

방사선투과사진에 의한 결함깊이 및 높이의 평가

강계명[†] · 박은수 · 심언덕*

서울산업대학교 신소재공학과

*동양검사기술(주)

Estimation of Flaw Depth and Height by Radiography

Kae Myung Kang[†], Un Su Park and Eon Deok Sim*

Dept. of Materials Science & Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743

*Dong Yang Inspection Technology Co. LTD, Seoul, 135-260

(2002년 7월 19일 받음, 2002년 8월 13일 최종수정본 받음)

Abstract The three-dimensional estimation on the depth and height of flaw by using the difference of radiographic contrast density was studied. First, the specimens having artificial flaws of various depths and heights were prepared and the radiographic testing was performed. The radiographic depth of flaw was investigated and estimated on the effect of the scattered radiation with the change of distance between flaw and film. The height of flaw was estimated from the radiographic test with the reference specimen. The radiographic contrast with flaw depth decreased with increasing the flaw depth. The scattered radiation increased with increasing flaw depth and varied with the location between flaw and film. However, in the case of flaw height, the contrast density increased with increasing flaw height. It is thought due to the change in volume generating the scattered radiation which reaches a film.

Key words: radiography, contrast density, flaw depth, flaw height, scattered radiation

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.¹⁾

특히 방사선투과시험에 의한 결함 해석과 평가는 투과사진 상에 나타나는 결함의 상으로부터 결함 형상과 결함 길이는 직접 확인할 수 있으나, 결함 깊이와 결함 높이의 해석에는 어려움이 따른다. 이에 입체방사선투과검사법(Stereo-radiography)과 parallax법 등으로 현재 결함 깊이와 높이를 해석하고 있다.^{2,3)} 그러나 이러한 방법은 결함 검출을 위하여 조사방향을 여러 방향으로 하여 방사선투과사진을 다수 촬영하여야 하고, 촬영된 결함의 분석과 해석에도 숙련된 평가 기법이 요구되는 등 많은 문제점을 내포하고 있다.

최근 이의 개선 방안으로 투과사진의 농도차에 의한 결함 높이의 평가에 관한 연구가 Nakamura 등에 의하여 연구·보고되고 있다.^{4~7)} 그러나 이 역시 결함부의 농도는 결함 높이뿐만 아니라 결함 길이, 결함 깊이 및 필름-시험체간 거리 등의 변수에 좌우됨으로 결함부의 농도만의 정보를 이용하여 결함높이의 정확한 추정에는 아직 도달하지 못한 실

정이다.

따라서 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 거리가 동일한 조건하에서 필름-시험체간 거리(Film-to-Testspecimen-Distance : 이하 FTD)를 두 조건으로 변화시켜 사진 농도에 미치는 산란선량율의 영향에 관하여 조사하였고, 대비 시험편을 사용한 투과사진으로부터 결함 높이의 평가가 가능함을 보이고져 본 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2-1. 시험편 제작

시험편 제작은 배관재료로 널리 사용되는 SM45C 강재를 사용하였다. 시험편은 Fig. 1과 같이 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. 이들 결함을 그림에 #1, #2, #3, #4로 각각 표기하였다. 한편 대비시험편은 시험편과 동일한 재질로서 $\phi : 20$ mm, $h : 1$ mm인 원판

