

## 원전 배관의 두께 측정 데이터에 대한 신뢰도 분석 방법 및 적용

윤 훈<sup>1,2</sup> · 황 경 모<sup>1</sup> · 이 효 승<sup>1</sup> · 문 승 재<sup>2,†</sup><sup>1</sup>경기도 성남시 분당구 구미로 8, 한국전력기술<sup>2</sup>서울특별시 성동구 왕십리로 222, 한양대학교 기계공학부

(2014년 11월 11일 접수, 2015년 2월 12일 수정, 2015년 2월 23일 채택)

## Method and Application for Reliability Analysis of Measurement Data in Nuclear Power Plant

Hun Yun<sup>1,2</sup>, Kyeongmo Hwang<sup>1</sup>, Hyoseoung Lee<sup>1,2</sup>, and Seungjae Moon<sup>2,†</sup><sup>1</sup>KEPCO E&C, 8, Gumi-ro, Bundang-gu, Seoungnam-si, Gyeonggi-do, Korea<sup>2</sup>Mechanical Department, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seoungdong-gu, Seoul, Korea

(Received November 11, 2014; February 12, 2015; Accepted February 23, 2015)

Pipe wall-thinning by flow-accelerated corrosion and various types of erosion is significant damage in secondary system piping of nuclear power plants(NPPs). All NPPs in Korea have management programs to ensure pipe integrity from degradation mechanisms. Ultrasonic test(UT) is widely used for pipe wall thickness measurement. Numerous UT measurements have been performed during scheduled outages. Wall-thinning rates are determined conservatively according to several evaluation methods developed by Electric Power Research Institute(EPRI). The issue of reliability caused by measurement error should be considered in the process of evaluation. The reliability analysis method was developed for single and multiple measurement data in the previous researches. This paper describes the application results of reliability analysis method to real measurement data during scheduled outage and proved its benefits.

**Keywords :** wall thinning, ultrasonic thickness measurement, reliability analysis

## 1. 서 론

발전소의 기기와 배관 내부는 고온, 고압 유체에 노출되어 있으며, 이로 인한 다양한 손상 메커니즘이 존재한다. 유동 가속부식(FAC, Flow-Accelerated Corrosion)은 고속의 물 또는 물-증기 혼합유체와 접촉하고 있는 기기 및 배관을 손상시키는 대표적인 메커니즘이다. FAC는 1차적으로 배관의 벽두께를 얇게 하는 원인이 될 뿐 만 아니라, 2차적으로 증기발생기 및 열교환기의 성능을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 1986년 미국의 Surry 원전에서 발생한 심각한 배관과열 사건 이래로 최근까지 크고 작은 손상 사례가 지속적으로 보고되고 있다.<sup>1),2)</sup> FAC 이외에도 발전소 배관에서는 침식(Erosion) 손상이 발생할 수 있다. Fig. 1과 Fig. 2는 발전소 배관 손상의 대표적인 메커니즘인 FAC와 액적

충돌침식(LDIE, Liquid Droplet Impingement Erosion)으로 인해 손상면을 나타낸다.<sup>3)</sup> 국내 원전에서는 이러한 손상을 미연에 방지하고 발전 설비의 안전을 보장하기 위하여 매주기 계획예방정비기간동안 배관 컴포넌트의 두께 측정을 실시하고, 측정 데이터를 토대로 잔여수명을 결정할 후 차주기 검사계획을 수립한다.

현재 원전의 배관 검사에는 초음파 두께 검사(UT, Ultrasonic Test)가 활용된다. 소구경 배관의 일부에서는 방사선투과 검사(RT, Radiographic Test)도 수행되나, 적용의 편의성 및 안전성의 이유로 대부분 UT 검사를 실시한다. 원전에서는 매주기 200~300개 배관 및 피팅류(Elbow, Tee, Expander, Reducer 등)를 검사한다. 배관 검사를 위해 배관 표면에 EPRI 가이드라인 및 발전소의 검사 절차에 따라 원주방향과 축방향으로 그리드를 구성한 후, 그리드의 교차점에서 두께를 측정한다. 배관의 구경에 따라 그리드 간격은 달라진다. 하나의 컴포넌트는 약 100~300 여개의 검사 포인트

