

## 국내 PWR형 원전의 주급수배관 감육에 대한 하중지지능력 평가

Estimation of Load Carrying Capacity for Pipe Wall Thinning  
of Main Feedwater Piping in Domestic PWR

최영환 강석철

한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19번지 305-338

### 요 약

최근 국내외적으로 원전 2차계통 탄소강 배관의 감육 및 그로 인한 파손 사례가 많이 보고되고 있다. 이 연구에서는 최근 국내에서 발생한 PWR형 원전 주급수배관의 감육이 배관의 건전성에 미치는 영향에 대한 평가를 수행하였다. 특히 배관 감육 및 덧붙이기 용접 보수(overlay weld repair)가 배관의 하중지지능력(load carrying capacity)에 미치는 영향을 근사적인 방법과 FEM에 의한 수치적인 방법으로 평가하였다. 하중지지능력에 대한 평가결과는 다음과 같다. (1) 덧씌우기 용접은 ASME Code 제한치와 비교하여 원주방향 응력은 17%, 모멘트는 20%의 하중지지능력이 향상되었으며, 감육된 상태로 운전되는 경우와 비교하여서는 인장응력과 모멘트 모두 33%의 하중지지능력이 향상되었다. (2) 감육된 부분을 보수하지 않을 경우, ASME Code Repair한 경우와 비교하여 감육경계면에서의 응력집중이 29% 증가하였다.

### Abstract

Such cases as the failure and/or wall thinning of carbon steel pipings due to erosion/corrosion in secondary piping system in NPPs have been widely reported. In this study, the effect of the wall thinning on piping integrity was estimated for main feedwater piping in domestic PWR. In special, the effect of the wall thinning and overlay weld repair on piping load carrying capacity was estimated using both the approximate method and numerical method (FEM), for the case of piping wall thinning in domestic PWR. The results are as follows : (1) The overlay weld repair has such increment of load carrying capacity as 17% in hoop stress and 20% in moment compared to ASME Code limit, and 33% in both hoop stress and moment compared to thinned piping. (2) The 29% increment of stress concentration occurs in thinned area compared to code repair.

## 1. 서 론

원자력발전소 1000MW급 가압경수형(PWR)의 경우 배관의 총 연장 길이는 약 100km에 달하며 이중 안전성 관련 일부 배관을 제외하고는 대부분이 탄소강으로 제작되어 있다. 탄소강 배관은 침부식(Erosion/Corrosion)에 취약한 것으로 알려져 있으며, 실제 탄소강으로 제작된 2차계통 배관에 대한 많은 침부식 손상사례가 보고되어 있다.<sup>1-3)</sup> 1980년대 중반 미국 여러 원전에서 침부식에 의한 탄소강 배관의 파단 사고로 인해 큰 경제적인 손실과 함께 인명 피해까지 발생한 이후, 2차계통 탄소강 배관의 침부식에 대한 문제점이 크게 부각되기 시작하였다.

특히 2차계통 배관 중, 증기발생기로부터 격리밸브(Isolation Valve)까지의 부분은 안전등급(Safety Class)으로 설계되기 때문에, 이 부분에 위치한 주증기계통, 주급수계통, 보조급수계통, 취출수계통 등에서의 파단은 원전 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 또한 격리밸브 이후의 배관은 비록 비안전성 배관이긴 하지만 이들 배관의 파손은 터빈 정지 및 원자로 정지를 유발할 수 있기 때문에 원전의 운전성과 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다.

2차계통의 침부식에 영향을 미치는 인자로는 배관 재질, 용존산소량, 운전온도, 운전시간, 운전 압력, 유속, 배관의 배치 및 형상 등이 알려져 있다. 이들 여러 인자들의 복합적인 영향에 의해 배관의 내벽에 침부식이 발생하며, 감육이 계속 진행될 경우, 설계에서 요구하는 최소 설계 벽두께(Minimum Design Wall Thickness)를 침범하게 되고, 최종적으로는 벽을 관통하게 된다. 침부식에 의한 배관 감육은 국부적으로 발생할 수도 있으며, 또는 원주방향 전체에 나타날 수도 있으나, 어떠한 경우라도 배관 감육은 배관의 하중지지능력(load Carrying Capacity)을 감소시키게 되어 배관 건전성(Integrity)에 나쁜 영향을 미치게 된다.

