

온도변화에 대한 고분자 코팅 층에 발생하는 응력 해석

박명규* · 이상순** · 서창민***
*문경대학 자동차기계계열
**한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부
***경북대학교 기계공학과

Analysis of Stresses Induced in a Polymer Coating Layer due to Temperature Change

MYUNG-KYU PARK*, SANG-SOON LEE**, AND CHANG-MIN SUH***
*Automobile and Mechanical Design Division, Munkyeong College, Kyungpook, Korea
**School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, Chonan, Korea
***School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

KEY WORDS: Boundary Element Analysis 경계요소해석, Polymer Coating Layer 폴리머 코팅층, Stress Singularity Factor 응력특이계수, Interface Stress 계면응력

ABSTRACT: This paper deals with the stress singularity developed in a polymer layer that is coated to a concrete surface, due to temperature change. The boundary element method is employed to investigate the behavior of interface stresses. The polymeric layer is assumed to be a linear viscoelastic material, and is thermorheologically simple. The order of the singularity is obtained, numerically, for a given viscoelastic model. Numerical results exhibit the relaxation of interface stresses, and large gradients are observed in the vicinity of the free surface. Results show that the stress singularity factor is relaxed with time, while the order of the singularity increases with time for the viscoelastic model.

1. 서 론

콘크리트 구조물에서 에폭시와 같은 고분자 재료가 콘크리트 표면을 보호하기 위해 넓게 사용되고 있다. 콘크리트 표면에 코팅된 고분자 재료는 물의 흡수 및 수증기의 통과를 방지하고 침식성 액체나 가스로부터 콘크리트 표면을 보호하게 된다(Hare, 2001). 코팅된 고분자 재료는 주변으로부터 온도변화를 받게 되는데, 콘크리트와는 서로 다른 기계적 성질 및 열적 성질을 지니기 때문에 온도변화가 발생하면 계면(interface) 모서리에서 응력 특이성이 존재하게 되며, 이러한 응력 특이성은 콘크리트와 고분자 코팅 층의 계면 모서리에서 박리(delamination)현상을 일으킬 수 있다. 서로 다른 성질을 갖는 재료들이 결합되어 있는 구조물에 외력이 작용하게 되면 계면에는 복잡한 응력상태가 형성되고, 계면 모서리에는 특이 응력들이 존재한다는 것은 잘 알려져 있다(Bogy, 1968; Reedy, 1990; Tsai and Morton, 1991). 이러한 특이 응력은 계

면 모서리에서 박리를 일으키거나 모서리 균열을 야기 시킬 수 있다. 응력 특이성의 정도는 결합 상태에 있는 두 재료의 물성의 차이에 따라 달라진다.

고분자 코팅 층은 상온에서 탄성 거동 상태를 유지하게 되나, 주변의 온도가 높아지면 점탄성 상태로 특성이 바뀌게 된다. 이때 코팅 층은 시간 경과에 따라 기계 역학적 거동이 달라지는 현상을 나타낸다. 따라서 콘크리트 표면 위에 코팅된 고분자 재료에 온도변화가 발생할 때 나타나는 박리 현상을 이해하기 위해서는 점탄성 해석이 수행되어야 한다. 본 논문의 초점은, 점탄성 해석을 통해서 콘크리트와 에폭시 코팅 층의 계면 모서리에서 나타나는 응력 특이성의 변화상태를 조사하는데 맞춰져 있다.

