

## 화력발전소 보일러 튜브 및 대형 유체수송관 자동 진단을 위한 이동로봇 시스템 개발

### Development of Mobile Robot Systems for Automatic Diagnosis of Boiler Tubes in Fossil Power Plants and Large Size Pipelines

박상덕\*<sup>†</sup>, 정희돈\*, 임종수\*\*  
 Sangdeok Park\*<sup>†</sup>, Hee-Don Jeong\* and Zhong-Soo Lim\*\*

**초 록** 화력발전소 보일러 튜브 및 대형 유체수송관의 자동 진단을 위해 비파괴검사 방법을 사용하는 두 가지 형태의 이동로봇을 개발하였다. 개발된 이동로봇은 보일러 튜브 또는 유체수송관의 외면을 주행하면서 전자기 초음파 탐촉자를 이용하여 파이프 벽면에 발생하는 미세한 구멍, 균열 또는 부식 및 침식에 의한 감육 등과 같은 결함을 검출한다. 이와 같은 이동로봇을 이용한 결함 검출의 자동화는 열악한 환경에서 작업자의 위험 없이 대형 구조물의 중대한 결함을 방지하는 유용한 수단으로 활용될 수 있다.

**주요용어** : 보일러 튜브, 유체수송관, 이동로봇, 전자기초음파탐촉자

**Abstract** In this study, two types of mobile robotic systems using NDT (Non-destructive testing) method are developed for automatic diagnosis of the boiler tubes and large size pipelines. The developed mobile robots crawl the outer surface of the tubes or pipelines and detect in-pipe defects such as pinholes, cracks and thickness reduction by corrosion and/or erosion using EMAT (Electro-magnetic Acoustic Transducer). Automation of fault detection by means of mobile robotic systems for these large-scale structures helps to prevent significant troubles without danger of human beings under harmful environment.

**Keywords**: boiler tubes, large size pipelines, mobile robot, EMAT

#### 1. 서 론

보일러 튜브의 결함은 화력발전소의 운전을 강제로 정지하게 하는 주된 원인이다. 화력발전소 보일러 내부의 가혹한 운전조건은 온도 변화에 따른 응력, 부식, 침식 및 진동 등을 유발하여 보일러 튜브의 수명을 단축시킨

다. 또한, 산화, 연소 생성물 및 불순한 보일러 용수에 의한 부식도 보일러 튜브의 두께를 감육시키며, 튜브에 발생하는 균열과 미세한 구멍 등과 함께 보일러의 유효 운전수명에 도달하기 전에 심각한 문제를 발생시킨다. 내부에 유체가 흐르는 대형 파이프 벽면의 균열 혹은 미세한 구멍 등과 같은 결함도 심각한 문제를 유발할 수 있다.

(접수일: 2002. 5. 4, 심사완료일: 2002. 5. 29) \*<sup>†</sup>교신저자: 포항산업과학연구원 기전연구팀(Mechanical and Electrical Engineering Research Team, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-330) sdpark@rist.re.kr, \*\* 포항산업과학연구원 센서·계측연구팀

보일러 튜브 혹은 유체수송관의 예기치 못한 파손사고를 방지하기 위해서는 비파괴검사방법을 이용하여 튜브의 상태를 주기적으로 검사하는 것이 필요하다. 특히, 짧은 시간 내에 길이가 긴 보일러 튜브 혹은 유체수송관을 대상으로 한 검사를 수행하기 위해서는 이동로봇을 이용한 비파괴검사의 자동화가 절실히 요구된다.

비파괴검사 센서를 장착한 이동로봇 시스템은 화력발전소 보일러 튜브 혹은 대형 유체수송관 등과 같이 규모가 큰 구조물의 자동 비파괴검사 목적에 가장 효과적인 수단이 될 수 있다. 현재, 이동로봇은 비행기 구조물의 비파괴검사[1,2], 대형 철구조물의 검사[3] 및 배관의 결함 검사[4,5] 등에 널리 사용되고 있다.

특수한 목적에의 적용을 위해 다양한 형태의 이동로봇들이 개발되었으며, 배관 검사용 이동로봇은 이동형태에 따라 배관 내부이동형[5] 및 배관 외부이동형[4]으로 나누어진다. 대형 배관 또는 탱크를 검사하기 위한 벽체 이동로봇의 이동 메커니즘은 한 개의 큰 흡착 컵을 이용하는 구조[6]와 여러 개의 작은 흡착 컵을 이용하는 구조[1,2,7] 및 영구자석 체인 트랙을 사용하는 구조[6]로 구분된다.

