

원료채집기의 제어: 모델링, 계수추정, 견실한 스미스 예측기의 설계

Reclaimer Control: Modeling, Parameter Estimation, and a Robust Smith Predictor Design

김성훈, 홍금식, 강동헌

(Sung-Hoon Kim, Keum-Shik Hong and Dong-Hunn Kang)

Abstract : In this paper, a modeling and a robust time-delay control for the reclaimer are investigated. Supplying the same amount of a raw material throughout the reclamation process from the raw yard to a sinter plant is important to keep the quality of the molten steel uniform in blast furnaces. As the actual parameter values of the reclaimer are not available, the boom rotational dynamics are modeled as a second order differential equation with unknown coefficients. The unknown parameters in the nominal model are estimated using a recursive estimation method. Another important factor in the control design of the reclaimer is the large time-delay in output measurement. Assuming a multiplicative uncertainty, that accounts for both the unstructured uncertainty neglected in the modeling and the structured uncertainty contained in the parameter estimation, a robust Smith predictor is designed. A robust stability criterion for the multiplicative uncertainty is also derived. Following the work of Goodwin *et al* [4], a quantifying procedure of the multiplicative uncertainty bound, through experiments, is described. Experimental and simulation results are provided.

Keywords : reclaimer, modeling, identification, Smith predictor, robustness, model uncertainty

1. 서론

리클레이머(reclaimer, 원료채집기)는 제철소의 원료 야적장에서 철광석이나 석탄과 같은 원료를 채집하여 컨베이어 벨트에 실는 산업용 머니플레이터이다. 그림 1(a)는 원료야적장에서 운전중인 리클레이머를 보여준다. 리클레이머는 직선레일을 주행하는 본체, 본체에 연결되어 수평과 수직방향으로 선회하는 붐(boom), 그리고 붐 끝단에 경사져서 연결되어 정속 회전하는 원판(disk)으로 구성된다. 붐의 길이는 약 50 미터, 회전원판의 지름은 약 6 미터이며, 원판의 원둘레에는 원료를 퍼담는 버킷(bucket)들이 달려있다. 원판은 붐쪽으로 기울어져 있기 때문에, 버킷에 의해 채집되는 원료는 원판이 돌아가면서 붐 중앙에 위치한 컨베이어 벨트 위로 떨어져 원료전처리공정으로 운반된다. 리클레이머의 상세한 구조와 기구학적해석에 대해서는 참고문헌 [5]를 참조한다.

원료채집작업에 있어서 가장 중요한 사항은 채집된 원료를 컨베이어 벨트를 통하여 원료전처리공정으로 일정한 량으로 공급하는 것이다. 이는 원료전처리공정에서 철광석의 탄소함유량을 균일하게 만들어 주어 용광로에서 제련되는 용강의 품질을 향상시킨다. 그림 1(b)는 동영상으로 구현한 채집작업 모의실험의 한 화면을 보여준다. 현재의 채집작업을 간략히 설명하면 다음과 같다. 먼저, 운전자는 채집할 원료의 종류, 양, 위치를 전달 받은 후 리클레이머를 원료더미로 운전해 간다. 그리고 회전하는 원판의 둘레에 붙어있는 버킷

의 끝을 원료더미의 채집지점에 위치시킨 후 붐을 수평으로 선회하면 원료는 버킷에 담겨 회전하다가 컨베이어 벨트 위에 쏟아져 이송되게 된다. 이때, 원료의 채집률(reclamation rate)은 버킷이 더미에 닿는 깊이와 붐의 수평선회속도에 따라 결정된다. 그런데 숙련된 운전자가 드물 뿐만 아니라, 야적장의 먼지로 인하여 시야가 좋지 않은 경우에는 수동운전으로 일정한 원료량을 채집하는데 많은 어려움이 있다. 원료공장은 또한 분진으로 인하여 작업자들이 작업을 기피하는 장소이기도 하다.

이러한 이유들로 인하여 제철분야에서는 리클레이머의 채집작업의 자동화에 대한 꾸준한 노력을 기울여왔다. 먼저, 그림 2와 같이 야적장에서 멀리 떨어진 중앙통제실에서 리클레이머를 원격조정하여 원료를 채집하고자 하는 원격조정시설이 시도되었다[10]. 또한, 원료더미에 대한 3차원 형상자료를 토대로 채집을 시작할 최초의 채집지점의 결정방법과 주어진 채집지점에 대하여 리클레이머의 각 관절의 관절변수값을 구하는 역기구학 해석에 관한 연구도 수행되었다[2],[5]. 그러나 정량채집을 위하여 붐의 회전속도를 제어할 때 필요한 채집작업에 대한 수학적 모델식이 없을 뿐만 아니라 채집량 측정시에 큰 시간지연이 발생하기 때문에 되먹임제어가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 논문에서는 원료의 정량채집 및 채집작업의 자동화를 위하여 원료야적장에 이미 설치되어 운전중인 리클레이머를 대상으로 붐의 회전운동을 수학적으로 모델링하고, 채집량 측정시에 발생하는 시간지연을 보상할 수 있는 견실한 스미스예측기(robust Smith predictor)를 설계하고자 한다. 채집작업의 모델링은 크게 다음의 두 단계로 나뉜다.

첫째, 유압동력으로 작동되는 리클레이머의 붐회전

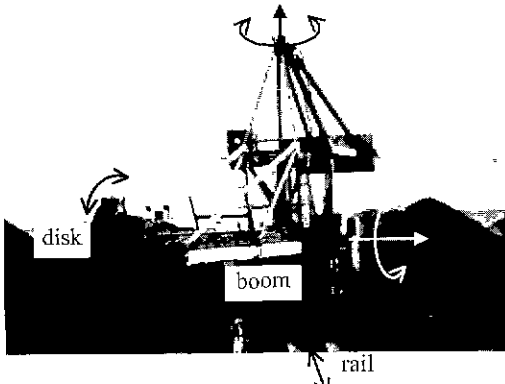
접수일자 : 1998. 9. 17., 수정완료 : 1999. 7. 21.

김성훈 부산대학교 대학원, 현재 LG 생산기술원

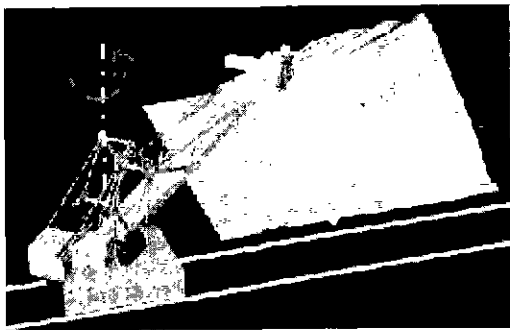
홍금식 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

강동헌 부산대학교 대학원 지능기계공학과

※본 연구는 한국학술진흥재단의 학술연구비(과제번호: 1998-001-E00198)에 의하여 지원되었습니다



(a) 원료야직장의 리클레이머



(b) 채집작업: 동영상 그래픽화면

그림 1. 리클레이머와 원료채집작업의 그래픽 시뮬레이션.

