

## 배관 부식도 측정을 위한 감마선 On-Line 조사 시스템



· 김기동 ·  
한국 지질 자원 연구원  
선임연구원



· 홍 완 ·  
한국 지질 자원 연구원  
선임연구원

### 1. 서론

방사선 조사로 인해 결정으로부터 섬광이 발생한다는 원리가 발견되면서부터 감마선 검출 장치 개발에는 상당한 발전을 가져왔다. 특히 감마선 에너지에 따라 섬광량이 비례하고 섬광의 붕괴 시간이 상당히 짧다는 특성이 알려지면서 감마선 분광 분석도 가능하게 되었다. 뿐만 아니라 섬광량을 표시하기 위한 전기적 신호 처리 기술의 발달로 인해 적은 량의 감마선도 측정할 수 있게 되어, 의학 및 산업 분야에 활용하게 되었다. 특히 현대에 와서는 비파괴 분석 분야까지 그 확장성을 넓혀, 감마선을 이용한 용접 부위의 접합 결함 여부 조사, 교각의 균열 여부 조사뿐만 아니라 용광로로부터 만들어지는 철의 두께 측정 등에 이용되어지고 있다. 이는 다른 방사선에 비해 감마선이 투과성이 높으며, 그 투과량이 매질의 물질 량과 지수 함수적으로 반비례한다는 직접적인 상관 관계를 갖기 때문이다.

그러나 감마선 검출 시스템을 비파괴 분석 분야에 이용하기 위해서 검출 시스템이 소형화되어, 현장 적용에 용이하게 되어야한다. 하지만 기존의 감마선 검출 시스템 즉 섬광체, 광전자 증배관, 전치증폭기로 이어지는 검출 시스템은 검출 효율은 좋으나, 공

간을 많이 차지한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 검출 시스템에 있어서 대부분 부피를 차지하는 광전자 증배관을, 비슷한 특성을 가지는 수 mm 광 다이오드로 대신하면, 공간에 의한 영향은 무시[1]할 수 있어, 감마선 검출 시스템을 소형화하는데 있어서는 아주 효과적인 방법이 될 수 있다.

또한 감마선 검출시스템에 광전자 증배관 대신 광다이오드를 사용하면, 외부 전자기장에 의한 영향도 적게 받을 수 있다는 장점도 있다[2].

본 연구에서는 부식으로 인한 파이프라인의 두께 변화량을 보온재 제거 없이 측정할 수 있는 소형 감마선 검출 시스템을 광 다이오드를 사용하여 프로토타입으로 제작한 방법과 그 검출 시스템의 측정 한계를 보고하고자한다.

### 2. 실험

#### 2.1 측정 원리

감마선 선원으로부터 방출된 감마선이 배관을 통과하게 되면 배관 물질과의 상호 작용을 통하여 투과 감마선의 세기는 처음의 세기보다 감소될 수 있다. 감마선의 투과 세기는 물질의 두께에 따라 지수 함수적으로 반비례하기 때문에 투과 세기를 측정하

면 물질의 두께를 평가할 수 있다.

투과한 감마선이 검출 센서 내부로 들어가게 되면 검출 센서는 감마선보다 파장인 긴 섬광을 방출하게 되는데, 이를 광다이오드들 통하여 대응 전류로 바꾸고, 또 이를 증폭 회로를 통하여 전압 증폭으로 바꾼 다음, ADC를 통하여 디지털 자료로 변환한 후, 컴퓨터에서 디지털 자료를 화상으로 비교 분석하면 투과한 감마선의 세기를 측정할 수 있다.

일반적으로 plant 산업에서의 배관은 상당히 긴 라인으로 구성되어져 있으며, 내용물에 따라서는 보온재라고 하는 물질로 둘러 쌓여져 있다. 긴 배관의 부식 정도를 짧은 시간에 측정하고자 할 때에는 검출 효율 및 공간 분해능을 향상시키기 위해서는 여러 개로 공간 분해능이 작은 감마선 검출 센서로 구성된 어레이 검출기를 이용한다.

