<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.3.405 ISSN 1226-4873

직관 용접부의 크리프 특성 불균일에 따른 열영향부 정상상태 응력 예측§

한재준* · 김상현* · 정진택* · 김윤재*†
* 고려대학교 기계공학과

Prediction of Steady-State Stresses within Heat Affected Zone Due to Creep Mismatch in Welded Straight Pipes

Jae-Jun Han*, Sang-Hyun Kim*, Jin-Taek Chung* and Yun-Jae Kim*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received September 17, 2012 ; Revised November 28, 2012 ; Accepted November 28, 2012)

Key Words: Creep Mismatch(크리프 불균일), Finite Element Analysis(유한요소해석), Steady-State Stress(정상상태 응력), Heat Affected Zone(열영향부), Stress Redistribution(응력 재분배)

초록: 본 논문은 크리프 파단 수명평가에 주요인자인 정상상태 크리프 응력을 직관 용접부에 대해 정량화한다. 모재와 용접부의 크리프 특성 불균일이 응력에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기 위해, 다양한 용접부 불균일에 대해 이차원 유한요소 크리프 탄성해석을 수행하였다. 용접부는 열영향부를 고려하였으며 각각의 재료는 이상화된 탄성-멱 크리프 법칙을 따른다고 가정하였다. 하중에 따른 영향을 보기 위해 내압과 인장하중에 대해 연구를 수행하였다. 용접부 크리프 응력의 정량화를 위해 크리프 불균일 지수를 도입하였으며, 무차원화된 단면평균응력과 선형적인 관계를 확인하였다. 불균일 지수로 정량화한 응력과 Type IV 영역을 모사한 용접부의 유한요소해석 결과 및 영국전력의 R5 문헌값의 비교를 통해 연구결과의 유효성을 검증하였다.

Abstract: This paper reports the steady-state stresses within the heat affected zone (HAZ) of a welded straight pipe subject to creep. The creep constants and exponent are varied systematically to see the effect of various mismatches in creep properties on the steady-state creep stresses, via detailed two-dimensional finite element (FE) creep analyses. The weldments consist of the base metal and weld metal with the HAZ, which are characterized using the idealized power creep laws with the same creep exponent. The internal pressure and axial loading are considered to see the effect of the loading mode. To quantify the creep stresses, a creep mismatch factor is introduced as a function of the creep constants and exponent. It is concluded that the ratio of the section-averaged stresses for a mismatched case to those for an evenmatched case are linearly dependent on the mismatch factor. The results are compared with the FE results, including the Type IV region, as well as the R5 procedure.

- 기호설명 -

A, n : 크리프 지수 및 재료 상수, 식 (2)
MF : 불균일 지수, 식 (3) 또는 식 (4)
P_L : 한계 하중
t : 크리프 시간
t_{red} : 재분배 시간, 식 (4)
ε : 크리프 변형률
σ_e : von Mises 등가 응력
σ_b : 균일한 배관의 응력
σ_m : 불균일 배관의 응력
σ_{ref} : 참조 응력
k : 용접부 재분배 계수
ξ : 응력 추출 위치, 그림 1

하첨자
b : 모재
w : 용접재
HAZ : 열영향부(coarse grain HAZ)
IV : Type IV (fine grain HAZ)

§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2012. 2. 16.-17., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

국내외에서 연구개발중인 소듐냉각 고속로 및 초초임계압(Ultra Super Critical) 조건의 화력 발전설비는 고온에서 운전되며 크리프 현상이 발생한다.[1] 이러한 조건에서는 주로 용접부에서 파단이 발생하므로[2-4] 정확한 크리프 수명 평가를 위해서는 용접부의 응력을 정확히 예측해야 한다. 이에 대한 연구는 주로 유한요소해석 결과를 통해 응력 및 파단시간을 예측하여 실험 결과와 비교하는 방식으로 수행되었다.[5] 기존 평가 방법으로는 영국전력의 사용적합성 평가코드 R5(이하 'R5 코드'로 지칭)에서 고온에서 사용되는 배관 용접부의 응력평가를 위해 용접부 재분배 계수(weld redistribution factor, k) 를 적용하고 있으나, CrMoV 용접 배관에 대해서만 값을 제시하고 있다.[6] 다양한 용접부 물성에 따른 크리프 응력 분포에 대한 연구는 Goldthrope 및 Law 등이 각각 용접부를 모재와 용접재 또는 모재와 열영향부를 모사한 용접재로 구분하여 크리프 특성 불균일에 따른 영향을 분석하였다.[7,8]

본 논문에서 다루는 응력 정량화와 관련해서는 Lee 등이 크리프 불균일 지수(creep mismatch factor)를 도입하여 영국의 AGR(Advanced Gas-cooled Reactor)에서 사용되는 대구경 분기관(large bore branch)의 용접부 물성 불일치에 따른 크리프 응력이 정량화가 가능하다는 결과를 제시하였다.[9] 이어서 Han 등은 다양한 분기관 형상과 복합하중에 대한 결과를 발표하며 결론을 확장하였다.[10]

