

배관감육 평가를 위한 UT 측정 신뢰도 분석

윤 훈[†] · 황 경 모

KEPCO E&C, 경기도 용인시 기흥구 마북동 360-9
(2012년 5월 11일 접수, 2012년 8월 27일 수정, 2012년 8월 27일 채택)

Reliability Analysis of UT Measurement for Evaluating Pipe Wall Thinning in Nuclear Power Plants

Hun Yun[†] and Kyeong-mo Hwang

KEPCO E&C, 360-9, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea
(Received May 11, 2012; Revised August 27, 2012; Accepted August 27, 2012)

UT(Ultrasonic Test), one of the non-destructive tests, is the most common thickness measurement method for evaluating the wear rate in NPPs(Nuclear Power Plants). UT is used widely because it is easy and safe for use. However some amount of error inevitably occurs in attempting to measure the thickness. The error, that could make the thickness data thicker or thinner, may affect estimation of wear rate in pipes. NPPs are composed of a lot of pipes and components. Some of them are tested to check the current status during RFO(Re-Fueling Outage). Reliability analysis of UT is essential for evaluating pipe wear rate and establishing the long-term management plan in NPPs. This paper reviewed the cause of error occurrence and presented the UT data reliability analysis method. Also, this paper shows the application result of reliability analysis to the UT data acquired in NPPs.

Keywords : UT measurement, wall thinning, error, reliability, wear rate

1. 서 론

원전 2차측 탄소강 배관이나 기기는 고온, 고압의 유체에 노출되어 유동가속부식에 의한 감육이 발생한다. 유동가속 부식은 배관 내벽을 손상시키는 원인이 되며, 이러한 손상을 감시하기 위하여 지속적으로 벽두께가 얇아지고 있는지 확인할 필요가 있다.¹⁾ Fig. 1은 감육으로 인한 손상 사례이다. 현재 원전 2차측 배관의 두께 검사를 위하여 초음파 검사(Ultrasonic Test ; UT)를 수행하고 있다. 수많은 배관으로 구성되어 있는 원전 2차측 배관의 건전성을 평가하기 위하여 매주기 UT를 활용하여 배관의 두께를 측정하고 이력을 관리한다.

초음파 검사는 다양한 비파괴 검사방법 중의 하나로, 가장 널리 활용되고 있는 방법이다. 이는 대표적인 내부 체적검사 방법으로 방사선투과검사(Radiograph Test ; RT)에 비해 손쉽게 측정할 수 있으며, 특히 검사시 측정자와 주변 환경에 무해한 방법이다. 이러한 이유로 산업계에서 다양한 방면에 활용되고 있다. 그러나, 다양한 장점에도 불구하고 UT를 활용할 때에는 기기 자체의 오차 및 측정시 발생하는 오차에

유의해야 한다. UT 측정시 발생한 오차는 측정데이터를 실제보다 과소 또는 과대하게 만들어, 배관에서 발생한 감육량이 과소 또는 과대 평가될 수 있는 원인이 된다. 만약 UT 측정데이터의 오차로 인한 두께 과소 또는 과대 측정이 발생할 경우, 검사해야 할 시기를 지나치거나 불필요한 검사를 수행할 가능성이 있다.

이에 따라 본 논문에서는 원전 2차측 배관 두께 검사시 발생할 수 있는 UT 측정 오차 발생의 원인을 분석하고, 원전



Fig. 1. Damaged Pipe by FAC.

[†] Corresponding author: dbsgns77@kepc0-enc.com

배관의 감육 평가를 위한 신뢰도 분석 방법을 고안하였다. 또한, 고안된 UT 신뢰도 분석 방법을 실제 측정된 데이터에 적용하여 활용성을 확인하였다.