본 연구에서는 화력발전소 보일러 튜브 및 대형 유체수송관의 비파괴검사를 위해 영구자석 바퀴를 가지는 두 가지 형태의 이동로봇을 개발하였다. 또한, 각각의 대상물에 대한 비파괴검사를 위해 영구자석을 내장한 서로 다른 크기의 EMAT(electro magnetic acoustic transducer)와 EMAT를 검사대상물에 부착하거나 떼기 위한 센서 탈착기구부를 개발하였으며, 각 이동로봇에 공통으로 사용하는 제어시스템을 개발하였다.

## 2. 보일러 튜브 검사용 이동로봇

### 2.1. 검사대상

본 연구에서 개발하고자 하는 비파괴 검사용 이동로봇의 검사대상인 화력발전소의 보일러 튜브는 직경 63.4mm, 길이 30m 이상의 수백 개의 강철 파이프로 구성된다. 보일러 튜브의 주된 결함은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 마모와 부식에 의한 튜브 외벽의 감속과 침식에 의한 균열 혹은 미세 구멍 등이다.

### 2.2. 이동로봇 구동부 설계

이동로봇의 형태는 검사대상과 검사방법에 따라 달라진다. 본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 EMAT를 사용하여 보일러 튜브 외부에서 튜브의 길이방향을 따라 송신부와 수신부 사이의 튜브 내부의 결함을 검출하는 방법을 사용하였다.

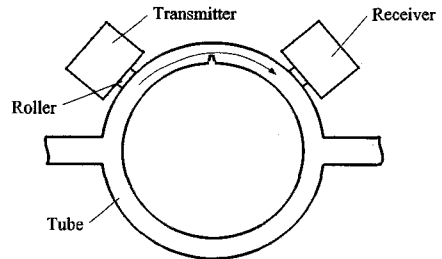


Fig. 2 Tube inspection method using EMAT

따라서, 이동로봇은 이러한 목적을 달성하기 위해 1) 튜브의 길이방향을 따른 직선주행, 2) 옆의 튜브로 건너가기 위한 방향전환 및 횡방향 주행, 3) 튜브의 오목하거나 볼록한 표면의 주행 및 4) EMAT를 검사대상물에 접촉하거나 분리하는 기능을 가지도록 설계되었다. 이러한 설계기준에 의해 Fig. 3과 같은 화력발전소 보일러 튜브의 자동 비파괴 검사를 위한 이동로봇을 개발하였다.

이동로봇의 양쪽에는 네 개의 영구자석 바퀴가 사용되었으며 두 개의 바퀴를 타이밍벨트로 묶어서 하나의 트랙을 형성하였다. 이 타이밍벨트는 이동로봇이 횡방향으로 이동할 때 튜브 사이의 홈에 영구자석 바퀴가 빠지지 않도록 해준다. 한 개의 DC 모터는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 감속기와 타이밍벨트 및 펄치차를 통해 두 개의 트랙을 구동한다.



(a) External reduction of wall thickness



(b) Internal pinholes

Fig. 1 Defects in boiler tubes in fossil power plants

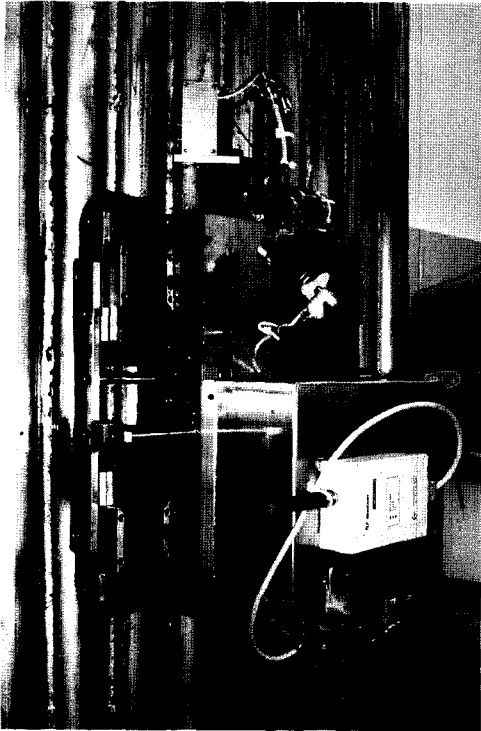


Fig. 3 The developed mobile robot for automatic diagnosis of boiler tubes in fossil power plants

