

## 방사성동위원소의 비파괴시험에 응용



박 은 수

서울산업대학교 재료공학과 교수

### 1. 머리말

비파괴시험기술은 소재, 부품, 구조물에 존재할 가능성이 있는 여러가지 결함이나, 재질의 이상, 열처리의 이상 등을 파괴하지 않고 시험, 평가하는 산업의 기반기술이다.

이와같은 비파괴시험에는 여러가지 물리적 에너지와 현상이 이용되고 있다. 예를들면 전자파, 입자선, 초음파, 자기, 열, 전기 등과 투과, 흡수, 산란, 전자유도, 침투, 누설 등이다. 그런데 방사성동위원소는 비파괴시험의 중요한 에너지원으로서  $\alpha$ ,  $\beta$  및 중성자선과 전자파인  $\gamma$  및 중전자선 등의 방사선을 방출한다. 입자선인  $\alpha$ ,  $\beta$  및 중성자선과 전자파인  $\gamma$  선은 물질과의 상호작용에 의한 투과, 흡수 및 산란현상의 각기 다른 특성을 지니고 있어 이들 특성을 이용하는 비파괴시험기술의 내용이 다양하다.

지금으로부터 1 세기 전에 Becquerel이 우라늄광석에서 방출되는 방사선을 발견한 이후 이의 이용에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 1920년대 후반에 Naval Research Laboratory의 Dr.R.F.Mehl이 Ra-226을 공업용 방사선투과시험에 이용한 것을 시발점으로 초기에는 자연동위원소를 사용하였다. 그러나 2차대전중 원자로의 개발로 시험에 유용한 새롭고 더 좋은 인공동위원소를 만들 수 있게 되어 이들의 공업적 응용이 더욱 활발해졌다.

이들 동위원소는 종류가 많으며, 각각 반감기, 화학적 형태, 방출되는 방사선의 종류와 에너지 등 특성이 다르기 때문에 비파괴시험에 적용되는 내용도 다르다. 그러나 대부분은 방사선의 투과현상을 이용한 투과시험과 계측시험에 이용되고 있으며 일부는 추적자로서 비파괴시험에 이용되는 예가 있다.

여기서는  $\gamma$ 선투과시험, 중성자투과시험, 두께, 밀도, 조성등 응용계측시험의 에너지원으로서 또 누설시험의 추적자로서 비파괴시험에 이용되는 방사성동위원소에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

## 2. $\gamma$ 선투과시험

### 2-1. $\gamma$ 선투과시험의 원리

$\gamma$ 선투과시험은 현재 우리나라에서 가장 많이 이용되는 비파괴검사기술로서 방사성 동위원소에서 방출되는  $\gamma$ 선을 시험품에 조사하고, 시험품과 상호작용에 의해 투과, 감쇠된  $\gamma$ 선을 시험품에 존재하는 불연속이나 내부조직을 검출하고 영상화하는데 이용하는 시험방법이다. 용접부나 주조품에 발생한 균열, 기공, 개재물 등을 잘 검출할 수 있고 내부의 구조, 치수의 변화 및 두께를 측정하는데 이용된다.

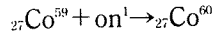
### 2-2. $\gamma$ 선투과시험의 특징

$\gamma$ 선은 방사성동위원소의 붕괴중에 방출되는 전파와방사선이다.  $\gamma$ 선은  $\chi$ 선에 비해 파장이 짧으며 연속스펙트럼을 가지지 않고 하나 이상의 분리된 에너지로 구성되어 있다.  $\gamma$ 선원의 주된 장점은 크기가 작고, 높은 투과력을 가지며,  $\chi$ 선장치에 비해 저가이다. 또한 전기나 물의 공급이 필요 없고, 관용도가 높아 한 필름에 담을 수 있는 두께범위가 크다. 이 반면에 단점으로는 강도가 낮아 노출시간이 길고, 어떤 것은 반감기가 짧아 자주 교체해야하며 방사선의 방출을 멈출 수 없으므로 항상 개인방호에 유의해야함을 들 수 있다.

### 2-3. $\gamma$ 선투과시험에 이용되는 동위원소

1930년대 초기에는 Ra-226이 방사선투과 시험에 사용되었지만 방사선장해, 가격등의 원인으로 널리 쓰이지 못했다. Ra-226는 자연에 존재하는  $\gamma$ 선방출 동위원소로서 반감기가 1,590년이다. Ra-226에서 방출되는  $\gamma$ 선 에너지는 여러 종류이나 평균에너지는 약 1.76 MeV이며, 투과력은 2 MeV의  $\chi$ 선발생장치와 맞먹는다. Ra-226는 강재두께 50mm에서 150mm의 투과사진촬영에 유용하다. 라듐과 라돈에서 방출되는  $\gamma$ 는 거의 비슷하다. 라듐대신에 라돈을 사용하기도 했으나 라돈은 반감기가 3.85일로 짧아 실용에 애로가 있었다.

