

## 감마선을 이용한 단열배관의 실시간 두께측정시스템 개발

### Development of Real-Time Thickness Measuring System for Insulated Pipeline Using Gamma-ray

장지훈\*, 김병주\*, 조정식\*<sup>†</sup>, 김기동\*\*

Ji-Hoon Jang\*, Byung-Joo Kim\*, Kyung-Shik Cho\*<sup>†</sup> and Gi-Dong Kim\*\*

**초 록** 본 연구에서는 감마선과 섬광체 및 광 다이오드로 구성된 64 채널의 선형 디텍터 어레이를 이용하여 보온재로 싸인 배관의 두께를 실시간으로 측정하는 시스템을 개발하였다. 본 측정시스템은 감마선원으로 Ir-192를 사용하였으며, 디텍터는 BGO 섬광체와 광다이오드로 구성하였다. Ir-192 방사선원은 배관의 한쪽 편에, 그리고 디텍터 어레이는 배관을 중심으로 그 반대편에 위치하며 컴퓨터로 제어되는 주행 시스템에 실려 배관을 따라 이동되는 동안 배관과 단열재를 투과한 방사선의 강도는 각 디텍터에서 측정된다. 측정된 디텍터 어레이의 출력은 증폭기에서 증폭된 후 케이블에 의해 컴퓨터로 전송되며 주행시스템이 진행되는 동안 컴퓨터는 수집된 신호를 분석 및 계산하여 실제의 두께를 나타내며 주사간격을 1mm로 할 경우의 최대 측정속도는 분당 120cm이다.

**주요용어** : 배관, 두께측정, 감마선, 섬광체, 디텍터 어레이, 실시간 방사선투과시험

**Abstract** By this study, on-line real-time radiometric system was developed using a 64 channels linear array of solid state detectors to measure wall thickness of insulated piping system. This system uses an Ir-192 as a gamma ray source and detector is composed of BGO scintillator and photodiode. Ir-192 gamma ray source and linear detector array mounted on a computer controlled robotic crawler. The Ir-192 gamma ray source is located on one side of the piping components and the detector array on the other side. The individual detectors of the detector array measure the intensity of the gamma rays after passing through the walls and the insulation of the piping component under measurement. The output of the detector array is amplified by amplifier and transmitted to the computer through cable. This system collects and analyses the data from the detector array in real-time as the crawler travels over the piping system. The maximum measurable length of pipe is 120cm/min. in the case of 1mm scanning interval.

**Keywords:** pipeline, thickness, gamma-ray, scintillator, detector array, real time radiography

#### 1. 서 론

배관은 가스나 유류와 같은 유체를 빠르고 안전하게 수송하는 수단으로, 현대산업에서 인체의 혈관과 같은 존

재이다. 석유화학공장과 같은 장치산업의 배관, 발전소의 증기관, 가스관은 물론이고 난방용 열배관 등, 배관은 우리의 일상생활과 직·간접적으로 매우 밀접한 관계가 있다. 배관은 그 기능상 가스나 유류 등의 유체를 운반하기

위한 장거리 배관과 석유화학공장과 같은 장치산업설비에서 공정의 흐름을 연결시켜 주는 배관으로 나눌 수 있다. 전세계적으로 유류와 가스를 운반하기 위한 배관은 수백만 km가 이미 설치되어 있으며 나날이 증가하고 있는 추세이다.

국내의 경우 석유화학설비의 상당부분은 60년대에 건설되었기 때문에 수명상 한 주기를 넘겨져 배관이 노후화되어 부식 및 결함 등이 나타나기 시작하였다. 특히 석유화학설비 등의 배관라인의 파열시에는 폭발, 화재로 이어지며 또한 대기오염, 수질오염 등의 환경피해로 사회 전체의 문제로 확산된다. 최근에는 이들 배관들이 매우 노후화되었고 사후관리가 소홀하여 대형사고가 빈번하며 앞으로도 이러한 가능성이 상존하고 있다.

이와 같은 배관은 내부 공정물의 온도를 유지시키기 위하여 대부분 외부에 단열재를 씌운다. 이러한 단열재는 파이프라인의 외면을 외부의 환경과 차단시켜 보호하는 효과도 있지만, 강우 등에 의해 단열재에 물이 함유되면 오히려 파이프라인의 외면에 국부 또는 전면부식을 촉진시키는 결과를 초래하기도 한다. 또 내부도 사용 중에 공정물에 의한 부식이나 침식이 발생한다. 따라서 이러한 부식 또는 침식에 따른 배관의 열화도를 점검하기 위한 두께측정 등의 정기적인 배관 검사의 시행이 요구된다.