† Corresponding author: smoon@hanyang.ac.kr

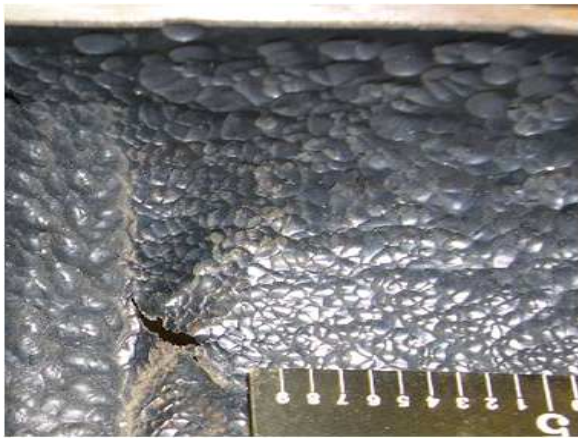


Fig. 1. Damaged surface by FAC.



Fig. 2. Damaged surface by LDIE.

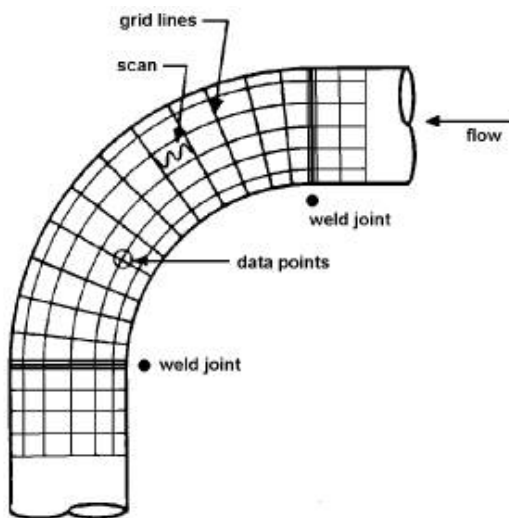


Fig. 3. Grid layout for an elbow.

로 구성된다. 일반적으로 매주기 계획예방정비기간동안 약 40,000~60,000개의 검사 데이터가 생산된다.

측정된 데이터는 EPRI NSAC-202L<sup>1)</sup>에 제시된 UT 평가 방법을 통해 평가하고, 그 결과를 토대로 차주기 검사 시기를 결정한다. 발전소 담당자는 측정된 데이터를 CHECWORKS 프로그램에 입력하고 NSAC-202L에 제시된 데이터 평가 방법에 따라 감육평가와 잔여수명을 계산한다.<sup>4)</sup> NSAC-202L에 제시된 데이터 평가 방법은 특정한 범위의 통계값을 계산하고, 계산된 값 중의 최대값을 이용하여 감육률을 결정한다. 최대값을 통해 감육률을 결정하는 것은 측정시 불가피하게 발생하는 측정오차를 모두 감육률에 포함하여 보수적인 값을 도출할 수 있다. 또한, 감육률로 전체 데이터 중 대표값을 선정하는 과정에서 극소수의 포인트에서 과도한 측정오차가 발생한 경우에 이를 감육으로 판단할 가능성도 존재한다. 본 논문에서는 이러한 측정오차를 검출하기 위한 측정 데이터의 신뢰도 분석 방법을 검토하고, 이를 원전의 계획예방정비기간동안 측정된 실제 검사 데이터에 적용하였다.

## 2. 원전 배관의 측정 현황 및 측정 오차

발전소의 운영 계획에 따라 수행되는 계획예방정비기간 동안 수많은 배관 및 피팅류를 검사한다. 현장에서 수행하는 배관 두께 검사를 위해서는 비계설치, 보온재 제거, 그리드 작성, 두께 검사, 보온재 재설치 등의 작업을 수행해야하기 때문에 많은 시간이 소요된다. 각 검사 컴포넌트는 Fig. 3과 같이 격자형태의 그리드를 구성하고, 그리드의 교차점에서 두께 측정을 수행한다.<sup>4)</sup> Fig. 4는 측정된 데이터를 나타낸다. 원주방향은 외호의 중심을 기준으로 시계방향으로 알파벳순으로 명칭을 부여하고, 축방향은 시작점을 기준으로 순차적으로 숫자를 부여하여 위치를 지정한다. 현재 국내 원전에서는 미국의 EPRI에서 FAC로 인한 감육 예측을 위해 개발된 CHECWORKS 프로그램을 사용하고 있다. CHECWORKS 프로그램은 입력된 운전 데이터를 바탕으로 자체 배관감육 이론모델을 통해 감육해석을 수행하고, 측정 데이터를 입력하여 감육 여부를 평가하는 기능을 갖고 있다.