## 2.2 BGO 섬광체[3]

본 연구에서는 투과한 감마선을 긴 파장의 섬광으로 바꾸는 센서로는 BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )를 이용하였는데, BGO 단결정은  $\text{Bi}^{3+}$ 를 활성제로 하는 섬광체로서, Bi와 같은 높은 원자 번호를 가진 물질로 구성되어져 있어서 감마선에 대해 큰 반응을 나타내므로 섬광체의 크기에 제한을 받는 감마선 검출 장치에 많이 이용되어진다. 또한 물리적으로 단단하고, 화학적으로 조해성도 지니고 있지 않으므로 통조림처럼 섬광체를 싸 주지 않아도 되는 이점이 있다. 또한 BGO 섬광체를 이용하여 만든 감마선 검출기는 에너지 분해능 면에 있어서 일반적인 섬광체를 이용하여 만든 검출기보다 절대 검출 효율은 떨어지나, 높은 피크대 컴퓨터 피크의 비(peak to Compton ratio)와 전에너지 이탈 피크 비(full energy to escape peak ratio)가 높다는 점 때문에 컴퓨터가 부착된 단층 촬영등에 이용한다. BGO에서 발생하는 주된 파장은 480nm 이고 이주된 파장의 감쇠 시간은 300ns 정도이다. 또한 BGO에서는 일반적인 다른 섬광체에서 같이 긴 잔유광을 가지고 있지 않기 때문에 감마선의 세기에 신속하게 반응할 수 있다는 특성도 가지고 있다.

또한 BGO는 섬광 과정을 증진시키기 위해 trace 활성 원소를 주입하지 않는 순수 무기 섬광체이다. 따

라서 흡수광 및 방출광 사이에는 에너지 차이가 나타나서, 비교적 자체에 발생한 섬광을 다시 흡수하는 과정은 잘 일어나지 않으며, 한번 방출된 광은 거의 직전하는 성질이 있다. 이 결정은 산화 Bi와 산화 Ge을 용해한 혼합물을 인장력을 이용하여 끌어당겨, 결정을 만드는 Czochalski 법에 의해 성장시킬 수 있지만 다른 섬광체와 마찬가지로 온도 증가에 따라 광 출력이 감소하는 특성을 가지고 있어서 고온에 부적합하다는 단점도 있다. 본 연구에서 이용된 BGO 섬광체의 모양은 직육면체로 구성되어져 있으며, 하나의 크기가  $2.85\text{mm} \times 2.1\text{mm} \times 8.5\text{mm}$  로 되어져 있다.

## 2.3 광다이오드[4]

감마선 검출에 있어서 공간적인 제약을 해소하기 위해서 Si 광다이오드를 이용하는데, 광다이오드는 입사광의 세기에 대하여 탁월한 선형성이 있으며, noise가 적고, 파장 대응 능력이 넓으며, 기계적으로 단단하고, 가볍고, 오래 동안 사용할 수 있다는 장점이 있다.

광다이오드는, 반도체 P형에 반도체 N형을 접합하여 만들어지는데, 각 반도체에 역전압을 가하면 depletion 영역이 형성된다.

여기에 섬광이 들어가게 되면 전자와 hole을 형성하게되고 이는 양단의 전기장에 의해서 전류를 형성하게 된다. 흐르는 전류는 극히 미미하여 적당한 증폭 및 전류-전압 교환 장치를 통하게되면 입력된 광량을 측정할 수 있다. 표 1은 방사선 측정에 많이 이용되어지는 광다이오드의 종류를 기술하였다. 본 연구에서는 암 전류가 가장 낮게 발생하는 S5668-01 광다이오드를 이용하였다.

## 2.4 증폭 회로

증폭기는 OP 111A 와 CA3140 IC를 이용하여 제작하였으며, 3단 증폭되게 구성하였다. 섬광 체로부터 발생한 섬광에 의한 광다이오드의 광전류를 0.8 msec 동안 적분하여 전압으로 바꾸어 읽어낼 수 있는 회로로 구성하였다. 증폭기에서는 방사선 투과 길이 및 광다이오드의 암전류 때문에 발생하는 전압 차이를 증폭기의 IC off 전압을 조정하여 맞출 수 있

표 1. 감마선 측정용 광다이오드들의 특성.

		S3071	S5668-01	S1337-1010BR
Window material		borosilicate glass	resin coating	resin coating
Package		To-8	ceramic	ceramic,
Active area(mm)		φ5.0	1.175×2.0	10×10
SR(nm)		320 to 1060	320 to 1100	320 to 1100
PSWλp(nm)		920	960	920
Photo sensitivity S(A/W)	λp	0.6	0.59	0.62
	480nm	0.28	0.29	0.30
Short circuit current I <sub>sc</sub> (μA)		17		70
Dark current	Typical(nA)	0.5	0.001	0.07
	Max.(nA)	10	0.01	0.2
Cutoff frequency T <sub>c</sub> (MHz)		40	*	**
TC(pF) f=1MHz		18	300	350
Absolute Maximum Ratings	RVM	50	1	5
	OT(°C)	-40 to 100	-20 to 60	-20 to 60

SR : spectra response  
 TC : Terminal capacitance  
 OT : Operation temperature  
 \*\* : rise time : 1μs

PSW : peak sensitivity wavelength  
 RVM : Reverse maximum voltage  
 \* : Vr=0V, RL=1kΩ rise time 0.1μs

도록 설계하였으며, 과도한 방사선 피폭을 피하기 위해서 모든 전압 크기의 조절은 외부에서 컴퓨터를 통하여 조절할 수 있는 리모터 저항을 부착하였다. 그림 1은 증폭기의 증폭 회로를 나타내고 있다.

