

# 자율 주행형 급수 배관 검사 로봇

최창환\*, 전풍우\*, 최용제\*\*, 정승호\*, 김승호\*

## An automatic motorized feeder pipe inspection robot

Chang-Hwan Choi\*, Pung-Woo Jeon\*, Yong-Je Choi\*\*,  
Seung-Ho Jeong\*, and Seung-Ho Kim\*

**Key Words:** inch-worm(인치웜), feeder pipe(급수 배관), 로봇(robot).

### Abstract

The outlet feeder pipe thinning in a PHWR (Pressured Heavy Water Reactor) is caused by high pressure steam flow inside the pipe, which is a well known degradation mechanism called FAC (Flow Assisted Corrosion). In order to monitor the degradation, the thickness of the outlet bends closed to the exit of the pressure tube should be measured and analyzed at every official overhaul. This paper develops an automatic feeder pipe inspection system that can minimize the irradiation dose by automating the measurement process. The robot can move by itself on the feeder pipe by using an inch worm mechanism, which is constructed by two gripper bodies that can fix their body on the pipe and one extendable and retractable body connected the two gripper bodies to move forward and backward.

### 1. 서 론

가압 중수로형 원자로에서 급수 배관 내부에는 고온고압의 증기가 흐르기 때문에 원자로의 압력관에 접합되어 있는 급수 배관의 곡관부에서 증기의 마찰로 인하여 배관의 두께가 얇아지게 되는 FAC (Flow Assisted Corrosion)라는 결함이 발생한다. 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 배

관의 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 어렵다. 작업 환경이 원자로의 전면부이기 때문에 정기 검사 기간이라 발전소를 섣다운한 상태에서 작업을 하더라도 방사선의 준위가 상당히 높아서 작업자의 피폭량도 많은 지역이기도 하다.

Ontario Hydro의 SIMD부에서는 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 적용 가능했다. 그러므로, 양질의 측정 데이터를 얻을 수 없었기 때문에 급수 배관의 안정성을 판별하기에는 충분하지 못 했다.

Hydro Quebec 연구 센터 (IREQ)에서는

---

\* 한국원자력연구소 원자력로봇랩  
E-mail : madistcch@kaeri.re.kr  
TEL : (042)868-8836 FAX : (042)868-8833  
\*\* 연세대학교 기계공학과  
E-mail : yjchoi@yonsei.ac.kr

---

METAR이라는 측정 장치를 개발하였고 1999년에서 2000년까지 Gentility-2에 적용하였다[1]. METAR은 14개의 초음파 센서를 가지고 있고 각 센서에 개별적인 홀더에 부착되어 있다. 홀더는 초음파 센서가 급수 배관에 수직으로 접촉할 수 있게 하고 홀더를 고정한 유연한 칼라를 이용하여 약간의 유연성을 줄 수 있게 하였다.

SIMD bracelet과 METAR은 작업자가 원자로의 전면부에 가서 직접 설치하고 측정하는 장치이다. 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 소모적인 작업이 동반된다. 그러므로 급수 배관을 측정을 마치는 동안 작업자가 원자로의 전면부에 상주해야 하기 때문에 작업자의 피폭량이 증가하게 된다.

본 논문에서는 이러한 급수 배관의 두께 측정 작업을 자동화 할 수 있는 급수 배관 검사 로봇을 개발한다. 로봇은 인치웸 메카니즘을 사용하여 자율적으로 급수 배관을 따라 주행할 수 있기 때문에 설치하는 사람이 하되 시간 소모적인 작업은 원격에서 작업할 수 있게 된다. 본 논문에서는 급수 배관 검사에 실제 적용할 수 있는 크기의 공압 구동형 급수 배관 검사 로봇을 제안하고 제안된 메카니즘이 급수 배관의 곡관부의 검사에 적용이 가능한가를 검증하기 위하여 두개의 급수 배관 검사 로봇 견본을 설계 및 제작하고 급수 배관의 모형에 적용하여 가능성을 검증하였다.

