

원전 탄소강배관의 두께측정을 위한 연속감시장치 개발 Development of On-Line Thickness Monitoring Equipment for Nuclear Carbon Steel Piping

이경수, 정일석, 홍승열

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소의 가동년수가 경과함에 따라 탄소강 배관의 두께가 감소하는 경향이 있다. 특히 일차계통 배관은 고온, 고압, 고방사선 환경에서 운전되므로 운전 중에는 접근이 불가능하여 기존의 휴대용 두께측정장비로는 운전중 두께를 감시할 수가 없다. 전력연구원은 운전중에도 배관의 두께를 연속적으로 원격에서 감시할 수 있는 방안의 하나로 연속 감속감시장치를 설계하고 현장 활용을 위한 시작품을 개발하였다. 본 논문에서는 초음파 연속 두께감시 원리와 장치의 설계 및 제작과정을 간략히 소개하였다.

Abstract

Thinning phenomena has been found in many nuclear carbon steel piping as the operation years increased. It is not possible to access to measure the piping thickness during power operation because of high radiation and high temperature. It needs remote monitoring equipment to monitor that piping thickness is above the design limit. Kepri designed and developed on-line remote monitoring equipment using personal computer and ultrasonic wave. Here we introduce the principle of thickness measurement by ultrasonic wave and design and manufacturing of the equipment.

1. 서 론

배관은 내부 유동유체의 성질에 따라 다양한 형태의 부식 및 감속현상을 일으킨다. 원자력발전소의 2차계통은 급수로 화학처리된 탈염수(demineralized water)를 사용하며 배관재질로는 주로 탄소강이 사용된다. 중수로원전에서는 일차계통에도 탄소강 배관이 사용되고 있으며 계통수로는 화학처리된 중수(D₂O)를 사용하고 있다. 이들 탄소강 배관 중 일부배관에서 유체가속부식(flow accelerated corrosion, FAC)에 의한 감속이 진행중인 것으로 확인되고 있으며 주요 영향 인자는 유체의 pH, 유속, 유량, 온도, 기포함량, 곡관형상, 재질내 크롬함량 등이다. 중수로원전에서는 특히 pH와 크롬함량의 영향이 지배적인 것으로 밝혀져 있다. 배관사용수명이 증가할수록 배관의 감속량은 증가하므로 오래된 배관일수록 배관의 두께가 설계허용두께 이상을 유지하고 있는지에 대한 확인 작업이 중요하다. 현재 사용되고 있는 두께측정방법은 휴대용 초음파두께측정장비로 발전소 운전정지기간을 이용하여 상온상태에서 두께를 측정하는 것으로서 운전중 두께감시는 고방사선 때문에 수행하기가 어렵다. 이를 해결하기 위해서 원격 초음파두께측정장비 개발에 대한 연구를 착수하였으며 개발 완료시에는 운전 중 배관두께감속에 대한 감시가 가능할 뿐만 아니라 운전변수변화가 배관감속율에 미치는 영향을 분석하는데 긴요하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 관련이론

2.1 초음파 두께 측정 원리

음파는 기체, 액체 또는 고체입자의 진동이며 가청주파수 (20Hz~20kHz)를 초과하는 음파를 초음파라 한다. 초음파는 매질내에서 진행되는 파의 방향에 대한 입자의 진동방식에 따라 종파, 횡파, 표면파 및 판파로 분류한다. 종파는 발생시키기가 쉽고 검사하기도 편리하여 가장 많이 사용되고 있으며 횡파나 표면파가 필요한 경우에도 특수한 경우를 제외하고는 종파를 파형변환을 통해 횡파나 표면파를 발생시켜 사용한다. 초음파는 매질을 통해서만 전달되는데 종파는 고체, 액체, 기체 모든 매질을 통해 전파되고 횡파는 고체에서만 전달된다. 종파라 할지라도 높은 주파수의 초음파는 기체상태에서는 감쇄가 심하여 검사에 이용하기 어렵다.

매질내에서 초음파의 전파속도는 다음 식과 같이 재료의 밀도 및 탄성계수에 의해 결정되며, 일반적으로 횡파의 속도는 종파의 속도의 50% 수준이다.

$$c = \sqrt{E/\rho} \tag{1}$$

여기서 c 는 종파속도 [cm/s], E 는 종탄성계수 [dynes/cm²], ρ 는 밀도 [g/cm³]이다.