이 연구에서는 실제 국내에서 발생한 배관 감육 사례를 대상으로 배관 감육이 배관의 하중지지능력에 미치는 영향에 대해 근사적인 방법과 FEM(Finite Element Method)에 의한 수치적인 방법을 사용하여 평가하였다.

## 2. 침부식에 의한 배관감육 및 파손 사례

탄소강배관에 대한 침부식 사례로 가장 심각한 영향을 준 것이 미국 Surry 2 원전에서의 사고였다.<sup>[2]</sup> 1986년 12월 9일 Surry 2호기가 전출력으로 운전 중에 주급수 펌프 A의 18" 흡입관이 파열되었다. 파단은 24" 헤더에서 1ft 떨어진 18" 배관의 엘보우에서 발생하였으며 이로 인해 주변의 여러 기기들이 심하게 손상되었다. 사고 원인에 대한 조사 결과, 탄소강 배관 벽의 마모/부식이 파단의 원인인 것으로 확인되었다. 당시의 일반적인 산업계의 관행에 따라 사업자는 급수 및 응축수 배관 감육에 대한 측정을 수행하지 않았었다. Surry 원전 사고이외에도 침부식에 의한 배관 감육 및 파손 사례는 미국의 경우 1976년부터 최근까지 30여건 이상 계속 보고되고 있다.

우리 나라에서도 최근 침부식에 의한 배관 감육 및 누설 사례가 발생한 바 있다. 누설이 발생한 곳은 PWR형 원전의 고압터빈에서 MSR로 연결되는 42" 증기 배관이었으며, 조사 결과 침부식에 의한 배관 감육으로 나타났다. 최소 설계두께는 19mm였으나 측정결과 4mm까지 배관이 감육된 것으로 나타났다. 또한 다른 PWR형 원전에서도 터빈 추기계통의 엘보우(elbow)와 티(tee)에서 최소설계두께를 침범하는 배관 감육이 발견되어 교체된 사례가 있으며, 주급수배관의 격리밸브 후단 직관부에서도 최소설계두께를 침범하는 배관 감육이 발견되었다. 이 주급수 배관 부위는 overlay 용접으로 보수하여 계속 운전이 허용된 바 있다.

## 3. 배관감육 및 overlay 용접보수에 대한 하중지지능력 평가

### 3.1 배관 감육현상 및 보수용접

우리 나라의 PWR형 원전의 경우, 우리 나라의 규제기관과 USNRC Bulletin 87-01 "Thinning of Pipe Walls in Nuclear Power Plant"<sup>[4]</sup>의 권고를 반영하여,

탄소강 배관에 대한 두께 감육을 정기보수 기간 중에 주기적으로 수행하고 있다. 최근 이러한 배관 감육 측정 프로그램에 따라 배관 감육을 측정하던 한 PWR형 원전에서 증기발생기에 연결된 18인치(457.2mm) 직경의 주급수배관의 체크 밸브(Check Valve) 후단부위의 측정두께가 최소 설계두께를 만족시키지 못함이 발견되었다. 이 부분의 최소 설계두께는 0.69인치(17.5mm)이나 측정된 배관두께는 최소 0.6인치(15.24mm)로 최소 설계두께에 0.09인치(2.26mm) 부족하였다. 이 부위에 대한 육안검사 및 PSI/ISI 결과를 근거로 배관 벽두께 감소의 원인은 유체유동에 의한 침부식인 것으로 추정되었으며, 배관이 일정하게 감육된다고 가정하였을 경우, 배관 감육율은 0.025인치/년(0.63mm/년)로 평가되었다. 감육된 배관부위에 대해서는 배관 외벽면에서 두께 0.24인치(6mm)의 덧붙이기 용접(overlay weld)으로 보수가 수행되었다. 그러나 ASME Code Sec.XI의 요건에 따르면 보수용접은 결함부위에 대해 수행하도록 규정하고 있기 때문에 배관 외벽면에 대한 덧붙이기 용접은 Non-Code Weld Repair이다. USNRC GL 90-05에서는 '운전중 발견된 결함에 대해서만 다음 O/H시 교체를 전제'로 임시적인 Non-Code Weld Repair를 허용하고 있다.<sup>[6]</sup> 이 GL에서는 Class 1&2 배관에 대해 Non-Code Weld Repair의 한 방법으로 '공학적인 용접 덧붙이기(Engineered Weld Overlay)를 허용하고 있으며, 여기서 '공학적(Engineered)'의 의미는 용접의 결과로서 '하중지지능력(Load Carrying Capacity)이 확보될 수 있어야 함을 뜻한다. Fig. 1은 감육현상이 발견된 주급수배관의 단면을 보여주는 그림이다. 그림에는 감육된 상태와 ASME Code Repair할 경우, 그리고 Non-Code Repair인 배관 외벽면에 대한 Non-Code Repair한 경우 등이 나타나 있다.

