2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Zr-2.5%Nb 합금에 코팅된 세라믹층의 열응력

Thermal Stresses of Ceramic Coating on Zr-2.5%Nb Alloy

김형남, 최성남, 장기상, 홍승열

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

에너지법에 근거하여 코팅층을 가진 탄성보 내의 열응력 분포를 구하기 위한 해석적 방법을 자유단 효과에 중점을 두어 개발했다. 이 방법에 의해 구해진 열응력은 자유단에서의 경계조건을 완전히 만족한다. 계산의 정확성을 보이기 위해 다른 연구자가 수행한 결과와 본 논문에서 소개된 방법에 의한 계산 결과를 비교하였다. 경계면에서 전단응력과 박리응력은 자유단 근처에서 매우 변화가 심하나 자유단에서 멀어지면 무시할 수 있을 정도로 작아진다. 중수로 압력관 재료로 사용되는 Zr-2.5%Nb 합금에 ZrO_2-SiO_2 세라믹을 코팅한 겹층판에 대하여 열응력 해석을 수행하여 코팅층의 두께가 응력분포에 미치는 영향을 분석하였다. 열팽창계수가 서로 다른 ZrO_2-SiO_2 코팅층과 ZrO_2-2.5%Y_2O_3 코팅층에 대한 열응력을 비교하여 열응력 관점에서 Zr-2.5%Nb 합금에 적절한 코팅 재료의 선정에 참고가 될 수 있는 자료를 제시하였다.

Abstract

Based on the principle of complementary energy, an analytical method is developed which focused on the end effects for determining thermal stress distributions in a coated beam. This method gives the stress distributions which completely satisfy the stress-free boundary condition at the edge. A numerical example is given in order to verify the method. The result shows that the shear and peeling stress distributions along the interface between the substrate and coat are significant near the edge and become negligible in the interior region. ZrO_2-SiO_2 layer coated on Zr-2.5%Nb alloy, which is the material for the pressure tube of PHWR, is investigated to address the coat thickness effects on the thermal stress distributions. The thermal stress distributions of the ZrO_2-SiO_2 coat on the zirconium alloy are compared with those of ZrO_2-2.5%Y_2O_3 coat on that alloy in order to choose the adequate coating material.

1. 서론

중수로 압력관은 핵연료 및 냉각재 하중을 지지할 수 있는 충분한 강도와 핵연료 교체나 운전중에 일어 날 수 있는 마모에 견딜 수 있는 내마모성 및 결함 생성 후 파괴에 저항 할 수 있는 충분한 파괴인성값을 가져야 된다. 중수로 압력관 재료로 사용되고 있는 Zr-2.5%Nb 합금은 이

들 조건을 만족하고 있으나 사용년수가 증가함에 따라 냉각재 중의 수소를 포획하여 파괴인성값이 급속히 감소한다. 이에 대한 대처 방안으로 압력관을 제작할 때 압력관 표면에 수소의 침투를 막을 수 있는 코팅층의 형성을 생각할 수 있다. 코팅층은 중수로 운전 조건에서 내산화, 내부식 및 내마모성이 요구되므로, 코팅층의 재료로는 지르코니아계의 세라믹이 가장 적합한 것으로 알려져 있다 [1]. 그러나 Zr-2.5%Nb 합금에 세라믹층을 형성시킨 경우에 대한 역학적 연구는 수행되지 않았다.

코팅된 기계요소에 온도변화가 있는 경우 서로 다른 열팽창계수로 인하여 서로 늘어나거나 줄어드는 길이 차이가 생기는 데, 이 차이가 경계면을 따라 분포된 힘으로 작용한다. 이 힘으로 인하여 자유단에서 가까운 경계면에서 응력의 변화가 커지고, 이는 미세 균열이나 박리의 원인이 되어 부품의 신뢰도에 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러므로 경계면에서의 응력상태를 안다는 것은 부품의 신뢰성 제고를 위하여 매우 중요한 일이다.

겹층 기계요소에 대한 열응력 문제는 Grimado [2] 이후 Electronic Packaging, 표면처리 등 여러 분야에서 널리 연구되고 있으나 자유단에서의 응력조건을 만족시키는 연구 결과를 찾기는 매우 어렵다. Suhir [3, 4]는 Timoshenko [5]의 바이메탈 이론을 발전시켜 유한 길이의 바이메탈을 두 개의 독립된 보로 취급하여 경계에서 응력과 변위를 일치시키는 방법으로 경계면에서의 응력을 구하였다. Razaqpur [6]와 Suhir [7] 자신에 의해 지적된 것처럼 그의 첫 번째 연구는 자유단에서의 응력조건을 만족시키지 못했지만 두 번째 연구에서는 이를 보완한 연구 결과를 내놓았다.

겹층보의 경계면을 따라 작용하는 열응력을 구하기 위하여 Yin [8, 9]은 Stress Function을 이용한 변분법을 이용하였다. 그의 연구는 끝단 효과(End-Effects)에 중점을 두어 겹층보의 자유단에서 경계조건을 만족하는 응력을 구하는데 중점을 두었다.

