

원전 배관감육 평가를 위한 새로운 기법의 도입 및 타당성

황 경 모[†] · 윤 훈 · 박 현 철한국전력기술(주), 경기도 용인시 기흥구 용구대로 2354
(2014년 4월 18일 접수, 2014년 4월 25일 수정, 2014년 4월 28일 채택)Introduction and Feasibility on a New Technology for the Pipe Wall Thinning
Evaluation of Nuclear Power PlantsKyeong Mo Hwang[†], Hun Yun, and Hyun Cheol ParkKEPCO E&C, 2354 Yonggu daero, Giheung-gu, Yongin, South Korea, 446-713
(Received April 18, 2014; Revised April 25, 2014; Accepted April 28, 2014)

A huge number of carbon steel piping components installed in the secondary system of nuclear power plants are exposed to aging mechanisms such as FAC (Flow-Accelerated Corrosion), Cavitation, Flashing, and LDIE (Liquid Droplet Impingement Erosion). Those aging mechanisms can lead to thinning of the piping components. To manage the wall thinning degradation, most of utilities in the world predict the wall thinning rate based on the computational program such as CHECWORKS, COMSY, and BRT-CICERO, evaluate the UT (Ultrasonic Test) data, and determine next inspection timing, repair or replacement, if needed. There are several evaluation methods, such as band, blanket, and strip methods, commonly used for determining the wear of piping components from single UT inspection data. It has been identified that those single UT evaluation methods not only do not consider the manufacturing features of pipes, but also may exclude the data of the most thinned point when determining the representative wear rate of piping components. This paper describes a newly developed single UT evaluation method, E-Cross method, for solving above problems and introduces application examples for several pipes and elbows. It was identified that the E-Cross method using the length and width of UT data excluded the most thinned points appropriate as the single UT evaluation method for thinned piping components.

Keywords : wall thinning, UT inspection, UT data single evaluation method, E-Cross evaluation method, manufacturing tolerance

1. 서 론

원자력발전소 2차계통에 사용되고 있는 탄소강 소재 배관은 유체흐름에 의해 가속되는 유동가속부식(FAC, Flow-Accelerated Corrosion)과 캐비테이션(Cavitation), 액적충돌(LDI, Liquid Droplet Impingement) 등과 같은 침식의 손상을 받아 두께가 점차 얇아지고 급기야는 파열되는 사건이 발생하기도 한다.^{1), 2)} 이러한 배관감육 손상을 관리하기 위하여 우리나라를 포함한 전 세계 모든 국가의 발전사업자는 CHECWORKS, COMSY, BRT-CICERO 등과 같은 프로그램을 이용하여 감육에 취약한 부위를 도출하고, 민감 우선순위에 따라 일정 물량을 주기적으로 검사한 후 UT

데이터를 평가/분석하여 차기 검사시거나 정비, 교체 여부를 결정하고 있다.

UT 데이터 평가시 고려해야 할 가장 중요한 사항은 단위 시간당 감육률이다. UT 검사를 2회 이상 수행하였다면 포인트별 감육률 계산은 어렵지 않지만 초기 데이터가 없는 상태에서 1회만 검사하였을 경우에는 과거 데이터가 존재하지 않기 때문에 특정 컴포넌트(직관, 엘보, 티, 리듀서 등)의 얇아진 부분이 제작에 따른 영향인지, 아니면 실제 감육이 발생하여 얇아진 것인지를 결정하기가 용이하지 않다. 이에 따라 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 단독평가 방식으로 Band Method, Strip Method, Blanket Method 등의 방식을 제시하였으며³⁾, 미국과 한국을 포함한 많은 국가에서 본 방식을 널리 활용하고 있다. 그러나 장기간 국내 원전의 배관감육 관리에 상기 단독평가

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

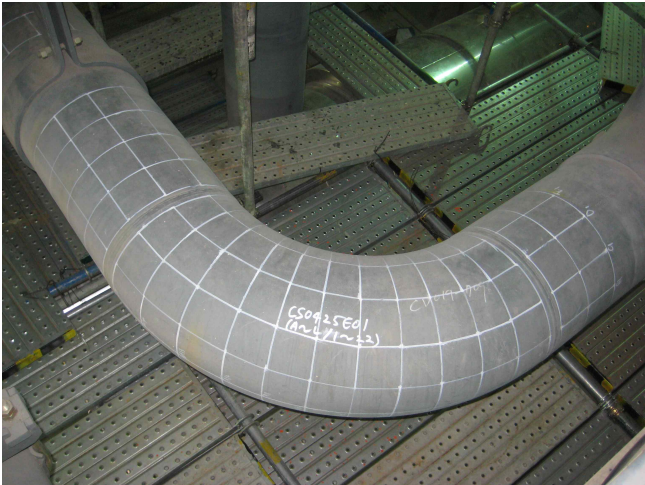


Fig. 1. grid points.



Fig. 2. UT inspection.