초음파가 매질내에 진행되는 것을 방해하는 저항을 음향 임피던스라 하며 음향 임피던스는 다음 식으로 구해진다.

$$Z = \rho * c \tag{2}$$

여기서 Z 는 음향임피던스 [g/cm² · s] 이고 주요 재료의 밀도, 음속 및 음향임피던스는 다음 표 1과 같다. [1]

표 1. 주요재료의 초음파 물성값

재 질	밀 도 [kg/m ³]	종파속도 [m/s]	음향임피던스 [10 ³ Pa · s/m]
백금	21,400	3,960	84,744
금	19,300	3,240	62,532
우라늄	18,700	3,200	59,840
저합금강	7,850	5,940	46,629
구리	8,900	4,700	41,830
은	10,500	3,600	37,800
티타늄	4,540	6,230	28,284
납	11,400	2,160	24,624
주철	6,900	5,300	24,150
알루미늄	2,700	6,320	17,064
콘크리트	2,000	4,600	9,200
글리세린	1,300	1,920	2,496
자동차오일	870	1,740	1,514
물(20℃)	1,000	1,480	1,480
공기	1.3	330	0.429

초음파가 물질내를 진행할 때, 물질에 가하는 압력을 음압(acoustic pressure)이라 하며 다음 식으로 구한다.

$$P = Z \times a \quad (3)$$

a 는 입자의 진폭 [cm] 이다.

음향임피던스가 다른 두 매질의 경계면에 초음파가 입사하면 경계면에서 일부는 반사하고 일부는 투과한다. 이 때 반사 및 투과되는 음압비율은 초음파가 진행하는 두 매질의 음향 임피던스의 차이에 따라 달라지며 다음 식으로 표시된다.

$$\gamma = \frac{P_r}{P_i} = \frac{|Z_1 - Z_2|}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

$$t = \frac{P_t}{P_i} = 1 - \gamma \quad (5)$$

여기서 γ 는 음압반사율, t 는 음압투과율, P_i 는 입사음압, P_r 은 반사음압, Z_1 은 제 1매질의 음향 임피던스, Z_2 는 제 2매질의 음향 임피던스이다.

초음파를 이용하여 두께를 측정하는 방법은 일반적으로 펄스-에코법을 사용한다. 초음파의 펄스-에코법으로 두께가 d 이고 초음파 속도가 c 인 시험체 표면에서 초음파 펄스를 발생시키면 초음파 펄스는 시험체 두께를 왕복하는데 t 의 시간이 걸리는데 이들의 관계는 다음과 같다[2].

$$d = \frac{c \times t}{2} \quad (6)$$

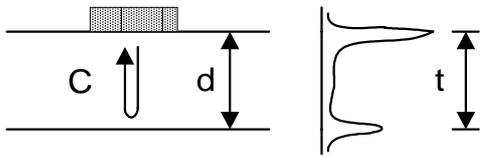


그림 1. 두께 측정의 개념도

이와 같은 관계를 이용하여 초음파를 이용한 두께측정기 등이 현재 상용화되어 사용하고 있다. 여기서 초음파의 속도는 재질에 따라 정해지는 고유값이므로 사전에 알 수 있고 초음파가 반사되어 되돌아온 시간 t 는 시험체의 앞면(배관의 외표면)에서 반사된 펄스신호와 뒷면(배관의 내표면)에서 반사된 펄스신호사이의 시간 간격을 측정하면 알 수 있다. 다만 이 값은 시험체의 전면과 후면이 평행하고 초음파가 수직입사 및 반사되었을 경우이며 입사각 및 반사각이 수직이 아니거나 시험체의 형상이 평행이 아닐 경우는 이에 대한 보정을 취해주어야 한다. 재질내에서의 초음파속도는 재질의 온도에 따라 변화하고 재질의 두께도 온도에 의해 변화하므로 이에 대해서도 보정이 필요하다.

2.2 온도 변화에 따른 초음파 속도의 변화

물질에서 초음파의 속도(c)는 매질에 따라 다르지만 매질의 밀도(ρ)와 매질의 탄성계수(E)와 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$c \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

만일 매질이 기체 또는 액체와 같이 유체인 경우에는 유체의 온도가 증가할수록 탄성계수는 증가하고 밀도는 감소하여 속도가 증가하게 된다[3,4]. 이상 기체의 경우에는 온도 상승에 따른 음

속의 변화는 $0.6 \text{ m/s}^\circ\text{C}$ 의 값을 가지며[3], 물의 경우에는 $10 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 범위에서 단위 온도당 3.0 m/s 씩 증가하는 것으로 알려져 있다[4].