2차대전중 원자로의 개발로 방사선투과 시험에 유용한 새롭고 더 좋은  $\gamma$ 선원을 인공적으로 만들 수 있게 되었다. 예를 들어 열중성자로 Co-59를 때리면 다음과 같은 핵반응에 의해 인공동위원소인 Co-60이 만들어진다.



$\gamma$ 선투과시험에 사용할 동위원소를 선택할 때 고려해야 할 인자로 반감기, 감마선에너지, 시험대상재료 가격을 들 수 있다.

현재  $\gamma$ 선투과시험에 이용되는 대표적인 방사성동위원소로서 Ir-192를 비롯하여 Co-60, Cs-137, Tm-170이 있으며 특성을 보면 표 1과 같다. Ir-192는 강재의 두께 3mm에서 75mm에 적용할 수 있으며, 1 MeV의  $\chi$ 선 발생장치와 유사한 결과를 가진다. 우리나라의 산업현장에서 가장 많이 사용되는  $\gamma$ 선원으로 93년에 산업기관용으로 수입한 Ir-192, 41,740 Ci중 대부분이 비파괴시험용으로 사용되었다고 생각된다. Co-60은 강재의 두께 50 mm에서 200mm에 적용되며, 3MeV엑스선 발생장치와 유사한 결과를 가지나 우리나라에서 투과시험용으로의 이용도는 아주 미미한 실정이다. Tm-170은 두께 12 mm이하의 강재에 대해 다른  $\gamma$ 선원보다 더 좋은 상질의 투과사진을 얻을 수 있으며, 3 mm에서 50 mm두께범위의 알루미늄촬영에도 사용할 수 있다.

이 외에  $\gamma$ 선원으로 Am-241이 있으며 반감기가 470년이나 되고, 59 KeV의  $\gamma$ 선이 방출된다. 두께 4mm까지의 강재에 대해 선형흡수계수가 9.76/cm이고, 두께 40mm까지의 알루미늄에 대해 선형흡수계수가 0.756/cm이며 밀도, 두께측정용으로 이용된다.

## 3. 중성자투과시험

### 3-1. 중성자투과시험의 원리

열중성자를 시험품에 조사하고 시험품과 상호작용에 의해 투과, 감쇠된 중성자선을 검출하여 영상화함으로써 시험품에 존재하

표 1. 투과시험에 사용되는  $\gamma$ 선원의 특성

특 성	Cobalt	Cesium	Iridium	Thulium
동위원소	60	137	192	170
반감기	5.27년	30.1년	74.3일	129일
화학적 형태	Co	CsCl	Ir	Tm <sup>2</sup> O <sup>3</sup>
밀도[gom <sup>3</sup> ]	8.9	3.5	22.4	4
$\gamma$ 선[MeV]	1.33,1.17	0.66	0.31,0.47,0.60	0.084,0.052
$\beta$ 선[MeV]	0.31	0.5	0.6	1.0
GBq당 mSv/h,m	310	80	125	0.7
비방사능[GBq/g]	1,850	925	13,000	37,000
실용 시험선원				
GBq[Ci]	740[20]	2,800[75]	3,700[100]	1,800[50]
mSv/h,m[R/h,m]	270[27]	300[30]	600[60]	3

는 불연속이나 내부조직을 조사하는 시험방법이다.

투과상의 검출법에는 직접촬영법과 간접촬영법이 있다. 그림 1은 촬영법의 개략도를 보여준 것이다. 시험품을 투과한 중성자는 전하를 갖지 않으므로 영상검출에는 이들 중성자와 반응하여 하전입자나 광을 발생하는 변환자(컨버터)를 사용하여야 한다. 현재 많이 사용되는 컨버터를 표 2에 나타내었다.

