

원전감육배관 UT 두께측정 결과의 신뢰도 평가를 위한 다자비교시험

이승준[†]·이원근*·이준현**·이성호***

Round Robin Test for Reliability Evaluation of Ultrasonic Thickness Measurement Results in Nuclear Power Plant Pipelines

Seung-Joon Lee, Won-Geun Yi, Joon-Hyun Lee and Sung-Ho Lee

Key Words: Confidence Interval(신뢰구간), Gage R&R(정밀도 분석), Round Robin Test(다자비교
실험), Wall Thinning(감육)

Abstract

The reduction of pipe-thickness induced by flow accelerated corrosion (FAC) is one of the most serious problems on the maintenance of piping system in nuclear power plants (NPP). If the thickness of a pipe component is reduced below the critical level, it cannot sustain pressure and consequently results in leakage or rupture. For this reason, wall thinning by FAC has been inspected in secondary side piping systems in NPPs. In this research Round Robin Test (RRT) was conducted to verify confidence of wall thinning measurement system in NPP. 12 inspectors from 3 companies participated and 23 specimens were used according to standard practice in RRT. The gage R&R analysis was introduced in regard to repeatability and reproducibility that are affected to measurement system errors. Confidence intervals of thickness measurement system were obtained.

1. 서 론

기호설명

- R : 배관 공칭 반경
 t : 배관 공칭 두께
 μ : 각 부분의 측정값의 평균
 p_i : 각 측정부분의 영향
 o_j : 측정자 j 의 영향
 $(op)_{ij}$: 측정부분 i 와 측정자 j 의 상호작용
 e_{ijk} : 반복성에 기초한 오차
 n : 측정횟수

원전 배관의 유동가속부식(FAC) 현상은 원전 사고의 주요 원인 중의 하나이다. 이러한 FAC에 의한 국부적인 감육을 조기에 발견하고 파손을 방지하기 위하여 원자력 발전소에서는 정기적으로 초음파 두께검사에 의한 감육 검사를 실시한다. 여기서 측정된 두께데이터는 데이터 베이스화하여 CHECWORKS 프로그램에 저장되어 배관의 감육 정도와 감육 속도를 평가하는 요소로서 파괴 역학 해석(Fracture mechanic analysis)에 의한 배관의 잔여 수명과 검사 주기를 평가하는데 사용된다. 따라서 과대 또는 과소하게 측정된 두께 데이터는 원전 배관 관리에 큰 문제를 일으킬 수 있다. 과대평가된 배관은 안전 운전에 대한 위험을 초래하게 되고 과소평가된 배관은 교체 등에 의한 과도한 관리 비용을 불러일으킬 수 있다. 아직까지 비파괴 두께검사 결과가 어느 정도의

† 이승준, 부산대학교 대학원 기계공학부
E-mail : leeseungjoon@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3078 FAX : (051)512-9835

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** 부산대학교 기계공학부

*** 한국전력공사 전력연구원

신뢰도를 가지고 있는지에 대한 평가는 국내에서 수행된 바가 없다. 이에 본 연구에서는 국내 초음파 두께검사의 신뢰도를 파악하고 기량검증을 하기 위한 Round Robin Test 방법을 수립하여, 원전배관 감육 관리의 효율성의 향상을 위한 측정 결과의 통계적 신뢰도 평가를 수행한다.

2. 다자비교시험

2.1 다자비교시험 시험편

초음파 두께검사 결과의 신뢰도 파악을 위하여 다음과 같은 방법으로 다자 비교 시험을 계획하였다.

먼저 감육이 많이 발생하는 원전 2차 계통 탄소강 배관의 데이터 베이스를 근거하여 배관의 재질 및 주요 직경에 따른 시험편을 준비한다. 직관의 경우 ASTM A106 Grade B를 선정하고, fitting 타입의 경우 ASTM A234 WPB를 선정하였다. 사용 빈도가 높은 2, 4, 6, 8, 12 inch의 인공 시험편과, 발전소 현장에서 사용되었던 3.5 inch와 16 inch의 현장 시험편을 각각 준비하였다. 인공 감육 시험편의 FAC 국부 감육 형상은 아래 식(1)에 의해 각각 길이와 폭을 계산하였고, 깊이는 공칭 두께의 20~80%로 다양하게 가공하였다. 다자비교 시험을 위한 현장 시험편의 경우 자연 감육 상태를 보존하여 사용하였다.

$$\begin{aligned} Length &= 4\sqrt{Rt} \\ Width &= \pi R \times 0.25 \end{aligned} \quad (1)$$

준비된 시험편에 측정위치를 선정하기 위해 표준 기행 절차에 따라 Table 1과 같이 그리드를 작성하였다.

