

증기발생기카세트 이종금속결합부의 응력 평가방법

A Method of Stress Evaluation on the Dissimilar Material Joint of Steam Generator Cassette

김용완, 김동욱, 이재선, 김궁구, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

일체형원자로에 내장되는 증기발생기카세트는 티타늄합금으로 설계된다. 티타늄과 스테인레스강의 이종금속결합부는 나사로 체결되어 여러가지 하중을 지탱한다. 스크류부분의 나사산과 너트부분의 나사산 사이는 브레이징을 하여 밀봉이 유지되도록 하였다. 브레이징부위에 횡방향 균열이 발생했을 때 응력상태를 이론적으로 계산하는 방법을 제시하였다. 결함이 생성되었을 때 결함의 존재로 인한 변형율과 응력교란성분을 전단지연방법을 이용하여 구하였다. 균열이 없는 모재와 횡방향균열이 생긴 모재에 대해 변위장을 가정하여 평형방정식에 대입하여 미분방정식을 구한다음 경계조건을 대입하여 실제 교란된 변위성분을 구하는 모델을 제시했다. 이 방법을 이용하여 브레이징 부위에 파손이 발생했을 때 지속적인 파손의 발생 가능성을 용이하게 평가할 수 있다. 이 방법을 이용하여 용가재와 모재의 탄성계수 비, 모재층과 용가재층의 두께가 응력분포에 미치는 영향 등을 고찰하였다.

Abstract

The steam generator cassette installed in the integral reactor is designed of titanium alloy. Screw-nut type dissimilar material joint is used to connect titanium alloy to stainless steel in the steam generator cassette. It has been brazed in the gap between the screwed part and the nut part for sealing. An analytical method has been presented to predict stress state after a transverse cracking in the brazed region. Displacement fields considering the perturbation by the transverse crack were assumed. Differential equations were obtained by substituting the displacement field into the equilibrium equations. Stress field and strain field for the base metal and brazing filler material have been obtained from the solution of the differential equations. Based on this stress fields, crack multiplications can be predicted. A parametric study has been performed for various ratios of modulus of elasticity between base metal and brazed metal. Also, the effect of the brazed metal thickness on the stress field has been investigated.

1. 서론

일체형원자로에 내장될 관류식 나선형 증기발생기가 한국원자력연구소에서 개발되고 있다[1,2]. 원자로에 내장되므로 증기발생기에 대한 유지보수가 상용발전로의 증기발생기에 비해 상대적으로 어렵다. 증기발생기의 전열관 소재로 내식성이 매우 우수한 티타늄합금을 사용한다. 티타늄합금은 일반 스테인레스강과 용접이 되지 않으므로 티타늄과 스테인레스강을 연결하는 이종금속결합부가 필요하다. 그림 1에서는 증기발생기의 카세트에서 티타늄과 스테인레스강을 결합하는 이종금속결합부의 위치를 보여준다. 티타늄과 스테인레스강을 결합하는 이종금속결합부는 단위카세트 당 모듈급 수관에 6개, 모듈증기관에 6개가 각각 사용된다. 이종금속결합부의 형상은 그림 2에서 보는 것과 같다. 스테인레스강과 티타늄합금은 나사로 체결되며 나사와 나사사이에는 브레이징을 하여 밀봉이 되도록 하였다. 브레이징 기법은 이미 발표된 바 있다[3,4]. 열팽창계수가 큰 스테인레스강은 암나사로 설계하고 열팽창계수가 작은 티타늄은 수나사로 설계한다. 브레이징을 할 때 온도가 올라가는 동안은 스테인레스강과 티타늄사이의 간격이 점점 커지게 되어 용가재가 틈새로 채워질수 있도록 한다. 반면에 냉각하는 동안은 틈새가 좁아지므로 틈새의 용가재를 밖으로 밀어내면서 완전한 결합이 이루어 질 수 있도록 설계되었다.