보통 직접촬영법에 의한 필름촬영법이 많이 쓰인다. 최근에 화학처리기술의 발달에 힘입어 실시간촬영법의 개발연구가 활발히

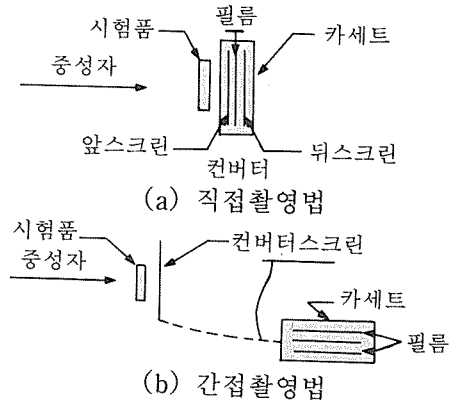


그림 1. 필름이용 중성자투과시험의 개략도

표 2. 열중성자투과시험에 사용되는 컨버터의 종류와 성질

재 료	반 응	열중성자에 대한 흡수단면[barn]	반 감 기
Lithium	Li-6(n, $\alpha$ )H-3	910	즉시
Boron	B-10(n, $\alpha$ )Li-7	3,380	즉시
Silver	Ag · 107(n)Ag-108	35	2.3 min
Cadmium	Cd 113(n, $\gamma$ )Cd-114	20,000	즉시
Indium	In-115(n)In-116	157	54 min
Samarium	Sm-149(n, $\alpha$ )Sm-150	41,000	즉시
	Sm-152(n, $\alpha$ )Sm-153	210	47 h
Europium	Eu-151(n)Eu-152m	3,000	9.2 h
Gadolinium	Gd-155(n, $\gamma$ )Gd-156	61,000	즉시
	Gd-157(n, $\gamma$ )Gd-158	254,000	즉시
Gold	Au-197(n)Au-198	98.8	2.7 d

시도되고 있다. 핵연료물질등 시험품이 강한 방사선을 발생할 때 간접촬영법을 이용하는 큰 장점이 있다.

### 3-2. 중성자투과시험의 특징

중성자선과  $\gamma$ 선의 물질투과에 대한 본질적인 차이를 그림 2에 나타내었다. 각종 원소의 원자번호에 대한 질량흡수계수의 비교 예이다.

열중성자의 낮은 물질의 무게에 관계없이 원소고유의 값을 나타내나  $\gamma$ 선의 경우는 에너지에 따라 다소 차이가 있으나 그림 2와 같이 비교적 단순한 밀도의 함수로 변한다. 일반적으로 중성자의 시험품투과 특징으로서 다음내용을 들 수 있다.

1) 수소, 리튬, 보론 등 투과하기 어려운 원소가 있다. 물, 플라스틱 등 수소를 함유하는 가벼운 물질은  $\gamma$ 선과 반대로 투과하기 어렵다.

2) 철, 납, 비스무스 등 중금속은 대체로 투과하기 쉽다.

이러한 성질을 잘 이용하면 중성자투과시험은 신소재, 중금속에 혼입된 이물질, 중물

질과 경물질이 공존하는 복합재의 검사에 활용할 수 있다. 앞으로 이용될 분야로 원자로연료의 균열 및 균일성 검사, 각종 로켓의 기폭관 등의 시험검사, 항공기 기체의 부식 및 날개의 하니컴구조의 접착상태, 연료수송관의 검사, 엔진내의 연료의 수송상황, 유압기기내의 기름, 금속관내의 액체의 흐름의 실시간 관찰, 각종 신소재의 검사, 그 외 고고학의 연구 등을 들 수 있다.

### 3-3. 중성자투과시험에 이용되는 동위원소

중성자의 발생은 X선과는 달리 원자핵반응을 필요로 한다. 따라서 발생원으로 원자로, 방사성동위원소, 가속기가 이용된다. 그런데 방사성동위원소 선원은 약간 중성자강도가 약하다는 약점을 가지고 있으나 가반성면에서 대단히 유리하여 앞으로 많은 활용이 기대된다. 표 3은 열중성자투과시험과 계측에 이용되는 동위원소의 특성을 나타낸 것이다. 동위원소는 아직 대부분 연구용으로 사용되고 있으나 Cf-252는 중성자 발생량이 많아 실용화 연구개발이 이루어지고 있다. 이 외에 Po-Be( $\alpha, n$ ), Sb-Be( $\gamma, n$ )등의 활용