기 수행된 정량화에 대한 연구들은 용접부의 형상이 복잡한 분기관에 대해 이루어졌으므로 크리프 재분배 응력의 이론적인 접근 및 분석이 어려우며, 용접재와 모재로 이루어진 배관의 해석결과로서 실제 파단은 주로 열영향부에 발생한다는 측면[3,4]에서 한계를 지닌다. 따라서 본 연구에서는 크리프 현상을 통해 재분배된 응력 분석이 용이한 직관 용접부 형상에 대해 열영향부의 영향을 고려하여 크리프 응력을 정량화하였다. 유한요소해석을 통해 다양한 경우의 모재, 용접재 그리고 열영향부에 대한 크리프 물성 불일치를 적용하였으며 하중에 따른 영향을 보기 위해 내압과 배관의 길이방향 인장하중에 대해 연구를 수행하였다.

다음 장에서 용접부 크리프 응력 평가와 관련된 기존의 평가법과 크리프 불균일 지수를 설명하였다. 3 장에는 유한요소해석 절차와 결과를 제시하고 이어서 영국전력의 R5 에서 제시하는 값과 비교하여 결과의 유효성을 검증하였으며 4 장에 결론을 기술하였다.

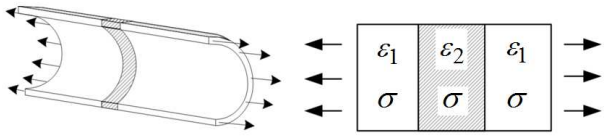


Fig. 1 Stress compatibility under axial loading condition in weld straight pipes

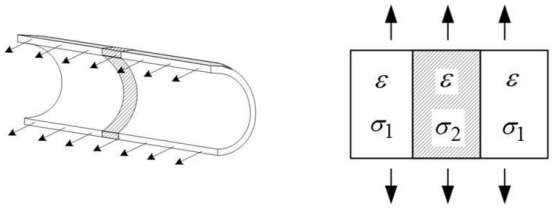


Fig. 2 Strain compatibility under internal pressure in weld straight pipes

2. 크리프 응력 평가

2.1 R5 코드 평가법

용접부의 크리프 응력평가에 사용되는 R5 코드에서 제시하는 평가법은 다음과 같다. 모재로 이루어진 배관에 대해 식 (1)로 정의된 참조응력을 결정하고 식 (2)와 같이 용접부 재분배 계수(k)를 적용하여 용접부 응력으로 보정한다.

$$\sigma_{\mathrm{ref}} = \frac{P}{P_{\mathrm{Lb}}}\sigma_{0.2\mathrm{b}} \tag{1}$$

$$(\sigma_{\mathrm{ref}})_{\mathrm{w}} = k \times \sigma_{\mathrm{ref}} \tag{2}$$

여기서 P_{Lb}는 모재로 이루어진 구조물의 한계하중이며 $\sigma_{0.2\mathrm{b}}$ 는 모재의 항복강도(0.2% proof strength)이다. 식 (2)의 한계하중(P_{Lb})은 항복강도($\sigma_{0.2\mathrm{b}}$)와 선형적인 관계이므로 참조응력(σ_{ref})은 항복강도($\sigma_{0.2\mathrm{b}}$)의 영향을 받지않고 구조물의 형상변수(geometry parameters)와 가해지는 하중에 의해 결정된다.[11]

용접부 재분배 계수는 하중조건에 따른 응력 또는 변형률 적합성(stress or strain compatibility)에 의해 결정된다.[9] Fig. 1 은 배관의 길이방향 인장 하중에 대한 용접부의 응력 상태를 나타내고 있다. 응력 적합성 조건에 따라 모재와 용접재의 응력은 동일하며 변형률은 다르므로 용접부 재분배 계수는 1 로 결정된다. 유사한 방식으로 Fig. 2 에서는 원주방향 응력조건에 대해 용접부의 응력 상태를 나타내고 있으며 변형률 적합성 조건에 따라

