

# 중수형 원자로 급수 배관 검사용 자율 주행형 자벌레 로봇

## Inch-Worm Robot with Automatic Pipe Tracking Capability for the Feeder Pipe Inspection of a PHWR

최 창 환\*, 박 병 석, 정 현 규, 정 승 호

(Changhwan Choi, Byungsuk Park, Hyunkyu Jung, and Seungho Jung)

**Abstract :** This paper describes a mobile inspection robot with an automatic pipe tracking system for a feeder pipe inspection in a PHWR. The robot is composed of two inch worm mechanisms. One is for a longitudinal motion along a pipe, and the other is for a rotational motion in a circumferential direction to access all of the outer surfaces of a pipe. The proposed mechanism has a stable gripping capability and is easy to install. An automatic pipe tracking system is proposed based on machine vision techniques to make the mobile robot follow an exact outer circumference of a curved feeder pipe as closely as possible, which is one of the requirements of a thickness measurement system for a feeder pipe. The proposed sensing technique is analyzed to attain its feasibility and to develop a calibration method for an accurate measurement. A mobile robot and control system are developed, and the automatic pipe tracking system is tested in a mockup of a feeder pipe.

**Keywords :** inch-worm, feeder pipe, robot

### I. 서론

기압 중수로형 원자로에서 급수 배관 내부에는 고온·고압의 증기가 흐르기 때문에 원자로의 압력관에 접합되어 있는 급수 배관의 곡관부에서 증기의 마찰로 인하여 배관의 두께가 얇아지게 되는 FAC (Flow Assisted Corrosion)라는 결함이 발생한다[1-3]. 이러한 결함을 모니터링 하기 위해서는 매 정기 검사 기간에 급수 배관의 곡관부의 두께를 측정하고 해석을 통하여 두께의 변화 추이를 관측해야 한다. 그러나 압력관 주위의 급수 배관의 배열이 조밀하고, 특히 2.5인치 급수 배관의 경우 공간이 거의 없기 때문에 작업자의 접근이 용이하지 않아서 충분한 측정 데이터를 확보하기가 어려운 문제가 있고 급수 배관의 표면이 거칠기 때문에 신뢰성 있는 측정 데이터를 얻기가 어려운 실정이다. 작업 환경이 원자로의 전면부이기 때문에 정기 검사 기간에 발전소를 섣다운한 상태에서 작업을 하더라도 방사선의 준위가 상당히 높아서 작업자의 피폭량도 많은 지역이기도 하다. 그러므로 급수 배관의 검사를 원격에서 수행할 수 있는 장치의 개발이 요구되고 있다.

배관 검사는 상하수도 검사, 송유관 검사, 화학공장 배관 등의 다양한 응용 분야를 가지고 있기 때문에 많은 연구가 되어 있는 분야 중의 하나이다. Okaga와 Sanemori는 시저 메카니즘을 이용하여 배관 내부에 로봇을 지지하면서 바퀴로 주행하는 구동방식의 배관 내부 검사 로봇을 개발하였다[4]. Suzumori 등은 소형 배관에 적용할 수 있는 유성 바퀴

형태의 구동 방식을 개발하였다[5]. Idogaki 등은 압전소자를 이용한 구동 방식을 채택하였고[6], Kim 등은 공압 구동 방식의 소형 이동 메카니즘을 제안하였다[7]. Fukuda 등은 배관 외부를 타고 주행할 수 있는 자벌레 구동 방식의 이동 로봇을 제안하였다[8]. 대부분의 기존의 배관 검사 메카니즘의 경우 배관 내부를 주행하는 방식이 사용되고 있는데 원자력발전소의 경우 원전 기기의 안전성 문제나 방사능 오염 등의 문제로 인하여 배관 내부에서 검사하는 방식 보다는 외부에서 검사하는 방식이 선호되고 있다.

Ontario Hydro의 SIMD에서는 급수 배관의 두께 측정을 위하여 SIMD bracelet이라는 측정 장치를 만들었고 1997년에서 1999년까지 Gentility-2에 투입하였다[1]. 그러나 SIMD bracelet은 2인치 급수 배관에만 적용이 가능했고 공간상의 제약으로 인해 첫 번째 곡관부에만 적용이 가능했다. 그러므로, 양질의 측정 데이터를 얻을 수 없었기 때문에 급수 배관의 안정성을 판별하기에는 충분하지 못 하였다. Hydro Quebec 연구 센터 (IREQ)에서는 METAR이라는 측정 장치를 개발하였고 1999년에서 2000년까지 Gentility-2에 적용하였다[1]. SIMD bracelet과 METAR은 작업자가 원자로의 전면부에 가서 직접 설치하고 측정하는 장치인데 좋은 측정 데이터를 얻기 위해서는 작업자가 센서의 측정 신호를 보면서 신호의 유효성을 판별하고 유효하지 못한 데이터일 경우 센서의 위치를 수정하거나 접촉 상태를 다시 바꾸는 등의 시간이 소요되는 작업이 동반된다. 그러므로 측정 작업 동안 작업자가 원자로의 전면부에 상주해야 하기 때문에 작업자의 피폭량이 증가한다. 이를 보완하기 위하여 전기 모터를 이용한 이동형 METAR을 개발하고 있다[2].

급수배관의 두께를 정기적으로 모니터링하기 위해서는 급수 배관 곡관면의 바깥 지점 중에서 매 주기 동안 동일한 지점을 측정해서 변화하는 추이를 관측해야 한다. 그러나 급수 배관에는 정확한 위치를 알 수 있는 인식표가 없

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 9. 10, 채택확정 : 2007. 11. 29.

최창환, 박병석 : 한국원자력연구원 핵주기시스템공학기술개발부 (madistech@kaeri.re.kr/nbspark@kaeri.re.kr)

정현규, 정승호 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 (hkjung@kaeri.re.kr/shjung2@kaeri.re.kr)

※ 본 연구는 산업자원부가 지원한 원자력용 내방사선 로봇 개발 과제의 일환으로 개발되었음.