일반적으로 두께측정에 주로 사용하는 초음파 두께측정법은 배관의 표면에 탐촉자를 접촉시켜야 하므로 우선 단열재를 제거하여야 하는데, 단열재를 제거하고 다시 설치하기 위해서는 막대한 비용과 시간이 소요되며, 제거한 단열재 및 기타 부속 자재는 재 사용할 수 없어 환경문제까지 발생한다.

따라서 이러한 여러 가지 애로 및 문제점을 해결하기 위해서는 단열재를 제거하지 않고 배관의 두께를 높은 정확도로 측정할 수 있는 새로운 기술의 개발이 요구되며, 지금까지 부식이나 침식으로 인한 배관의 두께 감소를 단열재를 제거하지 않은 상태에서 방사선, 초음파, 와전류 등을 이용하여 측정할 수 있는 기술 및 시스템을 개발하기 위한 연구가 다방면에서 진행되어 왔다[1-3].

본 연구는 단열재로 싸인 배관의 두께를 방사성동위원소를 이용하여 단열재를 제거하지 않은 상태에서 측정함으로써 부식 및 침식 등으로 인한 배관의 손상 정도를 비파괴적으로 실시간 평가하는 시스템을 개발하는 것이다.

## 2. 측정시스템 개발

### 2.1. 원리 및 시스템 구성

방사선이 섬광체에 조사되면 결정이 이온화되며 이때 섬광이 발생하는 현상이 알려진 이후, 방사선의 한 종류인 감마선의 경우, 감마선의 에너지에 따라 섬광체에서 발생하는 섬광량은 비례하고, 섬광의 붕괴시간 또한 짧은 특성이 알려지면서 감마선의 넓은 에너지 영역대까지 측정이 가능하게 되었다.

방사선과 물질과의 상호작용은 광전효과, 콤프턴 산란 효과, 이온쌍 생성 등이 있으며, 물질과 감마선과의 상호작용 확률은 단면적으로 표현한다.

물질을 통과한 감마선은 물질과의 상호작용의 영향으로 세기가 감쇠된다. 이때 감쇠 정도는 아래의 식으로 표현된다.

$$I = I_0 e^{-ux} \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서,  $I_0$  : 처음 세기
- $I$  : 투과후 세기
- $u$  : 선형 감쇠계수
- $x$  : 물질의 두께이다.

또한, 선형 감쇠계수 ( $u$ )는 물질의 밀도로 규격화되며 단위밀도당의 선형 감쇠계수로 표현할 수 있다.

$$u_m = u/\rho = 1/(\rho x) \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서,  $u_m$  : 질량 감쇠계수
- $\rho$  : 물질의 밀도이다.

위 식 (1)에 따라, 감마선이 Fig. 1과 같이 동일한 재질의 두께가 다른 매질을 투과할 경우, 투과된 감마선의 세기는 두께가 얇은 쪽에서 크게 나타나게 되며, 이는 섬광체에서 발생하는 광량과 정비례적인 요소로서 시료의 두께와는 반비례관계가 된다. 따라서 발생한 섬광의 양을 측정하면 간접적으로 시료의 두께변화를 측정할 수 있다.

또한, 단열재로 포장된 배관에서 단열재를 제거하지 않고 배관의 두께를 측정할 수 있는 이유는 단열재를 이루고 있는 물질이 주로 가벼운 원자로 구성되어 있기 때문에, 이들은 배관재질인 금속에 비해 질량 흡수계수가 작을 뿐만 아니라 밀도도 상당히 작아서 감마선의 투과강도에 큰 영향을 주지 않기 때문이다.