넓은 타이밍벨트로 연결된 두 개의 영구자석 바퀴는 두 바퀴의 중심을 잇는 선의 중간을 중심으로 회전할 수 있고, 각 트랙의 회전중심은 이동로봇의 몸체에 고정된다. 이동로봇 몸체에 대해 회전하는 각 트랙에 의해 Fig. 5와 같이 이동로봇이 튜브의 오목하거나 볼록한 표면을 주행할 때 영구자석 바퀴가 항상 튜브의 표면에 접촉할 수 있게 된다. Fig. 6은 이동로봇의 설계도이고 Table 1은 설계된 이동로봇의 개략적인 사양이다.

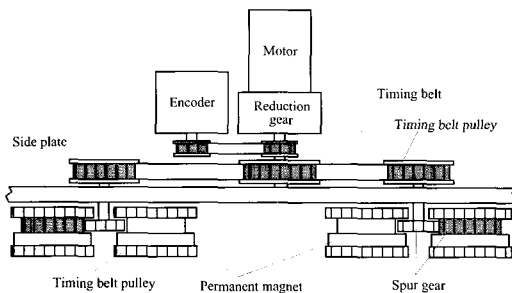


Fig. 4. Schematic draw of wheel driving mechanism

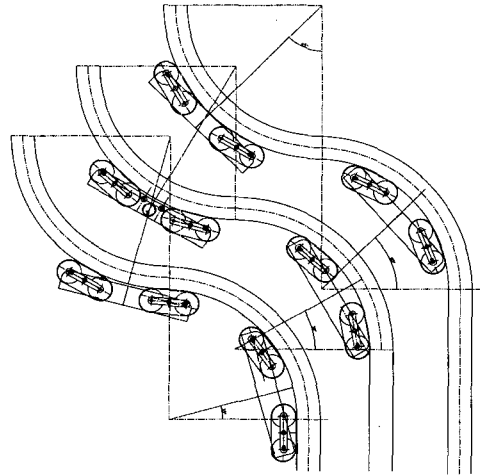
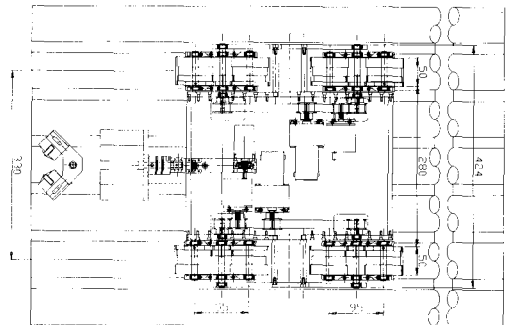
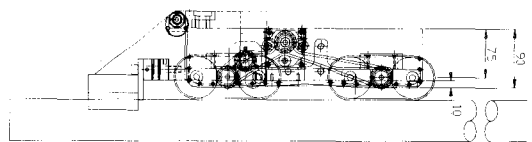


Fig. 5 Movement of crawler on the surface of convex and concave paths



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 6 Drawings of a boiler tube inspection crawler

Table 1 Specification of boiler tube inspection crawler

Item	Performance and specification
Size	420×400×220mm (with controller)
Weight	12kg(with EMAT sensor)
Speed	Max. 8m/min

### 2.2. EMAT 탈착기구부 설계

본 연구에 사용된 EMAT는 그 내부에 강한 영구자석이 들어있어서 보일러 튜브를 검사할 때 영구자석에 의해 튜브 벽에 강하게 부착된다. 그러므로, 보일러 튜브를 길이방향으로 연속적으로 탐상하기 위해서는 Fig. 2와 같이 EMAT는 보일러 튜브와 일정한 각도를 유지하면서 일직선으로 움직여야 한다. 아울러, EMAT를 검사대상물에 부착하거나 떼어내기 위한 기구부가 필요하다.

