

표면파를 이용한 자동 초음파탐상검사 주사장치의 위치제어 기술

Position Control Technique of Ultrasonic Scanner for an Automated Ultrasonic Testing Using Surface Wave

이종포*[†], 박철훈*, 엄병국*

Jong Po Lee*[†], Chul Hoon Park* and Byong Guk Um*

초 록 수동 초음파검사를 자동검사로 대체하기 위해서는 탐촉자의 위치정보를 정확하게 제어할 수 있는 주사장치가 필수적이다. 위치정보를 알기 위하여 기존의 모터제어 주사장치에서는 엔코더를 사용하고 있으며 엔코더는 여러 가지 측면에서 많은 장점을 가지고 있으나 주사 중에 미끄러짐(slip)이 발생하면 엔코더 위치정보의 정확도에 많은 오차가 포함되게 된다. 따라서, 미끄러짐이 있는 경우의 위치정보는 무의미하게 되며, 자동 초음파검사의 신뢰도는 큰 문제가 된다. 그러므로 미끄러짐을 피해야 하나 현재는 이를 완전히 해결하는 방법은 없는 상태이다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하고 엔코더를 대체할 수 있는 새로운 개념의 초음파검사 자동 주사장치의 위치 제어기술을 제안하고 이 방법이 실제 사용가능함을 확인하였다. 즉, 주사하고자 하는 직선 영역에 송신용 표면파 탐촉자를 부착하고 주사장치에 부착된 수신용 탐촉자에서 표면파를 수신하여 현재의 주사장치의 위치를 계산하고 이를 바탕으로 주사하고자 하는 거리만큼의 주사장치의 이동을 제어할 수 있다.

주요용어 : 위치제어, 초음파, 표면파, 주사장치, 자동초음파검사, 자동주사장치

Abstract In order to replace the manual ultrasonic testing(UT) with an automated UT(AUT), a scanner which enables us to control the positions of a transducer is essential. Encoders have been commonly used to obtain the position information from the conventional scanners controlled by motor. Encoders have various advantages in many aspects. However, if the slip of motor wheel occurs during scanning, various errors are involved in the position accuracy. Thus, the position information of encoders becomes meaningless in case of slip. The reliability of AUT results may become serious problem. Hence, slip must be avoided, but it can not be completely avoided at present time. In this paper, a new idea that surface wave is used to solve this problem and replace encoders has been proposed. It is shown that this idea can be employed in AUT scanner without encoders. That is, one transducer transmitting surface wave is fixed and the other transducer attached to the scanner receives UT signal. Then, computer calculates the present position of scanner based on the information given by surface wave. Thus, the movement of a scanner can be controlled by the amount of input based on the information obtained.

Keywords: position control, ultrasound, surface wave, scanner, automated ultrasonic testing, automatic scanner

1. 서론

초음파탐상검사 결과의 신뢰도를 높이고 검사 데이터를 보관하여 추후 검사결과와 비교검토 하기 위하여 수동검사를 자동검사로 많이 전환하고 있다[1]. 자동 초음파탐상검사의 핵심은 탐촉자를 자동으로 이송 제어할 수 있는 주사장치와 초음파검사 데이터를 자동으로 수집하고 처리하는 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어이다. 자동주사장치(scanner)에서 종래의 서보모터 혹은 스테핑모터의 위치제어는 엔코더로부터 위치정보(실제는 모터의 회전정보)를 받아서 위치 오차를 0으로 만드는 것이다. 그러나, 모터바퀴의 미끄러짐이 생기면 엔코더의 위치정보는 더 이상 신뢰할 수 없으며, 그 에러는 계속 누적되어 검사결과를 신뢰할 수 없게 된다. 이러한 미끄러짐을 막기 위해 가이드 트랙 등을 추가로 설치하여, 모터바퀴가 트랙 위를 주행하게 한다. 결국, 엔코더를 이용한 모터의 위치제어는 그대로 사용하지만 별도의 트랙이 사용되기 때문에 일부 좁은 장소에서의 사용은 제한될 수도 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 다각적인 방법이 연구되고 있으나, 아직 신뢰할 만한 방법이 개발되어 있지 못하다. 즉, 엔코더는 미끄러짐에 의한 오차가 없다면 여러 가지 측면에서 주사장치의 위치정보를 얻는 좋은 수단이 된다. 하지만 미끄러짐을 근본적으로 방지할 방법은 아직은 없는 상태이다[2,3].