### 2.5 감마선 어레이 검출기

실제로 현장에 적용할 수 있는 파이프라인의 부식

두께 측정용 감마선 어레이 검출기의 폭은 적어도 15cm를 넘어야하기 때문에 8채널이 한 조인 검출기가 최소 8개 이상 필요하며, 이들간에 생길 수 있는 공간적인 gap을 최대한 줄여서 구성하였다. 64채널 어레이 섬광체와 광다이오드를 MC 나일론으로 거푸집을 만들어 결합하였다. 각 검출기는 정렬은 전등으로부터 방출되는 빛을 콜리메이터에 통과시켜 이 빛이 모든 검출기에 들어가도록 위치하게 하였

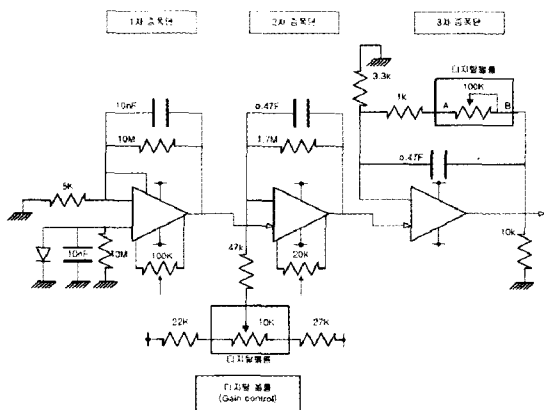


그림 1. 증폭회로.

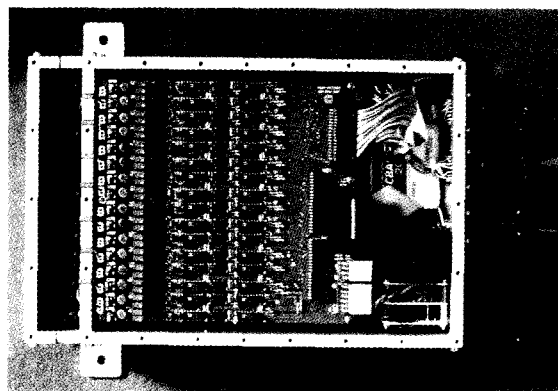


그림 2. 64 채널 감마선어레이검출기 및 증폭기.

다. 그림2 는 프로토 타입으로 만든 64채널 감마선 어레이검출기 및 증폭기를 보여주고 있다.

### 2.6 감마선 선원 및 콜리메이트

방사선 비파괴 검사에서는 주로 Ir-192 선원이 많이 이용되는데, Ir-192 선원은  $\beta$ -붕괴를 하며 반감기는 73.83일이고, 주 방출 에너지는 316.5keV(83.0%), 468.0keV(47.7%), 308.5keV(29.8%), 296.0keV(28.7%), 604.4keV(8.1%), 612.0keV(5.28%) 및 588.0keV(4.5%)이다. 시험용으로 이용된 감마선 선원의 세기는 17Ci 이었다.

방사선 선원에서 발생하는 방사선이 검출기 방향으로만 들어가게 하기 위해서는 콜리메이트가 부착 되어야한다. 콜리메이트는 두께 7cm 가로 12cm, 세로 12cm로 납으로 제작되었으며, 두께가 7cm이고, 가로 구멍 3mm 세로 10cm인 부채꼴모양으로 뚫어서 만들었다.

### 2.7 자료 축적 및 운송시스템

자료 축적 시스템은 NI사에서 개발한 분해도 12bit 64채널 ADC 카드와 LabVIEW를 이용하여 제작하였는데, LabView는 전체적인 구성이 그래픽 환경으로 구현되기 때문에 사용자 측면에서 이해하기 쉽고, 또한 검사결과를 실시간으로 처리하며, 차후 프로그램 수정에 있어서 쉽게 접근할 수 있다는 장점이 있다.

소프트웨어의 구성은 크게 데이터 취득부분과 모션 컨트롤의 두 부분으로 나눈다. 데이터 취득 부분은 각 위치에서 센서로부터 받아들인 N개의 데이터를 평균하여 Intensity Chart인 3차원 그래픽으로 출력하도록 설계하였다. 측정된 데이터는 위치 데이터 값과 함께 텍스트 데이터로 동시에 저장된다. 개발된 운용 소프트웨어의 초기화면은 그림 3과 같다.

