

원전 배관의 반복 측정 데이터에 대한 신뢰도 분석 방법

윤 훈[†] · 황 경 모

KEPCO E&C, 경기도 용인시 기흥구 마북동 360-9
(2012년 04월 16일 접수, 2013년 06월 17일 수정, 2013년 06월 27일 채택)

Reliability Analysis Method for Repeated UT Measurement Data 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 April 16, 2012; Revised June 17, 2013; Accepted June 27, 2013)

Safety is a major concern in Nuclear Power Plants (NPPs). Piping systems in NPPs are very complex and composed of many components such as tees, elbows, expanders and straight pipes. The high pressure and high temperature water flows inside piping components. As high speed water flows inside piping, the pipe wall thinning occurs in various reasons such as FAC (Flow Accelerated Corrosion), LDIE (Liquid Droplet Impingement Erosion) and Flashing. To inspect the wall thinning phenomenon and protect the piping from damages, piping components are checked by UT measurement in every overhaul. During every overhaul, approximately 200~300 components (40,000~60,000 UT data) are examined in NPPs. There are some methods from EPRI for evaluating wear rate of components. However, only few studies have been conducted to find out the raw data reliability for the wear rate evaluation. Securing the reliable raw data is the key factor for a reasonable evaluation. This paper suggests the reliability analysis method for the repeatedly measured data for wear rate evaluation.

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

1. 서 론

원자력발전소는 수많은 기기와 기기를 연결하는 배관으로 구성된다. 각 기기와 배관은 내부의 고온, 고압 유체의 압력경계를 유지하는 기능을 수행한다. 원자력 발전소의 방사능과 관련된 1차 계통과 달리 2차 계통은 랭킨사이클을 구성하는 계통과 그 부속계통으로 구성되어 있으며, 방사능과는 관련이 없는 계통이다. 그러나 2차 계통 내부는 고온, 고압의 유체가 흐르고 있어 발전 설비의 건전성을 보장하기 위하여 필수적으로 유지관리가 필요하다. 원전 2차 계통 탄소강 배관이나 기기는 다양한 감속 메커니즘에 의해 벽두께가 감소되는 현상이 발생한다. 유동가속부식(Flow-Accelerated Corrosion ; FAC)은 대표적인 감속 메커니즘이다. Fig. 1은 대표적인 유동가속부식의 손상 사례이다.¹⁾ 그러나 유동가속부식 이외에도 최근에는 액적충돌침식(Liquid Droplet Impingement

Erosion ; LDIE), 고체입자침식(Solid Particle Erosion ; SPE), 캐비테이션, 플래싱 등의 사례도 종종 보고되고 있다. Fig. 2는 액적충돌침식의 손상 사례이다.^{2,3)}

다양한 감속 메커니즘으로 인해 지속적으로 배관 내벽이 얇아지면 내부 유체의 압력한계를 버티지 못하고 누설 또는 파단되는 사고로 이어질 수 있다. 원자력 발전소에서는 이러한 현상을 적기에 탐지하고 배관 손상을 방지하기 위하여 감속에 민감한 2차 계통 배관을 대상으로 데이터베이스를 구축하고 이를 토대로 관리절차를 수립하고 있다. 매주기 정기점검시 수립된 관리절차에 따라 배관 컴포넌트에 초음파 두께측정(Ultrasonic Test ; UT) 검사를 수행하여 배관의 두께를 측정하고 데이터를 평가함으로써 배관의 건전성을 유지하고 있다.

UT 검사는 비파괴 검사방법 중의 하나로 대표적인 내부체적검사 방법이다. UT 검사는 방사선투과검사(Radiograph Test ; RT)에 비해 손쉽게 측정할 수 있으며, 특히 검사시 측정자와 주변 환경에 무해한 방법이다. 그러나 다양한 장점에

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

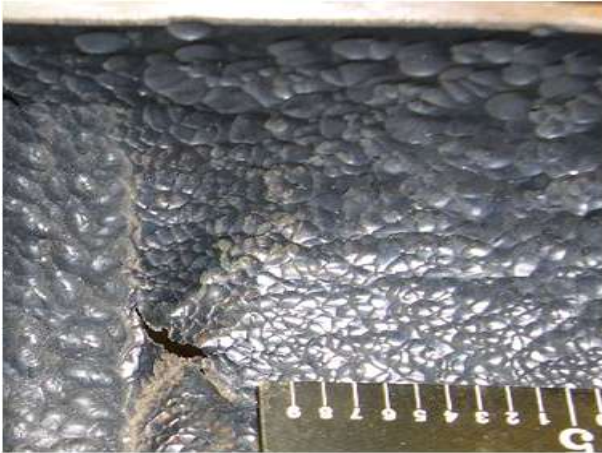


Fig. 1. Damaged Surface by FAC¹⁾.