Fig. 1. A reclaimer and a graphic simulation of the reclamation process.

운동에 대한 수학적 모델을 구한다. 서보벨브의 스프링 운동이나 유압관로 내의 압력변동과 같은 빠른 동역학적 요소를 무시할 경우 분회전운동의 동역학 모델은 2차 상미분방정식으로 간략화될 수 있다. 그러나 이비 원료야직장에 시설되어 운전중인 리클레이머의 경우에는 붐의 질량, 관성모멘트, 마찰특성과 같은 물리적 파라미터값들을 알 수 없기 때문에 유도된 운동방정식은 미지의 계수를 가지게 된다. 이러한 미지의 계수들은 실험을 통하여 확정되는데, 붐을 회전운동시키면서 얻은 입출력 실험자료를 사용하여 순환적최소자승추정법(recursive least squares estimation method)과 같은 계수 추정 방법을 통하여 결정된다. 또한, 모델링시에 누락된 요소들은, 즉 운동방정식에 포함되지 않은 동특성들은 계수추정으로 확정된 공칭모델(nominal model)에 대한 비구조적 불확실성(unstructured uncertainty)으로 규정된다.

둘째, 원료더미의 형상과 버킷의 궤적에 대한 분석을 통하여 원료가 채집되어 컨베이어로 이송되는 양을 붐의 선회각 및 선회각속도의 함수로 나타낸다. 이송되는 원료량은 제어하고자 하는 출력변수가 된다.

채집작업의 공칭모델은 붐의 운동방정식과 채집되는 원료량을 나타내는 출력방정식으로 구성된다. 리클레이머의 되먹임제어가 어려운 가장 중요한 이유들 중의 하나는 채집되는 원료량의 측정지연이다. 이는 채

집지점과 원료량을 측정하는 로드셀의 위치가 떨어져 있기 때문에 발생한다

본 논문에서는 제어기로서 측정시간지연을 보상하기 위한 스미스에측기의 구조를 도입한다. 모델링에서 누락된 비구조적 불확실성과 계수추정과정에서 발생하는 구조적 불확실성을 공칭모델에 대한 곱셈형 불확실성(multiplicative uncertainty)으로 나타낸다. 플랜트에 곱셈형 불확실성이 존재하는 상황에서 시간지연 보상기인 스미스에측기가 안정하고 견실할 조건을 구한다. 제어기가 허용하는 공칭모델의 불확실성에 대한 주과수역에서의 정량적인 한계(quantitative bound)를 규명하기 위하여 Goodwin 외 2인 [4]이 제안하는 방법을 체계화한다. 그리고, 체계화된 절차를 따라 리클레이머에 대하여 실제의 실험자료를 가지고 곱셈형 불확실성의 허용범위를 정량화한다. 마지막으로 설계된 스미스에측기의 되먹임제어 특성을 모의실험한다.

본 논문의 공헌은 다음과 같다. 본 논문은 리클레이머의 제어에 관련된 국내외를 통틀어 최초의 논문으로 판단된다. 그리고 이미 사용중인 장비에 대하여 제어기를 사후에 구현할 때에 당면하는 실제적인 문제를 해결하는 과정을 체계적으로 기술하고 있다. 먼저, 동역학 해석을 통하여 제어기설계를 목적으로 한 공칭플랜트의 차수를 결정하고, 그 계수들을 실험을 통하여 추정한다. 추정된 공칭플랜트는 구조적 불확실성 뿐만 아니라 비구조적 불확실성(무시된 동특성)도 포함하고 있기 때문에, 공칭모델이 가지고 있는 불확실성의 크기(bound)를 주과수역에서 정량화한다. 불확실성의 정량화과정을 알기 쉽게 체계화 한 것도 본 논문의 특징이라 할 수 있다

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 절에서는 제어를 목적으로 한 리클레이머의 공칭모델이 유도된다. 공칭모델의 계수들은 순환적최소자승추정법으로 규명된다. 그리고 원료더미의 형상분석과 버킷궤적의 기구학 해석을 통하여 채집량에 대한 출력방정식을 구한다. III 절에서는 출력시간지연보상기로서 스미스에측기가 설

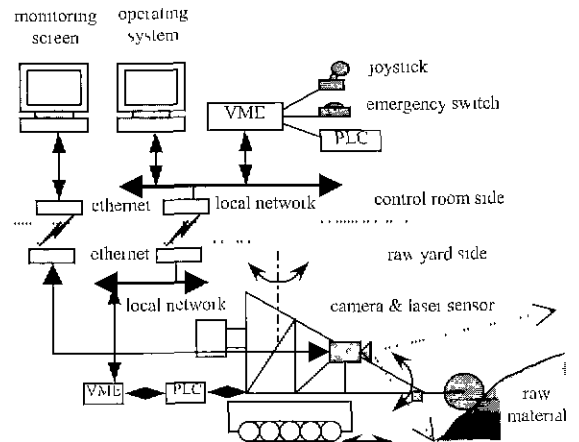


그림 2. 채집공정의 원격운전시스템.
Fig 2 A tele-operating system of the reclamation process.

계되고, 공칭모델이 갖고있는 곱셈형 불확실성에 대하여 견실안정성 조건을 유도한다. IV 절에서는 주파수역에서 곱셈형 불확실성의 크기를 정량화하는 과정을 기술한다. V 절에서는 실험을 통하여 리클레이머의 추정된 공칭모델의 모델오차를 추정하고, 허용된 범위내에서 안정성을 보장하는 견실한 스미스에측기의 성능을 모의실험한다. VI 절에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

II. 모델링

본 절에서는 제어기 설계를 목적으로 하여 원료채집작업을 수학적으로 모델링한다. 원료야적장에 기설치되어 운전중인 리클레이머의 경우에는 붐의 질량이나 서보밸브의 유량계수 등과 같은 시스템 파라미터값들은 알 수 없다. 따라서 본 논문에서는 유압시스템을 포함한 붐의 회전운동을 미정계수를 가지는 2차의 상미분방정식으로 표현한다. 그리고 실험을 통하여 붐회전운동의 동특성과 미분방정식의 해의 오차가 최소가 되도록 최소자승추정법과 같은 시스템규명방법으로 미정계수값을 추정한다. 채집량에 대한 출력방정식은 원료더미의 형상과 버킷의 궤적을 분석함으로써 붐선회의 각변위와 각속도의 함수로 나타낼 수 있다 따라서 채집작업에 대한 최종적인 공칭모델은 붐회전의 운동방정식과 선형화된 출력방정식으로 나타난다.