본 연구에서는 우리 나라 PWR형 원전 주급수배관에 대해 보고된 감육현상 및 덧붙이기 용접 보수가 배관계통의 하중지지능력에 미치는 영향을 근사적인 방법과 FEM에 의한 수치적인 방법으로 평가하였다.

## 3.2 근사적인 하중지지능력 평가

### 3.2.1. 평가 방법

배관에 작용되는 응력은 압력에 의한 원주방향 응력(Hoop Stress,  $\sigma_h$ )과 굽힘 응력(Bending Stress,  $\sigma_b$ )으로 나눌 수 있으며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_h = ( P * R_i ) / ( t ) \quad (1)$$

$$\sigma_b = ( M * R_o ) / ( I ) \quad (2)$$

여기서 P는 유체 내압으로 1270psi, M은 모멘트,  $R_i$ 는 배관의 내반경,  $R_o$ 는 배관의 외반경, I는 Moment of Inertia로  $[\pi(R_o^4 - R_i^4)/4]$ 와 같이 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 다음 5가지 경우에 대한 평가를 수행하였다.

Case 1 : 공칭두께를 유지하는 경우(제작요건)

Case 2 : 최소 설계벽두께를 유지하는 경우(Code 제한치)

Case 3 : 감육된 상태

Case 4 : 배관 내벽에 보수 용접하는 경우(Code 용접)

Case 5 : 배관 외벽에 덧붙이기 용접을 하는 경우(Non-Code 용접)

배관에 모멘트, M이 작용될 경우, 위의 5가지 경우에 대한 굽힘응력은 다음과 같은 변수에만 영향을 받는다.

$$\sigma_b \sim R_o / ( I ) \quad (3)$$

Table 1은 상기 5가지 경우에 대한 원주방향 응력과 모멘트를 평가한 결과이다. 표에는 Code 제한치를 1로 하여 각 경우에 대한 상대비율도 같이 표시되어 있다.

### 3.2.2 감육된 상태의 평가 (Case 3)

Table 표 1에 나타난 바와 같이 감육된 상태(Case 3, \* 표시부분)는 Code 제한

치(Case 2)에 대해 원주방향 응력은 16%, 모멘트는 13%를 초과하고 있다. 따라서 감육된 상태로 운전할 경우, 모든 운전조건(정상운전, 트립 등 이상상태, 지진 등 손상상태)에서의 배관건전성을 보장할 수 없음을 보여준다. 더욱이 감육된 부분은 증기발생기와 격리밸브 사이로서, 이 부분이 파단될 경우 유체 유출을 차단할 수 없을 뿐만 아니라 보조급수도 공급될 수 없어 대형사고의 위험성이 있다.