본 논문에서는 이와 같은 미끄러짐에 의한 엔코더의 위치제어 방법을 대체할 수 있는 새로운 기술을 제안하고 이 기술이 자동 초음파검사 주사장치 위치제어에 사용할 수 있음을 보이고자 한다.

이 방법은 송신용 탐촉자를 타겟 지점에 부착하고 주사장치에 부착된 수신용 탐촉자에서 표면파를 수신함으로써 주사장치의 현재의 위치를 스스로 파악하고 검사자가 원하는 이동거리를 입력하면, 입력된 주사거리 만큼의 거리를 자동으로 이동하게 함으로써 주사장치의 위치를 제어할 수 있게 하는 기술이다. 이를 구현하기 위하여 표면파신호를 수집하고 처리하는 시스템 하드웨어를 설계 제작하였으며 표면파를 이용하여 주사장치를 제어하기 위한 소프트웨어를 만들었다. 엔코더가 없는 주사장치의 전자제어부와 기계구동부를 설계 제작하여 주사장치의 위치제어가 가능하며 그 정확도가 사용가능 범위이내 인지를 검증하였다. 그렇게 함으로써 엔코더의 슬립에

의한 오차를 근원적으로 해결할 수 있을 뿐만 아니라 엔코더에서 일어날 수 있는 미끄러짐에 의한 오차를 알아내기 위한 방법과 엔코더를 대체하는 기술 등 다양한 분야에서 본 기술을 활용할 수 있을 것이다.

2. 시스템 하드웨어 및 소프트웨어 구성

2.1. 표면파를 이용한 로봇의 위치제어 원리

Fig. 1에서 고정된 송신 탐촉자와 주사장치에 부착된 이동 수신 탐촉자 사이의 거리는 두 탐촉자 간의 표면파 전달시간에 비례하므로 주사장치의 위치는 표면파를 수신하여 표면파 전달시간을 계산하면 현재의 주사장치 위치를 알 수 있다. 뿐만 아니라 이를 바탕으로 원하는 거리만큼의 주사장치 이동거리를 제어할 수 있게 된다. 즉, 엔코더 대신 표면파 정보로부터 얻은 위치 정보를 이용하여 모터의 위치제어를 구현할 수 있게 된다.

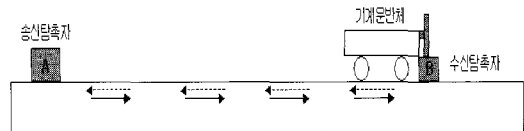


Fig. 1 Position control using surface wave

이와 같이 모터바퀴의 미끄러짐 때문에 엔코더를 쓸 수 없는 경우, 위치정보를 표면파 정보로부터 얻어 이를 활용하면 엔코더를 대신할 수 있다. 이를 위하여 초음파를 발생시키고 이를 수신하여 컴퓨터와의 인터페이스를 구현하기 위한 2조(송수신용)의 탐촉자와 초음파 보드가 필요하다. 초음파 보드에 송수신용 탐촉자를 연결하면 컴퓨터의 프로그램으로부터 신호를 확인할 수 있다. 기계운반체는 컴퓨터와의 인터페이스 카드로 연결되어 탐촉자로부터 얻어진 초음파의 위치정보를 이용한 위치제어가 가능하다. Fig. 2는 본 시스템의 작동 개념을 보여주고 있다.

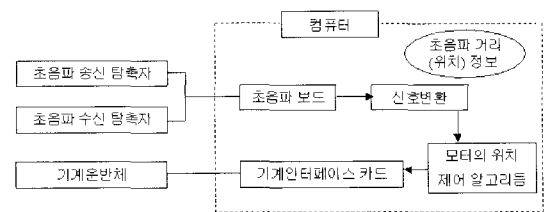


Fig. 2 Schematic diagram of a conceptual system

2.2. 표면파 신호처리 시스템의 하드웨어 구성

본 초음파 신호수집 시스템의 목적은 일반적인 초음파 검사가 아니다. 일반적으로, 초음파 검사 시스템은 Fig. 3에서와 같이 엔코더로부터 위치정보를 수집하고 검사를 행한다. Fig. 4는 표면파(초음파) 정보로부터 특정 포인트와의 거리정보를 얻어 스캐너를 제어하기 위한 표면파 신호수집 시스템이다.