[†] E-mail: littbird@snut.ac.kr

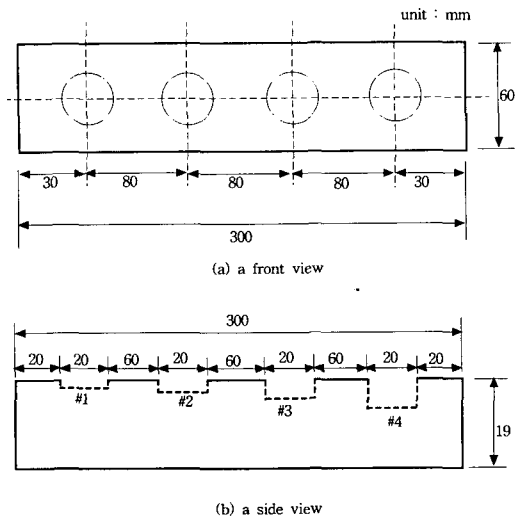


Fig. 1. Schematic diagram of specimen

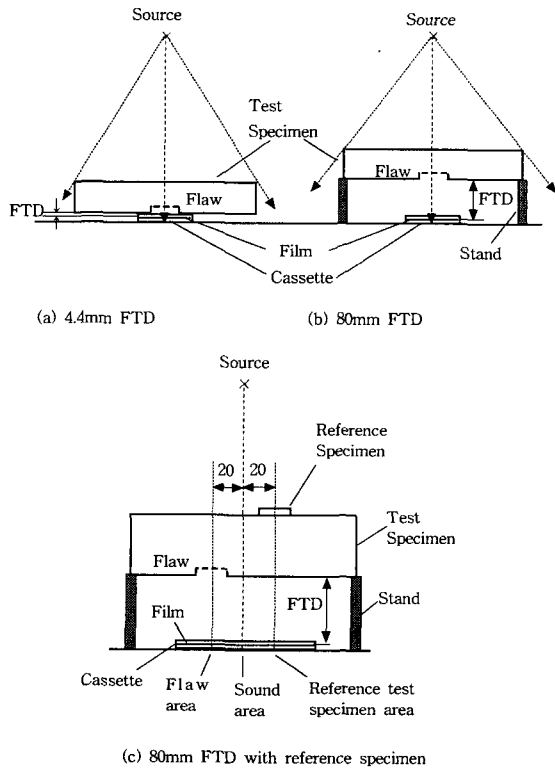


Fig. 2. Experimental method of the radiography

상으로 제작하였다. 이와 같이 결함의 깊이 변화와 높이의 변화를 인위적 가공, 제작된 시험편의 방사선투과사진으로부터, 먼저 결함 깊이에 따른 사진농도의 변화와 산란선량이 사진농도에 미치는 영향을 조사하고, 또한 대비시험편을 사용하여 촬영한 방사선투과사진으로부터 결함 높이를 조사, 검토하고자 하였다.

2-2. 방사선투과사진 촬영

방사선 선원으로 방사능 강도는 21Ci, 선원의 크기는 $\phi 2.7 \times h 2.5\text{mm}$ 인 Ir-192를 사용하여 방사선투과시험하였다. 이때 선원과 필름과의 거리는 600mm로 일정하게 유지하였고, 빛에 노출되지 않도록 경질 고무재질로 된 카세트

속에 FUJI #80 필름을 넣어 방사선투과사진을 촬영하였다. 방사선 투과시 FTD 변화에 따른 산란선량의 영향을 조사하기 위하여, Fig. 2와 같이 FTD의 변화를 주어 4개의 인공 결함과 대비시험편에 대하여 방사선투과사진을 촬영하였다. 이때 FTD는 Fig. 2(a)와 같은 4.4mm의 경우와 Fig. 2(b)의 80mm의 경우로 하였고, 이때 방사선원의 노출시간은 11.8분으로 방사선 조사하였다. 또한 각각의 동일한 FTD 조건하에서 방사선원의 위치가 인공 결함의 상부(A면)와 하부(B면)에 위치함에 따른 산란선량의 변화를 조사하였다. 또한 본 실험의 방사선투과사진 촬영에서 산란방사선을 흡수하고 1차 방사선량을 증가시켜 명암도와 선명도를 높이고져 증감지를 사용하여 방사선투과시험하였다. 실험에 사용된 증감지는 두께 0.0127mm의 연박 증감지를 사용하였고, 증감지 사용시 방사선원 노출한 시간은 18.9분으로 하였다.

