

퍼지 시스템을 사용한 전기로 합금철 계량 제어

Weighing control of alloy metal for electric arc furnace by fuzzy system

이기범* · 허정현* · 주문갑**

GiBum Lee*, J. H. Heo* and Moon G. Joo**

* 포항산업과학연구원 부품자동화연구소

** 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

요 약

본 논문에서는 전기로에 투입되는 합금철의 중량을 보다 정밀하게 제어하기 위하여 Mamdani 타입의 퍼지 알고리즘을 적용하였다. 고안된 퍼지 시스템은 중량 오차 및 변화를 입력으로 하고 합금철 투입 바이브레이터의 진동의 크기를 출력으로 하며, programmable logic controller의 래더 프로그램으로 구현하여 현장에 적용하였다. 현장에 적용된 퍼지 제어 알고리즘은 기존의 온-오프 제어기에 비하여 전기로에 투입되는 합금철의 계량 정밀도를 높였을 뿐 아니라, 합금철 투입 시간도 크게 단축시켰다.

키워드 : 퍼지 제어, 합금철, 전기로, PLC

Abstract

A fuzzy control algorithm is used to weigh alloy metal into electric arc furnace and implemented by using ladder program for programmable logic controller, where weight error and its derivative are used for input variables and vibration amplitude of alloy bin is used for output variable. Proposed fuzzy control algorithm is applied to the plant and results in higher measuring accuracy as well as faster measuring term than conventional on-off control system.

Key Words : Fuzzy control, alloy metal, electric arc furnace, programmable logic controller

1. 서 론

전기로[1]에는 그림 1과 같이 전기로 내부에 여러개의 전극봉이 위치하고 있으며, 각각의 전극에는 수만 암페어의 전류가 흐른다. 전기로의 전극이 전기로 안의 스크랩(scrap)에 근접하면 전극 사이에 강한 전류가 스크랩에 흘러 스크랩이 녹아 용강이 된다.

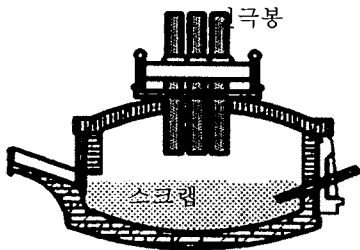


그림 1. 전기로.

Fig. 1. Electric arc furnace.

이때 만들어진 용강의 성분을 조정하기 위하여 니켈, 구리, 망간 등의 다양한 합금철을 조업 중에 첨가하게 된다. 합금철 생산 공정에서 전기로에 투입되는 합금철 원료 비율을 정확히 맞추는 것은, 생산되는 제품(합금철)의 품질뿐만 아니라 생산 원가에도 큰 영향을 미친다. 또한, 부정확한 합금철 원료의 비율로 제품을 생산할 경우, 2차/3차 가공품에서 불량률의 원인이 될 수 있고, 이 경우에는 안전성의 문제 등이 발생할 수 있다.

합금철 원료의 비율을 정확히 조절하는 것은 합금에 사용되는 합금철의 중량을 정확히 측정함으로써 가능하며, 합금철 생산 라인은 심한 분진 및 소음 등으로 작업환경이 매우 열악하므로, 전체 생산 공정은 자동화 시스템이 구축되어 있다.

합금철 제어기[2]는 전기로에 투입하고자 하는 합금철들을 바이브레이터의 진동을 이용하여 카트에 낙하시키고, 카트에 낙하된 중량을 계측하여 정해진 중량을 초과하지 않도록 제어하는 펌프프 제어기이다.

기존의 전기로 합금철 중량 제어 방식은 투여되어야 할 합금철의 양이 기준값을 넘으면 고진동을, 기준값보다 낮으면 저진동을 취하는 온-오프 제어 방식이었으며 이러한 방식으로는 합금철의 투입량을 정밀하게 제어할 수 없고, 오차를 줄이기 위하여 저진동 시간을 늘임에 따라 전체 계량 시간이 길어지는 단점을 가지고 있었다.

한편, 퍼지 및 신경망 제어기는 이미 철강 분야에서도 많

접수일자 : 2008년 5월 7일

완료일자 : 2008년 11월 1일

** 교신저자

본 연구는 포항제철 신기술연구조합 프로젝트에 의해 지원 받았습니다.

