

## 컴퓨터제어에 의한 자동초음파 탐상장치에 관한 연구

허 형 · 박치승 · 홍순신 · 박종현

(한국에너지연구소 비파괴시험연구실)

### A study on Computer-controlled Ultrasonic Scanning Device

H. Huh, C. S. Park and S. S. Hong, J. H. Park

**Abstract** Since the nuclear power plants in Korea have been operated in 1979, the nondestructive testing (NDT) of pressure vessels and/or piping welds plays an important role for maintaining the safety and integrity of the plants. Ultrasonic method is superior to the other NDT method in the viewpoint of the detectability of small flaw and accuracy to determine the locations, sizes, orientations, and shapes. As the service time of the nuclear power plants is increased, the radiation level from the components is getting higher. In order to get more quantitative and reliable results and secure the inspector from the exposure to high radiation level, automation of the ultrasonic equipments has been one of the important research and development(R & D) subject. In this research, it was attempted to visualize the shape of flaws presented inside the specimen using a Modified C-Scan technique. In order to develop Modified C-Scan technique, an automatic ultrasonic scanner and a module to control the scanner were designed and fabricated. IBM-PC/XT was interfaced to the module to control the scanner. Analog signals from the SONIC MARK II were digitized by Analog-Digital Converter(ADC 0800) for Modified C-Scan display. A computer program has been developed and has capability of automatic data acquisition and processing from the digital data, which consist of maximum amplitudes in each gate range and locations. The data from Modified C-Scan results was compared with shape from artificial defects using the developed system. Focal length of focused transducer was measured. The automatic ultrasonic equipment developed through this study is essential for more accurate, reliable, and repeatable ultrasonic experiments. If the scanner are modified to meet to appropriate purposes, it can be applied to automation of ultrasonic examination of nuclear power plants and helpful to the research on ultrasonic characterization of the materials.

1. 서 론

한국에너지연구소는 미국 Southwest Research Institute(SwRI)에서 공급한 원자로 자동초음파 탐상장치인 PaR ISI-2를 보유하고 있으나, 이것은 원자로(Reactor Pressure Vessel : RPV)만을 자동초음파 검사하도록 고안된 장비로서, 앞으로 십여기의 원자력 발전소를 보유하게 될 우리나라의 실정을 감안할 때에 자동초음파 검사장비의 자체 개발에 대한 기반구축은 필수적이며, 시급한 과제이다. 이러한 배경으로, 원전 고방사능 지역에서의 초음파 검사시 고방사선 피폭으로부터 검사원의 안전을 도모하고, 나아가 기존의 단순한 결과 표시인 A, B, C-Scan보다 정량적이고, 신뢰성(Reliability) 및 재현성(Repeatability)이 우수한 자동초음파 탐상장치의 개발을 목표로, 장치 주요부를 설계·제작하였으며, 기존의 장비들과 연결하여 활용도를 확대하였다.

이러한 자동초음파 탐상장치의 개발을 위해 먼저 자동초음파 주사장치를 설계·제작하였다.<sup>(1,4,6)</sup> 즉 기능별 분류에 따른 장치 주요부분의 설계·제작을 통한 성능시험을 거쳐 장치 전체 시제품을 위한 설계도면을 완성했으며, 이를 국내 제작하도록 하였다. 시제품을 제작한 자동초음파 주사장치의 도면과 함께 이에 대한 자세한 설명은 2.2절에서 언급하였다. 또한 2.3, 4절에서는 본 자동초음파 주사장치를 원격 조작하기 위한 Step Motor Controller 및 Data Acquisition Interface Card의 설계 및 제작에 대해 기술하였으며, 특히 Step Motor의 속도 및 구동 신뢰성<sup>3)</sup>에 관하여 연구하였으며, 여러 구동회로에 대한 제어성향분석 및 Analog-Digital Conversion에 대해 연구하였다. 3절에서는 최종적으로 완성된 Module로부터 얻어진 Digital Data의 수집 및 처리의 자동화를 위한 Software 및 초음파 주사장치의 제어를 위한 Software에 대해 언급하였다.<sup>2,5)</sup>

