

## 가동전검사 DB에 근거한 초기두께 분포 분석

### Overview of Initial Thickness Distribution based on the PSI DB

이성호, 제갈성, 김위수

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요약

본 고에서는 국내 원전에 적용하고 있는 감육 탄소강배관 관리 기술체계 요소기술에 대한 배경과 실지 발전소 적용 사례를 제시하였다. 또한 베이스라인 두께데이터를 확보하지 못한 배관기에 대한 데이터 분석과 감육량, 감육속도 평가시 초기두께분포를 이해함으로써 타당성 있는 감육평가 결과를 도출할 수 있도록 가동전검사 데이터베이스에 근거한 초기두께 분포를 분석하고 결과를 제시하였다.

#### 1. 개요

원자력발전소 2차계통 탄소강배관에서의 감육과 이에 따른 Elbow, Tee, Expander, Reducer, Straight Pipe 등의 배관기기 건전성 저하는 전력회사의 중요한 현안으로 대두되고 있고, 주된 감육요인은 FAC(Flow-Accelerated Corrosion)인 것으로 알려져 있다. 인명손상과 막대한 경제적 손실을 발생시킨 미국 Surry원전 급수관 파열사고('86.12) 이후 배관감육에 대한 관심이 높아졌으며, 배관관리와 관련한 규제와 기술들이 개발되어 왔다[1][2]. 한편 국내 원전 사업자는 FAC 모델 해석용 전산코드(EPRI CHECWORKS)를 활용하는 원전 2차계통 탄소강배관 관리기술을 개발하였으며, 현재 전 원전 배관관리 업무에 확대적용 함으로써 발전소 가동연수의 경과에 따라 증가하는 감육에 의한 배관 파열사고 가능성을 줄여가고 있다[3][4][5]. 본 고에서는 FAC 모델해석용 전산코드를 활용하는 감육배관 관리기술체계와, 여기에 활용하고 있는 속도·잔여수명 등의 감육배관 평가와 관련한 기술기준을 고찰함으로써 가동중 또는 가동전 두께검사 및 데이터 분석, 증장기 배관관리 계획수립 등에 활용할 수 있도록 하였다.

#### 2. 원전 2차계통 감육배관 관리기술체계

FAC 해석모델을 활용하는 원전 2차계통 감육배관 관리기술체계는 용량별 4,000~6,000여 개에 달하는 배관개소에 대하여 FAC 모델해석을 수행하는 것, 감육속도를 고려한 예측 잔여수명에 근거하여 설정한 우선 순위에 따라 검사대상을 선정하는 것, 계획예방정비 기간 중에 신뢰성 있는 두께데이터를 취득하여 실지 감육속도와 잔여수명을 평가한 후 차기 확인검사 또는 보수/교체 필요 시점을 설정하는 것 등의 요소기술들을 포함한다. 또한 실측 데이터와 모델해석 결과를 상호 비교함으로써 감육 예측모델의 신뢰성을 높이는 것과, 매 주기 검사 결과를 효과적으로 관리하는 것 또한 감육배관 관리에 있어 중요한 요소로 포함되며 종합하면 그림 1에 나타낸 바와 같다.