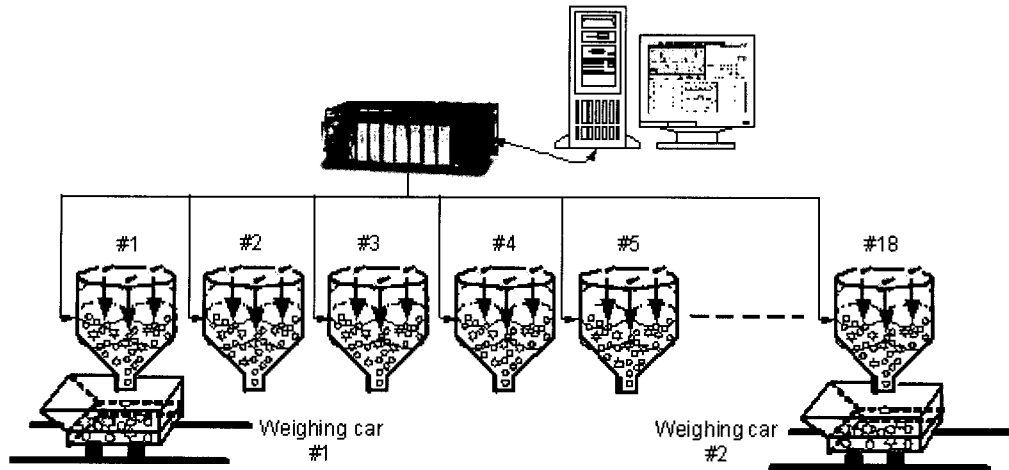


그림 2. 합금철 계량 제어기의 구성.
Fig. 2. Weigh control system for alloy metal.

은 응용 결과를 가지고 있으며, 특히 연속 주조 공정에서 몰드 내 용강 높이를 제어하기 위한 PID와 퍼지 제어기의 혼합 제어 [3-5]와 퍼지 제어기[6] 및 뉴럴 퍼지 제어기[7]가 보고되었고, 박판 주조 공정에서도 몰드 내 용강 높이를 제어하기 위한 적응 퍼지 제어기[8-9] 등이 보고되었다. 또한, 미니밀 제어에 신경망 제어기[10]가 사용되었다.

본 논문에서는 투입되는 합금철의 중량 오차를 줄이고 계량 시간을 단축하기 위하여 Mamdani 타입의 퍼지 시스템을 사용하였으며, 이를 PLC (programmable logic controller) 에 구현하여 실제 현장에 투입하여 그 효과를 보였다.

2. 합금철 계량을 위한 퍼지 제어기

2.1 합금철 계량을 위한 퍼지제어기의 구성

그림 2는 전기로에 들어갈 각각의 합금철을 통(bin)의 진동을 이용하여 카트(weighing car)에 낙하시키는 PLC 시스템을 보여준다. 18개 통(bin)에는 각각 다른 합금철을 담고 있으며, 출구 진동에 의해 낙하된 합금철은 카트에 하부에 설치된 로드셀에 의해 무게가 자동 측정된다. 카트에 담긴 적절한 양의 합금철은 전기로에 투입되어 용강의 성질을 결정하게 된다.

합금철 제어기는 퍼지 제어기로서, PLC로 구현되었고, 이때 사용된 퍼지 제어기의 구성은 그림 3과 같다. 제어기의 입력은 합금철마다 정해진 투입 중량과 카트에 떨어진 합금철 중량의 오차와 그 변화분이며, 출력은 바이브레이터의 진동 강도이다.

2.2 퍼지 집합과 퍼지 함수

퍼지 규칙의 전건부 및 후건부의 언어적 제어 변수는 투입잔량과 중량의 변화량, 바이브레이터의 진동 강도에 대해 각각 VS(Very Small), S(Small), M(Middle), B(Big), VB(Very Big)으로 나누었다. 여기서 투입 잔량 및 잔량의 변화량의 단위는 kg이며 그림 4와 그림 5와 같이 소속 함수를 정의하였다.

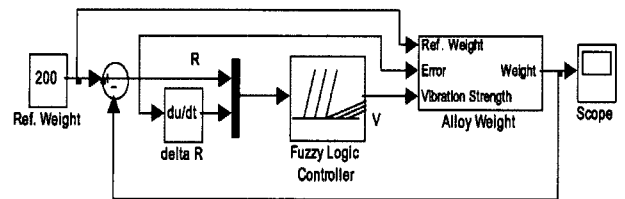


그림 3. 퍼지 제어기의 구성.
Fig. 3. Fuzzy controller.