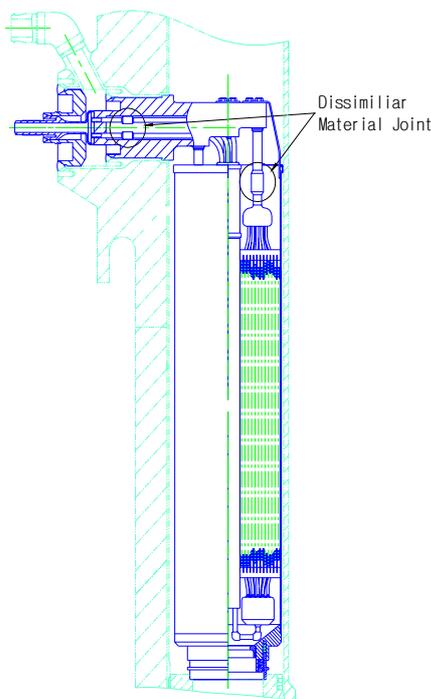


그림 1 이종금속결합부 위치

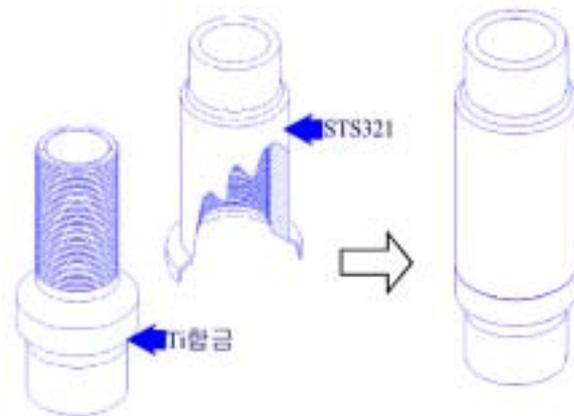


그림 2 모듈증기관 이종금속결합부 설명도

모듈급수관과 모듈증기관에 작용하는 하중은 이종금속결합부의 나사에 의해 지지되며 브레이징은 밀봉역할을 한다. 전열관에 누설이 발생하려면 나사부위의 전체 나선을 따라서 균열이 되어야 한다. 나사산과 나사산 사이의 브레이징부위가 완전히 파손되어도 누설은 발생하지만 이종금속결합부는 여전히 하중을 지지할 수 있도록 설계되었다. 일반적인 브레이징 결합부는 용가재가 전체 하중을 전단으로 지지하도록 설계된다. 이 경우는 용가재의 파손은 하중지지능력의 상실을 가져온다. 브레이징부위에서의 예상 가능한 균열의 형상은 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 첫째 강도가 모재보다 탄성계수와 열팽창계수의 차이 등으로 인해 상대적으로 모재에 비해 강도가 약한 브레이징부위의 횡방향 균열이 발생할 수 있다. 둘째로는 모재와 브레이징 부위사이의 계면균열이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 전자에서 언급한 횡방향 균열이 발생했을 때 응력분포를 구할 수 있는 모델을 제시하였으며, 이 모델을 이용하여 여러 가지 설계변수에 대한 경향을 조사하기 위한 해석을 수행하였다.

2. 이중금속결합부 형상과 하중상태

일반적인 브레이징 조인트는 그림 3의 위에서 보는 것과 같이 단순히 전단에 의해 하중이 전달된다. 이 경우 취약한 브레이징 부위가 파손되면 이 조인트는 더 이상 하중을 지탱할 수 없고 두 부분은 분리가 된다. 그러나 그림 3의 아래쪽과 같이 나사산을 이용하여 하중을 전달하면 브레이징부위가 파손되어도 하중은 그대로 지지 될 수 있다. 다만 파손의 양상과 크기에 따라서 밀봉상태가 더 이상 유지되지 않고 누설이 발생할 수 있다. 이 경우에 발생할 수 있는 최대의 누설양은 브레이징을 하지 않은 채 나사만으로 체결한 경우와 같으나 실제로 이렇게 누설이 발생할 가능성은 거의 희박하다.