1. 붐선회시스템의 운동방정식

그림 3은 붐선회시스템의 개략도를 나타내고 있다. 그림 3에서 도식화된 것처럼 붐선회시스템은 유압동력공급기, 서보밸브, 유압모터, 링기어 및 붐구조물로 구성된다. 붐선회시스템의 입력은 유압서보밸브로 들어가는 전류 i 이고, 출력은 붐 구조물의 수평선회속도 ω_2 이다. 유압관로 내에서의 압력강하 및 유압모터에서의 누유량 등을 무시하면 다음의 연속방정식이 얻어진다[11].

$$(k_o + k_f i)\sqrt{p_s - p_1} = D_m \omega_2 + \frac{p_1}{R_e} + \mu \frac{dp_1}{dt} \quad (1)$$

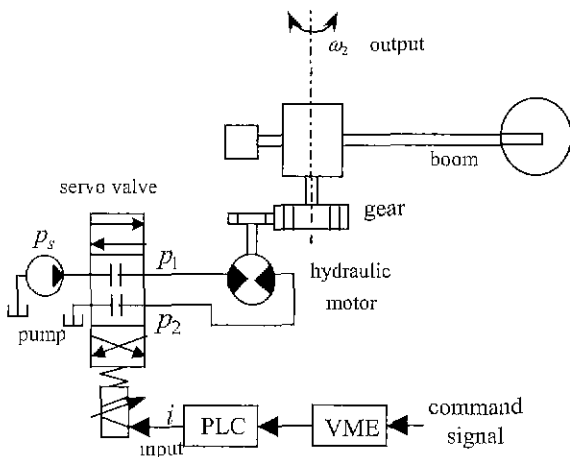


그림 3. 붐선회시스템의 개략도.
Fig. 3. A schematic diagram of the boom rotating system.

$$(k_o + k_f i)\sqrt{p_2} = D_m \omega_2 - \frac{p_2}{R_e} - \mu \frac{dp_2}{dt} \quad (2)$$

여기서 k_o 와 k_f 는 서보밸브의 유량상수, p_s 는 공급 유압, p_1 과 p_2 는 유압모터의 출/입포트의 유압, D_m 은 유압모터의 1 라디안 회전당 토출량, R_e 는 유압모터 누설저항, 그리고 μ 는 파이프와 유압모터의 용량이다. 뉴턴의 제 2 법칙을 적용하면 붐의 선회운동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$D_m(p_1 - p_2) = T_L - B_v \omega_2 + J_b \frac{d\omega_2}{dt} \quad (3)$$

여기서 T_L 은 외부부하토크, B_v 는 회전마찰계수, 그리고 J_b 는 붐의 회전축에 대한 관성모멘트이다. 붐을 회전시키기 위한 동력 $D_m(p_1 - p_2)$ 에 비하여 채집 시 버킷에 가해지는 부하토크 T_L 은 무시할 수 있으므로, 회전운동 시 임의의 동작점에서 선형화된 입력 i 로부터 출력 ω_2 로의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta \omega_2(s)}{\delta i(s)} = \frac{k_f / D_m}{\frac{\Gamma \mu}{2} s^2 + \left[\frac{\Gamma}{2R_v} + \frac{\Gamma}{2R_e} + \frac{\mu R_f}{2} \right] s + 1 + \frac{R_f}{2R_v} + \frac{R_f}{2R_e}} \quad (4)$$

여기서 k_f 는 정상상태에서의 서보밸브의 유량이득, $\Gamma = J_b / D_m^2$ 은 모터와 부하의 인덕턴스, R_v 는 정상상태의 서보밸브저항, 그리고 $R_f = B_v / D_m^2$ 은 점성저항이다.

앞에서 언급한 바와 같이, 현장에 설치된 리클레이머의 경우에는 (4)에서 나타나는 파라미터들, 즉 k_f , Γ , μ , R_e , R_v , 그리고 R_f 의 값을 알지 못한다. 따라서 다음과 같이 붐회전시스템의 공칭모델을 미정계수 a_1 , a_0 , 그리고 b_0 를 가지는 2차방정식으로 정의한다.

$$\frac{\omega_2(s)}{i(s)} \stackrel{\Delta}{=} G_o(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (5)$$

(5)에서 아래첨자 o 는 공칭모델을 의미한다.

주석 1 : 본 논문에서 붐 선회운동의 모델링 과정은 결과적으로 붐 선회운동을 묘사하는 미분방정식의 차수를 결정하는 것이 되었다. 그러나, (4)를 직접적으로 유도해 붐으로써 공칭모델이 갖고있는 구조적 불확실성이 어디서부터 발생되는지를 알 수 있다. 또한, (4)의 유도과정에서 누락된 서보밸브의 동특성, 유압모터의 동특성, 기어박스, 관로내의 압력강하, 외부 부하토크 등이 비구조적인 불확실성으로 남아 있음을 알 수 있다.

이제, (5)의 미정계수들을 실험을 통하여 추정하도록 한다. 먼저, 샘플링된 입출력데이터를 사용하기 위하여 (5)를 다음과 같은 이산형 전달함수로 바꾼다[9].

$$G_o(z) = \frac{\omega_2(k)}{i(k)} = \frac{b'_0 z^{-1}}{1 + a'_1 z^{-1} + a'_0 z^{-2}} \quad (6)$$

또한, 계수벡터를 $\theta = [a'_1 \ a'_0 \ b'_0]^T$ 로 나타내자. N 개의

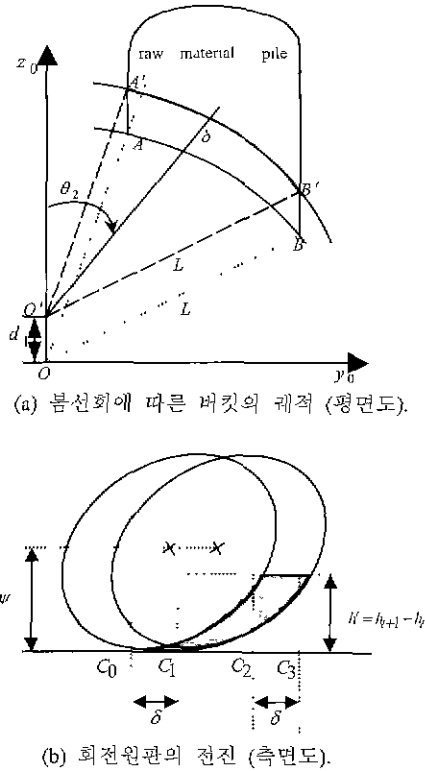


그림 4. 출력방정식의 유도를 위한 형상분석.
Fig. 4. Geometries for deriving the output equation.