배관 라인을 측정하기 위해서 이동시스템이 필요한데, 배관 라인 위를 타고 감마선 선원과 감마선 검출 시스템이 움직이면서 측정할 수 있도록 설계되었다 따라서 모션 컨트롤 부분은 구동 모터의 위치를 자유롭게 제어하도록 설계하였다.

또한, 검출기가 한 위치에서 데이터를 읽어들이는 회수를 자유롭게 지정할 수 있도록 「A/D Board

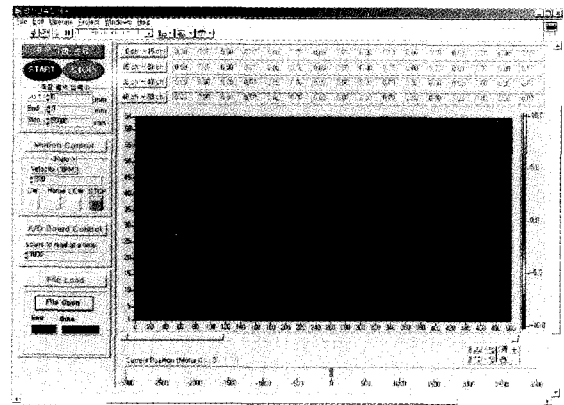


그림 3. 운용 소프트웨어의 초기화면.

Control」창을 두었으며, 이전에 측정된 검사 데이터 파일을 다시 불러와서 분석 및 재검토가 가능하도록 「File Load」기능도 부과하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 인공 결함 측정

본 연구에서 개발된 측정 시스템의 최대 측정 한계를 시험하기 위하여 몇 가지 인공결함으로 구성된 가공된 파이프에 대해서 측정 실험을 실시하였다.

그림 4는 17Ci 강도의 선원을 사용하여 인공결함을 측정된 결과를 보여주고 있는데, 각종 인공 결함 뿐만 아니라, 파이프라인 중 보온재를 고정시킨 리벳 핀을 볼 수 있을 정도로 정밀하게 측정되었다. 그림4의 윗부분의 스펙트럼은 64channel 어레이 검출기에 대해서 측정된 결과를 보여 주고 있다. 파이프 내부에 유체, 특히 액체가 채워져 있을 경우에 대한 측정 한계가 변화 정도를 보기 위해서 파이프 시편 내부에 물을 채워서 측정하였다.

시편에 가공된 인공결함 중 지름 20mm의 평저공 결함 6개에 대한 측정 데이터를 이용하여, 시스템의 최대 측정 한계를 다음 식으로 계산하였다.

$$\text{측정 한계} = \frac{d \cdot \sigma}{V - V_0}$$

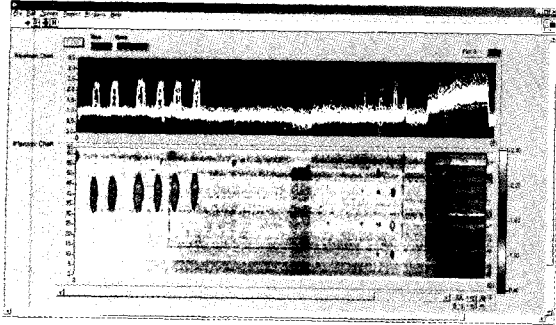


그림 4. 인공 결함 측정 결과.

여기서,  $d$ 는 결함깊이,  $\sigma$ 는 background 전압의 편차,  $V$ 는 측정전압,  $V_b$ 는 background 전압이다.

속이 빈 경우에는 측정 한계가 0.18mm로 나타났으며, 파이프 시편에 물을 채워서 측정한 결과의 측정 한계를 보면 0.26mm로서 다소 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 여기서 유체로 채워진 파이프라인의 검사 시에는 두께 측정 정밀도가 다소 떨어짐을 알 수 있었다.

### 3.2 실재 시편 측정

본 연구에서 개발된 측정 시스템의 성능 검증을 위하여 실제 현장에서 사용되던 부분 부식된 시편을 채취하여 부식도를 실시하였다. 그림 5는 실제 시편의 두께 변화를 측정한 그림을 나타낸다. 전체적으로 볼 때, 부식에 의한 두께의 감소가 균일하지 않고, 부분적으로는 상당히 부식이 심한 부위도 있는 것으로 나타났다.