Fig. 2. Damaged Surface by LDIE^{2,3)}.

도 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 과대평가될 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.

원전에서는 매주기 정기점검시 약 200~300 개의 배관 컴포넌트에 대한 초음파 두께 측정을 수행한다. 각각의 배관 컴포넌트는 약 200 개 이상의 UT 데이터로 구성되어 전체적으로 약 40,000~60,000 개의 초음파 두께 측정을 수행하게 된다. 이렇게 측정된 데이터는 각 컴포넌트 단위로 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 바탕으로 평가를 수행하여 차기 검사시점을 결정한다. 미국의 EPRI에서는 측정된 UT 데이터에 대한 다양한 평가방법을 제시하고 있다.⁴⁾ 그러나 정확한 데이터 평가를 위해서는 측정 데이터의 신뢰성

이 담보되어야 한다. 신뢰성 있는 측정 데이터가 취득되지 않는다면 감육 평가가 제대로 수행될 수 없다.

이전 연구⁵⁾에서는 원전 2차 계통 배관 두께 검사시 발생할 수 있는 UT 측정 오차 발생의 원인을 분석하고, 원전 배관의 감육 평가를 위한 측정 데이터의 신뢰도 분석 방법을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 2회 이상 반복 측정된 컴포넌트의 UT 데이터 신뢰도 분석방법을 제시하고자 한다.

2. 원전 배관의 UT 평가

2-1. 원전 2차 계통 배관 컴포넌트의 UT 측정

원자력 발전소에서는 각 배관 컴포넌트를 하나의 관리대상으로 분류하여 관리한다. 관리대상 컴포넌트에 대하여 UT 측정을 수행할 때 아래 Fig. 3과 같이 컴포넌트 표면에 바둑판과 같이 배관 전체의 위치 및 방향을 그리드로 구성하여 맵핑한다. 각 그리드의 교차점에 탐촉자를 접촉하여 데이



Fig. 3. Grid Mapping.

파일(F)	편집(E)	서식(O)	보기(V)	도움말(H)					
0.517	0.515	0.509	0.518	0.521	0.509	0.498	0.517	0.54	
0.502	0.516	0.51	0.514	0.522	0.508	0.501	0.52	0.545	
0.501	0.507	0.513	0.519	0.525	0.511	0.506	0.52	0.547	
0.488	0.508	0.518	0.526	0.526	0.515	0.504	0.519	0.544	
0.488	0.509	0.518	0.531	0.526	0.517	0.507	0.521	0.55	
0.489	0.512	0.52	0.537	0.528	0.523	0.515	0.522	0.549	
0.493	0.512	0.52	0.569	0.531	0.53	0.519	0.523	0.552	
0.492	0.505	0.524	0.545	0.527	0.531	0.525	0.524	0.549	
0.496	0.506	0.518	0.544	0.526	0.532	0.518	0.522	0.548	
0.496	0.503	0.518	0.534	0.525	0.531	0.509	0.514	0.547	
0.496	0.501	0.511	0.524	0.521	0.526	0.504	0.51	0.544	
0.492	0.499	0.511	0.522	0.518	0.525	0.505	0.508	0.537	
0.508	0.502	0.513	0.513	0.515	0.525	0.508	0.505	0.531	
0.457	0.476	0.455	0.457	0.458	0.441	0.429	0.441	0.432	
0.471	0.487	0.464	0.464	0.456	0.436	0.425	0.428	0.425	
0.473	0.467	0.44	0.43	0.433	0.429	0.421	0.443	0.446	
0.45	0.45	0.424	0.431	0.438	0.435	0.444	0.462	0.466	
0.439	0.452	0.441	0.453	0.464	0.46	0.449	0.461	0.439	
0.462	0.483	0.457	0.457	0.459	0.443	0.428	0.432	0.423	
0.473	0.475	0.441	0.435	0.437	0.428	0.422	0.443	0.439	

Fig. 4. Component UT data.