현장에서 측정된 UT 데이터는 다양한 불확실성이 존재한다. 일반적으로 UT 검사의 불확실성과 관련된 주요 인자는 탐지 확률 (Probability of Detection), 측정 오차 (Measurement Error - Bias and Random Error), 신호 손실로 인한 오차 (Loss of Signal Error), 검사 범위 오차 (Coverage Error)이다. 탐지 확률은 주로 결함 탐상과 관계되며 원전의 배관감육 검사와는 관련이 없다. 배관감육 검사를 위한 두께 측정시에는 측정오차가 주요 고려 대상이다. EPRI의 연구 결과에 따르면<sup>1)</sup> 배관의 표면 불균일, 곡면의 존재, 표면 거칠기 등으로 인해  $\pm 5\%$  정도의 측정 오차가 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다. 원전의 배관감육 검사시에는

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	1.435	1.443	1.510	1.601	1.725	1.887	2.002	2.024	1.930	1.783	1.644	1.529	1.458
2	1.422	1.424	1.479	1.593	1.712	1.873	1.989	2.012	1.934	1.787	1.637	1.519	1.443
3	1.450	1.440	1.482	1.569	1.691	1.834	1.928	1.977	1.913	1.769	1.640	1.541	1.469
4	1.461	1.444	1.490	1.581	1.682	1.833	1.930	1.973	1.918	1.762	1.635	1.542	1.473
5	1.459	1.444	1.487	1.579	1.685	1.820	1.915	1.964	1.907	1.761	1.637	1.544	1.473
6	1.463	1.450	1.489	1.577	1.689	1.818	1.922	1.963	1.901	1.760	1.629	1.542	1.477
7	1.464	1.450	1.493	1.579	1.688	1.823	1.907	1.958	1.899	1.762	1.633	1.544	1.484
8	1.457	1.446	1.488	1.575	1.685	1.824	1.916	1.963	1.898	1.762	1.635	1.545	1.473
9	1.466	1.451	1.496	1.583	1.690	1.834	1.927	1.965	1.897	1.761	1.628	1.544	1.476
10	1.467	1.454	1.507	1.583	1.695	1.834	1.925	1.972	1.911	1.763	1.633	1.532	1.475
11	1.463	1.457	1.509	1.588	1.701	1.832	1.927	1.964	1.896	1.758	1.639	1.542	1.475
12	1.462	1.455	1.517	1.592	1.711	1.853	1.950	1.975	1.905	1.769	1.639	1.551	1.484
13	1.453	1.454	1.515	1.601	1.703	1.837	1.930	1.956	1.896	1.754	1.637	1.531	1.469
14	1.445	1.447	1.510	1.588	1.712	1.866	1.967	1.985	1.903	1.758	1.638	1.538	1.470
15	1.464	1.466	1.516	1.593	1.704	1.842	1.943	1.962	1.898	1.756	1.636	1.552	1.478
16	1.429	1.427	1.479	1.579	1.698	1.846	1.950	1.959	1.879	1.747	1.633	1.518	1.449
17	1.436	1.443	1.482	1.578	1.697	1.839	1.953	1.957	1.888	1.739	1.627	1.529	1.453
18	1.442	1.439	1.474	1.572	1.691	1.846	1.952	1.971	1.890	1.757	1.631	1.529	1.447
19	1.459	1.446	1.491	1.577	1.681	1.822	1.917	1.941	1.875	1.738	1.632	1.532	1.462
20	1.519	1.476	1.524	1.575	1.649	1.741	1.778	1.839	1.815	1.713	1.635	1.572	1.519
21	1.634	1.614	1.615	1.601	1.608	1.609	1.601	1.627	1.630	1.622	1.634	1.641	1.626

Fig. 4. UT measurement data. (x-axis : circumferential direction, y-axis : axial direction, unit : inch)

미리 정해진 위치에서 반복 측정을 통해 두께 측정 데이터를 취득하므로 신호 손실로 인한 오차와 검사 범위의 오차는 배제할 수 있다.

