

구동 링크기구 최적설계 분석 및 불균형 대부하 고저 구동/제어 성능추정 프로그램 개발

Optimal Design Analysis of Driving Link-Mechanism and Development of Control Performance Estimation Program for Unbalance Heavy-Load Elevation Driving System.

최근국(삼성항공), 이만형(부산대 공대), 안태영(국방과학연구소)

K. K. Choi(SAMAUNG AEROSPACE), M. H. Lee(PUSAN Univ), T. Y. Ahn(Agency of Defence Development)

ABSTRACT

The unbalance heavy-load elevation driving systems are composed of rotating link-mechanism and hydraulic cylinder which actuates elevation and compensates the static unbalance moment of supporting mechanism. Control and compensation of gun driving is very difficult because these mechanism imply highly nonlinearities due to hydraulic fluid characteristics and mechanical rotation of link-mechanism. In this study, through the analysis of manufactured link-mechanism, the optimal link-mechanism design of the elevating system is suggested. Also to estimate the control performance of the unbalance heavy-load elevation servo-control driving system, modeling and simulation of the system are carried out. To prove the reliability of performance estimation program, simulation results are compared with the experimental results. Both results are similar, therefore this program will be helpful to study the control performance improvement of the system.

Keywords: Heavy-load(대부하), Electro-hydraulic(전기-유압식), Servo control system(서보 제어 장치), Elevation Driving Link-Mechanism(고저구동 기구 메카니즘)

1. 서론

불균형 대부하 고저구동 메카니즘은 고저평형실린더와 부하를 지지하고 구속하는 회전-링크기구로 구성되어 있다. 구동동력으로 유압동력을 사용하며 전기-유압 서보 제어 시스템 고유의 비선형성으로 인하여 제어장치 설계에 어려움이 있다. 또한 고저구동장치의 큰 특징은 부하의 지지구조상 정적 불균형 모멘트가 크게 발생하고 있어 이를 상쇄시키기 위한 평형 메카니즘이 부가적으로 요구되고 있다. 평형메카니즘은 고저평형실린더에 복동/일체형으로 부착된 평형실린더부와 유공압 축압기로 구성되어 있는데 이에 대한 연구는 참고문헌[7]에 잘 분석되어 있다. 본 연구에서는 이미 시제가 제작되어 시험중인 고저구동 링크-메카니즘 분석을 통하여 최적설계 방안을 도출하고, 또한 대부하이면서 여러가지 비선형 요소를 내포하고 있는 고저구동/제어 메카니즘에 대한 수학적 모델을 도출하여 실제 시스템과 유사한 거동을 나타내도록

시뮬레이션 프로그램을 개발하고자 한다. 성능예측의 신뢰도를 높이기 위하여 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 신뢰성을 높였다. 본 연구에서 개발 완료되는 시뮬레이션 프로그램을 잘 활용한다면 고저구동/제어 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 좋은 TOOL이 될 것으로 기대한다.

2. 시스템 분석

2.1 시스템 개요

본 연구의 대상인 대부하 구동제어 시스템은 구동/제어부, 유압증폭부, 유압구동부, 평형메카니즘부, 구동부하부로 구성되어 개략적인 블럭구성도는 그림 1과 같다.

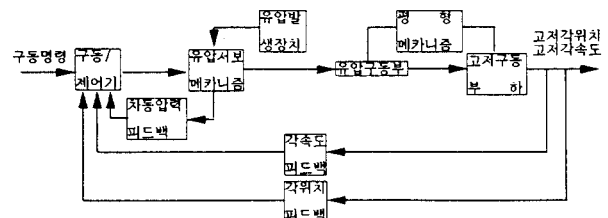


그림1. 불균형 대부하 고저구동/제어시스템 구성도

2.2 고저구동 기구해석

2.2.1 고저구동에 따른 모멘트암의 변화

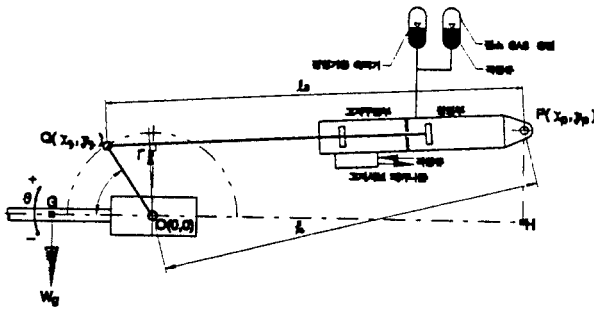


그림2. 대부하 고저구동 링크메카니즘 개념도

그림 2에서

$$l_{\theta} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2} \quad (1)$$

만약 부하가 θ 만큼 회전할때 Q점의 좌표(x_q, y_q)는

$$x_q = R \cos(180^\circ - \angle GOQ - \theta) = -R \cos(\angle GOQ + \theta) \quad (2)$$

$$y_q = R \sin(180^\circ - \angle GOQ - \theta) = R \sin(\angle GOQ + \theta) \quad (3)$$