2-3. 방사선투과사진 농도 측정

방사선투과시킨 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 감광유체에 남아 있는 감광되지 않는 브롬화은을 제거하여 안정된 상으로 정착시켰다. 정착 과정이 끝난 필름은 1분간 세척하였고, 필름상의 물방울을 제거하기 위하여 적십액에 1분간 유지 후, 필름을 50℃의 공기로 40분간 건조시켰다.²⁾

이와같이 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 사진농도 값으로 정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 방사선 사진 촬영

방사선 사진 농도에 미치는 제2차 방사선 즉, 시험편에 의해 산란된 산란선의 산란선량의 영향은 방사선 선원체와 필름간의 거리(Source-to-Film Distance : SFD)와 필름과 시험체간의 거리(Film-to-Testspecimen-Distance : FTD)에 영향을 받게 된다.^{8,9)} 그러나 본 실험조건에서는 SFD는 일정거리로 유지하였고, FTD를 4.4mm와 80mm의 두 조건으로 변화시켜 산란선량의 영향에 따른 방사선 사진 농도차를 조사하였다.

Table. 1은 FTD의 변화에 따른 방사선 사진 농도의 측정 결과와 증감지 사용 유·무에 따른 사진 농도의 측정 결과를 나타내고 있다. 특히 본 연구에서 도입한 보정농도는 실제 현장의 방사선투과사진의 사진농도를 2.0~4.0 범위로 현상하는 것이 최적의 사진 현상조건으로 있어, 이를 고려하여 다음과 같은, corrected density : 2.0 = measured density at the flaw area : measured density at the sound area의 측정된 농도와 보정농도를 건전부와 결함부의 경우로 대비시켜 보정된 결함부의 농도로 결정하였고, 결함의 깊이와 높이 평가에 표준화된 사진 농도 값으로 환

Table. 1 Film contrast densities with flaw depths and FTDs

division		flaw number	density at sound area		density at flaw area		corrected density	
			without screen (a)	with screen (b)	without screen (c)	with screen (d)	without screen (c) ÷ $\frac{(a)}{2}$	with screen (d) ÷ $\frac{(b)}{2}$
4.4mm FTD	flaw located at source side (A side)	# 1	1.74	2.71	1.79	2.83	2.06	2.09
		# 2	1.75	2.67	1.87	2.87	2.14	2.15
		# 3	1.75	2.70	2.03	3.02	2.18	2.24
		# 4	1.81	2.97	2.05	3.47	2.27	2.34
	flaw located at film side (B side)	# 1	1.76	2.70	1.84	2.87	2.09	2.13
		# 2	1.80	2.67	1.98	2.93	2.20	2.19
		# 3	1.66	2.60	1.89	3.00	2.28	2.31
		# 4	1.67	2.53	2.00	3.07	2.40	2.43
80mm FTD	flaw located at source side (A side)	# 1	1.60	2.65	1.63	2.74	2.04	2.07
		# 2	1.59	2.49	1.68	2.65	2.11	2.13
		# 3	1.55	2.90	1.67	3.18	2.15	2.19
		# 4	1.64	2.50	1.81	2.86	2.21	2.29
	flaw located at film side (B side)	# 1	1.60	2.52	1.64	2.58	2.05	2.05
		# 2	1.63	2.42	1.73	2.54	2.12	2.10
		# 3	1.59	2.45	1.72	2.66	2.16	2.17
		# 4	1.57	2.40	1.76	2.69	2.24	2.24

용하였다. FTD가 4.4mm인 경우에는 사진농도가 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 80mm인 경우 사진농도가 2.07에서 2.24까지 변화하는 것으로 조사되었다. 이들 결과로부터 FTD가 80mm인 경우가 FTD가 4.4mm인 경우에 비하여 제2차 방사선에 의한 산란선량의 영향이 감소되는 것을 알 수 있었다.