본 논문에서는 한쪽의 길이가 상대적으로 긴 겹층판의 자유단에서 경계조건을 완전히 만족할 수 있는 열응력 분포 계산 방법을 소개하고, 이를 이용하여 계산된 열응력 분포와 Yin [10]의 결과를 비교하였다. 또한 Zr-2.5%Nb 합금에 지르코니아계의 세라믹을 코팅한 겹층판에 대하여 코팅층의 두께가 열응력에 미치는 영향을 분석하였으며, 열팽창계수가 서로 다른 세라믹 코팅층에 대한 열응력을 비교하여 열응력 관점에서 Zr-2.5%Nb 합금에 적절한 코팅 재료의 선정에 참고가 될 수 있는 자료를 제시하였다.

2. 지배방정식

양쪽 끝이 자유단이고 폭이 1(unit)인 겹층보의 기하학적 크기 및 물리적 성질과 좌표계가 Fig. 1에 주어져있다. 본 논문에서는 온도변화에 의한 기계적 성질 변화는 없는 것으로 가정하였다. 온도 변화가 ΔT_k인 경우 2-차원 등방성(Isotropic) 탄성체의 응력-변형도 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_x^k = \frac{E_k}{1-\nu_k^2}(\varepsilon_x^k + \nu_k \varepsilon_y^k) - \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1-\nu_k} \tag{1}$$

$$\sigma_y^k = \frac{E_k}{1-\nu_k^2}(\varepsilon_y^k + \nu_k \varepsilon_x^k) - \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1-\nu_k} \tag{2}$$

$$\tau_{xy}^k = \frac{E_k}{1+\nu_k}\gamma_{xy}^k \tag{3}$$

여기서, 위(아래) 첨자 k는 k-번째 (k = 1, 2) 층을 의미한다.

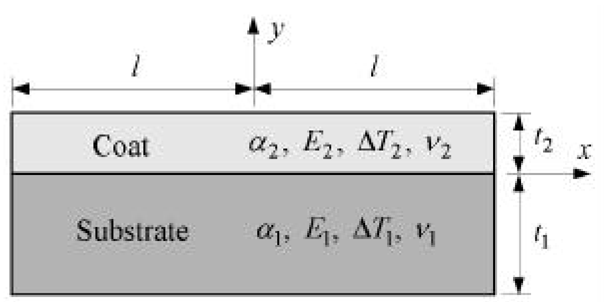


Fig. 1. Material properties of each layer and coordinate system

k-번째 ($k = 1, 2$) 층에 대한 평형 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_x^k}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^k}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}^k}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^k}{\partial y} = 0. \tag{5}$$

편의를 위하여 다음과 같은 관계식을 도입하자.

$$\sigma_x^k = \hat{\sigma}_x^k - \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1 - \nu_k} \tag{6}$$

$$\sigma_y^k = \hat{\sigma}_y^k - \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1 - \nu_k} \tag{7}$$

$$\tau_{xy}^k = \hat{\tau}_{xy}^k \tag{8}$$

각 층에서 재료의 기계적 성질과 온도변화가 일정하다는 가정하에 식 (6), (7), (8)을 평형 방정식(식 (4), (5))에 대입하면 다음과 같은 새로운 평형 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial \hat{\sigma}_x^k}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\tau}_{xy}^k}{\partial y} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial \hat{\tau}_{xy}^k}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\sigma}_y^k}{\partial y} = 0. \tag{10}$$

위 식에 대해서 자유단의 실제 응력이 “0”이 되기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\hat{\sigma}_x^k(\pm l, y) = \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1 - \nu_k} \tag{11}$$

$$\hat{\tau}_{xy}^k(\pm l, y) = 0 \tag{12}$$

겹층보의 위와 아래 표면이 외부에서 가해지는 힘이 없는 자유표면이 되기 위한 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{\sigma}_y^2(x,\ t_2) = \frac{\alpha_2 E_2 \Delta T_2}{1-\nu_2} \tag{13}$$

$$\hat{\tau}_{xy}^2(x,\ t_2) = 0 \tag{14}$$

$$\hat{\sigma}_y^1(x,\ -t_1) = \frac{\alpha_1 E_1 \Delta T_1}{1-\nu_1} \tag{15}$$

$$\hat{\tau}_{xy}^1(x,\ -t_1) = 0 \tag{16}$$

서로 다른 층이 접하고 있는 경계면에서의 힘 평형에 의한 조건은 다음과 같다.

$$\hat{\sigma}_y^1(x,0) = \hat{\sigma}_y^2(x,0) + \frac{\alpha_1 E_1 \Delta T_1}{1-\nu_1} - \frac{\alpha_2 E_2 \Delta T_2}{1-\nu_2} \tag{17}$$

$$\hat{\tau}_{xy}^1(x,0) = \hat{\tau}_{xy}^2(x,0) \tag{18}$$

3. 지배방정식의 변환

각층에 생기는 x-축 방향의 응력을 다음과 같이 가정하자.

$$\hat{\sigma}_x^k(x,y) = \sum_{i=1}^{n_k+1} \sigma_{(i-1)}^k(x)\left(\frac{y}{t_k}\right)^{i-1} \tag{19}$$