Table 1. Examples of UT data

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0.299	0.305	0.295	0.274	0.277	0.277	0.292	0.286	0.286	0.277	0.287	0.288	0.287	0.288
2	0.287	0.293	0.290	0.275	0.275	0.272	0.282	0.282	0.282	0.277	0.285	0.284	0.281	0.281
3	0.285	0.290	0.284	0.273	0.275	0.272	0.285	0.285	0.278	0.274	0.279	0.282	0.285	0.291
4	0.278	0.272	0.279	0.299	0.285	0.289	0.287	0.302	0.281	0.260	0.264	0.264	0.275	0.268
5	0.275	0.272	0.276	0.303	0.280	0.285	0.287	0.302	0.282	0.261	0.269	0.267	0.273	0.274
6	0.272	0.272	0.276	0.302	0.292	0.288	0.291	0.303	0.287	0.279	0.269	0.275	0.286	0.272
7	0.280	0.281	0.283	0.306	0.292	0.295	0.296	0.298	0.296	0.271	0.271	0.278	0.288	0.282
8	0.279	0.279	0.289	0.304	0.286	0.291	0.290	0.302	0.292	0.281	0.282	0.278	0.285	0.294
9	0.289	0.281	0.287	0.308	0.288	0.291	0.285	0.297	0.292	0.284	0.284	0.282	0.290	0.298
10	0.296	0.289	0.286	0.306	0.288	0.290	0.278	0.298	0.289	0.288	0.281	0.284	0.296	0.301
11	0.294	0.303	0.297	0.291	0.286	0.282	0.288	0.280	0.294	0.304	0.298	0.294	0.284	0.292
12	0.296	0.304	0.299	0.290	0.293	0.284	0.289	0.282	0.299	0.302	0.301	0.290	0.281	0.292
13	0.295	0.303	0.297	0.293	0.291	0.284	0.286	0.281	0.298	0.303	0.300	0.293	0.283	0.290
14	0.294	0.302	0.296	0.291	0.293	0.282	0.287	0.285	0.298	0.302	0.304	0.295	0.283	0.291
15	0.294	0.300	0.296	0.291	0.292	0.282	0.290	0.284	0.297	0.302	0.301	0.290	0.280	0.292
16	0.291	0.299	0.298	0.289	0.291	0.283	0.290	0.283	0.296	0.300	0.300	0.295	0.280	0.283
17	0.294	0.298	0.298	0.289	0.290	0.282	0.288	0.274	0.295	0.300	0.300	0.295	0.280	0.285

방식을 적용해 본 결과, 보수성을 과다하게 내포하고 있다는 사실을 확인하였다⁴⁾. 단독평가 방식에서 과도한 보수성은 재검사 빈도를 높이기 때문에 신규 검사부위가 축소되는 현상으로 귀결된다. 이에 따라 본 논문에서는 보다 현실적이고 경제적으로 배관을 관리할 수 있는 새로운 UT 데이터 단독평가법, 즉 E-Cross Method를 소개하고 그에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 기존 UT 데이터 단독평가법

우리나라를 포함한 전세계 대부분의 국가에서는 원전 2차측의 배관 및 피팅류 내부에서 발생하는 감육현상 발생 여부를 검사하기 위하여 바둑판 모양으로 배관두께를 검사하고 있다. Fig. 1은 UT 검사를 위한 그리드 포인트를 예로

서 제시한 것이다. 그림에서 흰 선의 교차점이 검사대상 포인트이다. Fig. 2는 UT 검사를 수행하고 있는 모습을 보여 준다. 검사 포인트는 교차점이며, 일반적으로 휴대용 장비를 활용한다. Table 1은 UT 데이터 파일을 예시한 것으로서 가로축이 원주방향, 세로축은 길이방향이다. 예로서, 좌표 (A,1)은 유체 흐름방향 최상류의 엘보우 외호 쪽 포인트를 의미하고 A, B, ... 순서는 시계방향이다.

이러한 UT 검사 데이터로부터 감육진행 여부를 판정해야 하는데 과거에 검사한 사례가 없을 경우에는 앞에서 기술한 Band Method, Strip Method, Blanket Method 등을 이용하여 단독평가를 수행하여야 한다. 각각의 평가방법은 다음과 같다.

2.1 Band Method 및 Strip Method

Band Method는 아래 식 (1) 및 식 (2)와 같이 원주방향 데이터 1열 중에서 가장 큰 값(t_{max}) 또는 공칭두께(t_{nom})