Table 1 Grid marking criteria in pipelines

Nominal diameter (inch)	Maximum grid size (inch)	Main Grid No.	
		Longitudinal	Circumferential
2	1.000	7	7
3.5	1.000	12	12
4	1.178	12	12
6	1.734	12	12
8	2.258	12	12
12	3.338	12	12
16	4.189	12	12

인공 감육 시험편과 현장 시험편에 대한 전경이 각각 Fig. 1에 나타나 있다.

다자비교시험에 사용된 시험편은 총 23 set이며 각 요소들에 대한 직경, 공칭두께, 감육 개수가 Table 2에 있다.

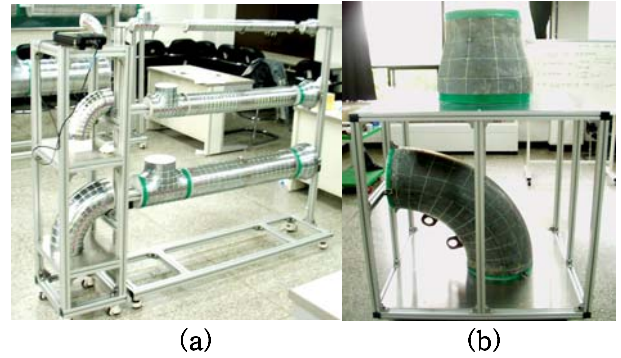


Fig. 1 Round Robin test specimens
(a) Artificial wall thinned specimens
(b) Natural wall thinned specimens

Table 2 Round Robin Test specimens

Type	Nominal thickness (mm)	Flaw No.
2"	pipe	7
	elbow	2
	tee	3
	reducer	2
4"	pipe	7
	elbow	2
	tee	3
	reducer	2
6"	pipe	7
	elbow	2
	tee	3
	reducer	2
8"	pipe	7
	elbow	2
	tee	3
	reducer	2
12"	pipe	7
	elbow	2
	tee	3
3.5" Elbow	5.49	Natural
3.5" Tee	5.49	Natural
16" Elbow	12.70	Natural
16" Expander	30.96	Natural

2.2 다자비교 시험 방법

다자비교 시험을 수행한 검사자는 Table 3에서와 같이 경상 검사자 3명을 포함하여 총 12명의 ASNT Level 2 이상의 검사자로 구성되며 이들 검사자 모두는 실제 원자력발전소의 감육 배관 검사 경력을 가지고 있다. 다자비교 시험에 사용된 두께 검사 장비는 현재 원전 배관 두께 검사에 사용되는 P사의 규정 장비와 탐촉자를 사용하였다. 다자비교 시험 절차는 표준기행에 따라 교정과 측정을 수행하였고 통계적 신뢰도 분석을 위해 전체 시험편에 대해 3회 반복 측정하였다. 전체 측정 데이터는 다음 식(2)와 같다.

$$4group \times 3inspectors \times 2,131grid \times 3time \quad (2) \\ = 76,716point$$

Table 3 Inspectors for Round Robin test

Group	No.	Level(ASNT)
A	1	II
	2	II
	3	II
B	4	II
	5	II
	6	II
C	7	II
	8	III
	9	II
D	10	III
	11	II
	12	II

3. 신뢰도 분석 기법

측정 시스템의 신뢰도 분석은 정밀도 분석과 정확도 분석으로 이뤄진다. 정밀도 분석은 측정값들의 산포가 평균값으로부터 퍼져 있는 정도인 편차를 분석하는 기법으로서 일반적으로 Gage R&R이라고 불리며 반복성(Repeatability)과 재현성(Reproducibility)에 의한 편차를 각각 분석하여, 신뢰구간을 선정해 주는 통계 분석법이다. 한편 정확도 분석은 측정값들의 평균값이 기준값(Reference)에서 벗어나 있는 편차(Bias)를 측정하는 기법으로서 편차 분석이라고 불리며, 각 지점의 측정값들의 평균값이 정밀 측정된 기준값과의 차이를 분석해 주는 기법이다.