2. 원전 배관의 UT 평가

2.1 원전 2차측 배관 컴포넌트의 UT 측정

원전 2차측 배관 두께 평가를 위하여 UT를 활용하고 있다. 원전에서는 각 배관 컴포넌트를 하나의 관리대상으로 하여, Fig. 2와 같이 배관 표면에 Full-grid로 마킹하여 배관 전체 위치 및 방향을 맵핑한 후, 교차점에 탐촉자를 접촉하여 데이터를 취득한다. 이렇게 취득한 데이터는 Fig. 3과 같이 매트릭스 형태의 Text 파일로 관리한다. Text 파일은 2차측 배관 관리 프로그램인 CHECWORKS에 입력하여 배관의 두께이력을 관리하고, 평가를 통하여 감육 여부를 판단한다.²⁾

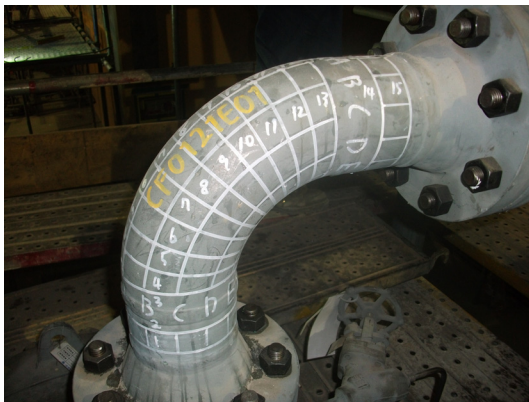


Fig. 2. Full-grid mapping.

파일(F)	편집(E)	서식(O)	보기(V)	도움말(H)				
0.313	0.32	0.335	0.346	0.35	0.353	0.358	0.382	0.37
0.34	0.345	0.347	0.351	0.361	0.375	0.377	0.381	0.365
0.33	0.339	0.345	0.36	0.366	0.376	0.384	0.383	0.366
0.315	0.333	0.337	0.357	0.372	0.386	0.394	0.387	0.369
0.304	0.322	0.335	0.352	0.369	0.388	0.402	0.389	0.369
0.304	0.315	0.33	0.35	0.364	0.395	0.405	0.39	0.362
0.305	0.316	0.333	0.353	0.365	0.397	0.411	0.399	0.37
0.308	0.326	0.338	0.351	0.362	0.4	0.41	0.401	0.368
0.311	0.333	0.343	0.349	0.366	0.396	0.414	0.398	0.368
0.324	0.335	0.347	0.354	0.359	0.391	0.411	0.396	0.366
0.333	0.342	0.349	0.353	0.357	0.379	0.398	0.388	0.363
0.348	0.359	0.36	0.358	0.355	0.369	0.373	0.377	0.363
0.375	0.398	0.379	0.387	0.373	0.356	0.353	0.346	0.336
0.379	0.376	0.375	0.387	0.373	0.355	0.352	0.346	0.334
0.375	0.375	0.376	0.39	0	0.355	0.354	0.35	0.337
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.378	0.378	0.38	0.387	0.376	0.357	0.353	0.349	0.338
0.375	0.376	0.383	0.384	0.378	0.356	0.354	0.348	0.335
0.375	0.375	0.38	0.386	0.372	0.356	0.354	0.346	0.338

Fig. 3. UT Text Data.

2.2 UT 데이터 평가³⁾

컴포넌트에서 취득한 데이터는 데이터 평가를 통하여 감육량을 결정한다. 컴포넌트에서 검사한 데이터가 1회만 존재하는 경우 단독평가를 수행하고, 2회 이상인 경우에는 반복평가를 수행한다. 단독평가는 다양한 방법이 존재하지만, 국내 원전에서는 파이프, 티 등과 같은 경우, Band Method를 활용하고, 엘보우와 같이 제작시 외호와 내호간의 두께 편차가 발생할 수 있는 경우는 Moving Blanket Method (MBM)를 활용하여 데이터 평가를 수행한다.