실험데이터를 가질 때, θ 의 추정값인 $\hat{\theta}_N$ 은 최소자승 추정법에 의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\hat{\theta}_N = \arg \min_{\theta} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\omega_2(k) - \varphi^T(k-1)\theta)^2 \quad (7)$$

여기서, $\varphi^T(k-1) = [-\omega_2(k-1) \quad -\omega_2(k-2) \quad \dots \quad i(k-1)]$ 는 회귀벡터 (regression vector)를 나타내며, $\{i(k), \omega_2(k), k=1, 2, \dots, N\}$ 은 입출력 실험자료이다[7]. (6)의 계수들을 추정하는데 있어서 어떠한 알고리즘을 사용하는가는 크게 민감하지 않다. 보다 상세한 시스템구명방법에 대해선 참고문헌 [1],[7] 등을 참조하기 바란다.

2. 출력방정식(Output Equation)

본 절에서는 원료의 채집량을 나타내는 출력방정식을 유도한다. 원료전처리공정으로 전달되는 원료의량은 붐의 각변위와 각속도의 함수로 나타낼 수 있다. 원료운반용 선박으로부터 원료를 이송받아 야적장에 쌓는 스택커(stacker)도 리클레이머가 사용하는 레일과 동일한 레일을 사용하기 때문에 원료파일은 레일에 평행하게 쌓이게 된다. 그림 4(a)은 버킷의 선회궤적을 위에서 본 그림이다. 여기서 z_0 축은 직선레일을 나타내고, 원호 $A'B'$ 는 리클레이머의 본체가 d_1 만큼 전진한 후의 버킷의 궤적을 보여준다 붐과 두 원호 AB 와 $A'B'$ 의 교차점 간의 거리를 δ 라고 하면, δ 는 θ_2 의 함수로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta(\theta_2) = (L + d_1 \cos \theta_2) - \sqrt{L^2 - d_1^2 \sin^2 \theta_2} \quad (8)$$

여기서 L 은 붐의 길이를 나타낸다. 그림 4(b)는 리클레이머가 d_1 만큼 전진할 때 회전원판이 이동하게 되는 모습을 측면도로 보여준다. 버킷에 담긴 원료가 원판이 회전할 때 붐 중앙에 위치한 컨베이어에 떨어질 수 있도록 원판이 붐 안쪽으로 기울어졌기 때문에, 회전원판의 모양은 타원으로 나타난다. 리클레이머의 기구학에 대한 자세한 내용은 참고문헌[5]를 참조한다. 그림 4(b)에서 $R \cos \psi$ 는 회전원판에서 원료더미의 채집면까지의 높이를 나타내고, ψ 는 회전원판의 기울어진 각을 나타낸다. 그리고 h_i 와 h_{i+1} 은 각각 i 와 $i+1$ 번째의 채집단의 높이이다. 그림 4(b)의 어두운 부분은 원판이 회전할 때 버킷에 의하여 채집될 원료의 단면적을 뜻하고 그 높이는 $h' = h_{i+1} - h_i$ 이다. 타원이 δ 만큼 병진운동되었으므로, 빗금친 S 의 면적은 C_2C_3 를 밑면으로 하고 h' 를 높이로 하는 직사각형의 면적과 같다. 따라서 S 는 θ_2 의 함수로써 다음과 같이 나타낸다.

$$S(\theta_2) = \left\{ (L + d_1 \cos \theta_2) - \sqrt{L^2 - d_1^2 \sin^2 \theta_2} \right\} \cdot h' \quad (9)$$

여기서 h' 는 경로계획을 통하여 사전에 결정되는 값이다(참고문헌 [5]참조). 이제, 채집량은 θ_2 와 ω_2 의 함수로 다음과 같이 유도된다.

$$q(\theta_2, \omega_2) = \rho \cdot h' \cdot \omega_2 \left\{ (L + d_1 \cos \theta_2) - \sqrt{L^2 - d_1^2 \sin^2 \theta_2} \right\} \quad (10)$$

여기서 ρ 는 원료의 밀도이다. (10)을 임의의 동작점, 예를 들면 $(\theta_2, \omega_2)_o = (45^\circ, 0.4^\circ/\text{sec})$ 에서 선형화하면 최종적인 공칭 출력방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$q(\theta_2, \omega_2) = \left[\frac{\partial q(\theta_2, \omega_2)}{\partial \theta_2} \quad \frac{\partial q(\theta_2, \omega_2)}{\partial \omega_2} \right]_o [\theta_2 \quad \omega_2]^T \quad (11)$$

여기서 아래첨자 o 는 동작점에서의 선형화를 나타내며, (11)은 출력방정식의 공칭모델이 된다.

주석 2 : 출력방정식의 유도과정에서 사용되는 원료더미에 대한 정보는 h' 뿐이다. 이는 경로계획을 통하여 사전에 결정된다[5]. 원료더미의 불규칙성은 정량채집을 방해할 수 있다. 그러나, 원료더미의 불규칙성은 시스템 자체의 문제라기 보다는 작업환경에서 발생하는 외란이다. 외란을 추정하여 보상함으로써 정량채집의 효과를 높이는 것도 좋은 연구주제라고 판단된다.

3. 측정지연 (Measurement Delay)

그림 5는 회전원판의 구조 및 측정센서의 위치를 보이고 있다. 로드셀(road cell)은 붐 끝단의 구조적인 제약으로 인하여 회전원판의 중심으로부터 약 5m 떨어진 컨베이어벨트의 아래부분에 위치하고 있다 따라서 채집지점인 버킷과 채집량의 측정센서인 로드셀의 위치가 다름으로 인하여 출력의 측정과정에서 큰 시간지연이 발생하게 된다. 시간지연의 크기는 리클레이머에 따라 차이는 있으나 대략적으로 5sec에서 10sec의 값을 가진다