Table 2. Examples of Blanket UT evaluation Method

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0,299	0,305	0,295	0,274	0,277	0,277	0,292	0,286	0,286	0,277	0,287	0,288	0,287	0,288
2	0,287	0,293	0,290	0,275	0,275	0,272	0,282	0,282	0,282	0,277	0,285	0,284	0,281	0,281
3	0,285	0,290	0,284	0,273	0,275	0,272	0,285	0,285	0,278	0,274	0,279	0,282	0,285	0,291
4	0,278	0,272	0,279	0,299	0,285	0,289	0,287	0,302	0,281	0,260	0,264	0,264	0,275	0,268
5	0,275	0,272	0,276	0,303	0,280	0,285	0,287	0,302	0,282	0,261	0,269	0,267	0,273	0,274
6	0,272	0,272	0,276	0,302	0,292	0,288	0,291	0,303	0,287	0,279	0,269	0,275	0,286	0,272
7	0,280	0,281	0,283	0,306	0,292	0,295	0,296	0,298	0,296	0,271	0,271	0,278	0,288	0,282
8	0,279	0,279	0,289	0,304	0,286	0,291	0,290	0,302	0,292	0,281	0,282	0,278	0,285	0,294
9	0,289	0,281	0,287	0,308	0,288	0,291	0,285	0,297	0,292	0,284	0,284	0,282	0,290	0,298
10	0,296	0,289	0,286	0,306	0,288	0,290	0,278	0,298	0,289	0,288	0,281	0,284	0,296	0,301
11	0,294	0,303	0,297	0,291	0,286	0,282	0,288	0,280	0,294	0,304	0,298	0,294	0,284	0,292
12	0,296	0,304	0,299	0,290	0,293	0,284	0,289	0,282	0,299	0,302	0,301	0,290	0,281	0,292
13	0,295	0,303	0,297	0,293	0,291	0,284	0,286	0,281	0,298	0,303	0,300	0,293	0,283	0,290
14	0,294	0,302	0,296	0,291	0,293	0,282	0,287	0,285	0,298	0,302	0,304	0,295	0,283	0,291
15	0,294	0,300	0,296	0,291	0,292	0,282	0,290	0,284	0,297	0,302	0,301	0,290	0,280	0,292
16	0,291	0,299	0,298	0,289	0,291	0,283	0,290	0,283	0,296	0,300	0,300	0,295	0,280	0,283
17	0,294	0,298	0,298	0,289	0,290	0,282	0,288	0,274	0,295	0,300	0,300	0,295	0,280	0,285

중 큰 값을 초기두께 (t_{ini}) 로 가정하고 동일 열의 가장 작은 값과의 차이를 감육량으로 결정한다. 이러한 과정을 맨 끝 열까지 반복한 후 가장 큰 감육량을 운전시간으로 나누어 해당 컴포넌트의 대표 감육률로 결정한다.⁵⁾

$$t_{init} = t_{nom} \text{ or } t_{max} \tag{1}$$

$$Wear = t_{init} - t_{min} \tag{2}$$

$$Wear \text{ Rate} = \frac{Wear}{OperatingTime} \tag{3}$$

Strip Method는 원주방향 데이터 열을 이용하는 Band Method와 달리 길이방향 데이터를 이용한다는 사실을 제외하고는 모두 동일하다. 여기서 Band Method와 Blanket Method는 각각 원주방향 및 길이방향으로 두께분포가 균일하다는 가정을 내포하고 있다.

2.2 Blanket Method

Blanket Method는 Table 2에서 볼 수 있듯이 (A,1) 포인트부터 (D,3)까지의 12개 데이터 세트(블랭킷으로 명명함)를 평가하고 그 다음 (B,1) 포인트부터 (E,3)까지 데이터를 평가하는 방식으로 행렬을 바꾸면서 (N,17)까지 전체 데이터를 평가해 나가는 방식이다. 감육량과 감육률을 결정하는 방식은 식 (4) 및 식 (5)와 같다. 즉, 하나의 블랭킷 내에서 가장 큰 두 값의 평균과 가장 작은 두 값의 평균을 뺀 값 또는 공칭두께와 가장 작은 두 값을 평균하여 뺀 값 중 큰 값을 감육량으로 결정하는 방식이다. 이러한 과정을 전체 블랭킷에 반복 적용한 후 가장 큰 감육량을 운전시간으로 나누어 해당 컴포넌트의 대표 감육률로 결정한다.⁵⁾

$$Wear = \max \left(\frac{(t_{max1} + t_{max2}) - (t_{min1} + t_{min2})}{2} \text{ or } t_{nom} - \frac{(t_{min1} + t_{min2})}{2} \right) \tag{4}$$

$$Wear \text{ Rate} = \frac{Wear}{OperatingTime} \tag{5}$$

3. 기존 UT 평가법의 문제점

3.1 직관

기존 EPRI에서 제시한 UT 데이터 단독 평가법의 적절성 여부를 검토하기 위하여 초기 제작 당시의 직관(PA)과 일정시간 운전된 원전의 직관(PB) 2개를 대상으로 Band Method 및 Strip Method를 적용하여 보았다. 상기 두 방식을 적용하는 이유는 EPRI가 직관일 경우에 적용하도록 권고하고 있기 때문이다.⁶⁾ Table 3는 직관 PA의 UT 데이터로 단독평가를 수행한 결과를 예로서 제시한 것이다. 비록 운전은 되지 않았지만 실제 운전된 것으로 가정하고, 앞의 2.1에서 제시한 Band Method에 따라 평가된 직관 PA에 대한 대표 감육량(Wear)은 2행의 0.056in이다. 마찬가지로 Strip Method를 적용하여 계산된 직관 PA에 대한 대표 감육량은 D열의 0.028in이다. 여기서 Band Method와 Strip Method로 계산된 감육량 사이에는 상당한 차이가 나타나고 있으며, 실제 가장 얇은 두께 데이터인 0.498in (K,8)를 반영하지 못하고 있는 것으로 나타났다.