지금까지 연구를 기초로 하여 향후 국내원자력발전소 가동전·중검사에 자동초음파 탐상장치가 활용될 수 있도록 그 목적에 맞는 초음파 주사장치를 개발하여 실용화에 이바지하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 컴퓨터제어에 의한 자동초음파탐상장치의 구성

본 연구에서는 초음파 탐촉자를 각 X, Y, Z축 방향으로 독립적으로 움직일 수 있게 설계·제작하였다. 또한 분해능과 정확도를 높이고, Feed back 회로없이 간편하게 위치제어를 할 수 있게 각축마다 Step Motor를 부착하여 동력원으로 사용하였고, 이를 구동 및 제어시키기 위한 구동회로(Translator & Driving Unit) 및 제어카드(Controller)를 설계·제작하였으며, 이를 IBM-PC/XT에 Interface하여 제어하였다.

초음파 신호처리장치(Data Acquisition)는 초음파 탐촉자를 고전압 펄스로 구동하여 초음파 펄스를 발생시켜 주는 초음파 발생기와 탐촉자의 출력신호를 증폭시키기 위한 광대역 주파수 특성의 증폭기 그리고 신호분석을 위한 게이트가 있으며, AD Converter(ADC 0800)를 사용하여 아날로그 신호를 디지털화 하였고, 그 획득된 데이터는 자체 개발된 프로그램에 의해 자동적으로 수집 및 처리되게 하였다.

또한 그 결과는 IBM-PC/XT 모니터에 영상처리되게 하였고, 보존을 위해 이 화면을 프린터로 출력할 수 있게 하였다.(Fig. 1)

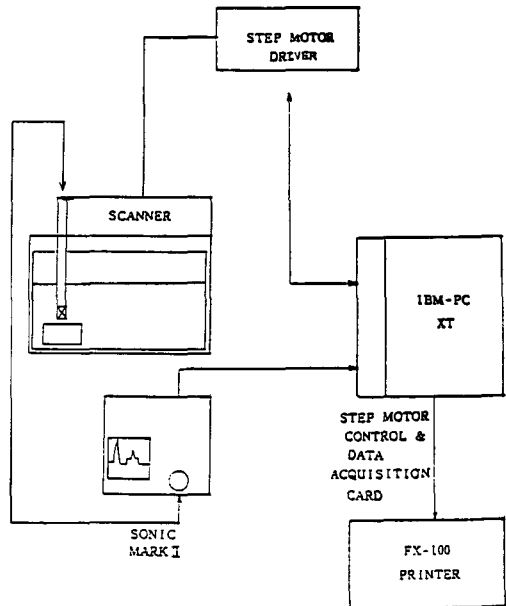


Fig. 1. Block diagram of the modified C-Scanner's measurement control system.

2.2 초음파 주사장치 설계

자동초음파탐상장치는 초음파주사장치, Step Motor 구동 및 제어장치(Driving Unit & Controller)와 초음파신호처리장치(Data Acquisition)로 크게 세부분으로 나눌 수 있다.

특히, 초음파주사장치는 동력발생부와 동력전달부로 구분할 수 있다. X-Y-Z의 3축 운동을 하는 초음파주사장치의 동력발생부는 3개의 Step Motor로 구성되어 있으며, 동력전달부는 Timing Belt(MXL Type : 0.08 inch)로 Step Motor에서 발생된 동력을 축끝에 부착된 풀리와 기어를 서로 연결시켜 동력을 전달시킨다. (감속비 = 1 : 5)

2.2.1 설계(Design)

초음파주사장치는 초음파탐촉자를 장착하고 검사체 표면위를 주어진 조건에 따라서 일정한 간격으로 정확하게 움직이도록 설계하였고, 각 X-Y-Z축을 독립적으로 움직일 수 있게 설계하였으며, 가능한 한 중량을 최소화 시키기 위해 듀랄루민 재질을 사용하였다. 또한,

각축의 중량 및 불평형에서 야기되는 마찰은 Step Motor 결정에 큰 영향을 주므로 마찰과 중량의 최소화 역점을 두어 설계하였다.

이 주사장치의 Resolution은 0.05mm로 설계했으며, 최대속도는 50mm/sec이내로 설계하였다.