Band Method는 Fig. 4와 같이 파이프의 원주방향 측정값을 하나의 Band로 하여 각 Band에서의 최대값과 최소값간의 차를 감육량으로 결정하는 방법이다. 이러한 방법으로 모든 Band에서 감육량을 결정한 후, 가장 큰 값을 해당 컴포넌트에서의 대표 감육량으로 결정한다. Band Method의 감육량 결정은 식 (1)과 같다. 여기서, Wear는 해당 컴포넌트의 대표 감육량, T_{max} 는 각 Band에서의 최대두께, T_{nom} 은 해당 컴포넌트의 공칭두께, T_{min} 은 최소두께를 의미한다.

$$Wear = Max(larger(T_{max} \text{ or } T_{nom}) - T_{min}) \text{ at all bands} \quad (1)$$

MBM은 Fig. 5와 같이 그리드 데이터 위에 일정한 범위를

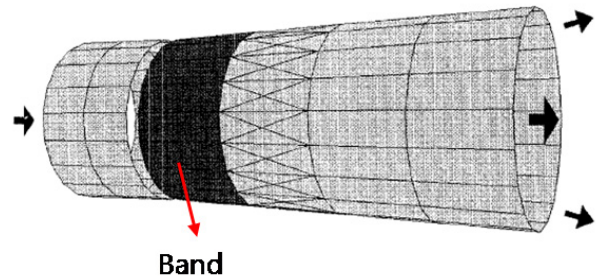


Fig. 4. Band Method.

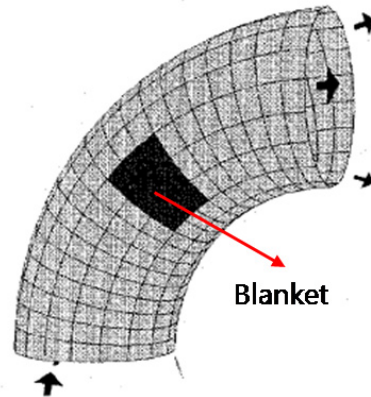


Fig. 5. Moving Blanket Method.

Blanket으로 정의한 후, Blanket 내에서 최대값과 최소값의 차이를 감육량으로 결정한다. Blanket을 하나씩 옮겨가며 전체적으로 모든 데이터에서 평가를 수행한 후, 가장 큰 값을 감육량으로 결정한다. MBM에 의한 감육량 결정 방법은 식 (2)와 같다. 여기서, Wear는 해당 컴포넌트의 대표 감육량, T_{max1} 과 T_{max2} 는 해당 Blanket에서 가장 큰 값과 두 번째 큰 값, T_{min1} 과 T_{min2} 는 해당 Blanket에서 가장 작은 값과 두 번째 작은 값, T_{nom} 은 해당 컴포넌트의 공칭두께를 의미한다.

$$Wear = Max(larger(\frac{T_{max_1} + T_{max_2}}{2} \text{ or } T_{nom}) - \frac{T_{min_1} + T_{min_2}}{2})_{at \text{ all blankets}} \quad (2)$$

Point-To-Point (PTP) Method는 동일한 컴포넌트에서 2회 이상 두께 검사를 수행한 경우에 적용하여 감육량을 결정한다. PTP Method는 시간의 차이가 존재하는 동일한 위치의 데이터 포인트에서 발생하는 두께차를 감육량으로 계산하여 평가하는 방법이다. PTP Method를 이용하여 감육량을 결정하는 방법은 식 (3)과 같다. 여기서, $T_{current}$ 는 동일한 위치의 현재 측정값, $T_{previous}$ 는 동일한 위치의 과거의 측정값이며, Wear는 감육량을 의미한다. 모든 위치에서 감육량을 계산한 후 그 중 가장 큰 값을 대표 감육량으로 결정한다.

$$Wear = Max(T_{current} - T_{previous})_{at \text{ all points}} \quad (3)$$

2.3 UT 측정 오차

UT는 기본적으로 측정시 어느 정도의 오차를 포함하고 있다. UT 측정의 정확도에 대한 문제는 다양한 분야에서 연구되고 있다. 다양한 분야에서 서로 다른 용어를 사용하고 있지만, 일반적으로 Fig. 6에서와 같이 두 가지의 용어로 UT 측정의 오차를 정의할 수 있다.