여기서, $n_k(k=1,2)$는 임의로 선택된 다항식의 최대 차수이고 $\sigma_{(i-1)}^k(x)$는 (n_k+1)개의 결정해야 되는 함수이다. 각 층의 자유단($x=\pm l$)에서의 경계조건(식 (11))과 식 (19)로부터 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\sigma_o^k(\pm l) = \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1-\nu_k} \tag{20}$$

$$\sigma_m^k(\pm l) = 0 \ \ (m = 1, 2, 3, \cdots, n_k) \tag{21}$$

식 (19)와 평형방정식(식 (9), (10))에 의해서 각 층에서 미지의 함수 $\sigma_{(i-1)}^k(x)$와 $\hat{\tau}_{xy}^k(x,y)$ 및 $\hat{\sigma}_y^k(x,y)$의 관계가 구해지며, $\hat{\tau}_{xy}^k(x,y)$와 식 (12)에 의해서 부가적인 경계조건이 다음과 같이 얻어진다.

$$\left.\frac{d\sigma_m^k}{dx}\right|_{x=\pm l} = 0 \ \ (m = 1, 2, 3, \cdots, n_k) \tag{22}$$

경계면에서 첫 번째 층과 두 번째 층의 수직응력(σ_y), 전단응력(τ_{xy})이 같다는 힘 평형조건(식 (17), (18))을 경계조건(식 (20), (21), (22))을 이용하여 적분하면 접합층에서의 미지함수(σ^2_o, σ^2_1, $\cdots$, $\sigma^2_{n_2}$)중 2개가 결정되어 응력분포를 알기 위해서 구해야 하는 미지함수의 수는 $(n_1 + n_2)$개 이다.

4. 에너지법

평형 방정식과 경계조건을 이용하여 구한 응력장(Auxiliary Stress Field)이 유일해가 되기 위해서는 다음과 같은 기하학적 적합조건에 관한 식을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial^2 \varepsilon^k_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon^k_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma^k_{xy}}{\partial x \, \partial y} \tag{23}$$

기하학적 적합조건은 실제 상태의 응력을 구하기 위한 필요 조건이며 Complementary 에너지법에 근거한 변분법에 의해서 우회적으로 만족시킬 수 있다. Principle of Complementary Energy는 다음과 같이 설명이 된다. 물체의 내부와 힘이 작용하는 일부 표면에서 평형 조건을 만족하는 모든 응력 중에서 기하학적 적합조건을 만족하는 응력은 Complementary 에너지 변분을 0으로 만든다.

2차원 응력 문제에서 Complementary Energy는 다음과 같다.

$$V^* = \int_{-l}^{l}\int_t \sum_{k=1}^{2} \frac{1}{2E_k} \{ (\hat{\sigma}^k_x)^2 + (\hat{\sigma}^k_y)^2 - 2\nu_k \hat{\sigma}^k_x \hat{\sigma}^k_y + 2(1+\nu_k)(\hat{\tau}^k_{xy})^2 \} dy\, dx \tag{24}$$

위식을 적분하여 에너지법(Principle of Stationary Complementary Energy)을 적용하면 함수 $\sigma^1_{m_1}(x)$ $(m_1 = 0, 1, 2, \ldots, n_1)$, $\sigma^2_{m_2}(x)$ $(m_2 = 0, 1, 2, \ldots, (n_2 - 2))$를 미지함수로 하는 다음과 같은 연립 상미분 방정식이 얻어진다.

$$[L]\{\sigma\} = \{a\} \tag{25}$$

여기서, $[L]$은 Square Symmetric 행렬로 이의 성분 L_{rs} $(r, s = 1, 2, 3, \ldots, (n_1 + n_2))$는 다음의 형태를 취하는 선형 연산자이고

$$L_{rs} = A_{rs} \frac{d^4}{dx^4} + B_{rs} \frac{d^2}{dx^2} + C_{rs} \tag{26}$$

상수 A_{rs}, B_{rs}, C_{rs}는 식 (26)을 y-좌표에 대하여 적분을 하고 변분을 취하는 과정에서 결정되는 상수이다(Column Matrix $\{a\}$의 성분도 이 과정에서 결정됨). Column Matrix $\{\sigma\}$의 성분은 다음과 같다.

$$\{\sigma\} = [\sigma^1_o, \sigma^1_1, \cdots, \sigma^2_{n_2-3}, \sigma^2_{n_2-2}]^T \tag{27}$$

경계조건(식 (22), (23), (24))과 함께 식 (27)에 의해 주어진 지배방정식은 잘 알려진 방법 [10]에

의해서 해를 구할 수 있으며, 식 (21)에서 어떤 $n_k(k=1,2)$를 선택하더라도 위와 같은 방법으로 해를 구할 수 있음을 증명할 수 있다 [11]. 경계조건과 함께 식 (27)에 의해 주어진 지배방정식을 풀고 이를 식 (1)에 대입하므로서 실제의 응력분포가 구해진다.

