

감육배관 관리기술체계에 있어서의
초음파 두께측정 기술에 관한 고찰

**Ultrasonic Thickness Measurement Criteria
in Thinned Pipe Management Program**

이성호, 제갈성, 김위수

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

본 논문에서는 원자력발전소 2차계통에서의 감육배관 관리에 적용하고 있는 두께검사, 감육 및 잔여수명 평가 등의 기술기준을 제시하였으며, 초음파 두께측정기에 적용된 기술을 이해하고 결과값에 영향을 미치는 요소들을 고찰하고 보완 필요 사항들을 제시함으로써 감육배관의 중장기 건전성 확보에 필요한 신뢰성 있는 두께데이터를 취득할 수 있도록 하였다.

Abstract

Credibility of thickness data is very important in the thinned pipe management program. This report presents following criteria; thickness measurement for each pipe component type, wear and wear rate calculation, and remaining service life assessment of thinned pipe component. And, the necessary items should be contained in the inspection report are presented.

감육배관 관리기술체계에 있어서의 초음파 두께측정 기술에 관한 고찰

Ultrasonic Thickness Measurement Technique in Thinned Pipe Management Program

이성호, 제갈성

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

본 논문에서는 원자력발전소 2차계통에서의 감육배관 관리에 적용하고 있는 두께검사, 감육 및 잔여수명 평가 등의 기술기준을 제시하였으며, 초음파 두께측정기에 적용된 기술을 이해하고 결과값에 영향을 미치는 요소들을 고찰하고 보완 필요 사항들을 제시함으로써 감육배관의 중장기 건전성 확보에 필요한 신뢰성 있는 두께데이터를 취득할 수 있도록 하였다.

1. 개요

원자력발전소 2차계통 배관의 FAC(Flow-Accelerated Corrosion)에 기인한 감육과 이에 따른 Elbow, Tee, Expander, Reducer, Straight Pipe 등의 배관기기 건전성 저하는 전력회사 배관관리 업무의 중요한 현안으로 대두되고 있다. 인명손상과 막대한 경제적 손실을 발생시킨 미국 Surry 원전 급수관 파열사고('86.12) 이후 FAC에 대한 관심이 높아졌으며, FAC 규제와 관리기술이 개발되어 왔다[1][2]. 국내의 경우 "침부식에 의한 원전배관 건전성저해 해석 연구('96.8-'99.8)"를 통해 FAC 모델해석용 전산코드(EPRI CHECWORKS)를 활용하는 원전 2차계통 배관관리 기술을 개발하였으며 "원전 이차계통 감육배관 관리 표준기술체계 개발('00.4-'03.4)" 과제를 통해 전 원전 감육배관 관리기술 체계를 표준화함으로써 발전소 가동연수의 경과에 따라 증가하는, 감육에 의한 배관 파열사고 가능성을 줄여가고 있다[3][4][5]. 이에 본 고에서는 'FAC 모델해석용 전산코드를 활용하는 원전 2차계통 감육배관 관리기술체계'와 여기에 활용하고 있는 초음파 두께검사와 관련된 기술기준 및 두께데이터 취득에 있어서의 신뢰성 확보 방안에 대하여 살펴봄으로써 중장기 감육배관 건전성 및 원전 안전성 확보에 활용할 수 있는 지침으로 제공하고자 하였다.

2. 원전 2차계통 감육배관 관리기술 체계

FAC 해석모델을 활용하는 원전 2차계통 감육배관 관리기술체계는 호기별 수 천 개에 달하는 감육 예상 배관개소에 대하여 FAC 모델해석을 수행하며, 검사 필요 우선 순위(예측 두께감소율과 잔여수명에 근거)에 따라 검사개소를 선정하는 것, 계획예방정비 기간 중에 신뢰성 있는 두께데이터를 취득하여 검사개소의 실제 두께감소율과 잔여수명을 평가한 후 차기 확인검사 주기 또는 보수/교체 필요 시점을 설정하는 등의 요소기술을 포함한다. 또한 매 주기 검사 결과를 효과

적으로 관리하며, 실측 데이터와 모델해석 결과를 상호 비교함으로써 감육 예측의 신뢰성을 높이기 위한 기술도 감육배관 관리에 있어 중요한 요소 중의 하나이며 종합하면 그림 1에 나타낸 바와 같다.