3.1 Gage R&R 분석

측정 결과의 편차 성분에는 반복성과 재현성 성분이 있다. 반복성 편차 성분은 동일 측정자가 동일 계측기를 가지고 동일한 부분을 반복 측정하였을 때 발생하는 편차를 나타낸다. 반복성에 의한 편차 요소는 측정 과정에서 야기되는 오차 요인과 측정 장비 자체의 오차요인이 있다. 재현성은 동일한 계측기로 동일한 부분을 측정할 때 측정자 간에 발생하는 편차를 나타낸다. 재현성에 의한 편차 요소는 측정자 간의 기량차이와 측정 방법의 차이 등을 포함한다. 이와 같은 반복성과 재현성에 의한 편차 성분의 합을 Gage R&R 값이라 한다. 초음파 두께측정 시스템의 Gage R&R 분석을 위한 측정값의 데이터 y_{ijk} 의 구조식은 아래 식(3)과 같다.

$$y_{ijk} = \mu + p_i + o_j + (op)_{ij} + e_{ijk} \quad (3)$$

그리고 p_i , o_j , $(op)_{ij}$, e_{ijk} 는 다음과 같은 정규 분포를 따르며, 식(4)와 식(5), 식(6) 그리고 식(7)과 같이 각각 독립이라고 가정한다.

$$p_i \sim N(0, \sigma_p^2) \quad (4)$$

$$o_j \sim N(0, \sigma_o^2) \quad (5)$$

$$(op)_{ij} \sim N(0, \sigma_{op}^2) \quad (6)$$

$$e_{ijk} \sim N(0, \sigma_e^2) \quad (7)$$

다음으로 분산 분석을 위해 각 성분의 제곱합 SS를 식(8)과 식(9), 식(10), 식(11) 그리고 식(12)과 같이 계산한다.

$$SS_p = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{y}_{i..} - \bar{y})^2 \quad (8)$$

$$SS_o = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{y}_{.j.} - \bar{y})^2 \quad (9)$$

$$SS_{op} = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y})^2 \quad (10)$$

$$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k (y_{ijk} - \bar{y})^2 \quad (11)$$

$$SS_e = SS_T - SS_p - SS_o - SS_{op} \quad (12)$$

위에서 구해진 각 성분의 제곱합 SS를 식(13)과 식(14), 식(15) 그리고 식(16)에 나타나 있는

자유도(d.f.: degree of freedom)로 나누어 다음과 같이 평균제곱(Mean Square) MS 를 각각 계산한다.

$$\sigma_p = p - 1 \quad (13)$$

$$\sigma_o = a - 1 \quad (14)$$

$$\sigma_{op} = (a - 1)(p - 1) \quad (15)$$

$$\sigma_e = ap(r - 1) \quad (16)$$

위에서 계산한 평균제곱의 기대값에서 각 분산에 추정값 기호를 사용하여 연립 방정식을 만들면 아래 식(17)과 식(18), 식(19) 그리고 식(20)과 같다.

$$MS_p = ar\hat{\sigma}_p^2 + r\hat{\sigma}_{op}^2 + \hat{\sigma}_e^2 \quad (17)$$

$$MS_o = pr\hat{\sigma}_o^2 + r\hat{\sigma}_{op}^2 + \hat{\sigma}_e^2 \quad (18)$$

$$MS_{op} = r\hat{\sigma}_{op}^2 + \hat{\sigma}_e^2 \quad (19)$$

$$MS_e = \hat{\sigma}_e^2 \quad (20)$$

위의 연립방정식을 각 분산에 관하여 정리하면, 다음 식(21)과 식(22), 식(23) 그리고 식(24)와 같은 각 분산의 불편추정량을 구할 수 있다. 만약 각 요인의 분산에 대한 추정값이 음수일 경우, 분산에 대한 추정값은 0으로 둔다.