5. 고찰

5.1. 검증

앞에서 설명한 방법의 정확성을 보이기 위하여 자유단에서 경계조건을 만족하고 있는 Yin [9, 10]의 결과와 본 논문에서 개발된 해석적 방법에 의한 결과를 서로 비교하였다. 계산과정에서 컴퓨터의 사용은 최소화하였으며 필연적으로 수반되는 고차방정식 등은 Mathematica [12]를 이용하여 풀이를 구하였다. 여기에서 사용된 각 층의 기계적 성질은 Table 1과 같다. 보의 길이 $2l$은 50.8 mm, 층의 두께는 첫째층과 둘째층 모두 2.54 mm이고 온도 변화 ΔT_k는 모든 층에 대하여 240 ^oC가 상승하는 것으로 보았다. 각 층의 높이가 길이에 비해서 작고 온도 변화가 두께의 함수가 아니면 식 (19)의 축방향 응력을 각 층의 경계에서 불연속인 선형함수로 가정해도 ($n_k(k=1,2)$를 1로 선택) 충분히 정확한 값을 얻을 수 있으나, 본 예제의 경우에는 n_1을 3, n_2를 1 또는 3으로 선택한 계산 결과를 제시하였다.

첫째층과 둘째층 사이 경계면에서 첫째층과 두째층에 작용하는 x-축방향 열응력 분포가 Fig. 2와 Fig. 3에 나타나 있다. 본 연구에서 소개된 방법에 의한 계산 결과와 Yin의 결과가 잘 일치하고 자유단에서의 경계조건(자유단에 가해지는 외력이 없으면 표면에 응력이 발생하지 않음)을 만족하고 있음을 알 수 있다. 열팽창계수가 커서 많이 늘어나는 첫째층은 전체적으로 압축응력이, 열팽창계수가 작아 상대적으로 작게 늘어나는 둘째층은 전체적으로 인장응력이 발생한다.

클래드층의 박리와 직접 관련된 경계면에서의 y-축방향 열응력 분포는 Fig. 4와 같다. 자유단 근처를 제외하면 수직 응력이 “0”이기 때문에 열에 의한 박리는 주로 자유단 근처에서 시작될 것임을 짐작할 수 있다.

Fig. 5는 경계면을 따라 작용하는 전단응력 분포도이다. 경계면의 전단응력은 대부분의 영역에서 “0”이고 자유단 근처에서 최대값을 가진다. 계산에 사용된 다항식의 수(식 (19)의 n_k)를 크게 할수록 최대값의 위치가 자유단에 접근하고 n_k를 무한대로 취하면, 자유단에서 전단응력은 최대값과 “0”인 두 값을 가질 것이다. 이러한 현상은 경계면의 자유단에서 특이점(Singular Point)이 있어 이곳에서는 유일해가 존재하지 않고 응력의 크기는 특이점으로의 접근 방향에 따라 결정된다. 즉, 보의 바깥쪽(즉, x의 좌표가 $\pm(l+|\varepsilon|)$)에서 자유단으로 접근하게 되면 전단응력이 “0”이 되고 보의 안쪽(즉, x의 좌표가 $\pm(l-|\varepsilon|)$)에서 자유단으로 접근하면 전단응력이 “0”이 아닌 어떤 값을 갖는다. Nissley [13]를 비롯한 많은 연구자들은 이러한 응력 특이성(Stress Singularity) 때문에 일반적인 유한요소법으로 끝단효과를 정확히 해석할 수 없음을 지적하고 있다.

Table 1. Material properties of each layer

Material	$E\ (GPa)$	ν	$\alpha(/\ ^oC)$
Layer 1	70.38	0.345	23.6×10^{-6}
Layer 2	324.7	0.293	4.9×10^{-6}

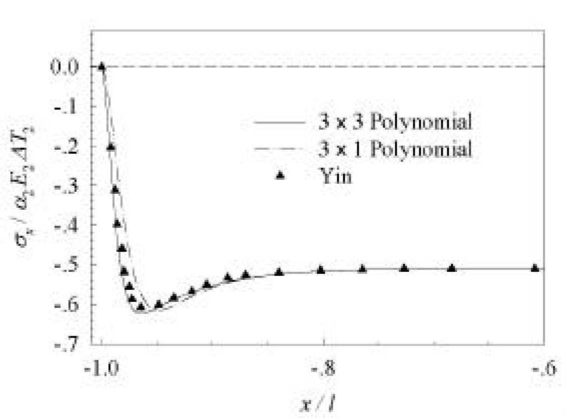


Fig. 2. Axial stress distributions in the layer 1 along the interface compared with the result of Yin

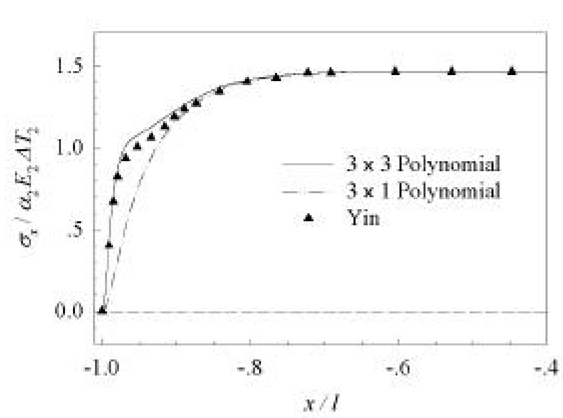


Fig. 3. Axial stress distributions in the layer 2 along the interface compared with the result of Yin