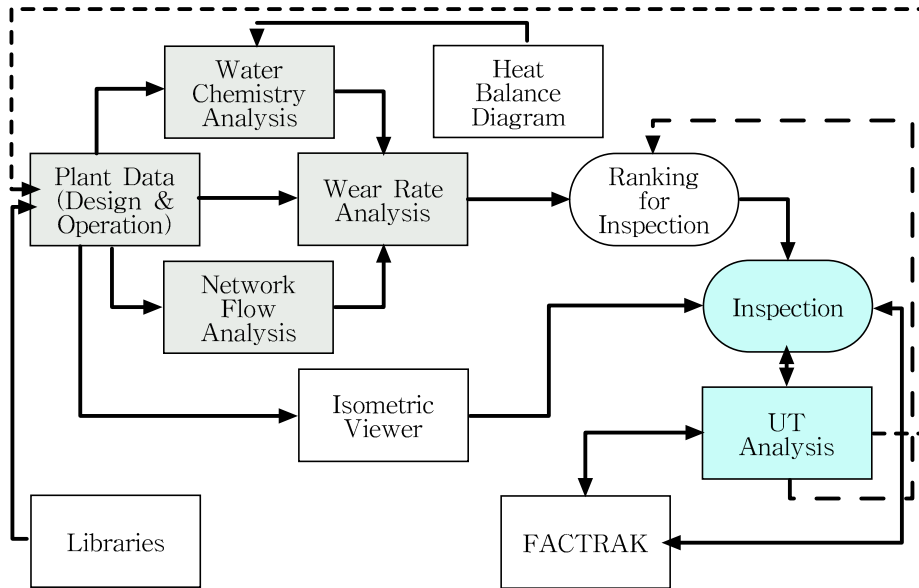


그림 1. FAC 모델해석용 전산코드를 활용하는 원전 2차계통 감육배관 관리기술체계

감육배관 관리에 있어 가장 먼저 수행해야 할 항목은 발전소 2차계통 구성을 면밀히 분석하여 상세한 배관목록을 작성하고, 각각의 배관계통이 어떠한 메커니즘(FAC, Cavitation, Liquid Impingement Erosion, Inter Granular Stress Corrosion Cracking(IGSCC), Microbiologically Influenced Corrosion(MIC), Solid Particle Erosion 등)에 의해 손상을 받을 것인지를 분석하여 해당 손상경로에 따른 관리대책을 강구하는 것이다. FAC 관리대상으로 분류된 배관은 전산코드를 사용한 FAC 모델해석 또는 기술적 판단과 경험에 의해 검사대상 컴포넌트를 선정하고 계획예방정비기간 중에 두께를 검사한다. 취득된 두께데이터로부터 컴포넌트별 감육 정도를 평가하며, 감육속도 및 최소요구두께(critical thickness) 도달 시점까지의 잔여수명을 평가한다. 마지막으로 감육과 수명평가 결과에 따라서 향후 지속적인 건전성유지 확인을 위한 검사주기를 설정하거나, 보수 또는 교체필요 여부 및 시점을 결정하는 등 후속조치를 취한다. 상기 감육배관 관리기술을 현장에 적용하면서 주어진 계획예방정비 기간 내에 200여 개에 달하는 검사개소에 대한 신속하고 효과적인 검사 수행 및 신뢰성 있는 두께데이터 취득이 배관관리 업무에 있어 매우 중요한 요소임을 확인하였으며 명확히 제시된 검사 기술기준에 따른 검사와 데이터 분석·감육평가가 필수적임을 관련 실무자간에 공감하였다.

3. 두께측정 기술기준

원자력발전소 배관기기의 감육을 검사하기 위해서는 육안검사(VT), 방사선검사(RT), 초음파검사(UT) 등의 비파괴 검사 기법들을 활용할 수 있으며 감육량 및 감육속도·잔여수명 등을 정확하게 평가하기에 유용한 초음파 두께검사 기술이 보편적으로 사용되고 있다. 특히 국내 원전에서는 데이터로거(Data Logger) 기능을 탑재한 P사의 초음파 두께측정기를 감육배관 두께검사에 활용하고 있고 감육배관의 두께데이터 취득을 위해 원전 사업자가 설정한 기술기준은 다음과 같다.