계면응력의 점탄성 해석은 오래 전부터 활발히 진행되어 왔다. Weitsman(1979)은 에폭시 접착재가 주변으로부터 수분을 흡수하게 될 때 발생하는 계면 응력을 해석하였다. Delale and Erdogan(1981)은 점탄성 재료로 결합된 램 조인트의 응력 분포의 해석을 시도하였다. 이들의 해석 결과에 의하면, 계면 응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 커지고, 점탄성 영향으로 시간이 경과함에 따라 응력들의 재분포가 이루어 졌다. 그러나 이들이 계산 과정에서 사용한 가정들이 단순했기 때문에, 계면

제1저자 박명규 연락처: 경북 문경시 호계면 별암리 산 6번지
054-559-1283 mkpark@mkc.ac.kr

모서리에서 나타나는 응력 특이성을 설명하는 특이 차수(order of singularity)나 응력특이계수(stress singularity factor)에 대해서는 설명되지 못했다. 최근에 Lee(1997, 1998)는 횡방향 인장 변형률을 받고 있는 점탄성 재료의 계면 모서리에서 나타나는 응력 특이성을 경계요소법과 라플라스 변환, 그리고 Mellin 변환을 결합하여 수치적으로 구하는 과정을 제시하였다.

본 논문에서는, 콘크리트 표면 위에 코팅된 고분자 층에 온도 변화가 발생할 때 나타나는 계면응력 특이성을 조사하고 있다. 일반적으로 콘크리트는 고분자 코팅 층에 비해 강성이 매우 크므로 해석과정에서는 강체(rigid body)로 가정하였다. 계면응력들의 분포에 대한 조사는 Lee and Westmann(1995)이 발표한 경계요소법을 이용하여 수행되었다.

2. 코팅 층 계면에서의 응력분포

Fig. 1의 (a)는 콘크리트에 코팅된 고분자 층을 나타내고 있다. 서론에서 언급한 것처럼, 콘크리트의 강성은 고분자 코팅 층의 강성보다 매우 크므로, 해석과정에서 강체(rigid body)로 취급하였다. 코팅 층의 길이는 $2L$ 이고 두께는 $2h$ 이다. 여기서 코팅 층은 균질의 선형 점탄성체로 가정한다. 문제의 대칭성(antisymmetric)을 고려하여 코팅 층의 2분의 1만 모델링하면 된다. 코팅 층에 온도변화가 작용할 때 코팅 층 계면에 나타나는 응력을 조사하기 위해서, Fig. 1의 (b)에 나타난 경계요소 모델을 사용한다. 여기에서 코팅 층은 평면 변형률(plane strain)상태에 있다고 가정한다. 수치해석은 $L/h = 25$ 에 대해서 수행한다.

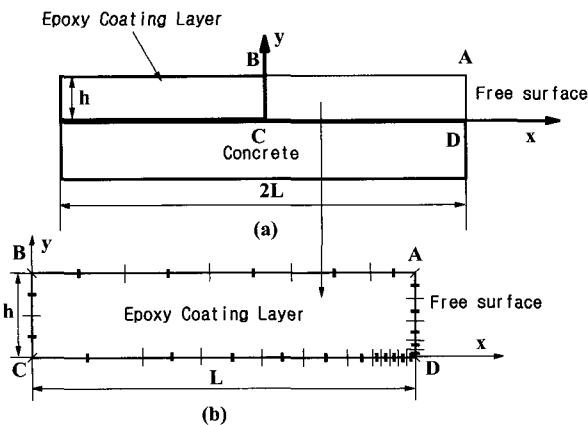


Fig. 1 BEM Model for Polymer Coating Layer (a) Free body diagram (b)BEM mesh

콘크리트 코팅에서 사용하는 고분자 층의 두께는 대체로 1 mm를 넘지 않는다. 이러한 코팅 층에 온도 변화가 발생했을 때 코팅 층 내부에 나타나는 온도 분포는 균일하다고 가정할 수 있다. 즉, 온도 분포는 $T(x, t) = T(t)$ 로 가정한다. 또한, 코팅 층과 주변사이의 온도 평형이 순식간에 이루어진다고

가정한다. Lee 등의 논문(Lee and Westmann, 1995)에서와 같이, 코팅 층 내의 균일한 온도 변화 $\Delta TH(t)$ 는 $\gamma(t)n_j$ 에 해당하는 표면력(traction)의 증가와 동등한데, $\gamma(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma(t) = 3Ka\Delta TH(t) \quad (1)$$

식(1)에서, K 는 체적 계수를 나타내고, n_j 는 계면면 위에서 단위 바깥방향 법선의 성분들을 가리키며, a 는 코팅 층의 열 팽창계수를 나타낸다.