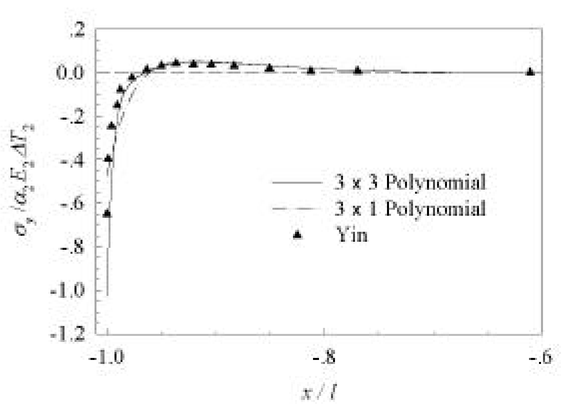


Fig. 4. Normal stress distributions along the interface compared with the result of Yin

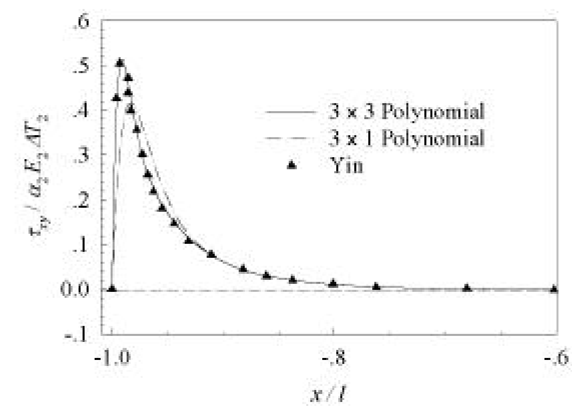


Fig. 5. Shear stress distributions along the interface compared with the result of Yin

5.2. 코팅층 두께의 영향

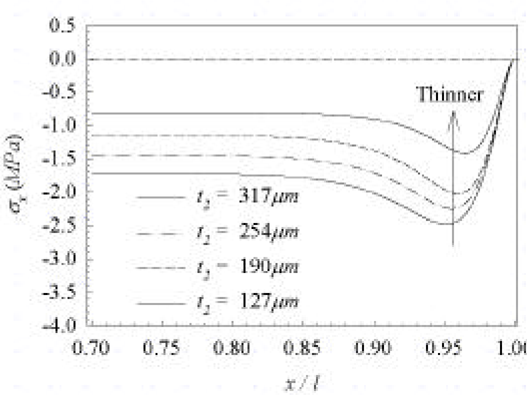
세라믹층의 두께가 열응력에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Zr-2.5%Nb 합금에 지르코니아 복합체인 ZrO_2-SiO_2를 코팅한 경우를 고찰하였다. 온도에 따른 물리적 성질의 변화는 무시하였다. 계산에 사용된 Zr-2.5%Nb 합금과 ZrO_2-SiO_2의 물리적 성질은 Table 2와 같다 [14, 15]. 모재 (Zr-2.5%Nb 합금)의 두께는 중수로 압력관 두께와 같은 4 mm, 코팅층 (ZrO_2-SiO_2)의 두께는 127 319 μm 를 취하였다. 겹층 보의 자유경계문제 (free boundary problem)에서 열에 의한 응력성분의 최대 (혹은 최소)값은 보의 길이에 무관하므로 [16], 본 논문에서는 보의 길이 $2l$의 값으로 50 mm를 선택하였다. 식 (19)의 n_k의 값은 모재에 대하여 3, 상대적으로 얇은 코팅층에 대하여 1을 선택하였다. 온도변화는 전체적으로 100 $^\circ C$ 상승한 것으로 보았다.

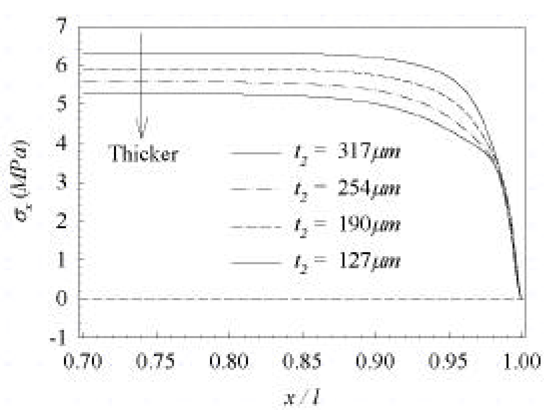
Table 2. Material properties of Zircaloy and Zircon [12, 13]

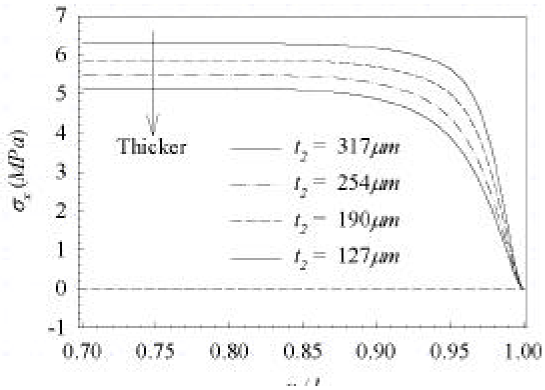
Material	$E\ (GPa)$	ν	$\alpha(/\ ^oC)$
Zr-$2.5\%Nb$ 합금	90	0.39	5.20×10^{-6}
ZrO_2-SiO_2	103.5	0.30	4.50×10^{-6}