Fig. 7은 EMAT 탈착기구부의 개략도이다. EMAT를 검사대상물에서 떼기 위해서는 큰 힘이 필요하므로 특별히 설계된 풀리에 감긴 와이어어를 이용한다. EMAT가 검사대상물에 부착된 상태에서 DC 모터는 암(arm)을 회전시키지 않은 채 풀리만을 구동하며, 풀리가 180° 회전하는 동안 와이어를 감아 센서의 앞 부분을 검사대상물에서 떼어낸다. 와이어가 풀리에 감기면서 센서의 끝 부분이 검사대상물에서 떨어진 후 암이 회전하면서 센서를 완전히 들어올린다. 와이어는 인장력만 전달할 수 있으므로 EMAT를 반대방향으로 구동하지 못한다. 와이어가 풀리에서 풀릴 때 암을 반대방향으로 회전시키기 위해 스프링을 사용하였다. EMAT를 튜브에 부착한 상태에서 수행하는 이동로봇에 약간의 위치오차가 발생하여도 EMAT와 튜브의 접촉성을 높이기 위해 EMAT와 암 사이에 플렉시블 조인트(flexible joint)를 설치하였다.

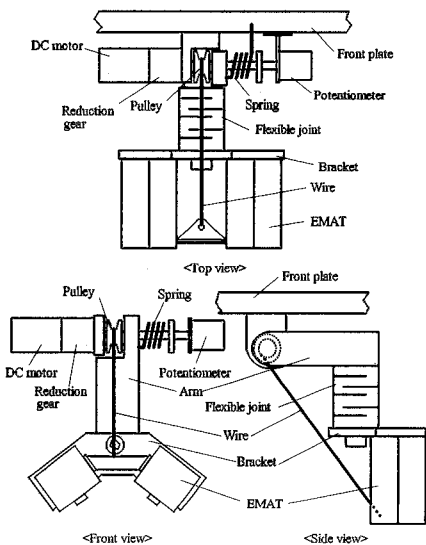


Fig. 7 Schematics of EMAT lifting mechanism

### 3. 대형 유체수송관 검사용 이동로봇

#### 3.1. 검사대상 및 검사방법

대형 유체수송관 검사용 로봇은 내부에 가스 혹은 액체가 흐르는 유체수송관 벽면의 균열 혹은 미세한 구멍 등의 결함을 검출하는 것이 목적이다. 검사대상으로 하는 유체수송관은 2m 이상의 직경과 수백 m에서 수 km에 이르는 길이를 갖는다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 유체수송관의 바깥 면에 부착된 EMAT는 송신부와 수신부 사이의 유체수송관 벽체 내부의 결함을 검사하는 효과적 수단인 수단이 될 수 있다. 따라서, 검사대상물의 자동검사를 위해 EMAT를 부착한 이동로봇은 유체수송관의 바깥 면에서 Fig. 9와 같이 관 길이방향 혹은 용접선을 따라 이동하도록 설계되어야 한다.

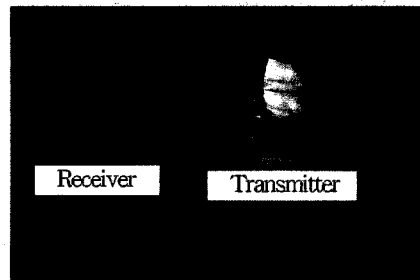


Fig. 8 Detecting defect using EMAT

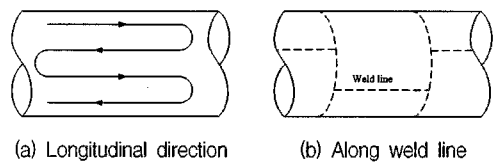


Fig. 9 Traveling method of a mobile robot

#### 3.2. 이동로봇 구동부 설계

대형 유체수송관 검사용 이동로봇은 영구자석 바퀴를 이용하여 파이프 바깥 면에 부착되어 이동한다. 이동로봇은 주행 중 유체수송관 아래부분에 거꾸로 매달릴 수 있기 때문에 떨어지는 것을 방지하기 위해 자석바퀴는 충분한 접촉력을 가져야한다.

또한, 이동로봇의 크기와 무게를 최소화하기 위해서는

자석바퀴의 수를 최소화할 필요가 있다. 따라서, 각 자석 바퀴가 일정한 부하를 지지하도록 설계하는 것이 중요하다. 그러나, 각 바퀴와 파이프 사이의 접촉력을 일정하게 유지하기 위해서는 유체수송관에 부착되는 이동로봇의 위치와 방향에 따라 각 바퀴의 위치와 각도가 달라져야 한다. 이러한 점들을 고려하여 대형 유체수송관의 자동검사를 위해 Fig. 10과 같이 여섯 개의 자석바퀴를 가지는 이동로봇을 개발하였다.