## 2. 급수 배관 검사 로봇의 구성

### 2.1 급수 배관 검사 로봇의 요구 조건

우리나라 중수로 발전소의 압력관은 총 380개로 이루어져 있고 각 압력관에 급수 배관이 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 1(a)는 압력관 배열의 특정 부분을 보여 주고 있다. 압력관은 286mm의 간격으로 원형으로 배열되어 있다. 압력관 전면부에서 급수 배관에 도달하기까지는 거리는 413mm 정도이다. 급수 배관에 도

달하기 위해서는 압력관과 급수 배관의 고정을 위한 가이드를 지나야 하기 때문에 로봇을 설치할 수 있는 공간은 155mm×204mm 정도의 공간이 된다. 그림 1(b)는 로봇이 급수 배관을 따라 주행할 때 검사 중인 급수 배관과 압력관 사이의 간섭을 도시한 것이다. 급수 배관 중 2.5인치 배관의 경우가 특히 간섭이 심하기 때문에 가장 심한 경우를 그린 그림이다. 그러므로 로봇이 급수 배관을 따라 검사를 수행하기 위해서는 그림과 같은 공간을 지날 수 있는 크기를 가져야 한다. 곡관의 안쪽 면은 공간이 충분하기 때문에 그다지 큰 문제는 없으나 검사를 수행해야 하는 곡관의 바깥쪽 면은 간섭이 심하다. 결과적으로 최소 7.6mm 이하의 공간을 지나야 하고 전체적으로는 14.63mm 이하가 되도록 하는 것이 유리하다.

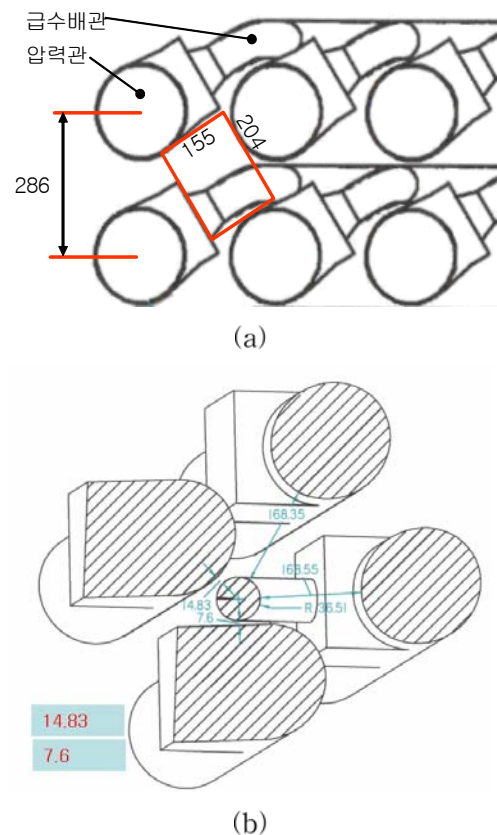
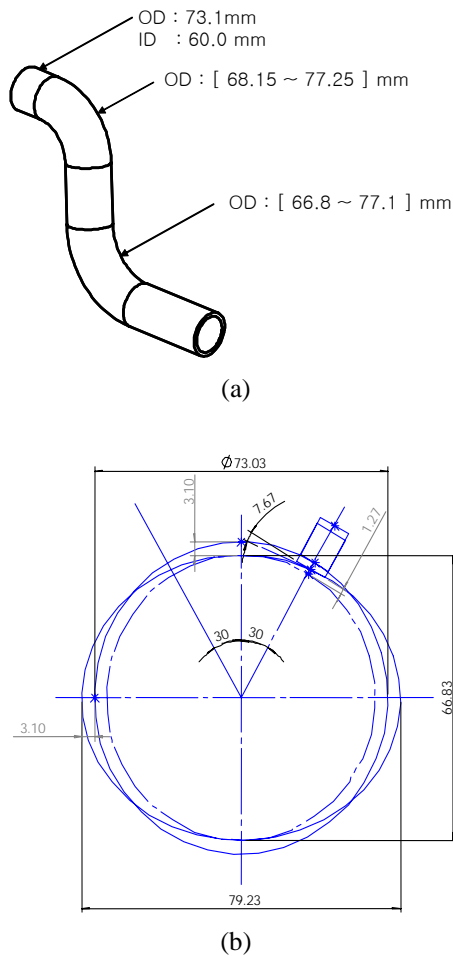


Fig. 1 (a) Feeder pipe array in a PHWR (b) The cross-section view of a closest gap in the array