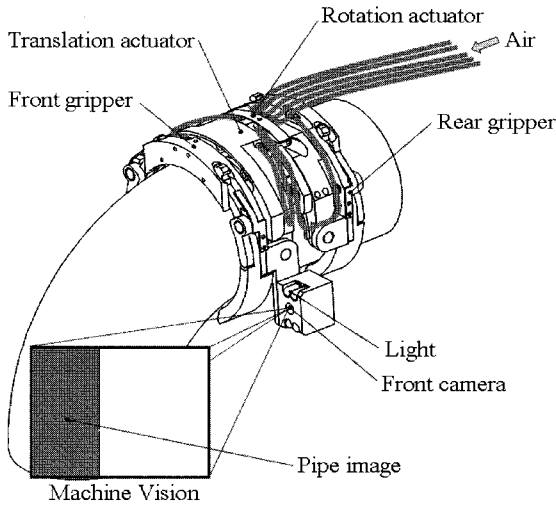


그림 1. 급수 배관 검사 로봇의 구조.  
Fig. 1. Schematics of a feeder pipe inspection robot.

기 때문에 로봇이 자체적으로 곡관면을 측정하여 항상 동일한 지점을 지나갈 수 있도록 제어해야 한다. 기존의 연구 [1,2]에서 길이 방향으로는 회전형 엔코더를 바퀴에 부착하는 방식으로 위치를 인식하고 있으나 원주 방향의 경우에는 별도의 센서가 부착되어 있지 않기 때문에 초기에 자세를 고정된 상태에서 전진만 하거나 육안으로 원주 방향 위치를 조절해야 하는 문제점이 있다. 그러므로 항상 동일한 지점을 측정한다는 보장이 없기 때문에 데이터의 신뢰도가 다소 떨어진다.

본 논문에서는 원주방향의 회전에 대한 위치를 자동으로 인식하여 급수 배관의 두께 측정 작업을 자동화할 수 있는 급수 배관 검사 로봇의 자동 주행을 위한 센서시스템을 제안한다(그림 1). 로봇의 전후면에 카메라를 부착하여 획득되는 영상정보를 이용하여 로봇이 배관의 굽은 면에 대하여 기울어진 각도를 측정하여 주행 중 자동으로 로봇의 자세를 보정할 수 있는 센서시스템을 개발한다. 획득된 영상정보를 이용하여 로봇의 기울기를 측정했을 경우의 센서의 성능을 예측하고 정확한 측정을 위한 보정 알고리즘을 제안한다. 급수 배관의 목업을 제작하여 로봇이 자동으로 자세를 보정하면서 주행하는 지를 실험을 통하여 증명한다.

제 II절에서는 로봇의 작업 환경인 중수형 원자로 급수 배관의 구조에 대하여 설명하고, 제 III절에서는 로봇의 구조 및 작동 원리를 설명하고, 제 IV절에서는 자동 주행용 센서 시스템, 제 V, VI절에서는 실험 장치와 결과를 제시하였다.

**II. 급수 배관의 구조**

우리나라 중수로 발전소의 압력관은 총 380개로 이루어져 있고 그림 2(a)와 같이 압력관(6)에 급수 배관(7)이 각각 하나씩 부착되어 있는데 1.5인치 급수 배관이 33개, 2인치가 183개, 2.5인치가 164개로 이루어져 있다. 압력관의 위치에 따라 여러 가지 방향과 각도의 곡관으로 구성되어 있다. 그림 2(b)는 압력관과 급수 배관을 평면에서 바라본 그

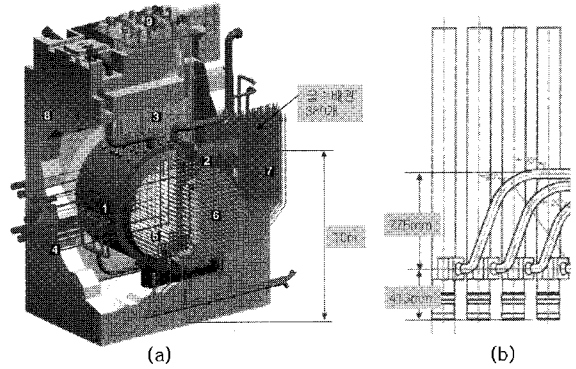


그림 2. (a) 중수형 원자로의 구조 (b) 급수배관의 평면도.  
Fig. 2. (a) Schematics of the Calandria (b) Plane view of the feeder pipe.

림이다. 원자로 전면부에서 413mm 부위에서 급수배관이 압력관과 연결이 되고 1차 곡관부도 그 정도의 위치에 있게 된다. 그러나 2차 곡관부의 경우에는 종류에 따라 다양한 형태를 가지고 있으나 1차 곡관부로부터 775mm 정도의 거리 안에 있다. 압력관을 전면에서 보면 압력관은 286mm의 간격의 정사각형 배열로 해서 전체적으로는 원형으로 배열되어 있다. 각 배열의 사이에서 급수 배관에 도달하기 위해서는 압력관과 급수배관의 고정을 위한 가이드를 지나야 하기 때문에 로봇을 설치할 수 있는 공간은 155mm×204mm 정도의 공간이 된다. 로봇이 급수 배관을 따라 주행할 때 검사 중인 급수 배관과 압력관 사이에는 간섭이 있게 되고 2.5인치 배관의 경우가 특히 간섭이 심하다. 그러므로 로봇이 급수 배관을 따라 검사를 수행하기 위해서는 최소 7.6mm 이하의 공간을 지나야 하고 전체적으로는 14.63mm 이하가 되도록 해야 한다. 급수 배관은 1.5인치, 2인치, 2.5인치의 특수 배관을 굽혀서 사용하기 때문에 굽혀지는 곡관 부분에서 외경의 변화가 생긴다. 즉, 굽어지는 방향으로는 외경이 줄어들고 굽어지는 평면상의 면은 외경이 커지게 된다. 배관의 변형을 타원형이라고 가정하면 최대 지름은 78mm 치소 지름은 66mm 정도 된다. 곡관의 곡률 반경은 1차 곡관부의 경우에는 92.3mm, 2차 곡관부는 배관에 따라 다르나 최소 92.3mm라고 가정한다.

