부산대학교 기계기술 연구소 메카트로닉스실과 수행한 산학 공동연구 과제를 통해 개발되어 실험모델(TEST-BED)의 구동제어 알고리즘 개발로 구현되어 왔으므로 모델링에 대한 상세한 내용은 본문에서는 생략하기로 한다. (상세내용은 참고 문헌 [1] [2] 참조)

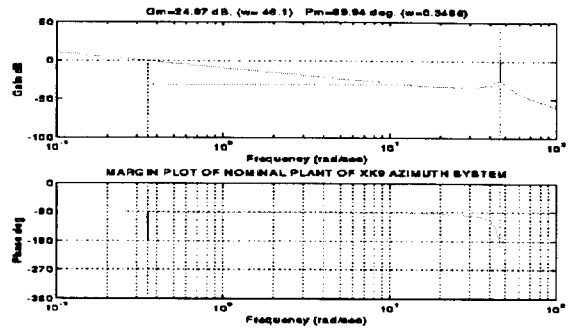


그림 7. 선형 공칭시스템의 개루프 전달함수에 대한 보드선도

현재 개발중인 대부하 구동/제어 시스템에 내재되어 있는 비선형 요소 파라메타들은 기초연구용 실험모델, 선행모델 개발실험을 통해 도출된 파라메타들을 사용하였으며 그 대표적인 파라메타 값들은 표1과 같다.

표 1. 구동/제어 시스템의 파라메타

| 변 수 명             | 실험값, 측정값, 추정값     |
|-------------------|-------------------|
| 제어기 비례게인          | 6.5               |
| 제어기 적분게인          | 0.0003            |
| 속도 피드백 게인         | 0.02              |
| 속도 센서 피드백 게인      | 10.8575           |
| 압력 피드백 게인         | 5.454545...       |
| 압력센서 피드백 게인       | 0.0000121         |
| 압력한계 (BYPASS V/V) | 2740 psi          |
| 서보 앰프 게인          | 3.2               |
| 서보밸브 스톱 최대변위      | 0.035 in          |
| 서보밸브 시정수          | 0.0035            |
| 서보밸브 전류한계         | ± 10 mA           |
| 부하 점성감쇠 계수        | 5,395 N-m-sec/rad |
| 부하 클램프할 토크        | 7,143 N-m         |

표1에 표시된 파라메타들을 이용하여 산학연구 과제를 통해 개발된 성능예측 프로그램의 시뮬레이션 결과와 구동실험 결과를 비교하면 그림 8(a, b, c)와 같이 나타난다.

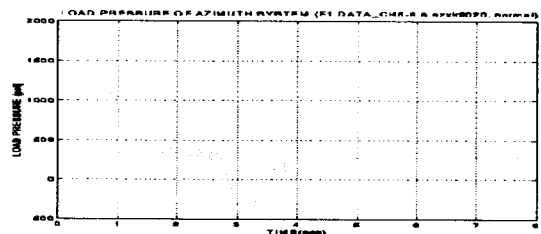


그림8-a 부하 압력 선도

부하압력선도(그림 8-a)에서 보는 바와 같이 구동기간 중에는 유사하게 변화를 보이다가 안정구간에 들어가면서 압력이

크게 변화/이탈하는 것을 볼수 있는데, 그 원인이 아직 명확히 파악되지 않고 있는 부분으로 좀더 연구해야할 부분으로 판단된다. 추정되는 원인으로는 본장비에 사용된 유압동력 공급장비가 장비내 탑재형으로 고밀도/소형 유압발생장치로 소요동력 절감을 위해 마력일정형의 펌프를 사용하고 있어 이부분의 동특성 반영이 미흡하여 모델링 오차가 상당히 있을 것으로 판단되고 있다. 또한 펌프의 맥동을 흡수하기 위해 사용된 축압기의 영향도 있을 것으로 판단된다.

