



변환영역 해석법을 이용한 덧씌우기 된 콘크리트 도로 포장의 다축차륜하중에 대한 거동 분석

Behavior of Overlaid Concrete Pavements under Multi-Axle Vehicle Loads Obtained Using Transformed Field Domain Analysis

안 주 옥* 김 성 민**
An, Zu Og Kim, Seong-Min

Abstract

The transformed field domain analysis method was developed in this study to investigate the aspects of the stress distribution in overlaid concrete pavement systems under multi-axle vehicle loads. The overlay was assumed to be perfectly bonded or perfectly unbonded to the existing concrete pavement. The loads considered included the dual tired single-axle, tandem-axle, and tridem-axle loads, and the effects of the overlay's thickness, elastic modulus, and Poisson's ratio on the stress distribution were investigated. Details of the analysis method in the transformed field domain to analyze the overlaid pavement was described in this paper and the analysis results were verified by comparing with those obtained using the finite element method. From the analysis, it was found that the maximum tensile stress in the existing slab decreased as the overlay's thickness, elastic modulus, and Poisson's ratio increased, and the bonded overlay showed more significant effects than the unbonded one. The overlay's Poisson's ratio did not much affect the stresses, and the features of the maximum stress reduction in the existing slab due to the increase of the thickness, elastic modulus, and Poisson's ratio of the overlay were investigated. The effects of the number of axles on the stress distribution and the maximum stress were also investigated.

Keywords : multi-axle loads, overlay, transformed field domain, bond, unbond, concrete pavement

요 지

본 연구에서는 콘크리트 포장에 덧씌우기를 하였을 때 다축차륜하중에 의한 응력분포특성을 분석하기 위하여 변환영역에서의 해석법을 개발하였다. 덧씌우기는 기존의 슬래브와 완전히 부착이 되었을 경우와 전혀 부착이 되지 않았을 때의 두 가지 극한 조건을 기준으로 분석을 하였다. 차륜하중은 복륜단축, 복륜복축, 복륜삼축 등 복륜다축하중을 고려하였으며 덧씌우기의 두께, 탄성계수, 포아송비 등이 응력분포에 미치는 영향을 분석하였다. 변환영역에서의 해석법을 이용하여 덧씌우기 포장을 분석하는 방법에 대하여 상세히 설명하였으며 해석결과의 정확성은 유한요소법을 이용한 해석결과와 비교하여 검증하였다. 해석을 수행한 결과 덧씌우기의 두께, 탄성계수, 포아송비의 증가는 기존 슬래브 하부의 최대인장응력을 감소시키며 감소 정도는 부착 덧씌우기가 비부착 덧씌우기에 비해 더 큰 것을 알 수 있었다. 또한 덧씌우기의 포아송비가 응력에 미치는 영향은 그리 크지 않은 것을 알 수 있었으며 부착과 비부착 덧씌우기 포장에서 덧씌우기의 두께 및 탄성계수의 증가에 따른 기존 슬래브의 최대응력 감소특성도 분석하였다. 그리고 하중의 축수에 따른 부착과 비부착 덧씌우기 포장의 응력분포 및 최대응력특성도 분석하였다.

핵심용어: 다축하중, 덧씌우기, 변환영역, 부착, 비부착, 콘크리트포장

* 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수
** 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수, 교신저자

1. 서론

콘크리트 도로 포장에 수명에 다다랐을 경우에 일반적으로 덧씌우기를 하여 그 수명을 연장시킨다. 콘크리트 포장의 수명은 성능적인 문제와 구조적인 문제로 나누어 분석한다. 포장이 하중을 견딜 수 있는 구조체로서의 문제는 없으나 표면거칠기 등 표면의 문제에 의해 사용자의 불편을 초래할 경우는 성능적인 면에서 수명에 다다른 것으로 판단하며 이러한 경우에는 일반적으로 얇은 아스팔트 또는 얇은 콘크리트 덧씌우기를 하여 성능적인 문제를 해결할 수 있다. 하지만 포장 자체의 구조적인 손상이 심하여 수명에 다다랐다고 판단될 경우는 콘크리트 덧씌우기나 두꺼운 아스팔트 덧씌우기를 하게 된다. 이러한 덧씌우기를 수행할 때는 기존의 콘크리트 슬래브와 부착이 되도록 하는 방법과 부착이 되지 않도록 하는 두 가지의 다른 방법을 사용하는 것이 일반적이다. 콘크리트 포장에 아스팔트 또는 콘크리트 덧씌우기를 하면 기존 슬래브와 덧씌우기와의 재료 성질의 차이와 두 층의 부착상태에 따라 포장의 거동이 달라지며 결국 합성포장에 대한 분석이 필요하게 된다. 따라서 덧씌우기 콘크리트 포장의 거동에 대한 연구는 활발히 수행되어 왔으며 (Kim 등, 2003; Kim and Nelson, 2004; Lange and Shin, 2001; Volle, 2001) 현재 개발중인 한국형 포장설계법에서도 덧씌우기에 대한 거동분석이 필요시 되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 덧씌우기가 된 콘크리트 포장에서의 차륜하중에 의한 응력특성을 간편하게 분석할 수 있는 구조해석방법을 개발하여 이용함으로써 덧씌우기 포장의 거동을 분석하였다.

본 연구는 플리에 변환을 이용한 공간의 변환영역에서의 구조해석방법을 개발하여 콘크리트 도로 포장에 부착 및 비부착 덧씌우기를 하였을 때 다축차륜하중에 의한 응력분포 및 최대응력특성을 분석하기 위하여 수행되었다. 변환영역에서의 해석방법 개발에 대하여 본 논문에서 상세히 설명하였으며 유한요소해석 결과와 비교하여 해석의 정확성을 입증하였

다. 차륜하중은 복륜단축, 복륜복축, 복륜삼축 등 복륜다축하중을 고려하였으며 덧씌우기의 두께, 탄성계수, 포아송비가 덧씌우기 된 포장의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 부착과 비부착 덧씌우기가 기존 슬래브의 응력특성을 어떻게 변화시키는지를 비교분석하였다.

2. 변환영역에서의 구조해석

콘크리트 포장의 구조해석은 일반적으로 탄성지반 위에 놓인 판으로 가정 한 모델을 이용하여 수행하며 (Zaman 등, 1991; Liu 등, 2000; Kim 등, 2002; Kim and McCullough, 2003) 그림 1은 기존의 콘크리트 포장에 덧씌우기가 된 포장의 구조해석 모델을 보여준다. 차륜하중이 포장의 안쪽에 작용할 때의 거동을 분석하기 위하여 슬래브는 수평방향으로 무한대로 넓어서 경계영역의 상태에 따라서 응력분포가 영향을 받지 않도록 하였다. 종방향을 x 횡방향을 y 라 하면 이러한 덧씌우기가 된 콘크리트 포장의 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