그러나 고체의 경우에는 온도가 증가하면 음속이 감소하는데 이러한 현상은 유체에서와 같이 온도가 상승하면 열팽창에 의해 밀도가 감소하기는 하나 온도가 상승하면 입자간 결합력이 감소하여 탄성계수가 감소하는데 탄성계수 감소가 밀도의 감소보다 크기 때문이다. 고체에서 탄성계수의 온도 의존성에 대해서는 Wachtman 등[5]이 Al_2O_3 , MgO 와 같은 산화물에 대해 연구한 바 있으며 탄소강에서는 온도가 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 상승하면 종파 속도는 대략 1 m/s 씩 감소한다는 연구 결과가 보고된 바 있다[4,6]. Mark 등이 Al 6061 T6, SPS 245 steel의 재료에 대해서 상온에서부터 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 초음파 속도와 Young's modulus의 온도에 따른 변화를 관찰하여 보고한 바에 따르면, 온도 상승에 따른 초음파 속도와 Young's modulus는 매우 선형적으로 감소하고 있다[7].

2.3 온도에 따른 초음파 두께 측정의 보정

온도에 따라 시험 대상체의 초음파 속도와 두께가 변화되므로, 원래 지니고 있는 상온에서의 시험체 두께를 알아내려면 이들의 관계를 찾아내어 보정을 해 주어야만 한다. 특정 기준 온도 T_0 (일반적으로 상온인 $20 \text{ }^\circ\text{C}$)에서 두께가 d_0 이고 초음파의 속도가 c_0 인 시험체는 어떤 온도 T 에서 두께는 열팽창에 의해서 d' 로 변화되고, 초음파 속도도 c' 로 변화되는데 이들의 관계는 다음과 같다[5,6,7]

$$\begin{aligned} d' &= d_0\{1 + \alpha(T - T_0)\} \\ c' &= c_0\{1 - \beta(T - T_0)\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 α 는 고체의 열팽창 계수이고 β 는 속도 변화 계수로 탄소강의 종파에 대해서는 약 0.00025 의 값을 가진다.

어떤 온도 T 에서 초음파로 위와 같은 시험체의 두께 측정을 하는 경우 초음파는 측정할 때의 온도에서의 시험체 두께를 그 온도에서의 속도로 왕복할 것이므로 측정되는 초음파 펄스의 왕복 시간 t 는 식 (1)에 의해서 다음과 같다.

$$t = \frac{2d'}{c'} \quad (9)$$

이와 같은 측정 값에서 실제로 구하고 싶은 값은 상온에서의 시험체의 두께 d_0 이므로, 식 (9)에 식 (8)을 대입하여 시험체의 두께 d_0 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$d_0 = \frac{c_0\{1 - \beta(T - T_0)\}}{2\{1 + \alpha(T - T_0)\}} t \quad (10)$$

2.4 고온에서의 초음파 신호 측정의 문제점

일반적으로 직접 접촉법에 의한 초음파 신호의 측정은 초음파 탐촉자와 시험대상체 사이로 초음파 에너지 전달을 좋게하기 위하여 물 또는 글리세린과 같은 액체 또는 반액체상태의 접촉매질을 사용한다. 그러나 이러한 접촉매질은 고온의 경우에 기화되어 접촉매질의 역할을 할 수 없게 된다. 또한 일반적인 압전형소자를 사용한 초음파 탐촉자의 경우 압전 소자는 큐리온도 이상이 되면 압전 성질을 잃어버리게 되며, 큐리온도 이하일지라도 그 온도 근처에서 오랜 시간 유지하면 열화로 압전 성질을 상실하게 되어 초음파를 송수신 할수 없게 된다. 따라서 이와 같은 문제점을 해소하기 위해서는 고온에서 견디는 초음파 탐촉자와 접촉매질을 사용하여야 한다. 현재 고

온용 초음파 탐촉자들이 상용화되어 판매되고는 있으나 아직도 고온에서 장시간 사용하는 탐촉자는 많지 않으며 이들을 개발하여 놓은 회사들도 이에 대한 정보를 공개하지 않고 있다.

