

모형 공압굴삭기 시스템 구축

이홍선*, 천세영⁺, 임태형⁺, 김승수⁺⁺, 최정주⁺⁺, 양순용⁺⁺⁺
(논문접수일 2006. 11. 27, 심사완료일 2007. 3. 26)

Development and Identification of Pneumatic Excavator System

Lee Hong-Sun*, Cheon Se-Young⁺, Lim Tae-Hyeong⁺, Kim Sung Su⁺⁺, Choi Jeong Ju⁺⁺,
Yang Soon-Young⁺⁺⁺

Abstract

The excavator is complex machinery which has widely used in the construction site, deck of harbor and deep sea. The one of important issue of excavator system in recent is an automation of it in order to improve a working efficiency, a convenience working circumstance and work satisfaction. However, since there are large nonlinearities of control circuit, actuating cylinder, joiners of hydraulic units and changing loads etc., it is difficult to develop an automatic excavator system. Therefore, in this study, toy scale pneumatic excavator system is constructed and the remote control system is installed on it, before developing the automatic excavator system. In order to design the control system of the developed pneumatic excavator system, the transfer function is obtained using signal processing method and the controller gains of PID are decided based on CDM(coefficient diagram method). The obtained transfer function and the performance of the proposed control system is evaluated through experiments and computer simulation.

Key Words : System Identification(시스템구명), CDM(계수도법), PID(PID제어), Automatic excavator(자동굴삭기)

1. 서론

굴삭기는 다양한 종류의 작업에 대한 높은 적용성과 경제성으로 인해 건설 현장뿐 아니라 제조업, 농업, 해저영역 등 활용영역은 점점 확대되고 있다. 굴삭기를 이용하여 수행하

는 평탄작업, 덩핑작업, 토사작업등의 작업들은 작업자가 많은 작업 장치들을 동시에 조작하여야 하기 때문에 고도의 숙련이 필요하고, 굴삭작업의 정도나 작업효율은 작업자의 능력에 좌우된다. 이러한 세밀한 컨트롤이나 어려운 작업을 자동화 시킬 수 있다면, 작업환경이나 작업시간 단축 등의

* 현대중공업 (hsl@hhi.co.kr)
주소: 689-792 울산광역시 동구 전하동 1번지
+ 울산대학교 대학원 기계자동차공학과
++ 부산대학교 기계공학부
+++ 울산대학교 기계자동차 공학부

상당한 이득을 볼 수 있다⁽¹⁾. 그러나 굴삭 시스템은 합류, 제어회로, 비선형적인 개구선도, 편로드 실린더 등의 유압회로로 구성되어 있으며, 기구학적인 비선형성과 유압시스템이 가지는 모델 불확실성으로 인해 굴삭기 시스템의 자동화에는 많은 고려사항이 존재한다. 또한, 자동화 구현에 앞서 실시하는 실차 실험 시 시스템 구축이 힘들 뿐만 아니라 실험 시 운전자의 안전상의 문제점을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 굴삭기 시스템의 자동화에 앞서 실험실 환경에서 자동굴삭기 시스템의 성능을 검증하기 위해서 모형 굴삭기 시스템을 구성하였다. 구성된 모형 굴삭기를 바탕으로 자동 굴삭기 시스템을 구성하기 위하여 원격리 리모트 컨트롤을 구성하였다. 구성된 모형 공압 굴삭기 시스템에 대해서 CDM(Coefficient Diagram Method)을 이용하여 현장에서 널리 사용되는 PID제어 시스템의 제어 파라미터를 선정하여 그 성능을 평가하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 모형 공압 굴삭기 시스템의 구성에 대해서 기술하였고, 제작된 공압 굴삭기 시스템의 제어시스템 설계에 앞서 시스템의 입력력 관계를 나타내는 전달함수를 3장에서 신호압축법을 이용하여 구하였다. 4장에서는 선정된 전달함수를 이용하여 PID제어 시스템의 제어게인을 CDM을 이용하여 구하였다. 설계된 PID제어 시스템의 성능을 5장에서 실험을 통해서 검증하였다.