CHECWORKS 프로그램에는 측정 데이터의 평가를 위한 다양한 기법이 포함되어 있다. 측정 데이터가 1회만 존재하는 단독 측정 데이터의 경우에 Band, Blanket, Area Method 등을 통해 컴포넌트의 감육량을 평가하고, 동일 컴포넌트에서 측정 데이터가 2회 이상인 반복 측정 데이터인 경우에는 PTP (Point-To-Point) Method를 통해 감육량을 평가할 수 있다.<sup>4)</sup> CHECWORKS 프로그램에서 제공하는 평가방법은 식(1)~(3)에 의해 간단히 계산될 수 있다. 이러한 식들은 간단명료하여 이해하기가 쉬우나 현장에서 다양한 이유로 발생할 수 있는 측정 불확실성을 고려할 수 없다. 만약, 측정 오차로 인해 측정값이 과소 또는 과대 예측될 경우, 이를 모두 감육이 발생한 것으로 평가할 가능성이 항상 존재한다.

Band Method :

$$\text{Wear Rate}_{\text{Band Method}} = \frac{\text{Max}(\text{Max}(T_{\text{max}} \text{ or } T_{\text{nom}}) - T_{\text{min}})}{\text{at All Bands}} \quad (1)$$

Blanket Method :

$$\text{Wear Rate}_{\text{Blanket Method}} = \frac{\text{Max}(T_{\text{rep}} - \text{Avg}(\text{Two Low Readings}))}{\text{at All Blankets}} \quad (2)$$

PTP Method :

$$\text{Wear Rate}_{\text{PTP Method}} = \frac{\text{Max}(T_{\text{prev}} - T_{\text{cur}})}{\text{at All Points}} \quad (3)$$

여기서,  $T_{\text{max}}$  : 해당 범위에서 가장 큰 측정값

$T_{\text{min}}$  : 해당 범위에서 가장 작은 측정값

$T_{\text{nom}}$  : 배관의 공칭두께

$T_{\text{rep}}$  : 해당 범위의 대표 두께, Max (Avg (Two High Readings),  $T_{\text{nom}}$ )

$T_{\text{prev}}$  : 동일 위치의 과거 측정값

$T_{\text{cur}}$  : 동일 위치의 현재 측정값

최근 EPRI에서는 오차로 인한 데이터 평가의 과급효과를 줄이고, 보다 합리적인 평가 결과를 도출할 수 있는 방법에 대한 보고서를 지속적으로 발간하고 있다. 3번 이상 반복 측정 데이터에 대하여 선형 적합을 통해 감육률을 계산하는 방법<sup>5)</sup>, 주변 데이터의 평균을 활용하여 데이터 편차를 저감할 수 있는 방법<sup>6)</sup>, 그리고 통계적인 방법을 통해 감육 여부를 판별하는 방법<sup>7)</sup>들이 알려져 있으나, 현재 이러한 방법들은 CHECWORKS 프로그램에서는 포함되어 있지 않다. CHECWORKS 프로그램과 현재까지 연구된 EPRI의 평가 방법은 측정 데이터 자체에 대한 신뢰도는 고려하지 않고 있다. 따라서 측정시 발생할 수 있는 불확실성을 고려할 때, 정확한 감육평가 결과 도출을 위하여 초기 데이터의 신뢰도 분석은 매우 중요하다.



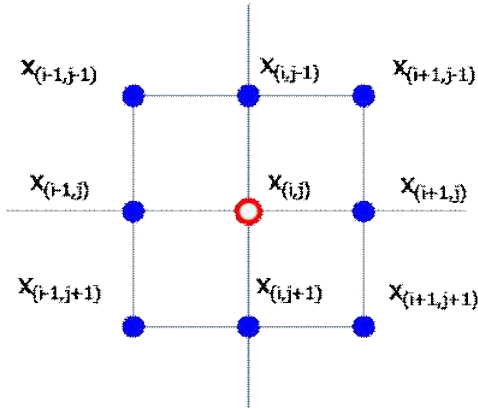


Fig. 5. Square Average Method.