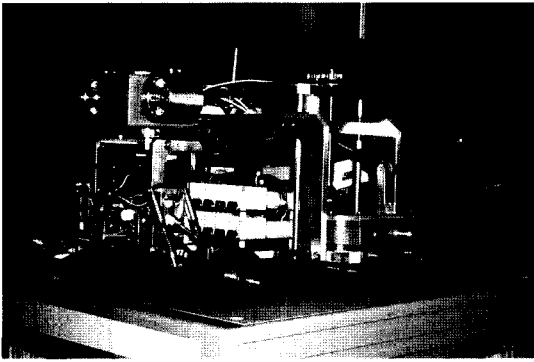


Fig. 10. The developed mobile robot system for large size pipeline inspection

Fig. 11은 설계된 이동로봇 바퀴 구동부의 메커니즘을 보여준다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 각 바퀴는 두 개의 완충기에 의해 지지되는 평행사변형 구조를 가지며, 이동로봇 몸체에 대해 각도변화 없이 회전할 수 있다. 이동로봇 몸체에 대해 상대운동을 하는 바퀴에 DC 모터의 구동력을 전달하기 위해 유니버설 조인트를 사용하였다. DC 모터의 구동력은 타이밍벨트에 의해 각 축의 뒷바퀴로 전달된다. Table 2는 설계된 이동로봇의 개략사양이다.

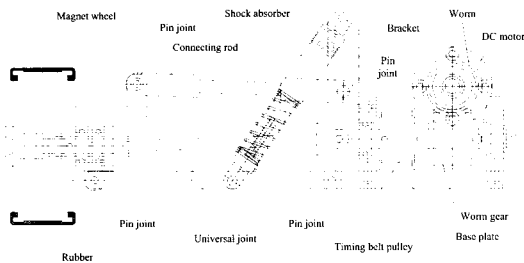


Fig. 11 The designed wheel driving mechanism

Table 2 Specification of large size pipe inspection crawler

Item	Performance and Specification
Size	530mm×380mm×240mm
Weight	13.5kg(with EMAT sensor)
Speed	Max. 9.5m/min

### 3.3. EMAT 탈착기구부 설계

유체수송관은 그 표면적이 넓으므로 보일러 튜브의 경우에서와 같이 송신부와 수신부 사이의 거리가 짧은 EMAT를 사용하면 파이프 표면 전체를 검사하는데 너무 많은 시간이 소요된다. 그러나, EMAT 송신부와 수신부의 거리가 너무 크면 측정결과가 부정확하다. 본 연구에서는 여러 가지 크기를 가지는 인공시험편에 대한 여러 번의 실험을 통하여 EMAT의 송신부와 수신부 사이의 거리를 40cm로 고정하였다. 이 경우 EMAT는 2mm 이상의 미세한 구멍을 감지할 수 있다.

유체수송관 검사용 이동로봇 시스템에 사용한 EMAT의 크기는 보일러 튜브 검사용 이동로봇에 사용된 EMAT보다 크기가 크고 EMAT에 내장된 영구자석의 자력이 강하므로 EMAT를 검사대상물에서 떼기가 무척 어렵다. 따라서, EMAT 탈착기구부는 작은 힘으로도 검사대상물의 표면에서 떼기 쉽고, 검사를 위해 센서를 검사대상물의 표면에 놓을 때 검사대상물 근처에서 갑작스럽게 부착되어 센서에 충격이 가해지는 것을 방지하도록 설계되어야 한다.

또한, Fig. 12에서 보는 바와 같이 EMAT가 검사대상물에 정확하게 부착되기 위한 각도  $\theta$ 는 두 센서 사이의 거리  $d$  및 파이프의 직경  $D$ 에 따라 식(1)과 같이 변하므로 EMAT의 각도 조절이 가능해야 한다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{d}{D}\right) \quad (d < D) \quad (1)$$