2.2.2 중요부품

(1) Step Motor

Step Motor는 근래 각종 정밀기기에 많이 사용되고 있으며, 대부분 전원(AC, DC)에 직접 연결하여 사용하는 일반 모터와 달리 전자제어회로에 의해 동작을 하며, 특히 Feed back 없이 속도제어 및 정밀한 위치조정이 가능하다. 또한 정지시 일반모터에 비해 큰 정지토크를 가지고 있다.

Step Motor의 속도제어는 입력 전압의 크기를 가변해서 이루어지는 것이 아니라, 구동회로에서 발생하는 펄스 수와 폭에 의해 결정된다. 즉, Motor 속도는 입력주파수에 비례하며, 모터의 스태수에 반비례한다. Step Motor의 Step수는 그 모터의 분해기능을 결정

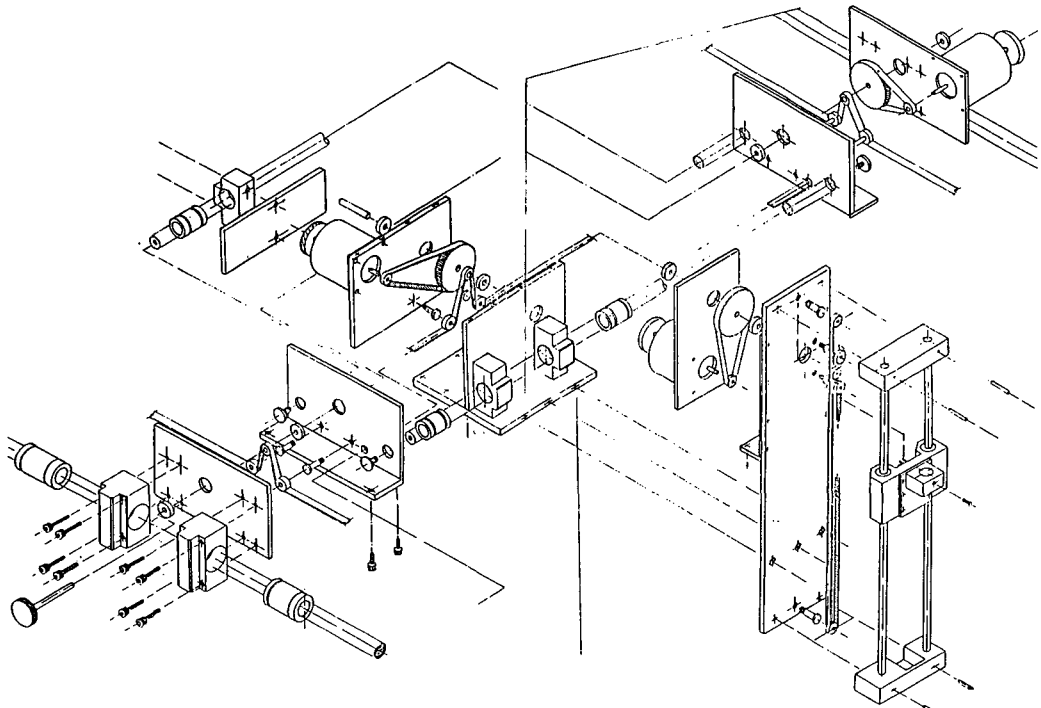


Fig. 2. Drawing of developed scanner.

하는 중요한 요소로서 Step S와 Rotor teeth T, 위상수 m, Step 각 a의 관계는  $S=360/a=MT$ 이다.

본 장치에서 사용한 Step Motor의 재원은 일본 ORIENTAL MOTOR사의 PH 268-01B로 Holding Torque는 7.2kg-cm이고, 한 Step의 각은 1.8°로서 총 Step수는 200이다.

(2) Timing Belt와 Pulley

Timing Belt는 미끄럼을 없애기 위해 접촉면에 치형을 붙여 맞물림에 의한 전동이 되도록 한 새로운 치붙임 동기 벨트이다. 재질은 꼬임강선을 코오드(Cord)로 한 치붙임 네오프렌(Neoprene)고무로서 치면측은 나일론 더크(Nylon Duck)로 보호하고 있는 수가 많다. 강선 Cord는 장력을 담당 유지하고 늘어남을 억제하고 있다.