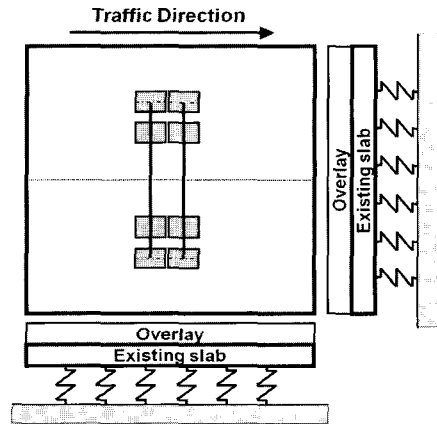
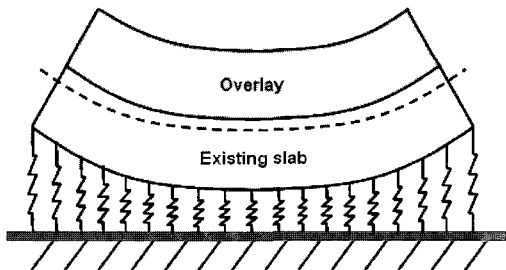


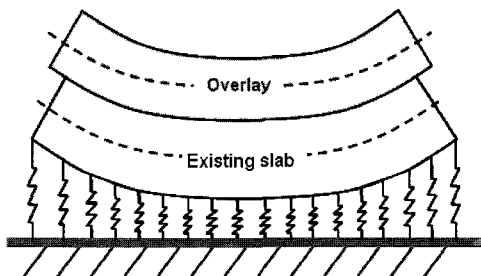
그림 1. 덧씌우기 된 콘크리트 포장 모델 및 복륜복축하중

$$D_p \left(\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4 \partial y^2} \right) + kw(x,y) = q(x,y) \tag{1}$$

여기서 w 는 수직변위이며 k 는 하부층을 모델링한 스프링의 탄성계수이고 q 는 하중이다. D_p 는 덧씌우기가 된 합성 슬래브의 휨강성을 나타낸다.



(a) 부착 덧씌우기



(b) 비부착 덧씌우기

그림 2. 덧씌우기 된 포장의 휨 거동

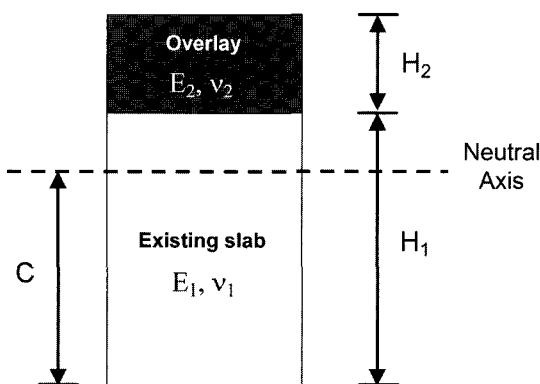


그림 3. 부착 덧씌우기 된 합성 슬래브의 중립축

이러한 합성 휨강성은 기존의 슬래브와 덧씌우기 재료의 성질에 따라 변하며 또한 기존의 슬래브와 덧씌우기 한 재료와의 부착상태에 따라 달라진다. 우선 덧씌우기가 기존의 슬래브와 완전히 부착되어 그림

2(a)에 보인 바와 같이 하나의 슬래브처럼 거동할 때는 휨에 의한 응력이 발생하지 않는 중립축이 합성 슬래브의 특정 위치에 생기게 되며 그림 3을 예로 들면 중립축의 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C = \frac{\frac{1}{2} H_1^2 + \frac{E_2}{E_1} H_2 (H_1 + \frac{1}{2} H_2)}{H_1 + \frac{E_2}{E_1} H_2} \quad (2)$$

여기서 C 는 기존 슬래브 밑면에서부터 중립축까지의 거리이며 H 와 E 는 각각 슬래브 두께와 탄성계수를 나타낸다. 또한 아래첨자인 1과 2는 기존 슬래브와 덧씌우기 슬래브를 각각 표현한다.

중립축의 위치가 결정되면 부착된 덧씌우기 콘크리트 슬래브의 합성 휨강성은 다음과 같이 구할 수 있다(Pister and Dong, 1959).

$$D_p = \frac{A_1 A_3 - A_2^2}{A_1} \quad (3)$$

여기서 쓰인 상수들은 다음과 같이 정의된다.

$$A_1 = \frac{E_1}{1-\nu_1^2} H_1 + \frac{E_2}{1-\nu_2^2} H_2 \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \frac{C^2 - (C-H_1)^2}{2} + \frac{E_2}{1-\nu_2^2} \frac{(C-H_1)^2 - (C-H_1-H_2)^2}{2} \quad (5)$$

$$A_3 = \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \frac{C^3 - (C-H_1)^3}{3} + \frac{E_2}{1-\nu_2^2} \frac{(C-H_1)^3 - (C-H_1-H_2)^3}{3} \quad (6)$$

여기서 ν_1 과 ν_2 는 각각 기존 슬래브와 덧씌우기의 포아송비를 나타낸다.

덧씌우기가 기존의 슬래브에 완전히 부착이 되어 있지 않으면 식(3)에 나타난 휨강성을 사용할 수 없다. 만약에 덧씌우기가 기존의 슬래브와 부착이 전혀 되어있지 않으면 이러한 비부착 덧씌우기가 된 슬래브의 합성 휨강성은 각각 슬래브의 휨강성을 구하여 더함으로써 구할 수 있다. 이러한 이유는 그림 2(b)에 보인 바와 같이 슬래브 간에 부착이 없으면 각각



따로 힘에 대해 저항하기 때문이다. 따라서 비부착 덧씌우기가 되어있는 포장의 휨강성은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_p = \frac{E_1 H_1^3}{12(1-\nu_1^2)} + \frac{E_2 H_2^3}{12(1-\nu_2^2)} \quad (7)$$

합성 휨강성을 구한 후 식(1)에 나타난 지배방정식을 이용하면 덧씌우기가 된 포장의 거동을 분석할 수 있다. 지배방정식을 풀기 위하여 변환영역에서의 해석법을 본 연구에서는 적용하였다. 이러한 해석방법은 유한요소법 등의 수치해석법을 이용할 때 발생할 수 있는 해석오차를 간편하게 없앨 수 있으며 계산시간 또한 매우 작게 소요되는 장점을 가지고 있다.

변환영역에서의 해석을 수행하기 위하여 먼저 η 와 ξ 를 x 와 y 의 변환영역이라 가정하고 식 (1)의 w 와 q 도 다음과 같이 가정한다.

$$W(\xi, \zeta) e^{i\xi x} e^{i\zeta y} \quad (8)$$

$$Q(\xi, \zeta) e^{i\xi x} e^{i\zeta y} \quad (9)$$

이러한 관계를 지배방정식에 대입하여 풀면 변환영역에서의 변위를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W(\xi, \zeta) = \frac{Q(\xi, \zeta)}{D_p(\xi^2 + \zeta^2)^2 + k} \quad (10)$$

변환영역에서의 변위는 이중 푸리에 변환을 이용함으로써 원래의 좌표계인 xy 좌표계에서의 수직변위로 다음과 같이 변환시킬 수 있다.

$$w(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q(\xi, \zeta)}{(\xi^2 + \zeta^2)^2 + k} e^{i\xi x} e^{i\zeta y} d\xi d\zeta \quad (11)$$

덧씌우기 된 포장의 종방향과 횡방향의 응력도 모든 위치에서 구할 수가 있으며 예를 들어 기존 슬래브에 작용하는 종방향의 응력을 구하려면 다음의 식을 이용할 수 있다.

$$\sigma_{x1} = \frac{E_1 z}{(1-\nu_1^2)(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(\xi^2 + \nu_1 \zeta^2) Q(\xi, \zeta)}{D_p(\xi^2 + \zeta^2)^2 + k} e^{i\xi x} e^{i\zeta y} d\xi d\zeta \quad (12)$$

여기서 z 는 중립축에서부터 응력을 구하려는 위치까지의 거리이며, 예를 들어 완전부착인 경우에 기존 슬래브의 하부에서의 응력을 구하려면 중립축에서부터의 거리인 C 를 위의 식에 대입하면 된다. 만약 비부착인 경우에는 기존 슬래브 하부의 응력은 기존 슬래브의 중립축에서 하부까지의 거리인 기존 슬래브 두께의 반을 z 에 대입하면 된다. 기존 슬래브가 아닌 덧씌우기 슬래브의 응력을 구하려면 위의 식의 탄성계수와 포아송비를 덧씌우기 층의 것으로 변환시키면 된다.

