

콘크리트 보호용 에폭시 코팅층에서 발생하는 잔류응력 해석

Analysis of Residual Stresses Induced in Epoxy Coating on Concrete

이 상순* , 김 노유* , 박 명규**
Lee, S.S., Kim, N.Y., Park, M.K.

ABSTRACT

This paper deals with the singular stresses developed in a polymer coating on concrete due to temperature change. The boundary element method is employed to investigate the behavior of interface stresses. Numerical results show that very large stress gradients are present at the interface corner and such stress singularity dominates a very small region relative to layer thickness. Since the exceedingly large stresses at the interface corner cannot be borne by coating materials, local yielding or delamination can occur in the vicinity of free surface.

1. 서 론

콘크리트 표면에 코팅된 고분자 재료는 물의 흡수 및 수증기의 통과를 방지하고 침식성 액체나 가스로부터 콘크리트 표면을 보호하게 된다.¹⁾ 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.^{2,4)} 이러한 특이 응력은 계면 모서리에서 박리를 일으키거나 모서리 균열을 야기시킬 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

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

** 문경대학교

발생할 때 나타나는 박리 현상을 이해하기 위해서는 점탄성 해석이 수행되어야 한다. 이 논문의 초점은, 점탄성 해석을 통해서 콘크리트와 에폭시 코팅 층의 계면 모서리에서 나타나는 특이응력들의 변화상태를 조사하는데 맞춰져 있다.

계면 응력의 점탄성 해석은 오래 전부터 활발히 진행되어 왔다. Weitsman⁵⁾은 에폭시 접착재가 주변으로부터 수분을 흡수하게 될 때 발생하는 계면 응력을 해석하였다. Delale과 Erdogan⁶⁾은 점탄성 재료로 결합된 랩 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 모서리에서 나타나는 응력 특이성을 설명하는 특이 차수(order of singularity)나 응력특이계수(stress singularity factor)에 대해서는 설명되지 못했다. 최근에 Lee^{7,8)}는 횡방향 인장 변형률을 받고 있는 점탄성 재료의 계면 모서리에서 나타나는 응력 특이성을 경계요소법과 라플라스 변환, 그리고 멜린 변환을 결합하여 수치적으로 구하는 과정을 제시하였다.

이 논문에서는, 콘크리트 표면 위에 코팅된 고분자 층에 온도 변화가 발생할 때 나타나는 계면응력들을 조사하고 있다. 일반적으로 콘크리트는 고분자 코팅 층에 비해 강성이 매우 크므로 해석과정에서는 강체(rigid body)로 가정하였다. 계면응력들의 분포에 대한 조사는 Lee와 Westmann⁹⁾이 발표한 경계요소법을 이용하여 수행되었다.

2. 계면에서의 응력분포

그림 1(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 h 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, 그림 1(b)에 나타낸 경계요소모델을 사용한다. 여기에서 코팅 층은 평면 변형률(plane strane)상태에 있다고 가정한다. 수치해석은 $L/h = 25$ 에 대해서 수행한다.

콘크리트 코팅에서 사용하는 고분자 층의 두께는 대체로 $1mm$ 를 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. 참고문헌[9]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.

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

식 (1)에서, K 는 체적 계수를 나타내고, n_j 는 경계면 위에서 단위 바깥방향 법선의 성분들을 가리키며, α 는 코팅 층의 열팽창계수를 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 가정아래, 주어진 해석 모델에 대한 경계적분 방정식은 다음과 같이 주어진다.⁹⁾

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

식(2)에서, u_j 와 t_j 는 각각 변위와 표면력 벡터를 나타내고, S 는 해석 모델의 경계면을 가리킨다. $c_{ij}(\mathbf{y})$ 는 경계면의 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,

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

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

$$\xi = A_m t \tag{4}$$

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

코팅재료에 대해서는 다음과 같은 점탄성 모델이 선택되었다.

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 e^{-\frac{t}{\lambda}} \tag{5}$$

$$K(t) = K_0$$

식 (5)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.

$$\mu(0) = 0.55 \text{ GPa} ; \mu(\infty) = 0.11 \text{ GPa} \tag{6}$$

$$K_0 = 2.0 \text{ GPa} ; \lambda = 10 \text{ min}$$

$$\alpha = 5 \times 10^{-5} / ^\circ C$$

$$\Delta T = 50^\circ C ; A_m = 10$$

그림 1(b)는 23개의 이차 선 요소로 이루어진 경계요소 해석 모델이다. 큰 응력 구배가 나타나는 계면 모서리 근처에는 세밀한 요소들이 사용되었다. 그림 2와 그림 3에는 경계요

소 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 온도 변화가 작용할 때 계면 모서리에는 특이 응력들이 나타나며, 점탄성으로 인한 응력 분포의 변화에도 불구하고 응력특이성들은 사라지지 않고 여전히 존재한다. 이러한 응력 특이성으로 인해, 계면 모서리의 접촉 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 필요해진다.

3. 응력특이계수

점탄성 코팅 층의 계면 모서리에 나타나는 특이 차수는 참고 문헌[7]과 [10]에서 설명한 방법을 확대 적용함으로써 얻을 수 있는데, 다음과 같은 특성 방정식이 구해진다.

$$\frac{2\delta^2}{s} - 8s[\nu^*(s)]^2 + 12\nu^*(s) - \frac{5}{s} - \left[\frac{3}{s} - 4\nu^*(s)\right] \cos(\delta\pi) = 0 \quad (7)$$

식 (7)을 수치적으로 계산하면 δ 가 얻어지는데, $\nu^*(s)$ 는 점탄성 프와송 비 $\nu(\xi)$ 에 대한 라플라스 변환을 나타낸다. 식 (7)은 라플라스 변환 공간에서의 특성 방정식이므로, 시간 공간으로 변환시켜야 한다. 식 (5)를 식 (7)에 적용하여 변환하면, 시간 영역에서의 특성 방정식이 얻어진다.