코팅 층 내에서의 온도 변화가 균일한 경우에, 코팅 층에 대한 경계적분 방정식은 실제 시간 t 보다, 환산 시간 ξ 에 대해서 기술하는 게 편리하다. 어떤 체력도 존재하지 않는다는 가정 아래, 주어진 해석 모델에 대한 경계적분 방정식은 다음과 같이 주어진다(Lee and Westmann, 1995).

$$\begin{aligned} & c_{ij}(\mathbf{y})u_j(\mathbf{y}, \xi) \\ & + \int_S [u_j(\mathbf{y}', \xi)T_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) \\ & + \int_{0+}^{\xi} u_j(\mathbf{y}', \xi - \xi') \frac{\partial T_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi'] dS(\mathbf{y}') \\ & = \int_S [t_j(\mathbf{y}', \xi)U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) \\ & + \int_{0+}^{\xi} t_j(\mathbf{y}', \xi - \xi') \frac{\partial U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi'] dS(\mathbf{y}') \\ & + \int_{0+}^{\xi} \gamma(\xi - \xi')n_j(\mathbf{y}') \frac{\partial U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi'] dS(\mathbf{y}') \\ & + \int_S [\gamma(\xi)n_j(\mathbf{y}')U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서, u_j 와 t_j 는 각각 변위와 표면력 벡터를 나타내고, s 는 해석 모델의 계면면을 가리킨다. $c_{ij}(\mathbf{y})$ 는 계면면의 기하학적 조건에 의해 결정되는 항이고, U_{ij} 와 T_{ij} 는 점탄성 기본해이다. 이러한 기본해는 탄성-점탄성 대응 원리로부터 구해질 수 있다. 식(2)에서 ξ 는 환산 시간(reduced time)을 나타내는데, 다음과 같이 정의된다. 즉,

$$\xi = \xi(t) = \int_0^t A_m [T(\rho)] d\rho \quad (3)$$

식(3)에서 $A_m(T)$ 는 온도의 변화에 의존하는 이동 함수를 나타내는데, 실험에 의해 결정되는 재료의 물성치이다. 일정한 온도 변화에 대해서, 식(3)의 환산 시간은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\xi = A_m t \quad (4)$$

식(2)는 수치적으로 처리될 수 있는데, 시간적분에 대해서는 변형된 심프슨 공식을 사용하고, 계면면에 대해서는 이차 선 요소(quadratic line elements)를 사용하면 정확하고 효율적인

계산이 수행된다. 식(2)를 정리하면 다음과 같은 행렬방정식이 얻어진다.

$$[H]\{u\} = [G]\{t\} + \{B_T\} + \{R\} \quad (5)$$

식(5)에서, H와 G는 영항 행렬을 나타내고, B_T 는 온도의 영향을 가리키며, R은 점탄성 이력을 가리키는 항이다. 식(5)에 경계조건을 적용하여 풀면, Fig. 1의 (b)의 해석 모델의 경계면에서의 변위와 표면력 또는 응력들이 얻어진다.

코팅재료에 대해서는 다음과 같은 점탄성 모델이 선택되었다.

$$\begin{aligned} \mu(t) &= \mu_0 + \mu_1 e^{-\frac{t}{\lambda}} \\ K(t) &= K_0 \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서, $\mu(t)$ 는 전단 이완계수(shear relaxation modulus)를 나타내고, $K(t)$ 는 체적 계수를 가리키며, μ_0, μ_1 그리고 K_0 는 양수를 나타내고, λ 는 이완 시간이다. 이 연구의 수치해석 과정에는 다음과 같은 수치 값들이 사용되었다.