Table 1 Geometric variables of welded straight pipes

r_i(mm)	r_o(mm)	t(mm)	h(mm)	L(mm)	r_m^*/t
152	160	16	2	500	10

*$r_m=(r_i+r_o)/2$

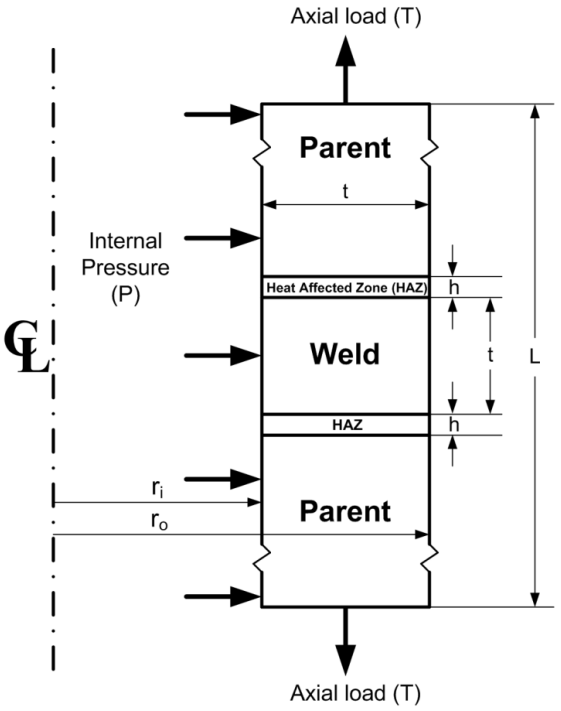


Fig. 3 Schematic of welded straight pipe showing the relevant geometric variables

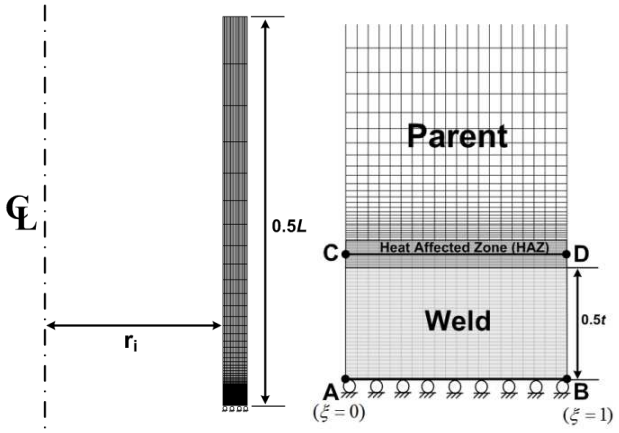


Fig. 4 FE mesh for three-material model for welded straight pipe

모재와 용접재의 변형률은 동일하며 응력은 다르다. 이러한 경우는 배관에 내압이 가해지는 상태를 나타내며, 이 때의 용접부 재분배 계수는 용접부의 크리프 특성에 의해 결정된다.

2.2 크리프 불균일 지수

기존 연구결과에 따르면 분균일한 크리프 특성을 가진 용접부의 응력분포는 크리프 지수와 크리프 상수의 비(A_w/A_b)에 영향을 받으므로[9,10] 크리프 지수와 상수를 포함한 크리프 불균일 지수를 도입하여 크리프 응력을 정량화하였다. 크리프 불균일 지수가 유도되는 과정은 다음과 같다.

재료의 크리프 특성은 이상화된 탄성-멱 크리프 법칙(elastic-power creep laws)을 따르고 모재와 용접부의 지수는 동일하다고 가정하였다.

$$\dot{\varepsilon}_b = A_b\sigma^n \tag{3}$$

$$\dot{\varepsilon}_w = A_w\sigma^n \tag{4}$$

$$\dot{\varepsilon}_{HAZ} = A_{HAZ}\sigma^n \tag{5}$$

위 식에서 A_b, A_w 그리고 A_{HAZ} 은 각각 모재와 용접재 그리고 열영향부의 크리프 상수이며 n 은 크리프 지수이다.

재료의 소성학에서 용접부와 모재의 항복응력의 비로 정의되는 불균일 지수(mismatch factor, MF)는 다음과 같이 정의된다.

$$MF = \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{yb}} \tag{6}$$

여기서 σ_{yb} 과 σ_{yw} 는 각각 모재와 용접재의 항복강도이다. 소성학의 인장 특성과 크리프 특성의 관계를 이용하여 크리프 불균일 지수를 정의한다.[12] 식 (3)-(5)에서 동일한 시간에 대해 0.2% 비탄성 크리프 변형률에 해당하는 항복강도를 식 (6)에 대입하면 아래와 같이 용접재와 열영향부에 대한 크리프 불균일 지수가 유도된다.

$$MF_w = \left(\frac{A_b}{A_w}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{7a}$$

$$MF_{HAZ} = \left(\frac{A_b}{A_{HAZ}}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{7b}$$

크리프 불균일 지수(MF)는 크리프 상수와 크리프 지수의 함수이며 이후에 본 연구에서 표기되는 MF 는 위 식에서 제시한 모재와 각각의 용접부 물성에 대한 크리프 불균일 지수를 의미한다. 불균일 지수가 1 보다 작으면 하불균일(under-matching), 1 이면 균일(even-matching) 그리고 1 보다 크면 상불균일(over-matching)이라고 지칭한다.

