

분기관 용접부의 크리프 특성 불균일이 응력 재분배에 미치는 영향

이국희* · 김윤재[†] · 윤기봉** · Kamran Nikbin*** · Dave Dean****

Effect of Creep Mismatch Factor on Stress Redistribution in Welded Branch

Kuk-Hee Lee · Yun-Jae Kim · Kee-Bong Yoo · Kamran Nikbin · Dave Dean

Key Words : Creep(크리프), Mismatch(불균일), Stress Redistribution(응력 재분배), Weld(용접), Branch Pipe(분기관)

Abstract

This paper attempts to quantify the effect of mismatch in creep properties on steady-state stress distributions for a welded branch vessel. A particular geometry for the branch vessel is chosen. The vessel is modeled by only two materials, the base and weld metal. Idealized power law creep laws with the same creep exponents are assumed for base and weld metals. A mismatch factor is introduced, as a function of the creep constant and exponent. Steady-state stress distributions within the weld metal, resulting from three-dimensional, elastic-creep finite element (FE) analyses, are then characterized by the mismatch factor. We can find that average stresses in the weld can be characterized by the mis-match factor. And there is an analogy between elastic-creep and elastic-perfectly plastic.

1. 서론

고온, 고압에서 작동되는 원자력 발전소의 분기관 용접부에 대한 크리프 수명 평가는 구조 건전성 평가를 위해서 매우 중요하다. 정확한 수명 평가를 위해서는 크리프 해석을 통해서 분기관 용접부의 응력 분포를 정확히 알아야 한다. 이에 대한 연구는 세계적으로 소수만 수행되었다⁽¹⁻⁴⁾. 영국의 R5 에서 고온에서 작동되는 배관 용접부의 응력 평가를 위해서 재분배 계수(redistribution factor)를 제시하고 있으나, 대략적인 값만을 제시하고 있을 뿐이다⁽⁵⁾.

본 논문에서 분기관 용접부의 크리프 특성 불균일(mismatch) 지수가 정상 상태(steady-state)의 응

력 재분배에 미치는 영향을 정량화하겠다.

본 연구를 위해서 유한요소법을 사용하였고, 사용 유한요소 프로그램인 ABAQUS v6.7 을 사용하였다.

2. 형상 및 유한요소 해석

2.1 분기관과 용접부 형상, 재료, 하중

본 연구에서 크리프 해석에서 불균일 지수가 용접부의 응력 분포에 미치는 영향을 조사하기 위해서, 가스 냉각 원자로의 배관 시스템에서 사용되는 분기관을 선택하였다⁽¹⁾. Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 분기관과 용접부의 형상을 보여준다. 분기관(branch pipe)과 주관(main pipe)의 교차부분은 용접되어 있다. 분기관과 주관의 재료는 1/2CrMoV 이고, 용접부의 재료는 2.25Cr1Mo 이다. 본 연구에서 고려한 하중은 다음과 같다

- 내압
- 분기관에 가해지는 면내 굽힘하중(M_y)
- 분기관에 가해지는 면외 굽힘하중(M_x)
- 주관에 가해지는 면내 굽힘하중(M_y)

[†] 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-4793 FAX : (02)929-1718

