

## 방사선투과사진에 의한 결함깊이 및 높이의 평가

심언덕 · 이진우\* · 이수경\*\* · 강계명\*\*\*

동양검사기술(주) · 한국산업안전공단\* · 서울산업대학교 안전공학과\*\*

서울산업대학교 신소재공학과\*\*\*

### 1. 서 론

구조물의 안전성 평가와 수명예측은 구조물 내 결함에 관한 정확한 정보 즉, 결함의 종류, 크기, 위치, 형상으로 평가하고 있다. 이들 결함의 분석과 해석 방법으로 실시간 평가가 가능하고, 구조물에 손상을 주지 않는 비파괴 결함 평가 방법이 널리 활용되고 있다. 특히 방사선투과시험에 의한 결함 해석과 평가는 투과사진 상에 나타나는 결함의 상으로부터 결함 형상과 결함 길이는 직접 확인할 수 있으며, 결함 깊이와 결함 높이의 해석에는 입체방사선투과검사법(Stereo-radiography)과 parallax법 등으로 현재 결함 깊이와 높이를 해석하고 있으나, 이러한 방법은 결함 검출을 위하여 조사방향을 여러 방향으로 하여 방사선 투과사진을 다수 촬영하여야 하고, 촬영된 결함의 분석과 해석에도 숙련된 평가 기법이 요구되는 등 많은 문제점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 방사선투과검사에서 소형 경량이며, 현장의 검사두께 범위에 적합한 Ir-192 방사성동위원소를 사용한 방사선투과시험을 이용하여 방사선투과사진의 농도차에 의한 결함의 깊이와 높이에 대한 실험적 평가를 하고자 하였다. 이를 위하여 선원-필름간의 거리(Source-to-Film-Distance : 이하 SFD)가 동일한 조건하에서 필름-시험체간 거리(Film-to-Testspecimen-Distance : 이하 FTD)를 두 조건으로 변화시켜 사진 농도에 미치는 산란선량율의 영향에 관하여 조사하였고, 대비시험편을 사용한 투과사진으로부터 결함 높이의 평가가 가능함을 보이고져 본 연구를 수행하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 시험편 제작

시험편 제작은 배관재료로 널리 사용되는 SM45C 강재를 사용하였다. 시험편은 300×60×19mm의 평판에 공히  $\phi 20$ mm의 4종류 인공 결함을 결함의 깊이와 높이를 각기 달리하여 가공하였다. 이때 결함의 깊이는 각각 17.87mm, 16.90mm, 16.03mm, 15.02mm이었고, 결함의 높이는 각각 1.13mm, 2.10mm, 2.97mm, 3.98mm으로 평저공 인공 결함을 가공하였다. 한편 대비시험편은 시험편과 동일한 재질로서  $\phi : 20$ mm,  $h : 1$ mm인 원판상으로 제작하였다.

## 2.2 방사선투과사진 촬영

방사선 선원으로 방사능 강도는 21Ci, 선원의 크기는  $\phi 2.7 \times h 2.5mm$ 인 Ir-192를 사용하여 방사선투과시험 하였다. 이때 선원과 필름과의 거리(SFD)는 600mm로 일정하게 유지하였고, 빛에 노출되지 않도록 경질 고무재질로 된 카세트 속에 FUJI #80 필름을 넣어 방사선투과사진을 촬영하였다.

FTD는 4.4mm의 경우와 80mm의 경우로 하였고, 방사선원의 노출시간은 11.8분으로 방사선 조사시험 하였다. 또한 각각의 동일한 FTD 조건하에서 방사선원의 위치가 인공결함의 상부(A side)와 하부(B side)에 위치함에 따른 산란선량율의 변화를 조사하였다. 방사선투과사진 촬영시 명암도와 선명도를 높이고저 증감지를 사용하였고, 실험에 사용된 증감지는 두께 0.0127mm의 연박 증감지이며 증감지 사용시 방사선원 노출 시간은 18.9분으로 하였다.