고저구동에 따른 모멘트-암(moment-arm)의 길이는 다음과 같이 구할수 있다.

$$r = h \cdot \sin \angle OPQ \quad (4)$$

시제 제작된 고저구동 링크메카니즘의 파라메타는 표 1과 같고 이에 대한 모멘트 암(ARM) 길이의 변화를 고저구동각에 대하여 그려보면 그림 3과 같다. 그림3에서 보듯이 전구동 고각범위에서 암의 길이가 중심각에서 최대치이며 60° ~ 70° 구간에서 변화량이 심함을 알 수 있다. 이를 개선하기 위하여 전체 구동고각범위에서 암길이 변화량을 최소화 할수 있는 목표함수를 (5)식과 같이 정하고 이를 만족하도록 설계파라메타를 변화시켜 보았다. 시뮬레이션 결과 표 1과 같은 파라메타를 얻었으며, 이에 대한 암길이의 변화를 그려보면 그림4와 같이 개선되어 있음을 알 수 있다.

표 1. 구동 링크메카니즘 파라메타

변 수 명	설계값	제안값
구동고각범위	-2.5° ~ 70°	-2.5° ~ 70°
link arm length	406.0 mm	406.0 mm
부하/링크 사잇각	57°	53°
고정힌지점 좌표	(1780.0, 450.0)	(1780.0, 428.0)

$$J = \sum (R - r_i)^2 \quad (5)$$

r_i : 구동범위를 0.5° 단위로 분할한 경우 링크암길이

2.3 시스템 모델링

2.3.1 유압서보 메카니즘

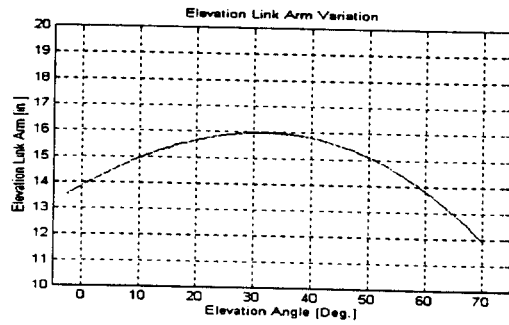


그림3. 기계작 링크 메카니즘의 고각에 따른 암 길이 변화

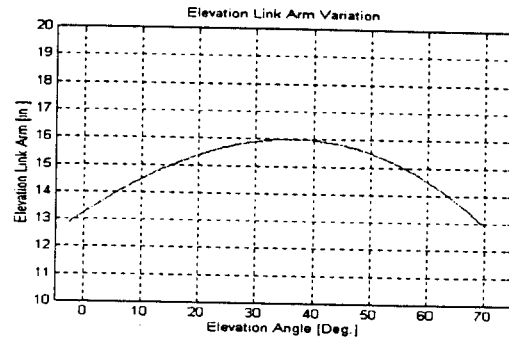


그림4. 개선 제안된 링크구조의 고각에 따른 암길이 변화

2.3.1.1 전류제어부

본시스템에 사용된 전기-유압 서보밸브는 2단 형식의 유량제어 서보밸브이며, 플랜트의 중량 및 관성량에 비해 응답속도가 빠르므로 (6)식과 같이 1차 지연요소로 모델링 하였다.

$$x_v = \frac{k_s}{1 + \tau \cdot s} i \quad (6)$$

2.3.1.2 유압증폭부

밸브와 양로드 실린더 조합(그림5)의 부하유량에 대한 서보메카니즘의 유량방정식은 (7), (8)과 같다.

$$Q_i = C_d \cdot w \cdot x_v \quad (7)$$

$$Q_o = C_d \cdot w \cdot x_v \quad (8)$$

C_d : 유량계수(DischargeCoefficient)

w : 서보밸브 포트 단면적 구배(in²/in)

2.3.2 유압구동부

2.3.2.1 유압실린더

유압구동부인 고저 유압실린더 주위의 챔버별 유량방정식은 (9), (10)식과 같다. 2.3.1.2절 및 본절에서 유도된 식을 이용하여 실린더 양 챔버별로 정리하여 신호계통도를 그려보면 그림 6과 같다.