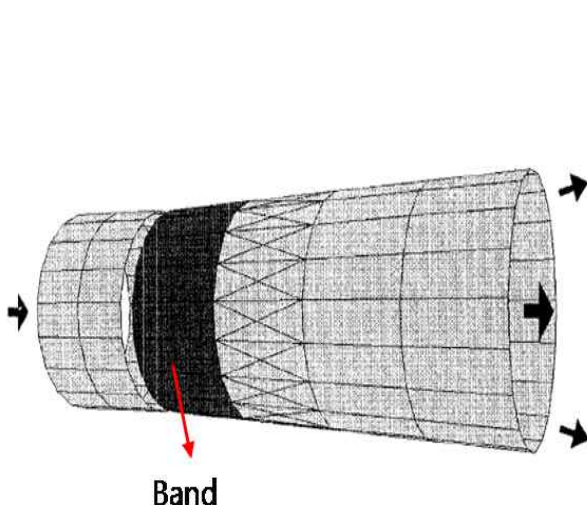


Fig. 5. Band Method.

터를 취득한 후, 데이터를 취합하여 Fig. 4와 같이 매트릭스 형태의 텍스트 파일을 구성하여 관리한다. 텍스트 파일은 2차 계통 배관 관리프로그램인 CHECWORKS에 입력하여 배관의 두께이력을 관리하고, 평가를 통하여 감육 여부를 판단한다.⁴⁾ 동일 컴포넌트가 반복 측정될 경우에는 마찬가지로 그리드의 교차점에서 데이터를 취득한 후 이전에 측정된 데이터와 동일하게 취합하여 데이터 평가에 활용한다. 반복 측정된 컴포넌트의 경우 텍스트 파일의 동일한 위치에 같은 위치에서 측정된 데이터가 동일하게 배치되어 있어야 한다.

2-2. UT 데이터 평가

CHECWORKS 프로그램에 입력된 UT 데이터는 평가를 통하여 감육량을 결정한다. 컴포넌트에서 검사한 데이터가 1회만 존재하는 경우 단독평가를 수행하고, 2회 이상인 경우에는 반복평가를 수행한다. 단독평가는 다양한 방법이 존재하지만, 국내 원전에서는 직관, 티 등과 같은 경우, Band Method를 활용하고, 엘보우와 같이 제작시 외호와 내호 간의 두께 편차가 발생할 수 있는 경우는 Moving Blanket Method(MBM)를 활용하여 데이터 평가를 수행한다. Band Method는 Fig. 5와 같이 파이프의 원주방향 측정값을 하나의 Band로 정의하고, 각 Band에서의 최대값과 최소값 간의 차를 감육량으로 결정하는 방법이다.⁴⁾ MBM은 Fig. 6과 같이 그리드 데이터 위에 일정한 범위를 Blanket으로 정의한 후, Blanket 내에서 최대값과 최소값의 차이를 감육량으로 결정한다. Blanket을 하나씩 옮겨가며 전체적으로 모든 데이터에서 평가를 수행한 후, 가장 큰 값을 감육량으로 결정한다.⁴⁾

Point-To-Point (PTP) Method는 동일한 컴포넌트에

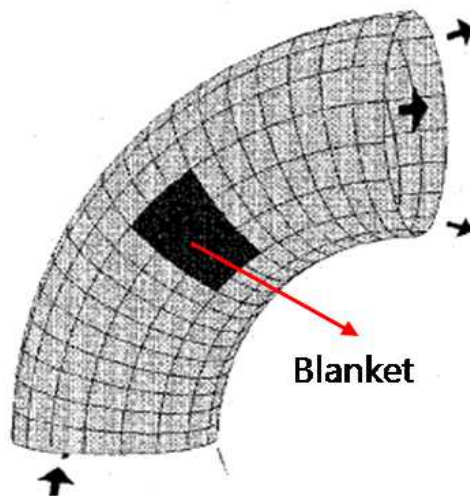


Fig. 6. Moving Blanket Method.