4. 채집작업의 공칭모델

유압서보밸브로의 입력전류 i 로부터 채집량 q 까지의 전달함수를 $P(s)$ 로 나타내자 그러면, (5)와 (11) 및

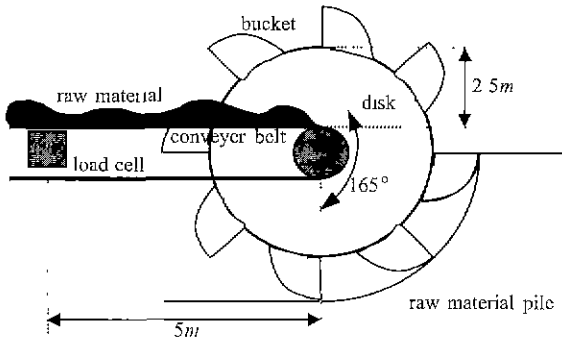


그림 5. 회전원판의 구조 및 측정센서의 위치.
Fig. 5. End-effector configuration and output sensor location

측정지연을 포함한 채집작업의 최종적인 공칭모델은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\frac{q(s)}{i(s)} = P(s) \frac{\Delta}{C_o(s)} \cdot G_o(s) e^{-T_o s} \quad (12)$$

여기서 $C_o(s) = \left(\frac{\partial q}{\partial \omega_2} + \frac{1}{s} \frac{\partial q}{\partial \theta_2} \right)_o$ 는 (11)로부터 정의되고,

$G_o(s)$ 는 (5)에서 정의되었다. 그리고 T_o 는 측정시간지연이다. 컨베이어벨트의 이송속도와 버킷의 회전속도는 일정하므로 붐의 외형치수로부터 T_o 는 대략적으로 계산될 수 있다. 본 논문에서는 실험을 통하여 $T_o = 7.8\text{sec}$ 로 취한다

III. 제어기 설계

본 절에서는 정량채집을 위하여 리클레이머의 되먹임제어를 설계한다. 되먹임제어의 실행은 첫 채집지점이 정해지고 버킷이 채집지점에 도달한 후 붐을 선회운동시킬 때 동작시키게 된다. 채집량 측정에서 발생하는 시간지연을 보상하기 위하여 출력시간지연보상기인 스미스예측기를 도입한다[8]. 그리고 공칭모델에 대한 곱셈형 불확실성으로 표시된 모델오차를 허용하는 견실안정성 판별조건을 유도한다.

1. 스미스예측기(Smith Predictor)

그림 6은 곱셈형 불확실성을 가진 공칭플랜트에 대한 스미스예측기의 구성을 보인다. $P(s)$ 는 (12)에서 정의된 공칭모델을 나타내고, $\Delta(s)$ 는 플랜트의 곱셈형 불확실성(모델오차)이다 이 모델오차는 (7)의 시스템규명 과정에서 발생하는 구조적인 계수오차와 서보밸브의 스펙트럼, 유압관로에서의 압력강하 등 생략된 동특성을 나타내는 비구조적인 오차를 모두 포함한다. $K(s)$ 는 스미스예측기를 나타내는데 일반적인 PID 제어기인 $K_o(s)$ 와 내부 되먹임 루프인 $P_o(s) - P(s)$ 로 구성된다. 여기서 $P_o(s)$ 는 (12)에서 시간지연요소를 제외한 부분, 즉 $P_o(s) = C_o(s)G_o(s)$ 이다. 스미스예측기의 내부 되먹임 루프의 신호 \hat{q} 은 측정시간지연만큼의 출력을 예측하는 역할을 하며, 따라서 $P_o(s) - P(s)$ 를 예측기라고 한다. 스미스예측기의 성능을 보장하는 데는 두가

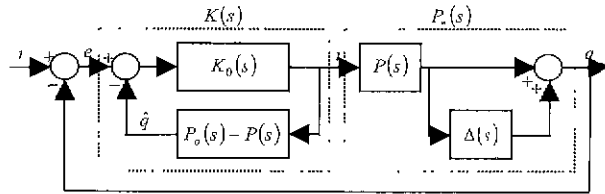


그림 6. 곱셈형 불확실성을 가진 공칭플랜트에 대한 스미스예측기.

Fig. 6. Smith predictor configuration for the nominal plant with a multiplicative uncertainty.

지 사항이 필요하다. 첫째 정확한 측정시간지연 값을 아는 것과, 또 다른 하나는 정확한 공칭모델을 유도하는 것이다.

제어를 위하여 특정의 리클레이머가 선정되면 측정 시간지연 값은 계산되거나 실험을 통하여 측정될 수 있다. 그러나 II 절의 모델링부분에서 언급한 것과 같이 (12)의 공칭모델은 모델오차를 포함하고 있는 상황이므로 보통의 스미스예측기로서 견실안정성을 보장할 수는 없다 하겠다.

2. 스미스예측기의 견실안정성

본 절에서는 리클레이머의 견실제어를 위하여 스미스예측기의 견실안정성 조건이 유도된다. 실제의 채집작업의 전달함수 특성을 다음과 같이 곱셈형 불확실성으로 나타내자.

$$P_*(s) = P(s)(1 + \Delta(s)) \quad (13)$$

여기서 아래첨자 *는 “실제의 플랜트”를 나타내며, $\Delta(s)$ 는 플랜트의 곱셈형 불확실성이다. 스미스예측기 블록의 전달함수는 다음과 같다.

$$K(s) = \frac{K_o(s)}{1 + K_o(s)(P_o(s) - P(s))} \quad (14)$$

모델오차가 없을 때에, 즉 $\Delta(s) = 0$ 일 때, 때로전달함수는 다음과 같다.

$$T_c(s) = \frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)} = \frac{K_o(s)P(s)}{1 + K_o(s)P_o(s)} \quad (15)$$

따라서, [3, p. 53]의 결과를 이용하면 곱셈형 불확실성에 대한 견실안정성 조건은 다음과 같다.

$$\|\Delta(j\omega)T_c(j\omega)\|_\infty < 1 \quad (16)$$

또한, $P(j\omega) = P_o(j\omega)e^{-jT_o\omega}$ 이므로 다음의 부등식이 성립한다.

$$\left\| \frac{\Delta(j\omega)K_o(j\omega)P(j\omega)}{1 + K_o(j\omega)P_o(j\omega)} \right\|_\infty \leq \left\| \frac{\Delta(j\omega)K_o(j\omega)P_o(j\omega)}{1 + K_o(j\omega)P_o(j\omega)} \right\|_\infty$$

즉, (16)의 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\left\| \frac{\Delta(j\omega)K_o(j\omega)P_o(j\omega)}{1 + K_o(j\omega)P_o(j\omega)} \right\|_\infty < 1 \quad (17)$$

이제, (17)을 사용하여 PID 제어기 $K_o(s)$ 의 설계를 위한 다음과 같은 조건을 제시한다.