검출 결과를 검증하기 위하여 파이프의 표면에서 초음파 두께 측정을 실시하여 본 측정 시스템에 의한 결과와 비교하였다. 그 결과 부식에 의한 두께의 감소가 가장 적은 부분인 그림에서 초록색으로 나타난 부분은 두께 6.0mm 이상이었으며, 푸른색으로 나타난 부분은 5.8~5.9mm 정도였다. 또한 붉은 색으로 나타난 부위는 약 5.3mm, 그리고 가장 두께 감소가 심한 부위인 노란색 또는 흰색으로 나타난 부위는 두께가 4.3~4.7mm인 것으로 측정되었다.

파이프 표면에 나타난 부식의 형태와 깊이가 측정 결과와 초음파의 경우와 거의 일치하였으며, 본 연구에서 개발된 측정 시스템의 현장 적용이 충분한

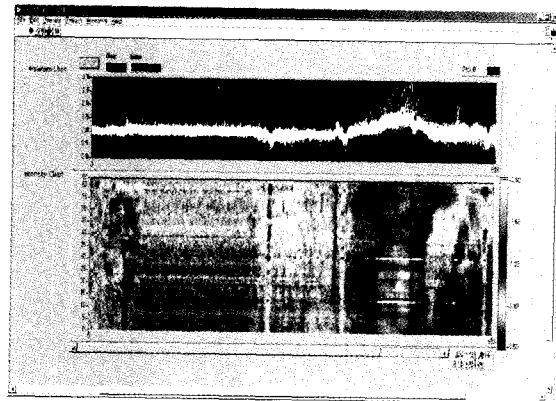
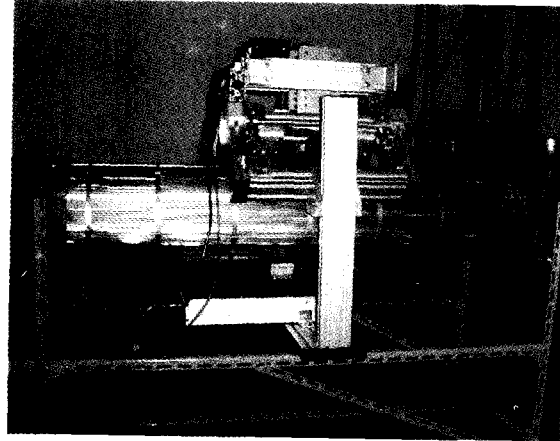


그림 5. 실제 시편 측정 장치도 및 결과.

것으로 검증되었다.

## 4. 결론

석유화학 플랜트에 설치되어 있는 수많은 파이프라인들은 대부분이 심각한 부식환경에 노출되어 있음에도 불구하고 경제성 및 신뢰성 있는 효과적인 평가기술이 존재하지 않았다.

BGO 섬광체 및 광다이오드를 이용한 소형 감마선 어레이 검출기 제작을 통하여 보온재 파이프라인의 부식 두께를 실시간 측정 평가하는 기술이 본 연구에서 확보되었다.

또한 화학플랜트에서 주로 사용하는 파이프를 효율적으로 검사할 수 있는 실시간 방사선 두께 평가

시스템이 제작되었으며, 그 측정 한계는 0.18mm로 확인되었다.

### 참고 문헌

- [1] D. E. Groom, "Silicon photodiode detection of bismuth germanate scintillation light", Nucl. Inst. and Meth. in Physics Research, Vol. 219, p. 141, 1984.
- [2] S. E. Derenzo, "Gamma-ray spectroscopy using small, cooled bismuth germanate scintillators and silicon photodiodes", Nucl. Inst. and Meth. in Physics Research, Vol. 219, p. 117, 1984.
- [3] BICRON, "Scintillation detector", Saint-Gobain Crystals & Detectors, 1999.
- [4] Hamamatsu, "Si photodiodes and charge sensitive amplifiers for scintillation counting and high energy physics", Hamamatsu Photonics K.K., 1999.

· 저 · 자 · 약 · 력 · . . . . .

**성명: 김기동**

❖ **학 력**

- 1984년 부산대 물리학과 이학사
- 1986년 부산대 물리학과 이학석사
- 1992년 부산대 물리학과 이학박사

❖ **경 력**

- 1992년-1996년 부산대 기초과학연구소 전임연구원
- 현재 한국지질자원연구원 선임연구원  
한국지질자원연구원 입자빔응용팀장

**성명: 홍완**

❖ **학 력**

- 1986년 연세대 물리학과 이학사
- 1997년 동경대 이학박사

❖ **경 력**

- 1988년-1991년 동력자원연구소 연구원
- 현재 한국지질자원연구원 선임연구원