변환영역에서의 하중은 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$Q(\xi, \zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) e^{-i\xi x} e^{-i\zeta y} dx dy \quad (13)$$

하중의 크기가 시간에 따라 변하지 않고 q 로 일정하며 그림 1에 보인 복륵복축하중이 작용하면 변환영역에서의 하중은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q(\xi, \zeta) = 4q \frac{\sin \frac{d_1 \xi}{2} \sin \frac{d_2 \zeta}{2}}{\xi \zeta} e^{-i\xi x_0} e^{-i\zeta y_0} (1 + e^{-i\xi d_a})(1 + e^{-i\zeta d_l} + e^{-i\zeta d_w} + e^{-i\zeta(d_l + d_w)}) \quad (14)$$

여기서 d_1 과 d_2 는 x 와 y 축 방향의 하나의 바퀴의 접촉 길이이며 x_0 와 y_0 는 기준 하중의 x 와 y 축 방향의 좌표이다. 또한 d_a 는 축간의 중심거리이며 d_l 는 복륵에서 바퀴 간의 중심거리이고 d_w 는 좌우 바퀴간의 중심거리이다. 비슷한 방법으로 차륵의 수나 차축의 수에 따라 변환영역에서의 하중을 구할 수 있다.

부착과 비부착된 덧씌우기 포장에 다축 차륵하중이 작용할 때 여러 가지 변수가 응력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 구조해석을 수행하였으며 해석에서 고려한 변수 및 각 변수의 범위는 표 1에 나타

내었다. 각 변수의 값 중에서 괄호 안의 값은 대표 값을 표시하며 해석결과 분석 시 변수에 대한 특별한 언급이 없으면 이러한 대표 값을 사용하여 해석한 결과를 나타내는 것이다. 대표 값은 전형적인 콘크리트 포장의 성질을 기준으로 하였다. 차량하중은 복륵단축, 복륵복축, 복륵삼축 하중을 고려하였으며 차륵과 차축간의 거리 등은 전형적인 덤프트럭을 기준으로 결정하였다.

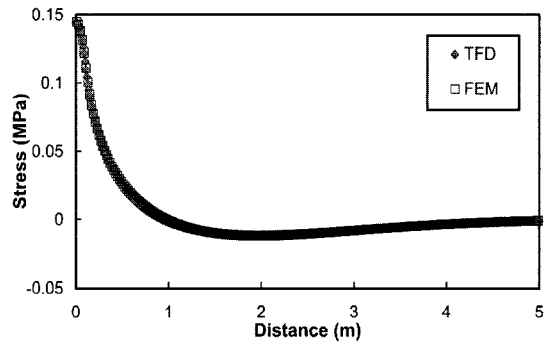
표 1. 해석에 사용된 변수 값

Properties		Values	
Existing Slab	Thickness (m)	0.3	
	Elastic modulus (GPa)	30	
	Poisson's ratio	0.15	
	Foundation stiffness (MN/m ³)	110	
Overlay	Thickness (m)	0.05, 0.1, (0.15), 0.2, 0.25	
	Elastic modulus (GPa)	10, 20, (30), 40, 50	
	Poisson's ratio	0.1, (0.15), 0.2, 0.3, 0.4	
Load	Magnitude (kN/wheel)	12.5	
	d_1, d_2 (mm)	80, 220	
	d_t (m)	0.32	
	d_w (m)	1.86	
	d_a (m)	Tandem	1.3
		Tridem	1.25

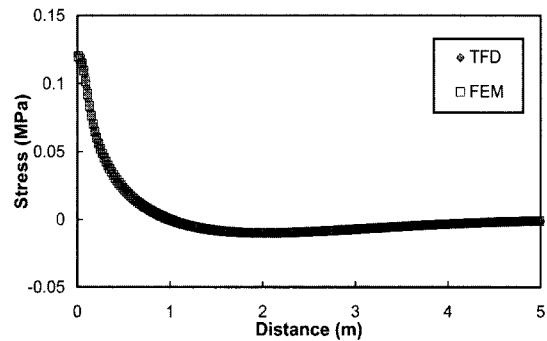
콘크리트 포장에서는 축하중을 받을 때 포장의 종방향 응력이 횡방향 응력보다 크기 때문에 본 연구에서는 종방향 응력분포를 분석하였으며 덧씌우기의 효과를 분석하기 위하여 기존 슬래브 하부의 응력을 고려하였다. 따라서 이후에 응력이라 함은 기존 슬래브 하부의 종방향 응력을 의미한다.

변환영역해석법을 이용하여 덧씌우기 포장의 거동을 분석하기 전에 먼저 해석결과의 정확성을 확인하기 위하여 ABAQUS 유한요소해석 프로그램 (ABAQUS, 2005)을 이용하여 구한 결과와 비교하였다. 그림 4는 하나의 하중이 작용할 때 하중의 위

치에서부터의 응력분포를 비교한 그림이다. 그림에서 TFD는 변환영역해석을 나타내며 FEM은 유한요소해석을 나타낸다. 그림 4(a)의 부착 덧씌우기 포장은 덧씌우기의 두께가 0.2m, 탄성계수가 3GPa, 포아송비가 0.4일 경우이며 그림 4(b)의 비부착 덧씌우기는 두께가 0.3m, 탄성계수가 20GPa, 포아송비가 0.15일 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 변환영역해석법과 유한요소법을 이용하여 구한 응력분포가 일치하는 것을 알 수 있다.