$$\hat{\sigma}_p^2 = \frac{MS_p - MS_{op}}{ar} \quad (21)$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{MS_o - MS_{op}}{pr} \quad (22)$$

$$\hat{\sigma}_{op}^2 = \frac{MS_{op} - MS_e}{r} \quad (23)$$

$$\hat{\sigma}_e^2 = MS_e \quad (24)$$

이렇게 구해진 각 분산 성분으로부터 제공근을 취하여 표준편차 성분을 구할 수 있고, 이로부터 반복성에 관련된 표준편차 성분 식(25)와 재현성에 관련된 표준편차 성분 식(26)을 합하여 Gage R&R 값을 식(27)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{반복성 성분} : \hat{\sigma}_{Rpt} = \hat{\sigma}_e \quad (25)$$

$$\text{재현성 성분} : \hat{\sigma}_{Rpd} = \sqrt{\hat{\sigma}_o^2 + \hat{\sigma}_{op}^2} \quad (26)$$

$$\text{Gage R\&R} : \hat{\sigma}_{gage\ RR} = \sqrt{\hat{\sigma}_{Rpt}^2 + \hat{\sigma}_{Rpd}^2} \quad (27)$$

위와 같이 구해진 Gage R&R 표준편차 성분에 6을 곱하여 측정 시스템에 의한 편차성분의 신뢰구간 99.73%를 계산할 수 있다.

3.2 편의 분석

계측기로 동일 측정부위를 측정하였을 때 얻어지는 측정값의 평균(\bar{X}_i)과 측정지점의 기준값(Reference)의 차이를 편의라고 한다. 일반적으로 편의가 작을 경우를 정확도가 높다고 한다. 본 연구에서 기준값으로 정도가 높은 계측기로 반복 측정된 평균값을 취하였다. 평균 편의는 아래 식(28)과 같이 구할 수 있다.

$$Bias(y_i) = \bar{X}_i - Reference \quad (28)$$

$$Average\ Bias = \frac{\sum y_i}{n}$$

4. 실험결과

4.1 정밀도 분석

3그룹 총 9명의 검사자들로 구성된 일반검사자팀에 의해 반복 측정된 감육 시험편 두께 데이터의 Gage R&R 분석 결과가 Table 4에 나타나 있다. 각각의 데이터에 대해 99.73%의 신뢰구간을 가지는 편차범위를 나타내며, 평균 측정두께 대비 백분율을 괄호 안에 나타내었다.

Table 4 Gage R&R analysis of normal inspectors in wall-thinned specimens

Diameter (inch)	Pipe (±mm)	Elbow (±mm)	Tee (±mm)	Reducer (±mm)
2	0.212 (5.42%)	0.312 (7.92%)	0.306 (5.61%)	0.309 (4.97%)
3.5	-	0.374 (6.81%)	0.409 (7.45%)	-
4	0.169 (2.81%)	0.294 (4.68%)	0.280 (3.53%)	0.312 (3.89%)
6	0.164 (2.31%)	0.249 (3.48%)	0.246 (2.65%)	0.244 (2.90%)
8	0.159 (1.94%)	0.195 (2.35%)	0.217 (2.12%)	0.202 (1.99%)
12	0.167 (1.75%)	0.194 (2.11%)	0.191 (1.64%)	-
16	-	0.187 (1.47%)	-	0.702 (2.27%)
Average	0.174 (2.85%)	0.258 (4.12%)	0.275 (3.83%)	0.354 (3.20%)

Table 5 Gage R&R analysis of ordinary inspectors in wall-thinned specimens

Diameter (inch)	Pipe (±mm)	Elbow (±mm)	Tee (±mm)	Reducer (±mm)
2	0.103 (2.62%)	0.112 (2.83%)	0.194 (3.56%)	0.162 (2.60%)
3.5	-	0.106 (1.93%)	0.145 (2.64%)	-
4	0.108 (1.80%)	0.092 (1.46%)	0.178 (2.24%)	0.192 (2.39%)
6	0.100 (1.40%)	0.162 (2.26%)	0.169 (1.82%)	0.244 (2.89%)
8	0.144 (1.51%)	0.171 (2.06%)	0.159 (1.55%)	0.225 (2.21%)
12	0.141 (1.48%)	0.133 (1.44%)	0.135 (1.16%)	-
16	-	0.109 (0.86%)	-	0.369 (1.19%)
Average	0.119 (1.76%)	0.126 (1.83%)	0.163 (2.16%)	0.238 (2.26%)