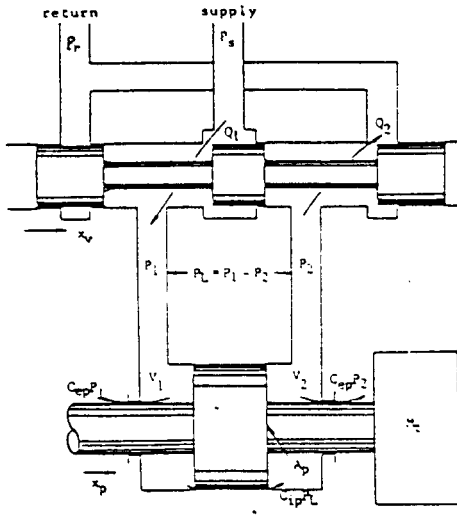


그림5. 밸브 및 양로드 실린더 도식도

$$Q_1 - C_{sp}(P_1 - P_2) - C_{sp}P_1 = \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dP_1}{dt} \quad (9)$$

$$C_{sp}(P_1 - P_2) - C_{sp}P_2 - Q_1 = \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_2}{dt} \quad (10)$$

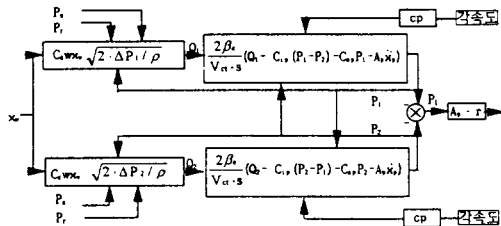


그림6. 유압충폭부/유압구동부 모델 신호계통도

2.3.2.2 기구메카니즘

링크 암 r 은 링크메카니즘 구조상 구동각 θ 의 비선형 함수로 표현되며 고각에 따른 r 의 변화는 그림 3과 같다.

2.3.2.3 구동각/피스톤변위 변환파라메타

변환파라메타(cp)는 링크메카니즘 구조상 구동각 θ 의 비선형 함수로 나타나며 미소 구동각 변위($\Delta\theta$)에 대한 피스톤/실린더의 길이변화(Δx_p)율로서 (11)식과 같으며 구동각에 대한 cp의 변화는 그림 3과 유사하다.

$$cp = \Delta x_p / \Delta \theta \quad (11)$$

x_p : $l_0 - l_0$; $\theta = 0^\circ$ 에서 θ 에 따른 피스톤/실린더 변위

2.3.2.4 평형메카니즘

고저 구동장치의 지지구조상 큰 정적 불균형 모멘트가 발생하게 되는데 이를 유공압 평형 메카니즘으로 적절히 상쇄시키도록 설계되어 있으나, 완전히 상쇄시키지 못한 미보상 모멘트가 시스템에 악영향을 끼치게 된다. 실측 데이터를 분석하여 고각별 불평형 모멘트에 대해 커브핏팅을 수행하여 모델링 하였다. 실측된 평형기내 압력변화 및 요구되는 평형기 압력을 분석한 결과 미보상 압력 및 커브핏팅은 그림 7과 같다.

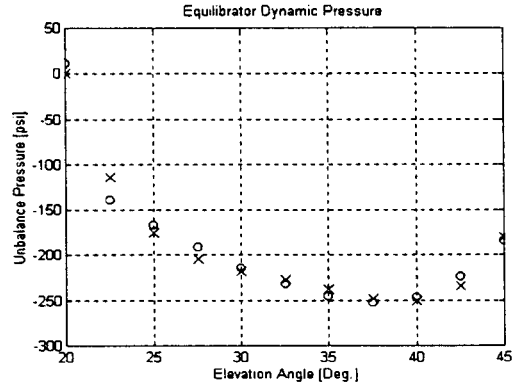


그림 7. 평형기 미보상 압력 및 커브핏팅 선도

(○: 미보상 압력, ×: 커브핏팅)

2.3.3 구동부하

고저구동부 운동방정식은 (12)식과 같다.

$$J_{eq} \ddot{\theta} + B_{eq} \dot{\theta} + T_L(\theta) = A_p \cdot r \cdot P_L \quad (12)$$

J_{eq} : 고저등가 관성모멘트(kg-m²)

B_{eq} : 고저 등가 점성감쇠 계수(N-m-sec)

$T_L(\theta)$: Coulomb 및 정적 불평형 토크(N-m)

r : 링크메카니즘의 Moment-Arm(in.)

2.3.4 유압동력발생부

유압발생장치는 전력소요 절감을 위해 마력일정형 유압 펌프를 적용하였다. 공급되는 유압동력은 그림8과 같다.