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

여기에서, $P(\xi)$ 와 $Q(\xi)$ 에 대한 표현 식은 생략하였다.

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 접착제 층의 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 참고 문헌⁴⁾에 나와 있다.

응력특이계수는 $h^{1-\delta}$ 로 정규화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.⁷⁾

$$K_{ij} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{r}{h}\right)^{1-\delta} \sigma_{ij}(r, \theta; t) \Big|_{b=0} \quad (9)$$

식 (9)는 응력단위를 갖는 양이다. 식 (9)로부터, K_{xx} 와 K_{xy} 가 계산된다.

4. 결 론

이 논문에서는 경계요소법(BEM:boundary element method)을 적용하여, 콘크리트 표면

에 코팅된 고분자 층에 온도변화가 발생할 때 계면에 발생하는 특이응력에 대한 해석을 시도하였다. 콘크리트의 강성은 고분자 코팅 재료에 비해 매우 크므로 강체로 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.

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 압축 응력과의 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 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. C.H. Hare, Paint Film Degradation, SSPC, 2001.
2. E.D. Reedy, Jr., "Intensity of the stress singularity at the interface corner between a bonded elastic and rigid layer", *Engineering Fracture Mechanics*, 36, 575(1990).
3. M.Y. Tsai and J. Morton, " The stresses in a thermally loaded bimaterial interface", *Int. J. Solids and Structures*, 28, 1053(1991).
4. D.B. Bogy, " Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading", *ASME J. Applied Mechanics*, 35, 460(1968).
5. Y. Weitsman, " Interfacial stresses in viscoelastic adhesive layers due to moisture sorption", *Int. J.Solids and Structures*, 15, 701(1979).
6. F. Delale and F. Erdogan, "Viscoelastic analysis of adhesively bonded joints", *ASME J. Applied Mechanics*, 48, 331(1981).
7. S.S. Lee, "Boundary element analysis of the stress singularity at the interface corner of viscoelastic adhesive layers", *Int. J. Solids and Structures*, 35, 1385(1998).
8. S.S.Lee, " Free edge stress singularity in a two dimensional unidirectional viscoelastic laminate model", *ASME J. Applied Mechanics*, 64, 408(1997).
9. S.S. Lee and R.A. Westmann, " Application of high-order quadrature rules to time domain boundary element analysis of viscoelasticity", *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, 38, 607(1995).

10. M.L. Williams, "Stress singularity resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension", ASME Journal of Applied Mechanics, 74, 526-528 (1952).

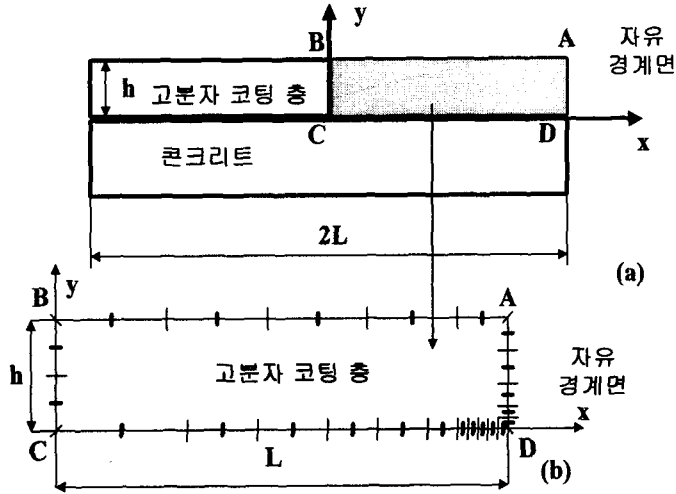


그림 1. 경계요소 모델링

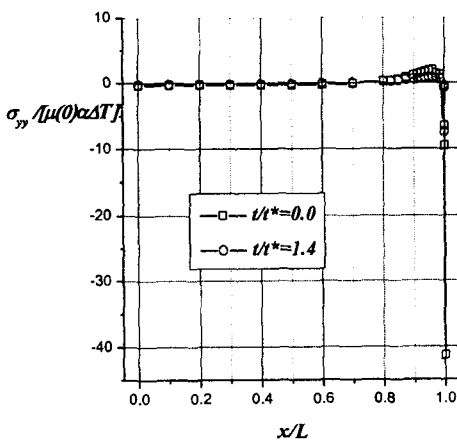


그림 2. 코팅 층의 계면 수직응력

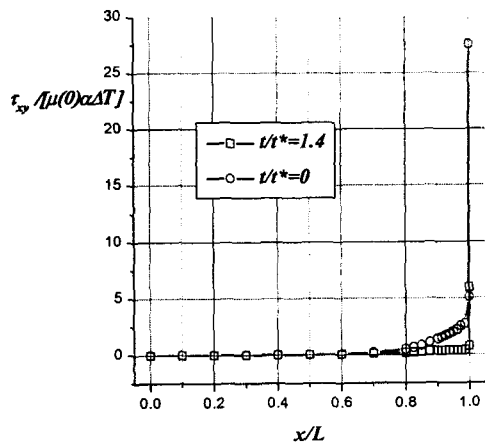


그림 3. 코팅 층의 계면 전단응력