가. Full Grid 및 확장검사

시험원전 엘보의 partial grid 및 full grid 방식에 따른 두께데이터를 분석한 결과 최소두께가 나타나는 위치를 나타내는 위치가 그림 2에서 보는바와 같이 곡관부 Extrados 또는 Intrados

에 한정되지 않고 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있었고 따라서 최소두께 즉 최대감육이 발생한 위치를 검사하였음을 확신할 수 있도록 full grid 방식을 두께검사에 적용토록 하였다.

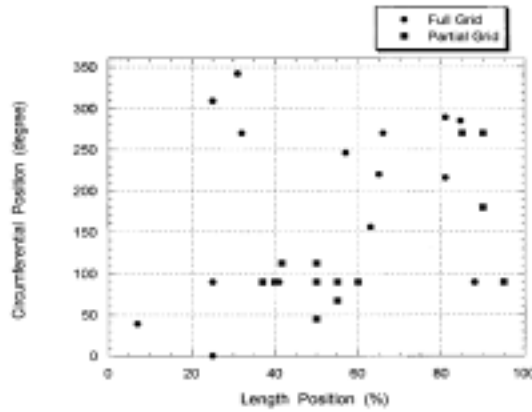


그림 2. 엘보에서의 최소두께 위치 비교

Grid의 크기(grid간의 최대거리)는 감육된 영역을 구분할 수 있을 정도로 충분히 좁아야 하는데, grid 크기를 $\pi D/12$ (D는 배관의 외경)보다 크지 않아야 하고, 1 inch 이상, 6 inch 이하로 하도록 기준을 설정하였으며, 이 기준에 따르면, 직경 3 inch 배관은 최대 1 inch 간격의 grid를 정하고, 직경 20 inch의 배관은 최대 6 inch 간격의 grid를 정하게 하였다. 그러면 full grid에 의한 측정 개소는 partial grid에 의한 측정개소보다 약 2~4배정도 많아진다. 이에 따라 full grid에 의한 측정은 보다 조밀하게 측정하게 되어 전체적인 감육을 해석할 수 있도록 하였다. 검사대상 배관 기기의 공칭 외경에 따라 다음 식에 따라 최대 Grid 간격을 결정하였으며 표 2에 상세히 나타내었다.

$$Size = \frac{\pi \cdot D_o}{12}$$

표 2. 배관 공칭 외경별 최대 Grid 간격

Pipe Size (inch)	Outside Diameter (inch)	Maximum Grid Size (inch)
2	2.375	1.00
3	3.500	1.00
4	4.500	1.17
6	6.625	1.73
8	8.625	2.25
10	10.750	2.81
12	12.750	3.33
14	14.000	3.67
16	16.000	4.19
18	18.000	4.71
20	20.000	5.23
24	24.000	6.00
>24	---	6.00

또한 임의의 컴포넌트가 연결되는 용접부에서 감육이 발생할 가능성이 크므로 full grid에서는 용접부 주변에 대해 측정토록 하였으며, 이는 용접부의 Backing ring 및 Counter Bore의 존재에 따라 후단부의 감육이 심하게 발생할 수 있음을 고려한 것이다. 이에 따라 임의의 컴포넌트 상류쪽에 2개 grid를, 하류쪽에는 2D 거리까지 grid를 정하여 측정하도록 하였으며, Expander나 Expanding Elbow는 상류측의 감육이 심하다는 경험에 따라 다른 컴포넌트와는 반대로 상류측에

2D까지 grid를 정하고 하류쪽에는 2개의 grid를 정하여 확장검사토록 하였고 배관기기 형상에 따른 확장검사 범위를 그림 3에 각각 나타내었다.