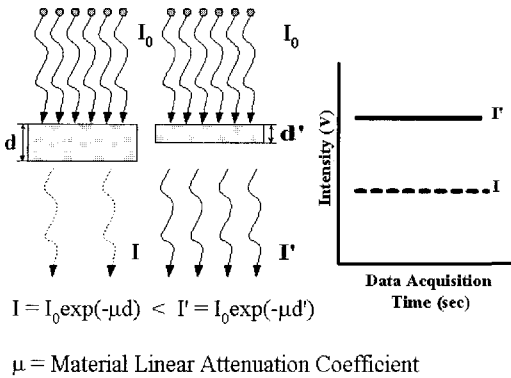


Fig. 1 Principle of thickness measurement

본 측정시스템은 방사성동위원소와 배관을 투과한 감마선의 세기를 측정하는 검출기, 배관을 주행하는 crawler, 그리고 이 시스템을 구동시키고 데이터를 수집, 저장 및 화면으로 출력하는 data acquisition system 및 software로 구성되어 있으며, 그 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

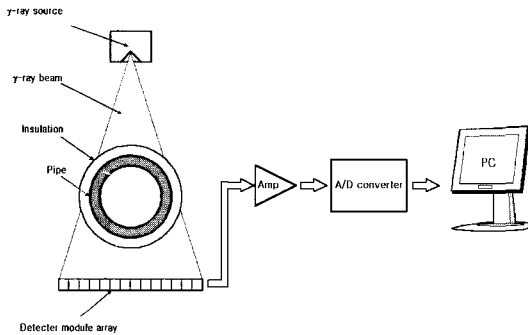


Fig. 2 Schematic diagram of thickness measuring system

2.2. 섬광체(BGO)

Bismuth germanate( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) 단결정은  $\text{Bi}^{3+}$ 를 활성제로 하는 섬광체로서, Table. 1에서와 같이 Bi와 같은 높은 원자번호를 가진 물질로 구성되고 감마선에 큰 반응성을 나타내며, 물리적 성질은 단단하고, 조해성이 없어 관리가 용이하다, 피크대 컴프턴 피크비(peak to Compton ratio)가 높고, 전 에너지에 대한 이탈 피크비

(full energy to escape peak ratio) 또한 높아 분해능이 높으며, 잔류광의 시간이 짧아 전류모드로 이용될 경우 신속하게 반응하는 이점이 있다.

Table 1 Characteristics of BGO

	value	unit
Density	7.13	[ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
Hardness	5	(Moh)
Wavelength of emission maximum	480	[nm]
Lower wavelength cutoff	320	[nm]
Refractive index at emission maximum	2.15	
Primary decay time	300	[ns]
After glow(after 3ms)	0.005	[%]
Light yield	$8-10 \times 10^3$	[photons/MeVg]
Photoelectron yield(for $\gamma$ -rays)	15-20	[% of NaI(Tl)]

2.3. Si 광다이오드

일반적으로 방사선에 의하여 섬광체에서 발생한 광은 광전자증배관이나, 반도체소자를 이용하여 침출하며, 본 연구에서는 공간적인 크기가 작은 광다이오드를 사용하였다. 사용된 광다이오드는 p형과 n형 반도체를 접합하여 제조한 것으로 입사광에 대한 높은 선형성, 적은 noise, 넓은 과장영역에 대한 반응성, 높은 기계적인 내구성 등의 특징이 있다.

다이오드에 입사광이 조사되면 내부의 p층, n층, depletion영역에서 전자와 hole이 발생되고, 외부 회로에 연결되면 p층으로는 hole, n층으로는 전자가 이동하며 전류신호가 발생하게 된다.

2.4. Charge sensitive amplifier

광다이오드에서 발생한 전기신호는 매우 적은 양이며  $10^{-9}\text{s} \sim 10^{-5}\text{s}$  사이에 지속되는 전류 펄스로서 전하량 형태로 전달된다. 본 연구에서는 이 신호를 증폭하는데 charge sensitive amplifier를 사용하였다. 전하 전달량에 대한 증폭도는 광다이오드의 내부 capacitance가 광다이오드에 걸리는 전압을 브라운킹하기 위해 가해지는 capacitance보다 작으므로 증폭도는 feedback capacitance에 의존한다. 뿐만 아니라 방출신호의 오름시간은 다이오드의 전류 펄

스폭과도 같은데, 전치증폭기의 출력전압  $V_0$ 와 붕괴시간  $\tau_f$ 는 다음과 같은 관계식으로 얻어진다.

$$V_0 = QD/C_f, \tau_f = R_f C_f \dots\dots\dots (3)$$

- 여기서,  $V_0$  : 출력전압
- $QD$  : 다이오드로부터 얻어지는 전하량
- $\tau_f$  : 붕괴시간
- $C_f$  : feedback capacitance(보통 0.1 5pF)
- $R_f$  : noise source 이다.