이 Belt의 특징은 Slip과 Creep이 거의 없고, 속도 변화가 아주 적다. 그리고, 굽힘저항이 작으므로 작은 지름의 Pulley에 사용할 수 있고, 저속 및 고속에서 원활한 운전이 가능하며, 소음이 극히 적다.

2. 3 Step Motor Controller

2. 3. 1 Step motor 구동장치

step motor 구동신호를 위해서는 논리회로와 flip-flop에 의하여 신호를 얻을 수가 있으나 UCN4202와 같이 step motor 제어를 위한 전용 집적회로(Integrated Circuit)를 사용하면 간단하다.

UCN4202의 핀 배치도는 Fig. 3과 같다.

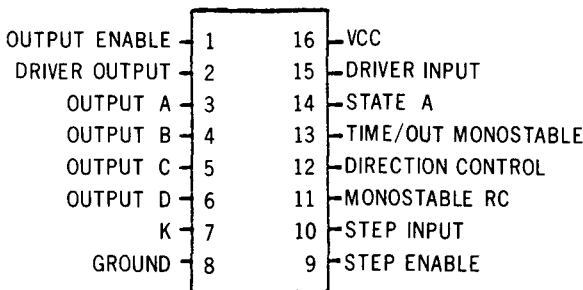


Fig. 3. Pin diagram of the UCN-4202A.

이는 구동전류가 0.5A까지의 step motor를 직접 구동할 수가 있다. Step motor를 구동하기 위해서는 step input신호가 1μs 이상의 logic low의 pulse를 가하면 된다. 이때 step motor는 positive-going edge에서 움직이게 된다. 여기서 DIRECTION CONTROL 신호는 출력의 순서를 A-B-C-D 또는 A-D-C-B로 결정하여 step motor의 회전방향을 결정하여 준다. NONOSTABLE 신호는 step motor를 double-step mode로 구동할 때 사용되어지고, full-step mode로 사용될 때는 MONOSTABLE RC(10번 핀)를 Vcc에 연결한다. Full-step mode timing chart는 Fig. 4와 같다.

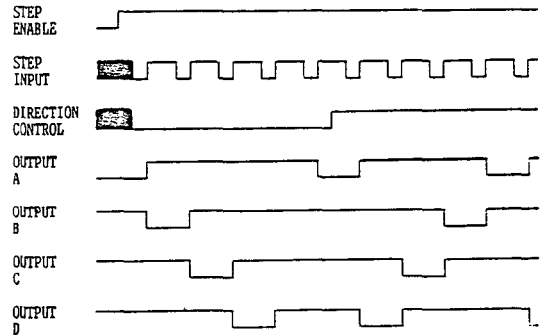


Fig. 4. Timing Chart of the (a) Full-step mode.

또한 입력 및 출력신호를 제어하는 ENABLE 입력 신호가 있는데, STEP ENABLE신호는 정논리로 logic high일 때에는 STEP INPUT에 의하여 출력신호가 변하고 logic low일 때에는 STEP INPUT신호가 있더라도 출력신호는 변하지 않는다. OUTPUT ENABLE신호는 부논리로 logic high일 때에는 Step motor에 전류를 차단하여 step motor가 구동되지 않고, logic low일 때에는 STEP INPUT 신호에 대응하여 step motor를 구동시키게 된다.

UCN4202의 출력으로 전류용량이 큰 step motor를 직접 구동하기에는 용량이 부족하여 Darlington TR을 사용하여 전류용량을 증가시키는 것이 바람직하다. 또한 여러개의 step motor를 하나의 제어장치를 사용하기 위해서는 step motor의 전원공급선은 별도로 선택적으로 공급하고 각 위상의 신호는 병렬로 묶어서

구동장치에 연결하면 된다. 또한 이 전원공급선은 relay 또는 TR을 사용하여 외부의 선택신호에 의하여 선택적으로 step motor를 구동할 수가 있다. 이의 회로도도 Fig. 5.에 나타나 있다.