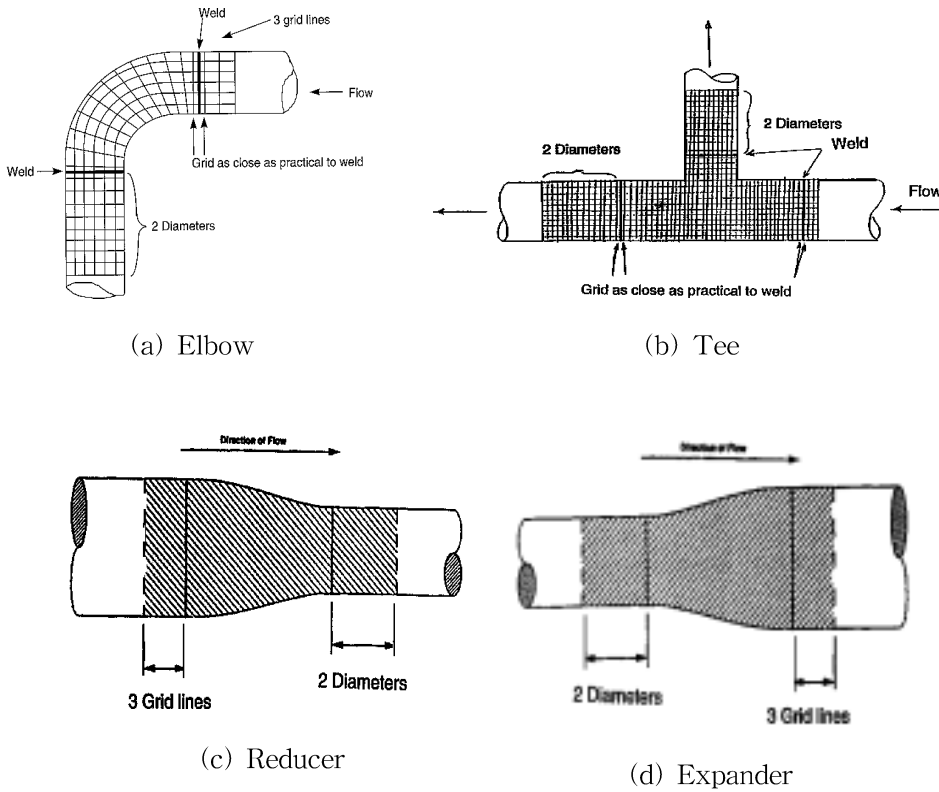


그림 3. 배관기기 형상별 확장검사 영역

나. Grid ID(Identification) 부여 체계

원전 한 개 호기 2차계통을 구성하는 수 천개의 배관기기 뿐만 아니라 하나의 배관기기에서의 수 백 개의 검사 포인트들이 각각 고유한 번호 즉 ID(Identification)를 가져야 하므로 아래와 같은 기준을 제시하여 배관기기 및 검사 포인트를 구분하도록 하였다.

- 기기명 : 8자리로 검사대상 기기 분류 (예 : CB002E01=C-AB-5002도면 첫 번째 Elbow)
- 구분자 : 1자리로 기기명과 Grid 번호를 구분 (예 : 'space' 또는 '-' 등)
- Grid 번호 : 3자리로 Grid 지점을 지정 (예 : A01 ~ P12) (그림 4 참조)
 - 원주방향 구분(Row) : 시계 방향으로 A, B, C,..... (1자리)
 - 길이방향 구분(Column) : 유로를 기준하여 01, 02, 03,..... (2자리)