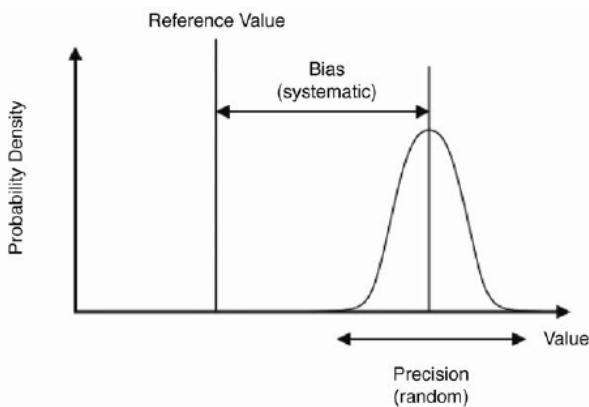


Fig. 6. Error of UT Measurement.⁴⁾

편차(Bias)는 참조값(Reference Value)에서 얼마나 측정값이 차이가 나는가를 나타내며, 시스템 오차(Systematic Error)로 정의할 수 있다. 정확도(Precision)는 측정값이 실제값 주변에 무리지어 나타나는지를 나타내며, 랜덤 오차(Random Error)라고 정의할 수 있다. 주로 시스템 오차는 기기를 보정할 때 나타나며, 랜덤 오차는 측정방법, 측정인의 능력 등에 의해 달라진다. 이러한 오차의 발생은 측정값을 실제값보다 과소 또는 과대하게 만든다. 원전 2차측 배관 평가에서 이러한 측정 오차의 영향은 감육량 결정에 영향을

미친다. 앞서 살펴본 바와 같이, 컴포넌트 표면에 Full-grid로 맵핑한 후, 그 교차점에서 측정된 많은 데이터를 모아 하나의 컴포넌트 UT 데이터로 생성한다. 각각의 UT 데이터 포인트는 모두 감육량 계산에 사용되며, 그 최대값을 감육량으로 결정하게 된다. 만약, UT 측정 데이터를 오차로 인하여 과대하게 측정할 경우, 그 하나의 데이터로 인하여 전체 컴포넌트에서의 감육량이 과대하게 예측될 수 있다. 또한, 너무 과소 측정된 경우에는 필요한 검사 및 교체시기를 지나쳐 문제가 발생할 가능성이 있다.

3. 신뢰도 분석 방법

3.1 정규분포(Normal Distribution)

일상생활에서 관찰할 수 있는 다양한 통계의 문제는 정규분포와 유사한 경우가 많다. 정규분포는 평균 μ 와 표준편차 σ 에 의해 결정되는 종모양의 확률밀도함수를 가진다. 일반적인 정규분포곡선은 Fig. 7과 같다.

정규분포의 확률밀도함수는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 x는 확률변수를 나타낸다. 원전 배관 컴포넌트에서 측정된 UT 데이터의 신뢰도 평가를 위하여 정규분포를 적용하였다.

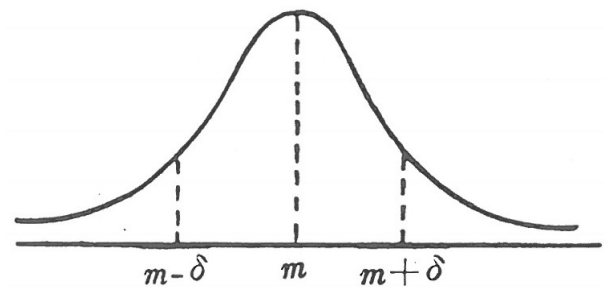


Fig. 7. Normal Distribution Curve.

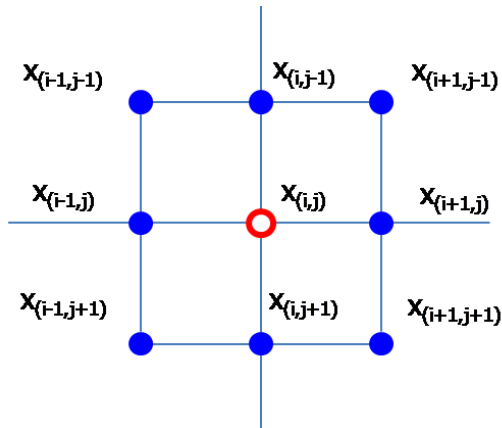


Fig. 8. Diagram of SAM.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}, -\infty < x < \infty \quad (4)$$