$$\left| \frac{K_o(j\omega)P_o(j\omega)}{1 + K_o(j\omega)P_o(j\omega)} \right| < \frac{1}{|\Delta(j\omega)|}, \quad \forall \omega > 0. \quad (18)$$

따라서, 공칭모델의 곱셈형 모델오차를 주파수역에서 나타내는 $|\Delta(j\omega)|$, $\omega > 0$ 가 결정되면, (18)의 관계식에 의하여 스미스에측기의 견실안정성 조건을 만족하는 $K_o(s)$ 를 설계할 수 있다. 다음 절에서는 리클레이머에 대하여 $\Delta(j\omega)$ 의 범위를 구하는 방법을 제시한다

IV. 불확실성의 정량화

본 절에서는 (18)의 오른쪽을 계산하기 위하여 리클레이머의 $\Delta(j\omega)$ 를 주파수역에서 추정한다. 실제의 전달함수를 다음과 같이 두가지 방법으로 표현할 수 있다.

$$P_*(s) = P(s)(1 + \Delta(s)) = C_o(s)G_*(s)e^{-T_*s} \quad (19)$$

여기서 $G_*(s)$ 는 (5)에 대한 실제의 전달함수, 즉 입력 전류 i 로부터 붐회전속도 ω 까지의 실제의 전달함수이고, T_* 는 실제의 측정지연시간이다. 그러나, 출력방정식 부분은 (12)의 $C_o(s)$ 를 그대로 쓴 점에 주목한다. 본 논문에서는 출력방정식에 대한 모델링오차는 고려하지 않는다. (13)으로부터 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$|\Delta(j\omega)| = \frac{|P(j\omega) - P_*(j\omega)|}{|P_o(j\omega)|}, \quad \forall \omega > 0. \quad (20)$$

(20)의 분자항은 (12)와 (19)를 이용하여 계산하면 다음과 같이 된다.

$$|P(j\omega) - P_*(j\omega)| = |C_o(j\omega)| |G_o(j\omega)e^{-j(T_o - T_*)\omega} - G_*(j\omega)| \quad (21)$$

$\forall \omega > 0$. 또한, 측정지연시간은 실험을 통하여 구할 수 있는 값이므로 $T_o - T_* \approx 0$ 를 가정하면, (20)은 다음과 같이 된다.

$$|\Delta(j\omega)| = \frac{|G_o(j\omega) - G_*(j\omega)|}{|G_o(j\omega)|}, \quad \forall \omega > 0. \quad (22)$$

본 논문에서는 (22)를 실험을 통하여 추정한다 리클레이머의 경우에 샘플링 시간은 붐의 동특성에 비해 충분히 빠르므로 (22)는 다음과 같이 나타낼 수 있다[1, p.12].

$$\frac{1}{|\Delta(e^{j\omega})|} = \frac{|G_o(e^{j\omega})|}{|G_o(e^{j\omega}) - G_*(e^{j\omega})|}, \quad \forall \omega > 0. \quad (23)$$

(23)에서 $G_o(j\omega)$ 는 알고 있는 전달함수이고, $|G_o(j\omega) - G_*(j\omega)|$ 가 구해져야 되는 값이다. (5)의 실제의 전달함수를 $G_*(j\omega) = G_o(j\omega) + G_\Delta(s)$ 로 표현할 때, $G_\Delta(j\omega)$ 는 $G_o(j\omega)$ 에 대한 덧셈형 불확실성이 된다

주석 3 : 공칭모델 (12)에 대한 곱셈형 불확실성의 정량화 문제는 최종적으로 붐회전시스템의 전달함수 (5)에 대한 덧셈형 불확실성을 정량화하는 문제로 귀착된다.

본 논문에서는 Goodwin 외 2인[4]의 방법을 사용하여 $|G_\Delta(j\omega)|$ 를 구한다. 이 덧셈형 불확실성을 주파수역에서 정량화하는 방법을 다음과 같이 6 단계로 기술한다.

단계 1 : 최소자승추정법 혹은 이와 유사한 방법을 사용하여 붐회전시스템의 이산형 공칭모델인 $G_o(z)$ 의 미정계수를 결정한다. N 개의 입/출력 데이터로 구성된

벡터를 각각 $U = [u(1) \dots u(N)]^T$ 와 $Y = [y(1) \dots y(N)]^T$ 로 정의한다. 여기서 u 는 입력전류 i 이고, y 는 붐회전속도 ω_2 이다.

단계 2 단계 1에서 얻어진 전달함수 $G_o(z)$ 를 다음과 같이 변형한다.

$$G_o(z) \approx \sum_{k=0}^{p-1} g(k)\lambda_k(z) = \Lambda(z)\hat{\theta}_g \quad (24)$$

여기서 p 는 충분히 큰 정수이고, $\lambda_k(z)$ 는 선형 시불변시스템을 표현할 수 있는 임의의 기저함수, 그리고 $g(k)$ 는 $\lambda_k(z)$ 의 계수이다. 기저함수들을 벡터로 표시하면, $\Lambda(z) = [\lambda_0(z) \lambda_1(z) \dots \lambda_{p-1}(z)]$, $\hat{\theta}_g = [g(0) \dots g(p-1)]^T$ 로 표시된다. 예를 들어, 유한임펄스응답(Finite Impulse Response: FIR) 모델의 기저함수는 $\lambda_k(z) = z^{-k}$ 이고 $g(k)$ 는 (6)의 임펄스응답이 된다 반면에 Laguerre 모델의 기저함수는 (6)의 대표극점의 실수부분의 절댓값을 ξ 로 놓을 때

$$\lambda_k(z) = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{(z-\xi)} \left(\frac{1-z\xi}{z-\xi} \right)^k$$

단계 3 : $\Pi(z) = [z^{-1} \dots z^{-(m-1)}]$ 을 정의한다. 여기서 m 은 $G_*(z)$ 의 임펄스응답이 충분히 감쇠된 시점의 시간을 나타낸다. 입력데이터 $u(k)$ 와 단계 2에서 얻은 $\Lambda(z)$ 를 사용하여 다음의 값들을 계산한다.

$$\begin{aligned} \Phi^T &= [\phi_1 \dots \phi_N], \text{ 여기서 } \phi_k^T = \Lambda(z)u(k), \\ Q &= (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T, \\ \Psi^T &= [\psi_0 \dots \psi_N]. \text{ 여기서 } \psi_k^T = \Pi(z)u(k) \end{aligned} \quad (25)$$

단계 4 : 다음과 같은 최적화문제의 해를 구한다(참고문헌[4] 참조). 이 문제는 다음과 같이 정의된 log maximum likelihood function을 최대화시키는 M , ζ 와 σ_v 를 찾는 문제이다.

$$\arg \max_{M, \zeta, \sigma_v} l(W; M, \zeta, \sigma_v) = \arg \max_{M, \zeta, \sigma_v} \left(-\frac{1}{2} \ln \det \Sigma - \frac{1}{2} W^T \Sigma^{-1} W + \text{constant} \right) \quad (26)$$

여기서

- $W = H^T (Y - \Phi \hat{\theta}_g)$
- Σ 는 $I - \Phi Q$ 의 독립적인 $N - p$ 개의 열로 구성되는 행렬,
- $\Sigma = H^T \Psi C_\eta \Psi^T H + \sigma_v^2 H^T H$,
- $C_\eta = \text{diag} \{ M \zeta^k \}_{0 \leq k \leq m-1}$.