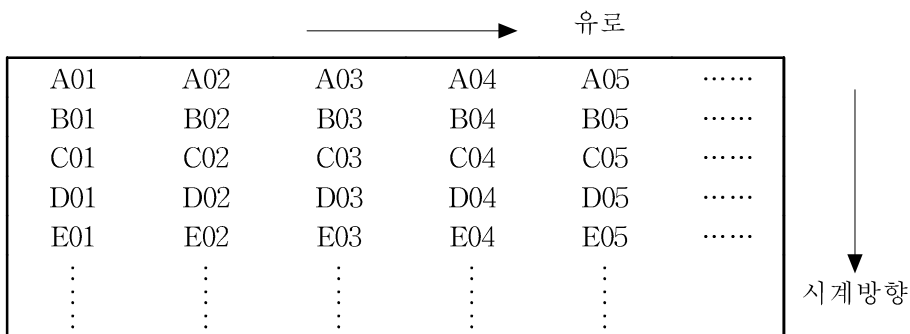


그림 4. 길이방향 및 원주방향 Grid 번호 체계

또한 배관기기 형상별 원주방향 시작선, 즉 A라인의 위치가 명확해야 하므로 Elbow에 대해서

는 곡관부 외면 중심선을, Tee에 대해서는 Branch 연결 방향의 중심선과 Up Stream Main 방향의 중심선을 측정 시작선으로 설정하였다.

4. 두께데이터에 근거한 배관기기 감육 및 잔여수명 평가 기술기준

가. 취득된 두께데이터를 분석하여 감육량을 평가하고 감육속도를 고려하여 잔여수명을 평가하기 위해 먼저 배관기기를 section(Up Stream, Down Stream, Branch 등)으로 세분하며 각 section에서의 최대두께(T_{max})와 공칭두께(T_{nom}) 중에서 큰 값을 최소두께(T_{init})로 설정하고, 최소두께(T_{min})와의 差($T_{init}-T_{min}$)를 현재까지의 총 운전기간 동안 section에서 발생한 감육량(Wear)으로 설정한다.

$$Wear = T_{init} - T_{min}$$

나. 각 section에서의 두께감소량을 총 운전시간으로 나누어 section의 두께감소율(Wear Rate)을 계산한다.

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

다. 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)

라. 위에서 계산된 각 section에 대한 두께감소율을 비교하여 최대값을 해당 배관기기의 대표 두께감소율(Wear Rate)로 설정하며, 최소두께(T_{min})로부터 최소요구두께(T_{crit})에 도달하는 잔여수명(Remaining Life) 도출한다.

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

마. 잔여수명 평가 결과에 따른 조치

차기 검사주기에 예상되는 최소두께($T_{min,p}$)가 최소요구두께(T_{crit})를 만족하지 못할 경우 금번 검사주기에서 교체하거나 용접보수를 수행해야 하며, 한 주기 이상의 잔여수명을 나타낸 경우에는 계산된 잔여수명의 절반이 경과하기 전 검사주기에 동일한 포인트에 대해 동일한 교정값으로 검사하여 그림 5에 나타낸 바와 같이 실제 운전시간 동안 감육된 량과 감육속도를 평가하여 향후 검사주기를 설정(Point To Point Method)하도록 한다.

5. 감육배관에 대한 초음파 두께측정 기술에 관한 고찰

상기의 감육배관 두께측정, 감육 및 잔여수명 평가 기준을 만족하기 위해 발전소 현장에서는 초음파 두께측정기(Ultrasonic Thickness Gage)를 사용하고 있어 이에 대한 이해가 필요하다.