3. 유한요소해석 결과 및 검증

3.1 형상 및 하중

용접부 불균일에 대한 크리프 응력을 정량화하기위해 배관 시스템에 사용되는 기본 요소인 직관 용접부 형상에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 직관 용접부의 형상과 각각의 치수를 Fig. 3 과 Table 1 에 나타내었으며, 하중에 따른 응력을 평가하기 위해 배관의 길이방향 인장하중과 내압이 가해지는 경우를 각각 고려하였다. 내압의 경우, 닫힌 배관을 모사하기 위해 배관 끝 단면에 작용하는 내압을 길이방향 응력(end cap stress)으로 환산하여 적용하였다. 초기 하중은 내압과 인장하중에 대해 각각 유한요소해석을 통해 구한 한계하중의 50%를 적용하였으며 이 값은 무차원화되므로 이후에 제시되는 결과에는 영향을 미치지 않는다.

3.2 유한요소 크리프 해석

연구에 사용된 유한요소망을 Fig. 4 에 나타내었다. 직관의 축대칭성을 구현하고 정확한 응력값을 얻기 위해 수치해석 상용프로그램인 ABAQUS v6.11 에서 제공하는 이차원 하이브리드 축대칭 요소(CAX8H)를 사용하였고[13] 탄성-크리프 해석을 수행하였다. 용접부 중앙을 기준으로 대칭성을 고려하여 1720 개의 요소와 7213 개의 절점으로 이루어진 1/2 모델을 사용하였다.

Table 2 Creep properties of base, weld metal and HAZ with mismatch factor

	A_w/A_b	A_{HAZ}/A_b	A_b	A_w	A_{HAZ}	MF_w	MF_{HAZ}	Case
3	5	8	3.20E-11	1.60E-10	2.56E-10	0.58	0.50	A
5	5	8	3.20E-15	1.60E-14	2.56E-14	0.72	0.66	
7	5	8	3.20E-19	1.60E-18	2.56E-18	0.79	0.74	
3	5	4	3.20E-11	1.60E-10	1.28E-10	0.58	0.63	B
5	5	4	3.20E-15	1.60E-14	1.28E-14	0.72	0.76	
7	5	4	3.20E-19	1.60E-18	1.28E-18	0.79	0.82	
3	5	2	3.20E-11	1.60E-10	6.40E-11	0.58	0.79	C
5	5	2	3.20E-15	1.60E-14	6.40E-15	0.72	0.87	
7	5	2	3.20E-19	1.60E-18	6.40E-19	0.79	0.91	
3	5	0.8	3.20E-11	1.60E-10	2.56E-11	0.58	1.08	D
5	5	0.8	3.20E-15	1.60E-14	2.56E-15	0.72	1.05	
7	5	0.8	3.20E-19	1.60E-18	2.56E-19	0.79	1.03	
3	5	0.5	3.20E-11	1.60E-10	1.60E-11	0.58	1.26	E
5	5	0.5	3.20E-15	1.60E-14	1.60E-15	0.72	1.15	
7	5	0.5	3.20E-19	1.60E-18	1.60E-19	0.79	1.10	
3	5	0.25	3.20E-11	1.60E-10	8.00E-12	0.58	1.59	F
5	5	0.25	3.20E-15	1.60E-14	8.00E-16	0.72	1.32	
7	5	0.25	3.20E-19	1.60E-18	8.00E-20	0.79	1.22	
3	5	0.167	3.20E-11	1.60E-10	5.34E-12	0.58	1.82	G
5	5	0.167	3.20E-15	1.60E-14	5.34E-16	0.72	1.43	
7	5	0.167	3.20E-19	1.60E-18	5.34E-20	0.79	1.29	

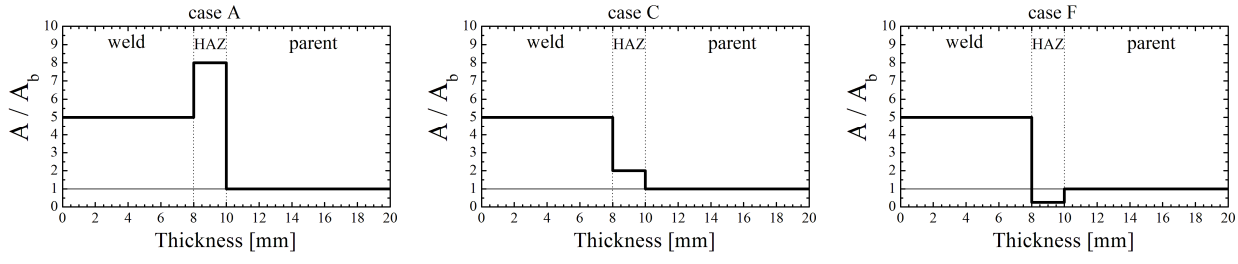


Fig. 5 Typical cases of mismatched creep properties in Table 4; (a) case A, (b) case C and (c) case F