$$\begin{aligned} \mu(0) &= 0.55 \text{ GPa} ; \mu(\infty) = 0.11 \text{ GPa} \\ K_0 &= 2.0 \text{ GPa} ; \lambda = 10 \text{ min} \\ \alpha &= 5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C} \\ \Delta T &= 50 ^\circ\text{C} ; A_m = 10 \end{aligned} \quad (7)$$

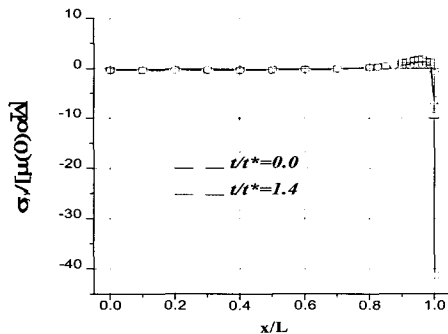


Fig 2. Interface normal stress in coating layer

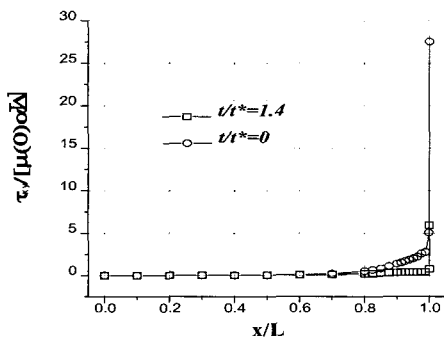


Fig 3 Interface shear stress in coating layer

Fig. 1의 (b)는 23개의 이차 선 요소로 이루어진 경계요소 해석 모델이다. 큰 응력 구배가 나타나는 계면 모서리 근처에는 세밀한 요소들이 사용되었다. Fig. 2와 Fig. 3에는 경계요소 해석 결과로 얻어진 수직 응력 σ_{yy} 와 전단 응력 τ_{xy} 가 무차원 시간 $t/\lambda = 0$ 과 1.4에 대해서 나타나 있다. 응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 큰 변화를 보이는데, 이러한 응력 변화는 계면 모서리 부근에 집중되어 있다. 이러한 응력 구배는 시간 경과에 따라 점탄성 영향으로 재분포가 이루어지는데, 여전히 큰 응력 구배가 응력 재 분포에 관계없이 계면 모서리 근처에 나타나고 있다. 이러한 결과를 볼 때, 콘크리트 위에 코팅된 점탄성 층에 온도변화가 작용할 때 계면 모서리에는 특이 응력들이 나타나며, 점탄성으로 인한 응력 분포의 변화에도 불구하고 응력특이성들은 사라지지 않고 여전히 존재한다. 이러한 응력 특이성으로 인해, 계면 모서리의 접착 결함이 약할 경우에는 모서리 균열이나 박리현상이 쉽게 발생할 수 있다고 판단되는 반면, 수직응력은 인장이 아닌 압축응력의 상태에 있으므로 모서리에서의 박리현상을 억제시키는 역할을 하고 있는 것으로 나타나고 있다. 이러한 응력 특이성에 대한 특성을 이해하기 위해서는 특이 차수와 응력특이계수에 대한 조사가 필요하다.

3. 특이차수와 응력특이계수

점탄성 코팅 층의 계면 모서리에 나타나는 특이 차수는 Lee(1998)에서 설명한 방법을 확대 적용함으로써 얻을 수 있다. Fig. 4는 콘크리트 위에 코팅된 점탄성 층의 계면 모서리 부근을 보여 주고 있다. 그림에서 자유 경계면에는 아무런 표면력이 작용하고 있지 않고, 주변으로부터의 온도변화가 코팅 층에 작용하는 유일한 변화이다.