단계 5 임의의 주파수 ω 에 대하여, $\Lambda(e^{-j\omega})$ 와 $\Pi(e^{-j\omega})$ 를 구한다. 이제 (23)의 분모의 기대값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E \left[|G_o(e^{-j\omega}) - G_*(e^{-j\omega})|^2 \right] &= (\Pi - \Lambda Q \Psi) C_\eta (\Pi - \Lambda Q \Psi)^* \\ &\quad + \Lambda Q C_v Q^T \Lambda^* \end{aligned} \quad (27)$$

여기서 $C_v = \sigma_v I_{N \times N}$ 이고, 윗첨자 *는 켈레복소전치행

열을 의미한다.

단계 6 각 ω 에 대하여 단계 5를 반복하면서 (23)을 계산하여 불확실성에 대한 한계를 주파수 영역에서 정량화한다

V. 실험 및 모의실험

계수추정에 대한 실험은 포항제철의 광양제철소 원료아적장의 리클레이머에 대하여 수행되었다.

단계 1 (6)의 미정계수들을 결정하기 위하여, 9000개의 데이터가 15Hz의 주기로 수집되었다. 즉, $N = 9000$ 이다. 입력신호의 들뜸지속성 (persistent excitation)을 만족시키기 위하여 입력신호 주파수의 동작점 근처에서 3개의 다른 주파수를 섞었다. 시스템 입력신호의 동작점은 대략 0.2%/sec에서 0.6%/sec의 주파수이다. 최소자승법으로 결정된 전달함수 (6)의 결과는 다음과 같다.

$$G_o(z) = \frac{0.1429z^{-1}}{1 - 0.2592z^{-1} + 0.2166z^{-2}} \quad (28)$$

그림 7은 실험시의 출력값과 실험시와 동일한 입력신호를 (28)에 부여하였을 때의 출력을 비교한 그림이다. 그림 7에서 비교된 것처럼 규명된 (28)은 붐의 선회운동에 대한 적절한 공칭모델이라 판단된다.

단계 2와 단계 3 : (28)을 (24)의 형태로 변형함에 있어서 $\zeta = 0.13$ ((28)의 극점의 실수부의 절대값)인 5차의 Laguerre 모델을 사용한다.

$$G_o(z) = \sum_{k=0}^4 g(k) \frac{\sqrt{1-0.13^2}}{(z-0.13)} \left(\frac{1-0.13z}{z-0.13} \right)^k$$

여기서 $g(0) = 0.0184$, $g(1) = 0.1454$, $g(2) = -0.0120$, $g(3) = -0.0287$, and $g(4) = 0.0080$ 이다. 단계 3의 $\Pi(z)$ 를 계산할 때에는 $m=30$ 으로 하였다.

단계 4 : (26)의 최적화 문제를 풀기 위하여 유전자알고리즘이 사용된다. 유전자 알고리즘으로 구한 M , ζ , 그리고 σ_v 의 값은 다음과 같다.

$$M = 0.412, \quad \zeta = 0.793, \quad \text{그리고} \quad \sigma_v = 0.12. \quad (29)$$

그림 8에서 지속적으로 감소하는 두 곡선은 덧셈형 불확실성 $G_\Delta(j\omega)$ 의 상한 및 하한을 나타낸다.

단계 5와 단계 6 : 단계 5와 단계 6을 통하여 (23)의 $1/|\Delta(j\omega)|$ 를 구하면 그림 9의 위쪽 곡선과 같다. 그림 9의 아래 곡선은 스미스에측기의 견실안정성 조건인

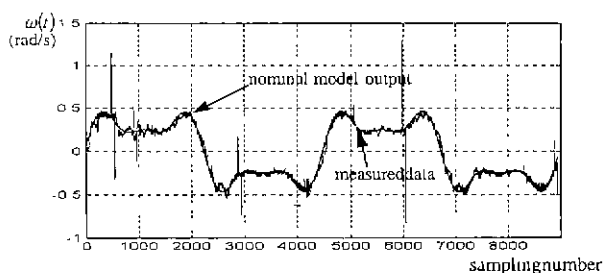


그림 7. 실험데이터와 (28)의 응답특성과의 비교.
Fig. 7. Comparison between the experimental output and the response of (28).

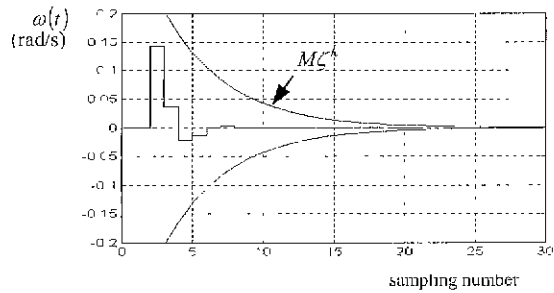


그림 8. $G_o(j\omega)$ 의 덧셈형 불확실성의 추정 (실험결과).

Fig. 8. An estimated additive uncertainty bound of $G_o(j\omega)$ (experimental results).

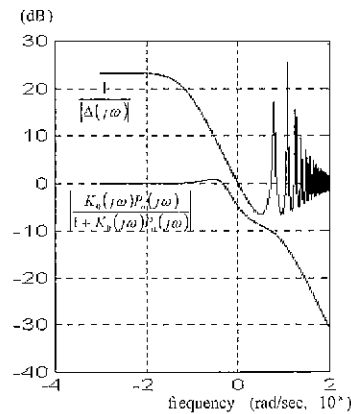


그림 9 설계조건 (18)을 만족시키는 스미스에측기의 설계 (실험결과).

Fig. 9. Design criteria (18) obtained for a specific reclaimers (experimental results).

