아스팔트포장의 경계층 영향에 대한 해석적 기초연구

Fundamental Study on analysis of the Bonding Effect on Asphalt Pavement

최준성[1)*] · 조성호[2)**] · 김수일[3)***]

Choi, Jun Seong · Cho, Sung Ho · Kim, Soo Il

1. 서 론

아스팔트 포장구조체는 다층으로 이루어져 있으며, 각 층은 탄성계수나 포아송비 등의 물성이 다른 재료로 구성되어 있다. 따라서 포장체에 작용하는 하중이 하부로 전달되는 과정에서 층의 경계부분에서는 경계면 효과로 인해 상부층과는 다른 응력 및 변형률을 나타낸다. 이로 인해 하부로 전달되는 하중에 변화가 발생하여 포장체 전체의 거동에 변화가 발생한다.

과거 아스팔트 포장구조체 내의 아스팔트층과 쇄석기층, 보조기층과 같은 일반 토체 사이에서의 관계를 단지 fully bonded라는 가정 하에 도로포장설계를 하였다. 그러나 반복되는 차량하중하에서 각층에서 발생하는 변형률의 차이로 인해 fully bonded 된 경계층에 균열이 발생하여 초기의 포장 거동과는 다른 양상을 보이게 된다. 따라서 포장층의 평균적인 interface friction의 고려방안을 정립하여 보다 실제적이고 합리적인 아스팔트 포장구조체의 거동을 구현하는 것이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 선정된 대표단면에 대해 수치해석을 실시하여 interface조건의 변화에 따라 포장체에 발생하는 응력 및 변형률을 비교하고, 공용성 분석을 통해 interface 조건에 따른 포장의 수명을 예측 및 비교하여 interface의 영향 분석의 필요성을 제안하였다.

2. 수치해석을 통한 포장체의 거동 분석

도로포장구조체를 해석하는 방법은 정해를 이용한 방법과 수치해석적인 방법이 있으며, 수치해석을 이용한 대표적인 방법으로는 주로 연속체역학을 기초로 하는 다층탄성이론에 의한 해석방법과 유한요소해석에 의한 방법으로 나누어진다. 또한, 가해지는 하중이 정적하중이냐 동적하중이냐에 따라 아스팔트포장도로의 정적거동, 동적거동을 산정하기 위한 해석방법으로 구분된다(김지성, 2002).

표 1. 대표적인 다층탄성해석 프로그램(Monismith, 1992)

이 름	최대해석층수	경계층 상태	개발자
CHEV	5	bond	Chevron
ELSYM5	10	bond	University of California at Berkeley
VESYS	5	bond	FHWA-US DOT
CHEVIT	5	bond	U.S. Army
BISAR	10	bond / unbond	Shell
PDMAP	5	bond / unbond	NCHRP
KENLAYER	19	bond / unbond	University of Kentucky

*정회원 · 인덕대학 건설환경설계학과 교수 · 공학박사 · 02-901-7658(E-mail:soilpave@induk.ac.kr)

**정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 · 석사과정 · 02-312-5101(E-mail:chosungho@yonsei.ac.kr)

***정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 · 공학박사 · 02-2123-2800(E-mail:geotech@yonsei.ac.kr)

아스팔트포장에서 포장 체를 다층구조모델로 보는 역학적 설계법의 가장 중요한 가정사항은 각 층 사이가 완전 접합(fully bonded)된 것으로 가정한다는 것이다. 이러한 가정은 포장 체의 모델 링과 계산 절차를 간단하게 해준다는 장점이 있다. 일부 모델들은 1(bond)과 0(unbond)의 접합 계수(bonding coefficient)를 사용하여 경계층의 상태를 모델링한다. 그러나 경계층의 상태를 측정할 수 있는 표준화된 시험방법이 없기 때문에 접합 계수를 선정하는 것이 쉽지 않다. 따라서 경계층의 접합 상태를 정확히 모델링하는 것이 포장의 실제 거동을 이해하는데 중요한 사항이다(Romanoschi and Metcalf, 2001). 표 1은 대표적인 다층탄성프로그램을 나타내었다.