또한, 증감지의 사용 유·무에 따라 사진의 선명도는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 사진 선명도의 차가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 실험방법에서 언급한 바와 같이 방사선투과사진 농도는 제1차 방사선량과 결합에 기인한 제2차 방사선량(산란방사선량)의 영향이 함께 중복되어 사진 상에 나타나는 결과에 기인하기 때문이다.^{10,11)} 따라서 본 실험에서는 제2차 방사선량의 영향을 적게 받는 것으로 조사된 80mm FTD의 사진농도의 측정 결과를 기준으로 정하여 본 실험의 결합의 깊이와 높이를 평가하고자 하였다.

결합 깊이의 평가를 위하여 FTD의 변화에 따른 사진 농도를 측정하고 이로부터 결합의 깊이를 평가하였다. FTD를 각각 4.4mm와 80mm로 유지하여 측정된 사진 농도의 측정 결과와 결합을 선원측에 둔 경우(A면)와 필름측에 둔 경우(B면) 및 증감지의 사용 유·무에 따른 경우에 대한 사진 농도의 시험 결과를 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1로부터 알 수 있듯이 FTD의 변화와 증감지 사용 유·무에 무관하게 측정되어진 사진농도는 결합의 깊이가 증가됨에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 한편 A면과 B면에서 측정되어진 사진 농도 값에서 산란선량의 영향이 각기 다른 것을 쓸 수 있다. 이에 본 연구에서는 A면과 B면의 결합 위치 변화에 따른 사진 농도의 산란선량을 영향을 함께 고려하기 위하여 A면과 B면에서 측정된 사진농도의 평균농도를 본 연구의 사진 농도로 정하여 이의 측정 결과를 Table. 2에 나타내었다. 또한 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 Fig. 4(a)는 FTD가 4.4mm인 경우이고, Fig. 4(b)는 FTD가 80mm인 경우로서, 이들 결과를 선형 회귀분석하여 측정된 평균농도와 결합 깊이와의 관계식을 구하였다. 측정된 평균농도와 결합 깊이의 관계식은 모두 선형적 관계를 나타내었고, 이들 관계로부터 사진 농도의 측정으로 결합의 깊이를 평가할 수 있는 것으로 생각된다.