2.5. 감마선 검출기

감마선 검출기는 섬광체, 광다이오드, 증폭기로 구성된 다. 기존의 섬광체와 광전지증배관으로 구성된 검출기는 효율은 아주 좋으나, 공간적인 제약을 받아왔다, 그러나 Si 광다이오드를 이용한 검출기는 소형으로 집적할 수 있어 공간적인 영향을 무시할 수 있다는 장점이 있으며[4] 효율도 비교적 양호하고 외부 자기장에 의한 영향도 적게 받는다[5]. 섬광체와 광다이오드를 결합하기 위해서 MC 나일론을 재질로 하는 하우징을 제작하였으며 BGO 섬광체의 5면을  $AlO_2$ 로 코팅하여 감마선에 의하여 발생한 섬광이 Si 광다이오드에 집중될 수 있도록 하였다. 그러나 BGO 섬광체의 굴절률이 2.2이고, 주로 Si로 구성되어 있는 광다이오드 면의 굴절률이 1.6이어서 Si 광다이오드 면에 대하여 37° 이상으로 들어가는 섬광은 모두 산란되어 나가기 때문에 이를 보상해 주는 물질이 필요한데, Si 광다이오드 앞면에 있는 레진의 굴절률이 보통 1.8 정도이므로 이 관계를 보상해 주고 있다[6].

또한 Si 광다이오드는 Hamamatsue사에서 제작된 광다이오드 어레이를 사용하였다[7]. Fig. 3은 BGO 섬광체와 광다이오드를 결합하여 제작된 8채널 검출기의 모습을 보여주고 있다.

Charge sensitive amplifier로 구성된 증폭기는 offset 전압, 게인의 조정에 디지털 볼륨을 적용하여 원격조정을 가능하도록 하여 작업자의 방사선 노출을 최소화하여 작업의 안정성을 높였다.

Fig. 4는 증폭기 회로도를 보여주고 있다.

제작된 검출기의 성능평가를 위하여 측정장치를 구성하고 스테인레스 판에 인공결함을 가공하여 측정하였으며 Fig. 5는 그 측정결과 신호를 나타내고 있다.

Fig. 6은 64채널 감마선 어레이 검출기 및 증폭기의 형상을 보여준다.

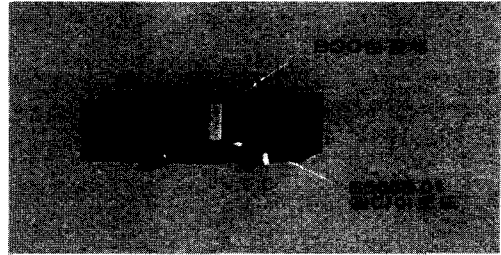


Fig. 3  $\gamma$ -ray detector module(8 channels)