컴퓨터에는 표면파 신호처리보드와 스캐너 인터페이스 보드를 장착했다. 표면파 신호처리 보드는 1 프레임(4kbyte/1채널)의 표면파 신호를 컴퓨터의 CPU에 보내고, 컴퓨터는 이로부터 위치정보를 연산한다. 스캐너 인터페이스 보드는 컴퓨터의 명령을 스캐너에 전송하고, 스캐너의 상태를 받는데 이용한다. 여기서, 스캐너는 3축 모터제어회로와 전원 증폭회로 및 CPU를 갖고 있는 독립된 개체이다. 따라서 스캐너 인터페이스 보드는 두 독립된 개체(CPU)들 사이의 정보 가교(Bridge)이다. Fig. 4는 스캐너 인터페이스보드와 초음파 보드가 장착된 Pentium III 800 MHz PC를 나타내고 있다.

2.2.1. 초음파 보드(UT Board)

로봇이 이동하면서 일정한 펄스를 초음파 신호처리 시스템으로 보내게 되면 로봇 인터페이스 카드는 인터럽트를 발생한다. 인터럽트 발생과 동시에 초음파 보드는 1 프레임(4 kbyte/1 채널)의 초음파 신호를 중앙처리장치에 보내고, 중앙처리장치는 이를 실시간으로 HDD에 저장된다. 이때, 신호처리 시스템에서 중요한 역할을 하는 것이 Fig. 5에 나타난 초음파 보드이다. 현재, 원전 검사에 많이 사용되고 있는 상용의 초음파 보드와 성능이 상응하는 초음파 보드를 제작하였다. 본 시스템의 데이터 수집을 위한 초음파 보드는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- Adjustable Digitization Rate(Selectable of 1, 2, 5, 10, 25, 50 MSPS)
- 8 kbytes Sample Memory Divided Between the Two Channels
- External RF Input Available: Voltage Range +/- 0.5 Volts
- Dynamic Range: 40 dB
- Maximum Number of Operator Selected Points: 16
- Maximum Sample Range Size: 4 kbytes per Channel

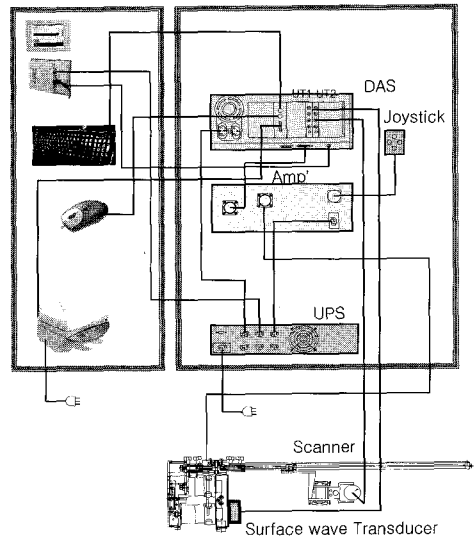


Fig. 3 Typical UT scanner system

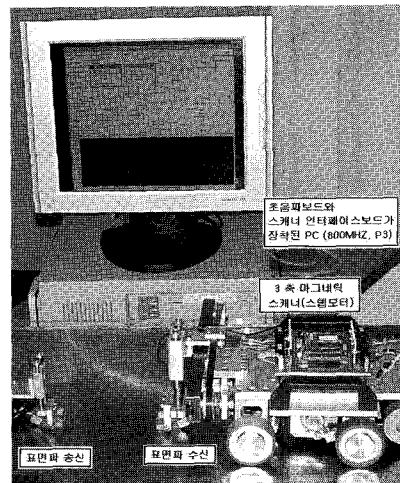


Fig. 4 Data acquisition system for surface wave

- Adjustable Pulse Amplitude: 50 to 400 V
- Square Wave Adjustable Pulse Width: 80 ns to 1 ms in 20 ns Steps
- Damping: 50, 100, 200, 400 Ohms
- Frequency Response: 0.5 to 30 MHz
- Gain Range: 0 to 98 dB, 0.5 dB Increments
- Low-Pass Filters: One Pole (5 and 10 MHz)