### 3.2.3 덧붙이기 용접의 평가 (Case 5)

배관 외부에 덧붙이기 용접을 한 경우(Case 5, \*\* 표시부분)는 Code 제한치(Case 1)에 대해 원주방향 응력은 17%, 모멘트는 20%의 여유도를 보여주고 있다. 이는 외부 덧붙이기용접이 'Engineered' Weld Overlay임을 보여주는 결과이다. 또한 덧붙이기 용접의 결과는 감육된 상태로 운전을 가정할 경우와 비교하여 원주방향 응력은 33%, 모멘트는 33%의 하중지지능력이 향상됨을 보여주고 있다. 한편 배관 외부에 덧붙이기 용접을 한 경우(Case 5)를 Code의 요건대로 배관 내부에서 보수용접을 하였다고 가정한 경우(Case 4)와 비교할 때, 원주방향 응력은 2% 정도의 여유도가 부족하나, 모멘트는 오히려 4% 정도의 여유도가 더 확보되었다. 이 결과는 덧붙이기 용접이 Code 보수용접과 거의 같은 하중지지능력을 가지고 있음을 보여주는 결과이다.

## 3.3 수치적인 하중지지능력 평가

앞 절에서 수행한 근사적인 하중지지능력 평가는 감육에 의한 응력집중의 효과를 평가할 수 없기 때문에 이 연구에서는 배관 감육에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 상용 수치해석프로그램인 ANSYS Code를 사용하였으며, 앞 절의 5가지 Case 중에서 Case 2, 3, 4, 5를 각각 모델링하여 유체내압이 작용하는 경우에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 2는 감육된 배관에 덧붙이기 용접을 수행한 경우(Case 5)에 대한 수치해석

모델링을 보여주는 그림이다. 사용된 element는 Axisymmetric Structural Solid Element(25번)로 Case 3의 경우 259개의 node와 258개의 element가 사용되었다. 그림에서 벽두께가 두꺼운 부분은 체크밸브 방향이며 체크 밸브쪽에서 오른쪽으로 유체가 흐른다. 감육부위는 삼각형 모양의 배관용접부의 후단이며, 덧씌우기 용접 부분은 배관 외벽에 0.24인치 두께로 나타나 있다.

Table 2는 Case 2, 3, 4, 5에 대한 수치해석 결과이다. 표에 나타난 값은 용접 중앙선에서 4인치 떨어진 곳의 원주방향 응력값이다. 수치적으로 구한 응력값은 배관의 외벽에서 구한 값이다. 표에는 비교를 위해 근사적인 방법으로 구한 응력값이 함께 표시되어 있다. 표에서 나타난 바와 같이 수치적인 방법으로 구한 결과는 근사적인 방법으로 구한 결과와 1% 이내로 원주방향 응력값을 주고 있다.

수치적인 해석에서는 근사적인 방법으로 평가하기 어려웠던 배관용접부와 감육부위와의 경계부분(Fig.2의 A-B)의 응력집중에 대한 평가를 수행하였다. Fig.2의 A-B 부분 중에서 응력집중이 가장 심한 곳은 C부분이다. Fig. 3은 감육된 상태에서 A-B의 원주방향 응력의 변화를 보여주는 그림이다. 그림은 감육 경계면에서의 응력집중현상이 나타나고 있음을 보여준다. Table 3은 수치적인 방법으로 구한 응력집중의 상태이다. 감육된 상태(Case 3)와 Code Repair된 상태(Case 4)에 대해 응력집중의 변화를 평가하였다. 표에는 실제 수치해석에서 구한 원주방향 응력값과 이 값을 식(1)로 구한 응력값으로 나눈 상대응력이 나타나 있다. 표에 나타난 바와 같이 감육부분을 유지한다면 Code Repair한 경우에 비해 C에서의 응력집중이 29% 증가하고 있다. 그러나 이 응력집중으로 인한 응력의 절대 수준(11072psi)은 배관용접부의 덧살로 인한 두께증가로 최소벽두께시의 원주방향응력(15215psi)보다는 작아 안전함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