경상에 있는 3명의 검사자들로 구성된 경상 그룹의 두께 측정 데이터에 대해 Gage R&R 분석한 결과가 Table 5에 나타나 있다. 일반검사자에 비해 경상검사자들은 직관인 경우 31.6%, 엘보의 경우 46.2%, 티의 경우 32.7%, 리듀서의 경우 43.9% 그리고 현장시험편의 경우 3.5 inch 요소의 경우 60% 이상, 16 inch 요소의 경우 40%가량 작은 편차구간을 나타내었다. 이는 다년간의 축적된 숙련도 차이에 의한 것으로 분석된다.

4.2 정확도 분석

일반검사자 그룹의 정밀도 분석 결과의 편차가 크게 발생하는 6 inch 이하 요소에 대해 편차 분석을 한 결과를 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Bias analysis of normal inspectors in wall-thinned specimens

Diameter (inch)	Elbow (mm)	Tee (mm)	Reducer (mm)
2	-0.054 (-1.39%)	0.005 (0.14%)	-0.028 (-0.71%)
3.5	-0.008 (-0.14%)	0.001 (-0.03%)	-
4	-0.023 (-0.39%)	-0.034 (-0.56%)	-0.098 (-1.63%)
6	-0.014 (-0.20%)	-0.001 (-0.02%)	-0.016 (-0.22%)
Average	-0.025 (-0.53%)	-0.007 (-0.10%)	-0.047 (-0.85%)

전체적으로 -편의가 발생하였는데, 이는 교정 오차가 교정 지점에서 멀어질수록 -편의가 발생하는 듀얼 탐촉자의 특성에 기인한 것이다. 한편 모든 결과는 허용 교정오차인 0.076 mm 이내로 발생하였음을 알 수 있다.

경상에 있는 검사자들로 구성된 경상그룹의 두께검사 데이터의 기준값과 평균 편차의 분석 결과가 Table 7에 나타나 있다. 평균 편차는 일반적인 교정오차에 해당하는 0.076 mm 이내로 작게 나타났고 평균 측정 두께 대비 백분율을 괄호 안에 나타내었다. 경상검사자의 경우 평균 편차가 대체로 작게 나타났으며 +편의와 -편의가 공존함을 알 수 있다. 경상검사자가 일반검사자에 비해 편차가 작게 나타났는데, 이는 교정오차에서 주로 발생함을 확인할 수 있다. 측정 재질의 음속 확인과 두께 확인 절차를 통해 교정오차에 의한 편차를 줄여줄 수 있을 것으로 분석된다.

4.3 신뢰구간 분석

경상검사자 그룹의 두께 측정 데이터에 대한 정밀도 분석인 Gage R&R 분석 결과와 정확도 분석인 편차 분석 결과를 토대로 $\pm 3\sigma$ 에 해당하는 99.73% 신뢰구간을 Table 8과 같이 구할 수 있다. 이는 정규분포를 따르는 임의의 측정값을 분석할 때 99.73%의 신뢰도를 가지기 위해 데이터가 가지는 오차범위를 나타낸다. 이렇게 분석된

Table 7 Bias analysis of ordinary inspectors in wall-thinned specimens

Diameter (inch)	Pipe (mm)	Elbow (mm)	Tee (mm)	Reducer (mm)
2	0.004 (0.09%)	0.000 (0.01%)	0.020 (0.52%)	0.015 (0.39%)
3.5	-	0.015 (0.27%)	0.013 (0.23%)	-
4	0.010 (0.16%)	0.011 (0.19%)	0.016 (0.26%)	0.004 (0.07%)
6	0.009 (0.12%)	-0.004 (-0.05%)	-0.002 (-0.08%)	-0.008 (-0.11%)
8	-0.002 (-0.03%)	-0.005 (-0.05%)	-0.002 (-0.03%)	0.004 (0.05%)
12	-0.004 (-0.04%)	0.002 (0.02%)	0.006 (0.06%)	-
16	-	0.003 (0.02%)	-	0.050 (0.16%)
Average	0.003 (0.08%)	0.003 (0.06%)	0.008 (0.16%)	0.013 (0.11%)