급수 배관에 고압의 증기가 흐를 때에 곡관부의 바깥쪽에 부딪혀서 감쇄되어 두께가 계속 얇아지게 된다. 이러한 두께의 변화를 18개월마다 있는 정기 점검 기간에 관측하여 감쇄의 정도를 관측하게 된다. 그런데 이러한 추이를 보려면 항상 동일한 지점을 측정해야 하기 때문에 로봇이 주행할 때에 항상 동일한 자세로 배관의 외측면을 따라가야 한다. 최근 들어 1차 곡관부 뿐만 아니라 2차 곡관부의 경우에도 주기적인 검사 작업의 필요성이 제기되고 있기 때문에 로봇은 1차 곡관부에서 장착되어 2차 곡관부까지 주행할 수 있는 기능이 필요하다.

**III. 자벌레형 급수 배관 검사 장치**

**1. 로봇의 구조**

로봇이 협소한 구역을 주행하기 위해서는 소형이어야 한

다. 자벌레 구동방식은 소형으로 만들기 용이하고 제어하기가 쉬운 장점이 있기 때문에 자벌레 구동 방식을 채택하였다. 구동력으로는 압전 소자와 같은 지능형 재료를 이용할 수도 있으나 이 방식은 수 마이크론의 미세한 구동에는 용이하나 수 밀리미터 이상의 주행에는 어려움이 있다. 더구나 급수 배관은 표면이 거칠기 때문에 배관의 거칠기 내에서 움직일 경우에는 로봇이 구동하지 않을 여지가 많기 때문에 본 연구에서는 공압력을 사용하였다.

그림 1은 제안된 로봇의 구조를 보여 주고 있다. 로봇은 급수 배관에 고정할 수 있는 두개의 전·후방 그리퍼 몸체가 있고 두 그리퍼 몸체의 사이에는 확장과 수축이 가능한 이동 구동기(translation actuator)와 좌우 회전이 가능한 회전 구동기(rotation actuator)가 연결되어 있다. 이동 구동기는 급수 배관의 길이 방향으로 로봇을 이동시킬 때 사용되고 회전 구동기는 원주 방향으로 로봇을 이동시킬 때 사용된다. 일반 상용 공압 실린더를 사용할 경우에는 피스톤 외에 외부 실린더와 공압 실린더, 장착 프레임등의 구조가 필요하여 소형화하기에는 어려움이 있어서 공압 실린더를 로봇의 몸체에 직접 구현하는 방법을 사용하여 14mm 이내의 소형 구조로 구현하였다. 로봇을 배관에 설치하기 용이하게 하기 위하여 공압이 인가되지 않았을 경우에는 작업자가 그리퍼를 쉽게 펼 수 있는 구조이다. 실제로 배관에 직접 밀어 넣기만 하면 장착이 된다. 장착 후에 공압이 비정상적으로 끊어졌을 경우에도 로봇이 배관에 안정적으로 매달려 있게 하기 위하여 스프링을 이용하여 적당한 고정력을 줄 수 있게 하였다.

2. 로봇의 작동 원리

로봇의 작동 원리는 그림 3과 같다. 로봇이 배관의 길이 방향으로 우측으로 주행하기 위해서는 그림 3(a)-(c)와 같이 후방 그리퍼를 배관과 고정하고 이동 구동기를 확장하여 전방 그리퍼를 고정된 길이만큼 이동시키고 다시 전방 그리퍼를 고정하고 후방 그리퍼를 풀고 이동 구동기를 수축하게 되는 사이클로서 로봇이 움직이게 된다. 좌측으로 이

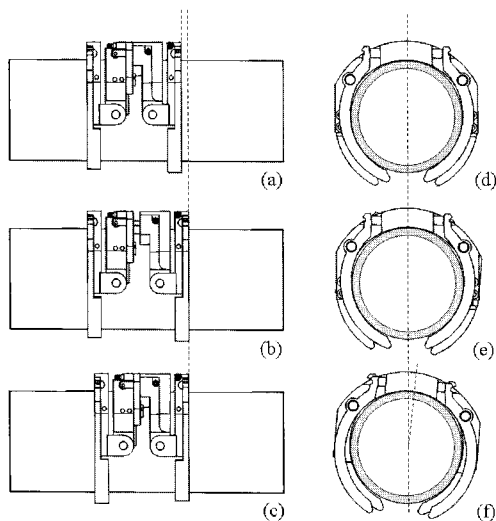


그림 3. 자벌레형 검사 로봇의 주행 원리.  
Fig. 3. The movement principle of the inch-worm mechanism.

동하기 위해서는 유사한 방식으로 순서를 반대로 하면 된다. 로봇이 배관의 원주 방향의 시계 방향으로 회전하기 위해서는 그림 3(d)-(f)와 같이 후방 그리퍼를 배관에 고정하고 회전 구동기를 시계 방향으로 회전시키고 전방 그리퍼를 배관과 고정하고 후방 그리퍼를 풀고 다시 회전 구동기를 원상 복귀하게 되는 사이클로서 회전하게 된다. 반시계 방향으로 회전하기 위해서는 유사한 방식으로 순서를 반대로 하면 된다. 위와 같이 두개의 움직임을 조합하여 로봇을 배관의 길이 및 원주 방향으로 자유자재로 움직일 수 있게 된다. 인치웜 구동 방식이므로 스텝-스텝으로 움직이게 되는데 배관의 길이 방향으로 한 스텝 당 6.25mm, 배관의 둘레 방향으로 7.6deg씩 움직이게 된다.

임의의 곡률반경을 가진 곡관의 주행을 위해서 전·후방 그리퍼와 이동 및 회전 구동기는 자유롭게 움직일 수 있는 조인트로 연결되어 있다. 그러면 곡관의 곡률에 따라 그리퍼의 각도가 곡관 면을 따라 구속이 되어 로봇이 곡관부에 밀착이 되게 된다. 상세한 설계 기법 및 내부 구조는 [9,10]을 참조하면 된다.