### 3. 원전 배관 두께 측정 데이터의 신뢰도 분석 방법

원전의 두께 측정 데이터의 평가는 측정 데이터가 1회만 존재하는 단독측정 데이터의 평가와 동일 컴포넌트에서 2회 이상 반복측정된 데이터의 평가로 구분된다. 단독측정 데이터의 경우 측정 데이터가 하나만 존재하므로 측정오차가 평가결과에 크게 영향을 미칠 수 있다. 반복측정 데이터는 미리 구성된 그리드 위의 동일 위치에서 2회 이상 반복측정된 데이터를 통해 평가를 수행하므로 단독측정 데이터의 평가결과 보다 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있다.

#### 3-1. 단독측정 데이터의 신뢰도 분석 방법

단독측정 데이터의 신뢰도 분석 방법으로 이전 연구를 통해 SAM(Square Average Method)을 제안하였다.<sup>8)</sup> 본 방법은 측정된 데이터 각각에 대하여 주변 데이터의 평균값과의 비교를 통해 데이터의 신뢰도를 평가하는 방법이다. 일반적으로 원전의 배관은 축방향 및 길이방향으로 급격한 불연속면이 없이 매끄럽게 제작되며 특정한 구역만 두껍거나 얇게 제작되지 않음에 착안하여 개발한 방법이다. 아래 Fig. 5는 SAM 평가를 위한 다이어그램이며, 식(4)을 통한 신뢰도 평가 방법을 나타낸다. 검사 대상 포인트  $x_{(i,j)}$ 에 가중치를 적용한 값이 주변 평균값보다 큰 경우 신뢰도 초과 데이터로 검출한다. 발전소 배관은 대부분 단열재로 씌워져 있다. 비파괴 검사를 위해 단열재를 제거한 후 검사를 수행하고 다시 단열재를 재시공해야 한다. 일반적으로 계획예방정비동안 컴포넌트의 두께 검사를 위해 주어진 시간이 부족하며, 단열재 재시공 후에 다시 검사를 위해 단열재를 제거할 수 있는 여유가 없다. SAM 기법이 포함된 자동화 프로그램을 적용할 경우, 신속하게 신뢰도 분석을 수행하여 오류로 추정되는 데이터를 검출하고, 이를 재측정하여 측정 데이터의 신뢰도를 높일 수 있다.

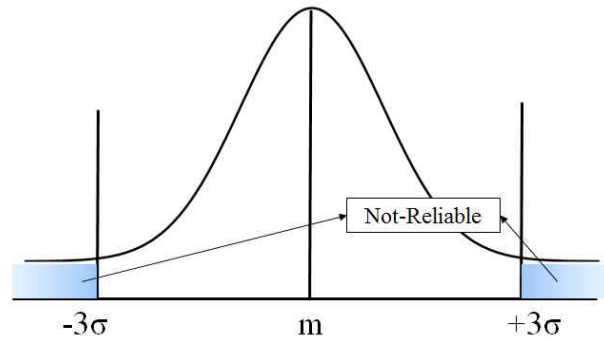


Fig. 6. The diagram of not-reliable region.

$$\alpha \cdot x_{(i,j)} \geq \frac{1}{8} (x_{(i-1,j-1)} + x_{(i,j-1)} + x_{(i+1,j-1)} + x_{(i-1,j)} + x_{(i+1,j)} + x_{(i-1,j+1)} + x_{(i,j+1)} + x_{(i+1,j+1)}) \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$  : Weighting factor  
 $i, j$  : Grid coordinate  
 $x$  : Thickness reading

#### 3-2. 반복측정 데이터의 신뢰도 분석 방법

반복측정 데이터는 컴포넌트 표면에 정해진 그리드 위치에서 일정 시간차를 두고 반복측정된 데이터를 의미한다. 반복측정된 횟수에 따라 다수의 측정 데이터가 존재할 수 있다. 각각의 개별 측정 데이터는 단독측정 신뢰도 분석 방법을 적용하여 신뢰도를 분석할 수 있다. 반복측정 데이터는 개별 포인트의 두께 측정값 차이가 감육이 발생한 두께 차이로 고려할 수 있다. 반복측정 데이터의 감육평가 결과는 이론적으로 단독검사 데이터의 결과보다 정확한 감육평가가 가능하다. 그러나 단독평가는 정해진 범위의 통계값을 통해 감육평가가 수행되나 반복측정 데이터는 개별 포인트의 두께 차이가 바로 감육평가 결과로 도출되기 때문에 측정오차에 오히려 민감할 수 있다.