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 중앙대학교 기계공학과

*** 영국, Imperial College

**** 영국, British Energy

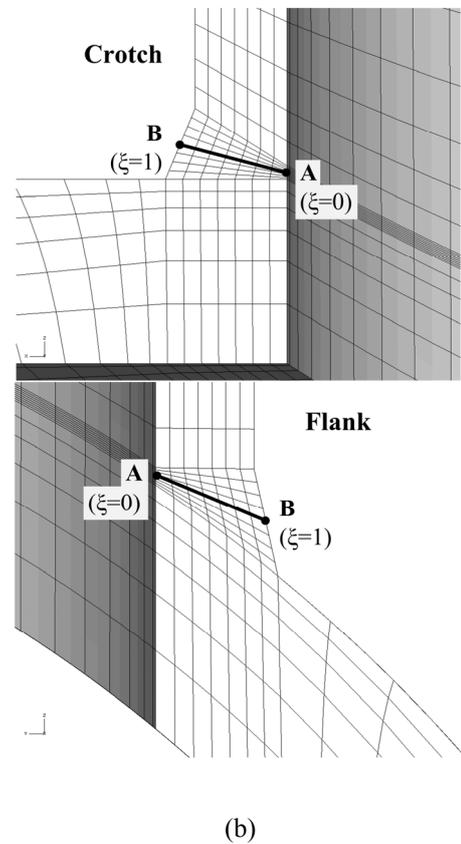
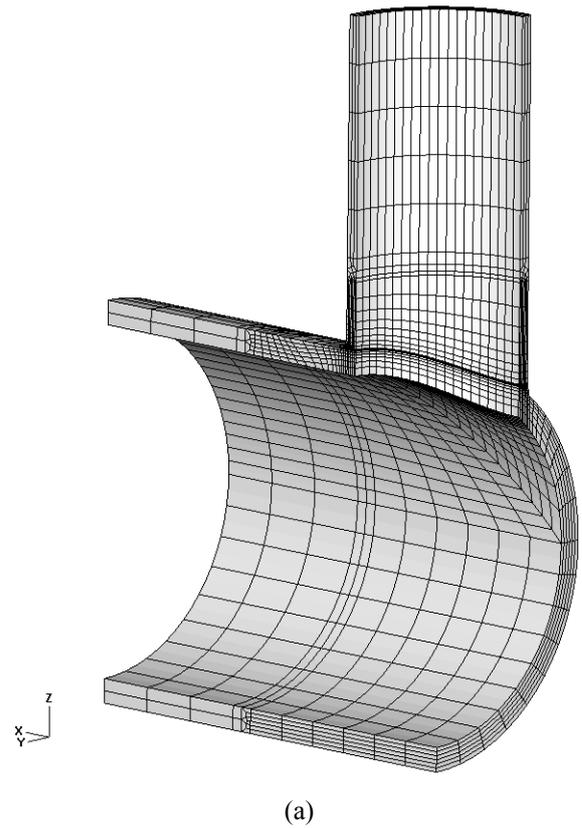
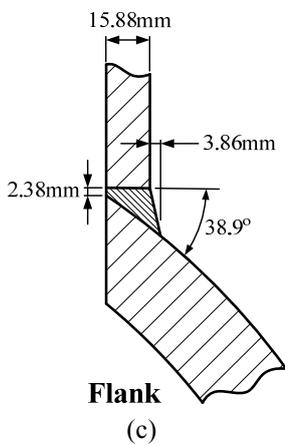
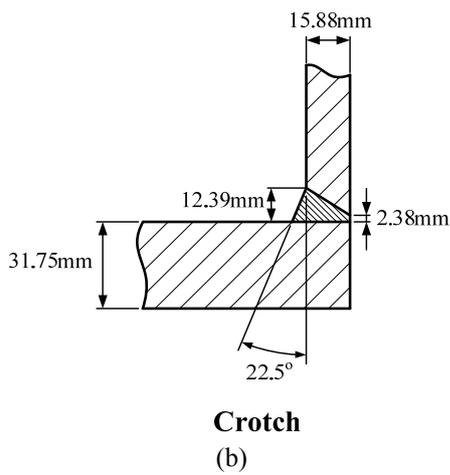
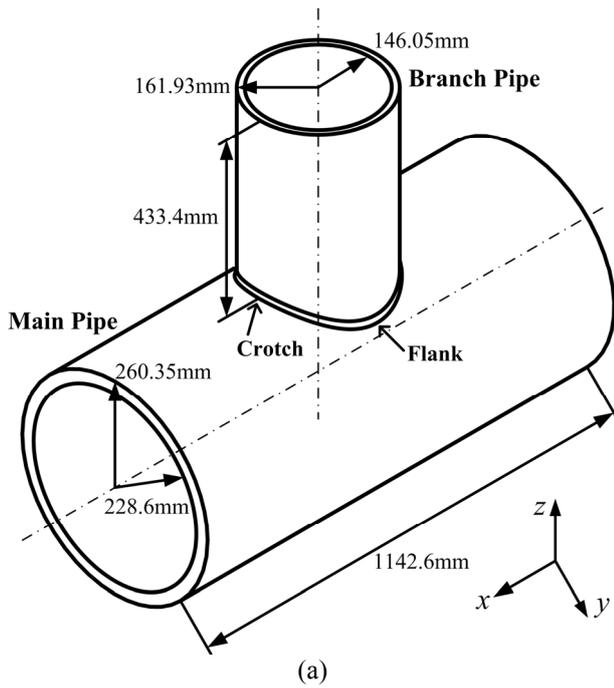


Fig. 1. (a) Schematic of the branch vessel showing the relevant geometric variables and dimensions, and (b), (c) detailed views of welded branch intersection.