가. 감육배관 초음파 두께측정 원리

감육배관 두께검사에 활용되는 초음파 두께측정기는 피검물 저면으로부터의 고 주파수 사운

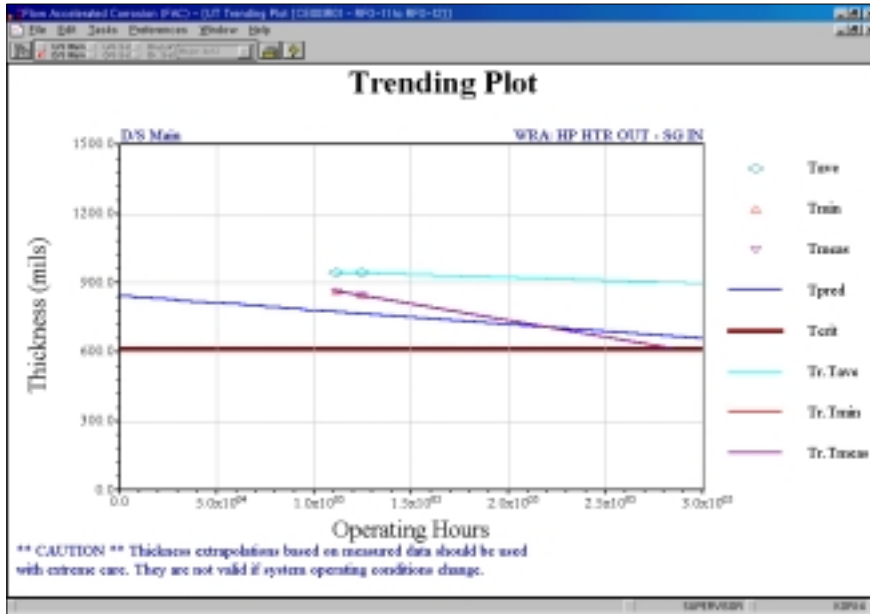


그림 5. Point To Point 감육 및 잔여수명 평가 예시

드파 반사시간을 측정하는 "펄스-에코" 원리로 작동되며 발신과 수신을 담당하는 피에조-일렉트릭 엘리먼트(piezoelectric elements)로 구분된 듀얼 탐촉자(그림 6 참조)를 사용한다.

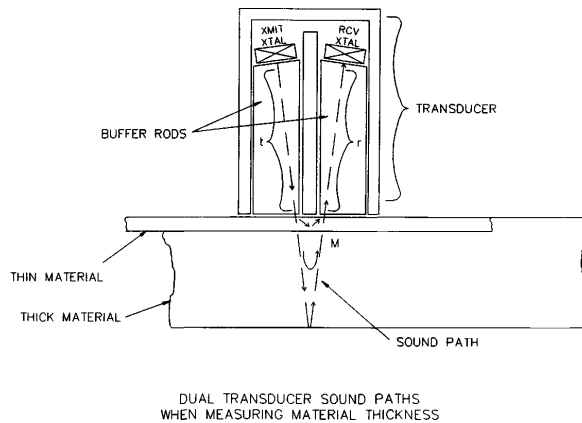


그림 6. 두께측정시 듀얼 탐촉자의 사운드 경로

이들 엘리먼트들은 수평면에 대해 어떤 각도(roof angle)로 갈라져 있는 딜레이 라인에 설치되어 있으며, 발신과 수신 빔의 경로가 피검물의 이면에서 각을 이루도록 되어 있으며 듀얼 엘리먼트의 크로스 빔(cross beam) 디자인은 가상 초점(pseudo-focussing) 효과로 감육배관 두께측정에 있어 최소두께 측정을 최적화 할 수 있다. 듀얼 탐촉자의 발신 부분은 짧은 전자펄스에 의해 여기 될 때 초음파 펄스를 만들어 내는데 이들 사운드웨이브 주파수는 일반적으로 인간의 가청 한계인 2만 사이클을 훨씬 넘어선 초당 2백만에서 1천만 사이클에 해당한다. 이 주파수의 사운드는 공기를 잘 통과하지 못하기 때문에 탐촉자와 피검물 사이에 프로필렌 글리콜, 글리세린 또는 겔과 같은 커플런트를 사용한다.

탐촉자 발신측에서 생성된 사운드웨이브는 피검물 안으로 들어가 통과한 후에 이면으로부터 반사되어 되돌아오며, 반사된 사운드웨이브 혹은 에코들은 탐촉자의 수신측에 포집되고 이곳에서 다시 전기적인 신호로 변환된다(그림 7 참조).