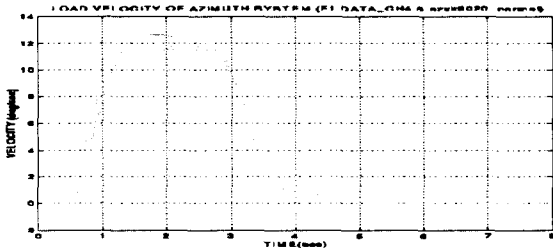


그림8-b 부하 속도 선도

속도선도에서도 피크치 부분에서 상당한 차이가 나고 있는데 이부분 또한 제한 저유량(8.5 GAL=32.2 리터), 고속의 펌프회전(5,000 RPM)으로 인해 작동유 속에 기포 혼재등 가시화 되지 원인 및 맥동흡수용의 축압기 영향도 함께 미치고 있는 것으로 추정된다.

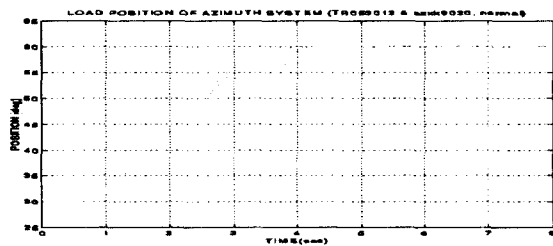


그림8-c 부하 위치 선도

위치선도 에서도 정상상태 도달부분에서 시뮬레이션 결과가 실험결과에 비해 조금 늦게(0.25초) 도달되고 있음을 볼수있는데 앞에서 설명한 원인들에 의해서 나타나는 결과라고 판단된다.

### 3. 구동/제어시스템 단순화 연구

#### 3.1 제어기 각요소의 영향분석 및 고찰

기제착되어 적용된 제어기 부분에서 당장비의 제어목적에 부합되지 않는, 기능이 불투명한 요소들이 포함되어 있는데, 이는 개발 초기단계에서 타장비의 제어기 부분을 모방 사용한 결과이다. 본 연구에서는 이러한 요소들의 영향을 정성적으로 분석해보고 불요하다고 판단되는 요소는 삭제하여 구동/제어 시스템을 단순화시키고자 한다.

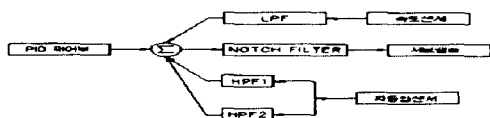


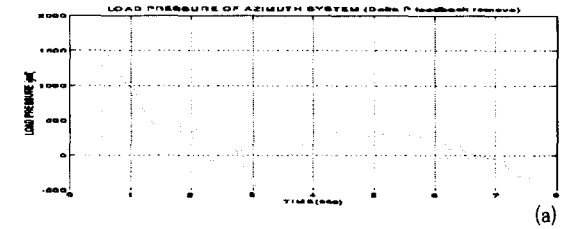
그림 9 서보밸브 입력전류 영향 요소

서보밸브 입력전류에 영향을 주고 있는 요소들은 그림 9와 같은데 각각의 요소들에 대한 영향을 시뮬레이션을 통해 알아보면 실제장비 부품들에서 발생하는 NOISE 성분에 의한 영향을 알 수는 없었으나 구조적으로 필요한 부품인지에 대한 정보는 확인할 수 있으리라고 사료된다.

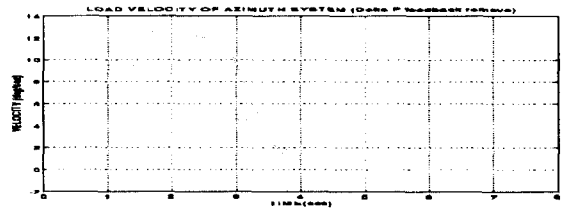
#### 3.1.1 차동압 피드백의 영향분석 및 고찰

차동압피드백의 목적은 시스템의 감쇄를 증가시켜 압력의 맥동현상을 방지하기 위함으로 구동환경이 매우 다이내믹한 시스템에서는 매우 효과가 있을 것으로 사료되나 본 개발장비의 구동환경은 매우 정적인 상태에서 단축(SINGLE AXIS) 스텝 입력 형태의 명령이 주어지므로 크게 효과가 없을 것으로 판단되어 먼저 시뮬레이션에서 차동압 피드백 부분을 제거하여 보았다.