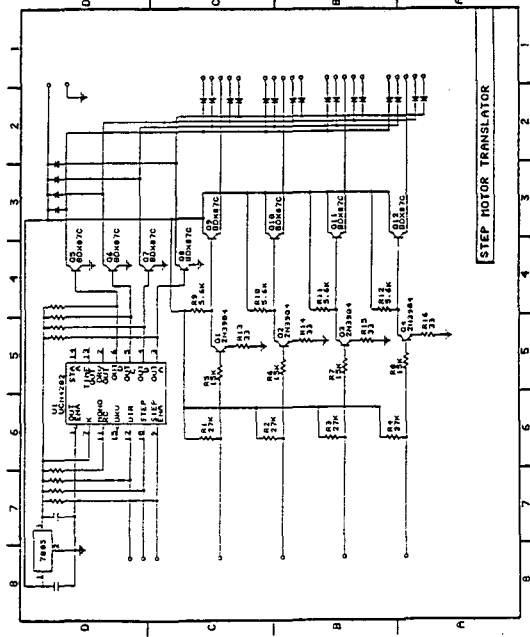


Fig. 5. Circuit diagram of the motor translator and driving unit with four step motors selection.

2.3.2 Step motor 제어 카드

Step motor를 제어하는 부위는 주위에서 많이 사용되는 16-bit personal computer IBM PC/XT를 사용하였다. Step motor 제어를 위한 기본적인 신호는 direction 및 pulse train이다. Pulse train의 pulse간격은 step motor의 속도를 조절할 수가 있으며 Pulse의 갯수는 step motor의 회전각을 제어할 수가 있다. 또한 부수적으로 구동영역의 경계부의 도달여부의 입력, step motor가 구동중인지 여부의 입력 등이 필요하다.

(1) IBM PC/XT Bus

IBM PC/XT에는 I/O 카드를 설치할 수 있는 slot가 있다. 이 slot에 연결되는 신호들은 data bus, address bus, interrupt, memory 및 I/O control, DMA, 전원 등이

연결된다. 이 확장 slot은 31 pin 양면 connector로 되어 있으며 그를 Fig. 6에 나타내었다.

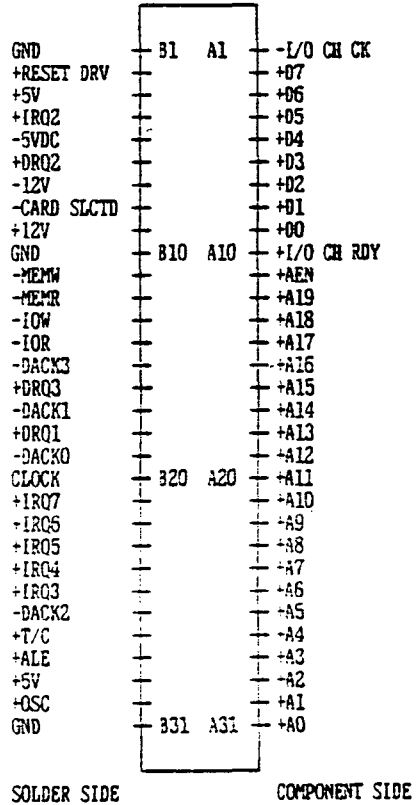


Fig. 6. Diagram of the IBM PC/XT I/O channel.

이들 중에서 step motor 제어에 사용한 단자들의 개략적인 기능은 다음과 같다. 이들의 단자는 74LS245를 사용하여 IBM의 8088의 신호를 buffer 시켜서 computer내의 신호에 영향을 주지 않도록 하였다.

(2) 8254 Programmable interval timer

Step motor 구동용 pulse train의 발생을 위하여 Intel사의 8254 programmable interval timer를 사용하였다. 이는 독립적인 3개의 16bit counter로 구성되어 있는데 이들은 binary 및 BCD mode의 counter로 사용될 수가 있다. 이의 pin 배치도는 Fig. 7과 같다.

이 8254는 Intel계의 microcomputer에 사용하기 적합하게 되어 있고 IBM PC에서는 Intel 8088 또는

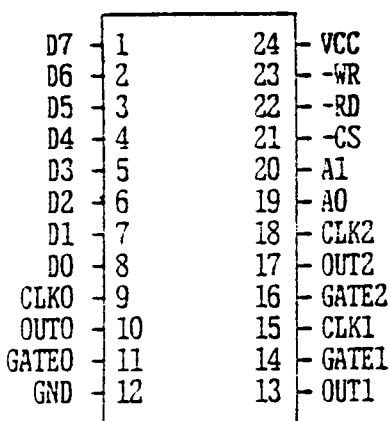


Fig. 7. Pin configuration of the Intel 8254.