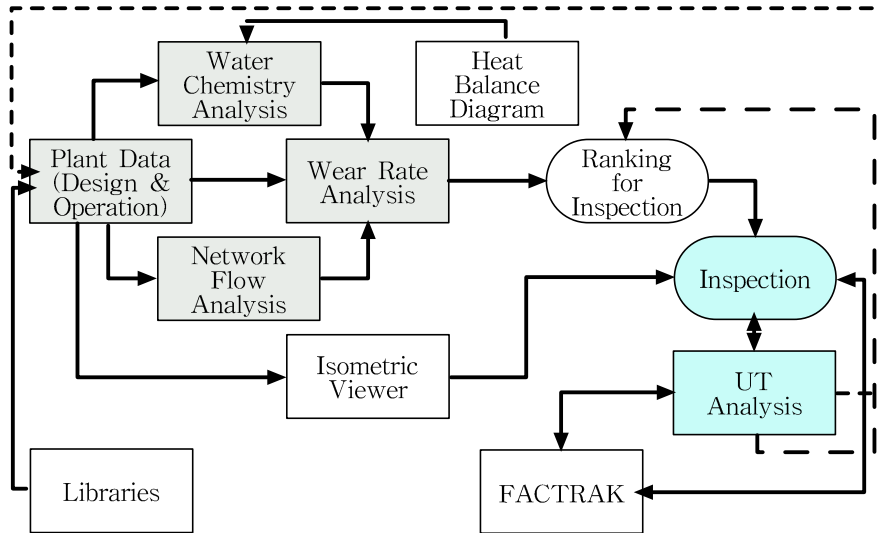


그림 1. FAC 모델해석용 전산코드를 활용하는 원전 2차계통 감육배관 관리기술체계

### 3. FAC 모델해석

FAC 모델해석용 전산코드인 CHECWORKS를 활용하여 원전 2차측 배관의 감육해석을 수행하기 위해서는 발전소 배관계통을 체계적으로 분류하고, 배관기기의 설계·운전자료를 데이터베이스화하며, 구축된 데이터베이스를 기초로 감육해석을 수행하는 등의 여러 가지 단계를 거쳐야 한다. 표2는 CHECWORKS 전산코드를 이용하여 최종결과인 배관기기별 감육속도, 잔여수명 등을 도출하기까지의 과정과 각 단계의 목적, 입력변수, 결과물 등을 제시한 것이다. 실제 현장에서 관리되고 있는 원전 2차측 배관은 10여 개 계통 정도이지만 이를 전산코드에 입력해야 하는 개개의 배관기기로 구분할 경우에는 발전용량에 따라 4,000~6,000개에 달하므로 이를 체계적으로 분류하여 데이터베이스 내에서 배관기기명이 서로 중복되지 않도록 해야 한다. 또한 원전 2차측의 열수지도(Heat Balance Diagram)를 작성하여 배관 라인의 위치를 열수지도에 링크시켜 줌으로써 조건에 맞는 데이터를 코드에서 인식하여 배관감육 해석에 반영할 수 있도록 해야 한다. 이러한 작업이 완료되면 설계압력, 설계온도, 재료, 치수 등의 개별 배관기기 정보와 시운전 착수시점에서부터 현재까지의 수처리 이력, 운전이력 등을 데이터베이스화하여 감육 해석에 반영될 수 있도록 해야 한다. 배관의 기초정보가 전산코드에 데이터베이스로 구축되면, 2차계통 샘플부위에서 취득된 수화학 데이터를 이용하여 개별 배관기기의 감육해석에 운전환경이 반영될 수 있도록 수화학 해석(Water Chemistry Analysis)을 수행한다. 배관감육 현상에 영향을 미치는 수화학 변수는 pH와 용존산소농도로써 2차계통에서 실측된 pH 조절용 아민(암모니아;  $\text{NH}_3$ )과 하이드라진( $\text{N}_2\text{H}_4$ )농도 등에 기초하며 열수력 환경을 함께 고려하여 수화학 샘플 분석이 수행되지 않는 배관라인의 개별 배관기기에서의 Hot pH, 암모니아, 하이드라진 농도 등을 계산한다. 수화학 해석이 완료되면 배관라인 입출구 사이에서 압력과 엔탈피의 변화가 크게 나타날 수 있고 2상(Two Phase) 유체가 흐를 가능성이 있는 추기계통 라인 및 습분분리기 배수/배기 라인과 1, 2단 재열기 배수/배기 라인 등에서 입구측과 출구측의 알고 있는 유량, 엔탈피, 압력 등을 이용하여 네트워크 해석(Network Flow Analysis)을 수행한다. 네트워크 해석을 수행하지 않더라도 CHECWORKS 전산코드에서는 수동으로 입력된 데이터를 이용하여 감육해석을 수행하지만 이는 보다 정확한 해석결과를 얻기 위함이다. 네트워크 해석 결과는 컴포넌트별 Steam Quality, 압력, 온도, 엔탈피, 손실계수(Loss Coefficient) 등이며, 이는 배관감육 해석시 전산코드 내에서 자동적으로 반영된다.

이상에서와 같이 배관기기의 설계자료 데이터베이스화와 수화학 해석, 네트워크 해석이 완료되면 아래 식(1)의 Chexal-Horowitz FAC 모델에서 고려하고 있는 각 영향인자들에 대한 데이터가 갖

추여지게되며 이를 기초하여 최종적으로 배관기기의 감육해석(Wear Rate Analysis)을 수행한다. 감육해석에는 지금까지 입력된 모든 설계정보 및 운전이력과 수화학 해석, 네트워크 해석 결과가 반영되어 개별 배관기기별 평균 감육속도, 현재 감육속도, 현재두께, 최소요구두께, 최소요구두께까지의 잔여수명 등의 계산결과를 도출한다.

$$W = F_1(T) * F_2(AC) * F_3(MT) * F_4(O_2) * F_5(pH) * F_6(G) * F_7(a) * F_8(N_2H_4) \quad (1)$$

