

증기발생기전열관의 검사정비로봇용 엔드이펙터의 범용 제어시스템 개발

박기태¹, 김선진², 노태정^{2*}
¹한전KPS(주), ²동명대학교 메카트로닉스공학과

A development of a general purposed control system of robot end-effector for inspection and maintenance of steam generator heat pipe

Ki-Tae Park¹, Seon-Jin Kim² and Tae-Jung Lho^{2*}

¹Tech. R&D Institute, KEPCO KPS

²Dept. of Mechatronics Eng., Tongmyong University

요약 여러 종류의 증기발생기 검사정비 로봇의 엔드이펙터 모션 구동에 전부 사용할 수 있도록 *ARM Cotex M3-107* MCU 기반의 제어기와 엔드이펙터 모션 프로그램 생성 응용소프트웨어로 구성된 범용 엔드이펙터 모션구동 제어시스템을 개발하였다. 범용 제어시스템을 적용하여 엔드이펙터의 직선이송 및 회전이송의 위치 결정의 오차는 무시할만한 수준이며, 재현성은 0.04% 오차를 보여줌으로써 실제로 사용 가능한 범용 엔드이펙터 모션구동 제어시스템을 개발하였다.

Abstract The general purposed control system for driving a motion of many different typed robot end-effector, which consists of a controller based on *ARM Cotex M3-11017* MCU and an application software for generating a motion of end-effector, was developed. Experimental results show that a positioning error is nearly negligible and a repeatability error is 0.04%. Accordingly the developed control system can be applied practically to actuate a robot end-effector for inspection and maintenance of steam generator heat pipe in nuclear power plant.

Key Words : End-Effector, General Purposed Control System, Inspection & Maintenance Robot, Motion Control, Steam Generator Heat Pipe

1. 서론

현재 각국은 화력발전소를 대체하기 위하여 원자력 발전을 늘리고 있다. 특히 중동, 아프리카 지방에서 원자력 발전소를 많이 늘리고 있다. 원자력 발전의 수요 및 건설이 증가되는 만큼 관리도 중요해진다.

원자력발전소 내의 안전성 관련기기의 점검보수 기술의 확보는 원전 신뢰도 제고와 직결되어 있다. 이에 따라 고신뢰도 점검 보수를 위한 원격 점검보수작업 기술 고도화는 국가적 차원에서 시급히 확보해야할 필요성이 절실히 요구되고 있다. 원자력 발전소 내의 안전성 관련기체인 증기발생기(steam generator) 검사 및 정비 공정은

계획 예방 정비 중 대부분 주 공정으로 진행이 되어 계획 예방정비 전체 공사기간의 주요변수가 되며, 고도의 기능을 구비한 자동화 장치가 극한 작업을 신속하고도 효율적으로 처리하게 함으로써 고방사선 환경 작업으로부터 작업자를 보호하며 작업여건도 개선시킬 뿐만 아니라 원전 이상상태를 효율적으로 감시하고 점검함으로써 원전의 안전성을 향상시킬 수 있다[1].

원자력 발전소 내부 검사의 경우 활발한 연구가 진행되고 있으며 원자로 내부의 수중 상황에서의 CCD 카메라를 이용한 육안검사를 위하여 수중로봇이 개발되고 있다[2, 3, 4]. 또한 증기발생기 전열관의 검사 및 정비에도 로봇 비전을 활용하여 적용하는 연구도 진행되었다[5].