평면 변형률 상태에서 특이 차수는 다음과 같은 응력 함수 식으로 부터 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{즉,} \\ &\nabla^4 \phi(r, \theta; t) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

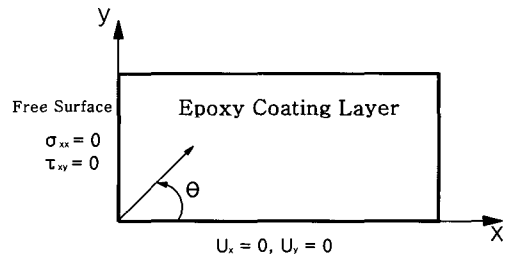


Fig. 4 Interface edge region in Polymer coating layer

또는, 위와 동등하게

$$\nabla^4 \phi(r, \theta; \xi) = 0 \quad (9)$$

식(9)를 전개하는데 필요한 경계조건으로는, $\theta = \frac{\pi}{2}$ 에서 수직응력 $\sigma_{\theta\theta}$ 와 전단응력 $\tau_{r\theta}$ 가 이고, $\theta = 0$ 에서 모든 변위 성분들이 0이다. 식(9)에서 ξ 는 환산 시간(reduced time)을 나타내는데, 식(3)과 같이 정의된다. 식(2)는 환산 시간 ξ 에 대한 라플라스 변환을 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^4 \phi^*(r, \theta; s) = 0 \tag{10}$$

식(10)에서 ϕ^* 는 ϕ 의 ξ 에 대한 라플라스 변환을 나타내고, s 는 변형 인자를 가리킨다.

Lee(1998) 및 Williams(1952)가 제안한 방법을 적용하여, 다음과 같은 응력 함수를 가정한다.

$$\begin{aligned} \phi^*(r, \theta; s) &= r^{\delta+1} f(\theta; s) \\ r > 0, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \end{aligned} \tag{11}$$

식(11)의 r 와 θ 는 Fig. 4에 정의되어 있다. δ 는 미지수로써 실수나 허수일 수 있다. $f(\theta; s)$ 는 경계조건을 적용하여 구해지는 함수이며 자세한 내용은 Lee (1998), Williams (1952) 등에 설명되어 있다. 식(11)로 주어진 응력 함수를 사용하면, 다음과 같은 특성 방정식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{2\delta^2}{s} - 8s[\nu^*(s)]^2 + 12\nu^*(s) - \frac{5}{s} \\ - \left[\frac{3}{s} - 4\nu^*(s) \right] \cos(\delta\pi) = 0 \end{aligned} \tag{12}$$

식(12)를 계산하면 δ 가 얻어지는데, $\nu^*(s)$ 는 점탄성 프와송비 $\nu(\xi)$ 에 대한 라플라스 변환을 나타낸다.

식(12)는 라플라스 변환 공간에서의 특성 방정식이므로, 시간 공간으로 변환시켜야 한다. 식(6)을 식(12)에 적용하여 변환하면, 시간 영역에서의 특성 방정식이 얻어진다.

$$2\delta^2 - 8P(\xi) + 12Q(\xi) - 5 - [3 - 4Q(\xi)] \cos(\delta\pi) = 0 \tag{13}$$

식(13)에서,

$$\begin{aligned} P(\xi) &= \frac{1}{4} \left[\frac{3K_0 - 2\mu(0)}{3K_0 + \mu(0)} \right]^2 \\ &\times \left[\beta_1^2 + \left(1 - \beta_1^2 + \beta_2 \frac{\xi}{\lambda} \right) \exp\left(-\beta_3 \frac{\xi}{\lambda}\right) \right] \end{aligned} \tag{14}$$

$$Q(\xi) = \frac{1}{2} \left[\frac{3K_0 - 2\mu(0)}{3K_0 + \mu(0)} \right] \left[\beta_1 + \left(1 - \beta_1 \right) \exp\left(-\beta_3 \frac{\xi}{\lambda}\right) \right]$$

이다.