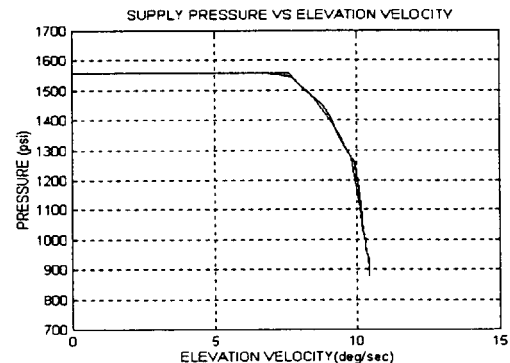


그림8 유압동력 발생장치 공급동력선도

2.3.5 기타

신호한제치, 쿠울롬 마찰, P-I 제어기 및 각종 아나로그 필터등도 모델링에 포함하였으며 본시스템의 주요 파라메타는 표2와 같다.

표2. 유압구동부, P-I 게인 및 제어부 파라메타 값

변 수 명	실험값, 측정값, 추정값
서보밸브 시정수	0.02857 sec
서보밸브스플 최대변위	0.035 in
유효 작동유체적	328 in ³
작동유 압축계수	100,000 psi
실린더 유효단면적	16.534 in ²
부하 쿨롱마찰 토크	800 N-m
부하 관성모멘트	36.085 kg-m ²
부하 점성감쇠 계수	400 N-m-sec/rad
유량계수(C _v)	0.772
제어기 비례게인	4.0
제어기 적분게인	0.0001
속도 피드백 게인	0.8
엔코더 피드백 게인	0.143 V/deg
타코메타 피드백 게인	2.17 V/(rad/sec)
차동압 센서 게인	1.21e-5 V/psi

3. 성능추정 프로그램의 시뮬레이션

2.3절의 시스템 모델링결과를 종합하여 불균형 대부하 고저구동/제어 시스템의 성능추정 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 시뮬레이션 결과 및 실험결과는 다음과 같다.

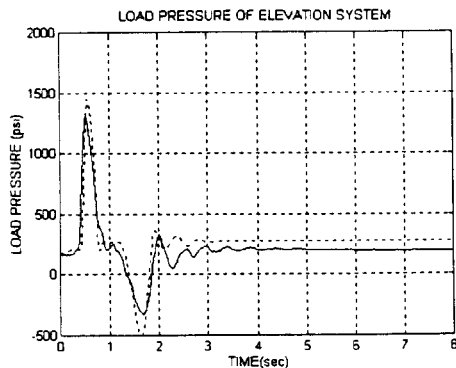


그림9. 부하압력선도(실선:실험, 점선:시뮬레이션)

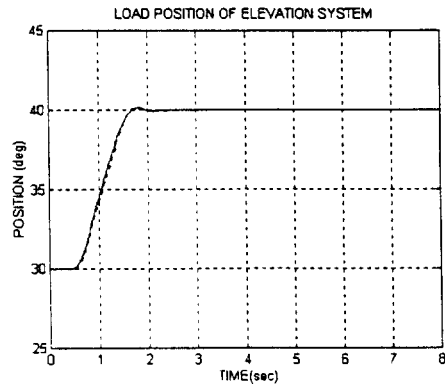


그림10. 부하위치선도(실선:실험, 점선:시뮬레이션)

4. 결 론

본연구에서는 불균형 대부하 고저 구동장치의 메카니즘 최적설계, 구동/제어 성능 추정 시뮬레이션 프로그램을 개발하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 현재 시제작된 기구-메카니즘의 분석을 통한 최적 설계 방안도출

둘째, 대부하(중량 5톤)이면서 여러가지 비선형 요소를 내포하고 있는 고저구동/제어 시스템에 대한 수학적 모델을 도출하고 실제 고저구동/제어시스템과 유사한 거동을 나타내도록 수백회의 시뮬레이션 튜닝과정을 거쳐 성능 추정이 가능한 시뮬레이션 프로그램을 개발 하였다. 또한 성능 추정의 신뢰도를 높이기 위하여 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교, 성능추정 가능성에 대한 신뢰성을 검증하였다.

본 연구결과를 향후 구동/제어 성능개선에 적절히 활용한다면 별도의 H/W 구동실험을 하지 않고서도 고저구동/제어 시스템의 성능을 향상시킬 수 개발 TOOL로써 많은 활용을 기대한다.

참고문헌

1. H.E. Merritt, "Hydraulic Control System", John-Wiley & Sons. 1967.
2. 이만형, "대부하 구동제어 시스템 기초연구", 전반기 중간보고서 pp63-70, 1991.
3. 이만형, "대부하 구동/제어시스템 기초연구", 중간 보고서, pp91-102, pp120-126, 1991.
4. 이만형, "대부하 구동/제어시스템 기초연구", 최종 보고서, pp39-48, pp135-191, 1991.
5. 주해호, 이종원, 이만형, "최신제어공학", 문운당, pp463-466, 1991.
6. 윤강섭, "대부하 구동제어시스템의 제어기 설계", pp 1-2, 1993.
7. 김동현, "고저구동 실린더/평형기 최적화 설계연구", pp1-4, 1996.