3. 고온용 접촉매질 실험

고온 및 고방사선 상태의 배관두께를 연속적으로 감시하기 위해서는 운전환경에서 기능을 상실하지 않고 연속적으로 사용이 가능한 접촉매질의 개발이 필수적이다. 현재 시판되고 있는 접촉매질은 대부분 풀 형태이나 고온 상태에서 계속적으로 기능을 잃지 않기 위해서는 고체상태의 접촉매질을 사용해야 할 것이다. 그러나 고체는 일반적으로 강도가 커서 초음파탐촉자와 배관사이의 공기를 완전히 제거하기가 어렵기 때문에 비교적 전성이 큰 재료를 사용하여야 한다. 고체 접촉매질은 현재 시판중인 제품이 없으며 문헌상으로 납 또는 금을 언급하고 있는 정도이다. 납은 고온에서 용융의 우려가 있으므로 본 연구에서는 납을 제외하고 우선 비교적 전성이 풍부한 재료로 알려진 금 및 알루미늄에 대한 실험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.1 알루미늄 박막 실험

상온에서 탄소강 배관과 초음파탐촉자 사이에 알루미늄 박막을 설치한 상태에서 초음파신호의 검출 및 두께측정을 시도하였으며 두께측정에 성공하였다. 알루미늄 박막 및 탐촉자 고정상태에서 수일 경과후에도 신호는 정상적인 지시를 나타내었다. 박막의 두께를 변화시킨 결과 두께변화에 따른 신호감쇄정도는 미약하였으나 클램프 조임력에 따른 변화의 정도는 매우 심하였다. 적절한 조임력을 유지하여야 정상적인 신호검출이 가능함을 확인하였다.

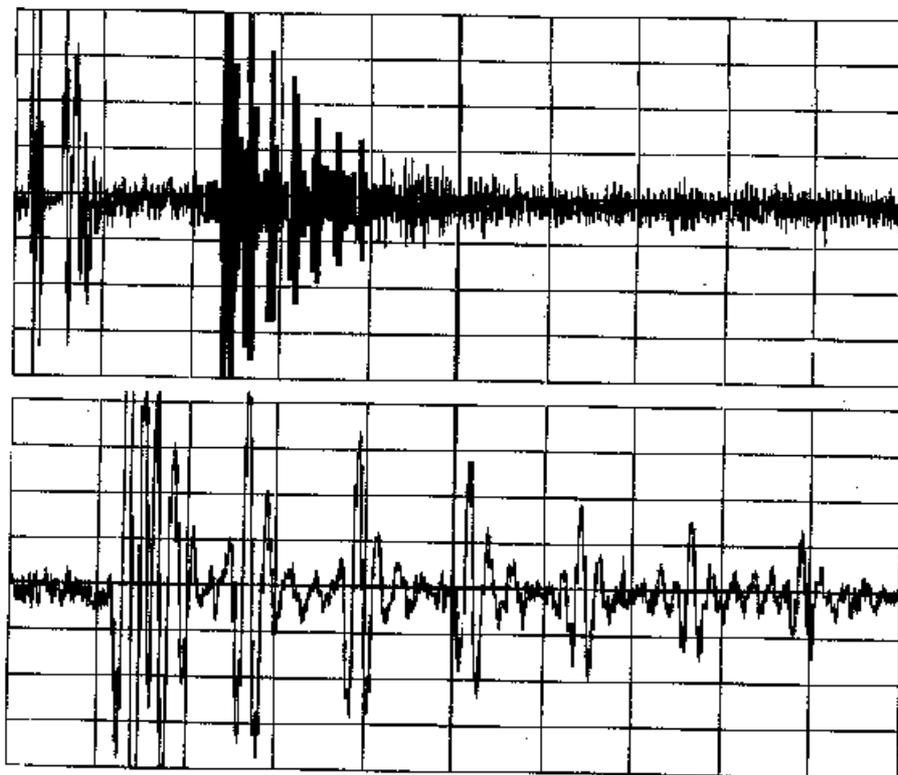


그림 2. 알루미늄 박막 설치 상태에서의 초음파 신호

그림 2에서 x축은 시간축이며 y축은 진폭축으로서 두 개의 초음파 신호사이의 간격이 초음파가 배관사이를 왕복하는데 소요된 시간이다. 따라서 상온상태에서 탄소강 배관에서의 초음파속도를 곱하면 배관의 두께에 대한 계산이 가능하다. 하부 파형은 상부 파형을 단순히 시간축으로 확대해 놓은 것이다.