급수 배관은 1.5인치, 2인치, 2.5인치의 특수 배관을 굽혀서 사용하기 때문에 굽혀지는 곡관 부분에서 외경의 변화가 생긴다. 즉, 굽어지는 방향으로 외경이 줄어들고 굽어지는 평면상의 면은 외경이 커지게 된다. 그림 2(a)는 급수 배관의 실제 모형에서 측정된 외경의 변화를 도시한 것이고 그림 2(b)는 외경의 변화와 함께 외경이 변했을 때 측정 면에 수직을 이루기 위해서는 초음파 센서의 접촉이 달라져야 하는 거리와 각도를 보여주고 있다. 완전한 원형이었을 때를 가정하면 거리상으로는 1.27mm의 변화가 있고 각도는 7.67° 변하는 것을 볼 수 있다. 이것은 로봇의 센서 부분에서 고려되어야 하는 부분이다.



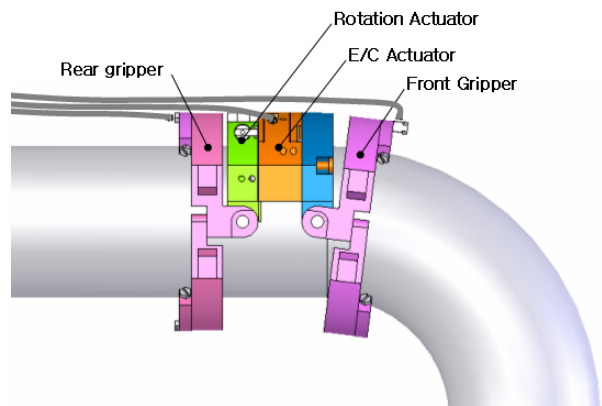
**Fig. 2** (a) The measurement of the diameter at the 1st and 2nd bending in a feeder pipe mockup (b) The variation of ultra-sonic sensor attachment caused by the bending

2.2 급수 배관 검사 로봇의 구성

급수 배관의 검사를 위하여 본 논문에서는 앞 절에서 열거한 요구 조건을 고려하여 자율 주행형 급수 배관 검사 로봇을 제안한다. 그림 3은 인치웜 방식을 사용한 급수 배관 검사 로봇의 개념 도면을 보여 주고 있다.

급수 배관 검사 로봇은 자신의 몸체를 급수 배관에 고정할 수 있는 두개의 그리퍼 몸체 (Front gripper, Rear gripper)가 있다. 두 그리퍼 몸체의 사이에는 확장/수축이 가능한 하나의 구동기(E/C Actuator)와 좌우 회전이 가능한 회전 구동기(Rotation actuator)가 있다. 확장/수축 구동기는 급수 배관의 길이 방향으로 로봇을 이동시킬 때 사용되고 회전 구동기는 원주 방향으로 로봇을 이동시킬 때 사용된다.

임의의 곡률반경을 가진 곡관의 주행을 위해서 전·후방 그리퍼와 회전 및 확장/수축 구동기는 자유롭게 움직일 수 있는 조인트로 연결되어 있다. 그러면 곡관의 곡률에 따라 그리퍼의 각도가 곡관 면을 따라 구속이 되어 곡관부에 항상 수직 방향으로 위치하게 된다. 곡관부의 굽힘에 의한 변형을 고려하여 로봇의 내경이 결정되어 지므로 배관과 로봇 사이에 공간이 생기기 때문에 완전한 수직을 보장하기는 어려우나 로봇의 이동은 수직도와는 관계없이 배관과 고정이 되는 것으로도 충분하기 때문에 주행에는 지장이 없다. 그러나 초음파 센서의 측정에 있어서는 수직도가 중요한 요소이기 때문에 별도의 기구를 구성하여 해결하도록 한다.