본 논문은 지식경제부의 2009년도 원전기술혁신사업 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Tae-Jung Lho (Tongmyong University)

Tel: +82-51-629-1533 email: tjlho@tu.ac.kr

Received November 13, 2012 Revised (1st December 5, 2012, 2nd December 31, 2012) Accepted January 10, 2013

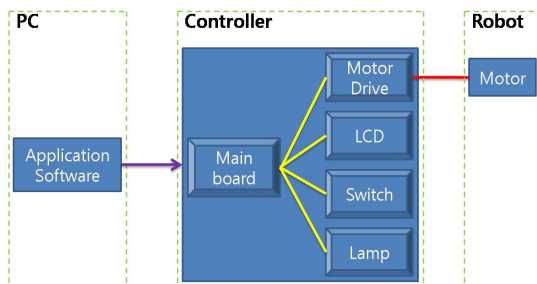
칼란드리아 감시점검용 이동형 로봇이 개발되어 작업자가 칼란드리아 내부로 들어가지 않고 칼란드리아 점검용 로봇이 획득하는 영상을 보며 검사를 하고 있다[6].

현재 원자력 발전소에서 증기발생기 전열관을 Westinghouse사의 RosaIII 로봇을 활용하여 검사/정비 작업을 수행하며, RosaIII 로봇에 용도에 적합한 엔드이펙터(end-effector)를 장착하여 운영하고 있다. 증기발생기 전열관 검사는 주로 초음파 스캐닝을 통하여 균열 및 이상상태를 검사하며 다른 엔드이펙터로 교체하여 크리닝 작업 및 보수 작업을 수행한다. 하지만 RosaIII 등과 같은 정비검사 로봇의 운영에 있어 범용의 엔드이펙터와 연동할 수 있는 시스템이 없으며, 작업 수요에 따른 엔드이펙터 변경시 그에 따른 컨트롤러 및 프로그램을 추가로 개발하여야 하는 상황이다. 그리고 현재 엔드이펙터의 동작 분석 및 작업 내용을 분석하며 원자력 발전의 중요 부분인 증기발생기 전열관 검사 시의 반복 정밀도 확보를 위하여 위치 제어가 가능하며 기존 엔드이펙터에서 사용하는 프로그램은 전문가가 작성한 프로그램이므로 다른 사람이 프로그램을 변경하거나 수정할 때에는 프로그램 해석에 상당한 시간이 소요되며 수정하기가 어렵다는 단점이 존재한다.

이에 대하여 본 연구에서는 기존 증기발생기 전열관 검사정비에 사용되는 로봇 보수 작업을 분석하여 기존의 엔드이펙터를 대체할 수 있으며, 차후 개발되는 엔드이펙터의 제어기 및 모션 프로그램으로 대체 가능한 범용 엔드이펙터 제어시스템을 개발하고자 한다.

2. 전체 시스템 구성 및 Controller 개발

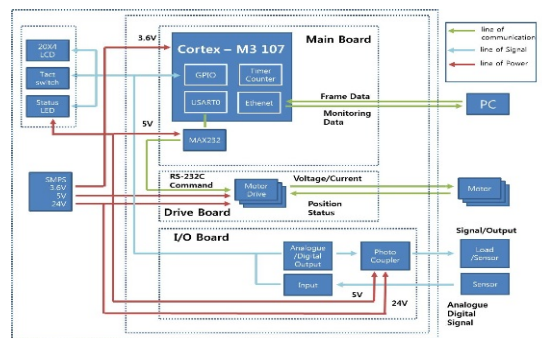
Fig. 1과 같이 범용 컨트롤러는 입/출력 시스템과 로봇 엔드이펙터 구동 드라이브시스템을 갖추어야하며, 트러블 발생 시 컨트롤러 단독으로 로봇 엔드이펙터를 구동할 수 있다.



[Fig. 1] Configuration of general purposed end-effector control system

PC 내의 엔드이펙터 모션 프로그램 생성 소프트웨어를 통하여 작성된 로봇의 엔드이펙터 구동 프로그램을 Ethernet이나 RS-232C 통신을 이용하여 범용 컨트롤러에 전송한다. 컨트롤러 내부에서는 CPU가 내장된 Main Board가 주변 장치인 모터 드라이브, 램프, 스위치, LCD 등을 제어하여 각종 상태 표시 및 PC에서 전송되어온 각종 명령들을 수행한다. PC에서 지시한 엔드이펙터 동작 명령은 컨트롤러 내부의 RS-232C 통신을 통하여 모터 드라이브 측으로 전송된다. 명령을 받은 모터 드라이브는 정비로봇에 부착된 엔드이펙터를 구동시킨다.