Table 3. Application examples of the Band and Blanket methods to pipe (PA) (Unit: in)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Max-Min
1	0.53	0.547	0.545	0.561	0.559	0.562	0.52	0.514	0.512	0.506	0.508	0.517	0.056
2	0.511	0.528	0.546	0.557	0.559	0.56	0.54	0.542	0.532	0.508	0.504	0.512	0.056
3	0.514	0.529	0.533	0.543	0.552	0.551	0.527	0.527	0.526	0.518	0.513	0.52	0.039
4	0.521	0.542	0.539	0.551	0.547	0.548	0.529	0.533	0.511	0.506	0.506	0.517	0.045
5	0.516	0.537	0.547	0.551	0.544	0.539	0.52	0.517	0.517	0.507	0.504	0.503	0.048
6	0.511	0.533	0.546	0.554	0.558	0.542	0.523	0.521	0.505	0.503	0.51	0.517	0.055
7	0.52	0.53	0.535	0.544	0.541	0.55	0.533	0.52	0.51	0.502	0.504	0.505	0.048
8	0.513	0.529	0.525	0.533	0.537	0.54	0.528	0.531	0.521	0.507	0.498	0.509	0.042
9	0.513	0.53	0.528	0.536	0.541	0.537	0.531	0.524	0.524	0.511	0.518	0.516	0.030
Max-Min	0.019	0.019	0.022	0.028	0.022	0.025	0.020	0.028	0.027	0.016	0.020	0.017	

Table 4. Application examples of the Band and Blanket methods to pipe (PB) (Unit: in)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Max-Min
1	0.390	0.387	0.377	0.381	0.373	0.374	0.370	0.378	0.395	0.395	0.382	0.373	0.025
2	0.395	0.391	0.380	0.382	0.375	0.379	0.374	0.385	0.402	0.401	0.389	0.382	0.028
3	0.395	0.391	0.377	0.379	0.374	0.375	0.376	0.382	0.398	0.401	0.388	0.383	0.027
4	0.394	0.389	0.374	0.377	0.375	0.375	0.378	0.381	0.395	0.400	0.389	0.392	0.026
5	0.389	0.384	0.375	0.379	0.371	0.372	0.370	0.384	0.388	0.398	0.386	0.390	0.028
Max-Min	0.006	0.007	0.006	0.005	0.004	0.007	0.008	0.007	0.014	0.006	0.007	0.019	

Table 5. Application examples of the Blanket method to Elbow EA (Unit: in)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	0.36	0.364	0.338	0.328	0.332	0.349	0.349	0.36	0.351	0.37	0.371	0.358
2	0.364	0.358	0.332	0.322	0.335	0.348	0.358	0.36	0.359	0.377	0.379	0.366
3	0.363	0.358	0.337	0.33	0.335	0.347	0.36	0.369	0.365	0.386	0.382	0.36
4	0.37	0.357	0.34	0.328	0.337	0.357	0.368	0.373	0.367	0.378	0.382	0.366
5	0.368	0.36	0.335	0.328	0.346	0.359	0.369	0.374	0.37	0.378	0.381	0.361
6	0.369	0.362	0.342	0.331	0.343	0.354	0.365	0.372	0.37	0.381	0.383	0.361
7	0.381	0.365	0.348	0.333	0.345	0.352	0.363	0.373	0.37	0.385	0.384	0.363
8	0.381	0.367	0.346	0.331	0.342	0.353	0.354	0.374	0.375	0.39	0.382	0.369
9	0.383	0.364	0.35	0.332	0.344	0.352	0.354	0.378	0.375	0.38	0.379	0.366
10	0.378	0.372	0.356	0.333	0.35	0.344	0.356	0.378	0.372	0.378	0.377	0.364
11	0.378	0.375	0.355	0.336	0.343	0.344	0.347	0.377	0.372	0.381	0.38	0.368
12	0.375	0.374	0.344	0.337	0.345	0.343	0.345	0.362	0.369	0.384	0.38	0.365
13	0.372	0.363	0.344	0.338	0.344	0.346	0.344	0.363	0.379	0.386	0.386	0.363

Table 4에서 볼 수 있듯이 일정기간 운전된 직관 PB에 대해서도 Band Method와 Strip Method를 적용하여 보았다. 직관 PB에 대하여 Band Method를 적용해 본 결과, 대표 감육량(Wear)은 2행의 0.028in로 계산되었다. 마찬가지로 Strip Method를 적용하여 계산된 직관 PB에 대한 대표 감육량은 I열의 0.014in로 나타났다. 직관 PA에서와 같이 Band Method와 Strip Method로 계산된 감육량 사이에는 2배 정도의 차이가 나타나고 있으며, 실제 가장 얇은 값인 0.370in(G,5)를 반영하지 못하고 있는 것으로 나타났다.