2. 공압 시스템을 이용한 자동 굴삭기 시스템

자동 굴삭기 시스템 구축에 앞서 본 연구에서는 공기압 시스템을 이용한 소형 굴삭기 시스템을 구성하였다. 굴삭기 시스템의 구조물은 닥터 레고를 이용하였고 각 관절부의 구동에 필요한 AD/DA는 N.I사의 DAQ 장비를 이용하였다. 장치 구성을 위해 사용된 세부 사양은 Table 1에 나타내었고 시스템 개략도는 Fig. 1과 같다.

공압실린더의 방향과 속도의 제어는 포텐서 미터 타입의

전기식 조이스틱과 공압 전자 비례 감압밸브(FESTO)를 사용하여 조이스틱 조작각도에 따른 작동유체(공기)의 방향과 유량을 결정할 수 있게 하였다. 공압 굴삭기의 선회는 스텝모터를 이용하여 작동하도록 구성하였다. 압축공기는 소형 에어컴프레서를 이용하여 공급압력이 3bar를 유지하도록 하였다. 공압굴삭기를 유압굴삭기와 유사한 응답성으로 실험하기 위해 공기압을 1~6bar까지 실험한 결과 3bar에서 유압굴삭기의 응답성과 유사했으므로 실험시 작동 압은 3bar로 결정하였다. 밸브와 스텝모터드라이버에 필요한 24V전원은 외부전원을 사용하였고 모든 포텐서미터에 들어가는 5V의 전압은 DAQ보드(PCI-6229)를 이용했다. 공압 밸브의 경우 작동 범위는 0~10[V]이며, 5[V]에서 스펴이 중립 위치를 유지하도록 되어 있다.

3. 공압 굴삭기 시스템의 전달 함수

공압 굴삭기 시스템은 작동 매체로 압축 공기를 사용하므로 환경 변화에 따른 압축 공기의 물리적 특성 변화에 대해서 시스템 전체의 동특성이 영향을 받는다. 예를 들어 공압은 유압과 다르게 압축성을 지니며 온도나 습도에 따라 공기의 압축성에 변화가 있다.

이러한 동특성 변화는 공압 굴삭기 시스템의 모델 불확실성으로 작용하게 되고 이러한 모델 불확실성이 내포된 시스템에 대한 제어시스템 설계에서는 안정 강인성 확보가 중요한 문제로 대두된다. 따라서 본 논문에서는 공압 굴삭기 시스템의 동적 모델을 구하기 위해서 주파수 응답 특성을 고려한 신호 압축법을 이용하여 선형 전달 함수를 유도하였다⁽²⁾. 또한 이를 바탕으로 안정 강인성이 보장되는 CDM기반의 PID제어 시스템을 설계하였다. 신호 압축법을 이용한 선형 전달 함수를 유도하기 위해서 편로드 실린더의 응답 특성을 압축과 신장의 두가지 모드를 고려하였다. 또한, 실험에서 사용한 밸브의 스펴은 0~10V 사이에서 작동되고 5[V]에서

Table 1 작업장치 구성

작업장치 Frame	Dr. LEGO
각관절 센서	potentiometer
공압 전자 비례 감압 밸브	Festo(MPYE-5-M5-010)
AD board(각관절 등)	NI PCI-6229
DA board (선회 모터, 밸브구동 등)	NI PCI-7344

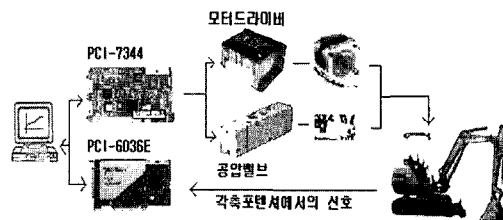


Fig. 1 시스템 개략도

널(null)상태를 유지하므로 신호압축법을 위해 선정한 시험 신호는 Fig. 2, 3과 같다.