여기서,  $W$  : Wear Rate

$F_1(T)$  : Factor for Temperature Effect

$F_2(AC)$  : Factor for Alloy Content Effect

$F_3(MT)$  : Factor for Mass Transfer Effect

$F_4(O_2)$  : Factor for Dissolved Oxygen Effect

$F_5(pH)$  : Factor for pH Effect

$F_6(G)$  : Factor for Geometry Effect

$F_7(a)$  : Factor for Void Fraction Effect

$F_8(N_2H_4)$  : Factor for Hydrazine Effect

표 1. FAC 모델해석 요약

항목	데이터베이스 구축		FAC 모델해석		
	글로벌 DB	배관기기 DB	Water Chemistry Analysis	Network Flow Analysis	Wear Rate Analysis
목적	운전 이력 반영	설계 환경 반영	라인별 · 수화학 환경 분석	배관기기별 · 열수력 환경 분석	배관기기별 · 감육속도, · 잔여수명 도출
입력 자료	주기별 · 출력준위 · 운전시간 · 수처리 이력	배관기기별 · 설계압력/온도 · 재질, 크기, 형상 등	· 샘플지점에서의 Cold pH, DO, 암모니아, 하이드라진 농도	· 라인유량 · 라인 입/출구의 온도/압력/엔탈피	· 글로벌/배관기기 DB · W · CA/NFA 결과
해석 결과			라인별 · Cold pH, DO, 암모니아, 하이드라진 농도	배관기기별 · 온도, 압력, 엔탈피, Quality, 레이놀드수 등	배관기기별 · 감육속도, · 잔여수명, · 최소요구두께, 등
용도	WCA, NFA, WRA 기초자료		WRA 입력자료	WRA 입력자료	라인별, 배관기기별 검사 우선순위 결정

#### 4. 배관라인 및 배관기기의 감육관리 우선순위 설정

상기에서의 감육해석 결과인 감육속도 및 잔여수명에 근거하여 발전소 2차측 배관계통별, 배관 라인별, 배관기기별 감육관리 우선순위를 결정함으로써 발전소 감육현황을 파악할 뿐만 아니라 주어진 계획예방정비 기간에 수행할 검사대상을 효율적으로 선정할 수 있는 기초자료를 작성한다. 그림 2는 우선순위 설정 예를 나타낸 것으로서, 각각의 감육관리 단위 배관라인그룹 내에서의 대표 잔여수명과 감육속도를 기준하여 우선순위를 설정한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 대체로 감육속도가 크게 나타난 배관라인그룹에서 잔여수명이 짧은 것으로 나타났지만 큰 값의 속도로 감육되고 있더라도 최소요구두께가 얇아(설계압력이 낮음) 이에 도달하기까지의 잔여수명이 길게 나타나는 라인그룹도 다수 있었다.

또한 감육관리 우선순위를 다시 4개의 Level로 구분하였는데, 잔여수명 예측값이 상대적으로 짧게 나타난 27개 라인그룹을 예측 감육속도를 고려하여 Level 1(14개 라인그룹)과 Level 2(13개 라인그룹)로 설정하였고, 예측 잔여수명이 다소 크게 나타난 15개 라인그룹을 Level 3으로 설정하

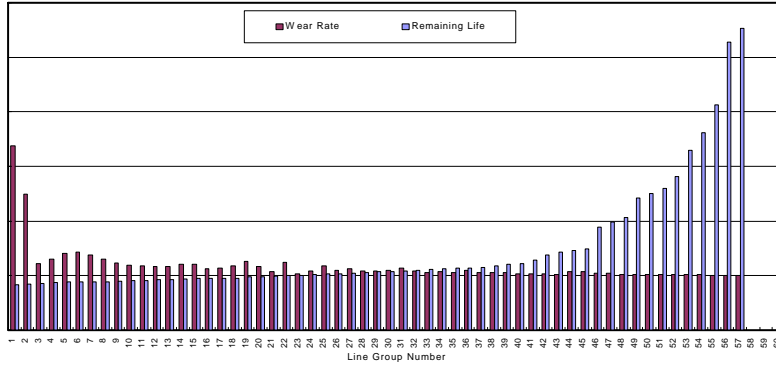


그림 2. 배관라인그룹별 감육관리 우선순위 적용 사례

였다. 나머지 18개 라인그룹은 예측 잔여수명 값이 클 뿐만 아니라 감육속도 또한 적게 나타나고 있으므로 이를 Level 4로 설정하였다. 이는 실지 계획예방정비 기간중에 두께검사는 시간과 인력 등의 제약으로 인한 제한된 물량 이내에서 배관라인별 검사 개수를 구별하여 결정하기 위함이다.

### 5. 두께검사

원자력발전소 배관기기의 감육 검사에는 육안검사(VT)·방사선검사(RT)·초음파검사(UT) 등의 다양한 비파괴검사 기법들을 활용할 수 있으나 감육량 및 감육속도·잔여수명 등을 정확하게 평가하기에 유용한 초음파 두께검사 기술을 보편적으로 사용하고 있고, 특히 국내 원전에서는 데이터로거(Data Logger) 기능을 탑재한 P사의 초음파 두께측정기를 감육배관 두께검사에 활용하고 있다. 원전 사업자가 설정한 두께검사와 관련된 기술기준은 아래와 같다.