2.1 Interface에 영향을 미치는 역학정수

기존 연구결과를 살펴보면, Uzan(1976)은 interface를 순수전단력이 작용하는 유한두께를 갖는 층으로 정의하였다. 현재 일반적으로 아스팔트포장에서는 rough interface로, 시멘트콘크리트 포장에서는 smooth interface로 가정하여 설계하고 있으나, 실제 현장관측에 의하면 층 사이에는 서로 다른 크기의 마찰이 존재하는 것으로 알려져 있고, interface에 영향을 주는 변수로는 전단응력-변위곡선의 기울기를 나타내는 interface reaction modulus(K), 전단강도(Smax), 그리고 파괴후의 마찰계수(μ) 등으로 알려져 있다.

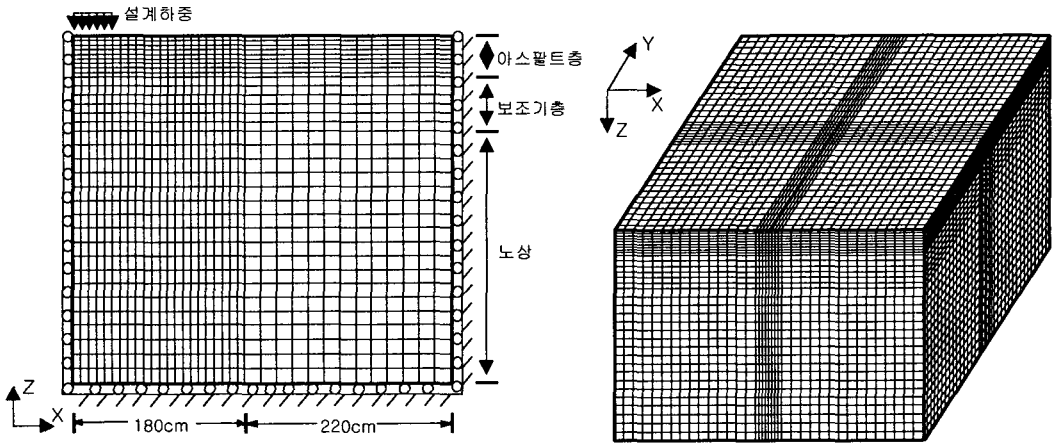
통과차량의 차륜에 의해서 포장체에 하중이 전달되고, 이 하중은 포장 표면에 연직한 방향으로 작용하는 하중과 수평방향으로 작용하는 하중을 포함하여야 한다. 수평하중은 이동하는 차량의 타이어에 의해서 표층에 전달된다. 실제 수평하중은 차량이 진행하면서 타이어와 포장의 표면에서 발생하는 마찰력을 의미한다. 그러나, 수평하중의 영향에 대한 인식이 증대되고 있음에도 불구하고, 포장도로에서 수평하중의 크기를 정량화하는 연구가 미흡하였다. Cardoso et al. (1995)는 상파울로(São Paulo)의 고속도로 5km 구간에 대해서 마찰력 측정을 실시하여, 타이어와 포장 표면의 평균 마찰계수 μ=0.48을 얻었다.

2.2 해석 조건

Interface의 상태에 따라 포장체의 거동이 어떻게 변화하는가를 분석하기 위해 다층탄성프로그램과 유한요소해석 프로그램을 이용하여 bond와 unbond 상태에서의 포장체의 거동을 분석하였다. 본 연구에서는 다층탄성프로그램으로는 표 1에서 보인 프로그램 중 KENLAYER를, 유한요소해석프로그램은 상용 유한요소해석프로그램인 ABAQUS를 각각 사용하였다. KENLAYER에서는 interface를 bond와 unbond의 두 가지로 구분하며, ABAQUS에서는 bond 상태를 의미하는 tied와 두 층 사이의 마찰계수를 사용하는 unbond로 나뉘어진다.