(18)을 만족하는 $K_o(s)$ 를 설계한 것을 보여준다 최종적으로 선정된 $K_o(s)$ 는 다음과 같다

$$K_o(s) = 10.3 + 0.17 \frac{1}{s} + 20.2s \quad (30)$$

(30)의 PID 게인들은 (18)을 만족하면서 대역폭을 크게 하여 정착시간을 줄이도록 루프성형법(loop shaping)을 통하여 결정되었다.

모의실험 (30)과 같이 설계된 스미스에측기의 견실성을 검증하기 위하여, 측정시간 지연 $T_o = 7.8\text{sec}$ 와 불선형시스템에 대한 다음의 덧셈형 모델오차를 가지고 모의실험을 수행하였다.

$$G_\Delta(z) = \frac{-0.0334z^{-3} - 0.1726z^{-2} + 0.2284z^{-1} - 0.0224}{z^{-4} - 0.6567z^{-3} + 0.4550z^{-2} - 0.1212z^{-1} + 0.0293} \quad (31)$$

(31)은 그림 8에서 보여주는 것처럼 그 임펄스응답이 지속적으로 감소하는 두 곡선 사이에 포함되도록 선정되었다. 그림 10은 첫째, 시간지연 및 불확실성이 없는 공칭플랜트에 대하여 잘 조정된 PID 제어를 시간지연이 있는 시스템에 적용하였을 때 (Simple PID로(31) 표기됨) 둘째, 시간지연은 포함되었으나 모델링오차가 없는 시스템에 대하여 잘 조정된 스미스에측기로 제어

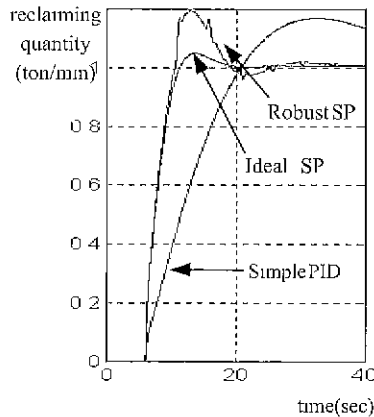


그림 10. 시간지연시스템에 적용된 Simple PID, 모델 오차가 없는 이상적인 플랜트에 적용된 Ideal SP, 그리고 모델오차를 포함한 플랜트에 적용된 Robust SP 의 비교 (모의실험 결과).

Fig. 10. Comparison of a simple PID, an ideal SP without uncertainty, and a robust SP with uncertainty (simulation results).

할 때 (Ideal SP 로 표기됨), 그리고 (31)과 같은 모델링 오차 1 를 플랜트에 추가한 후 본 논문에서 설계된 견실한 스미스예측기로 제어할 때 (Robust SP 로 표기됨) 의 3 가지 경우의 시스템 시간응답을 비교하고 있다. 일반적인 PID 제어기와 비교할 때 견실한 스미스예측기는 모델링오차가 존재함에도 불구하고 응답속도와 정착시간 성능에 있어서 매우 뛰어나고 견실한 성능을 보여주고 있다.

VI. 결론

본 논문은 리클레이머에 대한 제어를 위한 모델링과 견실한 스미스예측기의 설계에 관한 연구이다. 본 논문의 핵심내용은 산업현장에서 이미 사용중인 장비에 대해서 제어를 사후에 구현할 때 부딪히는 실제적인 문제들을 해결하는 과정을 체계적으로 기술하고 있다. 스미스예측기의 견실안정성 조건이 유도되었으며, 이 조건이 리클레이머에 적용될 때 분회전모델에 대한 덧샘형 불확실성의 범위를 추정하는 조건으로 귀착됨을 밝혔다. 또한, 스미스예측기가 허용하는 공칭모델의 불

확실성을 주파수역에서 정량화하는 과정을 체계적으로 제시하였다. 본 논문에서 기술하는 제어기설계 과정은 리클레이머 뿐만 아니라 다른 많은 시스템에 대해서도 직접적으로 응용될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- [1] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Computer Controlled Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [2] C. Choi, K. Lee, K. Shm, K. S. Hong, and H. Ahn, "Automatic landing method of a reclaimer on the stockpile." *IEEE Trans Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 29, Part C, no. 1, pp. 308-314, February, 1999.
- [3] J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Maxwell Macmillan, New York, 1992.
- [4] G. C. Goodwin, M. Gevers, and B. Ninness, "Quantifying the error in estimated transfer functions with application to model order selection," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, no. 7, pp. 913-927, 1992.
- [5] K. S. Hong, Y. M. Kim, and C. Choi, "Inverse kinematics of a serial manipulator: Kinematic redundancy and a closed-form solution by exploiting geometric constraints," *KSME International Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 629-638, December, 1997.
- [6] K. S. Hong, S. H. Kim, and K. I. Lee, "Control of reclaimer: Kinematics, modeling, identification, and robust smith predictor," *Proce. of the 14th World Congress of IFAC*, Beijing, China, Preprint, no. N-7b-01-6, vol. E, July 5-9, 1999.
- [7] L. Ljung, *System Identification. Theory for the User*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.
- [8] Z. J. Palmor, "Time-Delay Compensation: Smith Predictor and its Modifications," *The Control Handbook*, vol. 1. CRC press, pp. 224-229, 1996.
- [9] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital Control System Analysis and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [10] K. Shm, C. Choi, H. Ahn, and K. Lee, "Development of a tele-operation system of reclaimers," *Proceeding of the 11th Korea Automatic Control Conference*, pp. 1465-1468, 1996.
- [11] J. Watton, *Fluid Power Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.



김 성 훈

1975년 1월 10일생. 1997년 부산대학교 제어기계공학과 (공학사). 1999 부산대학교 대학원 지능기계공학과 (공학석사). 1999-현재 LG 생산기술원 연구원. 관심분야는 예측제어, 시스템규명, 적응제어



홍 금 식

1957년 8월 25일생. 1975-1979 서울대학교 기계설계학과 (공학사). 1985-1986 Columbia University (New York) 기계공학과 (공학석사). 1987-1991 University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC) 응용수학과 (이학석사) 및 기계공학과 (공학박사). 1991-1992 UIUC 기계공학과 Post-doctoral Fellow. 1979-1982 군복무 (포병). 1982-1985 대우중공업 (인천) 기술연구소 연구원, 디젤엔진 소음·진동 담당. 1993-현재 부산대학교 공과대학 전임강사. 조교수, 부교수. 관심분야는 시스템이론, 적응제어, 비선형제어, 분포매개변수시스템의 제어.



강 동 현

1972년 11월 26일생. 1998년 동아대학교 기계공학과 (공학사). 1998-현재 부산대학교 대학원 지능기계공학과 재학중. 관심분야는 시스템 규명, 불확실성의 정량화, 견실적응제어, 분포매개변수시스템의 제어.