Table 3 Creep properties of 0.5CrMoV steel welded with 2.25Cr1Mo with mismatch factor

n	A_w/A_b	A_{HAZ}/A_b	A_{IV}/A_b	A_b	A_w	A_{HAZ}	A_{IV}	MF_w	MF_{HAZ}	MF_{IV}
3	5	0.167	1.2	3.20E-11	1.60E-10	5.34E-12	3.84E-11	0.58	1.82	0.94
5	5	0.167	1.2	3.20E-15	1.60E-14	5.34E-16	3.84E-15	0.72	1.43	0.96
7	5	0.167	1.2	3.20E-19	1.60E-18	5.34E-20	3.84E-19	0.79	1.29	0.97

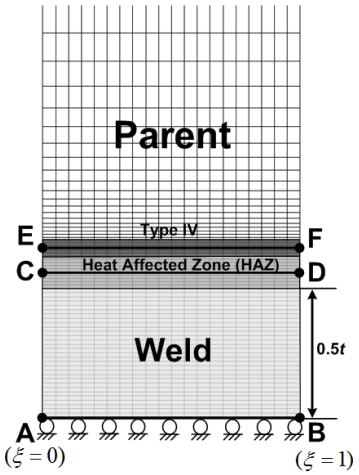


Fig. 6 FE mesh for four-material model for welded straight pipe

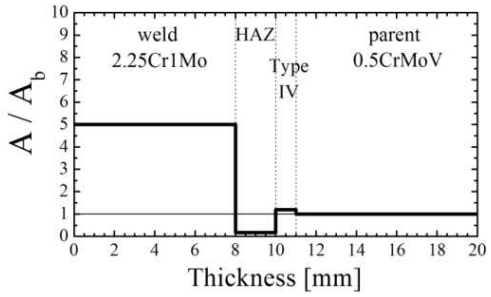


Fig. 7 Creep properties of 0.5CrMoV steel welded with 2.25Cr1Mo

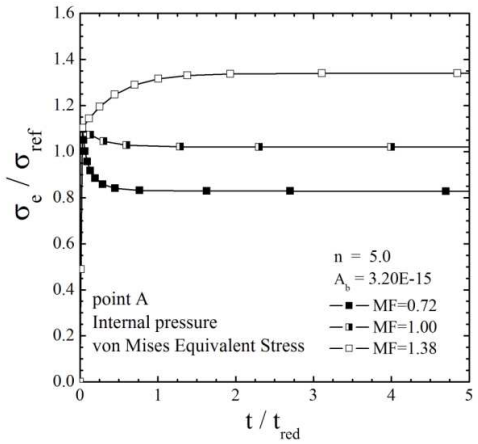


Fig. 8 Variation of von Mises equivalent stress at the point A(Fig. 4) with time

용접재 2.25Cr1Mo 는 모재 0.5CrMoV 보다 크리프 변형률이 5 배 빠르다.[14~16] 이러한 모재와 용접재의 크리프 특성을 기준으로 열영향부의 다양한 크리프 특성 불균일에 대해 연구를 수행하였으며 Table 2 에 정리하였다. 열영향부의 크리프 특성이 가장 빠른 경우와 용접재와 모재의 사이인 경우 그리고 가장 느린 경우를 체계적으로 고려하였으며 각각의 대표적인 경우를 Fig. 5 에 제시하였다.

미시적인 재료 구조적인 측면에서 열영향부는 네 부분까지 구분될 수 있으나,[17] R5 코드에서는 재료 강도의 측면에서 열영향부와 Type IV 영역에 대해 용접부 재분배 계수(k)를 정의하고 있다.[6] 따라서 본 연구에서는 용접재 2.25Cr1Mo 와 모재 0.5CrMoV 로 만든 용접부에 대해 모재, 용접재, 열영향부 그리고 Type IV 영역을 모사하여 Table 2 의 데이터를 사용한 결과와 비교하였다. Fig. 6 는 Type IV 영역을 모사한 유한요소망이며, Table 3 와 Fig. 7 에 크리프 물성을 나타내었다. 또한 해석결과를 통해 얻은 용접부 재분배 계수와 R5 코드에서 제시한 값을 비교하여 연구결과의 유효성을 검증하였다.

3.3 추출 응력

재료에 크리프 현상이 발생하면 시간에 따라 응력이 재분배 된다.[1] 해석에서는 정상상태 응력(steady-state stress)을 추출하기 위해 초기하중을 일정하게 유지한 상태에서 크리프 해석을 수행하여 응력완화가 충분히 이루어진 시점에서 응력을 추출하였다. 크리프 파단 평가시 주요인자인 von Mises 등가응력을 추출하였고,[6] 시간에 따른 응력 재분배 결과를 Fig. 8 에 제시하였다. 내압이 가해지는 경우에 대한 결과이며 그림에서 시간은 식 (8)로 정의되는 재분배 시간(t_{red})으로 무차원화하였다.

$$t_{red} = \frac{\sigma_{ref}}{EA_b\sigma_{ref}^n} \tag{8}$$

시간이 경과함에 따라 응력이 재분배되는 것을 확인할 수 있으며, 모든 경우에 재분배 시간보다 충분히 긴 시간에 해당하는 해석을 수행하여 정상상

태 응력을 추출하였다.