Fig. 2, 3과 같은 시험 신호에 대한 공압 굴삭기 암의 출력 응답은 Fig. 4, 5와 같이 얻을 수 있다. 실험을 통해 획득한 출력 응답에 대해서 FFT를 이용하여 보데 선도를 작성하고 이와 유사한 3차의 보데선도를 비교함으로써 공압 실린더의 신장 압축에 대한 선형 전달함수는 식 (1), (2)와 같이 구할

수 있다^(3,4). 이때 입 출력 신호를 보데 선도로 나타내면 Fig. 6, 7과 같다.

$$G(s) = \frac{70s^2 + 63s + 5670}{s^3 + 3.6s^2 + 81s} \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{110s^2 + 165s + 24750}{s^3 + 6s^2 + 225s} \quad (2)$$

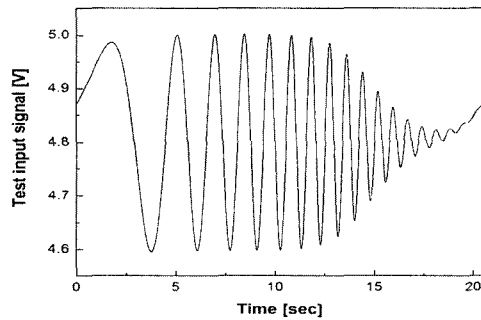


Fig. 2 암 실린더의 신장을 위한 시험 신호

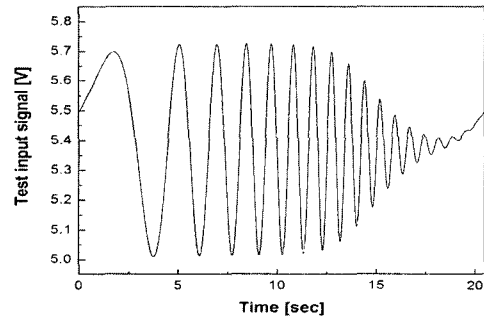


Fig. 3 암 실린더의 수축을 위한 시험 신호

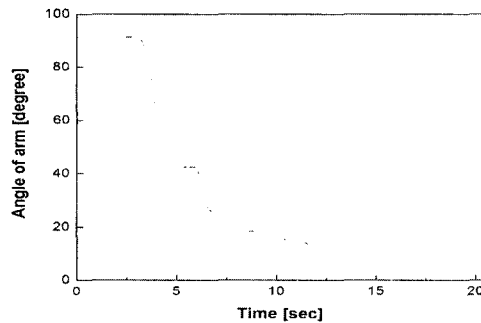


Fig. 4 암 실린더의 신장에 대한 출력 응답

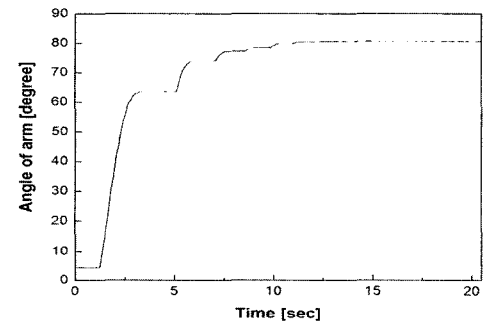


Fig. 5 암 실린더의 수축에 대한 출력 응답

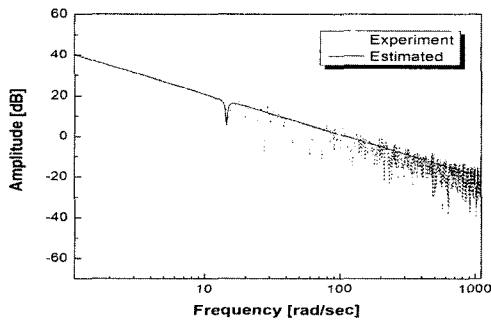


Fig. 6 암 실린더 신장에 대한 보데 선도

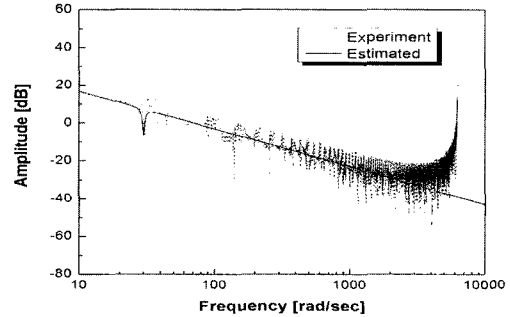


Fig. 7 암 실린더 수축에 대한 보데 선도

4. CDM을 이용한 제어기 설계

앞에 선정된 공압 굴삭기 시스템의 선형 전달 함수식을 이용하여 산업 현장에서 널리 사용하고 있는 PID제어 시스템에 외란 억제성을 높인 m-PID 제어 시스템을 설계하였다. m-PID제어 시스템의 제어 계인은 압축 공기의 누설 및 굴삭기 시스템의 파라미터 불확실성을 고려해서 안정 강인성을 보장할 수 있는 CDM방법을 이용하여 선정하였다.

CDM방법은 CD(Coefficient Diagram)을 이용하여 제어 시스템의 안정 강인성을 보장할 수 있는 제어 파라미터를 선정할 수 있는 기법이다^(5,6).

CDM을 이용하여 m-PID제어 시스템을 설계하기 위해서 일반적으로 PID제어 시스템의 구조를 Fig. 8과 같이 나타내었다.

Fig. 8과 같이 나타낸 블록선도의 페루프 전달함수는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 이에 대한 특성방정식은 식 (4)와 같다.