Fig. 2. A typical FE mesh for (a) a branch vessel and (b) welded intersection region .

Table 1. Creep properties for reference cases

n	A_w/A_b	A_b	A_w	MF
3	5	3.20E-11	1.60E-10	0.59
5	5	3.20E-15	1.60E-14	0.73
7	5	3.20E-19	1.60E-18	0.80
10	5	3.20E-25	1.60E-24	0.85
3	0.2	3.20E-11	6.40E-12	1.71
5	0.2	3.20E-15	6.40E-16	1.38
7	0.2	3.20E-19	6.40E-20	1.26

Table 2. Creep properties for test cases

n	A_w/A_b	A_b	A_w	MF
3	2.5	3.200E-11	8.000E-11	0.74
3	6	3.200E-11	1.920E-10	0.55
5	2.5	3.200E-15	8.000E-15	0.83
5	7	3.200E-15	2.240E-14	0.68

Table 3. FE limit loads for a homogeneous branch vessel.

Internal pressure	16.16 MPa
In-plane bending to the branch pipe	265.2 kN·m
Out-of-plane bending to the branch pipe	244.9 kN·m
In-plane bending to the main pipe	1021.3 kN·m

2.2 유한요소 해석

Fig. 2 는 한계 해석 및 탄성-크리프 해석에 사용된 유한요소망이다. 사용된 요소는 twenty-node iso-parametric quadratic brick hybrid element(ABAQUS 에서 C3D20H) 이다.

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

$$MF \equiv \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{yb}} \quad (1)$$

σ_{yw} 과 σ_{yb} 는 각각 용접부와 모재의 항복응력이다. 불균일 지수가 1 보다 작으면 하불균일(under-matching), 불균일 지수가 1 이면 균일(homogeneous), 불균일 지수가 1 보다 크면 상불균일(over-matching)이라고 지칭하겠다. 본 연구에서는 0.5 에서 2 의 불균일 지수 범위에서 연구를 수행하였다. 탄성 완성 소성 재료를 이용하여, 위의 불균일 지수가 한계 하중에 미치는 영향을 Fig. 3 에 나타내었다. Table 3 은 용접부와 모재의 물성치

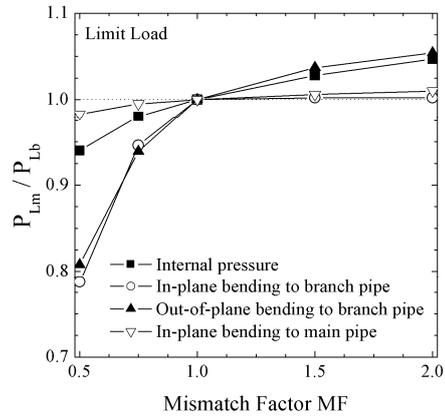


Fig. 3. The effect of the loading mode on FE mis-match limit loads for the welded branch vessel.

가 동일한 경우($MF=1$)의 한계 하중이다. 모재의 항복응력은 175.7 MPa 이다.

이상화된 크리프 법칙으로 탄성-력 크리프 법칙(elastic-power creep laws)을 사용하였다. 모재와 용접부의 지수(n)은 동일하다고 가정하였다.

$$\epsilon_b = A_b \sigma^n t \quad (2)$$

$$\epsilon_w = A_w \sigma^n t \quad (3)$$

여기서 A_b 과 A_w 은 각각 모재와 분기관의 재료 계수이다. A_b , A_w , n 을 체계적으로 변화시켜 다양한 불균일 지수(MF)에 대해서 연구를 수행하였다. 주된 연구를 위해서 사용된 크리프 특성을 Table 1 에 기입하였다. 하불균일인 경우에는 용접부의 크리프 응력 완화 완료 시간이 모재보다 5 배 빠르고, 상불균일인 경우에는 용접부의 크리프 응력 완화 완료 시간이 모재보다 5 배 느리다. 일반적인 재료 물성을 고려하기 위해서, Table 2 의 크리프 특성을 가지는 재료에 대해서도 연구하였다.