표 2. 대표단면

물성 \ 층		AC 층	보조기층	노상
두께 (cm)	상	45	60	-
	중	30	40	-
	하	15	20	-
탄성계수 (kgf/cm^2)	상	70000	5000	3000
	중	40000	3000	1500
	하	10000	1000	500
포아송비		0.30	0.35	0.40
단위중량 (kgf/cm^3)		0.00235	0.00230	0.00191



(a) 축대칭모형 (b) 3차원 모형

그림 1. 해석단면 및 하중분포

해석단면으로는 243개 대표단면 중 최상의 상태인 아스팔트층의 두께가 45 cm, 보조기층(쇄석기층 포함)이 60 cm, 노상이 반무한한 3층 구조를 선택하였다. 또한 3층 해석을 위한 등가 아스팔트층의 탄성계수를 70000 kgf/cm^2, 보조기층의 탄성계수는 5000 kgf/cm^2, 노상의 탄성계수는 3000 kgf/cm^{2}로 선정하였다. 포아송비는 아스팔트층을 0.30, 보조기층을 0.35, 노상을 0.40으로 취하였으며, 단위중량은 각 층에 대하여 각각 0.00235 kgf/cm^3, 0.00230 kgf/cm^3, 0.00191 kgf/cm^{3}로 가정하였다(최준성, 1998). 수치해석에 사용된 모델은 그림 2와 같이 연직하중만이 작용하는 경우는 axis-symmetric으로 모델을 구성하여 KENLAYER와 ABAQUS를 이용하였으며, 수평하중이 작용하는 경우는 ABAQUS를 이용하여 3차원 모델을 구성하였다. 사용된 모델은 본 연구진에 의해 발표된 기존연구(백종은 외, 2001; 최준성 외, 2003; 최준성 외, 2003)에서 검증된 모델링을 사용하였다. 포장체에 가해지는 하중으로 axis-symmetric 모델에서는 설계하중과 같은 반경 15 ㎝, 접지압 5.8 ㎏/㎠의 원형 등분포하중으로 가정하였으며, 3차원 모델에서는 axis-symmetric 모델의 원형하중과 동일한 재하면적과 크기를 갖도록 하여, 재하 면적 30×40 cm, 접지압 3.42 ㎏/㎠의 연직하중과 Cardoso et al. (1995)의 연구 결과와 유사한 μ=0.48을 사용하여 1.71 ㎏/㎠의 수평하중으로 가정하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 연직하중이 작용하는 경우

선택한 단면과 물성에 대해 ABAQUS와 KENLAYER를 이용하여 수치해석을 실시한 결과를 그림 2 ~ 그림 4에 나타내었다. 그림 2은 interface를 bond와 unbond(ABAQUS에서는 μ=0.5) 상태로 둔 경우의 포장체에 발생한 깊이별 처짐을 나타내었다. Bond인 경우 포장 표면에서의 처짐은 ABAQUS, KENLAYER가 각각 79.8, 77.7㎛로 나타났으며, Unbond인 경우 ABAQUS, KENLAYER는 86.7, 87.2㎛로 Bond인 경우와 비교하여 최대 10.9%의 차이를 보임을 알 수 있었다.

그림 3과 그림 4는 interface의 상태에 따른 깊이별 인장변형률과 연직변형률을 나타낸 것으로 공용성에 대한 평가를 실시한 결과 표 3과 같이 최대 6배 정도의 공용수명 차이를 보임을 알수있다.