80286등의 Intel사의 microprocessor를 CPU로 사용하므로 IBM PC에서의 8254의 사용이 용이하다.

8254의 동작 mode는 software에 의하여 program될 수가 있고 이 mode들은 mode 0부터 mode 5까지 모두 6가지가 있다. 이들 각각의 mode는 다음과 같다.

- 1) Mode 0 - Interrupt on terminal count
- 2) Mode 1 - hardware retriggerable one-shot
- 3) Mode 2 - Rate Generator
- 4) Mode 3 - Square wave mode
- 5) Mode 4 - Software Triggered strobe
- 6) Mode 5 - Hardware Triggered strobe(Re-triggerable)

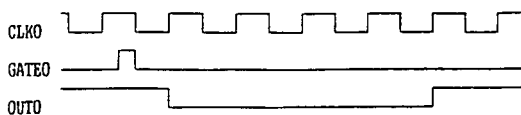


Fig. 8. Timing chart of the mode 1.

### 2.4 Data Acquisition

또한 이 step motor control board는 초음파 주사장치를 제어하는데 사용하므로 초음파 탐상신호를 입력시키도록 하였다. 초음파탐상기에서 얻을 수 있는 신호는 analog 신호이므로 이를 computer에서 사용하기 위하여 ADC 0800 A/D converter를 사용하였다.

Analog 신호의 영역은 -0.4V에서 2.5V까지이고 A/D converter의 입력영역은 -5V에서 +5V이므로 이를 맞추기 위하여 operational amplifier를 사용하여 증폭하였다. 또한 초음파 탐상기의 출력신호가 operational amplifier와 연결하였을 때에 impedance 때문에 전압이 변하므로 이를 방지하기 위하여 입력의 초단부에 voltage follower를 설치하였다.

ADC 0800 A/D converter의 변환시작 신호(Start Conversion)는 step motor의 구동끝을 나타내는 end of drv 신호를 이용하였고, 이 신호와 ADC 0800의 end of conversion 신호에 의해서 74 LS 74를 이용하여 A/D conversion 값의 유효를 나타내게 하였다. ADC 0800 A/D converter의 변환시간은 약 50 $\mu$ s 정도이므로 대개의 BASIC 언어에 의해서는 이 변환값을 즉시 읽어갈 수 있으나, FORTRAN, C, PASCAL, ASSEMBLER와 같이 처리속도가 빠른 언어의 경우는 A/D conversion 값의 유효여부를 판단하여 처리하여야 한다.

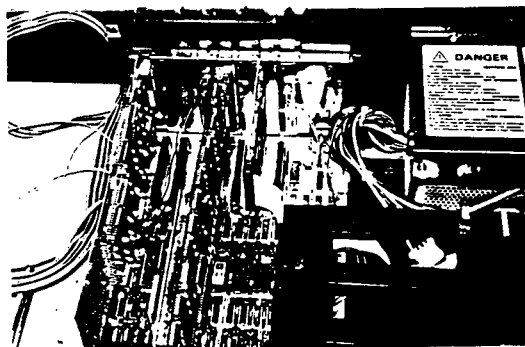


Photo. 1. View of step motor controller and data acquisition card.

### 3. 제어용 소프트웨어

제어용 소프트웨어는 TransEra사의 TBASIC Ver. 1.7를 이용하여 작성하였다. 이 언어는 subprogram과 graphic 기능이 우수하여 과학기술용 프로그램을 작성하는데 수월한 언어이다.