응력을 평가하고자 하는 부분의 중앙부에 선을 그어[18] 각 지점에서 추출한 응력을 평균하여 정량화에 사용하였다.[9,10] 이후 결과에서는 이를 단면 평균응력이라 지칭한다.

Fig. 9 에는 Table 2 의 하불균일에 대한 결과를 나타내고 있으며, 모재로 이루어진 배관(하첨자 b)의 단면평균응력과 참조응력의 비를 크리프 지수에 따라 제시한 결과이다. 단면평균응력과 참조응력은 하중조건과 크리프에 특성에 무관하게 동일한 값을 나타낸다. 따라서 식 (1)과 식 (2)에서 제시한 용접부 재분배 계수와 단면평균응력의 관계가 식 (9)로 정리되며, 불균일한 배관의 용접부의 단면평균응력(하첨자 m)과 모재로 이루어진 배관의 단면평균응력은 용접부 재분배 계수를 의미한다.

$$\left[\frac{(\sigma_e)_m}{(\sigma_e)_b}\right]_{avg} = \frac{(\sigma_{ref})_w}{\sigma_{ref}} = k \qquad (9)$$

3.4 결과 및 검증

Fig. 10 에는 Table 2 를 사용한 열영향부 응력(HAZ stress)과 용접재 응력(weld stress) 결과를 비교하였다. 열영향부 응력과 용접재 응력은 각각 Fig. 4 의 C-D 선과 A-B 선을 따라 추출하였다. 식 (9)에 따라 그래프에서 수평한 점선은 용접부 재분배 계수가 1 인 선이며 다른 선은 일대일선(identity line)이다. 내압이 작용하는 경우에 응력분포는 일대일선에 밀집해 있으며 이러한 경향은 열영향부 응력에서 더 뚜렷하다. 배관의 길이방향으로 인장하중이 작용하는 경우, 상분균일 영역(*MF*>1)에서는 일대일선에 분포하며 하불균일 영역(*MF*<1)에서는 수평선과 일대일선 사이에 분포한다. 이러한 결과는 2 장에서 설명한 응력 적합성 조건에 의해 결정되는 용접부 재분배 계수값(*k*=1)과 다소차이가 있다. 이에 대한 원인은 크리프 현상에 의해 재료간에 응력이 재분배(offloading)되어 응력 적합성조건에 의해 결정되는 응력에 영향을 미치기 때문이다.[19,20] 내압인 경우와 유사하게 열영향부 응력이 용접재 응력에 비해 일대일선에 가까운 결과를 나타낸다. 위의 결과들이 공통적으로 의미하는 것은 열영향부를 고려한 경우의 응력도 용접재 응력과 마찬가지로 크리프 불균일 지수로 정량화할 수 있다는 점이다.

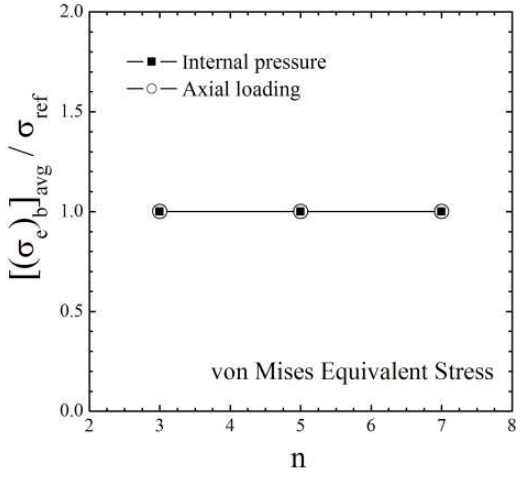
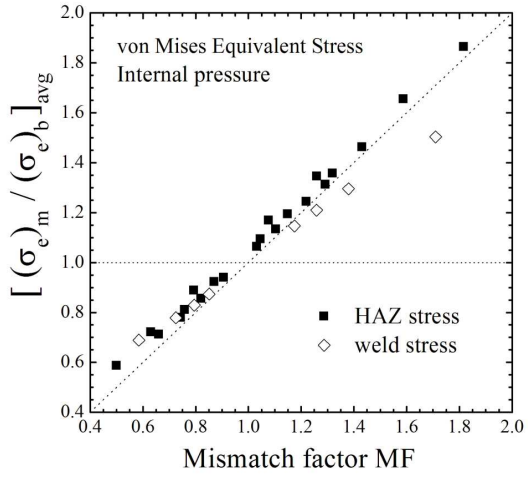
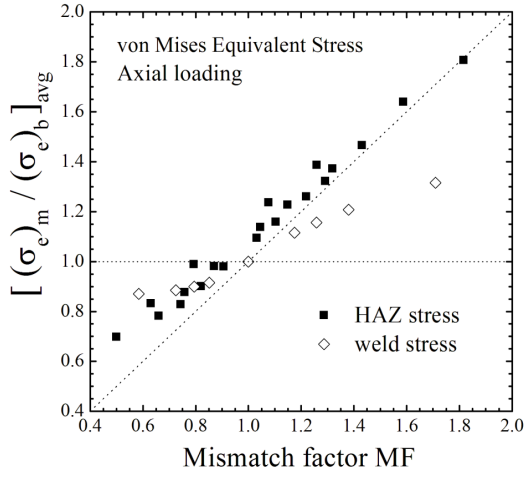