IV. 자동 배관 주행 시스템

1. 배관 기울기 측정 방법 분석

로봇이 배관의 바깥쪽 곡면을 추종하도록 제어하기 위해서는 배관의 바깥 곡면에 대하여 로봇이 기울어진 각도를 측정할 수 있어야 한다. 그러나 측정의 기준이 될 수 있는 인식표 등이 부착되어 있지 않고 원자력 발전소에 부가적인 장치들을 부착하는 것은 안전성 인증과 관련된 복잡한 검증을 필요로 하기 때문에 별도의 표식 없이 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 배관이 복잡한 형태로 얽혀있기 때문에 초음파 센서는 간섭이 심하고 정밀도를 확보하기가 어려운 문제가 있고, 자세를 측정하기 위해서는 배관의 전체적인 윤곽을 알아야 하므로 레이저 센서를 적용하기에는 어려운 문제가 있다. 그리고 IR센서는 발전소 내부의 열방출량이 크기 때문에 노이즈가 생길 우려가 많다. 반면에 카메라는 비교적 작은 공간에 장착이 가능하고 배관의 전체적인 윤곽을 측정하기에 유리한 장점이 있다. 배관의 색깔이 모두 동일하고 로봇의 전단에 조명을 부착하여 현재 주행 중에 있는 배관만 조명을 비추면 나머지 배관들은 조명이 미치지 못하기 때문에 구별이 가능하므로 적절한 영상처리를 통하여 자세 측정에 필요한 정보를 추출할 수 있을 것이다. 그러므로 본 연구에서는 카메라 영상 정보를 이용

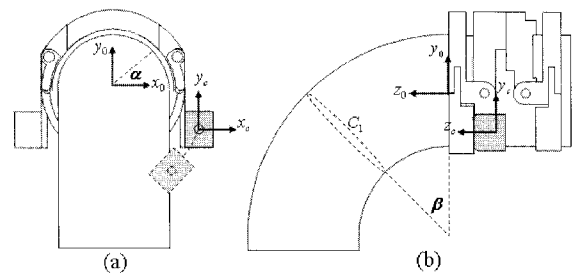


그림 4. 로봇의 자세 측정 방법 해석.  
Fig. 4. Analysis of the orientation measurement method.

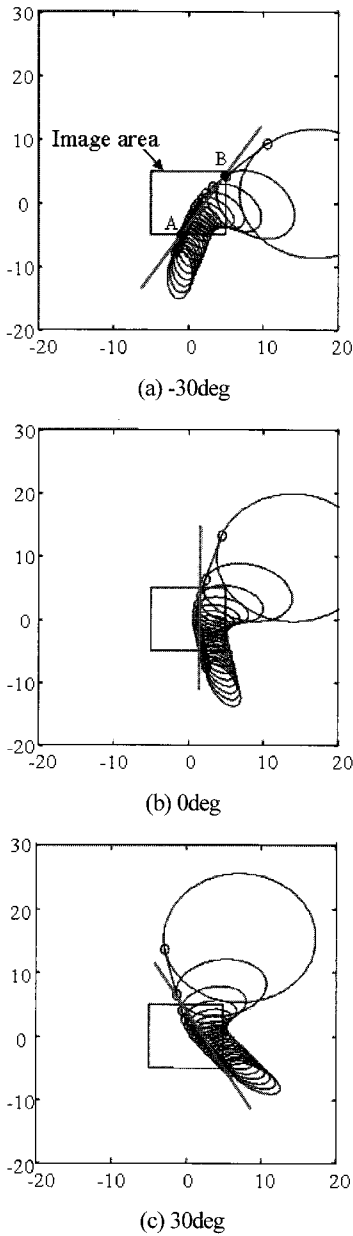


그림 5. (a) -30deg (b) 0deg (c) 30deg에서의 배관 기울기 해석 결과.

Fig. 5. Analysis results of the orientation measurement at (a) -30 deg (b) 0deg (c) 30deg.

하여 로봇의 자세를 측정하는 방법을 제안한다.

로봇의 몸체의 전후방에는 그림 1과 같이 두 대의 카메라가 부착되어 있다. 전방 카메라는 전진 시, 후방 카메라는 후진 시에 사용되는 카메라이다. 전·후진 운동은 유사하기 때문에 본 연구에서는 전진 운동만을 고려한다. 로봇이 배관의 외측면과 일치된 자세로 진입하게 되면 배관의 좌측 측면의 에지 라인이 그림 1과 같이 카메라에 관측될 것이다. 그러나 로봇이 배관에 기울어진 자세로 진입하게 되면 카메라에 관측된 배관의 측면 에지가 동일한 각도로 기울어질 것이고 영상의 수직축과 배관 측면 에지의 각도를 계산하면 로봇의 기울어진 각도를 구할 수 있다. 이 정

보를 이용하여 로봇의 회전 구동 부를 구동하면 자세를 조정할 수 있게 된다.

로봇의 자세 제어의 정확성은 영상으로부터 계산된 배관의 기울기의 정확도에 크게 의존하기 때문에 제안된 배관의 기울기 측정법이 어느 정도의 정확성과 선형성을 가지는지를 평가하기 위하여 해석을 수행한다. 그림 4는 로봇이 다양한 각도에서 곡관 부에 진입할 때에 카메라에 맞는 영상을 해석하기 위한 그림을 보여 주고 있다. 로봇이 곡관의 시작부에 위치하고 있다고 하고 각도  $\beta$ 에서의 곡관의 절단면의 외측 원을 C1이라고 하자. C1은 3차원 공간상에서 배관의 반경  $r_p$ 와 파라미터  $\alpha \in [0, 2\pi)$ 로 표현할 수 있다. C1 위의 각 점을  $x_0 - y_0$  좌표계로 나타내면 (1)과 같다.

$$W_h = T_x [r_p \cos \alpha, r_p \sin \alpha, 0, 1]^T \quad (1)$$

여기에서

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & -\rho(1 - \cos \beta) \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & \rho \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

는 C1에서 기준좌표계까지의 변환 행렬이고  $\rho$ 는 배관의 곡률 반경이다. (1)로 표현되는 3차원 좌표는 다음과 같은 수식에 의하여 영상 좌표계로 변환할 수 있다.

$$C_h = PR_z^{\theta_z} R_x^{\theta_x} T_c W_h \quad (2)$$

여기에서  $T_c, R_x^{\theta_x}, R_z^{\theta_z}, P$ 는 카메라 부착 위치로부터 기준 위치까지의 이동 변환 행렬,  $x$ 와  $z$ 방향으로의 회전 변환 행렬, 핀 홀 카메라 모델의 투영 행렬을 Homogeneous 변환 형태로 나타낸 것이다. 투영 행렬은 다음과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