그 결과 선도는 그림 10(a, b, c)와 같다. 그림 8(a, b, c)와 비교하여 전혀 변동이 없음을 알 수 있다. 따라서 실제 실험 장치 자체에서 발생하는 NOISE LEVEL 문제 이외에 구조적으로 구동특성에 영향을 영향을 주고 있다고 보기는 어렵다.



(a)



(b)

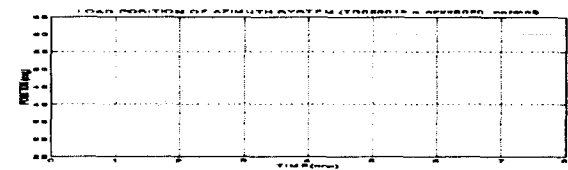


그림9 부하압력 피드백 삭제후 시스템 변수 선도 (c)

#### 3.1.2 노치(Notch) 필터의 영향분석 및 고찰

노치필터는 일정주파수 부분에 집중된 신호를 줄이기 위한 목적으로 사용되고 있다. 본 개발장비의 경우에는 선형시스템 동특성 분석에서 분석한 바와 같이 원점(ZERO)에 근접한 실수근의 영향으로 시스템의 고유진동수(7.33 Hz)에서 공진최대값이 -25 dB 수준으로 시스템의 동특성에 영향을 주지 못하고 있으므로 기타 전자 부품 내부의 문제가 없다면 삭제하더라도 큰 문제가 없을 것으로 사료된다. 노치 필터 제거시 시뮬레이션결과 및 실험결과는 그림 11(a, b, c)와 같다.

(지면관계상 생략, 그림 10-a, b, c와 변동없음)

### 3. 1. 3 LPF의 영향분석 및 고찰

LPF는 고주파수 부분의 신호를 줄이기 위한 목적으로 사용되고 있으나 본 개발장비의 선회구동시스템에서 LPF의 사용여부는 속도센서의 선정과 관련이 있을 것으로 본다. 속도 센서로는 TACHOMETER (Venitron社 제품, 품번:12561684)를 쓰고 있는데 고주파 부분의 잡음이 문제(전자적 측면에서)가 되지 않을 경우 LPF 부분의 제거도 가능할 것으로 판단된다. LPF 제거시 시뮬레이션 결과 및 실험결과 비교는 그림 12 (a, b, c)와 같다 (지면관계상 생략, 그림 10-a, b, c와 변동이 없음)

## 4. 결 론

이상의 이론해석 및 실험결과와 비교연구를 통해 우선 연구 대상 장비인 대부하 구동/제어 시스템의 성능을 추정할 수 있는 시뮬레이션 툴 (TOOL)을 활용할 수 있다고 확인 하였고, 이를 이용하여 현재 개발중인 장비의 구동제어 시스템을 단순화 할 수 있는 가능성을 다음과 같이 제시하고자 한다.

첫째, 노치 필터를 제거하고 실험을 수행하여 제거전 실험결과와 비교를 통해 성능상의 문제가 없는 경우 삭제,

둘째, 차동압 피드백 부분을 제거하고 실험을 하여 제거전과 비교하여 성능상 문제가 없는 경우 삭제,

셋째, 속도센서 피드백 부분의 LPF를 제거하고 실험을 하여 제거전과 비교하여 성능상 문제가 없는 경우 삭제

위 3가지 제시안에 대한 실험을 추가 진행하여 제거후 성능상의 문제가 제기되지 않을 경우 구동시스템을 단순화하여 장비에 적용할 수 있다. (추가 시험은 '96년 말경에 실시예정)

## 참 고 문 헌

- [1] H. E. Merritt, "Hydraulic Control System", John-Wiley & Sons. 1967.
- [2] 이만형, "대부하 구동/제어시스템 기초연구", 중간보고서, pp2~12, pp30~90, 1991.
- [3] 이만형, "대부하 구동/제어시스템 기초연구", 최종보고서, pp2~38, 1991.
- [4] 김종식, "선형제어 시스템공학", 청문각, pp186~188, pp208~211, 1991.