(a) 부착 덧씌우기



(b) 비부착 덧씌우기

그림 4. 해석결과 비교

3. 부착 덧씌우기 포장의 거동

덧씌우기가 기존의 슬래브에 완전히 부착되어 있을 경우에 덧씌우기의 두께와 탄성계수가 단축, 복축, 삼축하중이 작용할 때 기존 슬래브의 응력분포

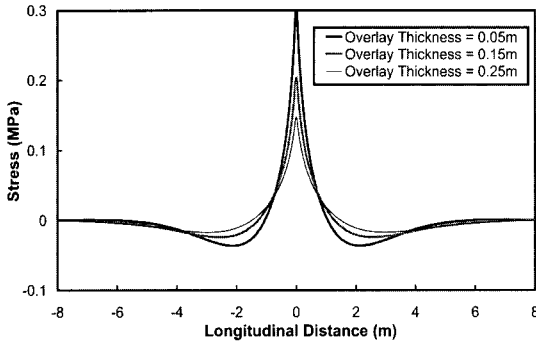


에 미치는 영향을 우선 분석하였다. 그림 5는 덧씌우기의 두께 변화에 따른 기존 슬래브 하부에 최대 인장응력이 생기는 위치에서 종방향을 따라 종방향 응력분포를 보여 준다. 그림에서 가로 축의 종방향 거리 (longitudinal distance) 0은 축하중의 중간 위치를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 응

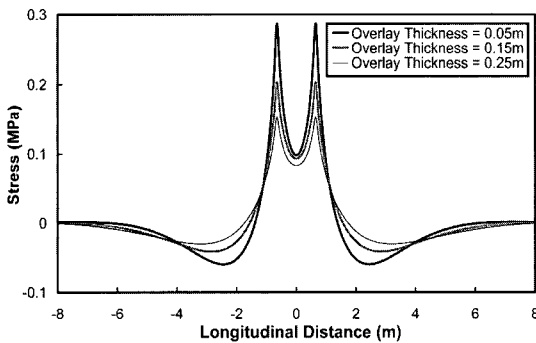
력분포는 축하중의 중간을 기준으로 대칭이며 축수에 관계없이 덧씌우기의 두께가 두꺼워지면 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 응력감소는 최대응력의 감소뿐만 아니라 부근의 부응력의 감소도 포함한다. 복축하중에서는 축과 축 사이의 최소응력도 덧씌우기의 두께가 증가할수록 감소하지만 삼축하중에서는 축과 축 사이의 최소응력은 덧씌우기의 두께에 따라 거의 영향을 받지 않으며 오히려 덧씌우기 두께가 증가할수록 최소응력이 미소하게 증가하는 경향을 보인다.

그림 6은 덧씌우기의 탄성계수가 변화할 때의 응력분포를 보여준다. 덧씌우기의 탄성계수가 증가하면 기존 슬래브 하부의 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있으며 하중위치의 양쪽 바깥부분에 생기는 부응력의 크기도 함께 감소하는 것을 알 수 있다. 복축하중에서는 축과 축 사이의 최소응력은 덧씌우기의 탄성계수에 영향을 거의 받지 않으며 삼축하중에서는 덧씌우기의 탄성계수가 증가하면 축간의 최소응력이 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 덧씌우기가 없이 기존의 슬래브의 탄성계수를 증가시키면 휨강성이 증가하여 휨 현상이 줄어들지만 이보다 탄성계수의 증가가 응력에 미치는 영향이 더 크기 때문에 슬래브 하부의 응력이 궁극적으로 증가하는 경향이 있지만, 덧씌우기를 하여 합성 슬래브의 휨강성을 증가시키면 기존 슬래브의 탄성계수는 유지되면서 휨 현상이 줄어들어 결국은 기존 슬래브 하부의 응력이 감소하는 것을 알 수 있다.

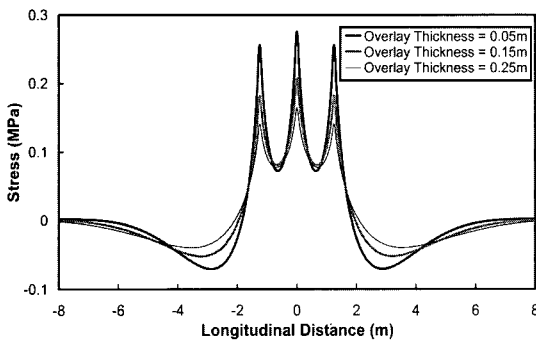
덧씌우기를 수행하여 포장의 구조적 성능을 높이는 방법은 기존의 슬래브 하부의 응력을 감소시키는 것이다. 따라서 덧씌우기의 재료 특성 및 축하중의 종류에 따라 기존 슬래브의 하부에 생기는 최대 응력이 어떻게 변화하는 지를 분석하였다. 덧씌우기는 두께, 탄성계수, 포아송비를 변화시키며 그에 따른 최대 응력의 변화를 분석하여 그림 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 하중의 종류에 관계없이 덧씌우기의 두께, 탄성계수, 포아송비가 증가 할수록 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) 단축