$$G = \frac{B_p K_i}{(A_p T_d + B_p K_d)s^2 + (A_p + B_p K_p)s + B_p K_i} \quad (3)$$

$$P = (T_d s^2 + s)A_p + (K_d s^2 + K_p s + K_i)B_p \quad (4)$$

여기서 선정된 전달함수는 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{B_p}{A_p} = \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{s^3 + w_3 s^2 + w_2 s + w_0} \quad (5)$$

식 (5)에 식 (4)를 대입하면 다음 식 (6)이 된다.

$$P(s) = a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \quad (6)$$

여기서 각각의 계수값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_5 &= T_d, & a_4 &= w_2 T_d + q_2 K_d + 1, \\ a_3 &= w_1 T_d + q_1 K_d + w_2 + q_2 K_p, \\ a_2 &= w_0 T_d + q_0 K_d + w_1 + q_1 K_p + q_2 K_i, \end{aligned}$$

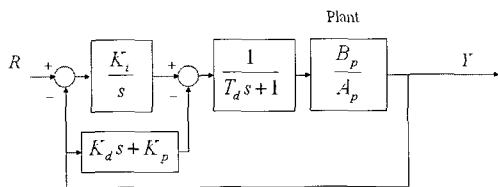


Fig. 8 m-PID 제어시스템을 이용한 굴삭기시스템의 블록선도

$$a_1 = w_0 + q_1 K_i + q_0 K_p, \quad a_0 = q_0 K_i$$

CDM을 이용한 제어 계인 선정을 위해서는 우선 안정도 지수 γ_i 와 안정도 한계지수 γ_i^* 를 다음과 같이 표현한다.

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{(a_{i-1} a_{i+1})}, \quad i = 1, \dots, (n-1) \quad (7)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}}, \quad \gamma_n = \gamma_0 = \infty \quad (8)$$

이때 안정도 지수에 대한 사양은 Manabe에 의해 제안된 γ_i 를 선정함으로써 계단 응답에 대한 오버슈트를 발생하지 않도록 설계할 수 있다. 이러한 안정지수의 특별한 값을 Manabe 표준형이라 한다^(5,6). Manabe 표준형에 사용되는 γ_i 는 $\gamma_i = [2.5 \ 2 \ 2 \ 2 \dots]$ 이다. 또한 등가 시정수는 τ 라고 표현하고 τ 는 다음과 같다.