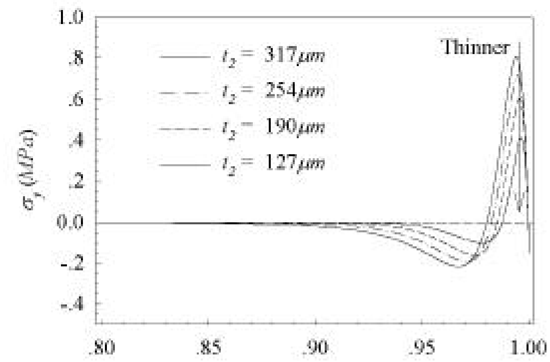
코팅층 두께에 따른 경계면에서 모재 및 코팅층에 각각 작용하는 x-축방향 열응력 분포가 Fig. 6, 7에 의해 주어져 있다. 전체적으로 모재에는 압축응력, 코팅층에는 인장응력이 발생하며, 자유단에서 어느 정도 떨어지면 응력이 일정해지고 자유단에서는 “0”이 된다. 경계면이 아닌 곳 (즉, $y\neq0$인 곳)에서도 이와 같은 현상이 나타난다. 코팅층의 두께가 증가함에 따라 모재에 발생하는 x-축방향 응력의 절대치는 커지고 코팅층에 발생하는 응력의 크기는 작아진다. Fig. 8은 열에 의해 코팅층에 발생하는 평균 x-축방향 응력분포 ($\sigma_x^2(x\ ,\ t_2/2)$ 혹은 $\int_0^{t_2}\sigma_x^2(x,y)\,dy/t_2$)를 보여준다. 식 (19)의 n_k를 코팅층에 대하여 1로 선택 (x-축방향 응력이 y-좌표가 변함에 따라 선형으로 변한다고 가정)하였으나 코팅층의 두께가 얇기 때문에 경계면을 따라 발생하는 응력이 y-좌표가 변해도 거의 변하지 않음을 알 수 있다.

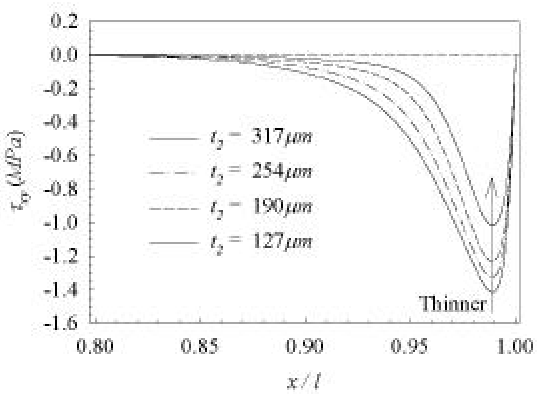
코팅층의 접착강도 및 박리와 직접 관련이 있는 경계면을 따라 발생하는 y-축방향 열응력 분포가 Fig. 9에 주어져 있다. 자유단 근처에서 응력이 현저히 크기 때문에 자유단 근처가 쉽게 박리될 것이다. 고정된 모재 두께에 대하여 코팅층의 두께가 커질수록 y-축방향 응력이 커지는 것으로 미루어, 코팅층의 두께가 두꺼울수록 열에 의해 쉽게 박리가 일어나리라는 것을 추측할 수 있다. Fig. 10은 경계면에서의 전단응력