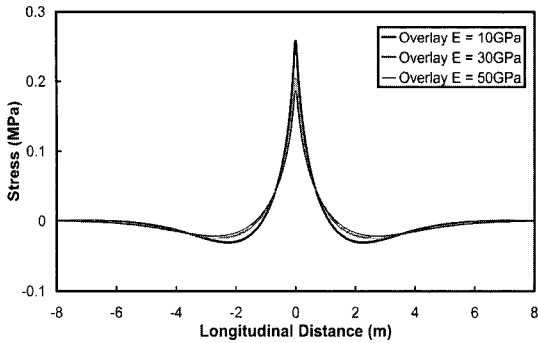


(b) 복축

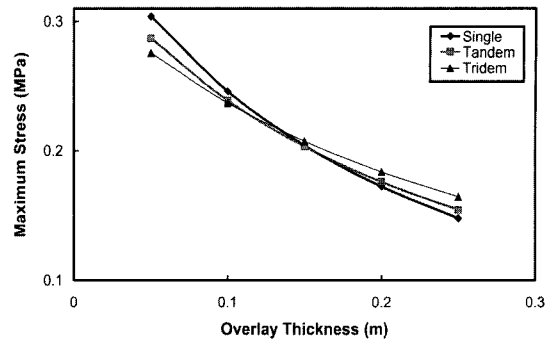


(c) 삼축

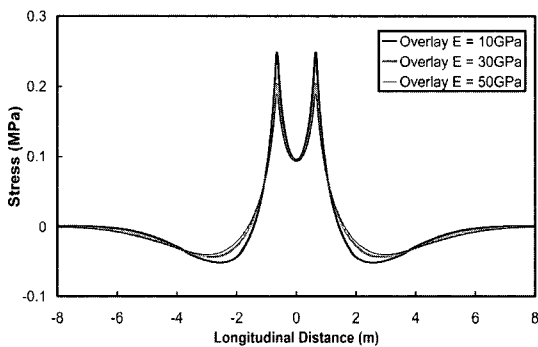
그림 5. 부착 덧씌우기 두께에 따른 응력분포



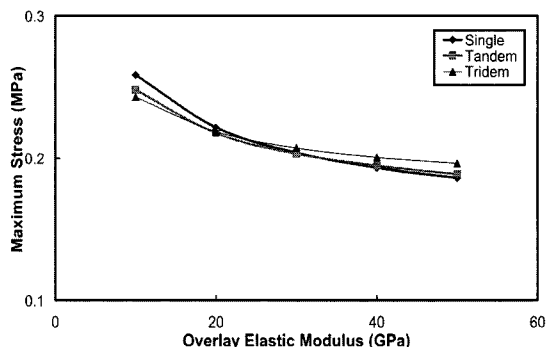
(a) 단층



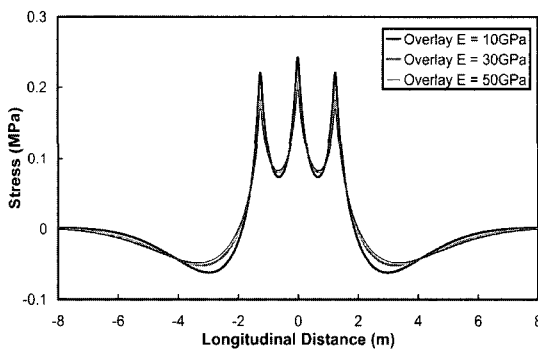
(a) 두께



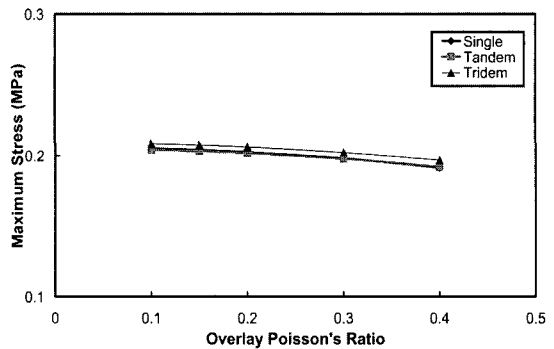
(b) 복층



(b) 탄성계수



(c) 삼층



(c) 포아송비

그림 6. 부착 덧씌우기 탄성계수에 따른 응력분포

그림 7. 부착 덧씌우기 성질에 따른 최대응력변화

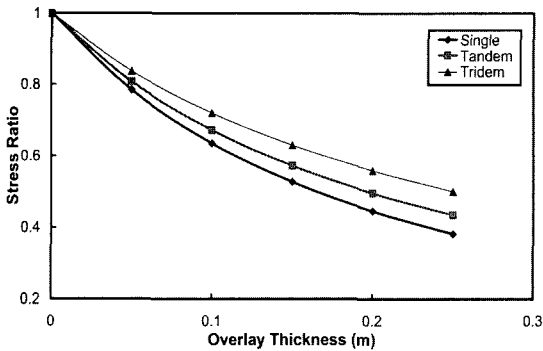
그림 7(a)에 보인 바와 같이 덧씌우기 두께가 작을 때는 축하중의 수가 클수록 최대응력이 감소하지만 덧씌우기의 두께가 증가하면 반대로 축하중의 수가 커지면 최대응력이 커지는 것을 알 수 있다. 덧씌우기의 탄성계수도 그림 7(b)에 나타낸 바와 같이

작을 때는 축하중의 수가 많으면 최대응력이 작아지지만 탄성계수가 클 때는 축하중의 수가 증가하면 최대응력이 커지는 것을 알 수 있다. 그림 7(c)에 보인 바와 같이 덧씌우기의 포아송비의 변화는 최대응력에 그리 큰 영향을 미치지 않지만 삼축하중에서의

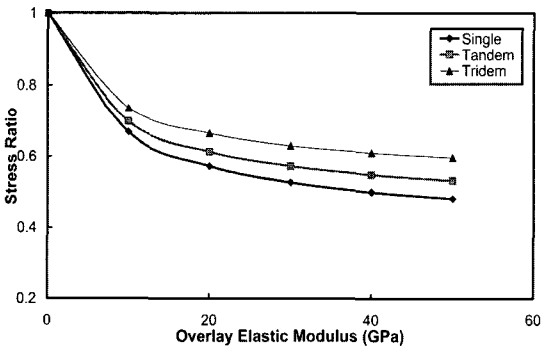


최대응력이 단축이나 복축하중에서의 최대응력 보다는 미소하게 큰 것을 알 수 있다.

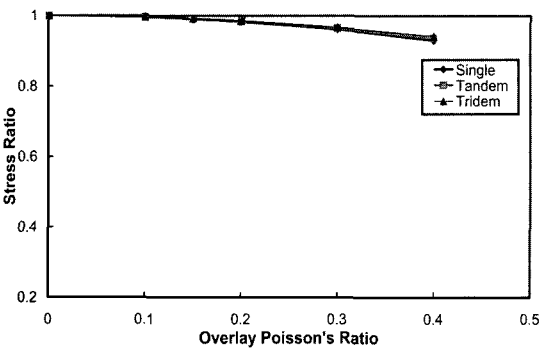
각각의 축하중에 대하여 덧씌우기의 성질이 변할 때 최대응력의 변화량을 알아보기 위하여 덧씌우기의 두께, 탄성계수, 그리고 포아송비가 각각 0일 때를 기준으로 최대응력의 변화비율을 분석하였다. 그



(a) 두께



(b) 탄성계수



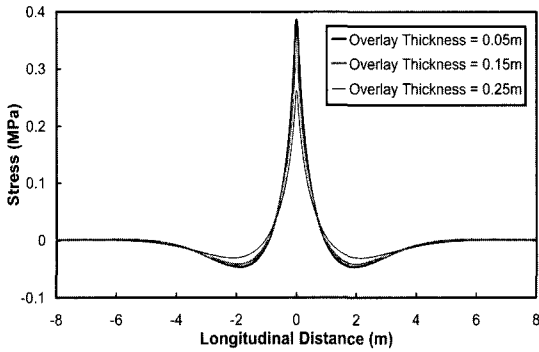
(c) 포아송비

그림 8. 부착 덧씌우기 성질에 따른 최대 응력 비율 변화

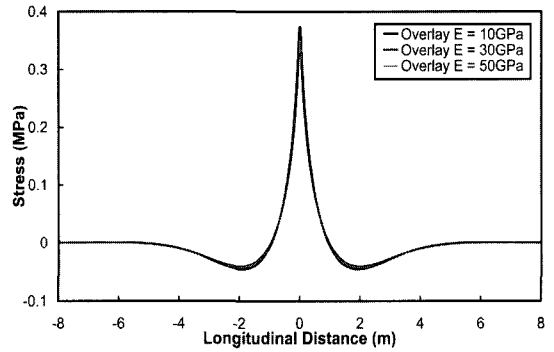
림 8(a)에 보인 바와 같이 덧씌우기의 두께가 0일 때, 즉, 덧씌우기가 없을 때의 기존 슬래브 하부의 최대응력을 1이라고 했을 때 덧씌우기 두께의 증가에 따른 최대응력의 감소비율을 각 축하중 별로 비교할 수 있다. 덧씌우기 두께가 증가할수록 최대응력의 감소량은 점점 둔해지는 경향을 보이며 이러한 최대 응력의 감소비율은 축수가 작을수록 더 커지는 것을 알 수 있다. 덧씌우기의 탄성계수가 0일 때, 다시 말하면 덧씌우기가 없을 때의 기존 슬래브의 최대응력을 1로 하고 덧씌우기 탄성계수의 변화에 따른 최대응력의 변화비율을 각 축하중별로 분석하여 그림 8(b)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 덧씌우기의 탄성계수가 증가하면 기존 슬래브의 최대응력이 급격히 감소하지만 어느 정도 이상의 탄성계수를 가지면 탄성계수의 증가에 따른 최대응력의 감소가 매우 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 최대응력의 감소비율은 축하중의 수가 작을수록 커지는 것을 알 수 있다. 덧씌우기의 포아송비는 그림 8(c)에 보인 바와 같이 증가하면 최대응력을 다소 감소시키지만 축수에 따른 감소비율의 차이는 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다.