#### 가. Full Grid

실지 감육관리중인 엘보의 partial grid와 full grid의 두께데이터를 분석한 결과 최소두께가 나타나는 위치를 나타내는 위치가 곡관부 Extrados 또는 Intrados에 한정되지 않고 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있었고, 따라서 최소두께 즉 최대감육이 발생한 위치를 검사하였음을 확신할 수 있도록 그림 3에 나타난 바와 같이 full grid 방식을 두께검사 기술기준에 적용하였다.

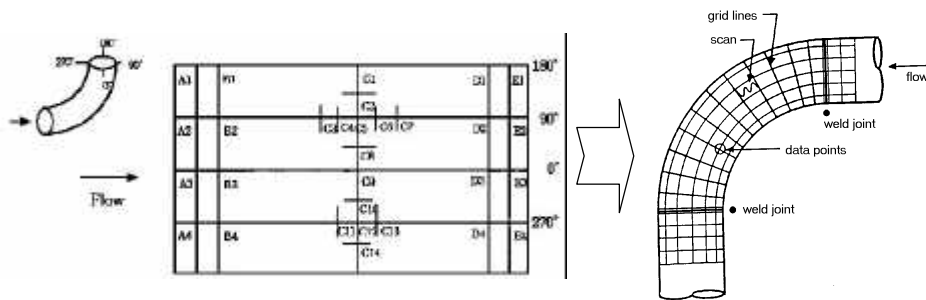


그림 3. Partial Grid에서 Full Grid로의 레이아웃 변경

Grid간의 최대거리는 감육된 영역을 구별할 수 있을 정도로 충분히 조밀해야 하는데, 배관의 외경( $D_o$ )에 따라  $\frac{\pi \cdot D_o}{12}$  보다 크지 않으며 최대 6 inch를 넘지 않도록 설정하였다. Full grid에 의한 측정 개소는 partial grid에 의한 측정개소보다 약 2~4배정도 많아지지만 full grid에 의한 조밀 측정은 해당 배관기기의 전체적인 감육 형상을 파악할 수 있을 뿐 만 아니라 신뢰성 있는 감육평가 결과를 도출하기 위함이다.

## 나. 확장검사

또한 임의의 배관기기가 연결되는 용접부 근처에서 감육이 발생할 가능성이 크므로 full grid에서는 용접부 주변 1 inch 내외에 첫 번째 grid를 측정토록 하였으며, 이는 용접부의 Backing ring 및 Counter Bore의 존재에 따라 후단부의 감육이 심하게 발생할 수 있음을 고려한 것이다. 또한 임의의 배관기기 상류측에는 3개 grid를, 하류측에는 2D 거리까지의 grid를 측정하도록 하였으며, Expander나 Reducer는 소구경측에서 감육이 더욱 심하게 발생한다는 경험에 따라 여타 배관기기와는 달리 소구경측에는 2D 거리까지의 grid를, 대구경측에는 3개의 grid를 확장하여 검사토록 하였다. 배관기기 형상에 따른 확장검사 범위와 상기의 full grid 적용 레를 그림 3에 각각 나타내었다.

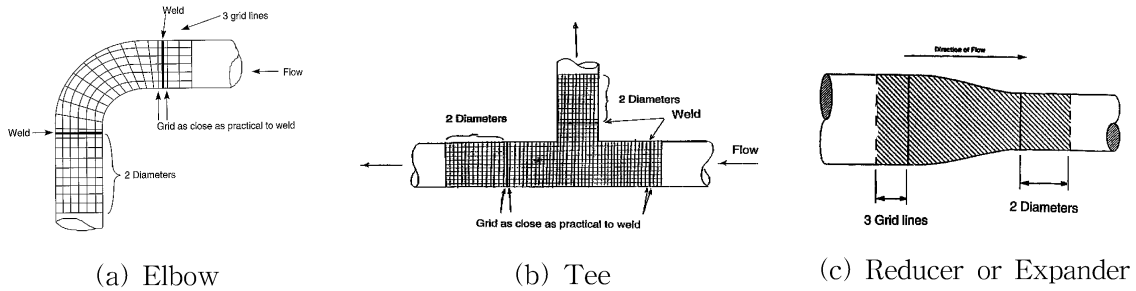


그림 3. 배관기기 형상별 확장검사 범위 및 Full Grid 적용 실례

## 6. 감육평가 및 후속조치

상기 두께검사 기술기준에 따라 취득된 데이터에 기초하여 해당 배관기기에서의 감육 위치, 크기, 감육량 및 감육속도 등을 결정함으로써 후속조치 긴급도와 시점을 결정 한다. 그러나 다음의 여러 가지 요인들에 의해 감육평가 과정이 매우 복잡해지므로 일관된 기술기준과 공학적 판단을 사용함으로써 이러한 문제들의 영향을 최소화하는 것은 매우 중요하다.