Fig. 2는 범용 컨트롤러 내부 구성도로서, 범용 제어기는 MCU부, I/O부, LCD, 센서입력부, 모터드라이브부로 구성하였다. Table 2는 제어기의 주요 사양이다.



[Fig. 2] Configuration of controller

[Table 2] Main specification of controller

항 목	사 양
MCU	ARM Cortex M3-107
Motor Drive	MCDC3006S
모터구동 축수	6 ea
아날로그 I/O	4~20mA, 8 Ch.
디지털I/O	24V/5V, 8 ea
통신	Ethernet, RS-232C
Display	16*4 Character LCD

제어기의 MCU는 ARM Cortex M3-107 프로세서를 사용하였으며, PC와 컨트롤러간 통신을 하며 모션 프로그램 데이터를 전송받거나 모터드라이브에서 들어오는 위치, 속도 정보를 받아 데이터 프레임을 만들어 PC측으로 전송해준다. 그리고 PC측에서 받은 데이터를 모터 드라이브 측으로 전송하여 모터를 구동시켜 로봇 엔드이펙터를 구동시킨다.

LCD는 16*4 캐릭터로서 제어기의 자동/수동 상태 및 현재 수행 중인 명령 등을 표시한다. 모터 드라이브는 Faulhaber사의 MCDC3006S로서 피크 전류 10A, 상시 허용전류가 6A를 수용할 수 있어 엔드이펙터 구동에 적합하였다. MCDC3006S는 모터에 부착된 엔코더 신호를 받아서 위치와 속도 정보, 소모 전류 등을 MCU측으로 전송해주며, MCU는 구동 데이터를 받아 모터를 구동시킨다.

제어기의 출력접점 8개로서 포토커플러를 사용하여 컨트롤러와 출력접점간의 회로를 절연하여 노이즈에 보호되도록 구성하였다. 또한 센서 신호를 입력받는 아날로그 입력의 경우 MCU의 ADC를 통하여 처리한다.

통신환경은 Ethernet이 구축되어 있을 경우 Ethernet 통신을 활용하며, 만약 환경이 구축되어 있지 않을 경우에는 RS-232C 통신을 통하여 PC와 제어기 간 통신을 통하여 데이터를 송수신 한다.

범용 엔드이펙터 제어기는 크게 ‘Running’ 모드와 ‘Manual’ 모드의 2가지 운전모드를 가지고 있다. ‘Running’ 모드는 PC에서 생성된 엔드이펙터 모션 프로그램을 통신을 통하여 받은 명령에 따라서 모터 드라이브 및 Lamp 등을 제어한다. 컨트롤러가 PC로부터 받은 명령은 출력 명령과 모터드라이브 명령이 있다.

표 3은 출력명령 포맷으로서, 처음 ‘L’은 출력명령 기호이며, 뒤의 ‘1’이나 ‘3’은 출력접점 번호이며, ‘O’, ‘F’는 각각 On, Off 상태를 명시한다. 그 뒤의 ‘CR’과 ‘LF’는 연속 명령의 구분을 위하여 표시하는 코드이다. 따라서 출력 On 명령은 출력접점 1번을 On시키는 명령이며 출력 Off 명령은 출력접점 3번을 Off시키는 명령을 의미한다.