여기에서  $f$ 는 초점 거리이다. 그러면 원형인 배관의 단면들이 비정형의 타원 모양의 상으로 맵핑이 된다. 그러면 배관의 측면 에지는 위의 타원들의 접선으로 나타나게 된다. 접선들을 구하기 위하여  $i$ -번째 타원과  $i+1$ -번째 타원이 접하기 위한 조건을 구하면 다음과 같은 수식이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta x_i(s)(y_i(s) - y_{i+1}(t)) \\ - \Delta y_i(s)(x_i(s) - x_{i+1}(t)) &= 0 \\ \Delta x_{i+1}(t)(y_i(s) - y_{i+1}(t)) \\ - \Delta y_{i+1}(t)(x_i(s) - x_{i+1}(t)) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $x_i(s), y_i(s)$ 는  $i$ -번째 타원 위의 각 점을  $s$ 를 매개 변수로 하여 표현한 것이다. 그림 5는 -30, 0, 30 deg에서 각 배관의 단면을 카메라 좌표계로 맵핑한 것이다. 대상이 된 배관은 일반적으로 사용되는 2.5인치 배관이고 배관의 곡률 반경과 지름은 각각 95.25mm와 73.3mm이다. 카메라의 초기 위치는 로봇이 정렬된 상태에서의 각도가 0deg

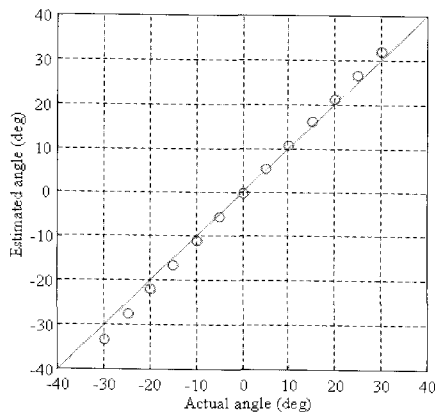


그림 6. 실제 로봇의 기울어진 각도와 영상으로부터 추출한 각도와와의 관계.

Fig. 6. Computed orientation angle vs. actual orientation angle.

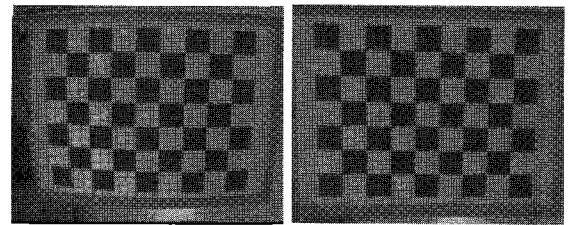
가 되도록 10.5deg로 조정하여 두었다. 카메라의 영상 영역 만큼만 보면 그림 5(a)와 같이 배관의 측면 영상을 얻을 수 있다. 배관의 기울기의 평균값은 기울기를 적분한 값을 곡선의 가로 좌표축으로 나누면 얻을 수 있고 이 값은 점 A, B를 연결하는 직선의 기울기와 동일한 값이므로 배관의 기울기는 배관의 측면과 영상 영역과의 교점인 A와 B점을 연결하는 선으로 근사적으로 구할 수 있다. 그림 6은 실제 로봇의 기울기와 영상으로부터 추출한 각도와와의 관계를 보여주고 있다. 선형 관계를 가지는 것을 볼 수 있고 평균 기울기는 1.088이고 표준 편차는 1.67deg이다.  $\pm 30$ deg 근방에서 거의 1:1의 관계를 가지는 것을 볼 수 있다. 측정된 값에 기울기의 역수를 곱하여 보정한 다음의 표준 편차는 0.27deg로서 상당히 정확한 측정이 가능하다는 것을 볼 수 있다. Lookup 테이블의 형태로 저장하여 interpolation하면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다.

2. 영상 처리 알고리즘

로봇의 기울기 측정은 카메라의 영상을 기반으로 측정되기 때문에 카메라 렌즈에 의한 왜곡이나 카메라의 부착위치에 대한 오차에 기인하여 그림 7(a)와 같이 왜곡된 영상을 얻게 되고 이를 기반으로 기울기를 계산할 경우 측정 오차가 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 Zhang [11] 등이 제안한 카메라 보정 기법을 적용하여 카메라를 보정한다. 보정 후의 카메라 상수들은 초점 거리  $[\alpha, \beta] = [419.7, 404.3]$ , 중심점 좌표  $[u_0, v_0] = [186.9, 92.5]$ , 왜곡 상수  $[k_1, k_2] = [-0.57, 0.27]$ 와 같이 구할 수 있다. 위 상수들을 적용하여 카메라를 보정하면 그림 7(b)과 같이 왜곡이 없는 영상을 얻을 수 있다.

카메라 영상을 이용하여 로봇의 기울기를 측정하기 위한 영상 처리 알고리즘을 개발한다. 영상 처리 순서는 다음과 같다.

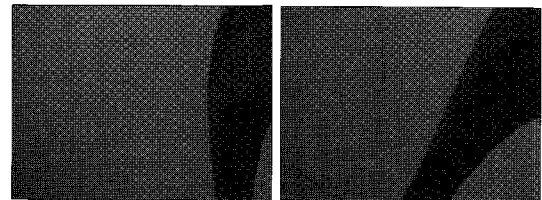
- 1) 영상을 캡처한다.
- 2) 영상을 그레이 이미지로 변환한다.
- 3) 카메라 보정 상수들을 이용하여 카메라를 보정한다.
- 4) 영상을 smoothing 및 thresholding한다.
- 5) 작은 홀들을 제거하기 위해 dilation한다.



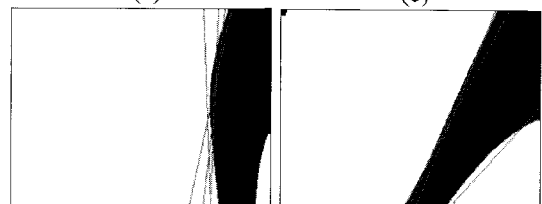
(a) (b)

그림 7. (a) 원래 영상 (b) 보정된 영상.

Fig. 7. (a) Original image (b) calibrated image.



(a) (c)



(b) (d)

그림 8. 로봇의 기울기 측정 (a) 기울임 각도 0deg (b) 에지 검출 결과 (c) 기울임 각도 40deg (d) 에지 검출 결과.