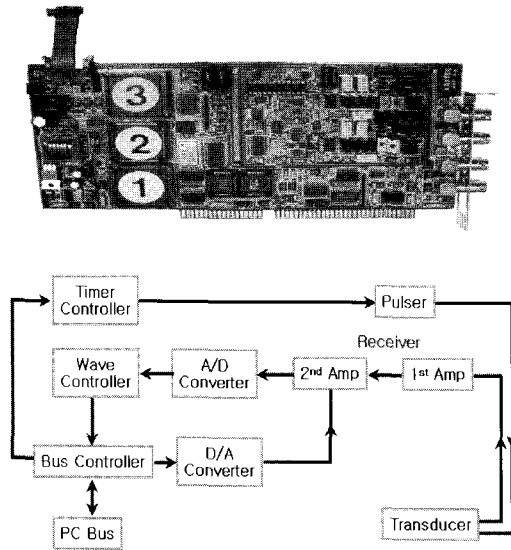


Fig. 5 Ultrasonic pulser-receiver board

은 “전/후진”, “좌/우회전”, “시작”, “정지” 등의 동작 명령어와 기계운반체의 상태정보 등이다.

- 차분 입력회로(U7-75176)를 채택하여 컴퓨터와 스캐너사이의 동기식 정보교환을 수행한다. 스캐너에 붙어있는 비파괴검사용 초음파 탐촉자의 트리거를 위하여, 스캐너는 스캔축의 일정거리 간격으로 펄스신호를 발생한다. 컴퓨터는 이 펄스신호를 실시간으로 받아야 한다. 차분 입력신호는 RS485의 반이중 방식과 같은 형태의 신호이므로 2 라인만 사용한다. 2 라인의 차분 입력신호는 75176 칩을 거쳐 인터럽트소스(74HC74)로 동작되고, 이 인터럽트는 비파괴 검사용 초음파 보드의 1 프레임 신호용 동기신호가 된다. 결국 스캐너의 스캔축 모터에서 발생하는 트리거신호는 컴퓨터를 거쳐 초음파 보드에서 1 프레임의 초음파 정보를 얻도록 하는 일련의 실시간 경로(Real Time Path)를 형성한다.

2.2.2. 기계운반체 인터페이스 보드

기계운반체도 CPU (Intel 8052 - 8 비트)를 갖고 있으므로, 구동은 자체 CPU가 제어한다. 컴퓨터는 표면과 정보로부터 위치 정보를 연산하여 스캐너에 동작명령을 내리고, 스캐너의 상태정보를 받으면 충분하다. 이를 위해서 두 CPU사이의 정보교환은 RS232/ RS485 비동기식 직렬통신을 이용하여 수행한다.

표면과(기계운반체의 인덱스축을 구동시킨다)와는 별개로 기계운반체에 초음파 탐촉자를 탑재하여, 구조물의 건전성 평가를 할 경우, 스캐너의 스캔축 방향에 대한 실시간 위치정보가 있어야 한다. 이를 실시간으로 받아 처리하기 위해 동기식 차분 입력회로(U7-75176)를 채택하였다.

Fig. 6에서 나타내고 있는 기계운반체 인터페이스 보드는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- RS485 직렬통신(U4-MAX232) 방식을 채택하여 컴퓨터와 기계운반체사이의 비동기식 정보교환을 수행한다. RS485 직렬통신은 1.2 km까지 신호의 특성이 유지되는 통신방법이며, 멀티드롭이 가능하므로, 향후 다수의 컴퓨터 및 기계운반체의 접속도 가능하다. 여기서는, 반이중(Half Duplex)방식으로 통신을 수행하므로 2 라인만 사용한다. 비동기식 정보교환(실시간으로 통신할 필요가 없다)의 내용

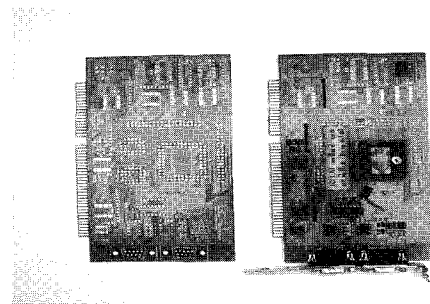


Fig. 6 Interface card

2.3. 초음파(표면파)를 이용한 위치제어 시스템의 소프트웨어 구성

표면파(초음파) 정보로부터 위치정보를 연산해내고, 이를 모터의 피드백신호로 사용하여 모터의 엔코더를 대신하고자 함이다. 그러므로 기존의 초음파보드용 드라이버대신 “표면파 신호수집을 위한 초음파보드용 드라이버”를 개발하였고, 아울러 기계구동부 인터페이스보드를 위해 “직렬통신용 드라이버”, “트리거 동기신호용 드라이버”를 개발하였다.