만약 직관 PA (K,8) 포인트의 0.498in와 직관 PB (G,5) 포인트의 0.370in가 실제 감육으로 인하여 얇아진 것이라

면 두 직관에서 계산된 대표 감육량은 모두 엉뚱한 위치에서 결정된 잘못된 감육량일 가능성이 크다.

3.2 엘보우

기존 UT 데이터 단독 평가법의 적절성 여부를 검토하기 위하여 초기 제작 당시의 엘보우(EA)와 일정기간 운전된 원전의 엘보우(EB) 2개를 대상으로 EPRI가 권고하고 있는 Blanket Method를 적용하여 보았다.⁶⁾ 비록 운전은 되지 않았지만 실제 운전된 것으로 가정하고, 앞의 2.2에서 제시한 Blanket Method에 따라 평가된 엘보우 EA에 대한 대표 감육량(Wear)은 0.051in이다. 본 값은 Table 5의 (A,7) 부터 (D,9)까지의 (4 x 3) 블랭킷에서 나온 값이다.

$$Wear = \frac{(t_{max1} + t_{max2}) - (t_{min1} + t_{min2})}{2} = \frac{(0.383 + 0.381) - (0.331 + 0.332)}{2} = 0.051 \quad (6)$$

여기서 EA의 대표 감육량인 0.051in를 계산한 (A,7) 부터 (D,9)까지의 (4 x 3) 블랭킷은 본 엘보우의 가장 얇은 포인트 (D,2)의 0.322in를 반영하고 있지 못하고 있다. 즉, 대표 감육량은 엉뚱한 부위의 데이터에서 제시된 값으로서 실제 감육량과는 거리가 먼 것을 알 수 있다.

마찬가지로 일정기간 운전된 엘보우 EB에 대해서도 Blanket Method를 적용하여 보았다. 엘보우 EB에 대하여 Blanket Method를 적용해 본 결과, 엘보우 EB에 대한 대표 감육량은 0.187in이다. 본 값은 Table 6의 (D,1) 부터 (G,3)까지의 (4 x 3) 블랭킷에서 나온 값이다.

$$Wear = \frac{(t_{max1} + t_{max2}) - (t_{min1} + t_{min2})}{2} = \frac{(0.668 + 0.668) - (0.481 + 0.482)}{2} = 0.187 \quad (7)$$

여기서 엘보우 EB의 대표 감육량인 0.187in를 계산한 (D,1) 부터 (G,3)까지의 (4 x 3) 블랭킷은 본 엘보우의 가장 얇은 포인트 (B,3)의 0.462in를 반영하고 있지 못하고 있다. 즉, 엘보우 EB의 대표 감육량이 결정된 블랭킷 역시 실제 감육이 많이 발생한 포인트의 값을 반영하고 있지 못함을 알 수 있다.

4. 새로운 기법의 도입 및 타당성

실제 감육이 발생한 부위가 배제될 가능성이 큰 기존의 Band Method, Strip Method 및 Blanket Method를 보완

Table 6. Application examples of the Blanket method to Elbow EB

(Unit: in)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	0.526	0.471	0.476	0.481	0.49	0.542	0.668	0.568	0.517	0.526	0.513	0.483
2	0.504	0.472	0.48	0.49	0.496	0.552	0.668	0.587	0.529	0.541	0.517	0.487
3	0.499	0.462	0.479	0.482	0.498	0.557	0.648	0.577	0.526	0.535	0.511	0.478
4	0.494	0.471	0.482	0.485	0.485	0.564	0.639	0.581	0.524	0.524	0.507	0.481
5	0.498	0.478	0.478	0.489	0.49	0.552	0.607	0.57	0.523	0.52	0.498	0.486
6	0.513	0.477	0.478	0.492	0.488	0.552	0.59	0.563	0.522	0.512	0.493	0.482
7	0.523	0.476	0.479	0.492	0.502	0.552	0.58	0.548	0.515	0.508	0.494	0.48
8	0.522	0.485	0.475	0.486	0.493	0.541	0.574	0.551	0.506	0.497	0.485	0.493
9	0.515	0.493	0.487	0.49	0.512	0.545	0.563	0.541	0.504	0.501	0.484	0.478
10	0.517	0.484	0.483	0.502	0.514	0.55	0.584	0.542	0.501	0.508	0.495	0.468
11	0.509	0.486	0.493	0.5	0.512	0.547	0.568	0.543	0.499	0.501	0.484	0.473