제어용 소프트웨어는 크게 1) 초기지 설정 2) step

Aspect ratio : 1  
 Echo factor : 1  
 Scan Area : 3 × 4cm  
 X Step : 0.1mm  
 Y Step : 0.2mm

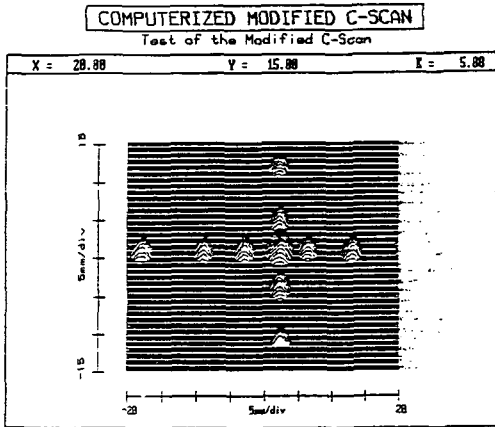


Fig. 11. Computerized modified C-Scan image 1 of Specimen #2

Aspect ratio : 1  
 Echo factor : 1  
 Scan Area : 3 × 4cm  
 X Step : 0.1mm  
 Y Step : 0.3mm

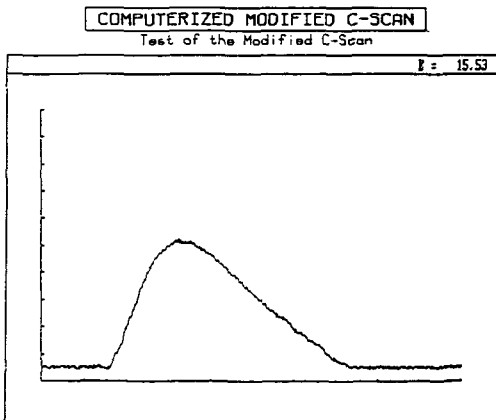


Fig. 12. Distance-amplitude curve(DAC) of focused transducer(5.0MHz).

Table 1은 실제의 인공결함 크기와 Modified C-Scan Image상에 나타난 결함 크기와 비교한 표로서, 그 결과는 실제크기에 근접됨을 알 수 있었다. 추후, 자연 결함(Natural Flaw)에 대한 비교·분석도 실시할 예정이다.

또한, Modified C-Scan System은 Amplitude 진폭의 분포를 쉽게 알 수 있어, 초음파 탐촉자, 초음파 대비 시험편의 교정 및 Focused 탐촉자의 초점길이(Focal Length) 측정(Fig. 12 참조)등에 다양하게 이용될 수 있음을 알 수 있고, 더 나아가 초음파 주사장치만을 실제용도에 맞게 설계·제작한다면 원자력발전소내의 압력용기 및 배관 용접부에 대한 자동초음파검사도 가능하다고 할 수 있다. 아울러 Remote Control과 Data 획득·수집 및 처리에 관한 Program도 개발하였다.

결 론

본 연구에서는 초음파 주사장치를 제작하고, 이를 자동화하였다. 이를 위하여, 초음파 주사장치와 Computer와의 연결을 위한 Interface Card를 설계·제작하여, 초음파 주사장치의 원격제어가 가능하게 되었다.

이 자동초음파 주사장치의 Resolution은 0.05mm이고, 최대속도는 25mm/sce이다.

이 자동초음파 탐상장치를 효율적으로 사용하기 위하여, 검사 Data의 수집 및 처리의 자동화를 이루었다. 이 System의 응용 예로, Modified C-Scan 및 수집용 탐촉자의 Distance-Amplitude Curve(DAC) 측정을 실시하였다. 그 결과 이 자동초음파 탐상장치는 다양한 방면에 응용 가능성이 밝혀졌다.

향후, Hardware 및 Software 보안을 통하여, B-Scan, 수집용 탐촉자 특성조사, 초음파 대비 시험편 및 탐촉자 교정등에 이용될 수 있다.

References

1. D. J. Chwirut : A simple Technique for visualizing transmitted or refracted sound fields, Materials Evaluation/December, 1979.
2. 이세경, 이재욱, 김영환 : 초음파 탐상시험의 자동화,

motor의 구동 3) 데이터 획득 및 처리부분으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 주사장치 활용의 대표적인 예로 modified C-scanning과 수침용 초음파 탐촉자의 거리에 따른 진폭특성(Distance-Amplitude Curve) 조사용 프로그램을 개발하였다.

이들 프로그램 수행의 flow chart는 다음과 같다.