출력 변수인 바이브레이션 강도의 단위는 %이다. 즉, 바이브레이션 강도가 Very Big인 경우, 최대 강도(100%)로 진동함을 의미한다. 바이브레이션 강도 출력은 그림 6과 같이 싱글톤 함수를 사용하였다.

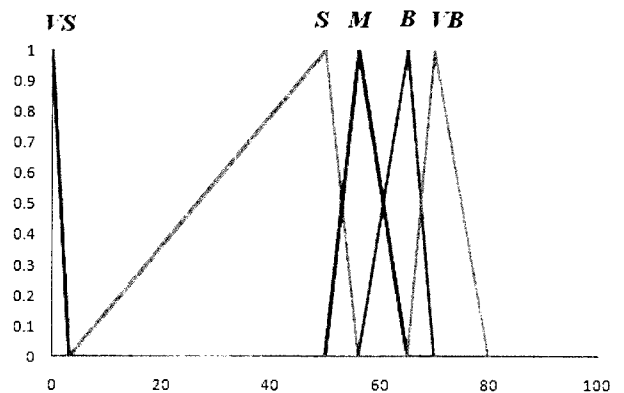


그림 4. 투입 잔량 (R).
Fig. 4. Remainder (R).

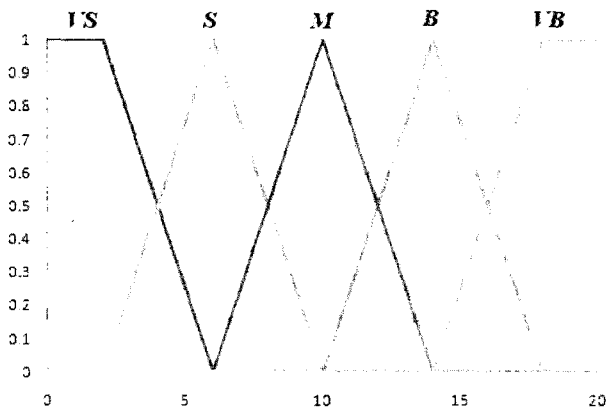


그림 5. 중량변화량 (ΔR).
Fig. 5. Change of weight (ΔR).

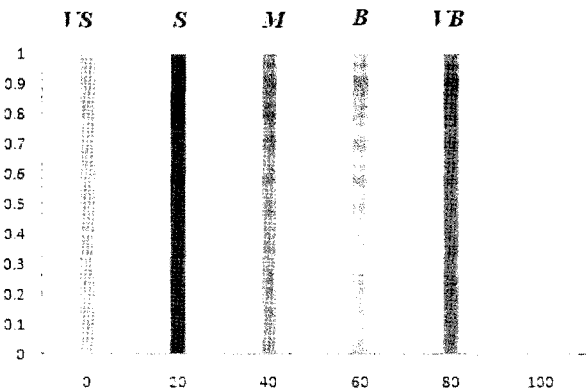


그림 6. 바이브레이션 강도 (V).
Fig. 6. Vibration strength (V).

2.3 퍼지 규칙 및 퍼지 추론

앞에서 정의한 소속 함수로부터 퍼지 제어를 구성하기 위하여 표 1과 같이 Mamdani 타입의 퍼지 규칙을 정의하였다. Mamdani 타입의 퍼지 시스템은 TSK 타입의 퍼지 시스템에 비하여 후건부가 간단하여 구현이 쉬우며 직관적이기 때문에 산업 현장에서 선호된다.

표 1. 퍼지 제어 규칙.
Table 1. Fuzzy Rule.

		ΔR				
		VS	S	M	B	VB
R	VS	VS	VS	VS	VS	VS
	S	M	M	S	S	S
	M	B	B	B	M	M
	B	B	B	B	B	B
	VB	VB	VB	VB	VB	VB

추론 방법은 싱글톤 퍼지화기, 곱 추론, 중심평균 비퍼지화기를 사용하였으며 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{\sum_i \mu^i y^i}{\sum_i \mu^i} \quad (1)$$

여기에서 μ^i 는 i 번째 퍼지 규칙의 적합도로서 식 (2)와 같이 나타내어지고

$$\mu^i = \mu^i(R) \mu^i(\Delta R) \quad (2)$$

y^i 는 i 번째 퍼지 규칙의 후건부를 나타낸다. i 번째 퍼지 규칙의 형태는 다음 식 (3)과 같다.