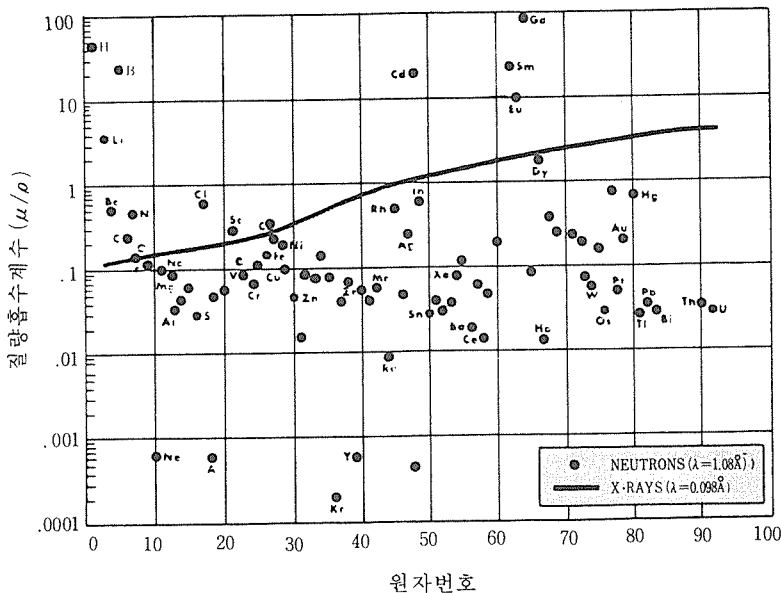


그림 2. 중성자 및  $\chi$ 에 대한 각 원소의 질량흡수계수

표 3. 열중성자투과시험과 계측에 이용되는 동위원소의 특성

선원	반응	반감기	특 성
Sb-124-Be	( $\gamma, n$ )	60 d	짧은 반감기, 높은 $\gamma$ 선배경, 낮은 중성자에너지로 쉬운 열중성자화, 저가, 높은 중성자 수율
Po-210-Be	( $\alpha, n$ )	138 d	짧은 반감기, 높은 $\gamma$ 선배경, 저가
Am-241-Be	( $\gamma, n$ )	458 d	긴 반감기, 쉽게 차폐되는 $\gamma$ 선 배경, 고가
Am-241-Cm-242-Be	( $\gamma, n$ )	163 d	짧은 반감기, 높은 $\gamma$ 선 배경, 저가가능성
Cf-252	자발 핵분열	2.65 y	긴 반감기, 작은 -치수, 낮은 중성자에너지로 쉬운 열중성자화, 높은 중성자 수율

에 관심이 높다.

#### 4. 방사선 응용계측법

##### 4-1. 방사선 응용계측의 원리

방사선 응용계측의 측정원리는 방사선이 물질을 통과할 때 일어나는 흡수, 산란, 전리 등의 현상을 이용하는 것으로서 측정원리로 볼 때 투과방사선의 측정, 2차방사선의 측정, 전리전류의 측정으로 나눌 수 있다. 시험품을 투과한 방사선을 시험품을 통과할 때의 흡수분율이 측정량과 일정한 관계를 가지는 것을 이용하여 목적측정량을 구하는 것이다. 목적에 따라  $\gamma$ , X선,  $\beta$ 선, 중성자선이 이용된다.

방사선 응용계측은 주로 코팅두께의 정밀 측정, 재료의 내부밀도 변화, 조성의 결정 등에 이용된다. 표 4는 방사선응용계측의 원리와 이용 예를 나타낸 것이다.

##### 4-2. 응용계측에 이용되는 동위원소

계측에 이용되는 동위원소는 계측의 목적과 원리에 따라 방사선의 종류, 에너지의 수준, 반감기, 가격 등을 고려하여 선택한다. 표 5는 두께측정에 이용되는 동위원소를 나타낸 것이다.

#### 5. 누설시험

방사성동위원소는 누설시험의 추적자로

표 4. 방사선응용계측의 원리와 이용 예

계측방법	원리, 측정 및 응용
$\gamma$ /X선 감쇠	밀도와 두께의 곱
두 에너지 감쇠	두 원소계의 조성
토모그래피	삼차원 영상
X선 형광	조성, 코팅두께
컴포톤산란	밀도 불균일성, 일면 밀도와 두께의 곱
$\beta$ 후방산란	코팅두께
중성자 감쇠, 산란, 변조	수소함량
루더포드산란	표면조성
핵상호작용	동위원소 특수분석

표 5. 두께측정에 이용되는 방사성동위원소

선 원	반감기	에너지 [MeV]	적정 측정범위
C-14	5,730y	0.156( $\beta_{max}$ )	0.5-12[mg/cm <sup>2</sup> ]
Pm-147	2.6y	0.224( $\beta_{max}$ )	0.5-15[mg/cm <sup>2</sup> ]
Kr-85	10.8y	0.67 ( $\beta_{max}$ )	1-120[mg/cm <sup>2</sup> ]
Am-241	458y	0.06 ( $\gamma$ )	400-3,500[mg/cm <sup>2</sup> ]
Cs-137	30y	0.66 ( $\gamma$ )	2-40[mg/cm <sup>2</sup> ]
Co-60	5.3y	1.1,1.3( $\gamma$ )	2.7-55[mg/cm <sup>2</sup> ]