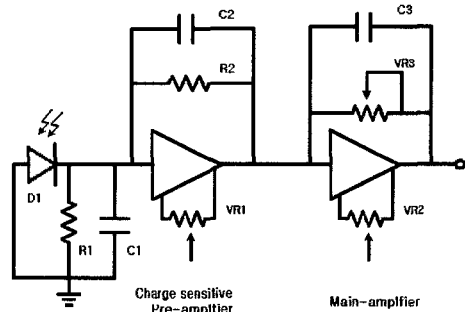


Fig. 4 Circuit diagram of amplifier

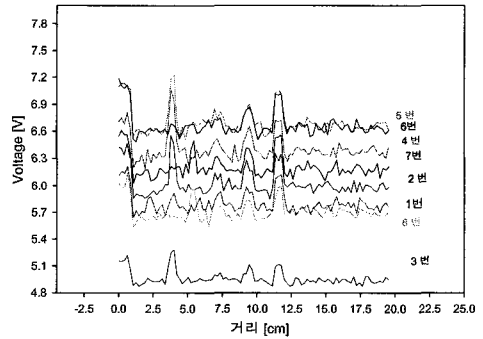


Fig. 5 Signals from 8 channel detectors

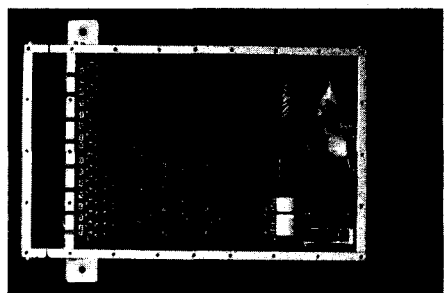


Fig. 6 Amplifier with 64 channel detector array

## 2.6. Crawler

Crawler는 Fig. 7에서와 같이 모터, 엔코더, 전원공급 장치로 구성되며, 곡면 주행에 적합하도록 좌우 구동축에 45°의 경사각을 부여하였고, 배관의 외경에 따라 축간의 거리와 검출기의 높이를 가변할 수 있도록 설계하였으며 구조적인 가변성과 경량화를 고려하여 재질은 알루미늄 profile을 사용하였다.

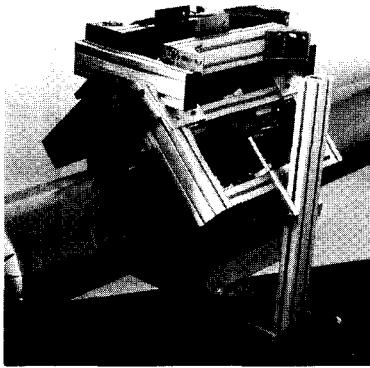


Fig. 7 Crawler

## 3. 적용성 및 성능검증 시험

### 3.1. 인공결함 시편에 대한 성능검증

#### 3.1.1. 인공결함 시편의 제작

본 연구에서는 실제 현장에서 많이 사용되는 배관의 재질 및 두께를 갖는 파이프에 인공 결함을 가공하여 결

함 시험편을 제작하였다. 시험편은 압력배관용 파이프재인 STPG370(JIS G 3454) 재질의 5" Sch. 40 파이프로서 외경 139.8mm, 두께 6.6mm이며, 측정시스템의 적용성 및 성능검증을 위해 시험편의 외부 표면에 인공결함을 가공하였다. 또한 시험편의 외면을 단열재로 싸서, 현장과 동일한 환경을 갖추도록 하였다. 파이프를 반원형 실리카 단열재로 포장 후 알루미늄 판으로 외장을 하는 방법으로 시공하여 시험편 제작을 완료하였다.

지름 20.0mm의 평저공들은 각 결함간에 0.1~0.2mm의 깊이 차이를 두어 측정 시스템의 두께 차이에 대한 검출 능력을 시험할 수 있게 하였고, 작은 피팅 등의 결함에 대한 검출능력을 평가하기 위하여 지름이 1.0~4.0mm인 평저공들을 축방향으로 나열하여 가공하였다. 또한 원주방향으로 분포한 결함에 대한 성능평가를 위해 150, 180, 210° 방향에 동일한 지름의 결함을 배치하였고, 마지막으로 원주 전체에 대한 스텝 결함을 가공하여 배관의 전체적인 두께 감소에 대한 측정 성능을 시험할 수 있도록 하였다.

Fig. 8은 시험편에 가공된 인공결함들의 사진으로 각각

- 지름 20.0mm의 평저공, 결함간의 깊이 차이 0.1mm, 위치 0° 방향
- 지름 20.0mm의 평저공, 결함간의 깊이 차이 0.2mm, 위치 90° 방향
- 깊이 3.0mm, 지름 1.0~4.0mm의 4개의 평저공, 위치 0° 방향
- 깊이 3.0mm, 지름 5.0mm의 4개의 평저공, 위치 180° 방향
- 150, 180, 210° 방향으로 분포된 평저공, 위치 18° 방향
- 원주 전체에 대한 깊이 1.0, 1.5, 1.8, 2.0mm의 스텝 결함을 보여주고 있다.