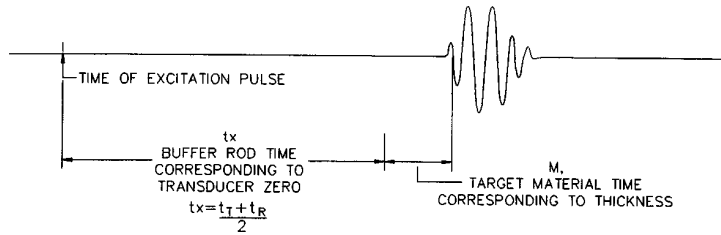


그림 7. 두께측정시 탐촉자 파형

두께측정기는 발진펄스와 첫 번째 에코신호 사이의 시간간격(t)을 정밀하게 측정한다. 다음으로 발신 엘리먼트에서 탐촉자의 끝 부분까지 사운드 웨이브가 통과한 시간과 탐촉자의 끝 부분에서 수신 엘리먼트까지의 에코가 통과한 시간을 더한 t_x 를 제거한다. 다음으로는 "V-Path 보정 시간"인 t_v 를 제거하는데, 이는 얇은 두께의 재질을 측정할 때에 사운드가 통과한 긴 V형상의 경로를 보상해 주기 위함이다. 결과 시간값에 피검물에서의 음속 V 를 곱하고 나서 양방향의 사운드 경로를 보상하기 위해 둘로 나누어 진다. 최종 결과값인 X 가 피검물의 실제 두께가 된다.

$$X = \frac{(t - t_x - t_v) \cdot V}{2}$$

나. 두께값 신뢰도에 영향을 미치는 요인

감육배관의 두께측정 결과는 현재까지의 감육량과 감육속도 및 잔여수명 평가에 매우 큰 영향을 미치므로 정확한 두께값을 도출해야 하며 두께값의 신뢰도에 영향을 미칠 수 있는 요인에 대하여 필수적으로 이해해야 하며 이들 요인을 배제하기 위한 노력이 있어야 한다.

1) 표면조건

피검물의 바깥 표면에 있는 스케일, 녹, 부식 혹은 먼지들은 탐촉자로부터 피검물로의 사운드 에너지 전달을 방해한다. 따라서 이러한 종류의 불순물들은 측정을 수행하기 전에 와이어브러시나 줄 등을 사용하여 피검물로부터 제거되어야 한다. 일반적으로, 녹이 부드러우며 금속 표면에 잘 접촉되어 있는 상태라면 얇은 녹 층을 제거하지 않아도 부식 측정은 가능하다. 일부 아주 거친 주철 혹은 부식된 표면에 대해서는 적절치 사운드가 전달될 수 있게 하기 위하여 매끄럽게 처리해 주어야 한다. 만일 페인트가 두껍게 덮어 있거나 금속에서 떨어져 있다면 부식 측정이 때로는 가능한 하지만, 두꺼운 페인트는 신호를 감쇠 시키거나 잘못된 에코를 발생시켜 부정확한 측정을 할 수 있게 한다. 배관이나 탱크의 바깥 표면에 있는 심한 피팅은 문제가 될 수 있다. 어떠한 거친 표면에서는, 액체 커플런트 보다 겔 혹은 그리스를 사용하는 것이 사운드 에너지의 피검물로의 전달에 도움이 된다. 심한 경우에는 줄이나 그라인더로 탐촉자가 충분히 접촉할 수 있도록 평평하게 할 필요가 있다. 배관이나 탱크의 바깥쪽에서 발생한, 깊이 피팅된 부분에 적용할 때에는 피팅 밑면에서부터 이면까지의 남아있는 금속두께를 측정할 필요성이 있다.

2) 탐촉자 위치/정렬

적절한 사운드 전달을 위해서는 탐촉자는 반드시 피검물 표면에 일정하게 눌러져야 하며 배관과 같은 소구경의 실린더 표면에서는 탐촉자의 갈라진 표면이 파이프 중심 축에 직각이 되도록 하여야 한다(그림 8. 참조).