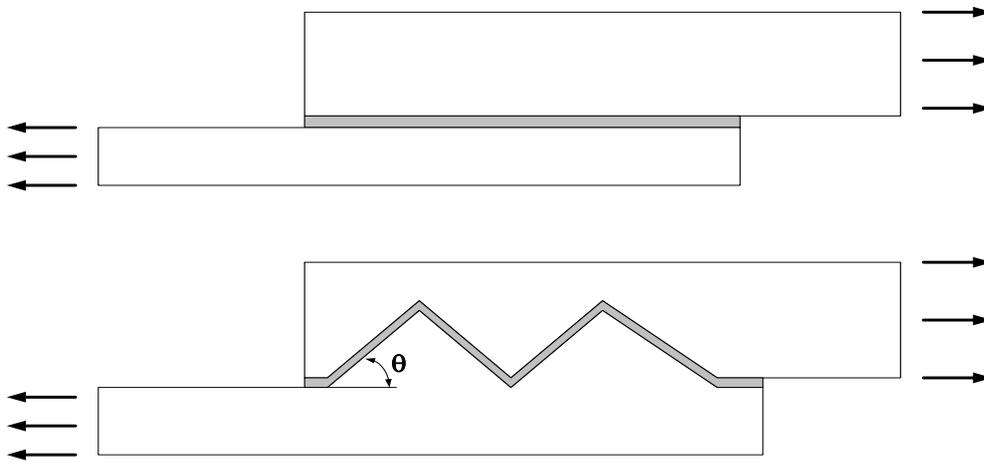


그림 3 일반적인 브레이징 결합부와 나사체결된 브레이징 비교

나사산은 하중방향과 θ 의 각도를 이루고 있으므로 축방향 하중성분은 나사산에 수직인 성분과 나사산에 평행한 성분으로 분리된다. 나사산에 평행한 성분은 횡방향 균열을 야기 하는 성분이 되며 나사산에 수직인 성분에 의해 박리(delamination)현상이 생긴다. 축방향으로 일정한 변위가 가해졌을 때 나사부위에서 나사산과 평행한 부분의 변형율 성분을 분리하여 모델링 한다. 나사산으로 된 경우는 완전한 축대칭이 아니지만 나선각이 매우 작으므로 간단히 축대칭으로 가정하였다.

3. 이중금속결합부의 응력상태

3.1 파손이 없는 경우

모재와 용가재 사이에는 거의 축대칭에 가까운 응력상태를 보인다. 다른 변위 성분은 고려하지 않고 용가재에 영향을 주는 축방향 변형율에 대해 응력을 계산하면 다음과 같다. 용가재와 평행하게 일정한 변형율이 작용한다고 가정했을 때 응력상태는 다음과 같다.

$$\sigma_{x_0}^{(1)} = \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \varepsilon_0 \quad (1-a)$$

$$\sigma_{x_0}^{(2)} = \frac{E_2}{1-\nu_2^2} \varepsilon_0 \quad (1-b)$$

동일한 변형율이 가해졌을 때 용가재와 모재사이에는 탄성계수와 포와송비의 차이로 인한 응력의 차이가 발생한다.

3.2 횡방향 균열이 존재하는 경우

이종금속결합부에서 가장 취약한 부위는 용가재가 채워지는 브레이징 부위이다. 브레이징 부위에 횡방향 균열이 발생하는 경우 실제로 누설이 발생하지 않지만 균열의 존재로 주변 응력장이 달라진다. 균열에 수직으로 작용하는 하중이 가장 중요하므로 균열의 존재로 인해 응력장을 평가하였다. 균열이 2l 마다 하나씩 존재한다고 가정하자. 또한 원주방향으로 축대칭이라고 가정하였다. 모재층의 두께는 h_1 이며 브레이징 층의 두께는 $2h_2$ 이다.

균열의 존재로 인해 균열에 수직인 방향의 변위장은 다음과 같이 가정할 수 있다.

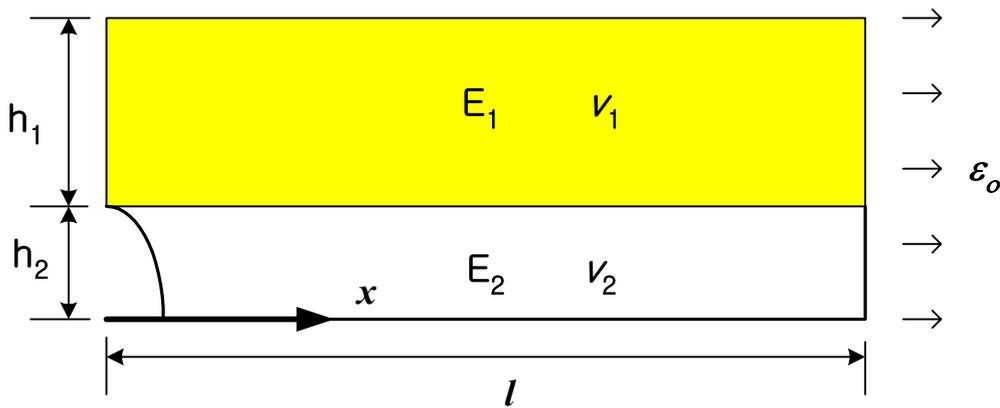


그림 4 균열이 존재하는 브레이징 부위의 기호 설명

$$u_1 = \varepsilon_0 x + U_1(x) \quad (2-a)$$

$$u_1 = \varepsilon_0 x + U_1(x) \quad (2-b)$$

z방향의 성분을 무시하면 응력과 변형율의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (3-a)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\nu \varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (3-b)$$

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy} \quad (3-c)$$

여기서 1로 표시되는 부분은 모재를 나타내며 2로 표시되는 지역은 용가재가 채워진 영역을 나타

낸다. 통상의 전단지연해석에서에서 가정하듯이 용가재 영역과 모재 사이에 변위차이를 전단하중으로 전달하는 가상의 층이 존재한다고 가정한다.

$$\tau_{xz} = \frac{G}{d_o}(u_2 - u_1) \quad (4)$$

수식(2)의 변위장과 응력-변형을 관계를 힘의 평형방정식에 대입하면 다음과 같은 미분 방정식을 얻게 된다.