서 2회 이상 두께 검사를 수행한 경우에 적용하여 감육량을 결정하는 방법이다. PTP Method는 현재 측정된 데이터와 동일한 위치에서 과거 측정된 데이터의 편차를 감육량으로 계산하는 방법이다. 컴포넌트의 모든 위치에서 편차를 계산하여 가장 큰 값을 대표 감육량으로 결정한다.⁴⁾

3. 반복 측정 데이터의 신뢰도 분석 방법

3-1. 반복 측정 데이터

원전에서는 매주기 측정된 데이터를 각 컴포넌트명으로 관리한다. 각 컴포넌트는 데이터 평가를 통해 차주기 검사시기를 결정한다. 차주기 검사시기 도래시 재측정하고 PTP Method를 통해 반복 측정된 데이터 평가 결과를 반영하여 다시 차주기 검사시기를 결정한다. 배관 컴포넌트의 반복 측정 원인은 다양하다. 특히, 높은 압력경계를 유지하기 위하여 최소 요구두께가 두꺼운 컴포넌트의 경우 잔여 두께가 얇게 평가되어 자주 반복 측정을 수행하게 된다. 또한, 측정 데이터가 오류로 인하여 크게 또는 너무 얇게 측정된 경우에도 감육이 큰 것으로 평가되어 자주 반복 측정하게 될 가능성이 있다. 실제로 반복 측정된 컴포넌트는 단독측정을 수행한 데이터에 비해 평가값을 신뢰하는 경향이 있다. 따라서 반복 측정 데이터 평가시에는 더욱 주의를 기울여야 한다.

반복 측정되는 데이터를 조사하기 위하여 발전소 A와 발전소 B의 2개 호기를 대상으로 전체 컴포넌트의 UT 측정 여부를 조사하였다. 발전소 A는 총 1,388개의 컴포넌트를 검사하였으며, 발전소 B는 총 1,201 개의 컴포넌트를 검사하였다. 이 중 2회 이상 반복 측정이 수행된 컴포넌트는 발전소 A에서 154개소이며, 발전소 B에서는 178개로 조사되었다. 각 발전소의 반복 측정 컴포넌트 현황은 Fig. 7과 같다. Fig.

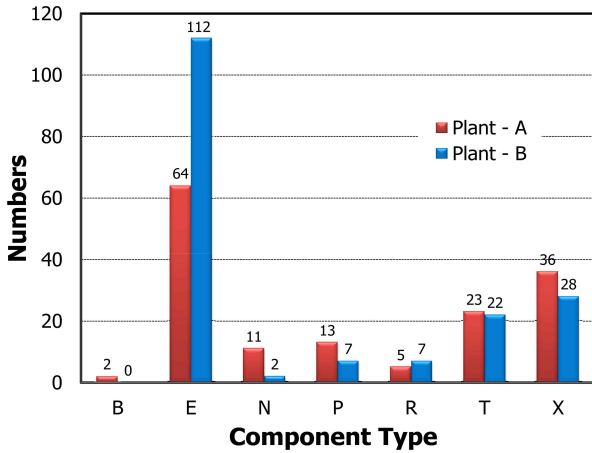


Fig. 7. Status of Inspection by Type for Plant 'A' and Plant 'B'.

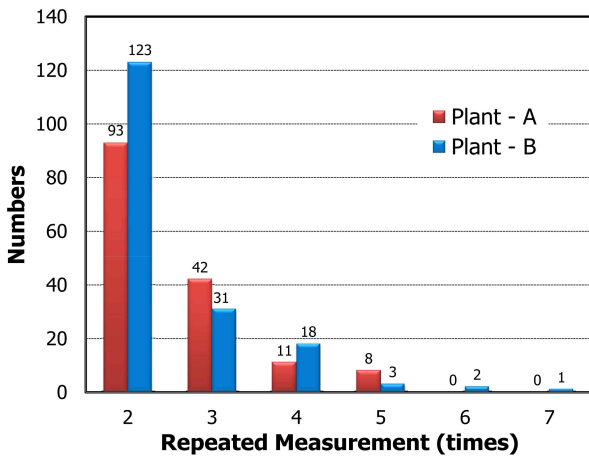


Fig. 8. Status of Repeated Measurement for Plant 'A' and Plant 'B'.

7에서 B는 Bend, E는 Elbow, N은 Nozzle, P는 Pipe, R은 Reducer, T는 Tee, X는 Expander를 의미한다. 각 발전소는 모두 Elbow에서 가장 많은 측정을 수행하였다. Fig. 8은 각 발전소에 대한 반복 측정 현황을 나타낸 것이다. 발전소 A에서 가장 많이 반복 측정이 수행된 컴포넌트는 5회이며, 발전소 B에서는 7회로 파악되었다. 7회 검사된 컴포넌트는 Expander로 최소 요구두께가 두꺼워 계속해서 반복 측정된 것으로 추정된다.