$$N_f = 0.0796(\varepsilon_t)^{-3.291}(E_1)^{-0.854} \quad (1)$$

$$N_d = 1.365\times10^{-9}(\varepsilon_c)^{4.477} \quad (2)$$

여기서, N_d, N_f = 공용횟수

$\varepsilon_t, \varepsilon_c$ = 아스팔트층의 인장변형률, 노상의 압축변형률

E_1 = 아스팔트층의 탄성계수

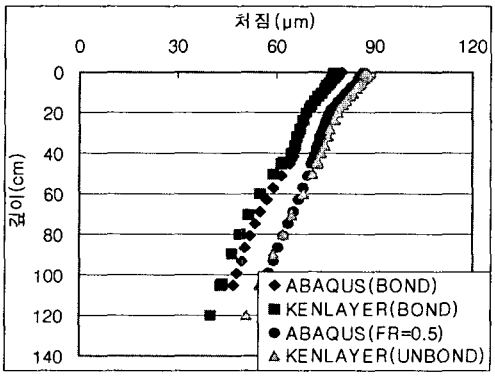
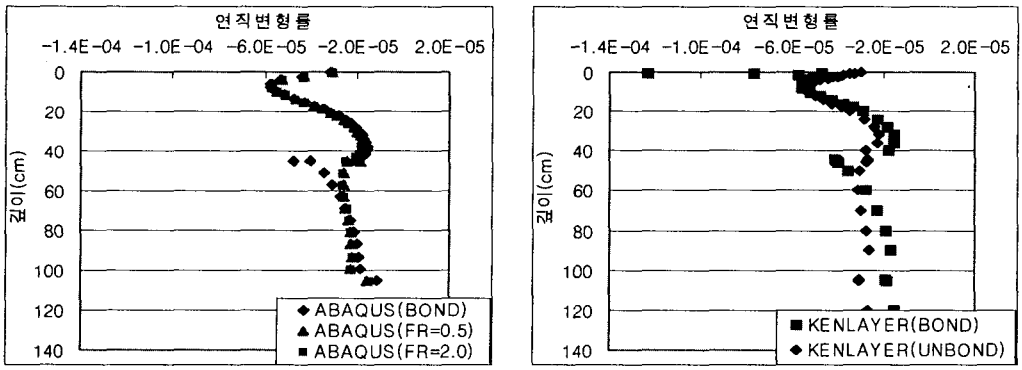
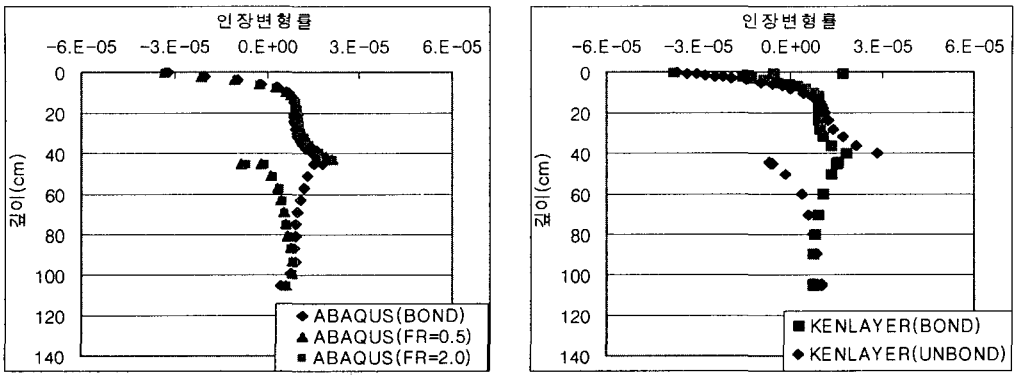


그림 2. 경계층 상태에 따른 깊이별 처짐



(a) 유한요소해석 (b) 다층탄성해석

그림 3. 경계층 상태에 따른 깊이별 연직변형률



(a) 유한요소해석 (b) 다층탄성해석

그림 4. 경계층 상태에 따른 깊이별 인장변형률

표 3. 프로그램 해석 결과에 따른 공용수명

프로그램	파괴유형	Bond(대)	Unbond(대)
유한요소해석	피로파괴	2.613×10^{9}	1.375×10^{9}
	소성파괴	7.040×10^{13}	2.294×10^{13}
다층탄성해석	피로파괴	2.474×10^{9}	5.366×10^{8}
	소성파괴	1.259×10^{14}	2.966×10^{13}