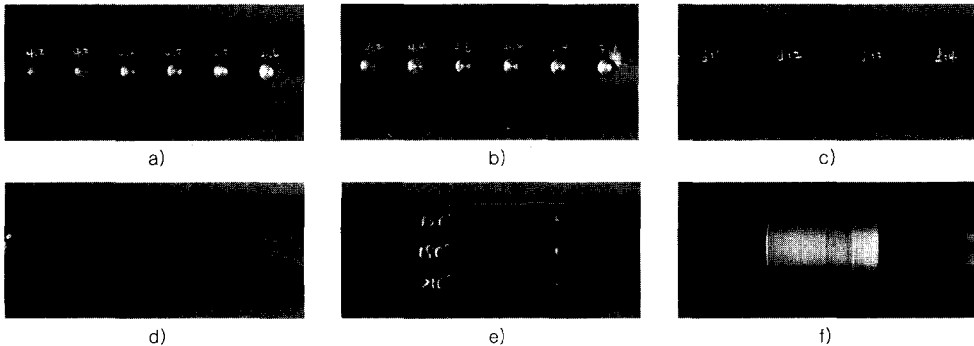


Fig. 8 Layout of artificial defects on specimen

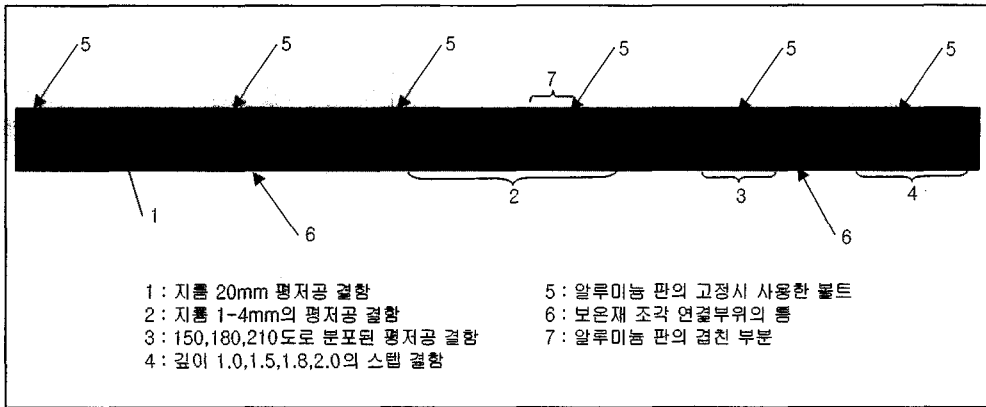


Fig. 9 Test result of measuring system by artificial defects

3.1.2. 시편에 대한 성능검증

성능검증은 crawler의 주행속도를 90cm/min., 주사간격을 1mm로 설정하여 수행하였으며 Fig. 9는 제작된 측정시스템의 인공결함 시편에 대한 측정결과의 한 예를 보여주고 있다. 여기에서 인공결함의 경우 지름 1.0mm 및 2.0mm 결함을 제외한 모든 결함이 선명하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 다만 지름 2.0mm 이하의 결함이 나타나지 않는 것은, 주사간격이 1mm로서 결함크기와 비교할 때 촘촘한 간격의 주사가 아닌데다가 또 검출기에 사용된 섬광체 1개의 크기가 2.1×2.85mm이므로, 섬광체에 감마선이 조사되는 면적보다 작은 결함의 경우는 측정하기가 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

또한 결함 외에 알루미늄 판을 고정하기 위해 사용한 볼트, 단열재의 조각이 맞닿는 부분에 생기는 틈, 알루미늄 판이 겹쳐지는 부분 등도 선명하게 나타나고 있다.

3.1.3. 최대 두께 분해능 예측

본 연구에서 개발된 측정시스템의 최대 측정한계를 시험하기 위하여 인공결함이 가공된 파이프에 대해서 몇 가지 조건에서 측정시험을 실시하였다.

감마선원은 5Ci 및 17Ci의 강도를 갖는 Ir-192를 사용하여 비교하였고, 파이프 내부에 유체의 영향을 평가하기 위하여, 특히 액체가 채워져 있을 경우에 대한 측정한계를 시험할 목적으로 파이프 시편 내부에 물을 채워서 측정하였다.

시스템의 측정한계는 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\text{측정 한계} = \frac{d \cdot \sigma}{V - V_b} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, d : 결함깊이  
 σ : background 전압의 편차  
 V : 측정전압  
 V<sub>b</sub> : background 전압이다.

각 결함 및 채널에 대한 측정한계(두께에 대한 분해능)의 평균을 구하여 각 조건에 대해 비교하였다. 그 결과 5Ci 선원을 사용한 경우 0.21mm로 나타났고, 17Ci 선원을 사용하여 측정했을 때는 측정한계가 0.18mm로 나타났다. 한편, 파이프 시편 내부에 물을 채워서 17Ci 선원을 사용하여 측정한 결과의 측정한계를 보면 0.26mm로서 다소 높은 값을 나타내었으며 Table 2, 3, 4는 각 경우에 대한 측정결과를 보여주고 있다.