3-2. 데이터 분석방법

이전 연구를 통하여 단독 측정된 데이터에 대한 신뢰도 분석 방법⁵⁾을 고안하고 그 방법을 실제 원전에 적용하여 활용가능성을 검증하였다. 이전 연구에서는 반복 측정된 데이터에 대한 분석을 고려하지 않았다. 본 논문에서는 반복 측정된 데이터에 대한 분석 방법을 연구하였다. 이전 연구에서 고안된 단독측정 데이터의 분석 방법과 본 연구의 반복

측정 데이터에 대한 분석 방법을 동시에 고려하면 보다 합리적인 신뢰도 분석 방법이 될 것으로 기대한다. 반복 측정 데이터 분석을 위하여 수집된 발전소 A와 발전소 B의 반복 측정된 컴포넌트에 대하여 각 포인트의 두께 변화율(x^*)을 아래 식(1)과 같이 계산하였다.

$$x^* = \frac{((T_{Pre} - T_{Cur}) / T_{Cur}) \times 100}{Operation\ Time} \quad (1)$$

여기서, x^* : 두께 변화율 (%/yr)

T_{Cur} : 현재 측정 두께 (in)

T_{Pre} : 과거 측정 두께 (in)

Operation Time : 현재 두께 측정 시간 - 과거 두께 측정 시간 (yr)

발전소 A에 대하여 반복 측정된 컴포넌트 내 모든 데이터의 두께 변화율(x^*)을 계산하고, 수집된 데이터 집단에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 발전소 A에서 분석에 활용한 포인트는 총 38,091개이다. 발전소 A의 평균 두께 변화율은 0.249 %/yr이며, 표준편차는 1.588로 확인되었다. 발전소 A에 대한 상세 통계값은 Table 1과 같다. Fig. 9는 발전소 A의 두께 변화율에 대한 확률밀도분포를 나타낸 것이다. 발전소 B도 발전소 A와 마찬가지로 수집된 데이터 모집단에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 발전소 B의 평균 두께 변화율은 0.067 %/yr이며, 표준편차는 1.436으로 확인되었다. Table 2에는 발전소 B에 대한 상세 통계값을 제시하였으며, Fig. 10은 발전소 B의 두께 변화율에 대한 확률밀도분포를 나타낸 것이다.

각 발전소에 대한 두께 변화율의 확률밀도는 정규분포를 따른다고 할 수 있다. 평균을 중심으로 대칭 형태의 분포를 이루고 있다. 또한 평균값이 발전소 A, B 모두에서 양수의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 모집단으로 선정된 데이터가 감육을 포함하고 있음을 의미한다. 반복 측정된 데이터

Table 1. Statistics of Plant 'A' Samples

Item	Value
Average	0.249
Median	0.068
Standard Deviation	1.588
Variance	2.522
Range	71.355
Min.	-27.870
Max.	43.484
Sample	38,091

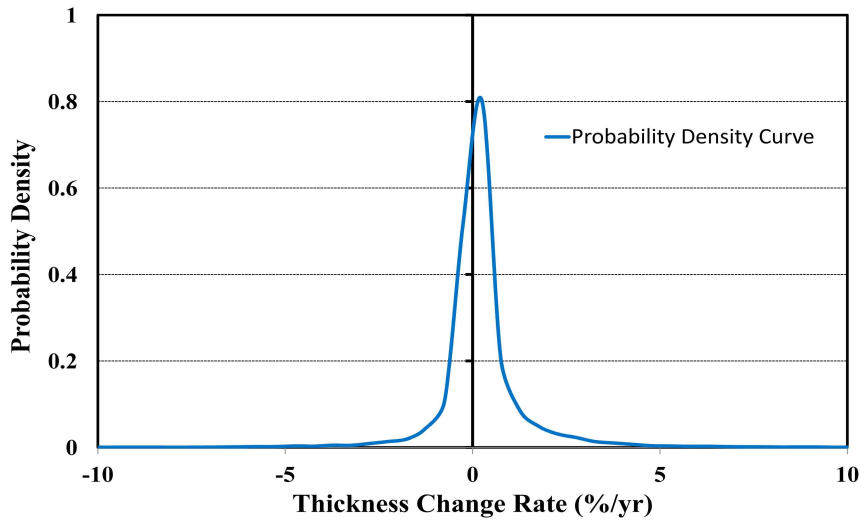


Fig. 9. Probability Density Curve for Plant 'A'.