Table 7. Examples of the E-Cross single evaluation method

(Unit: in)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Avg
1	0.565	0.524	0.48	0.466	0.46	0.451	0.5	0.542	0.591	0.602	0.57	0.566	0.526
2	0.574	0.539	0.51	0.454	0.417	0.453	0.477	0.53	0.585	0.61	0.588	0.579	0.526
3	0.577	0.545	0.497	0.441	0.438	0.463	0.489	0.541	0.574	0.607	0.583	0.578	0.528
4	0.592	0.549	0.497	0.424	0.436	0.475	0.497	0.543	0.583	0.605	0.579	0.577	0.530
5	0.583	0.551	0.507	0.433	0.447	0.472	0.506	0.54	0.593	0.601	0.547	0.573	0.529
6	0.589	0.537	0.506	0.443	0.433	0.467	0.489	0.536	0.619	0.594	0.53	0.582	0.527
7	0.571	0.531	0.504	0.443	0.423	0.454	0.498	0.556	0.607	0.577	0.533	0.582	0.523
8	0.565	0.53	0.495	0.432	0.412	0.454	0.5	0.56	0.607	0.582	0.556	0.586	0.553
9	0.566	0.537	0.492	0.429	0.409	0.455	0.485	0.549	0.601	0.586	0.567	0.586	0.552
10	0.574	0.531	0.47	0.431	0.421	0.45	0.491	0.55	0.589	0.579	0.568	0.598	0.550
11	0.575	0.533	0.447	0.437	0.443	0.453	0.495	0.532	0.575	0.575	0.563	0.598	0.519
12	0.551	0.503	0.457	0.464	0.45	0.464	0.481	0.498	0.565	0.563	0.539	0.585	0.510
Avg	0.574	0.534	0.489	0.445	0.439	0.461	0.492	0.540	0.591	0.590	0.560	0.583	

하고 직관과 엘보우에 적용하는 방법을 달리하고 있는 문제 점을 해결하기 위하여 아래와 같은 E-Cross Method를 개발하였다. 즉, 식 (8)과 Table 7에서 볼 수 있듯이 전체 UT 데이터 세트 중에서 가장 작은 두께 데이터와 주변 데이터, 총 9개 포인트(Table 7의 (D,8)부터 (F,10)까지 박스 안) 를 제외하고 행과 열의 데이터를 평균한 값 중 큰 값과 최소두께를 뺀 값을 감육량으로 고려한다는 것이다. 여기에는 배관감육 손상이 특정부위에 국한되는 많은 경험사례와 신규로 제작되는 배관이 원주방향으로 특정한 패턴을 갖는다는 사실이 반영된 것이다. Fig. 3의 직관(PA)과 Fig. 5의 엘보우(EA)에서 볼 수 있듯이 원주방향(A, B, C, ...)으로는 특정한 패턴을 갖고 있다. 즉, Fig. 3에서는 D~F열이 전반적으로 두껍고 J~K열이 얇은 것을 알 수 있으며, Fig. 4에서는 D열이 얇고 J~K열이 두꺼운 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 4와 Fig. 6에서 x-축의 길이방향(1,2,3, ...)으로는 두께가 비교적 고르게 형성되고 있는 것을 알 수 있다. 물론

극소수의 직관과 엘보우는 이와 다른 패턴을 보이는 것도 있기는 하지만 교차 데이터를 사용하는 E-Cross Method를 적용할 경우에는 문제가 되지 않는다.

$$Wear = \max(\text{average row}, \text{average column}) - t_{min} \quad (8)$$

본 연구에서 개발한 E-Cross Method를 16개의 직관과 13개 엘보우에 적용하여 본 결과를 아래 Table 8과 Table 9에 제시하였다. 16개 직관에 대하여 4가지 단독 평가 방식을 적용해 본 결과, 신규로 개발한 E-Cross Method의 결과가 다른 방식에 의한 결과보다 감육률이 20~70% 적게 계산됨을 확인하였다. 역으로 말하면 기존 단독평가 방식이 20~70% 정도 보수적으로 평가되고 있다는 것을 의미한다. 발전소에서 직관에 대하여 일반적으로 사용하고 있는 Band Method와 비교해서는 감육률이 평균 약 40% 적게 계산되었다.

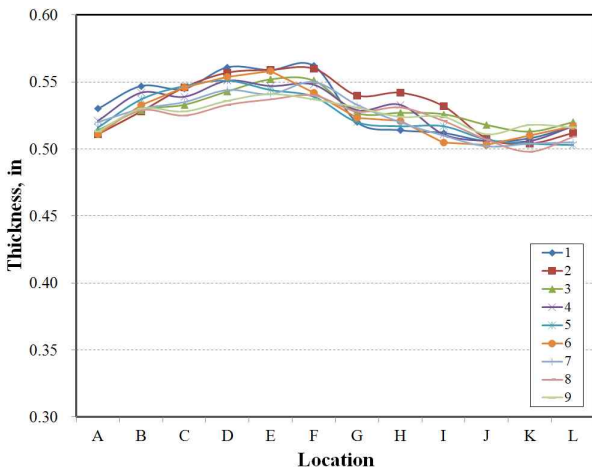


Fig. 3. Radial directional thickness distribution of PA.

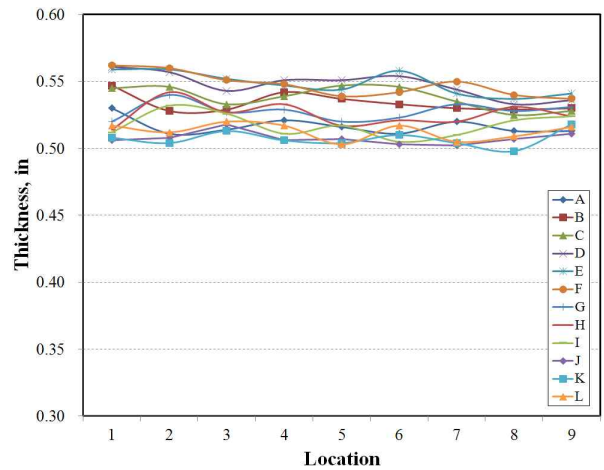


Fig. 4. Axial directional thickness distribution of PA.