4. 비부착 덧씌우기 포장의 거동

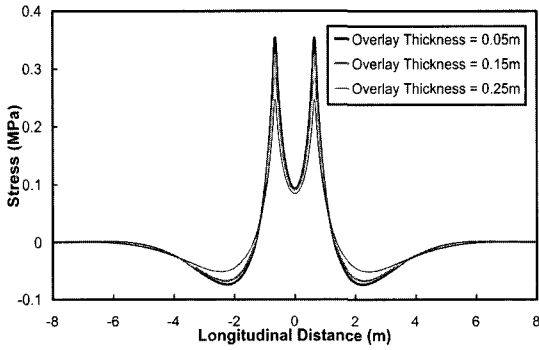
덧씌우기가 기존의 슬래브와 전혀 부착이 되어 있지 않아 수평방향으로의 미끄러짐이 자유로울 경우에 덧씌우기의 성질이 다축차륜하중이 작용할 때 기존 슬래브 하부의 응력분포에 미치는 영향을 분석하였다. 먼저 덧씌우기 두께의 변화에 따른 기존 슬래브 하부의 응력분포를 그림 9에서 보여 준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 응력분포는 축수에 관계없이 덧씌우기의 두께가 두꺼워지면 하중의 위치에서 발생하는 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 하중 주변의 부응력의 크기도 함께 감소하는 것을 알 수 있다. 복축 및 삼축하중에서 축과 축 사이에서 발생하는 축간 최소응력은 덧씌우기의 두께가 증가



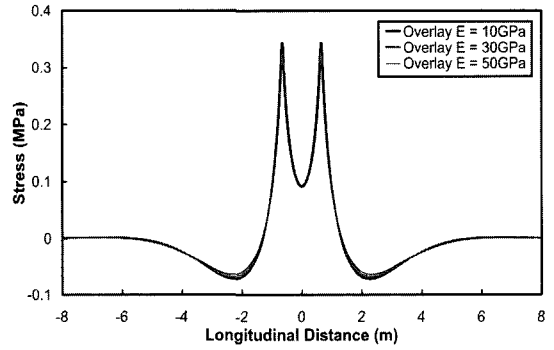
(a) 단축



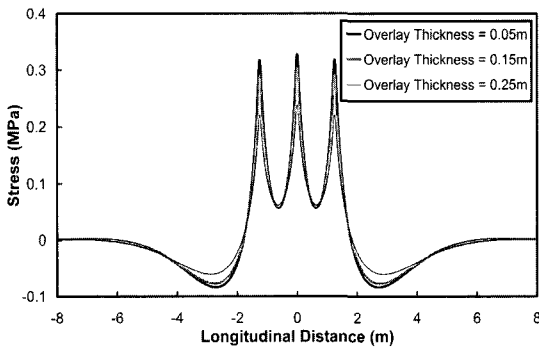
(a) 단축



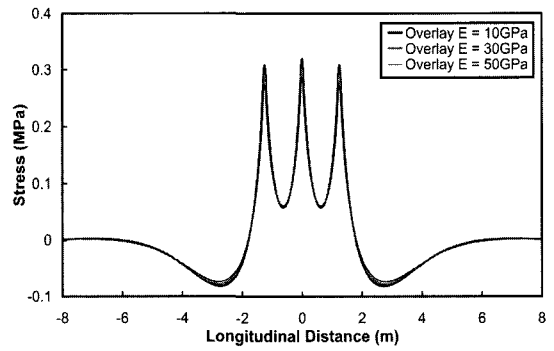
(b) 복축



(b) 복축



(c) 삼축



(c) 삼축

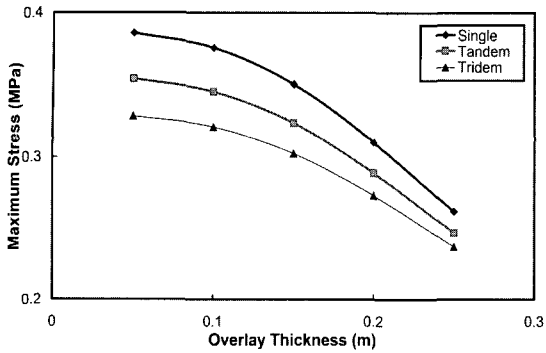
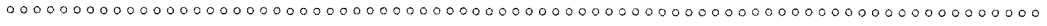
그림 9. 비부착 덧씌우기 두께에 따른 응력분포

그림 10. 비부착 덧씌우기 탄성계수에 따른 응력분포

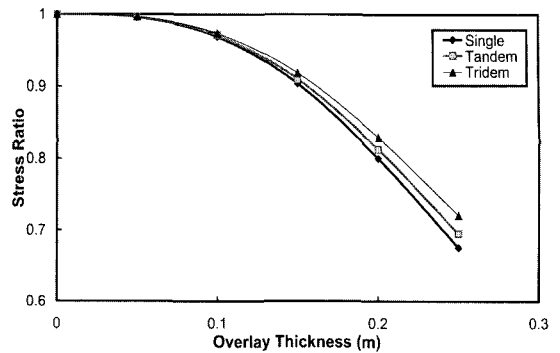
하여도 최대응력에서처럼 뚜렷이 감소하는 경향을 보이지는 않는다. 오히려 삼축하중에서는 축간 최소 응력이 덧씌우기의 두께가 증가함에 따라 매우 미소하게 증가하는 현상을 볼 수 있다.

비부착 덧씌우기의 탄성계수가 기존 슬래브 하부

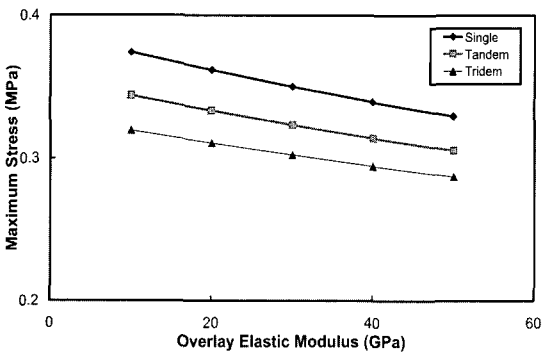
의 응력분포에 미치는 영향을 분석하여 그림 10에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 덧씌우기의 탄성 계수가 증가하면 하중의 위치에서의 최대응력이 다소 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 최대응력이 발생하는 부분을 제외한 다른 부분에서의 응력분포는