이전 연구를 통해 반복측정 데이터에 대한 신뢰도 분석 방법을 제안하였다.<sup>9)</sup> 반복측정 데이터의 신뢰도 분석은 개별 포인트에서 아래 식(5)와 같이 두께 변화율( $x^*$ )을 계산하고,  $x^*$ 의 발생 확률을 3 Sigma Method를 통해 신뢰도를 분석하는 방법이다.

$$x^* = \frac{((T_{Cur} - T_{Pre}) / T_{Pre}) \times 100}{Operation\ Time} \quad (5)$$

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)

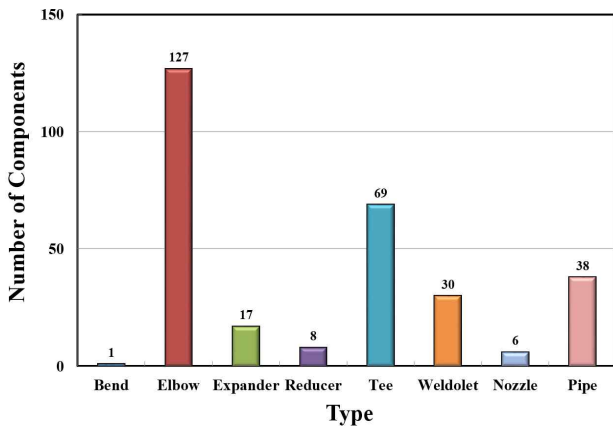


Fig. 7. The number of component grouped by type.

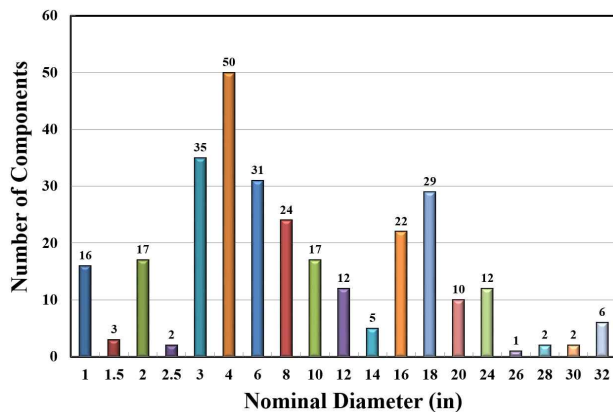


Fig. 8. The number of component grouped by nominal diameter.

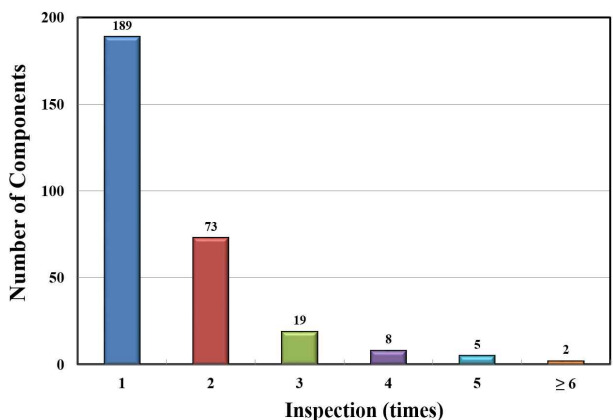


Fig. 9. The number of component grouped by inspection times.

이전 연구<sup>9)</sup> 결과를 통하여 반복측정 데이터에 대한 두께 변화율의 확률분포는 정규분포를 따르는 것을 확인하였다. 확률분포에서  $-3\sigma < x < +3\sigma$  는 정규 분포 곡선내 전면적의 99.73%를 의미한다. 즉,  $\pm 3\sigma$ 의 상하한 한계를 벗어나는 확률은 0.27%이다. 반복측정 데이터의 각각의 개

별 포인트에서 두께 변화율을 계산하고, Fig. 6과 같이  $\pm 3\sigma$ 의 상하한 한계를 벗어나는 경우 오류 데이터로 검출하고, 데이터를 재측정하여 신뢰도 분석을 수행할 수 있다.