3.2 금 박막 실험

상온에서 탄소강 배관과 초음파탐촉자 사이에 금 박막을 설치한 상태에서 초음파 신호 검출 및 두께측정을 시도하였으며 두께측정에 성공하였다. 금 박막 및 탐촉자 고정상태에서 수일 경과 후에도 정상적인 지시를 나타내었다. 두께변화에 대해 알루미늄 박막의 경우보다 민감한 변화를 나타내었으며 금 박막은 알루미늄 박막에 비해 쉽게 손상되는 특징을 나타내었다. 알루미늄 박막의 경우와 마찬가지로 클램프 조임력에 따른 신호변화는 민감한 반응을 나타내었다.

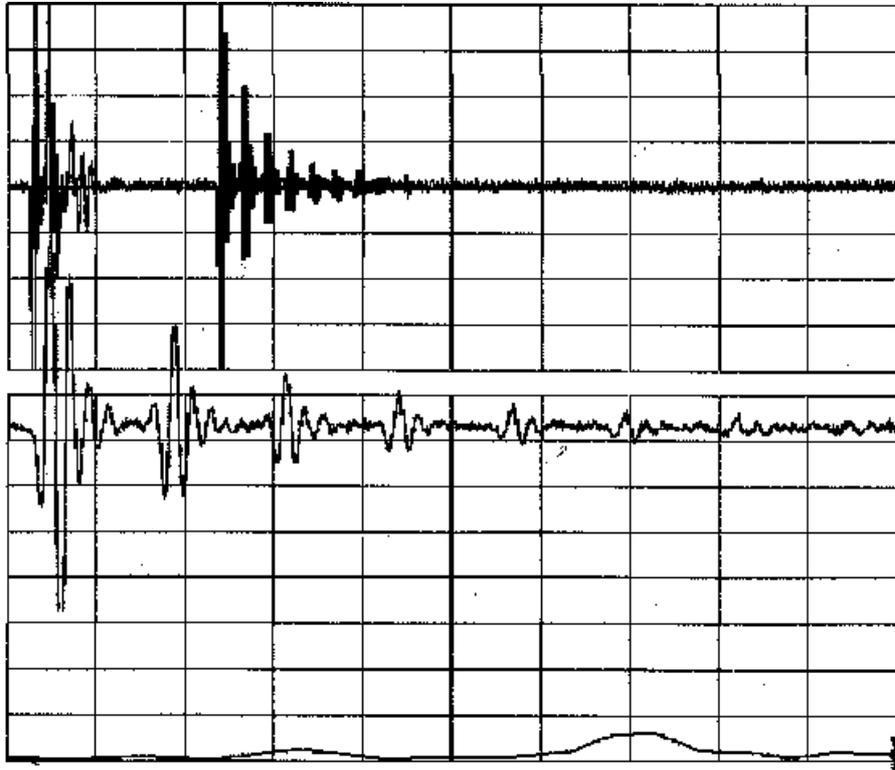


그림 3. 금 박막 설치 상태에서의 초음파 신호

그림 2와 마찬가지로 x축은 시간축이며 y축은 진폭축으로서 두 개의 초음파 신호사이의 간격이 초음파가 배관사이를 왕복하는데 소요된 시간이고 하부 파형은 상부 파형을 단순히 시간축으로 확대해 놓은 것이다.

4. 시스템 설계 및 제작

4.1. 시스템 설계

4.1.1. 설계 요건

연구 개발하고자 하는 시스템은 고온, 고방사선 상태의 배관의 두께를 원격에서 연속적으로 측정이 가능해야 하며 감육경향을 분석하기 위해 측정데이터를 자동으로 저장할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 고온, 고방사선에서 연속적으로 사용할 수 있는 초음파 탐촉자 및 접촉매질의 개발이 필수적이다. 초음파탐촉자 및 온도감지기는 유체유동에 의한 배관의 진동에도 불구하고 측정위치에서 움직이지 않고 고정상태를 유지해야 한다. 측정된 온도 및 초음파신호를 개인용 컴퓨터에서 판독하기 위해서는 이들 신호를 디지털신호로 변환시켜 컴퓨터에서 처리할 수 있는 인터페이스 기술이 필요하다. 온도변화에 따른 초음파속도 변화 및 두께변화에 대한 상관관계를 보상하여 오차가 발생하지 않도록 해야 한다. 끝으로 취득한 데이터를 원격에서 감시 또는 제어할 수 있도록 데이터 및 명령을 주고 받을 수 있는 통신시스템을 갖추어야 한다.