Fig. 8. Measurement of orientation angle (a) at 0deg (b) the edge detection result at 0deg (c) at 40deg (d) the edge detection result at 40deg.

6) Canny 에지 검출 알고리즘[12]을 사용하여 배관 에지를 추출한다. 에지를 추출하면 불필요한 라인들이 생성되는데 이를 제거하기 위하여 80도 이상의 기울기를 가진 선들은 제거한다.

7) Hough transform을 이용하여 에지의 기울기들을 구한다. 래스터 화면에서 가장 빈번한 기울기의 순서대로 정렬이 되게 되는데 그중에서 가장 빈번한 8개를 선택하여 평균하여 기울기 계산에 활용한다.

8) 구해진 기울기들을 moving average한다.

이와 같은 과정을 통하여 로봇의 기울기를 실시간으로 측정이 가능하다. 영상 처리 라이브러리는 openCV를 사용한다 [13]. 그림 8은 0deg와 40deg에서 로봇의 기울기를 측정된 결과를 보여 주고 있다. 그림 8(a)는 0deg에서의 원영상을 보여주고 있고 그림 8(b)는 영상 처리 결과를 보여 주고 있다. 배관의 에지가 곡선이기 때문에 검출된 기울기 라인에 2.0deg 정도의 표준 편차가 있다. 그림 8(c)는 40deg에서의 원영상을 보여 주고 있는데 이때에는 배관의 에지가 거의 직선으로 보이게 되어 표준 편차는 0.5deg 이내에서 측정할 수 있다.

3. 자동 배관 추적 제어

측정된 로봇의 기울기 정보를 이용하여 로봇이 배관을

자동으로 추종하기 위한 제어 알고리즘을 구성한다. 로봇에 가할 수 있는 명령은 전, 후 또는 시계방향, 반시계 방향의 이산적인 정보가 된다. 움직이는 속도는 작업자에 의하여 일정하게 정해진다고 가정한다. 영상 처리로 측정된 로봇의 기울기를 이용하여 간단한 제어 알고리즘을 적용해 본다. 제어 알고리즘은 작업자가 전진 명령을 주었을 경우 측정된 기울기의 오차가 오차 밴드 (error\_band)보다 작으면 앞으로 전진하고 크면 전진 운동을 정지하고 회전 구동기를 구동하여 오차를 줄이는 방향으로 한 스텝 움직이고 계속해서 오차가 크면 계속 같은 방향으로 회전하는 간단한 제어 알고리즘이다.

**V. 실험 장치**

그림 9는 제안된 급수 배관 검사 로봇의 사진을 보여 주고 있다. 제어기로부터 로봇까지의 거리는 2차곡관부에도 도달할 수 있는 거리로 하여 3m가량의 공압 호스와 케이블로 연결하였다. 로봇은 몸체에 내장된 4개의 공압실린더로 구동되는 4개의 구동장치와 배관에 의해 구속되는 2개의 수동조인트로 구성되어 총 6개의 자유도를 가지고 있다. 4개의 구동장치 중에 전·후방 그리퍼 구동기는 각각 하나의 단동식 공압 실린더로 구동되고 스프링을 이용하여 복귀하고 이동 구동기는 두 개의 단동실린더를 밀고 당기는 구조로 하여 하나의 복동식 실린더와 유사한 형태로 구성하였다. 회전 구동기도 마찬가지로 두 개의 단동실린더를 밀고 당기는 구조로 구성하였으나 이 경우 중간위치와 우회전, 좌회전 세 가지의 경우가 있으므로 두 개의 실린더를 따로 구동하는 방식을 사용한다. 요약하면 전후방 그리퍼용으로 3포트 공압 밸브가 각각 하나씩 필요하고 이동 구동기는 하나의 5포트형 복동식 실린더 구동 밸브, 회전 구동기의 경우는 두 개의 3포트형 공압 밸브가 필요하다. 편의상 3포트 구동 밸브는 5포트 구동 밸브에서 한쪽 포트를 막는 방법을 사용하고 그리하여 총 5개의 5포트 구동 밸브가 사용된다. 그림 10에 공압 회로와 밸브 구동회로를 포함한 제어 시스템의 블록다이어그램을 보여 주고 있다. 그림 11은 제어 시스템의 내부 사진이다.

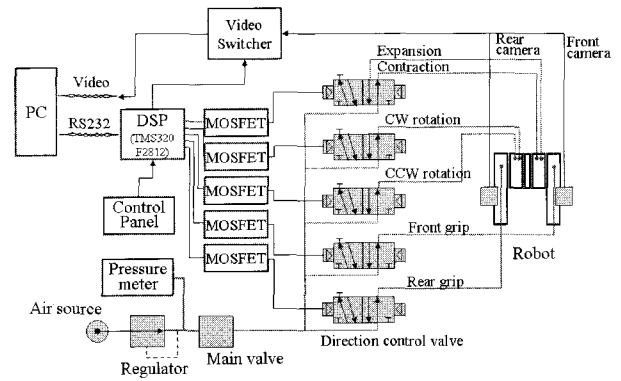


그림 10. 제어 시스템의 블록다이어그램.  
Fig. 10. The block diagram of the control system.

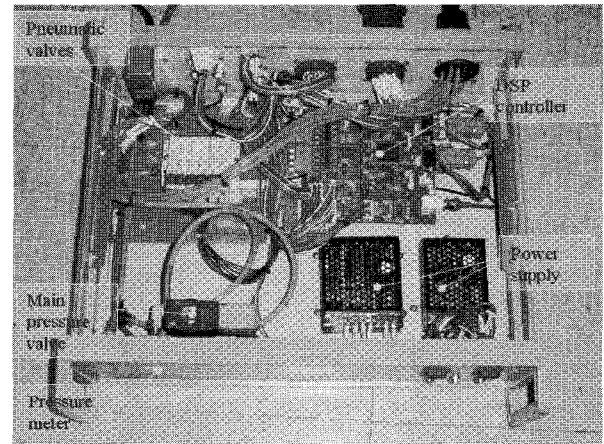


그림 11. 제어 시스템의 사진.  
Fig. 11. The picture of the control system.