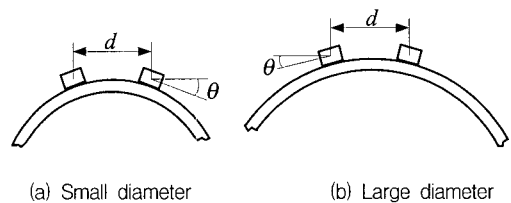


Fig. 12 Angle of EMAT according to the diameter of pipelines

Fig. 13은 EMAT의 탈부착과 각도 조절을 쉽게 하기 위한 EMAT 탈착기구부의 설계개념을 보여준다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 EMAT는 connecting rod에 의해 회전중심에 대해 회전한다. Connecting rod의 다른 쪽은 DC 모터에 의해 구동되는 회전기어에 pin joint에 의해 연결된다. EMAT가 회전해서 한쪽 끝이 검사대상물에서 떨어진 상태에서는 작은 힘으로도 EMAT를 쉽게 검사대상물에 부착하거나 뗄 수 있다. EMAT의 회전중심과 connecting rod에 연결되는 pin joint 사이의 거리가 멀면 작은 용량의 모터로도 쉽게 구동할 수 있다. 또한, DC 모터의 회전각도를 제어함으로써 EMAT의 각도를 검사대상물의 직경에 따라 조절할 수 있다.

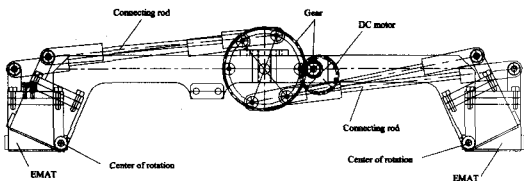


Fig. 13 Basic concept of EMAT lifting mechanism

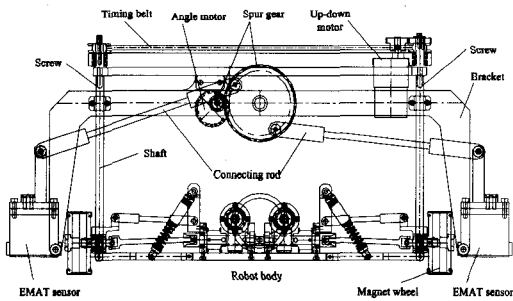


Fig. 14 The EMAT lifting mechanism assembled with the crawler

Fig. 14는 설계된 EMAT 탈착기구부가 이동로봇과 결합된 모습을 보여준다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 EMAT 탈착기구부는 이동로봇의 전면에 설치된 CCD 카메라와 이동로봇의 동작에 방해가 되지 않도록 이동로봇 상부에서 이동로봇 몸체의 중간부분에 네 개의 shaft를 이용하여 부착되었다. 센서 브래킷은 상하 이동모터와 타이밍벨트에 의해 구동되는 screw에 의해 shaft를 따라 위아래로 움직일 수 있다. Fig. 15는 제작된 EMAT 탈착기구부를 위에서 본 모습이다.

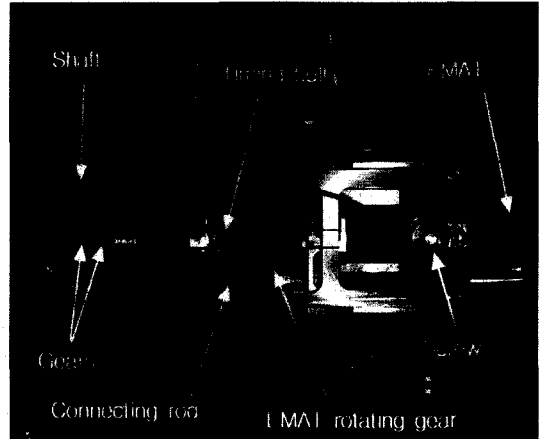


Fig. 15 The manufactured EMAT lifting part

#### 4. 결함 검출

Fig. 16은 개발된 대형 유체수송관 결함 탐상용 이동로봇이 test bed에서 작업중인 모습이다. 개발된 이동로봇은 EMAT를 사용하여 검사대상물인 유체수송관 표면을 검사하고 센서 송신부와 수신부 사이의 결함을 검출하여 페인트를 뿌려서 표시한다.



Fig. 16 The developed large size pipeline inspection mobile robot on a test bed

EMAT를 이용한 결함검출 방법은 간단하게 설명하기는 너무 복잡하므로 별도의 논문으로 발표할 예정이다. 원리를 간단히 설명하면, 결함이 없는 검사대상물에서 EMAT의 송신부에서 방출되어 수신부에서 검출되는 신호는 결함이 있을 때의 신호와 달라진다. 예를 들어, Fig. 17은 발진주파수 750kHz를 사용할 경우 두께 6.7mm의 철판에서 결함이 없을 때와 4mm 직경의 서로 다른 깊이의 결함이 있을 때의 초음파 신호의 변화를 보여준다. 호스트 컴퓨터(host computer)에서 운용되는 특

별히 작성된 결함 감지 알고리즘이 이러한 초음파 신호의 차이를 감지하여 결함을 판단한다.