소성학의 소성 물성과 크리프 특성의 관계를 이용하여 크리프 물성에 대한 불균일 지수를 유도할 수 있다⁽⁶⁾. 식 (2)와 (3)을 식(1)에 대입하고, ϵ_b 와 ϵ_w 가 동일하면, 다음과 같은 불균일 지수가 유도된다.

$$MF = \left(\frac{A_b}{A_w} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

불균일 지수(MF)은 A_b , A_w , n 의 함수이고, 이 변수들이 변화함에 따라서 불균일 지수가 정해진다. Table 1,과 2 의 불균일 지수는 식 (4)를 통해서 계산된 값이다.

크리프 해석의 완화된 응력은 탄성-크리프 해

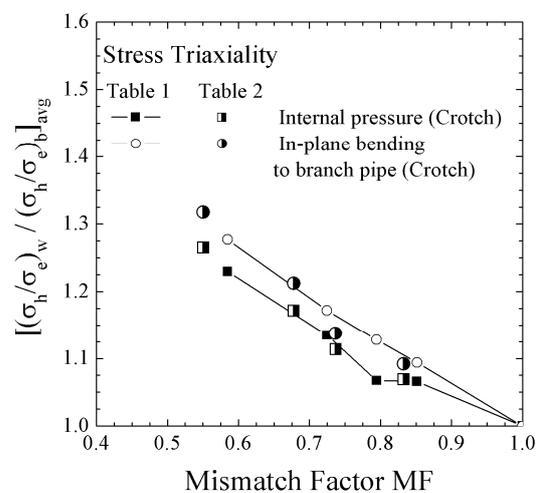
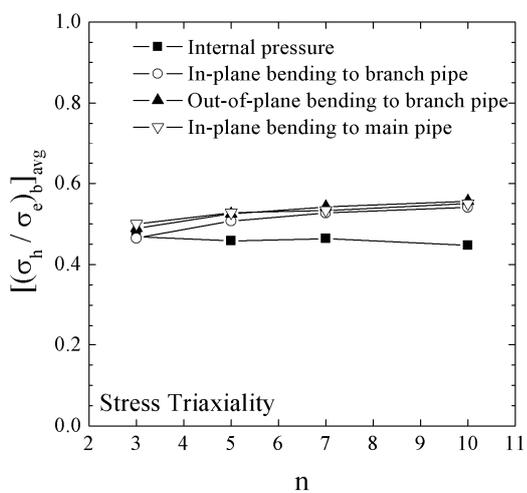
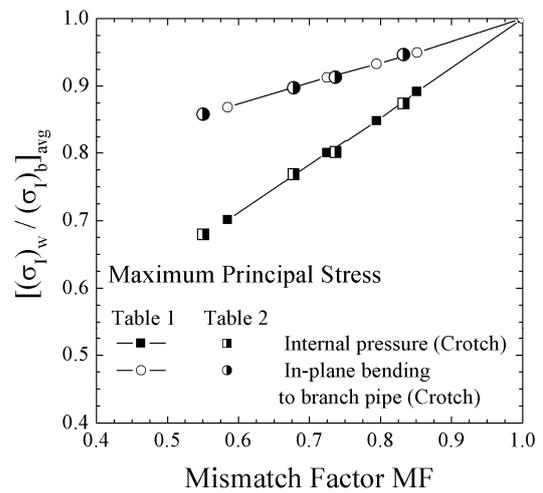
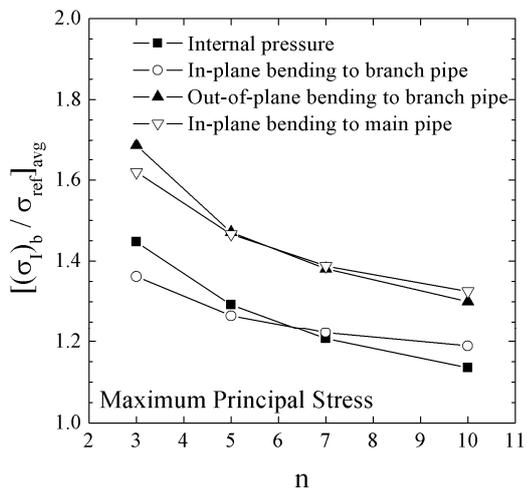
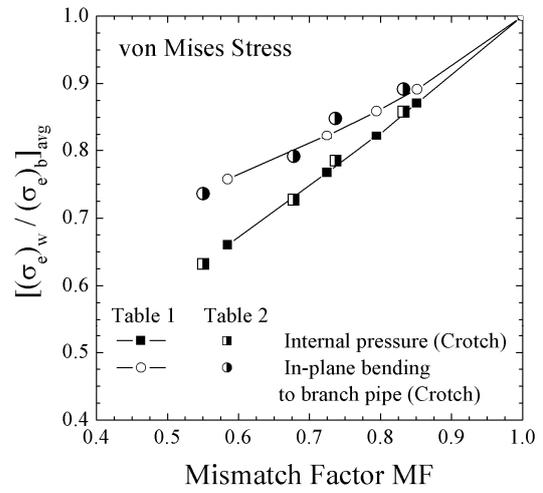
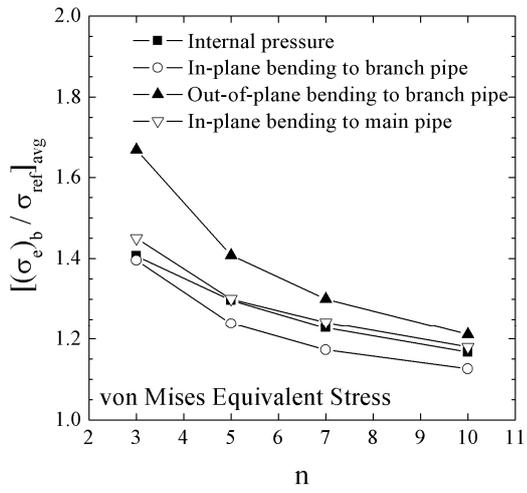