근사적인 방법과 수치적인 방법으로 국내 PWR형 원전의 주급수배관에 대한 배관 감육 및 덧씌우기 용접에 대한 하중지지능력을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 가. 감육된 상태는 Code 제한치에 대해 원주방향 응력은 16%, 모멘트는 13%를 초과하였다. 덧씌우기 용접의 경우는 Code 제한치에 대해 원주방향 응력은 17%, 모멘트는 20%의 여유도를 확보하였으며, 감육된 상태로 운전을 가정할 경우와 비교하여 덧씌우기 용접은 인장응력과 모멘트 모두에 대해 33%의 하중지지능력 향상을 가져왔다. 이러한 결과는 덧씌우기 용접이 공학적 덧씌우기 용접임을 보여주는 결과이다.
- 나. 감육부분을 유지한다면 Code Repair한 경우에 비해 응력집중이 29% 증가한다. 그러나 이 응력집중으로 인한 응력의 절대 수준(11072psi)은 배관용접부의 덧살로 인한 두께증가로 최소벽두께시의 원주방향응력(15215psi)보다는 작아 안전하다.

## 참 고 문 헌

1. USNRC, "Pipe Cracking Experience in LWR", NUREG-0679, 1980
2. USNRC, "Erosion/Corrosion-Induced Pipe Wall Thinning in US NPP", NUREG-1344, 1989
3. USNRC, "Investigation and Evaluation of Cracking Incidents in Piping in PWR", NUREG-0691, 1980
4. USNRC Bulletin 87-01 "Thinning of Pipe Walls in Nuclear Power Plant"
5. USNRC Generic Letter 90-05 "Guidance for Performing Temporary Non Code Repair of ASME Code Class 1, 2, and 3 Piping"

Table 1. 근사적인 방법으로 구한 원주방향 응력 및 모멘트

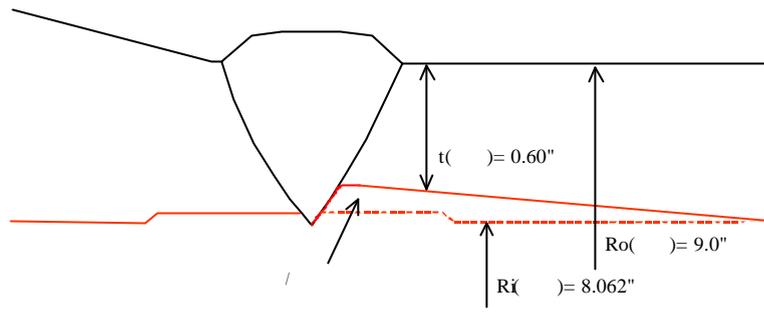
Case	Ro (in)	Ri (in)	t (in)	원주방향응력		모멘트	
				$\sigma_{\theta}$ (psi)	상대비율	Ro/l(x1000)	상대비율
1	9	8.062	0.938	12186	0.80	4.904	0.77
2	9	8.311	0.689	15319	1	6.402	1
3	9	8.400	0.600	17780	1.16*	7.242	1.13*
4	9	8.164	0.836	12403	0.81	5.409	0.84
5	9.236	8.400	0.836	12761	0.83**	5.117	0.80**

Table 2. 수치적인 방법으로 구한 원주방향 응력 및 모멘트

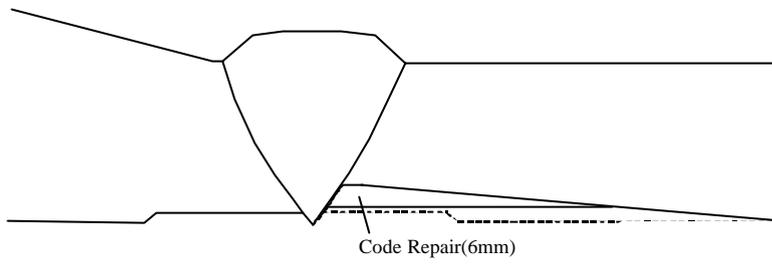
Case	수치적인 방법		근사적인 방법		%
	$\sigma_{\theta}$ (psi)	상대 비율	$\sigma_{\theta}$ (psi)	상대 비율	
2	15215	1	15319	1	0.68
3	17658	1.16	17780	1.16	0.69
4	12348	0.81	12403	0.81	0.45
5	12638	0.83	12761	0.83	0.97