**Fig. 3** Feeder pipe inspection robot using an inch-worm mechanism

그림 4는 로봇의 주행 원리를 보여 주고 있다. 그림 4(a)-(c)에서 로봇이 배관의 길이 방향으로 좌측으로 주행하기 위해서는 후방 그리퍼를 배관과 고정하고 확장/수축 구동기를 확장하여 전방 그리퍼를 고정된 길이만큼 이동시키고 다시 전방 그리퍼를 고정하고 후방 그리퍼를 풀고 확장/수축 구동기를 수축하게 되는 사이클로서 로봇이 움직이게 된다. 우측으로 이동하기 위해서는 같은 방식으로 해서 반대로 움직이게 된다. 그림 4(d)-(f)에서 로봇이 배관의 원주 방향으로 반시계 방향으로 회전하기 위해서는 후방 그리퍼를 배관에 고정하고 회전 구동기를 반시계 방향으로 회전시키고 전방 그리퍼를 배관과 고정하고 후방 그리퍼를 풀고 다시 회전 구동기를 원상 복귀하게 되는 사이클로서 회전하게 된다. 시계 방향으로 회전하기 위해서는 같은 방식으로 해서 반대로 움직이게 된다. 위와 같이 로봇은 배관의 길이 및 원주 방향으로 자유자재로 움직일 수 있기 때문에 다양한 부분의 측정이 가능하다.

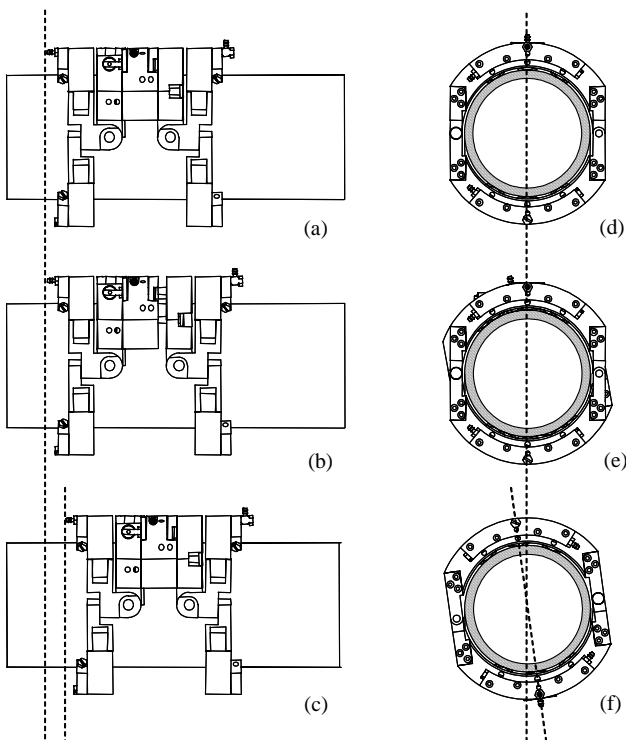


Fig. 4 Feeder pipe inspection robot using an inch-worm mechanism

전·후방 그리퍼의 경우 배관을 원주 방향으로 완전히 감싸고 있기 때문에 그림 5와 같은 체결 메카니즘으로 구성하여 로봇을 쉽게 설치할 수 있도록 구성한다. 체결 부의 한쪽은 자유롭게 움직일 수 있는 조인트로 구성되고 반대쪽은 쉽게 체결 및 분리를 할 수 있는 구조로 제작하였다. 향후 사람이 설치하지 않고 별도의 로봇 작동기를 사용하여 설치할 수도 있다.

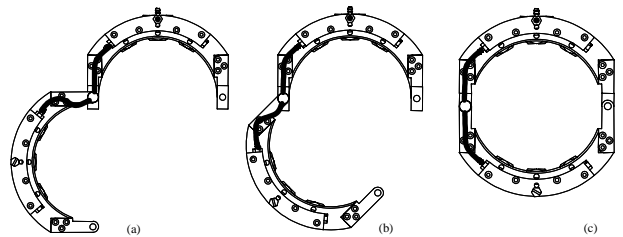


Fig. 5 The installation of the feeder pipe inspection robot

본 연구에서는 위와 같은 인치웜 메카니즘의 곡관 배관 검사에 적용에의 검증을 위하여 전기식과 전기 및 공압 복합식 인치웜 메카니즘을 제안하고 주행 시험을 통하여 각각 문제점을 살펴본다. 본 연구에서는 주행 메카니즘의 검증 단계로서 급수 배관 검사에의 실제 적용 보다는 곡관 부의 주행이 가능하고 소형화가 가능한 구조로 설계하고 실험을 통하여 검증하는 것을 목적으로 한다.