Fig. 4. Summary of average stresses for homogeneous branch component. equivalent and maximum principal stress, and stress triaxiality.

Fig. 5. Effect of different creeping rates and exponents on average stresses in weld metal.

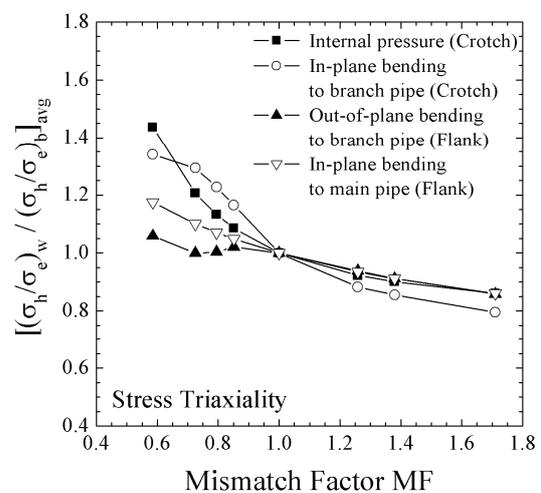
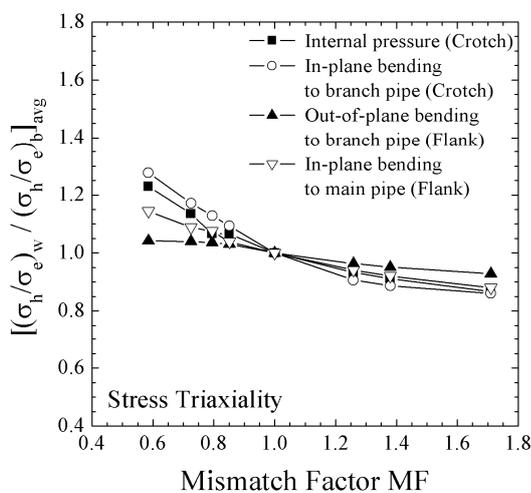
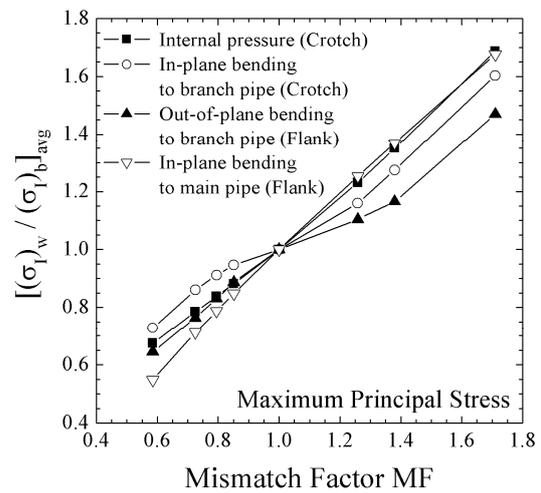
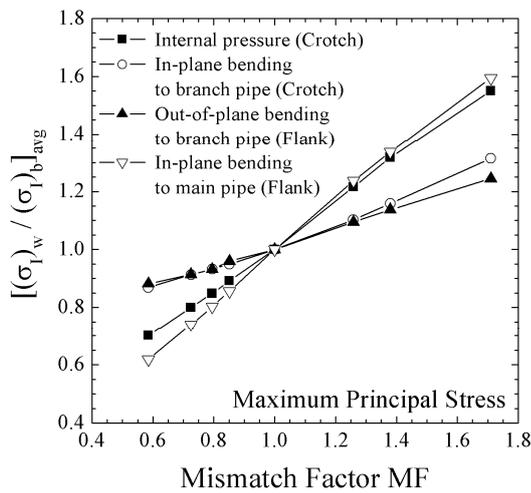
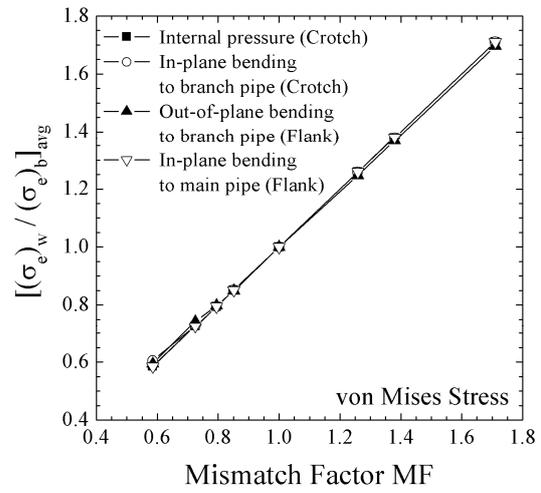
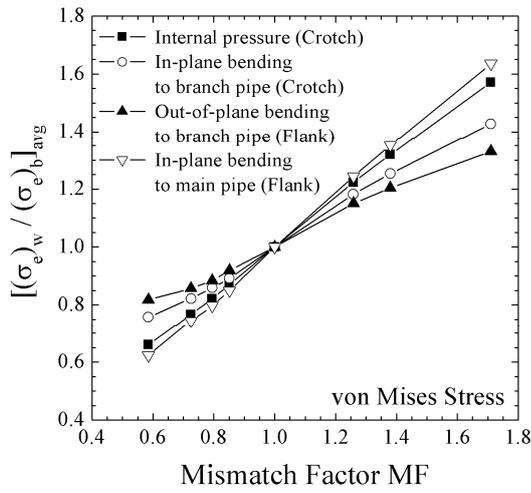


Fig. 6. Variations of average stresses for the mis-matched branch component with the mis-match factor.

Fig. 7. Plastic analysis results using ecstatic perfectly-plastic material.

석 결과와 탄소성-크리프 해석의 결과는 동일하다. 따라서, 크리프 해석을 위해서 탄성 재료를 사용하였다. 크리프 현상에서 충분히 재분배된 응력을 추출하기 위해서 충분히 긴 크리프 시간을 주었다.

3. 유한요소 해석 결과

3.1 유한요소 모델에서 응력 추출

크리프 파단(creep rupture) 수명을 예측하기 위해서, 용접부의 응력을 정확히 평가해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이, Croth 와 Flank 의 용접부 중간 선(A-B)에서 응력을 추출하고, 이를 평균하였다. von Mises 등가 응력(σ_e), 최대 주축 응력(σ_1), 삼축 응력(triaxial stress σ_h/σ_e)을 추출하였다. σ_h 은 정수압 응력(hydrostatic stress)이다.