Fig. 9 Variation of section-averaged stresses for homogeneous straight pipes with creep exponent



(a)

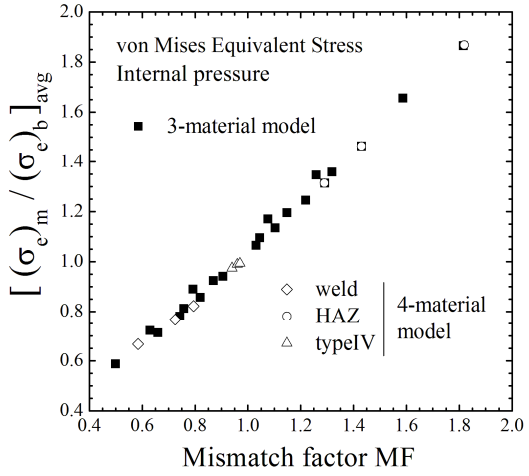


(b)

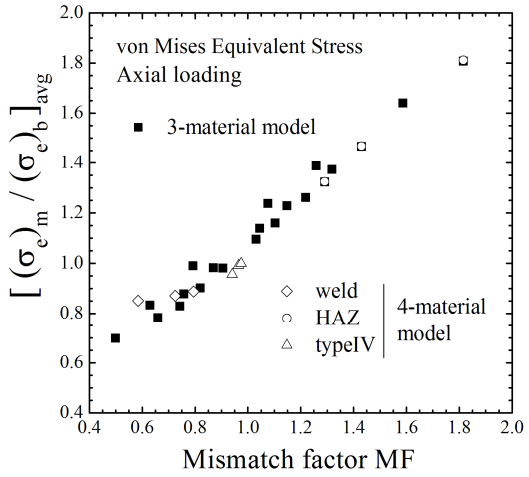
Fig. 10 Comparison of section-averaged stresses within weld metal and HAZ for three-material model; (a)internal pressure and (b)axial loading

Table 4 Comparison of weld redistribution factor in R5 and prediction using mismatch factor with n=4

	k	k^{pred}	k^{pred}/k
weld	0.7	0.73	1.04
HAZ	1.4	1.61	1.15
Type IV	1	1.01	1.01



(a)



(b)

Fig. 11 Comparison of three-material model with four-material model; (a)internal pressure and (b)axial loading

Fig. 10 에서 제시한 열영향부의 응력 정량화 결과와 Type IV 영역을 추가로 모사한 결과를 Fig. 11 에 비교하였다. Type IV 영역을 추가로 모사한 경우에 응력은 Fig. 6 의 A-B 선, C-D 선 그리고 E-F 선에서 각각 추출하였다. 내압과 배관 길이방향 인장하중의 두 경우 모두 열영향부 응력 정량화 결과에 부합하는 것을 확인할 수 있다.

연구 결과의 검증을 위해 실험과 해석적 연구를 기반으로 R5 코드에서 제시하는 CrMoV 용접배관의 용접부 재분배 계수와 비교하였다. 용접재 2.25Cr1Mo 와 모재 0.5CrMoV 로 이루어진 배관에 내압이 작용하는 경우의 용접부 재분배 계수(k)와 크리프 불균일 지수로 산정한 용접부 재분배 계수(k^{pred})를 비교하여 Table 4 에 제시하였다. 열영향부 응력 정량화 결과를 선형근사(linear approxi-ation fitting)하여 용접부 재분배 계수(k^{pred})를 산정하였다. 열영향부의 응력은 R5 코드에 비해 15%높게 예측하며 용접재는 4% 그리고 Type IV 영역은 1% 의 이내에서 보수적인 예측결과를 나타낸다.