3.2 SAM(Square Average Method)

SAM은 해당 포인트와 그 포인트 주변의 값들의 평균값을 이용하여 차이값 분석을 통하여 해당 포인트의 신뢰도를 평가하는 방법이다. 일반적으로 원전의 배관은 매끄럽게 제작되며, 특정한 구역만 두껍거나 얇게 제작되지 않음에 착안하여 개발한 평가법이다. 또한, 배관감육 손상 역시 특정한 부분만 얇게 감육되지 않는다는 경험에 근거하여 개발하였다. Fig. 8은 SAM 평가법의 모식도이며, 식(5)는 SAM 평가식이다. SAM은 해당 포인트를 제외한 주변 데이터들의 평균값과 해당 포인트에 안전율을 적용한 값을 비교하여 주변 데이터의 평균값보다 큰 경우 신뢰도 초과로 분류한다. 그리고, 해당 포인트를 하나씩 옮겨가며 전체 데이터에 대하여 수행하여 데이터의 신뢰도를 평가하는 방법이다.

$$\alpha \cdot x_{(i,j)} \geq \frac{1}{8} (x_{(i-1,j-1)} + x_{(i,j-1)} + x_{(i+1,j-1)} + x_{(i-1,j)} + x_{(i+1,j)} + x_{(i-1,j+1)} + x_{(i,j+1)} + x_{(i+1,j+1)}) \quad (5)$$

여기서, α : Safety Factor
 i, j : Grid Coordinate
 x : Thickness Reading

4. 신뢰도 분석 결과

4.1 검사 데이터

UT 데이터 평가를 위하여 실제 원전 2차측 컴포넌트에서 취득한 UT 데이터를 분석하였다. 2차측 배관 컴포넌트는 형상에 따라 파이프, 엘보우, 익스펜더, 리듀서, 티 등으로

Table 1. Component List

No	Comp. Name	Type	Pipe Size (U/S) (in)	Tnom (U/S) (in)	Pipe Size (Br) (in)	Tnom (Br) (in)
1	DR0622P03	Pipe	4.5	0.237		
2	DR0623P02	Pipe	2.875	0.203		
3	ER1722T01	Tee	24	0.5	12.75	0.5
4	ER1822T01	Tee	24	0.5	12.75	0.5
5	ES0421E02	Elbow	18	0.5		
6	ES0421E03	Elbow	18	0.5		
7	ES1721E02	Elbow	18	0.5		
8	ES1721E04	Elbow	18	0.5		

분류하여 관리한다. 검사 데이터는 형상을 고려하여 선정하였다. 선정된 배관 컴포넌트는 아래 Table 1과 같다.

4.2 신뢰도 분석 결과

신뢰도 분석을 위하여 Table 1에 제시한 컴포넌트의 UT 데이터 각각에 대하여 Table 2와 같이 두께 구배를 색으로 표시하고, 신뢰도 초과 부위를 구분할 수 있도록 표시한 데이터 분석틀을 개발하였다. 전체 데이터에서 상대적으로 두꺼운 셀은 짙은색으로 표시하고, 얇은 셀은 옅은색으로 표시하여 전체적인 두께 분포를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. Table 1에 제시한 컴포넌트 각각에 대하여 앞서 살펴본 정규분포, SAM, 그리고 데이터의 육안점검을 통하여 두께 측정이 필요로 한 부분을 도출하여 상호비교 함으로써 각각의 분석방법의 활용성을 검토하였다. 육안점검은 각각의 UT 데이터를 모두 살펴본 후, 두께가 상대적으로 두꺼운 부분을 도출하였다. 도출된 데이터는 재측정을 수행하여 측정값에 변화가 있는지 여부를 확인하였다.

육안점검은 실제 재측정을 수행하여 측정값의 변화가 있

는 경우 신뢰도 초과로 분류하였다. Table 3은 정규분포를 활용한 신뢰도 분석 결과의 예시이다. Table 4는 SAM을 활용한 신뢰도 분석 결과 예시이다.