## 2.3 방사선투과사진 농도 측정

방사선 투과시킨 필름은 20℃의 알칼리성 현상액에서 5분간 유지, 현상한 후, 초산 정지액에 1분간 유지하여 필름상의 잔류 현상액을 제거하였다. 정지 과정이 끝난 필름은 20℃의 정착액에 10분간 유지하여 필름 감광유제에 남아있는 감광되지 않는 브롬화 은을 제거하여 안정된 상으로 정착시켰다. 정착 과정이 끝난 필름은 1분간 세척하였고, 필름상의 물방울 무늬를 제거하기 위하여 적심액에 1분간 유지 후, 필름을 50℃의 공기로 40분간 건조시켰다.

이와 같이 준비된 필름의 농도는 Macbeth 사진농도 측정계를 이용하여 사진 농도를 측정하였다. 이를 위하여 먼저 표준 스텝웨이 필름을 사용하여 보정한 후, 조사된 필름상 8개의 결함부와 건전부 및 대비시험편부를 각각 5회 측정하여 그 평균값을 본 실험의 사진 농도 값으로 정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 방사선투과사진 촬영

FTD의 변화에 따른 방사선 사진 농도의 측정 결과는 FTD가 4.4mm인 경우에 사진 농도가 2.06에서 2.40까지 변화하였고, FTD가 80mm인 경우에는 사진농도가 2.04에서 2.24까지 변화하였다. 또한 증감지를 사용한 경우에는 FTD가 4.4mm인 경우 사진농도가 2.09에서 2.43까지 변화하였고, FTD가 80mm의 경우 사진농도가 2.07에서 2.24까지 변화하는 것으로 조사되었다.

Table. 1 FTD의 변화에 따른 방사선투과사진 농도

flaw depth (mm)	measured density	A side density		B side density		calculated mean density	
		with screen	without screen	with screen	without screen	with screen	without screen
4.4mm FTD	15.02	2.34	2.27	2.43	2.40	2.385	2.335
	16.03	2.24	2.18	2.31	2.28	2.275	2.23
	16.90	2.15	2.14	2.19	2.20	2.17	2.17
	17.87	2.09	2.05	2.13	2.09	2.11	2.075
80mm FTD	15.02	2.29	2.21	2.24	2.24	2.365	2.225
	16.03	2.19	2.15	2.17	2.16	2.18	2.155
	16.90	2.13	2.11	2.10	2.12	2.115	2.115
	17.87	2.07	2.04	2.05	2.05	2.06	2.045

### 3.2 사진 농도차에 따른 결함 깊이 평가

A면과 B면의 결함 위치 변화에 따른 사진 농도의 산란선량을 영향을 고려하기 위하여 A면과 B면에서 측정된 사진농도의 평균농도를 본 연구의 사진 농도로 정하여, 결함 위치에 대한 사진 농도의 영향을 함께 고려하여 이를 도표화하여 그림 1에 결함 깊이와 평균농도의 관계를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 (a)는 FTD가 4.4mm인 경우이고, (b)는 FTD가 80mm인 경우로서 이들 결과를 선형 회기분석하여 측정된 평균농도와 결함 깊이와의 관계식을 구하였다. 측정된 평균농도와 결함 깊이의 관계식은 모두 선형의 관계를 나타내었으며, 다음은 선형 회기분석한 결과에서 얻은 실험식으로,

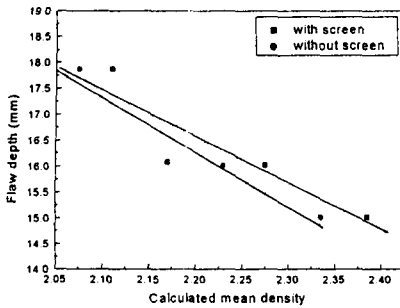
$$y = 35.85 - 8.77x \quad [R = 0.9] \quad \text{4.4mm FTD with screen}$$

$$y = 39.15 - 10.40x \quad [R = 0.96] \quad \text{4.4mm FTD without screen}$$

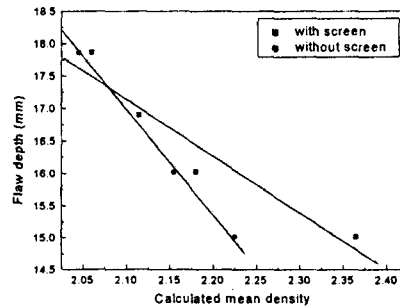
$$y = 35.60 - 8.78x \quad [R = 0.96] \quad \text{80mm FTD with screen}$$

$$y = 50.85 - 16.11x \quad [R = 0.99] \quad \text{80mm FTD without screen}$$

여기서, R은 실제 결함 깊이와의 상관계수로서, 실험 평가 결과와 실제 결함 깊이와 좋은 대비 관계를 보임을 알 수 있다. 또한 FTD가 4.4mm 경우보다 80mm의 경우에서 상관성이 증가하는 것을 알 수 있다. 이들 관계식으로 평균 사진 농도로부터 결함의 깊이가 평가될 수 있는 유효한 파라미터로 작용함을 알 수 있다.