Table 2 System test results(5Ci source)

	Depth of Artificial Defect(mm)	Limit of Measurement			
		#45	#46	#47	Ave.(mm)
Specimen	4.2	0.18(2.14)	0.23(2.21)	0.25(2.19)	0.21±0.02
	4.3	0.18(2.18)	0.23(2.27)	0.23(2.32)	
	4.4	0.16(2.34)	0.22(2.37)	0.21(2.43)	
	4.5	0.20(2.11)	0.23(2.33)	0.23(2.39)	
	4.5	0.18(2.22)	0.23(2.33)	0.21(2.48)	
	4.6	0.20(2.15)	0.23(2.35)	0.22(2.45)	
Back-ground	Voltage	(0.99)	(0.94)	(0.99)	
	Deviation	(0.05)	(0.07)	(0.07)	

Table 3 System test results(17Ci source)

	Depth of Artificial Defect(mm)	Limit of Measurement			
		#36	#37	#38	Ave.(mm)
Specimen	4.2	0.22(1.76)	0.21(1.83)	0.19(1.85)	0.18±0.02
	4.3	0.20(1.86)	0.20(1.92)	0.18(1.91)	
	4.4	0.18(1.96)	0.18(1.96)	0.17(1.98)	
	4.5	0.19(1.96)	0.19(2.01)	0.16(2.08)	
	4.5	0.18(2.02)	0.18(2.03)	0.16(2.12)	
	4.6	0.18(2.00)	0.19(1.99)	0.15(2.15)	
Back-ground	Voltage	(1.00)	(0.99)	(0.97)	
	Deviation	(0.04)	(0.04)	(0.04)	

Table 4 Result of system test((17Ci source, water filled specimen)

	Depth of Artificial Defect(mm)	Limit of Measurement			
		#33	#34	#35	Ave.(mm)
Specimen	4.2	0.23(3.88)	0.37(2.23)	0.27(2.09)	0.26±0.05
	4.3	0.22(3.88)	0.35(2.32)	0.28(2.07)	
	4.4	0.21(4.31)	0.32(2.47)	0.24(2.25)	
	4.5	0.20(4.46)	0.29(2.62)	0.22(2.40)	
	4.5	0.20(4.46)	0.30(2.57)	0.24(2.30)	
	4.6	0.21(4.32)	0.31(2.57)	0.25(2.28)	
Back-ground	Voltage	(1.23)	(1.11)	(1.16)	
	Deviation	(0.14)	(0.10)	(0.06)	

이로부터 측정할 배관의 두께와 배관 내부의 유체의 유무, 그리고 사용하는 방사선의 강도에 따라 측정한계가 다소 변함을 알 수 있으며 따라서 정밀한 측정을 해야 할 경우에는 이에 대한 추가적인 고려가 있어야 함을 알 수 있다.

### 3.2. 부식된 시편을 이용한 성능검증

본 연구에서 개발된 측정시스템의 성능검증을 위하여 현장에서 사용되던 국부 부식된 시편을 채취하여 측정조건을 인공결함 시험편의 검증시와 마찬가지로 crawler의 주행속도를 90cm/min., 주사간격을 1mm로 하여 실시하였다. Fig. 10은 부식시편에 대한 성능검증의 최종결과로서 단열재를 제거한 상태에서의 파이프의 부식상태와 영상화된 측정결과를 동일한 배율로 나타내었으며, 초음파에 의한 두께측정치와 본 시스템에 의해 측정된 두께 측정치를 비교 검토한 결과 본 연구에서 개발한 측정시스템이 실제 적용될 경우 높은 신뢰도가 있음이 확인되었다.

### 4. 결 론

본 연구를 통해 외국에 의존하던 감마선을 이용한 단열재로 싸인 배관의 부식두께 측정기법의 개발 및 측정시스템을 국산화하는데 성공하였다. 이 연구를 통하여 이 분야에 대한 많은 know-how를 축적할 수 있었으며 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

- (1) BGO 섬광체와 Si 광다이오드 및 증폭기를 결합한 감마선 검출기를 제작하였다.