$$Q_1 \frac{d^2 u_1}{dx^2} + \frac{G}{h_1 d_o}(u_2 - u_1) = 0 \quad (5-a)$$

$$Q_2 \frac{d^2 u_2}{dx^2} - \frac{G}{h_2 d_o}(u_2 - u_1) = 0 \quad (5-b)$$

여기서

$$Q_1 = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} \quad (6-a)$$

$$Q_2 = \frac{E_2}{1 - \nu_2^2} \quad (6-b)$$

균열 선단에서는 용가재 부위의 응력성분이 영이 되고 모재에 의해 전체 하중이 전달된다는 경계 조건을 사용한다.

$$\sigma_x^{(2)} = 0 \quad (7-a)$$

$$h_1 \sigma_x^{(1)} = (h_1 + h_2) \bar{\sigma}_x \quad (7-b)$$

미분방정식을 풀면 다음과 같이 변위장을 구할 수 있다.

$$u_1(x) = \varepsilon_o x - \frac{1}{\alpha_1} \frac{h_2 \sigma_{xo}^{(2)}}{h_1 Q_1} (-c_1 e^{\alpha_1 x} + c_2 e^{-\alpha_1 x}) \quad (8-a)$$

$$u_2(x) = \varepsilon_o x + \frac{1}{\alpha_1} \frac{\sigma_{xo}^{(2)}}{Q_2} (-c_1 e^{\alpha_1 x} + c_2 e^{-\alpha_1 x}) \quad (8-b)$$

여기서

$$\alpha_1^2 = \frac{G}{d_o} \left(\frac{1}{h_1 Q_1} + \frac{1}{h_2 Q_2} \right) \quad (9)$$

$$c_1 = \frac{1 - e^{-2\alpha_1 l}}{e^{2\alpha_1 l} - e^{-2\alpha_1 l}} \quad (10-a)$$

$$c_2 = \frac{e^{2\alpha_1 l} - 1}{e^{2\alpha_1 l} - e^{-2\alpha_1 l}} \quad (10-b)$$

변위장을 미분하여 변형율을 구하고 변형율에 응력-변형율 관계를 대입하면 아래와 같다.

$$\varepsilon_x^{(1)} = \varepsilon_o + \frac{h_2 \sigma_{xo}^{(2)}}{h_1 Q_1} (c_1 e^{\alpha_1 x} + c_2 e^{-\alpha_1 x}) \quad (11-a)$$

$$\varepsilon_x^{(2)} = \varepsilon_o - \frac{\sigma_{xo}^{(2)}}{Q_1} (c_1 e^{\alpha_1 x} + c_2 e^{-\alpha_1 x}) \quad (11-b)$$

$$\sigma_x^{(1)} = \sigma_{xo}^{(1)} + \frac{h_1}{h_2} \sigma_{xo}^{(2)} (c_1 e^{\alpha_1 x} + c_2 e^{-\alpha_1 x}) \quad (12-a)$$

$$\sigma_x^{(2)} = \sigma_{xo}^{(2)} \{1 - (c_1 e^{\alpha_1 x} + c_2 e^{-\alpha_1 x})\} \quad (12-b)$$

수식 (11)과 수식 (12)에서 첫째 항은 균열이 없을 때의 변형율과 응력상태를 나타내며 나머지 항은 횡방향 균열의 존재로 인해 교란된 응력성분이다.

모재와 브레이징 부위의 응력 그리고 계면에서의 전단응력성분은 그림 5와 같다. 브레이징 부위는 균열선단에서 영이었다가 점차 증가한다. 반면에 전단응력은 균열선단에서 최대 값을 갖고 점차 0으로 접근하게 된다. 균열선단에서 일정한 거리가 되면 모재와 브레이징부위의 응력성분은 일정한 값을 갖게 된다. 그림 6에서는 균열과 균열사이의 거리에 따른 응력분포를 나타내는데 길이 l 이 무한대가 되면 균열이 하나만 존재하는 경우가 된다. 균열간의 간격이 일정한 값 이내가 되면 응력은 균열이 없을 때의 응력 값에 도달하지 못한다. 모재와 브레이징 소재의 두께 비에 따른 응력의 분포는 그림 7과 같으며 그다지 큰 영향을 미치지 않는다.