$$\text{IF } R \text{ is } A \text{ and } \Delta R \text{ is } B \text{ THEN } V \text{ is } y^i \quad (3)$$

2.4 합금철 계량 퍼지 제어기의 시뮬레이션

카트에 떨어지는 합금철의 양은 바이브레이터의 진동강도에 비례하는데, 작업 중 바이브레이터를 중지시키더라도 잔여 진동에 의하여 일부의 합금철이 굴러 떨어지므로, 시뮬레이션에서는 랜덤 함수를 써서 표현하였다. 식 (4)와 같이 쓰여진 진동 강도에 따른 합금철 중량 변화의 MATLAB 모델은 그림 7과 같다.

$$\frac{dM(t)}{dt} = \begin{cases} \alpha V & , \text{if } M < M_s - M_c \\ \text{random,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기에서 $M(t)$ 는 카트에 떨어진 합금철의 중량, V 는 바이브레이터의 강도, α 는 비례상수, M_s 는 합금철 목표 중량, M_c 은 목표중량에 도달하기 직전 바이브레이터를 중지시키는 허용 중량 오차를 나타낸다. 시뮬레이션에서는 $\alpha = 0.2$, $M_s = 200$, $M_c = 2$ 를 사용하였다.

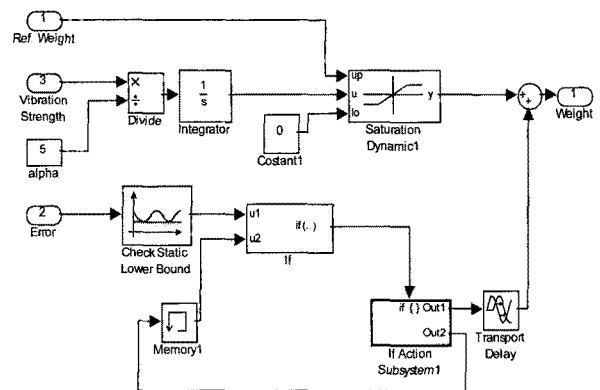


그림 7. 합금철 계량의 MATLAB 모델.
Fig. 7. MATLAB model of weighing alloy.

앞에서 정의한 퍼지 소속 함수와 퍼지 추론을 사용하여 시뮬레이션을 한 결과, 그림 8과 같은 제어기의 출력을 얻을 수 있었다. 그림 8은 합금철 목표 중량을 200kg으로 설정한 경우이며, 빨간 선은 목표 중량과 현재량의 오차(kg), 붉은선은 이에 따른 바이브레이터의 진동 강도(%)를 나타낸다.

퍼지 제어기에 의하여, 바이브레이터는 중량 오차가 80Kg 이상인 경우 100%로 진동하다가, 오차에 줄어들수록 진동 크기를 낮추게 되고, 오차가 20Kg미만인 경우에는 최소 크기로 진동하여 목표 중량보다 2kg 적을 때에 바이브레이터의 진동을 중단시킨다. 그림 8에서는 최종 중량

오차값이 0에 도달하지 않고 있는데, 이는 합금철 중량 제어 시스템에서 바이브레이션 중단 시 낙하되는 철의 오차를 감안한 것으로, 실제 합금철 제어 시스템에서도 비슷한 결과를 가져왔다.

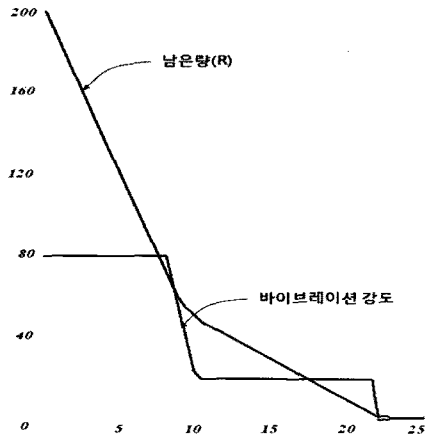


그림 8. 시뮬레이션 결과.
Fig. 8 Simulation result

3. 합금철 계량 퍼지 제어 결과

실제 시스템에서는 합금철의 종류와 중량에 따라 각각 바이브레이터의 최대, 최소 진동 크기와 제어 시작, 종료 시점을 다르게 지정하여야 하는데, 그림 9와 같이 사용자 인터페이스 화면에서 설정이 가능하게 하였다.