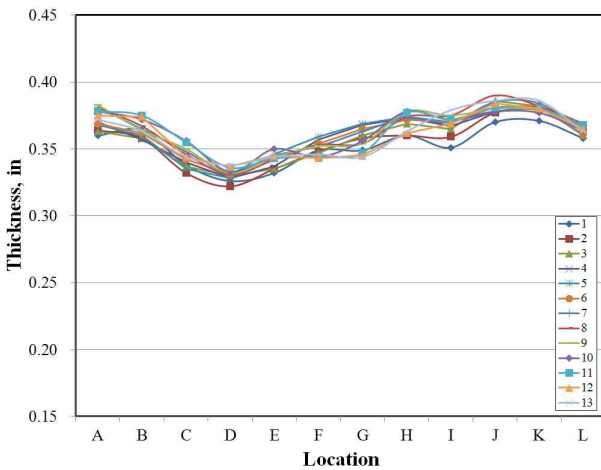


Fig. 5. Radial directional thickness distribution of EA.

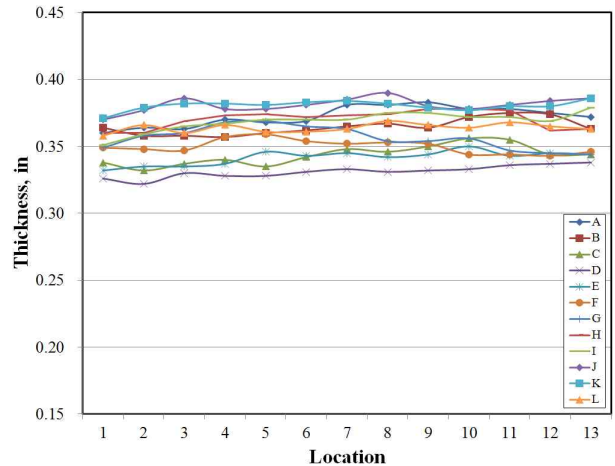


Fig. 6. Axial directional thickness distribution of EA.

Table 8. Comparisons of several pipe UT evaluation results between preexisting and E-Cross methods

No	Comp. Name	Type	Size, in	Band, in/yr	Strip, in/yr	Blanket, in/yr	E-Cross, in/yr	E-C/Band, %
1	CQ2121P05	Pipe	6,625	0,0064	0,0062	0,0059	0,0026	40,0
2	CJ0221P06	Pipe	6,625	0,0064	0,0048	0,0066	0,0022	34,4
3	CT1734P07	Pipe	6,625	0,0068	0,0038	0,0045	0,0045	65,7
4	HR0133P01	Pipe	16	0,0112	0,0056	0,0096	0,0061	54,6
5	HR0632P01	Pipe	16	0,0060	0,0056	0,0057	0,0035	58,5
6	DR0422P03	Pipe	4,5	0,0064	0,0040	0,0055	0,0036	56,9
7	1ASG044P04	Pipe	6,625	0,0015	0,0009	0,0010	0,0009	61,1
8	1GSS049P01	Pipe	8,625	0,0017	0,0013	0,0014	0,0011	61,4
9	1CEX016P17	Pipe	10,75	0,0014	0,0016	0,0013	0,0011	75,0
10	1AHP021P03	Pipe	12,75	0,0031	0,0040	0,0035	0,0035	114,7
11	2APP005P14	Pipe	24	0,0052	0,0017	0,0042	0,0030	57,2
12	2CEX004P08	Pipe	32	0,0150	0,0086	0,0121	0,0074	49,2
13	2ACO002P23	Pipe	20	0,0041	0,0026	0,0045	0,0025	59,5
14	2AHP021P03	Pipe	12,75	0,0019	0,0008	0,0012	0,0014	73,1
15	2CEX003P06	Pipe	20	0,0042	0,0038	0,0034	0,0030	71,5
16	TF008P08	Pipe	16	0,0013	0,0009	0,0014	0,0007	51,6
Average								61,5

Table 9. Comparisons of several elbow UT evaluation results between preexisting and E-Cross methods