#### 4. 신뢰도 분석 방법의 적용

##### 4-1. 대상 발전소 두께 측정 현황

2013년 계획예방정비를 수행한 발전소를 대상으로 신뢰도 분석을 적용하였다. 해당 기간 동안 총 296개의 컴포넌트에 대하여 두께 검사를 실시하였다. Fig. 7은 배관 유형별 검사현황이다. Bend, Elbow, Expander, Reducer, Tee, Weldolet, Nozzle 및 Pipe의 8가지 유형에 대한 검사를 수행하였으며 가장 많이 측정된 컴포넌트는 Elbow로서 127개이다.

Fig. 8은 배관 공칭구경별 검사 현황이다. 1인치의 소구경 배관에서 32인치의 대구경 배관에 이르는 다양한 구경의 컴포넌트를 검사하였다. 가장 많이 측정된 배관 공칭구경은 4인치로 50개의 컴포넌트를 검사하였으며, 18인치의 대구경 컴포넌트도 29개소를 측정하였다. 컴포넌트 검사를 위해 그리드를 생성할 때 그리드 간격은 배관 구경에 따라 정해지는데 일반적으로 EPRI의 가이드라인에 따른다. 4인치 구경 엘보우의 경우 약 180여개의 검사 포인트가 생성되며, 18인치 대구경 엘보우의 경우 240여개의 검사 포인트가 생성된다. 해당 발전소의 계획예방정비기간동안 검사한 전체 검사 포인트는 약 45,000개이다.

Fig. 9는 계획예방정비기간 중 측정된 컴포넌트의 검사회수에 대한 현황이다. 발전소에서는 감육 분석 및 운전경험을 통해 매주기 검사계획을 수립한다. 해당 주기 동안 신규로 측정된 컴포넌트는 189개이며, 반복측정된 컴포넌트는 107개이다. 발전소에서는 감육에 취약하거나 잔여수명이 짧게 계산되는 경우 지속적으로 검사를 수행하여 건전성을 확인하고 있다. 해당 주기에 반복측정된 컴포넌트 중 2회 반복측정된 컴포넌트는 73개로 가장 많지만, 3회 이상 반복측정된 컴포넌트도 34개가 있다.

##### 4-2. 신뢰도 분석 방법 적용 결과

계획예방정비동안 검사한 컴포넌트에 대하여 앞서 검토한 신뢰도 분석 방법을 적용하였다. 단독 및 반복측정 데이터에 대하여 신뢰도 분석 방법을 적용하여 신뢰도 범위를 초과하는 데이터를 추출하고, 해당 데이터에 대한 재측정을 수행하였다. 측정 데이터의 신뢰도 분석은 초기 데이터 취득 후 대부분 당일 수행되었으며, 재측정은 초기 데이터 측정 후 1~2일 이내에 수행되었다. Table 1은 신뢰도 분석의 적용결과이다. 계획예방정비기간동안 오류 데이터로 검출되어 재측정한 검사 데이터는 221개이다. 이는 전체 검사 데이터 기준으로 약 0.49%에 해당된다. 검출된 데이터를

**Table 1. Application result of reliability analysis**

Total Inspection Data (a)	Re-inspection Data (b)	Re-inspection Ratio (b/a)	Thickness Change (c)	Thickness Change Ratio (c/b)
Approximately 45,000	221	0.49%	137	62%

**Table 2. Results of applying changed thickness for calculation of remaining life**

Components (d)	Re-inspection Components (e)	Re-inspection Ratio (e/d)	Remaining Life Change (f)	Remaining Life Change Ratio (f/d)
296	54	18%	34	11%

재측정한 결과 검사 데이터의 변동이 발생한 개수는 137개이며, 이는 재측정한 데이터의 62% 에 해당한다.