각 컴포넌트에서 수행한 신뢰도 분석 결과를 Table 5에 제시하였다. 정규분포를 활용한 신뢰도 분석은 대부분의 경우에 신뢰도 초과값이 검출되었다. 이는 제작시 발생한 두께 구배로 인해 발생한 것으로 분석되었다. SAM을 활용한 신뢰도 분석 방법은 육안점검과 거의 일치하는 것을 확인하였다. 일치하지 않는 부분은 육안점검에서 놓친 부분이거나, 컴포넌트의 섹션 구분을 하지 않아 발생한 것으로 추정된다.

Table 2. Thickness Gradient of the Component UT Data

원주방향 길이방향	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	0.244	0.248	0.237	0.237	0.244	0.25	0.242	0.25	0.247	0.255	0.247	0.242
2	0.243	0.247	0.24	0.238	0.241	0.25	0.241	0.247	0.243	0.255	0.249	0.242
3	0.248	0.247	0.237	0.237	0.241	0.249	0.239	0.241	0.245	0.261	0.251	0.242
4	0.247	0.249	0.238	0.237	0.239	0.248	0.239	0.246	0.246	0.262	0.246	0.241
5	0.243	0.248	0.24	0.236	0.239	0.249	0.238	0.241	0.243	0.265	0.243	0.241
6	0.241	0.248	0.238	0.238	0.243	0.248	0.237	0.24	0.241	0.253	0.243	0.238
7	0.242	0.247	0.239	0.24	0.248	0.248	0.237	0.239	0.24	0.252	0.245	0.237
8	0.238	0.249	0.24	0.238	0.247	0.246	0.234	0.24	0.239	0.253	0.247	0.243

Bold 신뢰도 초과

Table 3. Reliability Analysis Result of Normal Distribution

원주방향 길이방향	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Summary
1	0.258	0.254	0.24	0.249	0.258	0.26	0.275	0.273	0.271	0.27	0.263	0.259	평균 : 0.261 표준편차 : 0.011 유의구간 : > 0.2833 위치 : G4,G5,G6,G7
2	0.257	0.255	0.245	0.25	0.259	0.261	0.277	0.275	0.273	0.27	0.264	0.259	
3	0.251	0.256	0.245	0.25	0.258	0.262	0.283	0.28	0.274	0.27	0.269	0.259	
4	0.251	0.254	0.245	0.252	0.259	0.266	0.29	0.277	0.277	0.272	0.266	0.257	
5	0.251	0.259	0.245	0.252	0.256	0.268	0.291	0.278	0.278	0.273	0.267	0.262	
6	0.255	0.257	0.246	0.249	0.256	0.269	0.293	0.276	0.276	0.27	0.266	0.257	
7	0.257	0.258	0.248	0.249	0.253	0.275	0.287	0.277	0.275	0.266	0.264	0.258	
8	0.254	0.258	0.245	0.248	0.248	0.27	0.276	0.277	0.27	0.267	0.266	0.254	
9	0.255	0.254	0.244	0.248	0.248	0.262	0.278	0.273	0.265	0.266	0.264	0.252	
10	0.252	0.257	0.245	0.248	0.248	0.26	0.273	0.269	0.265	0.27	0.264	0.249	
11	0.251	0.256	0.246	0.252	0.25	0.261	0.265	0.26	0.263	0.27	0.262	0.251	
12	0.251	0.256	0.247	0.253	0.252	0.254	0.261	0.258	0.257	0.272	0.265	0.252	