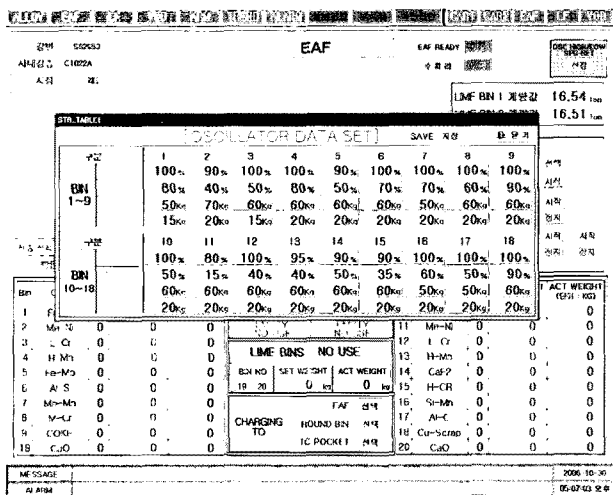


그림 9. 합금철 계량을 위한 파라미터 설정 화면.
Fig. 9. Parameter setup for each alloy metal.

그림 10은 현장 설치된 퍼지 제어기의 출력 전류를 나타낸 것이다. 바이브레이터의 진동 제어기는 출력 전류의 양(0~20mA)을 조절함으로써 진동 강도를 조절하므로, 이 그림은 진동 강도의 변화 패턴과 일치하며, 시뮬레이션 결과와 같은 패턴임을 알 수 있다.

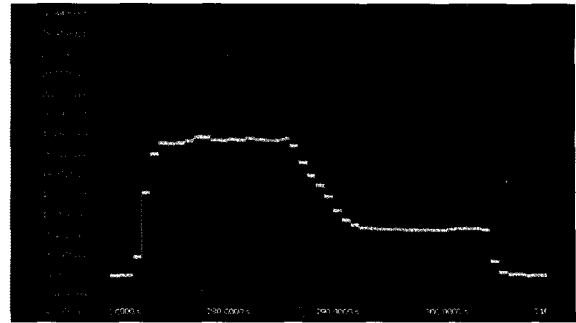


그림 10. 퍼지 제어기의 출력 전류.
Fig. 10. Current output of fuzzy controller.

고안된 퍼지 제어 기법을 사용하여 실제 현장에서 활용한 합금철 계량 제어기는 기존의 온-오프 제어기에 비하여 합금철 계량 오차와 합금철 계량 시간을 그림 11, 그림 12에서 보이는 것처럼 크게 단축시켰다. 그림 11은 13개 합금철 종류에 따른 개선 전과 개선 후의 계량 오차를 비교하여 보여주고 있으며, 그림 12는 17개 합금철 bin에 따른 합금철 계량 시간의 차이를 보여주고 있다.

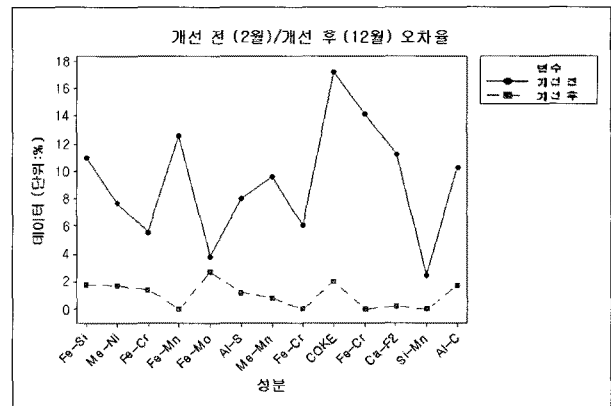


그림 11. 합금철 오차 비교.
Fig. 11. Comparison of error rate.

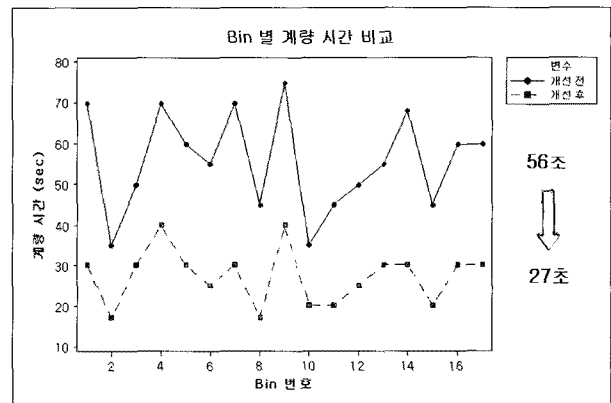


그림 12. 합금철 계량 시간 비교.
Fig. 12. Comparison of measuring term.