4.1.2 시스템 설계

설계요건을 기반으로 하여 그림 4와 같이 원격 두께측정시스템을 설계하였다. 시스템은 크게 3부분으로 구성하였다. 온도감지기 및 초음파탐촉자는 배관에 고정 설치되어 온도 및 초음파 신호를 서버(server) PC에 제공한다. 서버 PC는 초음파 및 온도 신호를 수신하여 데이터 변환 및 처리과정을 통하여 원격에 설치된 클라이언트(client) PC에 정보를 제공한다. 초음파 펄서/수신 보드는 초음파탐촉자가 초음파를 발생할 수 있도록 전기펄스를 제공하며 초음파탐촉자에서 보내오는 초음파신호를 수신한다. 멀티플렉싱 보드는 여러 지점의 두께를 측정할 수 있도록 측정채널을 확장시키는 기능을 갖는다. 아날로그/디지털(A/D) 변환보드는 아날로그 초음파 신호를 디지털 신호로 변환시켜 컴퓨터에서 신호처리가 가능하도록 한다. 온도보드는 멀티플렉싱 기능과 A/D 변환 기능을 동시에 보유하고 있다. 변환처리된 두께데이터는 통신시스템을 통하여 클라이언트 PC에 제공된다. 클라이언트 PC에서는 서버에서 제공된 데이터를 수신하여 데이터를 판독하고 서버 PC를 제어하는 기능을 수행한다.

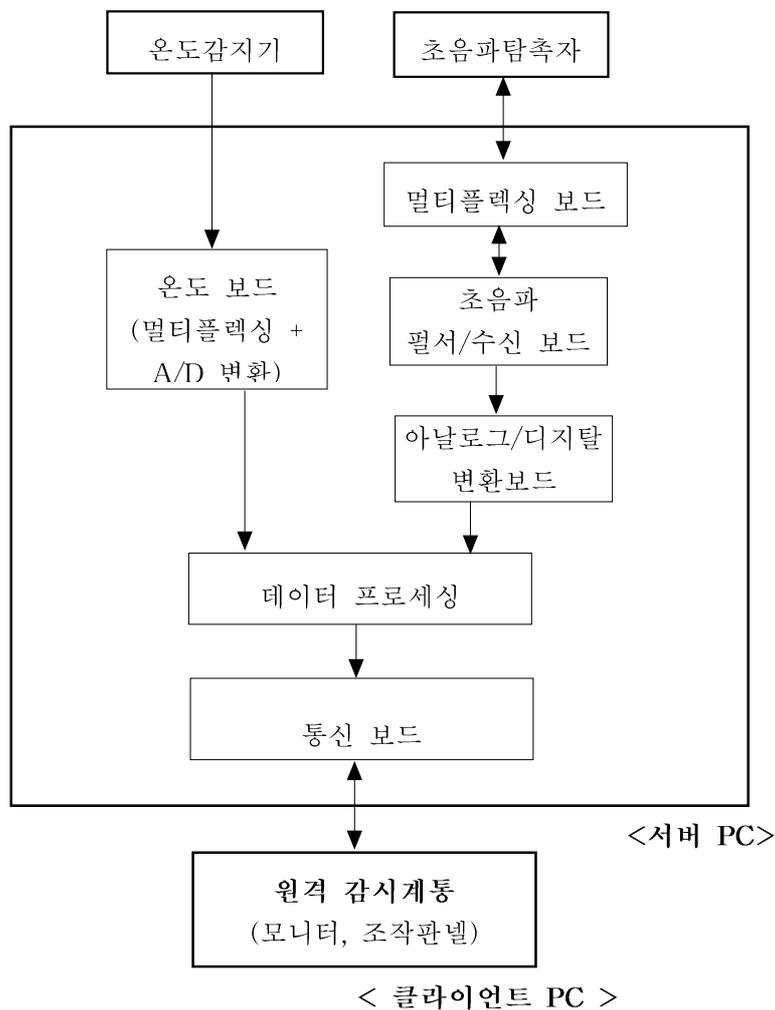


그림 4. 원격 연속 두께측정 시스템 구성도

4.2 시스템 제작

그림 4의 시스템 구성도에 따라 시작품 제작을 수행하였다. 온도감지기로는 500℃까지 측정할 수 있는 K-type 열전대를 채택하였고 초음파탐촉자는 우선 고온에서 사용경험이 있는 이시가

와시마사 탐촉자를 사용하였다. 감속현상이 발견된 발전소의 배관을 모의제작하였으며 열전대와 초음파탐촉자를 고정시킬 수 있는 클램프의 설계 및 제작을 완료하였다. 접촉매질로는 실험에 성공한 알루미늄 박막과 금 박막을 사용하였다.