4. 결 론

열영향부를 고려한 유한요소 탄성 크리프 해석을 수행하였으며 크리프 불균일 지수(*MF*)를 도입하여 직관 용접부의 응력을 정량화하였다. 내압의 경우 단면평균 응력의 비가 크리프 불균일 지수(*MF*)에 대해 일대일선에 놓이는 결과를 나타낸다. 배관의 길이방향 인장하중이 작용하는 경우에는 응력 재분배 현상에 의해 응력 적합성조건에 따라 결정되는 용접부 재분배 계수(k)에 영향을 미친다. 열영향부를 고려한 응력 정량화 결과와 Type IV 영역을 추가적으로 모사한 결과를 비교하여 적용가능성을 확인하였다. 영국전력의 사용적합성 평가코드 R5 에서 제시하는 용접부 재분배 계수와 연구 결과를 이용하여 산정한 용접부 재분배 계수(k^{pred})를 비교하여 연구결과의 유효성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 2012 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2011T100200202)

참고문헌

(1) Webster, G. A. and Ainsworth, R. A., 1994, *High Temperature Component Life Assessment*, Chapman & Hall, London, pp. 10~49.

(2) Parker, J. D., 1995, “Creep Behaviour of Low Alloy Steel Weldments,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 63, No.1, pp. 55~62.

(3) Roberts, B. W., Ellis, F. V. and Viswanathan, R., 1985, “Utility Survey and Inspection for Life Assessment of Elevated Temperature Headers,” *Proc. of the American Power Conference*, Chicago, IL, pp. 289~301.

(4) Viswanathan, R. and Dooley, R. B., 1986, “Creep

Life Assessment Techniques for Fossil Power Plant Boiler Pressure Parts," *Proc. of International Conference on Creep*, Tokyo, pp. 349~359.

(5) Hyde, T. H., Sun, W. and Williams, J. A., 2003, "Creep Analysis of Pressurized Circumferential Pipe Weldments - A Review," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 38, No. 1, pp. 1~30.

(6) R5, 2003, *Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures*, Issue 3, British Energy Generation Ltd, UK.

(7) Goldthorpe, M. R., 2008, "Effect of Weld Mismatch on Uncracked Stresses, Reference Stresses and C* Estimates for Cracks in CMV HAZ Materials," *British Energy Generation report*, E/REP/BDBB/0046/GEN/04, British Energy Generation Limited, UK.

(8) Law, M. and Payten, W., 1997, "Weld Performance under Creep Using Finite Element Modelling," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 72, No. 1, pp. 45~49.

(9) Lee, K.-H., Kim, Y.-J., Yoon, K.-B., Nikbin, K. and Dean D., 2010, "Quantification of Stress Redistribution due to Mismatch in Creep Properties in Welded Branch Pipes," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 33, No. 4, pp. 238~251.

(10) Han, J.-J., Lee, K.-H., Kim, Y.-J., Nikbin, K. and Dean D., 2011, "Effects of Geometry and Combined Loading on Steady-State Creep Stresses in Welded Branches," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 88, No. 10, pp. 395~402.

(11) R6, 2010, *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects*, Revision 4, British Energy Generation Ltd, UK.

(12) Oh, C.-K., Kim, Y.-J., Park, J.-M., Kim, J.-S. and Jin T.-E., 2007, "Effect of Structural Geometry and Crack Location on Crack Driving Forces for Cracks in Welds," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, No. 6, pp. 912~931.

(13) Abaqus 6.11, *Analysis User's Manual*, 2011, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI.

(14) Laham, S. A., 1999, "Large Bore Branch Test Creep Analysis," *British Energy Generation report*, EPD/GEN/REP/0371/98, British Energy Generation Limited, UK.

(15) Baker, A. J., 2000, "Stress Redistribution Factors for 21/4Cr1Mo Weld Metal in 1/2Cr1/2Mo1/4V Weldments," *British Energy Generation report*, EPD/GEN/REP/0514/99, British Energy Generation Limited, UK.

(16) Dean, D. and Kiff, S. J., 2000, "Creep Deformation Data and Weld Redistribution Factors for 1/2Cr1/2Mo1/4V Type IV Zones," *British Energy Generation report*, EPD/GEN/REP/0443/99, British Energy Generation Limited, UK.

(17) Easterling, K., 1992, *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworth-Heinemann, London.

(18) Antaki, G., 2005, *Fitness-for-Service and Integrity of Piping, Vessels and Tanks*, McGraw-Hill, New York.

(19) Walters, D. J. and Cockcroft, R. D. M., 1972, "A Stress Analysis and Failure Criteria for High Temperature Butt Welds," *Proc. of International Institute of Welding Colloquium on Creep Behaviour of Welds in Boilers*, Pressure Vessels and Piping, Toronto.

(20) Walters, D. J., 1976, "The Stress Analysis of Cylindrical Butt Welds Under Creep Conditions," *CEGB Note*, RD/B/N3716,Central Electricity Generating Board, UK.