- 초기두께를 알 수 없음 (설치 후 baseline 데이터를 취득하지 않은 경우)
- 배관기기의 길이방향에 따라, 그리고 원주방향에 따라 두께가 다양함 (제작공차)
- 비파괴 검사의 부정확도 (검사오차)
- 직관과 연결된 배관기기간의 misalignment, backing ring 또는 counter bore의 적용
- 데이터 기록 에러 또는 데이터 전송 에러 (인터페이스 에러)
- 완벽한 grid 마킹을 막는 방해물(예 : 용접 접합물) 등

### 가. 두께데이터 신뢰성 확보

두께데이터 분석에서는 어느 데이터값이 에러를 포함하고 있다는 것을 확인하기 위해 신중하게 검토한다. 잘못된 데이터는 재검사하여 확실한 두께값으로 하거나, 필요시 감육평가에서 제외한다. 연속된 두께값을 가진 영역 내에서 특별히 높거나 또는 특별히 낮은 두께데이터 값은 오류 데이터일 가능성이 있으므로 그 신뢰성을 확인하기 위하여 인근 데이터 값과 비교한다. 배관기기 종류에 따라 제작과정에서 기인될 수 있는 다양한 두께값은 FAC에 의한 감육과 반드시 구별해야 한다. 연결된 상류측과 하류측 배관기기의 데이터와 비교하는 것도 도움이 될 수 있다. 엘보, 티, 리듀서와 익스펜더 등은 제작과정에서 확인한 두께값의 차이를 나타낼 수 있는 배관기기들이다. backing ring과 counterbore의 존재에 주의하여 이들 영향이 제외될 수 있도록 해야 한다.

두께데이터에 대한 분석 및 신뢰성이 확보되면 배관기기 상의 감육영역을 확인한다. 감육영역은 배관기기의 설치방향, 유로방향, 그리고 연결된 배관을 고려하여 비교해야 한다. 이 영역 내에서의 다양한 두께값은 감육의 존재를 확인하기 위해 인접 구역과 비교해야 한다. 이전 주기의 데이터가 있다면 현재의 측정값과 비교하여 감육 경향을 확인한다.

### 나. 감육평가 기법

감육평가는 다음의 두 가지 범주로 나누어 수행한다. 첫 번째 범주는 baseline 두께데이터를 가진 배관기기에 대한 것이고, 두 번째 범주는 baseline 데이터가 없는 배관기기에 대한 것이다. 최초 두께값을 알 수 없는 두 번째 경우 컴포넌트의 최대 감육을 계산하기 위해 사용되는 방법에는 여러 가지가 있다. UT 데이터를 이용하여 배관기기의 감육을 평가하는데 일반적으로 사용하는 방법은 다음과 같다.

- Band Method
- Area Method
- Moving Blanket Method
- Point to Point Method

앞의 세 가지 방법은 한 주기 검사 데이터(Single Outage Inspection Data)를 가진 컴포넌트의 감육을 계산하는데 사용될 수 있는데, 국내 원전의 경우 엘보 영역에 대해서는 Moving Blanket Method를 그 이외의 배관기기에 대해서는 Band Method를 적용하여 감육을 평가하고 있다.

#### 1) Band Method

원주방향 Band를 따라 관찰된 다양한 두께 분포는 배관기기가 감육을 겪고 있음을 보여주는 것이며, 이들 원주방향 각 Band에서 관찰된 두께차 중 최대값을 배관기기 해당 영역에서의 감육량으로 결정한다. Band Method는 한 그리드의 폭을 가진 여러 개의 원주방향 Band로 나누며, 각 Band는 유체 흐름 방향에 직교하는 평면이 된다. 그림 4는 감육 영역을 가진 원주방향 Band를 보여 주며, 해당 배관기기 내 각 Band에서의 감육량을 비교하고 이 중에서 최대값을 해당 배관기기의 대표 감육량으로 설정한다.