[Table 3] Format of output command

출력 On	L	1	O	CR	LF
출력 Off	L	3	F	CR	LF

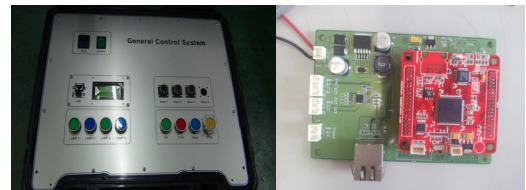
Table 4는 PC로부터 받은 모터드라이브 구동 명령이다. 처음 명시된 ‘0’과 ‘1’은 모터드라이브의 고유번호이며, 그 후 ‘L’과 ‘A’는 모터 구동 명령이며 뒤에 숫자 ‘1000’은 해당 값이다. 동작명령의 ‘M’은 모터 구동 명령이다. 따라서 위치지정 명령의 경우 0번 모터 구동으로 절대 좌표값 1000으로 위치 결정하라는 명령이며, 동작명령의 경우 1번 모터드라이브에 연결된 모터를 동작하라는 명령이다.

[Table 4] Format of motor driving command

위치지정	0	L	A	1	0	0	0	CR	LF
동작명령	1	M	CR	LF					

‘Manual’ 모드는 정비로봇을 프로그램을 통하여 동작하기 전에 사전에 정비 로봇을 운전해보거나 트러블 발생시 수동으로 동작하기 위한 기능이다. 범용 컨트롤러 상부에 부착되어있는 푸쉬 버튼을 통하여 구동할 모터를 선택하고, 정회전 또는 역회전 동작을 하게 된다. 실제로 컨트롤러 운영 시에는 원자력발전 관리실에서 검사정비 로봇 엔드이펙터를 보면서 컴퓨터로 원격 조작하거나 작업자가 노트북을 통하여 컨트롤러와 연결하여 운영할 수 있다.

Fig. 3은 본 연구에서 개발 제작한 범용 컨트롤러의 외관 및 내부의 제어기 PCB 사진이다.



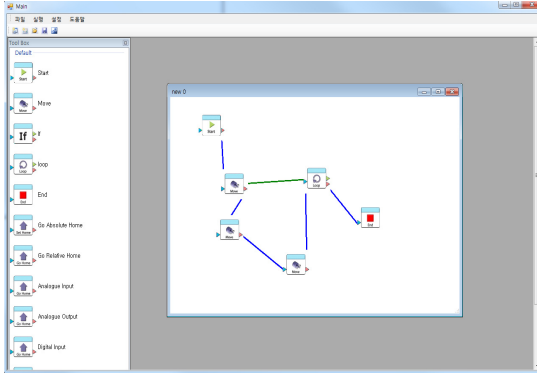
[Fig. 3] Appearance of controller and PCB

3. 모션프로그램 생성 소프트웨어 개발

PC에 내장된 엔드이펙터 모션 프로그램 생성 소프트웨어는 정비로봇 엔드이펙터의 동작을 프로그래밍하는 소프트웨어로서 사용자가 원하는 동작을 구성할 수 있도록 구현되어야 하며, 정비 로봇 엔드이펙터의 움직임에 따라 속도 및 위치제어가 가능하고 범용 컨트롤러의 I/O 동작 명령을 구현하여야 한다. 엔드이펙터 모션 프로그램을 생성하는 소프트웨어를 개발하기 위하여 사용한 도구는 Visual Studio2008 이며, 사용된 언어는 C#을 이용하여 응용 소프트웨어를 작성하였다.

Fig. 4와 같이 개발한 소프트웨어는 엔드이펙터의 기계적 특성을 설정하는 기구설정 화면, 도구상자 창과 프로그램 창으로 구성되어 있으며, 엔드이펙터 구동시 동작 화면, 모니터링 화면으로 구성되어 있다. 또한 동작화면에는 작성된 프로그램에 의한 자동 운전 기능과 수동 운전 기능이 구현되어있다. 엔드이펙터 모션 프로그램 작성 방법은 왼쪽의 도구 상자에서 작성자가 원하는 명령을 오른쪽 프로그램 화면으로 드래그앤드롭(Drag & Drop)

방법을 이용하여 이동시킨 뒤 블록간의 선을 연결하여 프로그램을 작성한다. 이를 통하여 작성된 블록 다이어그램을 알고리즘을 통하여 시퀀스 처리하여 컨트롤러 측으로 전송할 수 있는 만들어 준다.