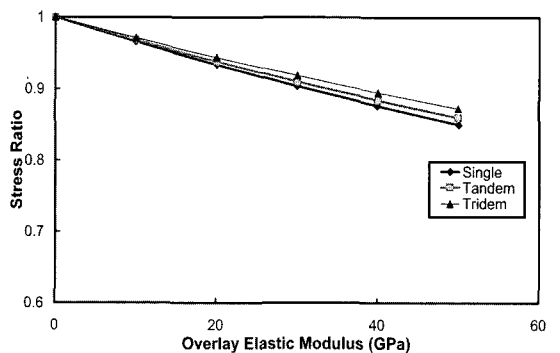
(a) 두께



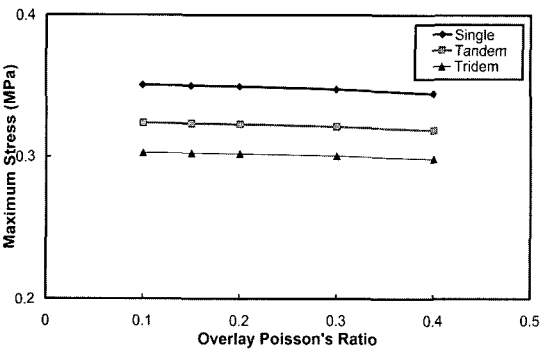
(a) 두께



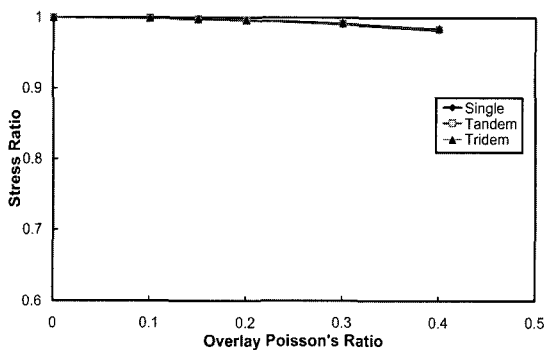
(b) 탄성계수



(b) 탄성계수



(c) 포아송비



(c) 포아송비

그림 11. 비부착 덧씌우기 성질에 따른 최대응력 변화

그림 12. 비부착 덧씌우기 성질에 따른 최대응력비율 변화

덧씌우기의 탄성계수에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

비부착 덧씌우기 포장에서 덧씌우기의 재료특성 및 축하중의 종류에 따라 기존 슬래브의 하부에 생기는 최대응력이 어떻게 변화하는지를 분석하여 그림

11에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 축하중의 수에 관계없이 덧씌우기의 두께, 탄성계수, 포아송비가 증가 할수록 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 최대응력은 덧씌우기의 성질에 관계없이 단축일 때가 가장 크며 축수가 많아질수록 작아지는 것



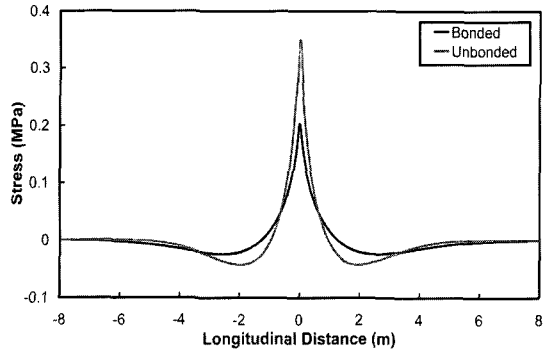
을 알 수 있다.

덧씌우기 두께 증가에 따른 최대응력의 감소는 그림 11(a)에 보인 바와 같이 두께가 증가할수록 급격해지는 것을 알 수 있다. 또한 축하중의 수에 따른 최대 응력의 차이는 덧씌우기 두께가 작을 때는 크지만 두께가 증가할수록 최대응력의 차이가 감소하는 것을 볼 수 있다. 덧씌우기의 탄성계수는 그림 11(b)에 나타낸 바와 같이 증가하면 최대응력을 거의 선형으로 감소시키는 것을 알 수 있으며 축수에 따른 최대 응력의 차이도 덧씌우기의 탄성계수 값에 관계없이 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 그림 11(c)에 보인 바와 같이 덧씌우기 포아송비의 변화는 최대응력에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

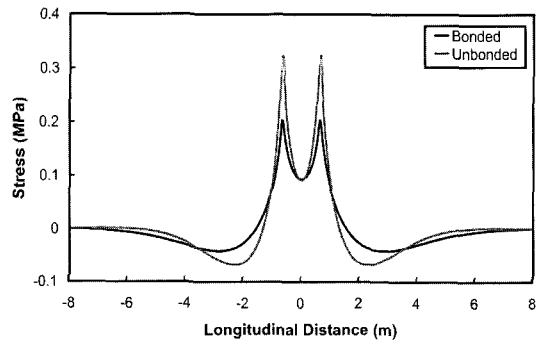
그림 12는 각각의 축하중에 대하여 덧씌우기의 성질이 변할 때 최대응력의 변화량을 보여준다. 그림 12(a)에 보인 바와 같이 덧씌우기의 두께가 증가할수록 최대응력의 감소비율은 축수가 작을수록 더 커지는 것을 알 수 있다. 덧씌우기의 탄성계수 증가에 의한 최대응력의 감소비율도 그림 12(b)에 보인바와 같이 축수가 작을수록 더 커지게 된다. 하지만 감소율의 차이는 그리 크지 않다. 덧씌우기의 포아송비는 그림 12(c)에 보인 바와 같이 증가하면 최대응력 비율을 다소 감소시키며 축수에 따른 감소비율은 거의 같은 것을 알 수 있다.

5. 부착과 비부착 덧씌우기 포장 거동 비교

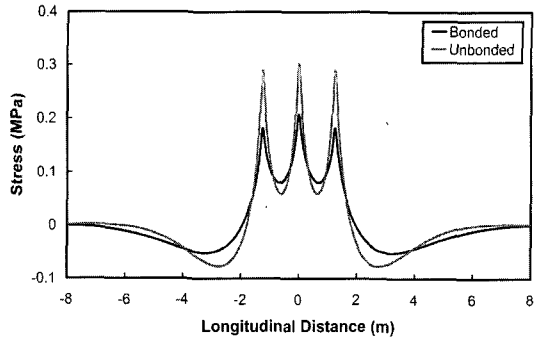
덧씌우기가 기존의 슬래브에 부착이 되었을 때와 부착이 되지 않았을 때의 기존 슬래브 하부의 응력 특성을 비교 분석하였다. 먼저 부착과 비부착 덧씌우기의 응력분포를 축하중의 수에 따라 비교하여 그림 13에 나타내었다. 하중축수에 관계없이 부착 덧씌우기를 하였을 때의 최대응력이 비부착 덧씌우기에 비해 뚜렷이 작은 것을 알 수 있다. 복축하중에서는 축간의 최소응력은 부착과 비부착 덧씌우기에서 거의 비슷해지는 것을 알 수 있다. 삼축하중에서는 축간



(a) 단축



(b) 복축

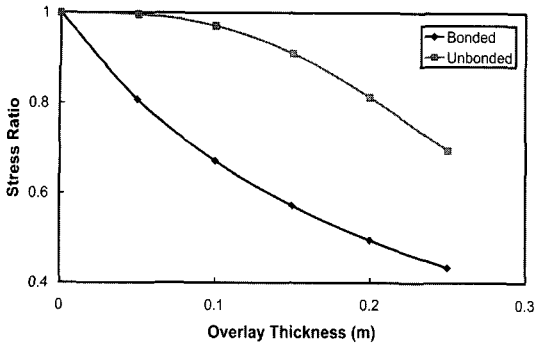


(c) 삼축

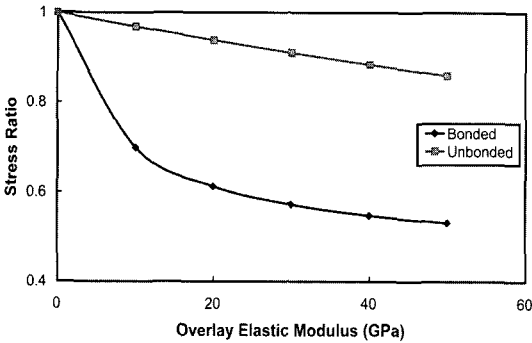
그림 13. 부착과 비부착 덧씌우기 포장의 응력분포

의 최소응력은 오히려 부착 덧씌우기에서 더 커지는 것을 볼 수 있다.