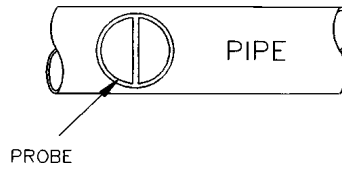


그림 8. 직관부에 대한 정확한 탐촉자 정렬

탐촉자는 절대로 거친 금속 표면에서 굽히게 하거나 비틀어지게 해서는 안 되는데 이는 탐촉자의 표면을 상하게 할뿐 아니라 정확도를 떨어뜨리기 때문이다. 거친 표면에 대해 탐촉자를 움직이는 가장 안전한 방법은 들어올려서 각 측정할 지점에 다시 갖다대는 것이며, 결코 미끄러지게 해서는 안 된다. 초음파 두께측정은 단지 탐촉자 빔 내에서의 한 지점에서만 이루어진다는 것과, 감육 내면 상태에서의 두께값은 종종 매우 다양하게 나타난다는 점을 기억한다. 심각하게 감육되었거나 피팅된 어떠한 피검물에서는 측정값을 얻을 수 없는 지점이 있을 수 있으며 이것은 피검물의 이면이 너무 불규칙적이어서 사운드 에너지가 탐촉자로 반사되기보다는 산란하기 때문이다. 측정값을 얻을 수 없는 또 다른 이유는 사용된 탐촉자나 장비의 측정가능 영역 밖의 두께값일 수도 있다. 일반적으로 피검물의 특정 지점에서 정확한 두께값을 얻을 수 없다는 것은 이면이 다른 수단에 의해 점검되어야 할 정도로 심각하게 손상되어 있다는 것을 의미한다.

3) 교정

교정은 특정의 온도조건 하에서, 특정의 탐촉자를 사용하여, 특정의 재질을 정확하게 측정하기 위하여 두께기를 조정하는 과정이며 결과값의 정확성은 장비 자체의 정밀도와 교정여부에 따라 달라진다. 두께값을 알고 있는 테스트 블록을 사용하여 주기적으로 두께기가 올바르게 작동되는지를 검사해야 하며 탐촉자 딜레이라인에 대한 제로 보상과 두께를 알고 있는 피검물과 동일한 재질의 테스트 블록을 사용한 재질 음속교정은 필수적이다.

4) 고온에서의 두께측정

높은 온도에서의 두께측정에는 피검물의 표면 온도가 사용하는 탐촉자의 규정된 최대온도를 넘지 않았는지, 해당 온도에 사용 가능한 커플런트를 적용하고 있는지, 그리고 피검물의 해당 온도에서의 음속값 변화를 고려하고 있는지 등의 특별한 주의가 필요하다.

다. 초음파 두께측정 신뢰도 향상 방안

앞에서 언급한 두께값 신뢰도에 영향을 미치는 요인들은 초음파 두께측정에 있어서 기본적으로 필요한 주의사항 들이며, 감육배관 관리기술체계에서 요구되는 두께값의 신뢰도 향상을 위해서는 아래에 기술하는 사항들이 추가로 고려되어야 할 필요성이 있다.

1) 재질별 시험시편의 확보 및 교정에 활용

원자력발전소 2차측 배관계통을 구성하는 직관 및 피팅류의 주요 재질을 파악하여 해당 재질에 대한 시험편을 확보하고 두께검사 전에 이를 활용하여 두께측정기를 교정해야 한다. 이는 최초검사서에서 매우 유용하며 일차적으로 두께데이터의 신뢰성을 확인할 수 있는 항목이다.

2) 두께검사 결과 보고서 필수 기입 사항 보완

선정된 대상 배관에 대하여 최초검사 감육평가 결과에 근거하여 설정된 주기에 확인검사를 수행할 때 활용할 수 있도록 최초 두께검사 보고서에는 교정에 관한 기록이 반드시 남아 있어야

하는데 특히 교정에 사용한 시험편의 종류와 음속교정 값이다. 이는 동일 배관기기에 대한 확인 검사에서 취득한 두께데이터와 이전 주기에서 취득한 두께데이터와 비교하여 실지 감육이 어느 정도의 감육속도를 가지고 진행하고 있는지를 결정하는데 중요하게 활용되기 때문이다.

6. 결론

신뢰성 있는 두께데이터를 취한다는 것은 두께검사 결과에 근거하여 감육과 잔여수명을 평가하고 용접보수, 교체 또는 확인검사 시점을 결정하는 등의 감육배관 관리에 있어 매우 중요한 항목이다. 따라서 두께검사에 활용되는 초음파 두께측정기와 실측 현장에서 발생할 수 있는 요인들에 대해 충분히 고려하여 오류 두께데이터 취득 가능성을 배제할 수 있도록 해야 한다. 또한 두께검사를 수행하는 검사자는 감육배관 관리 업무 전반에 대한 충분한 이해와 두께데이터 신뢰성의 중요성에 대한 인식을 가지고 본 고에서 제시한 기술기준을 준수하여 두께검사에 임하여야 할 것으로 사려된다.

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