합금철 투입 계량 오차는 기존에 비하여 평균 8%에서 1%로 약 8배 개선되었으며, 합금철 투입 속도는 평균 56초/200Kg에서 27초/200Kg으로 2배 향상되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 퍼지 시스템을 사용하여, 전기로에 투입되는 합금철의 투입 중량을 제어하였다. 퍼지 시스템은 PLC의 일반 연산함수를 사용하여 래더 프로그램으로 구현되었다.

퍼지 제어기의 현장 적용 결과, 기존의 온-오프 제어기에 비하여 합금철 투입 계량 오차는 약 8배 축소되었으며, 합금철 계량 속도는 2배 향상되었다.

참 고 문 헌

- [1] Benoit Boulet, Gino Lalli and Mark Ajersch, "Modeling and Control of an Elctric Arc Furnace", *Proceeding of the American Control Conference*, 2003.
- [2] 황복빈, 전기로 조업법: 전기야금학, 성안당, 1992.
- [3] Michel Dussud, Sylvie Galichet, and Laurent P. Foulloy, "Application of fuzzy logic control for continuous casting mold level control", *IEEE trans. Control systems Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 246-256, 1998.
- [4] M. A. Barron, R. Aguilar, J. Gonzalez, E. Melendez, "Model based control of mold level in a continuous steel caster under model uncertainties", *Control Eng. Practice.*, Vol. 6, pp. 191-196, 1998.
- [5] Miguel A. Barron, Ricardo Aguilar, and Jesus Gonzalez, "Stabilization of the molten steel level in the mold of a continuous casting machine by means of vacuum", *IEEE trans. Industry Applications*, Vol. 36, No. 3, pp. 861-864, 2000.
- [6] Yeongseob Kueon and Wendong Xiao, "Improved mold level control for continuous steel casting by fuzzy logic control", *Trans. Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-7, 1999.
- [7] Chang-Gyoon Lim, Yeong-Seob Kueon, Yigon Kim, "Neural fuzzy mold level control for continuous steel casting", *Int. Journal of fuzzy logic and intelligent systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 146-152, 2002.
- [8] D. M. Lee, J. S. Lee, and T. Kang, "Adaptive fuzzy control of molten steel level in strip-casting process", *Control Eng. Practice*, Vol. 4, No. 11, pp. 357-364, 1996.
- [9] M. G. Joo, Y. H. Kim, and T. Kang, "Stable adaptive fuzzy control of molten steel level in the strip casting process", *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, Vol. 149, No. 5, pp. 357-364, 2002.
- [10] Gang-Hwa Lee, Dong-Il Lee, Seung-Joon Lee, Suk-Gye Lee, Shin-Il Kim, Hae-Doo Park, and Seung-Gap Choi, "Neural-based blind modeling of mini-mill ASC crwon", *퍼지 및 지능 시스템 학회 논문지*, Vol. 12, No. 6, pp. 577-582, 2002.

저 자 소개



이기범(GiBum Lee)

1984년: 광운대 전자공학과(공학사)
 1986년: 광운대 전자공학과(공학석사)
 2002년: 포항공대 전자전기공학과
 (공학박사)
 2006년 7월~현재: 포항산업과학연구원
 유비쿼터스융합연구실
 실장

관심분야 : 퍼지 이론, Petri Net, 제어 시스템 등
 Phone : 052-219-4851
 Fax : 052-219-4860
 E-mail : gblee@rist.re.kr



허정현(J. H. Heo)

1996년: 포항공대 전자전기공학과(공학사)
 2004년: 포항공대 전자전기공학과(공학석사)
 2006년 3월~현재: 포항산업과학연구원
 선임연구원.

관심분야 : 퍼지 이론, 자동화, 센서 네트워크
 Phone : 052-219-4854
 Fax : 052-219-4860
 E-mail : inspace@rist.re.kr



주문갑(Moon G. Joo)

1992년: 포항공대 전자전기공학과(공학사)
 1994년: 포항공대 정보통신학과(공학석사)
 2001년: 포항공대 전자컴퓨터공학부
 (공학박사)
 1997년~2003년: 포항산업과학연구원
 선임연구원
 2003년~현재: 부경대학교 전자컴퓨터
 정보통신공학부 조교수.

관심분야 : 지능 제어, 공장 자동화 등
 E-mail : gabi@pknu.ac.kr