식(14)에서,

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{[3K_0 + \mu(0)]}{[3K_0 - 2\mu(0)]} \frac{[3K_0 - 2\mu(\infty)]}{[3K_0 + \mu(\infty)]} \\ \beta_2 &= 2 \frac{3K_0 - 2\mu(0)}{3K_0 - 2\mu(\infty)} - \frac{3K_0 + \mu(0)}{3K_0 + \mu(\infty)} \\ &\quad - \frac{3K_0 + \mu(0)}{3K_0 + \mu(\infty)} \left[\frac{3K_0 - 2\mu(0)}{3K_0 - 2\mu(\infty)} \right]^2 \\ \beta_3 &= \frac{3K_0 + \mu(\infty)}{3K_0 + \mu(0)} \end{aligned} \tag{15}$$

계면 모서리에서의 응력 특이성은 $r^{1-\delta}$ 의 형태를 갖게 된다. 따라서 특이 차수를 구하는 문제는 $0 < Re(\delta) < 1$ 의 범위에 해당되는 δ 값만이 의미를 지닌다. 실제 점탄성 점착제층의 프와송 비는 $0 < \nu(t) < 0.5$ 를 갖는데, 이러한 범위에 대해서 $0 < Re(\delta) < 1$ 의 조건을 갖는 δ 값은 오직 하나만 존재하고, 그러한 δ 값은 실수이다. 이러한 내용에 관한 자세한 수학적 설명은 Bogy (1968)에 나와 있다. Fig. 5는 시간 t 영역에서의 특이 차수 $(1-\delta)$ 의 변화를 나타내고 있다. 점탄성 코팅 층에 대한 특이 차수는 시간이 경과함에 따라 점차 커지다가 일정한 값에 수렴하고 있다.

응력특이계수는 $h^{1-\delta}$ 로 정규화하여 다음과 같이 쓸 수 있다(Lee, 1998).

$$K_{ij} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{r}{h} \right)^{1-\delta} \sigma_{ij}(r, \theta; t) \Big|_{\theta=0} \tag{16}$$

식(16)은 응력단위를 갖는 양이다. Fig. 6은 응력특이계수의 변화되는 모양을 보여주고 있으며, K_{xx} 와 K_{yy} 는 모두 시간이 경과함에 따라 절대 값들이 점차 작아지다가 일정한 값으로 수렴하고 있다. 현재의 수치해석 결과에 의하면, 온도 변화 인한 박리현상은 모서리에서 박리를 발생시키려는 계면 전단응력과 이를 억제시키려는 계면 압축응력과의 상대적인 크기에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 그러나 현재의 해석결과에 의해서는 두 응력의 상대적인 크기와 박리의 발생정도의 관계에 대해서는 정확한 예측이 가능하지 않다고 보여진다. 두 응력의 상대적인 크기가 계면 모서리에서의 박리나 국부 항복에 어떤 역할을 하는지를 알기 위해서는 실험적인 뒷받침이 요구된다고 판단된다.