다음은 선형 회귀분석으로 얻은 결과식으로,

$$y = 35.85 - 8.77x \quad [R = 0.9] \quad (1)$$

at 4.4mm FTD with screen

$$y = 39.15 - 10.40x \quad [R = 0.96] \quad (2)$$

at 4.4mm FTD without screen

$$y = 35.60 - 8.78x \quad [R = 0.96] \quad (3)$$

at 80mm FTD with screen

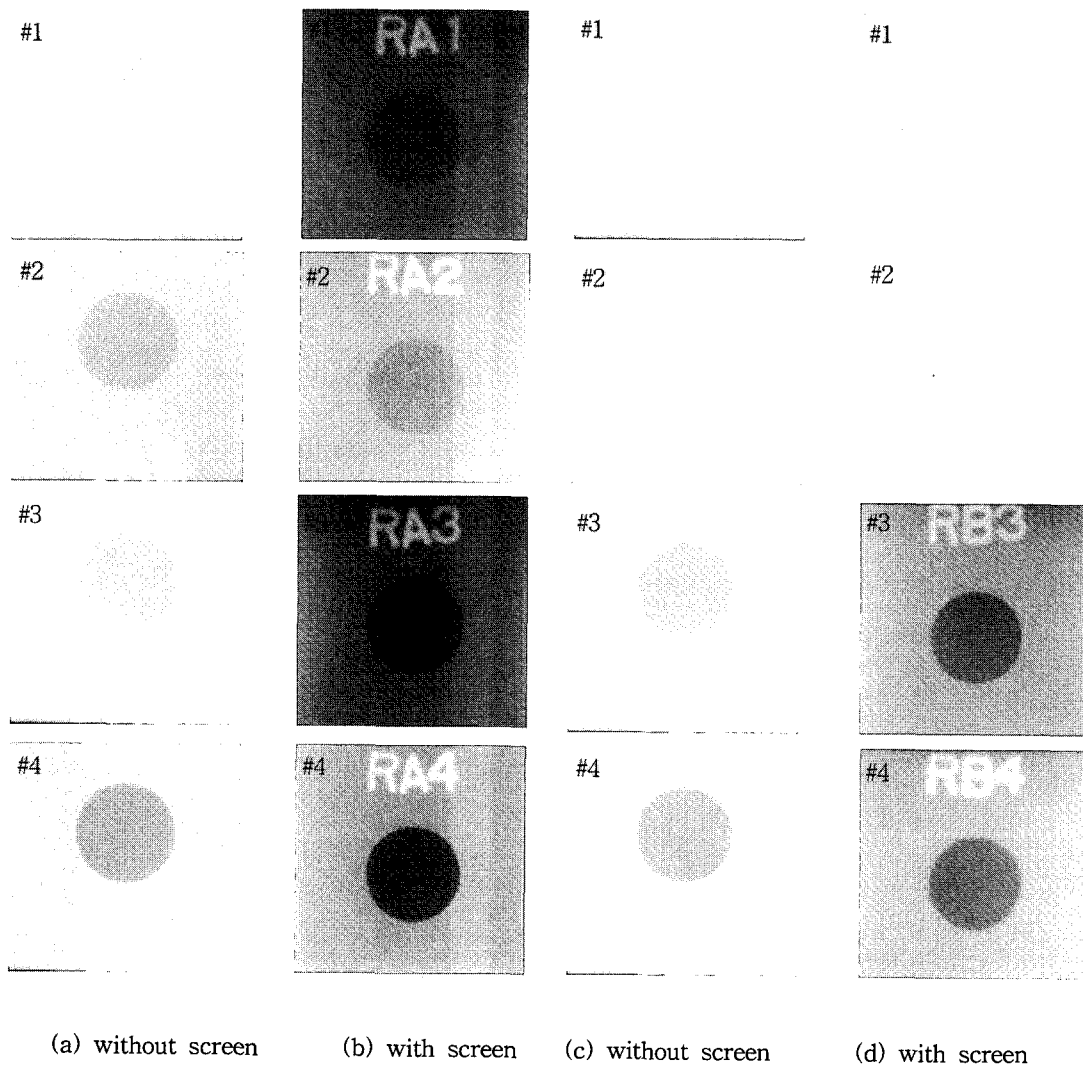


Fig. 3. 80mm FTD radiographic photographs of flaw located at source side (a), (b) and film side (c), (d).

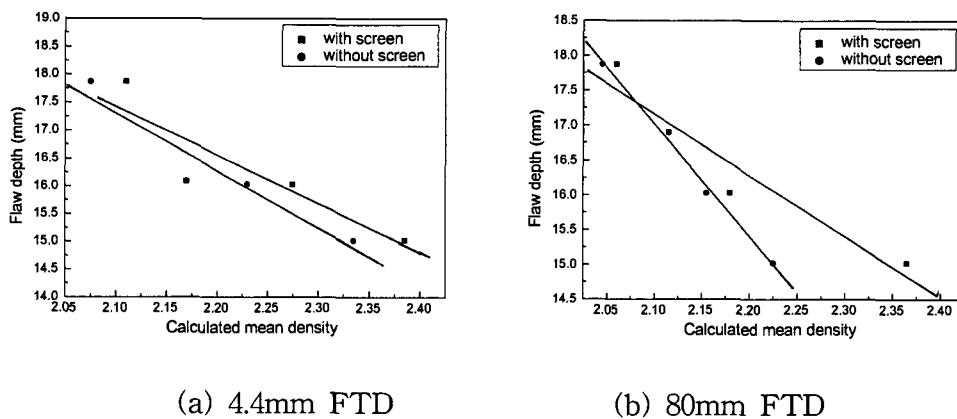


Fig. 4. Relationship between mean density and calculated flaw depth

$$y = 50.85 - 16.11x \quad [R = 0.99] \quad (4)$$

at 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 경우 보다 80mm의 경우에서 상관성이 증가하는 것을 알 수 있다. 이들 관계식으로