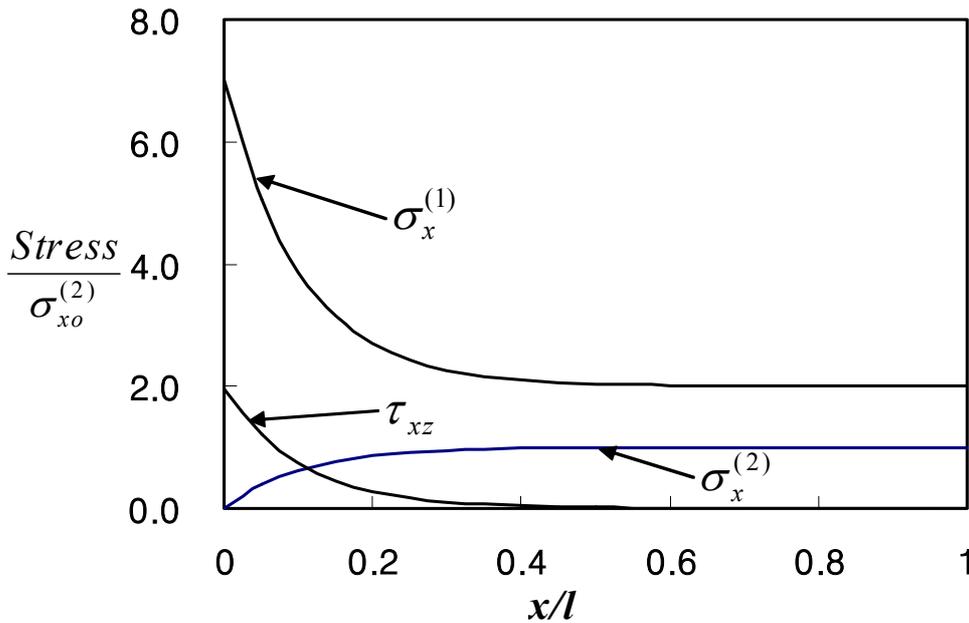


그림 5 모재와 브레이징 부위의 응력상태

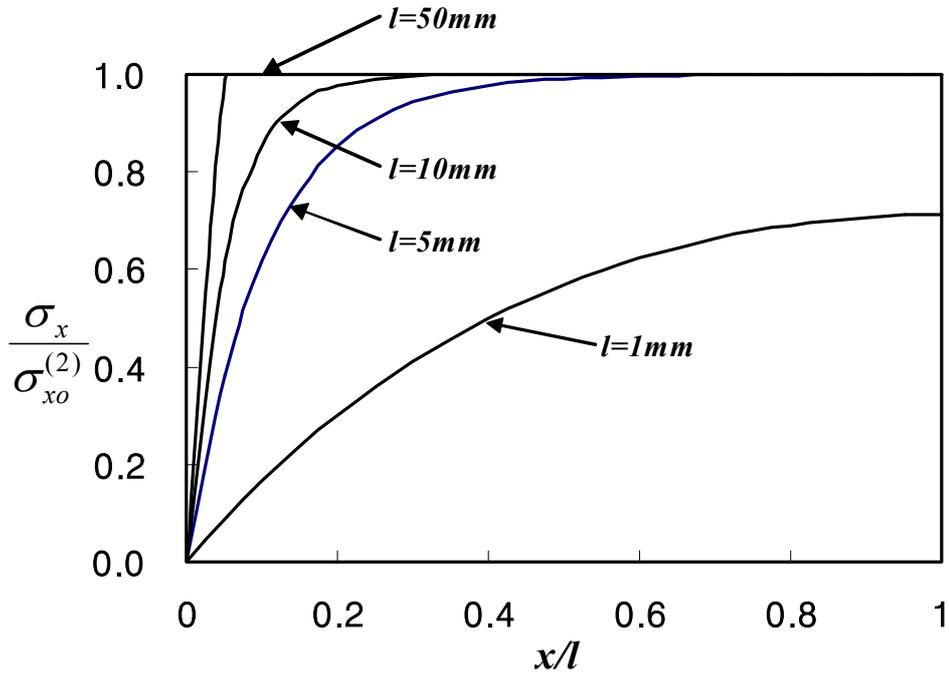


그림 6 균열의 간격에 따른 응력분포 비교

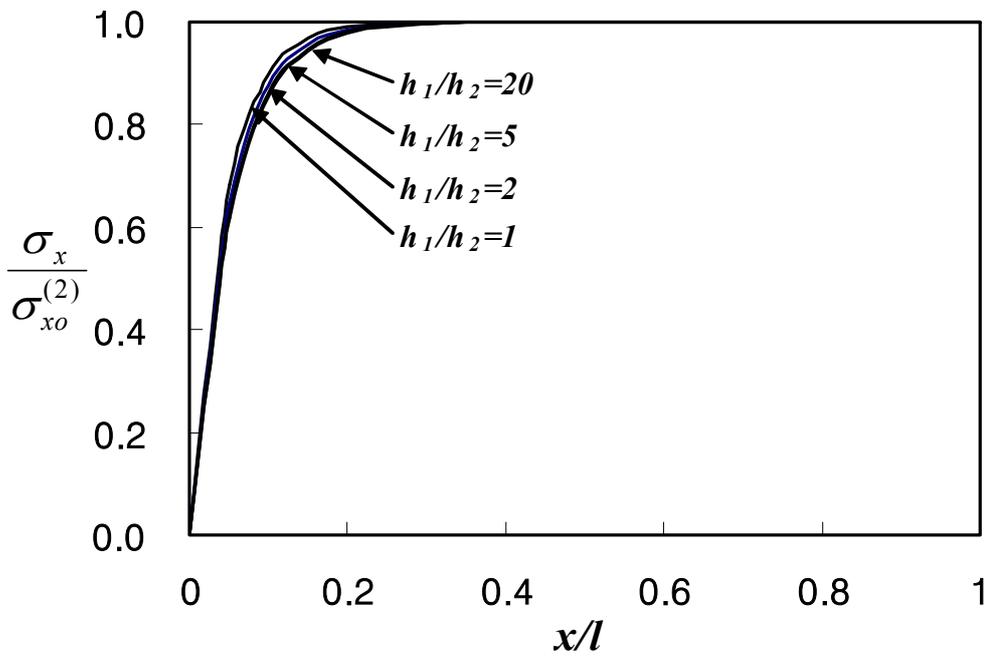


그림 7 모재와 브레이징 부위의 두께 비에 따른 응력분포

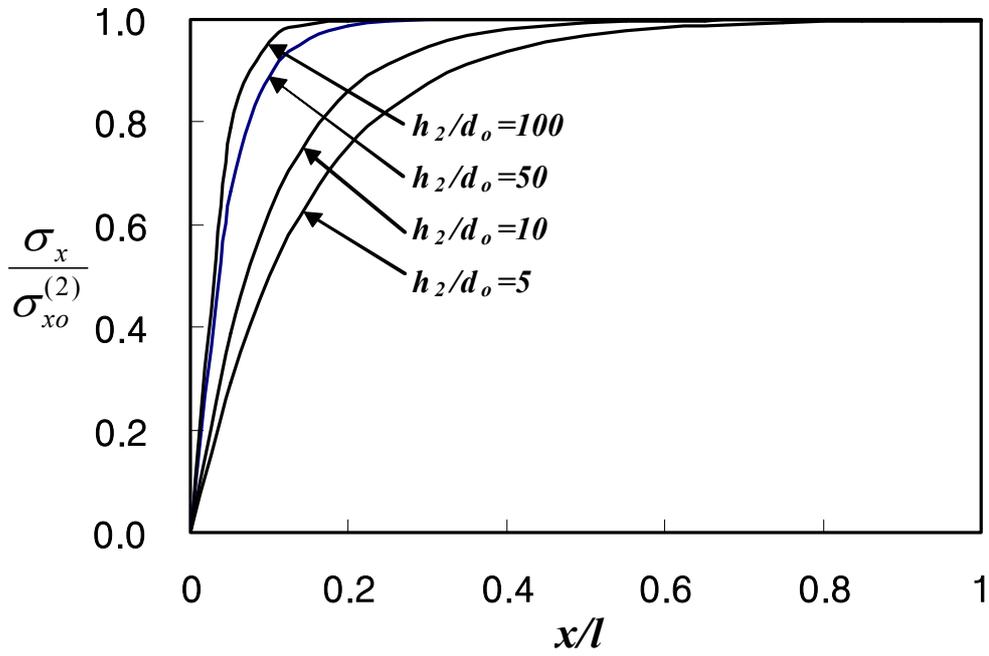


그림 8 전단지연층의 두께가 응력 분포에 미치는 영향

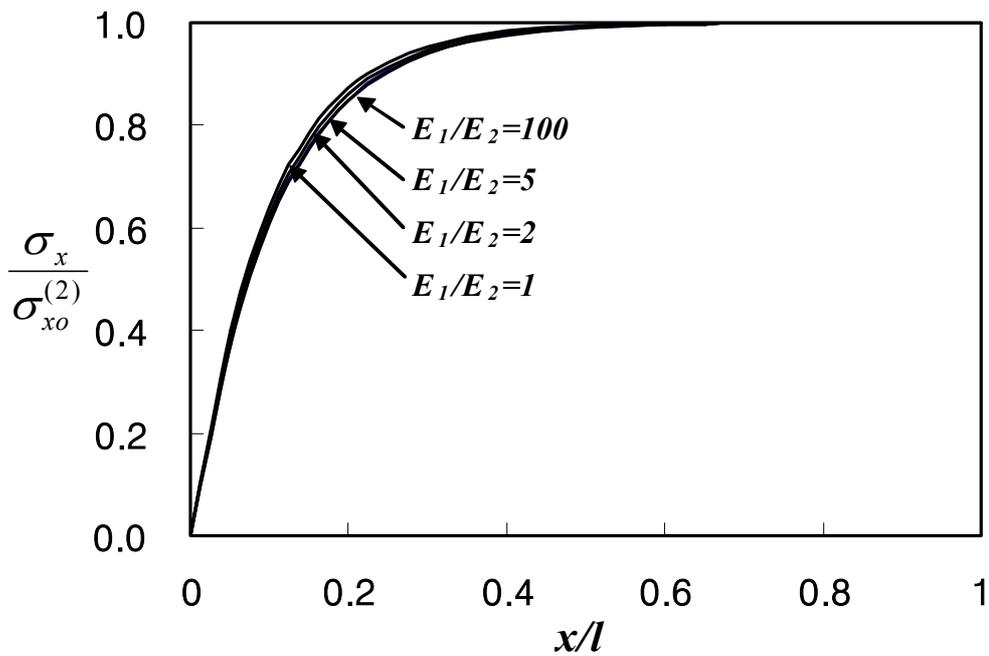


그림 9 모재와 브레이징부위의 탄성계수 비에 따른 응력분포

전단지연모델에서 가정한 전단지연층의 두께와 브레이징 층의 두께 비에 따른 응력의 분포는 그림 8과 같다. 이 경우는 전단지연층의 두께가 브레이징 층의 두께에 비해 매우 작다고 가정하는 경우가 실제 모델에 가깝다. 그림 9에서는 모재와 브레이징 부위의 탄성계수차이에 따른 비교해석을 수행하였다.