초음파보드와 스캐너 인터페이스보드는 각각 독립된 인터럽트를 발생시킨다. 초음파보드는 IRQ 12번을 사용하고, 트리거 동기신호 입력회로는

IRQ 5번, 직렬통신은 IRQ 4번을 사용한다. 이중 초음파보드와 트리거 동기신호 입력회로의 신호처리는 실시간 처리를 필요로 하므로, 다중 신호처리 및 실시간 처리 OS인 Lynx OS (Ver 3.02)를 선택하였고, 드라이버 역시 이 OS에 맞게 개발하였다. 세 드라이버 모두 독립된 인터럽트 핸들러를 갖고 있다.

2.3.1. 초음파 보드용 드라이버 프로그램

초음파보드는 외부의 하드웨어 트리거에 의해 탐촉자 여기전압 (최대 -400볼트)을 발생시키는 방법과, 내부 소프트웨어 트리거에 의해 여기전압을 발생시키는 두 가지 방법이 있다. 여기서는 기계구동부 인터페이스보드에 의해 동기 신호를 실시간으로 받으므로 내부 소프트웨어 트리거방식을 사용하였다. 이 방식은 기계구동부에서 펄스를 발생한 후, 초음파보드에서 탐촉자 여기전압이 발생할 때까지 시간지연이 발생한다. 하지만 실시간 및 동기식이므로 시간지연은 거의 일정하게 되므로 상수 처리하여 보정하였다.

2.3.2. 직렬 통신용 드라이버 프로그램

스캐너 인터페이스보드의 기능에서 스캐너 구동과 관련하여 스캐너에 동작명령을 내리고, 스캐너의 상태정보를 받기 위한 직렬통신용 드라이버에 대해 설명한다.

대부분의 컴퓨터에는 12V로 구동되는 RS232 직렬통신 포트가 있다. RS232 통신은 12 m 정도까지만 신호를 신뢰할 수 있다. 우리는 원격에서 스캐너를 구동시키기 위해, RS232 신호를 1.2 km까지 신호를 신뢰할 수 있는 RS485로 변환하여 사용한다. 인터럽트 회로는 컴퓨터 내부의 RS232 하드웨어 인터럽트를 사용하므로 스캐너 인터페이스보드에서는 따로 만들 필요가 없다.

스캐너와의 비동기식 정보교환을 수행할 때, 폴링방식의 드라이빙은 CPU의 Idle시간이 생기고, 태스크가 길 경우 정보손실이 생길 수 있다. 이를 방지하기 위해 통신용 드라이버에 직렬통신용 인터럽트 핸들러를 만들었다.

스캐너는 6가지 구동 모드가 있다. 인텍스축의 구동 명령어, 즉 스캐너 자체의 구동 명령어는 전

진(FWARD), 후진(BWARD), 우회전(CW), 좌회전(CCW)의 4가지를 만들었고, 스캔축의 구동 명령어 (이때 스캐너는 정지 상태이다)는 좌(XLEFT), 우(XRGHT)의 2가지를 만들었다.

전진량, 후진량, 좌진행량, 우진행량과 우회전각도, 좌회전각도는 위 파일구조에서 count 항목의 값으로 결정된다. (전/후진의 경우 100 count 에 10 cm 진행한다)

스텝모터는 펄스열의 주기가 모터의 속도에 대응한다. 위 파일구조에서 lop과 hip 항목은 변수명이며, lop항목은 펄스 하단의 폭을 의미하며, hip항목은 펄스 상단의 폭을 의미한다. 결국 lop항목과 hip항목을 합한 값은 스캐너의 속도를 결정하는 값이 된다. 그러므로 명령어 파일의 각 펄드내용은 스캐너가 한가지 동작을 하는 필요 충분조건을 포함하고 있다. 스캐너 제어 프로그램에서는 명령어 파일의 각 펄드내용을 아래와 같이 스캐너 구동코드로 변환하여 드라이버에 넘겨주고, 드라이버는 이를 스캐너에 통신라인을 통해 전송한다.