### 3. 급수 배관 검사 로봇의 주행 실험

#### 3.1 전기식 급수 배관 검사 로봇

제안한 급수 배관 검사 로봇을 전기식으로 구현해 본다. 그림 6은 스텝 모터와 솔레노이드 구동기를 이용하여 전기식으로 제작한 급수 배관 검사로봇을 보여 주고 있다. 전·후방 그리퍼는 솔레노이드 구동기를 이용하여 전·후방 그리퍼의 상하에 각각 3개씩 그리퍼당 6개의 솔레노이드 구동기를 부착하였다. 곡관 주행 시에 반경이 변하더라도 충분히 고정될 수 있도록 솔레노이드를 여러 개를 부착하였다. 확장/수축 구동기는 CDROM 드라이브에 주로 사용되는 소형 스텝 모터를 사용하여 제작하였다. 리드스크류 메카니즘을

사용하여 모터의 정역회전에 따라 확장 또는 수축 작용을 하게 된다.

그림 7은 제어기의 구성을 보여 주고 있다. 제어는 Atmel사의 AVR 마이크로컨트롤러를 사용하여 구성하였다. PC에서 RS-232 통신으로 전진, 후진 명령을 전송하면 제어기가 로봇을 전후로 움직이게 된다.

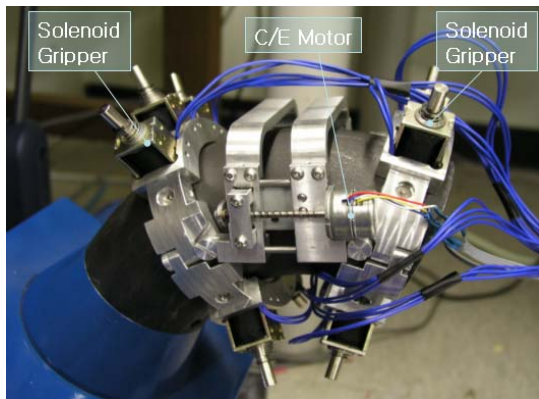


Fig. 6 Electric feeder pipe inspection robot

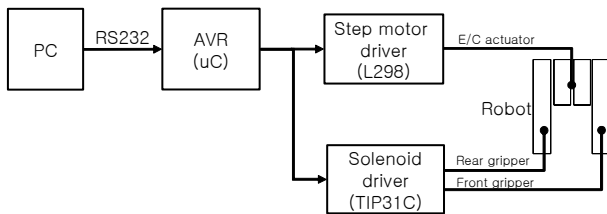


Fig. 7 The controller for the electric feeder pipe inspection robot

전기식 구동의 경우 컴퓨터로 제어하기가 쉽고 케이블을 유연하게 할 수 있기 때문에 로봇의 진행에 방해가 될 수 있는 장점이 있고 방사능에도 강한 장점이 있다. 그러나, 솔레노이드의 구동력이 약하기 때문에 로봇을 배관에 단단히 고정하지 못하고 배관이 기울어질 경우에는 미끄러지는 문제가 생겼다. 문제를 해결하기 위하여 전류를 높이는 방법이 있으나 드라이버의 한계와 솔레노이드의 발열 문제로 구동력을 높이는 데에는 한계가 있다. 전기식 구동기의 경우 크기가 작아지면 구동력의 증가와 발열 문제를 해결하기가 어렵기 때문에 공압력을 사용하여 위와 같은 문제점을 해결하도록 시도한다.

3.2 전기·공압 복합식 급수 배관 검사 로봇

제안한 급수 배관 검사 로봇을 전기 및 공압 복합식으로 구현해 본다. 전기식의 문제점을 보완하기 위하여 그리퍼 부분을 상용 공압 실린더를 사용하여 제작하였다. 공압 실린더는 피스톤 지름이 6mm이고 7kgf/cm<sup>2</sup>의 공압에서 2.0Kg 정도의 구동력을 가지게 된다.

스텝모터와 타이밍 벨트를 사용하여 회전 구동기를 구현하였다. 로봇이 곡관의 외부를 정확하게 추종할 수 있도록 하기 위하여 비틀림 정도가 설정된 값을 넘어설 경우 스위치의 작동으로 인하여 비틀림이 검출되고 회전 구동기를 구동하여 로봇을 반대 방향으로 회전시키게 된다.

초음파 센서가 정확히 수직도를 유지할 수 있도록 하기 위해 센서가 Pitching/Yawing 운동을 할 수 있는 메카니즘으로 구성하였다.