### 5. 이동로봇 제어기

Fig. 18은 개발된 두 가지 형태의 이동로봇 제어기의 기본 구조를 보여준다. 호스트 컴퓨터는 이동로봇에 탑재된 CCD 카메라로부터의 영상신호를 처리하여 모니터에 표시한다. CCD 카메라가 잡은 영상을 호스트 컴퓨터에 보내기 위해 TX/RX-VID-2450 무선영상 송신기가 사용되었다. 호스트 컴퓨터의 RS-232C는 RTCom RS-232C 무선모뎀을 통해 전달된 이동로봇의 정보를 수신하고 처리하여 이동로봇에 탑재된 제어기의 CPU에 무선으로 이동로봇 동작명령을 송신한다.

### 6. 결 론

본 연구를 통해 화력발전소 보일러 튜브 및 대형 유체수송관의 자동 결함 탐상을 위해 검사대상물의 모양에 따라 서로 다른 형태의 EMAT를 사용하는 두 가지 형태

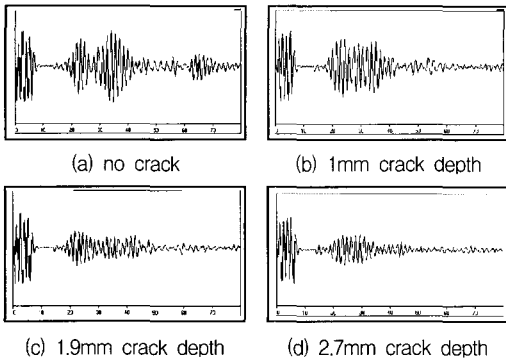


Fig. 17 The change of acoustic signals of EMAT with respect to crack depth for a 4mm diameter hole

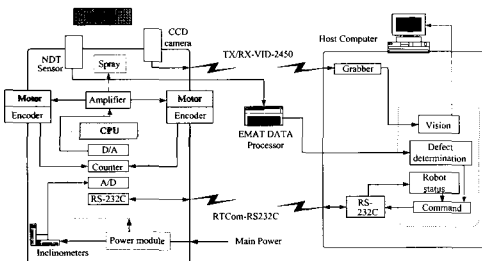


Fig. 18 The basic structure of the controller for crawlers

의 이동로봇 시스템을 개발하였다. 각각의 작업에 대해 서로 다른 이동로봇 구조 및 센서 탈착기구부를 개발하고 제작하였다.

### 참고문헌

- [1] Y. Bar-Cohen and P. G. Backes, "Scanning Aircraft Structures Using Open-Architecture Robotic Crawlers as Platforms with NDT Boards and Sensor," *Materials Evaluation* Vol. 57, No. 3, pp. 361-366, (1999)
- [2] M. Siegel, P. Gunatilake, and G. Podnar, "Robotic Assistants for Aircraft Inspector," *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, pp. 1-22, (1997)
- [3] Y. Bar-Cohen, "Mother-Crawler and Modular NDE-Boards for Robotics Scanning and Testing," *Proceedings of ASNT 98 Fall Conference, NDT Technology Track, Robotics and Miniaturization in NDT I*, Nashville, TN, Oct. 19-23, pp. 1-4, (1998)
- [4] H. Hosokai, F. Hara, Y. Uchida, Y. Abe, K. Tanaka, and Y. Tanaka, "Mechanism and Control of Mobile Pipeline Maintenance Robot with Lazy Tong Mechanism," *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 851-856, (1995)
- [5] S. Ryew and H. Choi, "Development of a Inpipe Inspection Robot," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 23, No. 12, pp. 2216-2225, (1999)
- [6] W. Yan, L. Shuliang, X. Dianguo, Z. Yanzheng, S. Hao, and G. Xueshan, "Development of Wall-Climbing Robots," *Proceedings of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Detroit, Michigan*, pp. 1207-1212, (1999)
- [7] T. Yano, T. Suwa, K. Sakurada, and M. Murakami, "Development of a Wall Climbing Robot II with Scanning Type Suction Cups," *Proceedings of 2nd ECPD Int. Conf. On Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, Vienna*, Sep. 26-28, pp. 368-373, (1996)