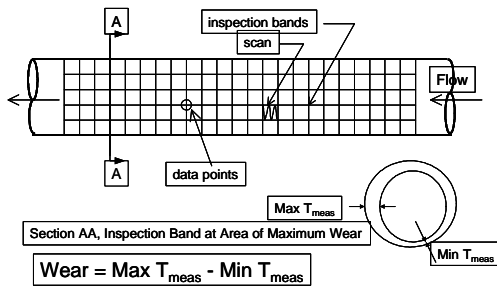


그림 4 Band Method

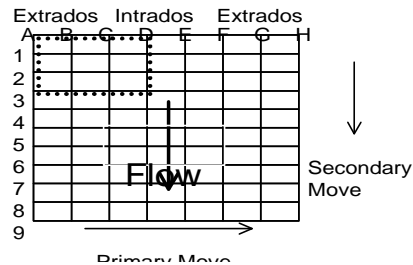


그림 5. Moving Blanket Method

#### 2) Moving Blanket Method

Moving Blanket Method는 최대 감육이 일어난 구역을 자동으로 찾아내며, 측정오차의 영향을 최소화할 수 있다. 본 기법은 그림 5에 나타난 바와 같이 grid 데이터 상에 임의의 차원을 가진 블랭킷을 위치시킨 후에 블랭킷 내의 데이터를 분석하여 최대실측두께와 최소실측두께를 도출하고 하나의 그리드가 옮겨진 블랭킷에서의 최대실측두께와 최소실측두께를 도출한다. 해당 배관기기 전체에 대해 상기 과정을 반복하고나 후에 최대실측두께에 대한 평균값과 최소실측두께에 대한 평균값을 도출하며 본 두 개의 평균값 차이를 해당 배관기기에서의 감육량으로 결정한다.

#### 3) Point To Point Method

Point To Point Method는 동일한 grid에서 두 주기 이상의 데이터가 취득되거나 또는 베이스라인 데이터와 한 주기 이상의 데이터가 취득되었을 때 적용한다. 이 경우는 grid에서의 두께차를 얻을 수 있게 되는데, 각 grid에 대해서 이전 주기 두께값에서 나중 주기 두께값을 제한 값

을을 도출하고 기 중에서 최대값을 해당 배관기기의 대표 감육량으로 결정한다.

다. 배관기기 감육평가

1) 확장하여 취득된 두께데이터로부터 감육량을 평가하고 감육속도를 고려하는 잔여수명을 평가하기 위해 먼저 배관기기를 영역(Up Stream, Down Stream, Branch 등)으로 세분하며 각 영역에서의 최대두께( $T_{max}$ )와 공칭두께( $T_{nom}$ ) 중에서 큰 값을 기준두께( $T_{ref}$ )로 설정하고, 최소두께( $T_{min}$ )와의 차( $T_{ref}-T_{min}$ )를 현재까지의 총 운전시간 동안 section에서 발생한 감육량(Wear)으로 설정한다.

$$Wear = T_{ref}( T_{max}) - T_{min}$$

2) 각 section에서의 두께감소량을 총 운전시간으로 나누어 영역의 감육속도(Wear Rate)를 도출한다.

$$Wear Rate = \frac{T_{ref} - T_{min}}{Total Operating Time}$$

3) ASME Code Sec.III에 제시된 아래 식을 적용, 배관기기의 최소요구두께( $T_{crit}$ )를 계산한다.

$$T_{crit} = \frac{P \cdot D}{2(S + y \cdot P)} + C$$

여기서,  $T_{crit}$  : 최소요구두께 (inch)

$P$  : 설계압력 (psi)

$D$  : 공칭외경 (inch)

$S$  : 배관재질 최대허용응력 (psi)

$y$  : 온도에 따른 금속조직 계수 (=0.4로 설정)

$C$  : 부식여유 (=0으로 설정)

4) 상기에서 계산된 각 영역에 대한 감육속도 중에서 최대값을 해당 배관기기의 대표 감육속도(Wear Rate)로 설정하며, 동 감육속도로 현재의 최소두께( $T_{min}$ )로부터 최소요구두께( $T_{crit}$ )에 도달할 때까지의 잔여수명(Remaining Life) 도출한다.

$$Remaining Life = \frac{T_{min} - T_{crit}}{Wear Rate}$$

라. 잔여수명 평가 결과에 따른 후속조치

차기 검사주기에 예상되는 최소두께( $T_{min,p}$ )가 최소요구두께( $T_{crit}$ )를 만족하지 못할 경우 금번 검사주기에서 교체하거나 용접보수를 수행해야 하며, 두 주기 이상의 잔여수명을 나타낸 경우에는 계산된 잔여수명의 절반이 경과하기 전 검사주기에 동일한 포인트에 대해 동일한 교정값으로 검사하여 그림 6에 나타낸 바와 같이 실지 운전시간 동안 감육된 량과 감육속도를 평가하여 향후 검사주기를 설정(Point To Point Method) 한다.