초음파 탐촉자 및 열전대에서 서버 PC로의 신호전송은 케이블을 통해서 이루어지며 케이블내에서 신호감쇄를 최소화 하기 위해 거리를 20m 이내로 하였다. 온도측에는 열전대의 출력신호가 미약하여 신호증폭기를 추가로 설치하였다. 안정된 전원공급을 위하여 전원장치에는 자동전압조정기(AVR)을 설치하였다. 서버 내부의 초음파 발생 및 수신 장치는 PRC35(JSR)를 사용하였으며 초음파 A/D 변환기로 100 MHz 고속 A/D 변환기인 STR8100D(SONIX)를 사용하였다. 온도보드는 다중 A/D 변환기능을 갖고 있는 PCL816(Advantech)을 채택하였다. 초음파 멀티플렉서로는 8-channel까지 확장사용할 수 있는 MUX/4800(SONIX)를 사용하였다. 한편 열전대신호 증폭기, 자동전압조정기 및 서버 PC는 하나의 샷시에 일체형으로 조립함으로써 설치 및 이동이 용이하도록 하였다.



그림 5. 서버 PC



그림 6. 클라이언트 PC

클라이언트 PC는 일반적인 컴퓨터 본체와 LAN card 그리고 원격제어 프로그램으로 구성하였다. 프로그램은 크게 디스플레이(display) 모듈과 서버제어 모듈로 구분된다. 디스플레이 모듈은 현재 측정되고 있는 초음파 신호와 온도값 그리고 연산에 의해 보정된 두께 값을 표시하는 스코우프(Scope) 모듈과 측정된 초음파 신호의 주파수 특성을 보여주는 FFT 모듈 그리고 저장된 데이터를 원하는 구간에 대해 경향을 보여주는 Trend graph 모듈로 구성하였다. 그림 7,8에 scope 화면과 trend graph화면을 표시하였다.

서버제어 모듈은 서버의 하드웨어값을 제어하는 모듈로서 PRC35 카드와 A/D 변환기의 초기값 및 측정모드를 설정하는 조건설정모듈 온도변화에 따른 두께보정을 위한 계수값을 설정 및 교정하는 측정계수 설정 모듈로 구성되어 있다. 초음파 펄서/수신카드에 대해서는 이득값, 댐핑값, 펄스반복주파수, 광역필터 대역값 등을 설정 또는 변경할 수 있고, A/D 변환기의 샘플링주파수, 파형버퍼값 등을 조정할 수 있도록 하였다.

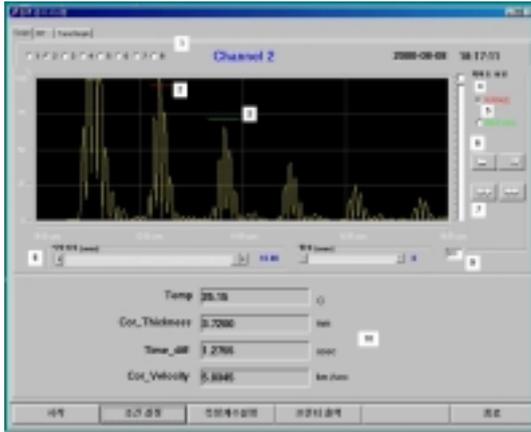


그림 7. Scope 화면

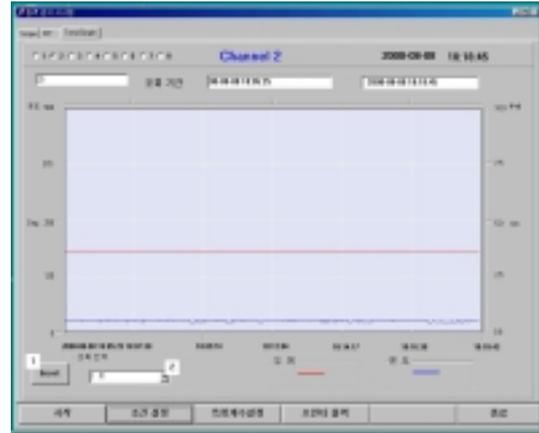


그림 8. Trend graph 화면

시스템을 구성하고 있는 주요 부품의 사양은 다음과 같다.