(a) 4.4mm FTD



(b) 80mm FTD

Fig. 1 결함깊이와 평균농도의 상관관계

### 3.3 결함 높이 평가

표 2는 측정된 사진 농도와 Nakamura 등의 결함 높이 평가 연구 결과로서, Nakamura 등의 결함 높이 평가는 A면과 B면 각각의 사진 농도를 독립적으로 고려하여 결함의 높이를 추정하였다. 이들 추정치는 증감지가 있는 경우 A면에서는 결함 높이가 증가함에 따라 0.8에서 3.56 까지 나타났고, 증감지가 없는 경우는 1.0에서 3.5 까지 변화하는 것으로 추정하였다. 그러나 이들 결함 높이의 추정치는 실제 결함의 높이와는 다소 오차 범위가 큰 것을 알 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 결함 높이를 A면과 B면의 사진 농도를 앞서 결함 깊이 평가에서와 같이, 함께 고려하여 평균농도를 구하고 이에 대응하는 것으로 결함 높이를 평가하고자 하였다.

이들 결과 추정치가 표 3으로서, 표에는 사진 농도와 재평가되어진 결함 높이의 관계를 나타내고 있다. 증감지가 있는 경우 0.985에서 3.995 까지 결함의 높이가 변화하였고, 증감지가 없는 경우에는 1.0에서 3.665로 증가하는 것으로 평가되었다. 또한 이들 평가치는 실제 결함의 높이와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이들 농도와 추정된 결함 높이의 상관성을 평가하기 위하여 회기분석한 결과식은 다음과 같으며,

$$y = -21.85 + 15.05x \quad [R = 0.96] \quad \text{without screen}$$

$$y = 0.92 + 8.03E - 13 \exp\left[\frac{-x}{0.11}\right] \quad \text{with screen}$$

이들 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서와 같이 증감지가 있는 경우에는 평균농도가 증가함에 따라 추정되는 결함의 높이는 지수함수적 관계로 증가하고 있으나, 증감지가 없는 경우 평균농도와 결함의 높이에는 선형의 관계를 보였다. 이들 증감지 사용 유·무에 따른 추정 결함 높이의 변화 곡선은 방사선 산란선량율의 영향에 기인한 현상으로 생각된다.

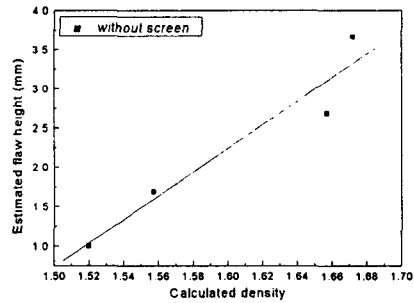
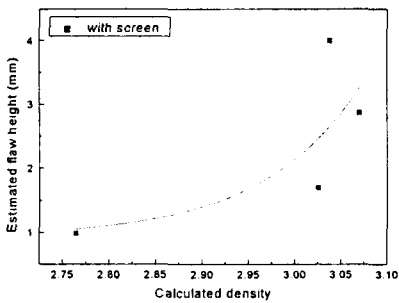
Table. 2 방사선투과사진에서 계산된 결함 높이

division	flaw number	measured contrast density						Calculated flaw height* (mm)	
		flaw area (a)		sound area (b)		reference test specimen area (c)			
		with screen	without screen	with screen	without screen	with screen	without screen	with screen	without screen
flaw located at source side	#1	2.64	1.62	2.60	1.60	2.55	1.58	0.80	1.00
	#2	3.19	1.72	3.01	1.64	2.89	1.59	1.50	1.60
	#3	3.27	2.00	3.02	1.81	2.92	1.74	2.50	2.71
	#4	3.30	2.07	2.98	1.79	2.89	1.71	3.56	3.50
flaw located at film side	#1	3.00	1.46	2.93	1.44	2.87	1.42	1.17	1.00
	#2	3.18	1.60	2.99	1.44	2.89	1.35	1.90	1.78
	#3	3.27	1.59	3.01	1.43	2.93	1.37	3.25	2.67
	#4	3.25	1.66	2.94	1.43	2.87	1.37	4.43	3.83