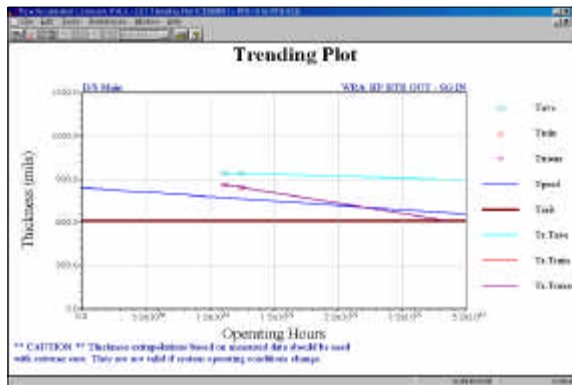


그림 6. PTP적용한 감육·잔여수명 평가 예시

### 7. 가동전 두께검사 DB에 근거한 초기두께 분포 분석

상기에서 언급한 감육평가 기술들은 운전시간이 어느 정도 경과한 발전소 배관기기에서 취득한 두께데이터를 분석하여 기준두께를 설정하고, 이로부터 전 운전시간 동안의 타당성 있는 감육량과 감육속도 및 잔여수명 등을 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 가동년수가 수년 이내로 짧은, 베이스라인 데이터를 확보하지 않은 배관기기에 대해서는 본 감육평가 기술을 곧바로 적용했을 경우 제작공차 뿐만 아니라 counter bore 적용으로 인한 용접부 인접 grid에서의 두께값이 감육으로 포함되어 배관관리에 있어서의 주요 기준인 잔여수명이 매우 짧게 평가될 수 있는 가능성이 매우 클 것이므로 가동전검사에서 취득한 베이스라인 두께데이터를 분석하여 배관기기 형상별, 크기별 초기두께분포를 이해하여 배관관리를 수행하는 것은 매우 의미 있는 것으로 판단된다. 여기에서는 영광 5호기 특정 배관라인그룹에 위치한 8개 엘보에 대한 가동전 검사에서의 베이스라인 두께데이터 분포를 분석하였으며, 대상 엘보들에 대한 설계자료를 표 2에, 분석에 활용된 배관기기 각각의 분석 자료와 결과를 표 3에 나타내었다.

표 2. 초기두께 분포 분석 대상 엘보의 설계정보

재질	공칭두께 [inch]	설계압력 [psi]	설계온도 [°F]	최대허용응력 [psi]	최소요구두께 [inch]
SA 420 WPL 6	1.125	1,255	575	15,000	1.052

표 3. 초기두께 분포 분석 대상 엘보의 데이터 분석

항목	A	B	C	D	E	F	G	H	비고
데이터 포인트 개수	210	210	154	196	210	210	154	196	1540
평균두께 [inch]	1.232	1.243	1.177	1.185	1.225	1.274	1.177	1.202	1.214
평균두께/공칭두께 [%]	109	111	105	105	109	103	105	107	108
최소요구두께 미만 개수	0	0	0	0	0	0	0	0	0
제작공차 미만 개수	0	1	1	2	0	0	1	0	5
제작공차 범위 개수	36	49	95	94	38	1	95	72	480
제작공차 초과 개수	174	160	58	100	172	209	58	124	1055
제작공차 미만 [%]	0	0	1	1	0	0	1	0	0
제작공차 범위 [%]	17	23	62	48	18		62	37	31
제작공차 초과 [%]	83	76	38	51	82	100	38	63	69

표 3에서 보는 바와 같이 8개 엘보에 대한 두께값들이 공칭두께에 비해 평균적으로 108% 정도 두껍게 제작되고 있어 배관관리 업무에는 여유가 커짐을 알 수 있다. 그러나 최소측정두께가 제작공차 범위를 벗어나 최소요구두께에 가까운 값을 가지는 배관기기들은 향후 수 주기 운전 후에 확인검사를 수행하여 실지 감육추이를 감시해야 할 필요성이 있다.

가동중 원전에 적용하고 있는 Band · Area · Blanket 등의 기법을 활용하여 비교적 짧은 기간 동안 운전된 배관기기의 감육평가지 초기두께의 분포가 평가 결과에 미칠 수 있는 영향 정도를 파악하기 위하여 8개 엘보에 대하여 각각의 기법을 적용하여 감육량(기준두께(or 최대두께)-최소두께)을 도출하고 표 4에 결과를 나타내었다.