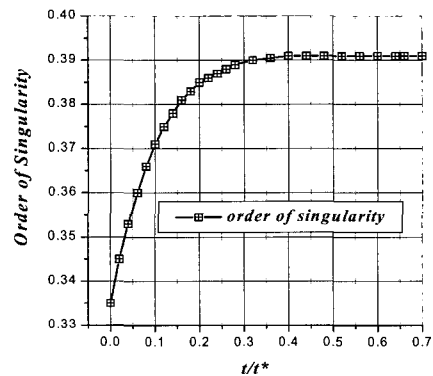


Fig. 5 Variation of the order of singularity

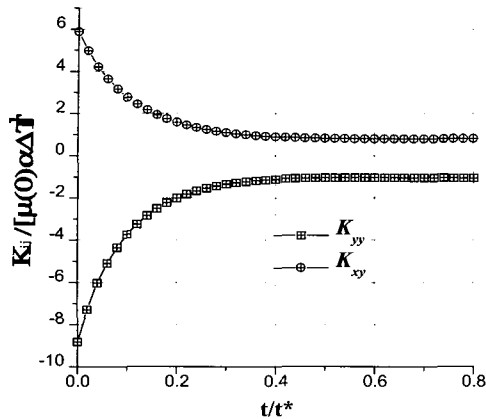


Fig. 6 Variation of the stress singularity factor

4. 결 론

본 논문에서는 경계요소법(Boundary Element Method)을 적용하여, 콘크리트 표면에 코팅된 고분자 층에 온도변화가 발생할 때 계면에 발생하는 특이응력에 대한 해석을 시도하였다. 콘크리트의 강성은 고분자 코팅 재료에 비해 매우 크므로 강제로 가정되었다. 해석결과에 의하면 계면 모서리에서 매우 큰 응력구배가 나타났다. 이러한 특이 응력들은 코팅 층의 길이나 두께에 비교해 비교적 작은 범위에 걸쳐 나타나고 있으며, 시간의 경과에 따라 이완되는 경향을 보여주고 있다. 특이 차수는 코팅 층의 물성이 시간에 따라 변함에 따라 점차 증가하다가 일정한 값으로 수렴하고 있다. 응력특이계수는 초기 값에서 점차 이완되다가 일정한 값으로 수렴되는 현상을 보여 주었다.

온도 변화 인해 고분자 코팅 층의 계면 모서리에서 나타나는 응력특이성은 피할 수 없는 현상으로 계면 모서리 부근에서 결합상태가 건전하지 않으면 박리현상이 나타날 수 있다. 박리현상은 모서리에서 박리를 발생시키려는 계면 전단응력과 이를 억제시키려는 계면 압축응력과의 상대적인 크기에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 그러나 현재의 해석결과에 의해서는 두 응력의 상대적인 크기와 박리의 발생정도의 관계에 대해서는 정확한 예측이 가능하지 않다고 보여 진다. 이러한 두 현상 중 어느 부분이 접착상태의 건전성에 더 큰 영향을 주는지를 확인할 수 있는 실험적인 검증이 요구된다고 판단 된다. 본 논문은 콘크리트 해양구조물의 침식 또는 부식을 방지하기 위하여 코팅을 할 때 코팅층의 박리현상 등의 규명과 응력해석을 위한 연구의 기초자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(과제번호: 02523)주관으로 수행되어진 것으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Bogy, D.B. (1968). "Edge-Bonded Dissimilar Orthogonalelastic Wedges under Normal and Shear Loading", ASME J. Applied Mechanics, Vol 35, pp 460-466.
- Delale, F. and Erdogan, F. (1981). "Viscoelastic Analysis of Adhesively Bonded Joints", ASME J. Applied Mechanics, Vol 48, pp 331-338.
- Hare, C.H. (2001). Paint Film Degradation, SSPC
- Lee S.S. and Westmann, R.A. (1995). "Application of High-order Quadrature Rules to Time Domain Boundary Element Analysis of Viscoelasticity", Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol 38, pp 607-629.
- Lee, S.S. (1997). "Free Edge Stress Singularity in a Two Dimensional Unidirectional Viscoelastic Laminate Model", ASME J. Applied Mechanics, Vol 64, pp 408-414.
- Lee, S.S. (1998). "Boundary Element Analysis of the Stress Singularity at the Interface Corner of Viscoelastic Adhesive Layers", Int. J. Solids and Structures, Vol 35, pp 1385-1390.
- Reedy, E.D., Jr., (1990). "Intensity of the Stress Singularity at the Interface Corner Between a Bonded Elastic and Rigid Layer", Engineering Fracture Mechanics, Vol 36, pp 575-583.
- Tsaj, M.Y. and Morton, J. (1991). "The Stresses in a Thermally Loaded Bimaterial Interface", Int. J. Solids and Structures, Vol 28, pp 1053-1075.
- Williams, M.L. (1952). "Stress Singularity Resulting from Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extension", ASME J. Applied Mechanics, Vol 74, pp 526-528.
- Weitsman, Y. (1979). "Interfacial Stresses in Viscoelastic Adhesive Layers due to Moisture Absorption", Int. J. Solids and Structures, Vol 15, pp 701-713.

2003년 10월 2일 원고 접수

2003년 11월 3일 최종 수정본 채택