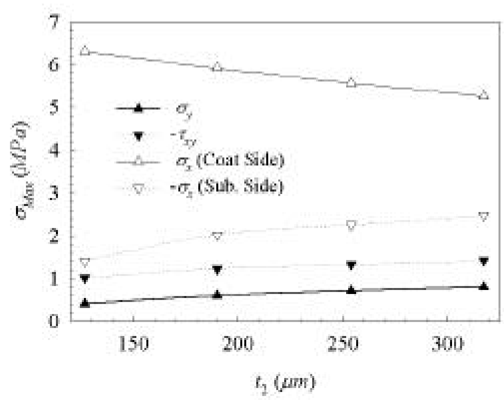












5.3. 코팅 재료의 영향

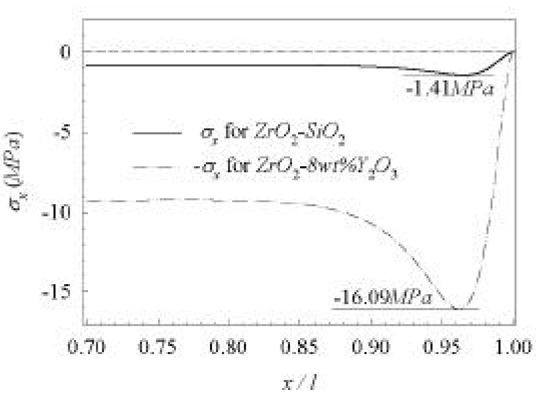
지르코니아계 세라믹의 일종인 ZrO_2-$8wt\%Y_2O_3$는 내열성, 내마모성 및 내부식성이 우수할 뿐만 아니라 열팽창계수가 강과 비슷하여 (상온에서 ZrO_2-$8wt\%Y_2O_3$의 열팽창계수는 11.0×10^{-6} $/{}^oC$, 강은 9.0 12.0×10^{-6} $/{}^oC$) 열차폐코팅 (TBC, thermal barrier coating) 등 코팅 재료로 널리 이용되고 있다. 또한, 위와 같은 ZrO_2-$8wt\%Y_2O_3$의 특성 때문에 ZrO_2-$8wt\%Y_2O_3$가 중수로 압력관 (Zr-$2.5\%Nb$ 합금)에 대한 최적의 코팅 재료로 인식되어 왔다 [1]. 그러나 Zr-$2.5\%Nb$ 합금은 강에 비해 매우 낮은 열팽창계수 (5.20×10^{-6} $/{}^oC$)를 가지고 있어 (Table 3 참조), 압력관에 ZrO_2-$8wt\%Y_2O_3$ 코팅을 했을 경우 코팅층의 역학적 건전성은 온도 변화에 매우 민감할 것으로 예상된다.

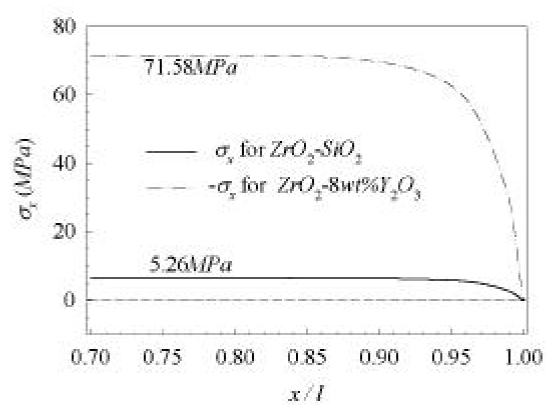
Table 3. Material properties of Zircaloy, Zircon and Zirconia-Yittria

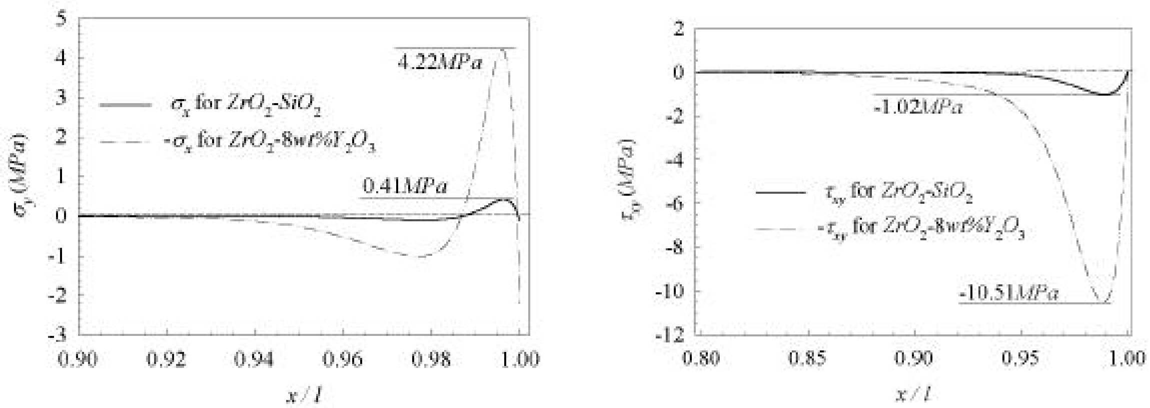
Material	$E\ (GPa)$	ν	$\alpha(/\ ^{o}C)$
Zr-2.5%Nb 합금	90	0.39	5.20×10^{-6}
ZrO_2-SiO_2	103.5	0.30	4.50×10^{-6}
ZrO_2-8wt%Y_2O_3	150	0.3	11.0×10^{-6}

모재와 코팅재의 열팽창계수 차이가 작을수록 열에 의해서 발생하는 응력이 작을 것이라는 것은 쉽게 짐작할 수 있다. 본 논문에서는 Zr-2.5%Nb 합금에 Zr-2.5%Nb 합금의 열팽창계수와 비슷한 열팽창계수를 가진 ZrO_2-SiO_2을 코팅한 경우와 일반적으로 최적의 코팅 재료로 알려져 있는 ZrO_2-8wt%Y_2O_3를 코팅한 경우의 열응력에 대해서 고찰하였다. 계산에 사용된 물리적 성질은 Table 3에 주어져 있다. 모재 (Zr-2.5%Nb 합금)의 두께는 4 mm, 코팅층 (ZrO_2-SiO_2)의 두께는 127 μm를 취하였다. 보의 길이 $2l$의 값으로 50 mm를 선택하였다. 식 (19)의 n_k의 값은 모재에 대하여 3, 상대적으로 얇은 코팅층에 대하여 1을 선택하였다. 온도변화는 전체적으로 100 ^{o}C 상승한 것으로 보았다.