Table 8 Confidence intervals of ordinary inspector's thickness measurement results

Diameter (inch)	Pipe (%)	Elbow (%)	Tee (%)	Reducer (%)
2	+2.53 -2.72	+2.82 -2.84	+3.04 -4.08	+2.21 -2.99
3.5	-	+1.66 -2.21	+2.41 -2.87	-
4	+1.64 -1.96	+1.27 -1.65	+1.98 -2.50	+2.32 -2.46
6	-1.28 -1.52	+2.31 -2.20	+1.89 -1.74	+3.00 -2.77
8	+1.54 -1.48	+2.13 -2.00	+1.58 -1.52	+2.16 -2.26
12	+1.52 -1.43	+1.42 -1.46	+1.10 -1.22	-
16	-	+0.84 -0.88	-	+1.03 -1.35

Table 9 Confidence intervals of normal inspector's thickness measurement results

Diameter (inch)	Elbow (mm)	Tee (mm)	Reducer (mm)
2	+5.92 -3.17	+4.05 -4.25	+3.33 -2.44
3.5	+3.19 -2.95	+2.82 -2.86	-
4	+3.24 -2.49	+2.88 -2.03	+3.68 -1.24
6	+2.93 -2.53	+2.61 -2.55	+3.36 -2.99

초음파 두께 데이터의 신뢰구간을 통해 원전 배관요소의 측정값을 이용하면 감육량과 감육속도에 대한 평가시에 합리적인 판단을 내릴 수 있을 것이다.

또한 Gage R&R 분석결과 편차가 상대적으로 크게 발생하는 6 inch 이하 요소에 대한 정확도 분석과 정밀도 분석을 토대로 일반검사자 그룹의 99.73% 신뢰구간을 Table 9와 같이 구할 수 있다. 각각의 수치는 평균측정두께 대비 백분율을 나타낸다.

5. 고찰

다자비교시험 분석 결과를 토대로 국내 원전 배관 감육부 초음파 두께 검사 결과의 정밀도 분석과 정확도 분석을 할 수 있었다. 또한 이렇게

분석된 정밀도, 정확도 분석 결과를 토대로 초음파 두께 측정 시스템의 신뢰도를 검증할 수 있다. 검증된 신뢰구간을 통하여 초음파 두께 데이터를 이용하여 원전 배관부의 감육량, 감육속도 그리고 교체시기 등을 결정할 때 안전하고 합리적인 판단을 내리는데 도움을 줄 것이다. 한편 정상검사자들과 일반검사자들 간의 신뢰도 차이를 분석하여, 신뢰도 차이에 영향을 주는 인자와 오차요인을 분석하여 신뢰도 향상 방안을 제시할 수 있다.

후 기

본 연구는 한전전력연구원(KEPRI)의 감육배관 관리 및 적용 최적화 프로그램 개발 과제를 통해 수행되었음

참고문헌

- (1) ASME SE-797.2, 2004, "Standard Practice for Ultrasonic Examination of Longitudinal Welded Piping and Tubing", *BOILER & PRESSURE VESSEL CODE V*.
- (2) Electric Power Research Institute, 1998, "TR-103198-P1", *CHECWORKS Computer Program User Manual*.
- (3) Electric Power Research Institute, 2006, "NSAC-202L-R3", *Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program*.
- (4) ASTM E177-90a, "Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods".
- (5) Smith, J. O. and Abel, J. S., 1999, "Bark and ERB Bilinear Transforms", *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 7, No. 6, pp. 697-708.
- (6) Burdick, Richard K., and Larsen, Greg A., 1997, "Confidence Intervals on Measures of Variability in R&R Studies", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 3, pp. 261-273
- (7) P. G. Heasler, S. R. Doctor, 1996, "Piping Inspection Round Robin", *NUREG/CR-5068 PNNL-10475*.