Table 4. Reliability Analysis Result of SAM

원주방향 길이방향	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Summary
1	0.499	0.479	0.488	0.478	0.503	0.514	0.503	0.52	0.488	0.479	0.48	0.505	위치 : C4 구역 : (B3:D5) 구역평균 : 0.477 유의구간 : > 0.537
2	0.501	0.475	0.485	0.479	0.502	0.513	0.506	0.518	0.49	0.483	0.484	0.501	
3	0.512	0.471	0.488	0.476	0.5	0.514	0.511	0.516	0.488	0.481	0.484	0.501	
4	0.512	0.472	0.546	0.479	0.503	0.52	0.513	0.519	0.49	0.487	0.483	0.505	
5	0.514	0.473	0.486	0.476	0.501	0.52	0.517	0.515	0.489	0.479	0.481	0.496	
6	0.511	0.471	0.484	0.478	0.5	0.52	0.519	0.518	0.487	0.476	0.483	0.494	
7	0.504	0.468	0.484	0.478	0.503	0.52	0.513	0.515	0.482	0.469	0.483	0.493	
8	0.507	0.469	0.484	0.48	0.506	0.517	0.512	0.512	0.482	0.465	0.477	0.489	
9	0.5	0.472	0.484	0.477	0.503	0.518	0.51	0.506	0.477	0.465	0.478	0.49	
10	0.492	0.469	0.484	0.484	0.505	0.508	0.504	0.505	0.478	0.471	0.479	0.489	
11	0.492	0.47	0.483	0.479	0.502	0.505	0.493	0.501	0.485	0.475	0.478	0.487	
12	0.492	0.476	0.485	0.474	0.501	0.497	0.472	0.511	0.483	0.472	0.473	0.488	

Table 7. Result of Reliability Analysis

No	Comp. Name	정규분포 (ND)	SAM	육안점검 (VT)
1	DR0622P03	O		
2	DR0623P02	O	O	O
3	ER1722T01	O	O	O
4	ER1822T01		O	
5	ES0421E02	O		
6	ES0421E03	O	O	O
7	ES1721E02	O		
8	ES1721E04	O		

5. 결 론

UT는 산업계에서 다양하게 활용되고 있는 방법으로, 손쉽게 측정이 가능하고 측정시 측정자에게 무해한 장점이 있는 반면, 측정오차가 필연적으로 발생하는 단점이 있다. 원전 2차측 배관의 두께 검사에도 UT를 활용하고 있다. 배관 두께 검사시 발생할 수 있는 UT 측정오차의 영향을 분석하고, 측정오차를 효율적으로 검출하여 UT 측정 데이터의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방법의 필요에 따라 원전 배관 감육 평가에 활용할 수 있는 신뢰도 분석 방법을 연구하였다.

신뢰도 분석 방법을 도출하기 위하여 오차의 발생 원인을 분석하고, 평가 가능한 신뢰도 분석 방법을 도출하였다. 그

리고, 도출된 신뢰도 분석 방법을 실제 원전 배관에서 측정된 데이터에 적용하였다. 적용결과, 정규분포는 육안점검과 상당한 차이를 보였으며, SAM은 육안점검 결과와 대부분 일치하는 것을 확인하였다. 정규분포에 의한 신뢰도 분석 방법은 초기 배관 제작시 발생한 두께차를 모두 신뢰도 초과 부위로 분류하여 실제 활용에는 어려움이 있는 것으로 확인되었다. SAM과 육안점검의 불일치는 육안점검시 놓친 부분이거나, 컴포넌트 데이터의 섹션 미구분으로 인해 발생한 것으로 추정되며, 차후 더 많은 UT 데이터를 확보하고 결과를 보정하면 신뢰도 분석틀로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. K. M. Hwang, T. E. Jin, K. H. Kim, "Disclosing the Root Cause of Local Wall Thinning Observed in the Deflected Turbulent Flow inside Carbon Steel Piping", Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers, p. 1 (2007).
2. K. M. Hwang, T. E. Jin, S. H. Lee, "Wall Thinning Analysis for Secondary Side Piping of Domestic NPPs using CHECWORKS Code", Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers, **1**, 807 (2001)
3. Jeffrey Horowitz, "Guidelines for Plant Modeling and Evaluation of Component Inspection Data", EPRI 1009599, p. 4-1 (2004).
4. Jeffrey Horowitz, "Statistical Methods for Analysis of Multiple-Inspection Flow-Accelerated Corrosion Data", EPRI 1019175, p. 3.3 (2011).