\*NAKAMURA experimental result

Table. 3 80mm FTD로 촬영한 방사선투과사진에서 추정된 결함 높이

mean density at A side		mean density at B side		calculated density		true flaw height (mm)	estimated flaw height (mm)	
with screen (a)	without screen (b)	with screen (c)	without screen (d)	with screen $\frac{(a)+(c)}{2}$	without screen $\frac{(b)+(d)}{2}$		with screen	without screen
2.597	1.600	2.933	1.440	2.765	1.520	1.13	0.985	1.000
3.030	1.650	3.020	1.463	3.025	1.557	2.10	1.700	1.690
3.070	1.850	3.070	1.463	3.070	1.657	2.97	2.875	2.690
3.057	1.857	3.020	1.487	3.038	1.672	3.98	3.995	3.665



(a) with screen

(b) without screen

Fig. 2 추정결함 높이와 평균농도 사이의 상관관계

## 5. 결 론

Ir-192 방사성동위원소를 사용한 방사선투과사진의 농도차에 의한 결함 깊이와 결함 높이 평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 80mm FTD가 4.4mm FTD에 비하여 농도차의 변화 폭이 작은 것으로 조사되었다. 이는 산란선량의 영향에 의한 것으로서, 80mm FTD가 산란선량의 영향을 최소화할 수 있음을 알 수 있다.
- 2) 결함깊이에 따른 사진 농도의 변화는 결함 깊이가 증가함에 따라 2.385부터 2.06까지 감소하는 경향을 나타내었고, 이를 선형 회기분석한 결과 사진농도와 추정되는 결함 깊이는 선형적 관계를 보였다.
- 3) 사진 농도와 결함 높이의 실험적 관계로부터 사진 농도를 평가함으로써 결함 높이의 평가가 가능한 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Metal handbook, 9th Edition, Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASTM International, Vol.17, pp.310, 1996
2. Lawrence E. Bryant, "Nondestructive Testing Handbook", Vol. 3, Published by the American Society for Nondestructive Testing, pp.317-326, pp.808-816, 1985.
3. "Radiography in Modern Industry", 4th Edition, Eastman Kodak Company, pp.114, 1980.
4. 中村和夫, 平山一男, 橋本健二, 中村正宏, 加藤光昭, "放射線透過試験による  
ぎず高さの定量化", (第1報), 日本非破壊検査協會, Vol. 48, No. 7, pp.421-429, 1999.
5. 中村和夫, 平山一男, 橋本健二, 中村正宏, 加藤光昭, "放射線透過試験による  
ぎず高さの定量化", (第2報), 日本非破壊検査協會, Vol. 48, No. 7, pp.430-436, 1999.
6. 中村和夫, 平山一男, 橋本健二, 中村正宏, 加藤光昭, "放射線透過試験による  
ぎず高さの定量化", (第3報), 日本非破壊検査協會, Vol. 48, No. 7, pp.437-442, 1999.
7. 仙田富男, 平山一男, 小野桂一郎, 古橋次郎, "余盛が放射線透過寫眞の像質に  
及ぼす影響", (社)日本非破壊検査協會關西支部研究發表會, pp.65-68, 1979.
8. Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Hemisphere, pp.50-57, 1989.
9. 仙田富男, 平山一男, 山中久志, 横山計次, 中村和夫, "X線透過試験における平板試験体  
の散亂比に関する研究", (第1報), 日本非破壊検査協會, Vol. 36, No. 6, pp.411-418, 1987.
10. B. D. Cullity, "Elements of X-ray Diffraction", 2nd Edition, Published by  
Addison Wesley, pp.13-16, 1977.
11. Nicholas Tsoufanidis, "Measurement and Detection of Radiation", John  
Wiley & Sons, pp.141-153, 1976.