[Fig. 4] Display on motion programming

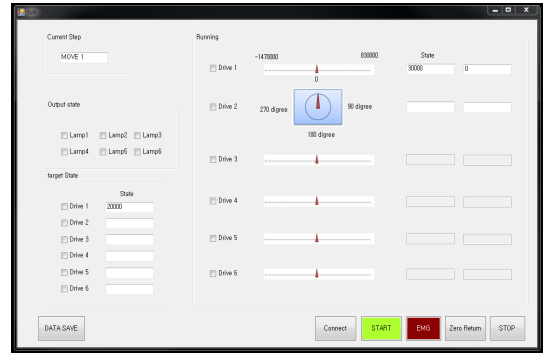
'Start' 블록은 선택된 모터에 한하여 활성화를 시켜주며, 'Move' 블록은 각 축에 설정된 값에 의하여 그 값으로 움직이는 명령으로서 하나의 축에만 값을 입력하였을 경우에는 단축운동을 하지만 다른 여러 축에도 입력하였을 경우에는 동시 다축 운전이 가능하다. 'Rotate' 블록은 그 축에 회전속도 값을 주어 회전운동을 하게 해주는 명령이다. 'Loop' 블록은 되돌아갈 위치를 정해주고 반복횟수를 입력하면 반복횟수가 성립이 될 때까지 되돌아갈 위치로 되돌아가 다시 반복한다.

'D/I' 블록은 MCU의 GPIO에서 해당하는 핀에 신호가 올 때까지 대기하며 해당신호가 들어오게 되면 다음 명령으로 넘어가며 타 장비와 연동시키거나 스위치 입력을 받을 경우를 고려하여 구현하였다. 'D/O' 블록은 'D/I' 블록과 마찬가지로 MCU의 GPIO를 활용하여 해당 핀에 출력을 내주어 타 장비에 시작 신호 및 종료 신호를 보낼 수 있으며 램프와 연결 시 상태를 모니터링 할 수 있도록 하는 명령이다. 'A/I' 및 'A/O' 블록은 상기 'D/I', 'D/O' 블록과 같은 기능을 한다.

원전 증기발생기 전열관 검사정비 로봇의 엔드이펙터의 경우 설치조건상 리미트스위치를 장착할 수 없을 경우 자동 교정기능을 통하여 그 축의 스트로크를 측정할 수 있으며, 측정된 스트로크를 통하여 엔드이펙터의 기계적 원점 및 상대적 원점을 정할 수 있다. 교정 방식은 축을 회전시켜 부하를 주기적으로 측정하여 자동 교정하는 방식이며 만약 일정 시간동안 부하가 일정 이상 걸리지 않는다면 그 축은 단순한 회전축이라고 판단하여 교정한다.

Fig. 5는 동작화면 및 모니터링 화면으로서 여기서 작

업하였던 프로그램을 제거기로 전송하여 엔드이펙터를 동작시킨다. 동작 중 현재 수행 중인 명령을 표시해주며 해당 명령의 목표 값, 엔드이펙터 자체의 원점과 프로그램에서 설정하였던 상대 값을 보여주며, 그 위치에 관한 정보를 이미지 및 수치상으로 확인할 수 있었다.

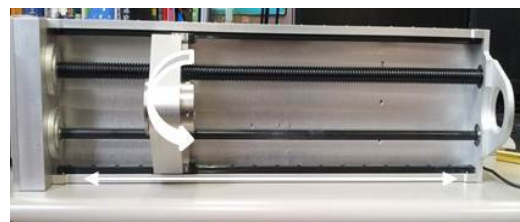


[Fig. 5] Run screen of program

개발한 엔드이펙터 모션 프로그램 생성 소프트웨어는 작성자가 작성한 내용으로 움직여야하며 동작이 바뀔 경우에 따라 대처하기 위해 프로그램 동작 시 해당 명령에 따라 동작하도록 예외처리와 명령 알고리즘의 모듈화로 각종 변수에 대응할 수 있도록 프로그램 알고리즘을 개발하여 적용하였다.