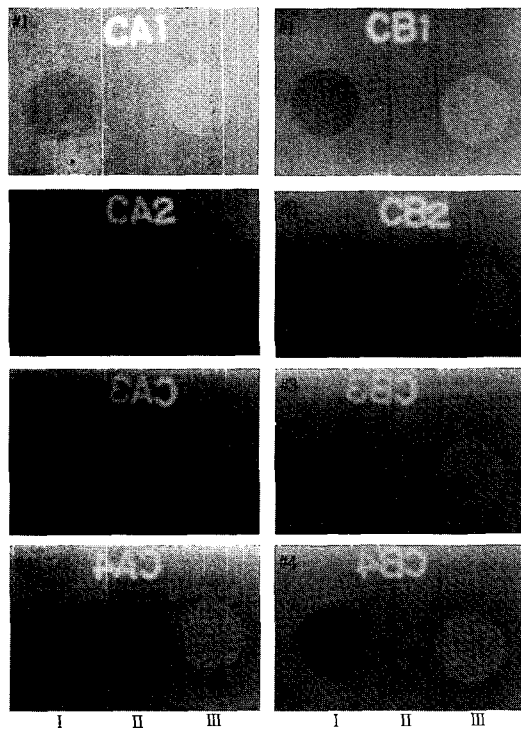
평균 사진 농도로부터 결함의 깊이가 평가될 수 있는 유효한 파라미터로 작용함을 알 수 있다.

3-3. 결함 높이의 평가

결함 높이의 평가를 위하여 대비시험편을 사용하여 방사선투과시험한 80mm FTD의 경우에서 증감지의 사용 유·무에 따른 사진 농도와 결함 깊이와의 관계를 Fig. 5와 Table. 3 및 Table. 4에 각각 나타내었다. Fig. 5는 대비시

Table 2. Radiographic contrast density according to the variation of FTDs

measured density flaw depth (mm)		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



I : flaw part, II : sound part, III : reference part

(a) flaw located at source side(A side) (b) flaw located at film side (B side)

Fig. 5. Radiography of the reference specimen with screen

험편을 사용하여 촬영한 방사선투과사진으로 사진 상에 I 은 결함부, II 는 건전부, 그리고 III 은 대비시험편부를 나타내고 있다. 앞서 결함 깊이와는 달리 건전부와 대비시험편부에 의한 사진 농도 변화를 함께 고려하였다. 전체적으로 결함 높이가 증가함에 따라 각 부위의 사진 농도는 증가하는 것을 볼 수 있다. Table. 3은 측정된 사진 농도와 Nakamura 등의 결함 높이 평가 결과이다. 즉, Nakamura 등의 결함 높이 평가는 A 면과 B 면 각각의 사진 농도를 독립적으로 고려하여 결함의 높이를 추정하였다.⁴⁻⁶⁾ 이들 추정치는 증감지가 있는 경우 A 면에서는 결함 높이가 증가함에 따라 0.8에서 3.56까지 나타났고, 증감지가 없는 경우는

1.0에서 3.5까지 변화하는 것으로 추정하였다. 그러나 이들 결함 높이의 추정치는 실제 결함의 높이와는 다소 오차 범위가 큰 것을 알 수 있다.