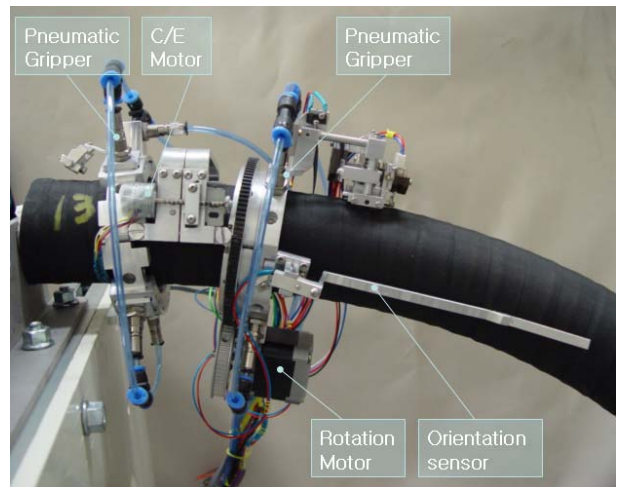


Fig. 8 Pneumatic and electric feeder pipe inspection robot

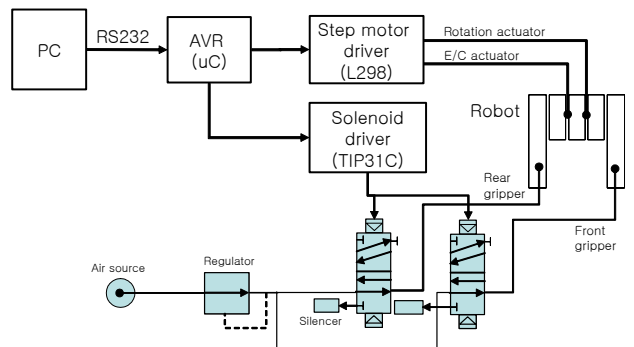


Fig. 9 The controller for pneumatic and electric feeder pipe inspection robot

그림 9는 전기·공압 복합식 급수 배관 로봇의 제어기를 도시한 것이다. 회전 구동기와 확장/수축 구동기의 스텝 모터는 AVR 마이크로 컨트롤러를 사용하여 구성하였고 전·후방 그리퍼의 공압 실린더는 단동식 구동 솔레노이드 밸브를 이용하여 구성하였다.

공압식의 경우 전기식과는 달리 작은 부피에서 비교적 큰 힘을 얻을 수 있었다. 실린더는 지름 10mm에 길이가 25mm인 상용 실린더를 사용하였기 때문에 부피가 커졌으나 로봇의 몸체에 공압 실린더를 심을 경우에는 충분히 작은 크기로도 제작이 가능하다. 현재 전기식으로 되어 있는 회전 구동기와 확장/수축 구동기도 공압 실린더를 사용하면 더 작은 부피로 구현할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

인치웜 방식을 이용하여 중수로형 원자로의 급수 배관을 원격에서 검사하는 자율 주행형 로봇을 개발하였다. 전기식과 전기 및 공압 복합식의 배관 검사 로봇을 개발하였고 각각의 장·단점을 살펴보았다. 본 연구는 발전소에 실제 투입하기 위한 로봇 개발의 전 단계로서 제안한 메카니즘을 여러 가지 방식으로 제작하였고 완전한 공압을 통하여 소형화가 가능하다.

#### 후 기

본 연구는 원자력 증장기 개발사업의 원자력용 내방사선 로봇 개발과제의 일환으로 개발되었다.

#### 참고문헌

- (1) Eric Lavoie, Gilles Rousseau, Jean Lessard, and Alain Drolet, "Hydro-Quebec Meter Inspection Bracelet," Canadian Nuclear Society's 5th Int. Conf. on CANDU Maintenance.
- (2) Byungkyu Kim, Kyoung-Dae Kim, Jinhee Lee, Jong-Oh Park, Soo-Hyun Kim and Yeh-Sun Hong, "Locomotive Mechanism based on pneumatic actuators for the semi-autonomous endoscopic system," ICASE 2001.
- (3) Chang-Hwan Choi, Seung-Ho Jung, Yong-Chil Seo, Kyung-Min Jeong, Ho-Chul Shin, and Seung-Ho Kim, "Small mobile feeder pipe inspection robot for pressurized heavy water reactor with inch-worm mechanism," Korean Patents, 10-2003-0059819.
- (4) Development of video probe system for inspection of feeder pipe support in calandria reactor, KAERI/RR-2058/99