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (9)$$

γ_i 와 τ 를 a_i 에 관하여 정리하면 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$a_i = \frac{a_0 \tau^i}{(\gamma_{i-1} \gamma_{i-1}^2 \dots \gamma_{i-2}^2 \gamma_{i-1}^2)} \quad (i = 1 \dots n) \quad (10)$$

식 (7), (9) 그리고 (10)을 이용하여 선정된 페루프 특성방정식의 계수와 PID 제어 계인은 Table 2, 3과 같다. 그리고 CD 선도는 Fig. 9, 10과 같다.

Table 2 암 실린더 신장에 대한 파라미터

a_0	1701	a_1	2551.5
a_2	1020.6	a_3	204.12
a_4	20.41	a_5	1.02
K_p	0.44	K_i	0.3
K_d	1.86	T_d	1.02

Table 3 암 실린더 수축에 대한 파라미터

a_0	2475	a_1	3712.5
a_2	1485	a_3	297
a_4	29.7	a_5	1.49
K_p	0.14	K_i	0.1
K_d	216	T_d	1.46

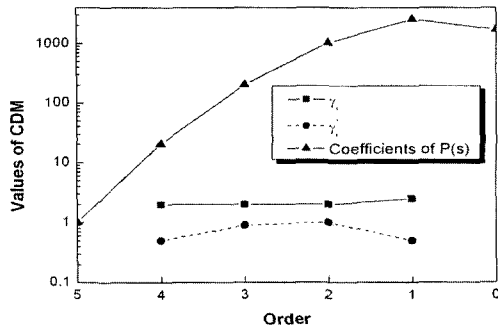


Fig. 9 암 실린더 신장에 대한 CD선도

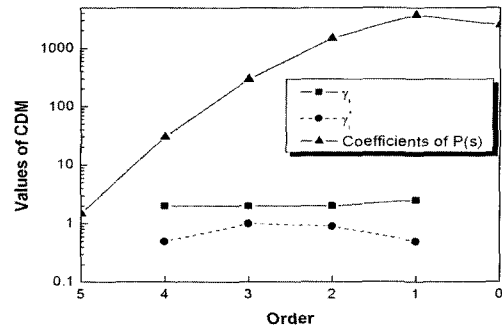


Fig. 10 암 실린더 수축에 대한 CD선도

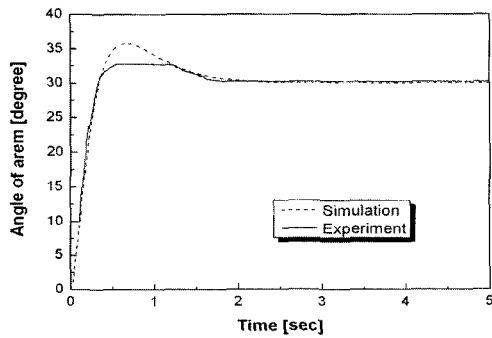


Fig. 11 계단 입력에 대한 응답 특성

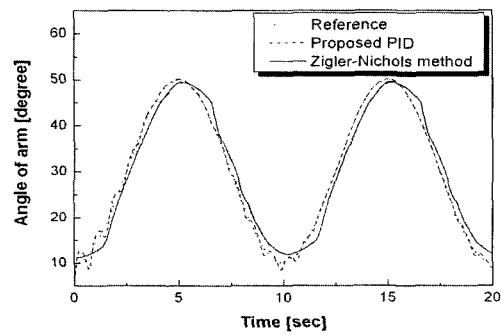


Fig. 13 명령추종 성능에 대한 실험 결과 비교

5. 실험 결과 고찰

신호압축법을 이용하여 선정된 공압 굴삭기 시스템의 전달함수에 대한 타당성을 검토하기 위해서 실험의 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Fig. 11은 계단 입력에 대한 응답특성을 실험 및 시뮬레이션을 비교한 결과이다. Fig. 11에서와 같이 정상상태에 이르는 정착시간은 2sec, 상승시간은 0.25sec로 시뮬레이션 및 실험의 결과에서 비슷한 응답 특성을 나타내었다. 오버슈트에 대한 응답특성은 시뮬레이션 결과에서는 23%, 실험의 결과에서는 10% 정도의 퍼센트 오버슈트가 발생함을 알 수 있다. 이는 공압 굴삭기 시스템의 압축공기의 누설과 마찰 특성과 같은 비선형성 응답특성을 선정된 전달함수에서 묘사할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

다음은 제안된 CDM방법을 이용한 제어시스템의 성능을 평가하기 위해서 0.1Hz의 주기를 가지는 정현파 신호에 대한 추종성능을 지글러-니콜스 방법을 이용하여 구한 PID와 비교하였다. Fig. 12는 지글러-니콜스 계인 선정법을 이용한