발전소에서는 측정된 검사 데이터는 평가를 통해 차주기 검사 시기를 결정한다. 차주기 검사 시기는 식 (6)에 의해 결정된다.

$$RL = \frac{T_{min} - Max(T_{crit}, 0.2 \times T_{nom})}{\frac{MW}{OT_{total}}} \cdot \frac{Cycle}{OT} \cdot \frac{1}{DF} \quad (6)$$

여기서, RL : 잔여수명, Cycle  
 T<sub>min</sub> : 최소측정두께, in  
 T<sub>crit</sub> : 최소요구두께, in  
 T<sub>nom</sub> : 공칭두께, in  
 MW : 평가 감육량 (CHECWORKS 결정), in  
 OT<sub>total</sub> : 전체 운전시간, hr  
 Cycle : 운전주기  
 DF : Duty Factor  
 $\overline{OT}$  : 5주기 평균 운전시간, hr

신뢰도 분석으로 도출된 컴포넌트의 재측정 결과를 반영하여 잔여수명을 계산하였다. 측정 데이터가 변경됨으로 인하여 식(6)의 평가 감육량이 변경될 수 있다. 감육평가는 CHECWORKS 프로그램을 활용하여 발전소의 절차에 따라 수행하였다. 잔여수명 계산 결과는 CHECWORKS 프로그램의 평가 감육량에 따라 증가 또는 감소할 수 있다. Table 2는 재측정 결과를 반영하여 잔여수명을 재계산한 결과이다. 전체 296개의 검사 컴포넌트 중 재검사를 수행한 컴포넌트는 18%인 54개이다. 재측정 결과를 반영하여 잔여수명을 계산할 경우 잔여수명이 변경되는 컴포넌트는 전체 컴포넌트 기준으로 11%인 34개소로 확인되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 원전 배관의 두께측정 데이터에 대한 신뢰도 분석 방법을 검토하고, 계획예방정비기간동안 실제 원전에서 측정된 데이터에 적용하여 효과를 검증하였다. 본 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 배관 두께측정 데이터 평가방법은 일부 측정 데이터 범위의 최대값을 기준으로 컴포넌트에서 발생한 감육률을 계산한다. 이러한 방법은 측정과정에서 불가피하게 발생하는 측정 오차를 배관두께 감육으로 평가할 가능성이 존재한다.
- 2) 이전 연구를 통해 개발된 신뢰도 분석 방법을 실제 발전소에 측정된 검사 데이터에 적용한 결과, 도출된 검사 포인트의 62%에서 재측정시 두께 데이터가 변동됨을 확인하였다. 재측정 결과를 반영하여 잔여수명을 계산한 결과 11%에서 잔여수명이 변동됨을 확인하였다.
- 3) 이를 통해 신뢰도 분석 방법이 발전소 초기 데이터 분석에 매우 효과적임을 확인하였으며, 그 결과가 전체 컴포넌트 잔여수명에도 영향을 미침을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 신뢰도 분석 방법을 적용할 경우 배관감육 관리의 신뢰성을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### References

1. EPRI, *Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R4)*, Technical Report 2001000563, Palo Alto, CA, USA (2013).
2. EPRI, *Mentoring Guide for Flow-Accelerated Corrosion Engineers*, 1022295, Palo Alto, CA, USA (2010).
3. EPRI, *Recommendations for Controlling Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement, and Solid Particle Erosion*

- in Nuclear Power Plant Piping Systems*, Final Report, 1011231, Palo Alto, CA, USA (2004).
4. EPRI, *Guidelines for Plant Modeling and Evaluation of Component Inspection Data*, 1009599, Palo Alto, CA, USA (2004).
  5. EPRI, *Least Square Methods for Evaluating Inspection Data*, Technical Report, 1018456, Palo Alto, CA, USA (2008).
  6. EPRI, *Development of an Averaged Point-to-Point Method for Inspection Data*, Technical Report 1020528, Palo Alto, CA, USA (2010).
  7. EPRI, *Statistical Methods for the Analysis of Multiple-Inspection Flow-Accelerated Corrosion Data*, 1019175 Final Report, Palo Alto, CA, USA (2009).
  8. H. Yun and K. M. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 129 (2012).
  9. H. Yun and K. M. Hwang, *Reliability Analysis Method for Repeated UT Measurement Data in Nuclear Power Plants*, Proceedings of the CSSK spring meeting p. 12, CSSK, CHONNAM National Univ., Gwangju, Korea (2013).