(1) 초음파 탐촉자

- 모델명 : MNL-2
- 제작사 : 이시가와시마 (일)
- 주요 사양
 - delay tip(지연재) : 20mm
 - 탐촉자 직경 : 10mm
 - 탐촉자 주파수 : 5 MHz

(2) 초음파 펄스발생 및 수신 카드

- 모델명 : PRC-35
- 제작사 : JSR Ultrasonics,(미)
- 주요 사양
 - 공급전압 : 300 V
 - 펄스형태 : negative spike pulse
 - 펄스에너지 : 12, 24, 60, 120 μ J
 - 댐핑 : 24.7 ~ 333 Ω
 - 펄스반복주파수 : 78 Hz ~ 5 kHz
 - 수신기 이득 : -29dB ~ 50dB
 - 수신 고역 필터 : 0.001, 0.3, 1.0, 5.0 MHz
 - 수신 저역 필터 : 10, 15, 25, 35 MHz

(3) 초음파 아날로그/디지털 변환 카드

- 모델명 : SONIX STR*8100D
- 제작사 : SONIX Inc.(미)
- 주요 사양
 - 채널 스위칭 시간 : 최소 15 ns
 - 입력 임피던스 : 50 Ω
 - 입력 커패시턴스 : 30pF
 - A/D 변환형식 : 100 Msamples/초, 8-bit flash
 - 출력 코딩 : 2진(0~255), 2개 보수(complement) : -127~+127
 - 입력 기준전압 : 0 ~ -2.5V
 - 최대 샘플속도 : 3.2 G samples/초

(4) 멀티플렉싱 카드

- 모델명 : MUX/4800
- 제작사 : SONIX Inc.(미)
- 주요 사양
 - 입력 커플링 : AC, DC
 - 입력 임피던스 : 50Ω
 - 사용전압 : +5 V
 - 릴레이 스위치
 - : 작동시간 0.5 ms
 - : release time 0.3 ms
 - : cycle time 1 ms
 - 사용온도 : $0 \sim 55^{\circ}\text{C}$

(5) 온도 보드

- 모델명 : PCL-816
- 제작사 : Advantec Co. Ltd.
- 주요 사양
 - 아날로그 입력
 - ▶ 채널 : 16개
 - ▶ resolution : 16 bits
 - ▶ sampling rate : 100 kHz max.
 - ▶ accuracy : $0.003\% \text{ FS} \pm 1\text{LSB}$
 - ▶ 입력 임피던스 : $> 10 \text{ M}\Omega$
 - 디지털 입력 / 출력
 - ▶ 채널 : 16개
 - ▶ Logic level : TTL compatible

(6) 데이터통신카드 (Ethernet Card)

- 모델명 : 3C50X
- 제작사 : 3 COM

(7) 컴퓨터

- 모델명 : PCA-6176
- 제작사 : Advantec. Co. Ltd.
- 주요 사양
 - Industry Rackmounted Computer
 - OS : Windows 98
 - CPU : Pentium II MMX 200
 - RAM : 64 MB

5. 결 론

원자력발전소 1차계통 배관의 두께를 원격에서 연속감시할 수 있는 측정원리, 시스템의 설계 및 시작품 제작 과정을 소개하였다. 고온에서 연속사용할 수 있는 고체 접촉매질로서 알루미늄과 금에 대한 실험을 수행하여 사용가능성을 확인하였다. 향후 온도변화에 따른 초음파속도의 변화 및 온도보정에 관한 실험연구와 실제 사용환경에서의 성능시험 및 교정연구를 계속 진행할 예정이다.

참고문헌

- [1] 한국비파괴검사학회, “초음파탐상검사”, 1998
- [2] ASTM(1991), Sec. 3 Vol. 0303, Nondestructive testing, E 797-90, “Practice for measuring

thickness by manual ultrasonic pulse-echo contact method."

[3] Lawrence E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 3rd ed., Chap. 5, John Wiley & Sons, New York, 1980.

[4] J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic testing of materials*, 4th ed., Chap. 1-2, 1990.

[5] J. B. Wachtman Jr., W. E. Tefft, D. G. Lam Jr. and C. S. Apstein, "Exponential temperature dependence of Young's modulus for several Oxides," *Physical Review*, Vol. 122, No. 6, 1961, pp. 1754-1759.

[6] W. Morgner, K. -H. Schiebold and H. Krause, "ultrasonic high temperature materials evaluation - A solved problem?," *Material Evaluation*, Vol. 45, 1987, pp. 569-571.

[7] D. K. Mark and J. Gauthier, "Ultrasonic measurement of longitudinal and shear velocities of materials at elevated temperature," *Ultrasonics*, Vol. 31, No. 4, 1993, pp. 245-249.