2.3.3. 위치제어를 위한 표면파 보정 프로그램

이 보정 프로그램은 기계운반체의 위치제어를 위해 사용되는 표면파 탐촉자의 신호응답을 적절한 감도로 조정하는데 사용한다. 탐촉자를 기계운반체가 거동할 재질과 같은 Standard block 위에 놓고, 반사신호에서 신호응답을 관찰한다. 표면파는 기계운반체가 움직인 거리만큼의 신호응답이 나타날 때까지 조절하여 음속을 측정하여 프로그램에 입력하면 Fig. 7의 화면에서와 같이 기계운반체가 움직일 때의 신호응답을 관찰할 수 있다. 여기서 A지점에서 발생하는 예코는 탐촉자간의 거리가 멀어질수록 B지점에서 신호예코가 발생한다(Fig. 7에서 A와 B는 편의상 중첩시켜 나타난 것임). UT Calibration에서 Yaongi FwBw와 Yaongi Adjust의 메뉴를 클릭하면 Fig. 8과 같은 새 메뉴창이 활성화한다. 이러한 메뉴들은 선택된 메뉴의 상단에 수평점선을 클릭함으로써 새 윈도우로 전환할 수 있다. 이것은 "Tear Off Menu"이다. 이 윈도우는 다른 윈도우와 같이 조작되어질 수 있는 독립적인 윈도우라 할 수 있다. 이 메뉴에서는 로봇의 방향과 거리를 일정하게 움직이면서 표면파의 음속을 적절히 조절하면서 정확한 거리정보를 얻을 수 있다.

2차 임계각은 다음과 같이 스넬의 법칙을 이용하여 구할 수 있다. 즉, $\sin\beta = \sin 90^\circ = 1$ (표면파굴절각) 이므로

$$\sin\alpha = \frac{V_1}{V_2} \dots\dots\dots (2)$$

α 는 매질 내에 표면파가 발생하도록 하는 입사각이다.

3.2. 표면파 탐촉자 및 웨지

표면파를 전달시키기 위한 웨지와 매질사이의 접촉매질을 물을 사용하고, 탐촉자와 구조물 사이에 검사로봇이 전후진시 연속적으로 분사하게 된다. Fig. 11은 본 실험에서 사용된 웨지의 가공도면이고, Table. 1에서 탐촉자와 웨지의 사양을 설명하고 있다.

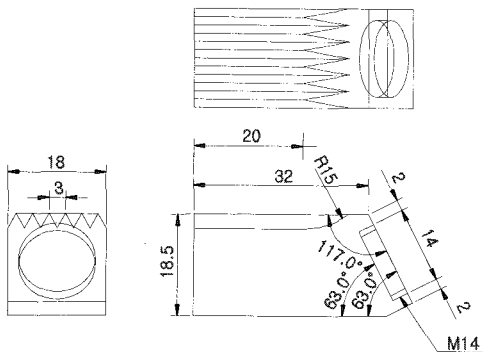


Fig. 11 Wedge form for surface wave

Table 1 Specification of surface wave transducer

구분	설명
Freq.	1.5MHz (0.48%)
Element	Dia 3/8" LZT ceramic
Wedge mat.	Lucite (Physical Acous. Co.)
Incidence angle	65°
Refracted angle	89°

3.3. 탐촉자 위치 측정

Fig. 9은 표면파를 이용하여 로봇의 위치를 정확히 산출하기 위해 개발된 초음파 검사 블록과 평판 주행용 로봇 V2이다. 기존의 엔코더를 사용하면 미

끄러짐을 방지하기 위한 장치(가이드 트랙)가 필요한데 발전소의 구조물 여건상 이를 사용할 수 없게 되어 초음파를 이용하여 엔코더를 대체하였다. 먼저, 기계운반체의 거리정보를 위한 송신 탐촉자를 필요한 거리에 고정하고 기계운반체에 수신용 탐촉자를 설치하여 이동하면서 거리정보로부터 모터를 제어하고, 그 실측값은 Table 2 및 Table 3에 명시하였다.