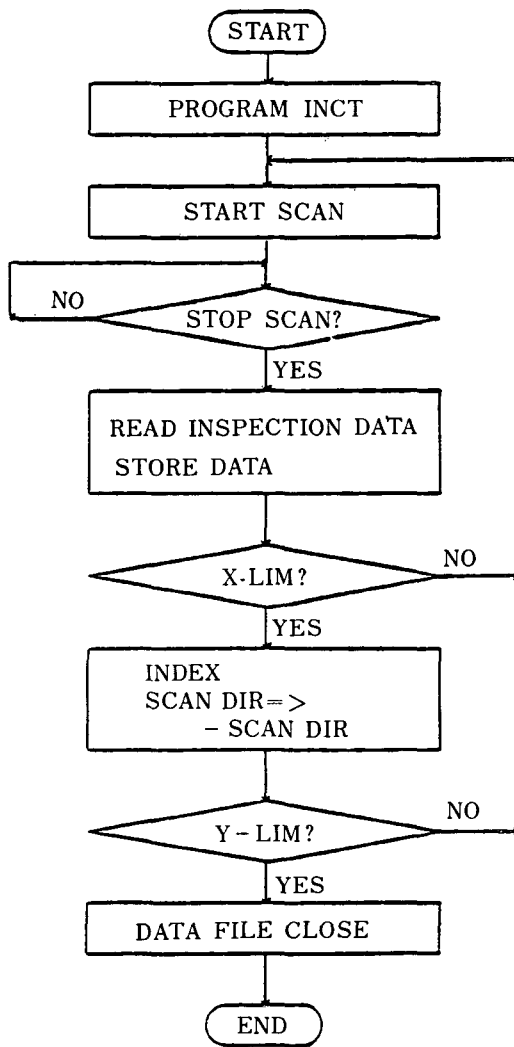


Fig. 9. Flow chart for modified C-Scanning program logic.

4. 연구결과 및 고찰

초음파 주사장치에 Step Motor를 부착하여 각 X-Y-Z 3축이 Feed-back 회로없이 정확한 위치제어가 가능하게 되었고, Step Motor 제어용 신호로부터 X, Y 좌표에 해당하는 Analog값을 얻고, 이것을 바로 Analog-Digital Conversion(ADC 0800)시켜 Digital Data를 획득할 수 있었다. 이 획득된 Digital Data를 이용하여 Modified C-Scan을 완성하였다.(Fig. 10, 11 참조) 인공결함(Artificial Flaw)이 내재된 각 시험편에 대한 완성된 Modified C-Scan Image내의 결함크기와 서로 비교·검토한 결과는 다음과 같다.

Table 1. Comparison of size measurements between artificial flaw and flaw presented modified C-Scan image

단위 : (mm)

시험편	실제 가공된 결함의 크기	Modified C-Scan Image로부터 측정된 결함의 크기
# 1	소 원 : 27	26
	중 원 : 20	21
	대 원 : 8	9
# 2	3	2.9

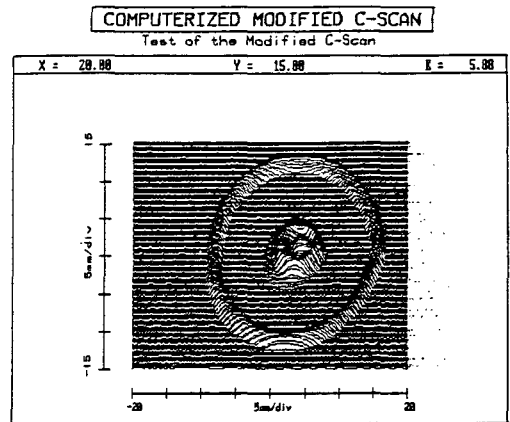


Fig. 10. Computerized modified C-Scan image 1 of Specimen #1



KSRI-IR-58.

3. T. Kenjo ; Stepping motors and their microprocessor Control, Oxford University Press, 1984.
4. J. M. Warren ; Inexpensive expansion of ultrasonic C-Scan Capabilities, Materials Evaluation/January, 1982.
5. J. L. Rose and G. H. Thomas ; Microprocessor utilization in ultrasonic nondestructive inspection systems, Material Evaluation/January, 1980.
6. M. Moghisi and D.P. Almond ; An inexpensive computer-controlled ultrasonic C-Scan system, NDT International/February, 1983.