Table 3. 수치적인 방법으로 구한 응력 집중 상태

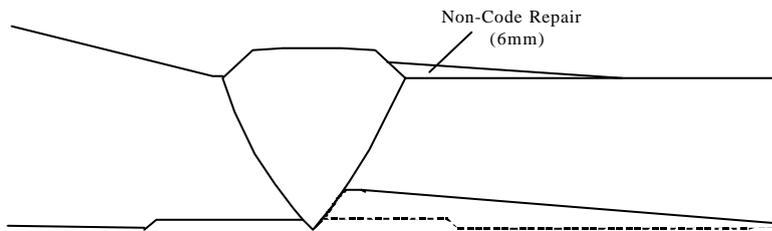
Position (Fig. 2)	Case 3		Case 4		Case 3&4 비율
	$\sigma_{\theta}$ (psi)	상대응력	$\sigma_{\theta}$ (psi)	상대응력	
A	6675	0.618	6017	0.557	1.11
B	11072	0.712	6192	0.553	1.29
C	9723	0.547	8230	0.667	0.82



(a) 감육된 상태



(b) 배관 내벽면에 보수용접한 경우(Code Repair)



(c) 배관 외벽면에 Overlay 용접한 경우(Non-Code Repair)

Fig. 1 Geometry of Pipe Wall Thing in Main Feedwater Line and Overlay Weld Repair

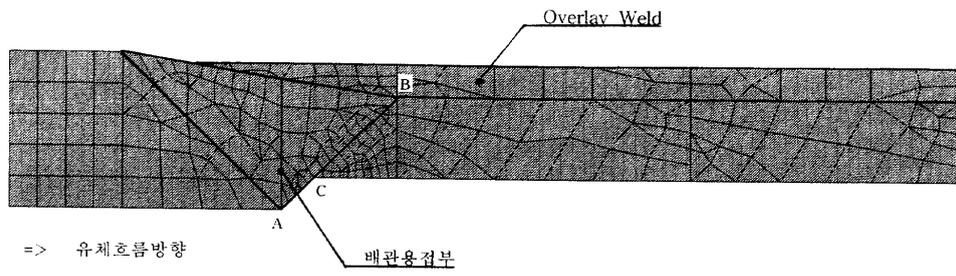


Fig. 2 Finite Element Modelling for Wall Thinning and Overlay Weld Repair

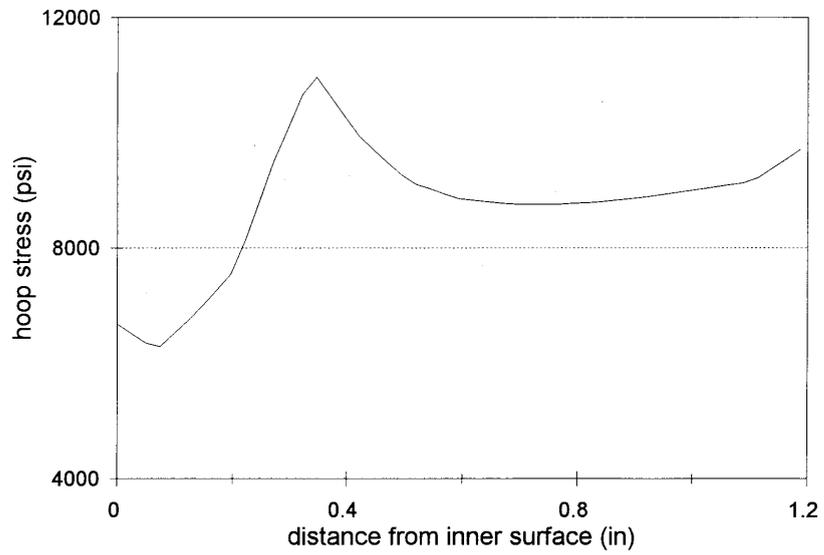


Fig. 3 Hoop Stress along Weld Fusion Line from Pipe Inner Surface