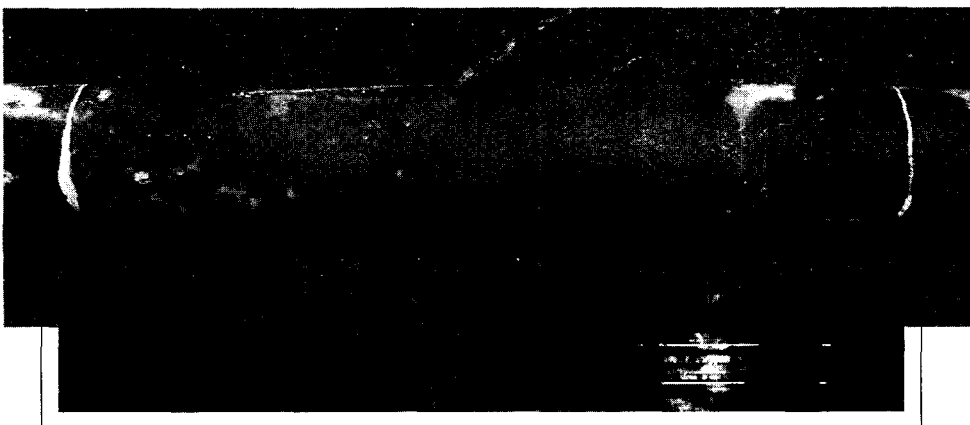


Fig. 10 Test result of measuring system by corroded specimen

- (2) 광다이오드에 흐르는 미세 전류를 직접 전압으로 바꾸어 주는, 증폭도가  $2 \times 10^3$ 인 증폭기 (전치증폭기 및 주증폭기)를 설계, 제작하였다.
- (3) 배관을 따라 주행하는 탐상용 crawler 및 소구경 배관용 64채널 감마선 어레이 검출기를 개발, 제작하였다.
- (4) 측정시스템을 원격제어 할 수 있는 구동 프로그램 및 데이터의 수집 및 실시간 분석이 가능한 프로그램을 개발하였다.
- (5) 인공결함 시편에 대한 성능검증 결과 지름 2.0mm 이상의 모든 결함들이 선명하게 검출되었으며,  $^{170}\text{Yb}$  Ir-192를 사용했을 때 최대 두께 분해능은 0.18mm로 나타났다.
- (6) 실제 현장에서 장시간 사용되어 부식이 진행된 시편에 대한 성능을 검증하였으며, 측정 결과가 매우 우수하여 실제 적용될 경우 높은 신뢰도가 있음이 입증되었다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 “엔지니어링 핵심공통 기반기술 개발사업”에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Nand K. Gupta and Bruce G. Issacson, "Real Time In-Service Inspection of Bare Insulated Above-Ground Pipelines," *Materials Evaluation*, Vol. 55, No. 11, pp. 1219-1225, (1997)
- [2] Andreas Hecht et al., "On-Line Radiographic Wallthickness-Measurement of Insulated Piping in the Chemical and Petrochemical Industry," 7th European Conference on Non-destructive Testing, (ndt.net)(1998)
- [3] J. M. Galbraith et al., "Real-time Radioscopic Inspection of Insulated Piping Systems," *Insight*, Vol. 37 No. 6, pp. 417-420, (1995)
- [4] D. E. Groom, *Nucl. Inst. and Meth. in Physics Research* 219, pp. 141-148, (1984)
- [5] S. E. Derenzo, *Nucl. Inst. and Meth. in Physics Research* 219, pp. 117-122 (1984)
- [6] BICRON, *Scintillation Detector*, (Manual)(1999)
- [7] Hamamatsu, *Si Photodiodes and Charge Sensitive Amplifiers for Scintillation Counting and High Energy Physics*, (Manual)(1999)
- [8] Nicholas Tsoulfanidis, "Measurement and Detection of Radiation", Chap.4, pp. 115-164, Hemisphere Publishing Corp., U.S.A. (1983)
- [9] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Second Edition, Vol.1, Chap.10, pp. 307-353, John Wiley & Sons, U.S.A. (1989)
- [10] Kai Siegbahn, "Alpha-, Beta- and Gamma-ray Spectroscopy", Vol. 1, Chap. 1, North-Holland Publishing Company, (1966)