로봇용 제어기는 Texas Instrument사의 DSP인 TMS320 F2812를 사용하여 구현하였고 증폭용 MOSFET을 통하여 공압 밸브를 구동하였다. 제어 명령은 원격에서 PC를 이용하여 RS232 통신으로 DSP에 명령을 전달할 수도 있고 제어기에 제어반을 별도로 부착하여 PC없이 직접 제어할 수도 있도록 하였다. 전·후방 카메라의 영상을 비디어 스위처와 비디오 전송 회로를 통하여 PC에 있는 영상 캡처 보드에 연결하였다.

**VI. 실험 결과**

초기에 로봇의 자세에 오차를 주어서 로봇이 자동적으로 자세를 측정하여 자세 오차를 보정하고 전진하는 실험을 수행하였다. 작업자가 육안으로 어느 정도의 진입 자세를 잡아 준다고 가정하여 초기에 40deg의 오차가 있다고 가정하였다. 다시 말해 작업자가 40deg 이내에만 맞추어 주면 로봇이 자동으로 자세를 바로잡을 수 있다. 그리고 그림 6에서와 같이 센서가 선형적으로 동작하는 최대 구간이기도 하다.

제어 알고리즘에서 에러 밴드를 5deg로 주었을 경우 또는 2deg로 주었을 경우와 로봇이 저속 (4.9mm/s)으로 이동할 때와 최대 속도 (12.9mm/s)로 이동할 때의 응답을 살펴

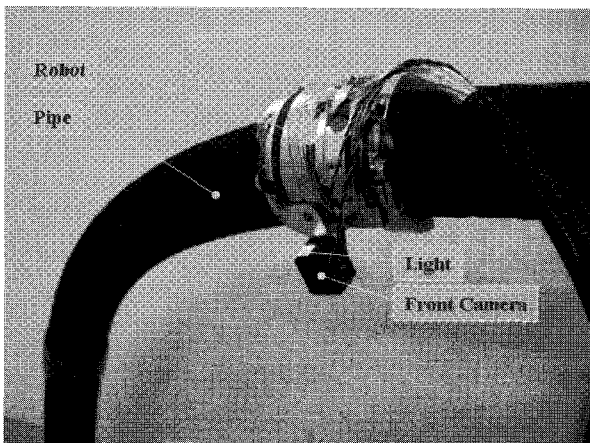


그림 9. 곡관에 장착된 로봇의 사진.  
Fig. 9. The picture of the robot attached at a curved pipe.

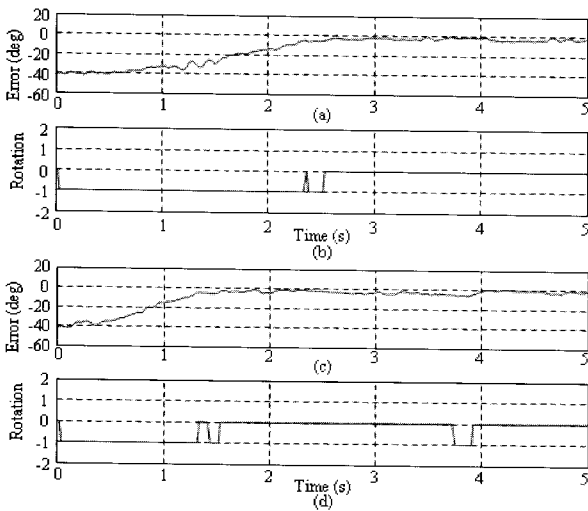


그림 12. 에러 밴드가 5deg일 때 이동속도 4.9mm/s에서의 (a) 위치 응답 (b) 회전 구동기의 스위칭 제어 입력, 12.4 mm/s에서의 (a) 위치 응답 (b) 회전 구동기의 스위칭 제어 입력.

Fig. 12. The result of the offset orientation angle control when the error band is 5deg (a) at low speed (4.9 \$mm/s\$) (b) the robot movement and rotation sequence (c) at high speed (12.4 \$mm/s\$) (d) the robot movement and rotation sequence.

보았다. 그림 12(a)는 에러 밴드가 5deg일 때 이동속도 4.9mm/s에서의 위치 응답을 보여 주고 있다. 초기 오차는 2.5초 이내에서 줄어 든 것을 볼 수 있다. 그러나 정상 상태에서 -5deg 정도의 오차가 나타나는 것을 볼 수 있고 이것은 제어 알고리즘이 5deg 이내의 에러 밴드에만 들어오면 제어 입력을 가지지 않기 때문에 발생한 현상으로 그림 12(b)를 보면 실제 2.5초 이후에는 제어 입력이 없는 것을 볼 수 있다. 그림 12(c)는 이동 속도를 12.9mm로 올렸을 경우의 응답이다. 1.5초 이내에서 정상상태에 도달한 것을 알 수 있다. 3.8초 근처의 추가적인 위치 조정은 로봇이 주행하면서 에러 밴드를 벗어나 추가적으로 위치 제어를 수행한 결과이다. 여전히 -5deg 근방에서 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다.

정상 상태 오차를 줄이기 위해서는 에러 밴드를 줄이면 된다. 그림 13(a)는 오차 밴드를 2deg로 줄인 경우를 보여 주고 있다. 과도 상태의 응답 성능은 오차 밴드가 5deg일 경우와 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 그러나 정상 상태에서 오차가 상당히 줄어 든 것을 볼 수 있다. 그리고 오차 밴드가 줄어 든 만큼 3초 이후에 제어 입력이 자주 가해지는 것을 볼 수 있다. 제안된 제어알고리즘은 회전 위치 보정을 할 때에 전진 운동을 정지하기 때문에 잦은 회전 제어 입력은 전진 속도를 떨어뜨리는 결과를 초래하므로 적절한 오차 밴드의 설정이 필요하다. 그림 13(c)는 이동 속도를 12.9mm로 올렸을 경우의 응답이다. 유사한 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 결과적으로 대략 2deg 정도의 오차 내에서 로봇의 자세 제어가 가능했고 이것은 사람의 육안