4. 엔드이펙터 동작 실험

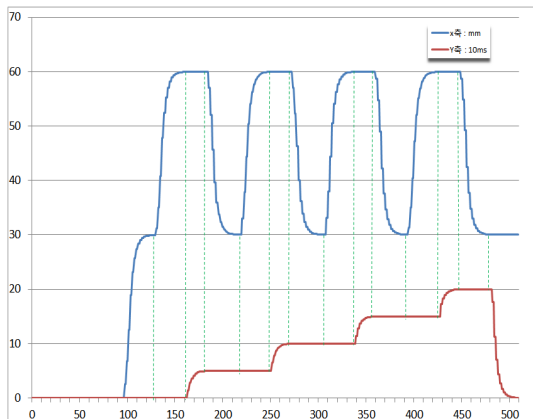
본 연구에서 개발한 엔드이펙터 제어시스템을 통하여 다축 동작실험과 재현성 실험을 하였다. Fig. 6의 2축 엔드이펙터는 실제 증기발생기 전열관을 검사하는 엔드이펙터와 동일한 구조로서 450mm의 스트로크를 가진 직선운동을 하는 이송축과 360° 회전하는 회전축을 가지고 있다. 사용된 구동모터는 Faulhaber사의 DC 모터인 DC3863C를 사용하였으며, 엔코더는 분해능이 1,024인 오토닉스사의 E60HB를 사용하였다.



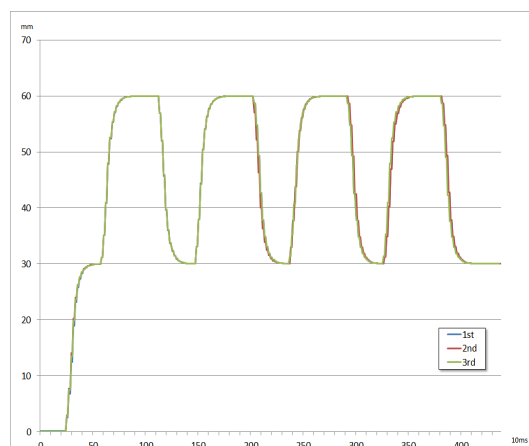
[Fig. 6] Appearance of 2-Axis end-effector

모션 프로그램 동작 모델은 실제 원자력발전소에서 증기발생기 전열관을 검사/정비할 때 쓰이는 엔드이펙터 동작 모델을 참고로 하였다. 실제 엔드이펙터는 같은 구조의 엔드이펙터에 초음파 센서가 부착되어 엔드이펙터가 전진 후 센서회전 동작을 한다. 그 후 다시 후진하는 동작을 반복하게 된다.

모션 프로그램 작성은 실제 운영하는 방식과 동일한 움직임에 의하여 이송동작은 처음 상대좌표 원점으로 간 후 X축 +30mm 이송, Y축 15° 회전, X축 -30mm 이송을 4회 반복 동작이다. 동작이 끝난 후 다시 상대 원점으로 복귀하여 프로그램은 종료가 된다. Fig. 7은 프로그램에 의해 2축 엔드이펙터의 이동 궤적으로서 프로그램 시작 후 초기에 상대원점인 30mm 위치에 X축이 움직이며 그 후부터 정해진 동작대로 움직이는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 7] Moving path of end-effector



[Fig. 8] Result of repeatability test

엔드이펙터 동작의 재현성 실험은 X축을 30mm씩 증가, 감소를 4회 반복하도록 모션 프로그램을 구성하였고, 총 3회의 실험을 하였다. Fig. 8은 재현성 실험 결과를 나타내고 있으며, 이는 총 이송 거리를 계산하여 비교 결과 0.04%정도의 오차를 보여주고 있어 위치에 관한 재현성은 우수하다고 볼 수 있다.