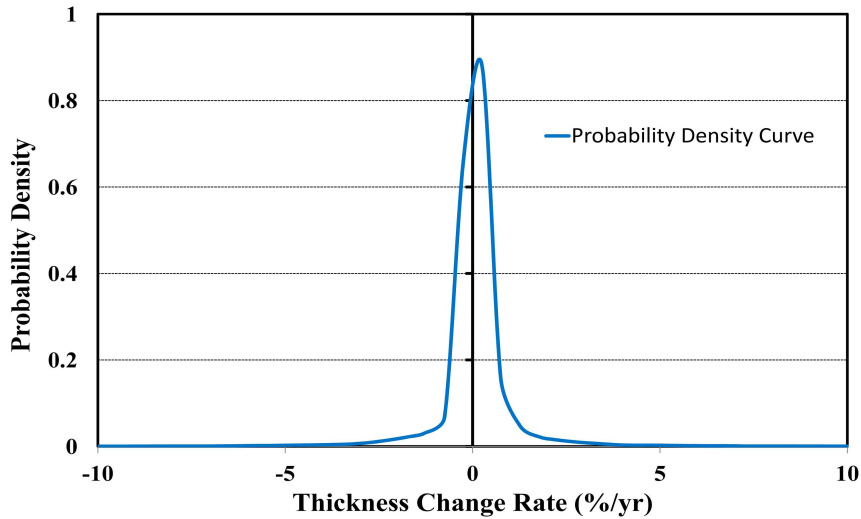


Fig. 10. Probability Density Curve for Plant 'B'.

에 대한 신뢰도 분석을 위하여 상한과 하한 모두 3 Sigma Method를 적용하였다. 3 Sigma Method는 정규 분포 곡선 내의 전면적의 99.73%를 의미하며, 상하한 한계를 벗어나는 확률은 0.27%가 된다. 3 Sigma Method를 적용할 경우 발전소 A에서의 신뢰도 구간은 $-4.516 < x^* < 5.013$ 이며, 발전소 B의 신뢰도 구간은 $-4.242 < x^* < 4.375$ 이다.

4. 평가 방법의 적용

발전소 B에서 신규로 측정된 실제 데이터를 수집하여 신뢰도 분석에 활용하였다. 분석에 활용한 반복 측정된 배관 컴포넌트는 104개이다. 104개 컴포넌트에 대하여 앞서 살펴본 신뢰도 분석방법을 적용하여 신뢰도 분석을 수행하였

다. 그리고 신뢰도 구간을 벗어나는 데이터 중 검토 시점에서 접근이 가능한 부위의 데이터를 재측정하여 두께값을 재확인하였다. 반복측정 데이터에 대한 신뢰도 분석 결과는 Table 3에 제시하였다. Table 3에서 T_0 는 과거 측정된 데이터이고, T_1 은 현재 측정된 데이터이며, T_2 는 T_1 의 위치에서 재측정한 데이터이다. 여기서, x^* 는 앞서 살펴본 발전소 B에 대한 신뢰도 구간인 $-4.242 < x^* < 4.375$ 을 벗어나는 값이다. 데이터를 재측정한 결과 대부분의 컴포넌트에서 이전에 측정된 값과 큰 차이를 보였다. 데이터 분석 결과로 볼 때 이러한 측정값의 변화는 측정오류로 인해 발생한 것으로 추정할 수 있다. 즉, 신뢰도 구간을 벗어나는 데이터는 측정오류가 발생한 데이터로 가정할 수 있으며 재측정을 수행하여 데이터의 신뢰도를 재확인하는 것은 상당히 의미가

Table 2. Statistics of Plant ‘B’ Samples

Item	Value
Average	0.067
Median	0.025
Standard Deviation	1.436
Variance	2.063
Range	105.589
Min.	-51.672
Max.	53.916
Sample	55291