추가로 균열이 발생할 가능성은 다음과 같이 평가할 수 있다. 일반적으로 파손을 평가하는 것은 단순히 부분적인 응력상태를 사용하는 것보다 일정부분에 대해 응력평균값을 계산하여 이 값이 인장강도를 초과하는 경우에 다시 파손이 발생했다고 가정하는 평균응력개념이 많이 사용된다. 마찬가지로 방법으로 응력 값 대신 변형률 값을 사용하여 예측할 수 있다. $2l$ 의 길이의 응력평균값이 인장하중을 넘어가면 다시 그 사이에 균열이 생성된다고 모델링 할 수 있다.

$$\bar{\sigma}_x^{(2)} = \frac{1}{2l} \int_0^{2l} \sigma_x^{(2)} dx \quad (13-a)$$

$$\bar{\sigma}_x^{(2)} = \sigma_{xo}^{(2)} - \frac{\sigma_{xo}^{(2)}}{\alpha_1 l} \tanh(\alpha_1 l) \quad (13-b)$$

처음에 균열사이의 거리가 $2l_0$ 인 상태에서 응력해석을 수행하여 수식(13)의 평균응력값을 구한다. 평균응력값이 브레이징부위의 인장강도 보다 큰 경우 균열 중앙에 다시 새로운 균열이 생성된다고 가정할 수 있다. 이 경우 균열사이의 거리는 $2l_n$ 이 되며 이 값은 $2l_0$ 의 절반이다. 하중이 증가함에 따라 새로운 균열의 생성이 반복된다.

브레이징 소재의 파손에 대한 변형률 값을 알고 있는 경우에는 위와 마찬가지로 변형률을 적분하여 균열의 추가 생성 가능성을 예측할 수 있다.

BAg-19와 BVAg-30의 인장강도는 그림 11과 같다[4]. 예를 들면 BAg-19를 920도로 브레이징 한 경우, 수식(13-b)에서 구한 응력값이 약 250MPa를 초과하면 다시 횡방향 파손이 생긴다고 판단할 수 있다.