그리고 본 연구에서 개발한 범용 엔드이펙터 제어시스템을 (주)한전KPS에서 보유하고 있는 Rosa III 로봇의 엔드이펙터에 적용한 결과 원활하게 동작함을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서 증기발생기 검사정비 로봇의 엔드이펙터용 범용 제어시스템 개발 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 여러 종류 로봇의 엔드이펙터 모션 구동에 전부 사용할 수 있도록 ARM Cotex M3-107 MCU 기반의 제어기와 엔드이펙터 모션 프로그램 생성 응용 소프트웨어로 구성된 범용 엔드이펙터 모션구동 제어시스템을 개발하였다.
- (2) 범용 제어시스템을 적용하여 엔드이펙터의 직선이송 및 회전이송의 위치 결정은 만족할만한 오차범위 내에 들었으며, 재현성은 0.04% 오차를 보여줌으로써 실제로 사용가능한 범용 엔드이펙터 모션구동 제어시스템을 개발하였다.
- (3) 개발한 범용 엔드이펙터 제어시스템을 Rosa III 로봇의 엔드이펙터에 적용한 결과 원활하게 동작함을 확인하였다.

References

- [1] Y. K. Park, "Maintenance of Power Plant Facilities and Nondestructive inspection(II)- Nuclear Power Plants", *J. of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 4, pp 410-430, 2004.
- [2] B. H. Cho, S. H. Byun, C. H. Shin, and J. B. Yang, "The Development of Underwater Robotic System and Its application to Visual Inspection of Nuclear Reactor Internals", *Proc. of 2004 KSPE Fall Conference*, pp.1327-1330, Oct. 2004.
- [3] S. H. Han, "Design of intelligent Robot Vision System for Automatic Inspection of Steam Generator of Nuclear Plant", *J. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 6, 2000.

- [4] B. H. Cho, S. H. Byun, J. S. Kim, and J. M. Oh, "Design of Remotely Operated, Underwater Robotic Vehicle System for Reactor Vessel Inspection and Foreign Objects Removal", *Proc. of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 25, No 1, pp.153-157, 2002.
- [5] S. H. Han, W. Y. Chong, J. G. Kim, X. P. Lix, and H. H. Wang, "Development of a Robot Vision System for Automatic Repair and Maintenance of Steam Generator in Nuclear Power Plants", *J. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 6, No. 4, 1997.
- [6] S. H. Kim, B. H. Cho, C. H. Kim, Y. C. Seo, N. H. Lee, S. H. Jung, J. Y. Cho, S. H. Byun, C. H. Shin, and J. B. Yang, "The Development of Mobile Robot For Monitoring and Inspection Of Calandria Faces in PHWR", *Research Report of KAERI*, 2003.

노 태 정(Tae-Jung Lho)

[정회원]



- 1984년 2월 : 부산대 기계설계학과 (공학학사)
- 1986년 2월 : KAIST 생산공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : KAIST 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1986년 2월 ~ 1999년 2월 : 삼성중공업 기전연구소(수석연구원)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 교수

<관심분야>

Mechatronics, Robotics, 기계 제어.자동화 등

박 기 태(Ki-Tae Park)

[정회원]



- 1987년 2월 : 부경대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2004년 2월 : 동명대학교 로봇시스템공학과 (공학석사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한전KPS 원자력정비기술센터(수석연구원)

<관심분야>

기계, 로봇, 자동화

김 선 진(Seon-Jin Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 (공학학사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계시스템공학과 (석사과정)

<관심분야>

Mechatronics, Robotics, 자동화 등