Table 2 Measured velocity using surface wave

No.	실측거리(S)	전파시간(T)	측정음속
1	50 mm	16.8 μ s	2970 m/s
2	100 mm	33.6 μ s	
3	150 mm	50.4 μ s	
4	200 mm	67.4 μ s	
5	250 mm	84.2 μ s	
6	300 mm	100.9 μ s	
7	350 mm	117.8 μ s	
8	400 mm	134.7 μ s	
9	450 mm	151.5 μ s	
10	500 mm	168.3 μ s	

Table 3 Measured error for position control

No.	이동거리 (mm)	입력거리 (mm)	오차 (mm)	최대 오차 (mm)
1	50.1	50	0.1	0.2
2	100.1	100	0.1	
3	149.9	150	0.1	
4	200.1	200	0.1	
5	250.2	250	0.2	
6	300.1	300	0.1	
7	349.9	350	0.1	
8	402.2	400	0.2	
9	450.1	450	0.1	
10	499.9	500	0.1	

4. 결과 및 고찰

실측 실험은 Fig. 1과 2의 개념도에서 최초의 절대위치를 A로 정하고(0점) 매 5 cm간격으로 50 cm까지의 거리측정을 하였고, (B, C, ...) 음속은 소수점이하자리는 절삭하였다. 측정된 음속은 2970m/s로 확인되었고 이 값을 프로그램에 입력하였다. 평판 스캐너가 구동하여 실측값과의 오차는 0.2mm 였다. 또한, 표면파는 구조물의 표면에 따라 진행하기 때문에 표면거칠기가 거리측정에 큰 영향을 미칠수 있으나, 원전에서 검사를 위한 표면거칠기를 고려하여 동일한 조건에서 실험한 결과 S/N 비는 크게 떨어지지 않았다.

5. 결론

자동 초음파검사에서 탐촉자의 위치정보를 얻기 위해 사용하는 엔코더는 모터 바퀴의 미끄러짐이 발생하면 많은 오차가 생긴다. 이를 해결하기 위해 엔코더 대신 표면파를 이용하여 주사장치의 위치를 제어하고 위치정보를 얻는 방법을 구현하였다. 즉, 주사하고자 하는 직선 영역에 송신용 표면파 탐촉자를 부착하고 주사장치에 부착된 수신용 탐촉자에서 표면파를 수신함으로써 현재의 주사장치의 위치를 알 수 있을 뿐만 아니라 주사하고자 하는 거리만큼의 주사장치의 이동을 제어할 수 있게 하였다. 이를 가능하게 하기 위하여 주사장치를 설계 제작하고 표면파를 송수신하여 주사장치의 위치정보를 얻게하고 주사장치를 제어하는 시스템을 제작하였다. 설계/제작된 시스템으로 엔코더 없이 주사장치를 정확하게 제어할 수 있는 지를 실험한 결과 위치정보의 오차는 0.2mm 이내로 위치제어가 가능함을 확인하였다. 즉, 이 기술은 엔코더 대응으로 또는 모터바퀴의 미끄러짐에 의한 오차 문제를 해결하기 위한 대안으로 사용이 가능하리라 판단된다.

참고문헌

- [1] A. S. Birks, R. E. Green, Jr. and P. McIntire, "Nondestructive Testing Handbook, Vol. 7 Ultrasonic Testing," American Society for Nondestructive Testing, Second Ed. (1991)
- [2] "Automated Ultrasonic Weld Inspection, International Institute Welding Document," VC 460, Fifth Draft (1987)
- [3] T. Timura, S. Wadaka and H. Tanaka, "Analysis of echoes in ultrasonic testing for round bar using angle beam immersion technique," Review of Progress in QNDE, Vol. 20 (2001)
- [4] S. S. Kuo, "Computer Applications of Numerical method," Addison-Wesley, pp. 253-273 (1972)
- [5] D. J. Hatley, "Strategies for Real-Time System Specification," Dorset House (1987)
- [6] E. Papadakis, "Physical Acoustics," Vol. 24, "Ultrasonic Instruments & Devices II," A-P (1998)
- [7] P. M. Embree, "C Algorithms for Real-Time DSP," Prentice Hall (1995)
- [8] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, "Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications," Third Edition, Prentice Hall, Inc. (1996)
- [9] Lynx OS User's Guide, Lynx OS Version 2.5, Lynx Real-Time Systems, Inc. (1997)
- [10] ELOG Library Programmer's Guide, Lynx OS Version 2.5, Lynx Real-Time Systems, Inc. (1997)