경우에 대한 실험결과로 추종성능에 대한 응답 특성은 0.1 초 내외의 시간 지연 응답을 나타냄을 알 수 있다. 또한 추종 성능 향상을 위해 앞서 CDM기법을 이용하여 선정된 PID 제어 계인을 이용하여 동일한 실험을 수행한 결과도 나타내었다. 결과에서와 같이 지글러-니콜러 방법에 의해 선정된 제어시스템에 비해 명령추종 성능이 향상됨을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 소형 공압 굴삭기 시스템을 구축하였고, 신호 압축법을 이용하여 공압 굴삭기 시스템의 전달함수를 도출하였다. 또한, CDM을 이용하여 PID제어 계인을 설계하여 시스템에 적용하였다. 신호압축법을 이용하여 선정된 전달함수는 공기압의 누설이나 마찰과 같은 비선형 특성을 충분히 나타낼 수 없지만, 계단 입력에 대한 시간영역의 성능을 만족시키는 전달함수를 유도할 수 있었다. 또한 이를 이용하여 제어시스템을 설계함으로써 보다 효율적인 제어시스템 설계 및 성능향상을 도모할 수 있었다. 본 연구의 결과를

바탕으로 향후 실제 굴삭기 시스템의 제어시스템 설계 문제에 접목하여 보다 향상된 성능을 가진 굴삭기 시스템을 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 울산대학교 2005년 교비 및 BK21사업단 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, Y. J., Lim, T. H. and Yang, S. Y., 2004, "Development of Pneumatic Excavator Model for using LEGO and LabVIEW," *ICASE*, Vol. 2, No. 1, pp. 167~171.
- (2) Kim, M. S., Lee, M. C., Yun, J. J. and Yu, K. S., 2004, "Identification of Dynamic Characteristics of Gimbals For Line-of-sight Stabilization Using the Signal Compression Method," *KSPE*, No. 4 pp. 396~399.
- (3) Juang, J. N., 1993, *Applied System Identification*, Prentice Hall PTR.
- (4) Lennart, L., 1988, *System identification toolbox for use with MATLAB: User's guide*, MathWorks Inc.
- (5) Manabe, S., 1997, "An Algebraic Approach to Control System Design: Coefficient Diagram Methods," Chungbuk National University, Lecture Notes on Workshop on Control Theory.
- (6) Manabe, S., 1998, "COEFFICIENT DIAGRAM METHOD," *14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, pp. 1~13.
- (7) Kang, H. I. and Juang, Y. W., "A study on the generalization of the Manabe standard forms with the genetic," *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000 Volume 1*, Issue 6, 28-30 June 2000 Page(s):444~447.