Table 3. Reliability Analysis Results for Repeated Measurement Data

No	Comp. Name	Type	Repeated Measurement	Pipe O.D. (in)	T _{nom} (in)	x* (%/yr)	T ₀ (in)	T ₁ (in)	T ₂ (in)	Ratio (T ₂ -T ₁)/T ₁ (%)
1	TE027AEC	ELBOW	2	20	1.5	5.486	1.483	1.149	1.49	29.7
2	TE034AEB	ELBOW	2	10.75	0.719	9.821	0.998	0.715	0.981	37.2
3	TD006BEA	ELBOW	2	24	0.688	4.896	1.18	0.893	1.118	25.2
4	TD071AEC	ELBOW	2	16	0.5	29.638	0.851	0.478	0.478	-

있다고 추정할 수 있다.

5. 결론

발전소에서는 매주기 계획예방정비 시 약 40,000~60,000 개 정도의 데이터를 취득한다. 측정 데이터는 미국의 EPRI에서 개발된 원전 2차 계통 감육관리 프로그램인 CHECWORKS에 입력하여 데이터 평가를 수행하고 감육량을 결정한다. 측정된 데이터에 대한 평가를 수행하는 다양한 방법은 제시되어 있으나, 측정 데이터 자체에 대한 신뢰도 평가 방법에 대한 연구는 미미하다. 따라서 현장에서 측정된 데이터를 이용하여 배관감육 평가를 수행하는 진단계로서 데이터 자체를 분석하는 방법은 반드시 필요하다. 이는 측정 데이터 신뢰성이 확보되어야만 감육평가 결과를 신뢰할 수 있기 때문이다.

발전소에서 실제 반복 측정된 데이터를 바탕으로 원전 배관의 UT 측정 데이터 신뢰도 분석 방법을 연구하였다. 발전소 A와 발전소 B에서 각각 1,388개, 1,201개의 컴포넌트를 수집한 후 2회 이상 반복 측정된 데이터를 조사하였다. 반복 측정된 컴포넌트의 두께 측정 데이터에서 두께 변화율(x*)을 계산하고, 계산된 두께 변화율을 모집단으로 통계적 분석 방법을 통해 신뢰도 분석 방법을 도출하였다. 3 Sigma

Method에 근거한 각 발전소의 데이터 신뢰구간은 발전소 A는 $-4.516 < x^* < 5.013$ 이며, 발전소 B는 $-4.242 < x^* < 4.375$ 이다. 3 Sigma Method에 근거한 신뢰도 구간을 발전소에서 정기점검시 측정된 데이터에 적용하여 활용성을 확인하였다. 다중 반복 측정된 컴포넌트를 분석하고, 분석된 결과를 바탕으로 신뢰도 초과 구간에 위치한 데이터를 추출하여 재측정을 수행하였다. 배관 두께를 재측정한 결과 대부분의 컴포넌트에서 이전에 측정된 값과 큰 차이를 보였다.

이전 연구를 통해 배관감육 평가를 위해 컴포넌트에서 단독으로 측정된 데이터에 대한 원시 데이터 신뢰도 분석 방법을 제시하였으며, 본 연구에서는 동일한 컴포넌트에 대하여 반복 측정되는 데이터에 대한 신뢰도 분석방법을 연구하였다. 발전 운영 계획에 따라 수행하는 계획예방정비의 제한된 시간안에 배관감육관리 담당자가 수많은 UT 측정 결과를 분석하고 평가하기에는 시간이 너무 부족하다. 단독 측정 데이터에 대한 신뢰도 분석과 반복 측정 데이터에 대한 신뢰도 분석 방법을 적용하면 배관감육관리 담당자가 역무 수행 시간을 상당부분 단축할 수 있고 감육 평가 결과의 신뢰성을 크게 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. J. Horowitz, Guidelines for Plant Modeling and Evaluation of Component Inspection Data, pp. 4-1~4-4, EPRI 1009599 (2004).
2. J. Horowitz, Recommendation for Controlling Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement, and Solid Particle Erosion in Nuclear Power Plant Piping Systems, pp. 2-1~3-5, EPRI 1011231 (2004).
3. EPRI, Computer-Based Training Module: Erosion In Piping Systems (2006).
4. D. Munson and J. Horowitz, Recommendation for the Effective Flow-Accelerated Corrosion Program(NSAC-202L-R3), pp. 4-6~4-7, EPRI 1011838 (2006).
5. H. Yun and K-M. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 129 (2012).