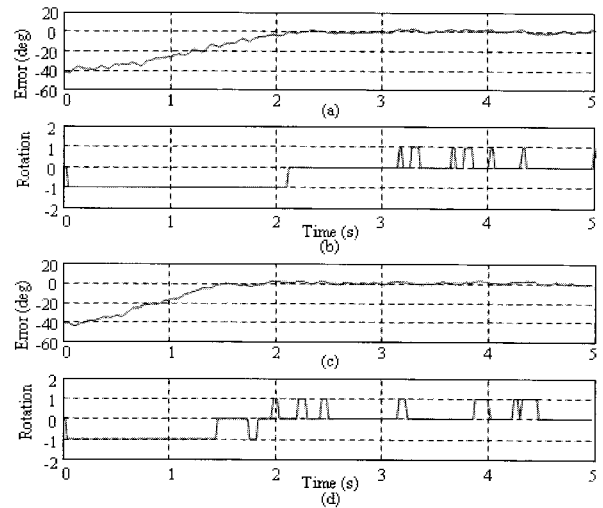


그림 13. 에러 밴드가 2deg일 때 이동속도 4.9mm/s에서의 (a) 위치 응답 (b) 회전 구동기의 스위칭 제어 입력, 12.4 mm/s에서의 (a) 위치 응답 (b) 회전 구동기의 스위칭 제어 입력.

Fig. 13. The result of the offset orientation angle control when the error band is 2deg (a) at low speed (4.9 \$mm/s\$) (b) the robot movement and rotation sequence (c) at high speed (12.4 \$mm/s\$) (d) the robot movement and rotation sequence.

으로 측정하고 있는 현재의 방식의 비정확성을 충분히 향상시킬 수 있다.

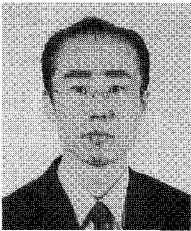
## VII. 결론

본 논문에서는 생체 모방형 구동 메카니즘 중의 하나인 자벌레 메카니즘을 이용하여 중수로형 원자로의 급수 배관을 주행하면서 검사를 수행할 있는 소형 이동 로봇을 개발하였다. 소형 이동 로봇의 자율 주행을 위한 센서 시스템을 제안하였고 센서 보정을 위한 해석 기법과 실험 결과를 제시하였다. 고방사선 환경에서 시간이 많이 소요되어 작업자의 피폭이 큰 급수 배관 검사 작업을 로봇을 이용하여 원격에서 작업함으로써 작업자의 피폭을 줄이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [1] E. Lavoie, G. Rousseau, J. Lessard, and A. Drolet, "Hydro-quebec meter inspection bracelet," *Canadian Nuclear Society's 5th Int. Conf. on CANDU Maintenance*.
- [2] E. Lavoie, G. Rousseau, and L. Reynaud, "On the development of the MATAR family of inspection tools," *Proceedings of Sixth CNS International Conference on CANDU Maintenance*, 2003.
- [3] G. Rousseau, K. Chaplin, T. Hazelton, P. Martin, and E. Choi, "Feeder piping NDE-Current capabilities and future direction", Hydro Quebec, Gentilly, Canada, <http://www.ndt.net/>

- [4] T. Okada and T. Sanemori, "MOGRER : A vehicle study and realization for in-pipe inspection tasks," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 6, pp. 573-582, 1987.
- [5] K. Suzumori, T. Miyagawa, M. Kimura, and Y. Hasegawa, "Micro inspection robot for 1-in pipes," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 4, no. 3, pp. 286-292, 1999.
- [6] T. Idogaki, H. Kanayama, N. Ohya, H. Suzuki, and T. Hattori, "Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in-pipe micro inspection machine," *IEEE 6th Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 193-198, 1995.
- [7] B. K. Kim, K.-D. Kim, J. H. Lee, J.-O. Park, S.-H. Kim, and Y.-S. Hong, "Locomotive mechanism based on pneumatic actuators for the semi-autonomous endoscopic system," *ICASE 2001*.
- [8] T. Fukuda, Hidemi Hosokai, and M. Otsuka, "Autonomous pipeline inspection and maintenance robot with inch-worm mobile mechanism," *IEEE Conf. on Robotics and Automations*, vol. 4, pp. 539-544, 1987.
- [9] C. H. Choi, S. H. Jung, and S. H. Kim, "Feeder pipe inspection robot with inch-worm mechanism using pneumatic actuators," *Int. Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 87-95, 2006.
- [10] C.-H. Choi, S.-H. Jung, Y.-C. Seo, K.-M. Jeong, H.-C. Shin, and S.-H. Kim, "Small mobile feeder pipe inspection robot for pressurized heavy water reactor with inch-worm mechanism," *Korean Patents*, 10-2003-0059819.
- [11] Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [12] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, no. 6, pp. 802-809, 1986.
- [13] Open Source Computer Vision Library Reference Manual, The Intel inc., 2001.



#### 최창환

1995년 한양대 정밀기계공학과 졸업. 1997년 광주과학기술원 석사. 2001년 동 대학원 박사. 2001년~현재 한국원자력연구원 핵주기시스템공학기술개발부 선임연구원. 관심분야는 원격 조작기, 햅틱 장치, 로봇 시스템 설계 및

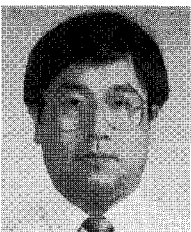
제어, 그래픽 및 동역학 시뮬레이션, 비선형 시스템 해석 및 제어, 등.



#### 박병석

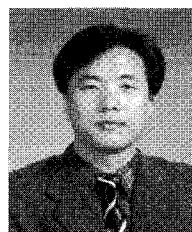
1986년 조선대학교 기계공학과(공학사). 1990년 전남대학교 기계공학과(공학석사). 2002년 충남대학교 기계설계공학과(공학박사). 1987년~현재 한국원자력연구원 핵주기시스템공학기술개발부 책임연구원. 관심분야는 마스터-슬

레이브 로봇 설계, 힘반영 제어, 강인제어, 신호처리, 가상 환경 작업 시뮬레이션.



#### 정현규

2000년 한국과학기술원 재료공학(공학박사). 1983년~현재 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원. 관심분야는 초음파 발생장치 및 신호 해석.



#### 정승호

1984년 연세대 기계공학과 졸업. 1992년 동 대학원 박사. 1999년~현재 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원. 관심분야는 로봇 시스템, 동역학시스템 해석, 로봇 캘리브레이션, 영상처리.