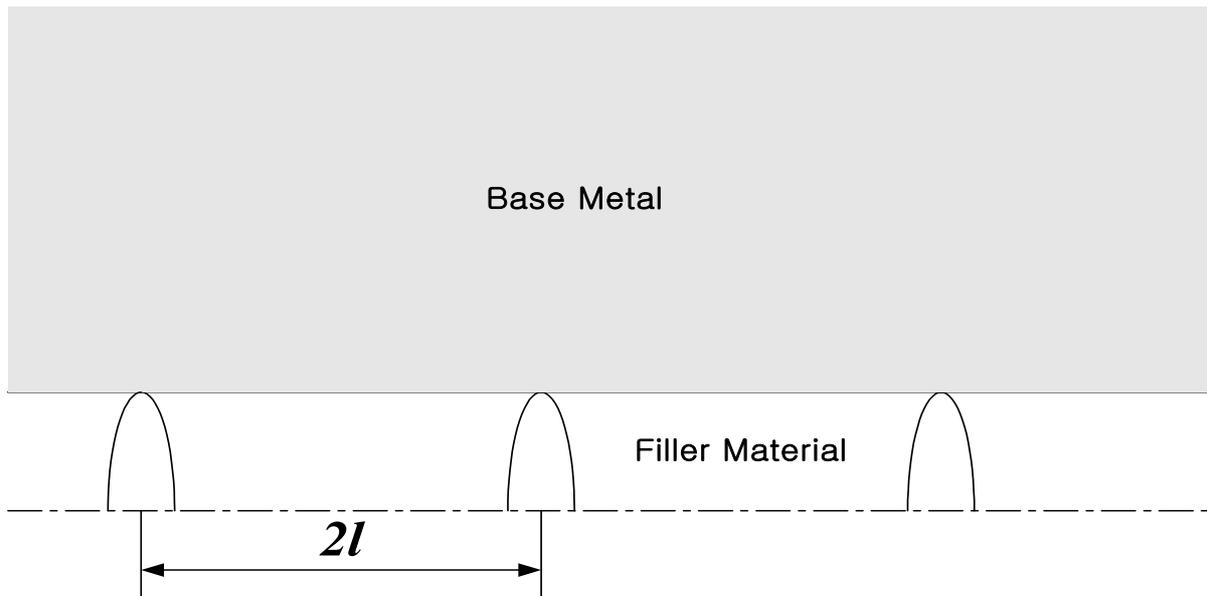


그림 10 새로운 균열의 생성

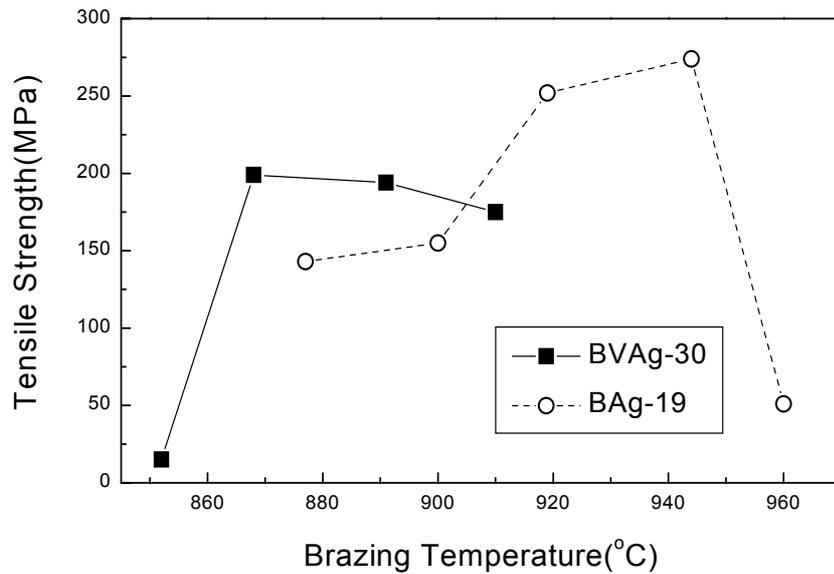


그림 11 브레이징 온도와 브레이징 부위의 인장강도

4. 결론

증기발생기카세트에 사용되는 이중금속결합부의 브레이징 부위에 횡방향균열이 발생했을 때 응력 상태를 평가할 수 있는 모델을 제시하였다. 변위장을 가정하여 응력상태를 평가하는 방안을 제시하였다. 실제로 모재와 용가재의 탄성계수의 차이 두께의 차이 등의 변수에 대한 응력분포 변화를 조사하였다. 브레이징 부위의 응력성분을 이용하여 횡방향균열의 추가 발생 여부에 대한 평가를 하는 방안도 제시하였다. 모재와 브레이징 소재 사이의 경계면에 대한 박리가 발생했을 때에 대한 평가가 향후 진행되어야 한다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김종인 외, 일체형원자로 주기기개발 및 검증시험, KAERI/RR-1889/98, 1999.
2. 김용완, 외, 증기발생기 기본설계보고서, KAERI/TR-2127/2002.
3. 권상철 외, “일체형원자로 증기발생기용 Ti합금과 스테인레스강 이중금속접합부의 브레이징” 2001 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2001.5
4. S.C. Kwon etc., "Mechanical Properties and Interface Reaction in Brazed Joint of Titanium and Stainless Steel, " *LIMAT 2001*, Pusan, 2001.
5. Highsmith, A. L. and Reifsnider, K.L., "Stiffness-Reduction Mechanism in Composite Laminates, " *ASTM STP 775*, 1982, pp.103-117.