No	Comp. Name	Type	Size, in	Band, in/yr	Strip, in/yr	Blanket, in/yr	E-Cross, in/yr	E-C/Blanket, %
1	CQ1021E01	Elbow	16	0,0118	0,0056	0,0101	0,0082	81,6
2	CQ1021E01	Elbow	16	0,0150	0,0066	0,0136	0,0101	74,0
3	CQ1021E01	Elbow	16	0,0212	0,0114	0,0208	0,0130	62,5
4	2GSS059E18	Elbow	10,75	0,0093	0,0050	0,0088	0,0034	39,0
5	2AHP001E05	Elbow	24	0,0143	0,0133	0,0135	0,0130	96,2
6	2VVP001E03	Elbow	32	0,0067	0,0073	0,0067	0,0062	91,4
7	2GSS057E14	Elbow	10,75	0,0093	0,0049	0,0073	0,0066	90,4
8	1GSS016E01	Elbow	12,75	0,0031	0,0022	0,0032	0,0022	68,9
9	TCG24E03	Elbow	10,75	0,0072	0,0057	0,0066	0,0042	63,4
10	TCG13E05	Elbow	10,75	0,0094	0,0030	0,0078	0,0069	88,3
11	TCG01E01	Elbow	10,75	0,0088	0,0037	0,0088	0,0054	61,9
12	TCG01E05	Elbow	10,75	0,0073	0,0036	0,0054	0,0048	87,6
13	TD057E03	Elbow	14	0,0040	0,0023	0,0032	0,0027	84,3
Average								76,1

13 개 엘보우에 대하여 4 가지 단독평가 방식을 적용해 본 결과는 신규로 개발한 E-Cross Method 의 결과가 Band Method 와 Blanket Method 의 결과보다 약 30~50% 적게 계산되었다. 그러나 Strip Method 와 비교할 때는 약 20% 더 크게 계산되었다. 일반적으로 엘보우는 외호 쪽이 얇게 제작되는 특성에 따라 현장에서는 Strip Method 를 거의 적용하지 않기 때문에 큰 의미는 없다. 발전소에서 엘보우에 대하여 일반적으로 사용하고 있는 Blanket Method 와 비교해서는 감육률이 평균 약 25% 적게 계산되었다. 결과적으로 E-Cross Method 는 기존 EPRI 가 제시한 단독평가 방법들 중, 배관의 제작특성을 감안하지 못하는 문제와 감육되지 않은 포인트의 두께에

근거하여 계산된 보수적인 감육률을 해당 컴포넌트의 대표 감육률로 결정하는 문제점을 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

우리나라를 포함한 전 세계 원전에서는 2 차계통 탄소강 배관에서 발생하는 감육 현상을 관리하기 위하여 일정 주기로 배관두께를 검사하고 UT 데이터 평가를 수행하여 정비, 교체 또는 재검사 시기를 결정하고 있다. 배관두께 검사를 2 회 이상 수행하였을 경우에는 PTP (Point to Point) 방식을 적용하여 감육 정도를 결정하고 있으나, 1 회 검사하였을

경우에는 배관설치 당시의 두께가 없어 감육률 결정이 용이하지 않다. 이에 따라 미국 EPRI 에서는 단독평가 방식으로 Band Method, Strip Method, Blanket Method 등의 방식을 제시하였으며, 미국과 한국을 포함한 많은 국가에서 본 방식을 널리 활용하고 있다. 그러나 상기 단독평가 방식에는 배관의 제작특성을 감안하지 못하는 문제와 감육되지 않은 포인트의 두께에 근거하여 계산된 보수적인 감육률을 해당 컴포넌트의 대표 감육률로 결정하는 문제점이 존재하고 있는 것을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서는 상기와 같은 문제점과 재검비율 과다로 나타나는 문제점을 해소하기 위하여 E-Cross Method 를 개발하였으며, 29 개의 직관과 엘보우에 적용해 본 결과 기존 대비 20~70% 정도의 보수성을 줄일 수 있고 단독평가 결과의 타당성도 충분하다는 사실을 확인하였다. 이는 동일한 배관 컴포넌트의 재검사 비율을 줄이고 신규 검사부위 확대에 따른 배관 건전성과 안전성 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이외에도 E-Cross Method 는 배관 컴포넌트 형태에 따라 다른 방식을 적용하던 기존 방식과 달리 동일한 방식을 컴포넌트 형태와 무관하게 적용할 수 있다는 장점도 내포하고 있다.

References

1. J. Horowitz, Recommendations for Controlling Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement Erosion, and Solid Particle Erosion in Nuclear Power Plant Piping Systems, EPRI 1011231, Final Report, p.2-1 (2004).
2. K. M. Hwang, *J. of Mech. Sci. and Technol*, B (Korean), **35**, 1105 (2011).
3. D. Smith, Mentoring Guide for Flow-Accelerated Corrosion Engineers, EPRI 1022295, Technical Update, p.8-7 (2010).
4. Y. H. Lee, Thickness Inspecting Data Analysis after 2 Operating Cycles for a New Constructed Nuclear Plant”, The Corrosion Science Society of Korea, The CSSK 2013 Annual Fall Meeting and Symposium on Protective Coating & Stainless Steel Program, p.49, Jeju (2013).
5. D. Poe and H. Crockett, CHECWORKS™ Steam/Feedwater, Application, Guidelines for Plant Modeling and Evaluation of Component Inspection Data, EPRI 1019176, Final Report, p.4-11 (2009).
6. D. Poe, D. Ha, and J. Horowitz, CHECWORKS™ Steam/Feedwater, Application, Guidelines for Plant Modeling and Evaluation of Component Inspection Data, EPRI 1009599, Final Report, p.4-15 (2004).