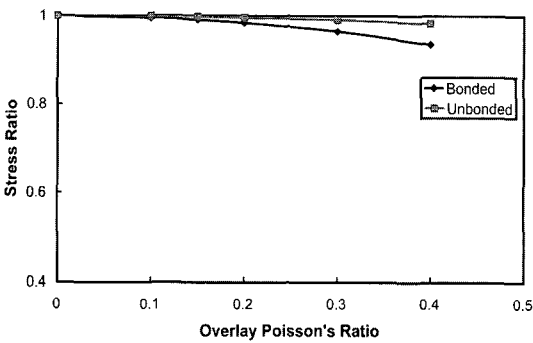
부착과 비부착 덧씌우기의 최대응력비율의 변화를 비교하여 그림 14에서 보여준다. 앞에서 이미 설명한 바와 같이 축수에 따른 결과가 비슷하기 때문에



(a) 두께



(b) 탄성계수



(c) 포아송비

그림 14. 부착과 비부착 덧씌우기 성질에 따른 최대응력비율 변화

그림은 복축하중의 결과를 비교하여 보여준다. 덧씌우기의 두께가 증가하면 그림 14(a)에 나타낸 바와 같이 부착 덧씌우기의 응력감소비율이 더 크며, 부착 덧씌우기는 응력의 감소량이 두께 증가에 따라 줄어드는데 반해 비부착 덧씌우기는 두께 증가에 따라 응

력의 감소비율이 커지는 것을 알 수 있다. 덧씌우기의 탄성계수는 그림 14(b)에서 보여주는 바와 같이 그 값이 증가하면 부착 덧씌우기에서는 응력이 급격히 감소하다가 감소율이 차차 작아지는 것을 알 수 있으며 비부착 덧씌우기는 감소비율이 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 포아송비는 그림 14(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 그 값이 증가하면 응력을 다소 감소시키는데 감소량은 부착 덧씌우기에서 더 큰 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 덧씌우기 된 콘크리트 포장의 다축 차륜하중에 대한 응력분포를 구하기 위하여 변환영역에서의 해석법을 이용하는 방법을 개발하였으며 이러한 해석법의 정확성을 유한요소법을 이용한 해석결과와 비교하여 검증하였다. 변환영역해석법을 이용하여 부착과 비부착 덧씌우기 포장의 응력분포 및 최대응력특성을 분석하였다. 차륜하중은 복륜단축, 복륜복축, 복륜삼축 등 복륜다축하중을 고려하였으며 덧씌우기의 두께, 탄성계수, 포아송비 등이 응력분포에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 연구 결과 다음과 같은 결론을 유출할 수 있었다.

- 덧씌우기 두께의 변화는 기존 슬래브의 최대응력 뿐만 아니라 광범위한 응력분포의 변화를 초래하는데 반해 덧씌우기 탄성계수의 변화는 최대응력 발생위치 부근의 응력분포에 집중적으로 영향을 미치게 된다. 이러한 현상은 비부착 덧씌우기 포장에서 더욱 더 뚜렷하게 된다.
- 덧씌우기의 두께, 탄성계수, 포아송비의 증가는 기존 슬래브 하부의 최대인장응력을 감소시키며 감소 정도는 부착 덧씌우기가 비부착 덧씌우기에 비해 더 크게 된다.
- 덧씌우기의 두께 증가에 따른 기존 슬래브의 최대 응력감소는 부착 덧씌우기에서는 두께가 증가할수록 둔해지지만 비부착 덧씌우기에서는 반대로 두께



- 가 증가할수록 응력의 감소가 더 커지게 된다.
- 덧씌우기의 탄성계수 증가에 따른 기존 슬래브의 최대응력 감소는 부착 덧씌우기 포장에서는 탄성계수의 증가 초기에 매우 크며 탄성계수가 증가할수록 감소량이 작아지게 되며 비부착 덧씌우기 포장에서는 탄성계수 증가에 따라 최대응력 감소량이 거의 같아서 최대 응력이 거의 선형적으로 감소하게 된다.
 - 덧씌우기의 포아송비 증가는 기존 슬래브의 최대응력을 감소시키기는 하지만 감소량은 그리 크지 않다.
 - 덧씌우기의 두께 및 탄성계수가 일정할 때 기존 슬래브의 최대응력은 비부착 덧씌우기에서는 항상 하중축수가 많을수록 작아지지만 부착 덧씌우기에서는 두께 및 탄성계수가 작을 때는 축수가 많을수록 최대응력이 작아지지만 두께 및 탄성계수가 어느 정도 이상이 되면 축수가 많아지면 최대응력이 커지게 된다.
 - 덧씌우기의 두께 및 탄성계수에 따른 기존 슬래브의 최대응력비율은 부착과 비부착 덧씌우기에서 모두 하중축수가 증가할수록 작아진다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 경희대학교 연구비지원에 의한 결과임.

참고문헌

ABAQUS (2005) *User's Manual Version 6.5*. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.

Kim, S. M. and McCullough, B. F. (2003) "Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude." *Engineering Structures*, Vol. 25, Issue 9, Elsevier Science Ltd., pp. 1179-1188.

Kim, S. M. and Nelson, P. K. (2004) "Experimental and numerical analyses of PCC

overlays on PCC slabs-on-grade subjected to climatic loading." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, Issue 3-4, Elsevier Science Ltd., pp.785-800.

Kim, S. M., Nelson, P. K., Ruiz, M., Rasmussen, R. O. and Turner, D. (2003) "Early-age behavior of concrete overlays on continuously reinforced concrete pavements," *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*, No. 1823, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 80-92.

Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. (2002) "Dynamic stress response of concrete pavements to moving tandem-axle loads," *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*, No. 1809, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 32-41.

Lange, D. A. and Shin, H. C. (2001) "Early age stresses and debonding in bonded concrete overlays," *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*, No. 1778, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 174-181.

Liu, C., McCullough, B. F., and Oey, H. S. (2000) "Response of rigid pavements due to vehicle-road interaction," *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No. 3, pp. 237-242.

Pister, K. S. and Dong, S. B. (1959) "Elastic bending of layered plates," *Proc. ASCE*, 84, *Journal of Engineering Mechanics Division*, pp. 1-10.

Volle, T. H. (2001) "Thin bonded concrete overlays in Illinois: Preliminary report on performance," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No. 1778, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 156-163.



Zaman, M., Taheri, M., and Alvappillai, A. (1991)
“Dynamic response of a thick plate on
viscoelastic foundation to moving loads,”
International Journal for Numerical and

Analytical Methods in Geomechanics, Vol 15,
pp. 627-647.

접 수 일 : 2007. 4. 9

심 사 일 : 2007. 4. 12

심사완료일 : 2007. 6. 12