이용되기도 한다. 방사성동위원소를 이용한 누설시험은 Reed-Curtis사가 작은 밀봉부품의 누설시험을 하기위해 Radiflo라고 하는 방법을 개발한 것이 시초이다. 이 방법은 시

험할 시험품을 큰 탱크속에 넣고 탱크를 밀봉한 다음 방사성가스를 주입한 후 가압하여 일정 시간 유지하고, 시험품을 가스속에서 꺼내어 방사성오염을 깨끗이 제거한 다음 방사선검출기로 측정하여 누설율을 알아내는 방법이다. 이 시험의 감도는 가스압력, 가스농도, 가압시간에 영향을 받는다.

그리고 동위원소를 이용하여 유압시스템의 누설과 흐름을 측정한다. 한 예로 상수도 주관에 Na-24와 같은 방사성용액을 균일하게 채우고 모든 배출구를 막은 다음 일정 시간 압력을 유지하여 방사성용액의 누출을 점검하여 누설위치를 찾아 낸다.

또한 누설이 예상되는 상수도·주관의 입구와 출구의 밸브를 막고 중간지점에서 물을 공급하여 압력평형이 되었을 때, 미량의 방사성물질을 물공급구에서 주입하고 주입구 양쪽에 설치된 계측기로 측정한다. 이 때 계수율이 높은 쪽이 누설의 방향이며 여러 지점에서 방사성물질이 통과하는 시간을 측정함으로써 유속의 변화를 알 수 있고 누설 위치를 찾아낼 수 있다. 이 방법을 송유관에 적용한 사례도 있다. 이상의 예는 용해성 방사성동위원소를 추적자로 이용한 경우이며 이때 반감기가 짧은 동위원소를 허용기준 이하의 농도로 시험하는 것이 보통이다.

Kr-85는 가스상의 동위원소 추적자로 누설시험에 이용된다. 이는 마이크로회로와 같은 작은 부품을  $10^{-12}$  atm cm<sup>3</sup>/s 정도의 높은 감도로 시험할 수 있다. 그러나 유기물 코팅이 있을 경우 흡착되는 문제점을 가진다.

1930년대 초에 표면균열을 검출하기 위하여 방사성침투액을 이용하여 침투탐상시험을 한 사례가 있으며, Makin은 1959년에 동위원소 pd-109가 들어있는 오일을 사용하여 마그네슘합금의 기공을 측정한 예도 있다. 시험품 표면의 자동방사선사진을 찍어 사진 필름상에 나타난 농도분포로 시험품 표면의 기포정도를 측정했다.

특히 방사성물질을 시험추적자로 사용할 때 시험품의 오염과 검사원의 과피폭방지에 각별히 주의해야함은 재론의 여지가 없다.

## 6. 맺는말

1890년대 말에 방사성동위원소가 발견된 이후 이것에서 방출되는 방사선의 이용에 대한 연구가 계속되었으며 비파괴시험분야에 이용기술도 많이 발전되었다. 1960년대 중반에 우리나라에서 처음으로 동위원소를 이용한 비파괴시험이 시도된 이래 중화학공업의 진흥과 방위산업 육성 정책에 힘입어 비파괴시험의 수요증가와 함께 동위원소의 이용량이 급증하게 되었다.

그러나 지금 우리나라에서 비파괴시험에 이용되는 동위원소는 특정 핵종에 국한되어 있고 이용기술 또한 투과시험에 편중되어 있는 아쉬움을 가지고 있으며, 다른 기술의 이용은 물론 새로운 기술의 연구 개발도 활발하지 못한 실정이다.

오늘날 신기능재료를 비롯하여 다수의 신소재부품이 만들어지면서 날로 비파괴시험의 대상이 증가하고 요구되는 기술수준은 고급화, 극미세화로 치닫고 있다. 이러한 시대적 요구에 부응하기 위해 우리도 동위원소의 특성을 이용한 비파괴시험 기술의 연구 개발에 힘을 기울일 때이다. 이것이 선진 기술국으로 나아가고 국제경쟁력을 키울 수 있는 지름길이다.

## 참 고 문 헌

1. W. J. McGonagle : "Nondestructive Testing, 2nd ed", Gordon & Breach, 1975.
2. 일본비파괴검사학회 편 : "신 비파괴검사편람", 일간공업신문사, 1992.
3. ASNT : "NDT Handbook, 2nd ed., Vol.3", ASNT, 1985.