모재인 Zr-2.5%Nb 합금의 열팽창계수에 비해서 ZrO_2-8wt%Y_2O_3는 큰 열팽창계수를 가지고 있고 ZrO_2-SiO_2은 작은 열팽창계수를 가지고 있기 때문에 계산된 열응력은 서로 반대 부호를 가지게 된다. 여기에서는 온도변화에 대한 열응력의 민감도를 비교하기 위하여 ZrO_2-8wt%Y_2O_3 코팅층을 가진 경우에 대한 계산 결과에 "-"를 붙였다. Fig. 12 Fig. 15는 경계면에서의 응력 분포도이다. 예상했던 대로 ZrO_2-8wt%Y_2O_3 코팅층을 가진 경우가 ZrO_2-SiO_2 코팅층을 가진 경우에 비해서 온도 변화에 민감함을 알 수 있다. 물론 열응력 해석의 결과만으로 Zr-2.5%Nb 합







6. 결론

에너지법에 근거하여 양쪽이 자유단인 겹층보에 대하여 경계조건을 완전히 만족하는 열응력 분포 계산 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하면 자유단에서 충분히 떨어진 곳에서 뿐만 아니라 자유단 근처의 응력분포도 구할 수 있다. 코팅층을 가진 겹층보에 작용하는 열응력의 특징은 다음과 같다. 자유단에서 어느 정도 떨어진 위치에서 모재와 코팅층 사이 경계면을 따라 작용하는 x-축방향 응력은 위치에 관계없이 일정한 값을 갖지만 자유단에 접근함에 따라 약간 커지거나 작아졌다가 “0”이 된다. 경계면에서 y-축방향 수직응력과 전단응력은 대부분에서 “0”이나 자유단 근처에서 변화가 심하다. 이와 같은 현상은 경계면이 아닌 곳에서도 똑같이 나타난다.

고정된 모재 두께에 대하여 코팅층의 두께가 커질수록 y-축방향 응력이 커지는 것으로 미루어, 코팅층의 두께가 두꺼울수록 열에 의해 쉽게 박리가 일어나리라는 것을 추측할 수 있다. 열에 의해서 경계면을 따라 발생하는 전단응력의 절대치도 코팅층의 두께가 증가함에 따라 커진다.

Zr-2.5%Nb 합금은 강에 비해 열팽창계수가 작기 때문에 강과 비슷한 열팽창계수를 가진 ZrO_2-8wt%Y_2O_3 세라믹을 코팅 재료로 사용하면 온도 변화에 민감하게 된다. 그러므로 ZrO_2-8wt%Y_2O_3 세라믹보다는 열팽창계수가 Zr-2.5%Nb 합금에 가장 가까운 재료를 중수로 압력관 코팅 재료로 사용하여야 온도변화가 크더라도 역학적 건전성이 유지되는 최적의 코팅층을 형성할 수 있을 것이다.

7. 참고문헌

1. 한국원자력연구소, “원자력 신소재 개발”, KAERI/RR-1766/96, 286 (1996).
2. P. B. Grimado, "Interlaminar Thermoelastic Stresses in Layered Beams," Journal of Thermal Stresses, 1, 75 (1974).
3. E. Suhir, "Stresses in Bi-Metal Thermostats," ASME Journal of Applied Mechanics, 53, 657 (1986).
4. E. Suhir, "Interfacial Stresses in Bimetal Thermostats," ASME Journal of Applied

Mechanics, 56, 595 (1989).

5. S. P. Timoshenko, "Analysis of Bi-Metal Thermostats," Journal of the Optical Society of America, 11, 233 (1925).
6. A. G. Razaqpur, "Discussion on Stresses in Bi-Metal Thermostats," ASME Journal of Applied Mechanics, 54, 479 (1987).
7. E. Suhir, "Discussion on Stresses in Bi-Metal Thermostats," ASME Journal of Applied Mechanics, 54, 479 (1987).
8. W.-L. Yin, "Thermal Stresses and Free-Edge Effects in Laminated Beams: A Variational Approach Using Stress Functions," ASME Journal of Electronic Packaging, 113, 68 (1991).
9. W.-L. Yin, "Refined Variational Solutions of the Interfacial Thermal Stresses in a Laminated Beam," ASME Journal of Electronic Packaging, 114, 193 (1992).
10. F. B. Hilderbrand, Advanced Calculus for Application, 2nd ed., p. 18, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1976).
11. H. N. Kim, The Analysis of Free-Edge Effects of a Bilayered Structure due to Phase Change and Variable Temperature Distribution, Ph.D. Dissertation, UW-Madison (1995).
12. S. Wolfram, The Mathematica® Book, Version 4, Cambridge University Press, UK (1999).
13. D. M. Nissley, "Thermal Barrier Coating Life Modeling in Aircraft Gas Turbine Engines," Journal of Thermal Spray Technology, 6, 91 (1997).
14. D. O. Northwood, Values of Elastic Constants of Zirconium Alloys for Use in Design, CRNL-1227 (1974).
15. Atomic Energy of Canada Limited, Measurement of Thermal Expansion of Zirconium Alloys, File 91-11600, Lab Report No. M2090 (1974).
16. H. N. Kim, S. N. Choi and K. S. Jang, "Thermal Stresses near the Edge in a Clad," Journal of the Korean Welding Society, 18, 104 (2000).