내압과 면내 굽힘하중이 분기관에 가해지면, Crotch 에서 최대 응력이 발생한다. 면외 굽힘하중이 분기관에 가해지거나 면내 굽힘하중이 주관에 가해지면, Flank 에서 최대 응력이 발생한다. 최대 응력이 발생하는 지점에서 크리프 파단이 일어나므로, 본 연구에는 이 지점에서 응력을 추출하였다.

3.2 탄소성 크리프 해석 결과

Fig. 4 는 분기관과 용접부가 균일한 재료로 이루어져 있는 경우의 크리프 해석 결과이다. 응력은 참조 응력(σ_{ref} , reference stress)로 무차원화하였다. 참조 응력은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{ref} = \frac{P}{P_L} \sigma_o \quad (5)$$

여기서, P 는 가해지는 하중이고, P_L 은 한계 하중이다. σ_o 은 재료의 항복 응력이다. von Mises 등가 응력(σ_e), 최대 주축 응력(σ_1)은 n 이 증가하면서 감소하고, 삼축 응력(σ_h/σ_e)은 n 에 따른 증가량의 차이는 크지 않다.

Fig. 5 는 Table 1 과 2 의 크리프 물성을 재료에 적용하여 얻는 결과이다. 임의의 A_b, A_w, n 를 가지는 재료의 특성을 식(4)의 불균일 지수로 정의할 수 있고, 이 불균일 지수는 용접부의 응력을 정량화할 수 있는 기법을 제시한다. 즉, 어떠한 하중에서 불균일 지수에 따른 평균 응력이 정의되면, 임의의 A_b, A_w, n 를 가지는 재료의 평균 응력을 예측할 수 있다.

Fig. 6 은 크리프 해석을 통해서 구해진 용접부의 평균 응력을 불균일 지수에 따라서 나타낸 그래프이다. Fig. 7 은 소성 해석을 통해서 구해진 용접부의 평균 응력을 불균일 지수에 따라서 나타낸

그래프이다. 소성 해석을 위해서 탄성-완전 소성 재료를 이용하여 한계 하중 해석을 수행하였다. Fig. 7 에서 불균일 지수는 식(1)을 통해서 구해진다. 크리프 해석에서 얻어진 응력과 소성 해석에서 얻어진 응력의 결과가 유사함을 볼 수 있다. 불균일 지수(식(1), (4))을 이용하면, 소성 해석을 통하여 얻어진 평균 응력으로 크리프 응력 해석을 대체할 수 있다. 이를 간략한 해석 기법으로 생각할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 크리프 물성치의 불균일 지수가 용접부의 응력 분포에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서 발견한 2 가지 사실을 다음과 같다.

(1) 크리프 응력 해석에서 식 (4)로 정의되는 불균일 지수에 따른 평균 응력이 정의되면, 임의의 A_b, A_w, n 를 가지는 재료의 평균 응력을 예측할 수 있다.

(2) 간략한 해석 기법을 위해서 다음을 사용할 수 있다. 불균일 지수(식(1), (4))을 이용하면, 소성 해석을 통하여 얻어진 평균 응력으로 크리프 응력 해석을 대체할 수 있다.

후기

본 연구는 교육과학기술부 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업(원자력기초공동연구소)과 BK21 2008 년도 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) S. Al. Laham, 1999, "Large Bore Branch Test Creep Analysis", EPD/GEN/REP/0371/98, British Energy Report, UK.
- (2) P. J. Budden and P. Booth, 1998, "Redistribution Factor for R5 Volume 7 Assessment of 0.5CrMoV Weldments", EPD/GEN/REP/0289/98, British Energy Report, UK.
- (3) R. D. Patel, 2002, "R5 Medium Bore Branch Life Assessment", E/REP/ATEC/0005/GEN/01, British Energy Report, UK.
- (4) R. D. Patel, 2003, "Creep life assessment of welded trunnion and branch components using the R5 procedure", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 80, pp. 695-704.
- (5) R5: an assessment procedure for the high temperature response of structures. Issue 3, British Energy, 2003
- (6) Chang-Kyun Oh, Y.-J. Kim, J.-M. Park, J.-S. Kim and T.-E. Jin, 2007, "Effect of structural geometry and crack location on crack driving forces for cracks in welds", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 912-931.