표 4. 평가기법간 결정 감육량 차이 비교

[inch]

Method \ Comp.	A	B	C	D	E	F	G	H
Band	0.192	0.304	0.177	0.212	0.166	0.207	0.302	0.257
Area	0.230	0.342	0.357	0.256	0.197	0.207	0.340	0.257
Blanket	0.181	0.297	0.296	0.209	0.160	0.117	0.258	0.213

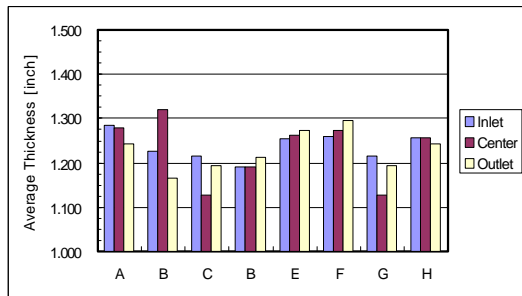
표 4에서 알 수 있는 바와 같이 어느 기법을 적용하더라도 초기두께의 불균일한 분포가 상당량의 감육이 진행되어 있는 것으로 잘못 평가될 수 있음을 확인하였다.

다음으로 엘보를 길이방향으로는 3개의, 원주방향으로는 4개의, 총 12개 영역으로 나누어 살펴본 결과 대부분 입구측 extrados와 intrados에서 최대평균두께를 나타내고 있음을 확인하였고 표 5에 요약하였다.

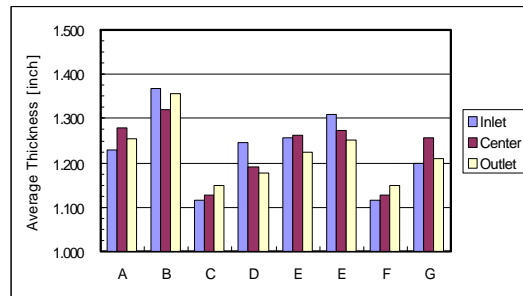
표 5. 최대평균두께 위치

Component	A	B	C	D	E	F	G	H
최대평균두께 영역	Inlet Extrados	Inlet Intrados	Inlet Extrados	Inlet Intrados	Outlet Extrados	Inlet Intrados	Inlet Extrados	Inlet Extrados

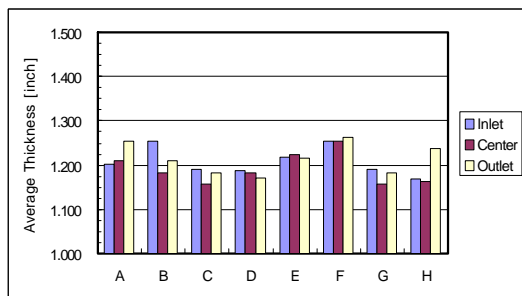
엘보의 원주방향 영역별 길이방향 평균두께분포는 그림 7에 나타낸 바와 같다.



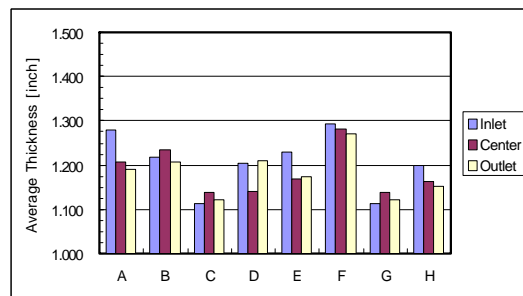
(a) Extrados



(b) Intrados



(c) Right Side



(d) Left Side

그림 7. 엘보의 원주방향 영역별 길이방향 평균두께 분포

## 8. 결론 및 향후계획

본고에서 초기두께분포를 살펴본 26 inch 엘보의 경우 매우 복잡한 두께분포를 보이고 있으며 제작공차가 상당히 커서 수 주기 운전 후에 최초검사를 수행하였을 경우 큰 감육속도를 가지고

감육이 진행되고 있는 것으로 잘못 평가될 가능성이 있음을 확인하였고, 엘보의 경우 통상 intrados에서 두꺼운 초기두께를 가진 것으로 알려져 있으나 실측데이터 분석 결과 extrados에서도 큰 두께로 제작될 수 있음을 확인하였다. 따라서 베이스라인 두께데이터를 확보하여 배관기기별 초기두께분포를 파악해 두는 것이 신뢰성 있는 감육평가 및 배관관리를 위해서 매우 중요함을 확인하였다.

향후 가동중 원전에서의 배관기기 감육평가에 활용할 수 있도록 본고의 대상 배관기기 뿐만 아니라 형상별, 크기별 초기두께분포를 분석하고 배관계통별, 등급별 초기두께분포 경향을 도출하여 제시할 예정이다.

#### 참고문헌

1. Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, EPRI TR-106611, June 1996
2. Plant Experience Database, EPRI TR-102032, December 1995
3. 침부식에 의한 원전배관 건전성저해 해석 연구, 전력연구원, September 1999
4. 부식용 두께측정기 활용 지침서, 전력연구원, September 1997
5. 감육 배관기기에 대한 두께검사 기술기준, 전력연구원, April 1999
6. 원전 탄소강배관 감육 관리 지침, 전력연구원, December 2000