이에 본 연구에서는 결함 높이를 A 면과 B 면의 사진 농도를 앞서 결함 깊이 평가에서와 같이, 함께 고려하여 평균 농도를 구하고 이에 대응하는 것으로 결함 높이를 평가하고자 하였다. 이들 결과 추정치가 Table. 4로서 사진 농도와 재평가되어진 결함 높이의 관계를 나타내고 있다. 증감지가 있는 경우 0.985에서 3.995까지 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,

$$y = -21.85 + 15.05x \quad [R=0.96] \quad \text{without screen} \quad (5)$$

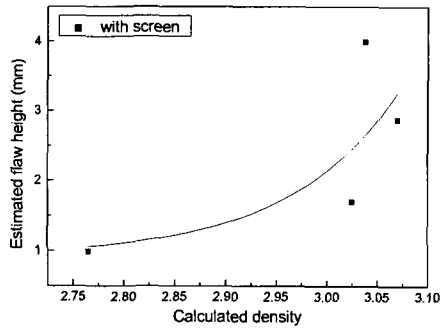
$$y = 0.92 + 8.03E-13 \exp\left[\frac{x}{0.11}\right] \quad \text{with screen} \quad (6)$$

이들 결과를 Fig. 6에 나타내었듯이 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. 사진 농도를 이용한 결함의 깊이와 높이의 평가가 정량적으로 평가가능한 것으로 생각된다.

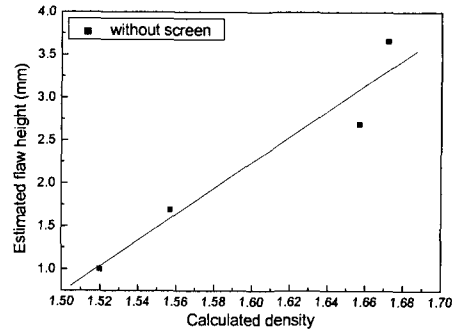
4. 결 론

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 산란선량 등의 영향을 최소화할 수 있음을 알 수 있다.



(a) with screen



(b) without screen

Fig. 6. Relationship between mean density and estimated flaw height at 80mm FTD

Table 3. Flaw height estimated on the radiographic contrast

division	# of flat bottom hole	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[5]

Table 4. Estimated flaw height with radiographic contrast measured at 80mm FTD

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

2) 결함깊이에 따른 사진 농도의 변화는 결함 깊이가 증가함에 따라 2.385부터 2.06까지 감소하는 경향을 나타내

었고, 이를 선형 회기분석한 결과 사진농도와 추정되는 결함 깊이는 선형적 관계를 보였다.

3) 사진 농도 변화와 결함 높이의 실험적 관계로부터 사진 농도를 평가함으로써 결함 높이의 평가가 가능한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 서울산업대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Metal handbook, 9th ed., Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASTM International, 17, 310 (1996).
2. Lawrence E. Bryant, Nondestructive Testing Handbook, ASNT, 3, 317 (1985).
3. Radiography in Modern Industry, 4th ed., Eastman Kodak Company, 114 (1980).
4. 中村和夫, 平山一男, 橋本健二, 中村正宏, 加藤光昭, 日本非破壊検査協會, 48(7), 421 (1999).
5. 中村和夫, 平山一男, 橋本健二, 中村正宏, 加藤光昭, 日本非破壊検査協會, 48(7), 430 (1999).
6. 中村和夫, 平山一男, 橋本健二, 中村正宏, 加藤光昭, 日本非破壊検査協會, 48(7), 437 (1999).
7. 仙田富男, 平山一男, 山中久志, 横山計次, 中村和夫, 日本非破壊検査協會, 36(6), 411 (1987).
8. Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Hemisphere, 50 (1989).
9. 仙田富男, 平山一男, 小野桂一郎, 古橋次郎, (社)日本非破壊検査協會關西支部 研究發表會, 65 (1979).
10. B.D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction, 2nd ed., Addison Wesley, 13 (1977).
11. Nicholas Tsoulfanidis, Measurement and Detection of Radiation, John Wiley & Sons, 141 (1976).