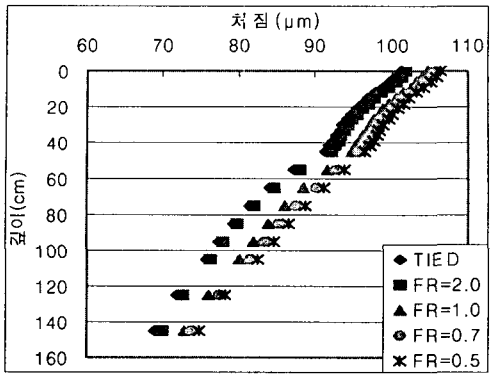
3.2 연직하중과 수평하중이 작용하는 경우

선택한 단면과 물성에 대해 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 실시하였으며, interface 조건으로는 bond 상태에 해당하는 tied와 unbond 상태에 대해서 해석을 수행하였다. unbond 상태는 마찰계수 μ가 2.0, 1.0, 0.7, 0.5인 경우에 대해서 해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

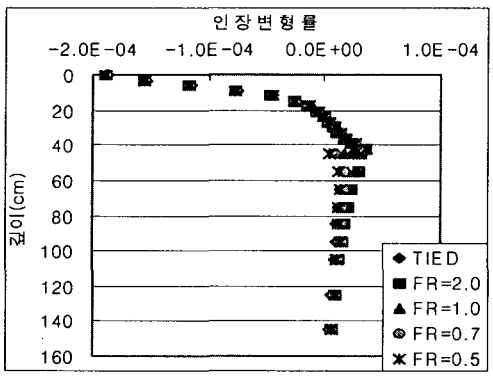
포장 표면에서의 처짐은 bond인 경우가 가장 작은 값인 101.2 ㎛를 보였으며, 마찰계수 μ가 0.5인 경우가 가장 큰 처짐 105.7 ㎛를 보이나 bond인 경우와 비교하여 약 4 ㎛의 차이로 별 차이가 없음을 알 수 있었다. 아스팔트층하부의 인장변형률과 노상상부의 압축변형률을 표 3에 나타내었고, 이를 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 공용성 분석을 실시하였다. 공용성 분석결과, interface의 조건에 따라 bond인 경우 3.83×10^{8} 대이며, μ=0.5인 경우는 2.481×10^{8} 대로 bond의 경우에 비해 약 35 % 정도 감소된 공용성을 보였으며, 3.647×10^{8} 대의 공용기간을 보인 μ=2.0인 경우에는 약 32 % 정도 공용성이 감소함을 알 수있다.

표 3. interface 조건에 따른 변형률과 공용수명

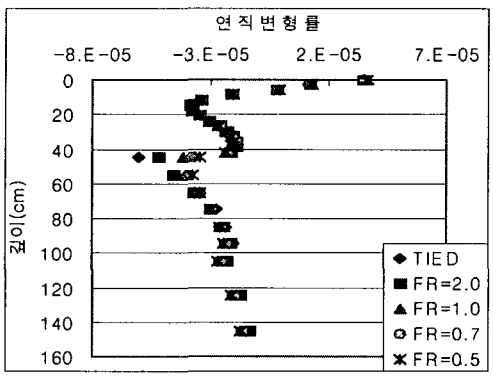
	tied	μ=2.0	μ=1.0	μ=0.7	μ=0.5
인장변형률	3.17E-05	3.22E-05	3.45E-05	3.55E-05	3.62E-05
연직변형률	2.26E-05	2.33E-05	2.56E-05	2.65E-05	2.71E-05
피로파괴	3.830×10^{8}	3.647×10^{8}	2.904×10^{8}	2.655×10^{8}	2.481×10^{8}
소성파괴	8.548×10^{11}	7.529×10^{11}	4.946×10^{11}	4.245×10^{11}	3.798×10^{11}



(a) 깊이별 처짐



(b) 깊이별 인장변형률



(c) 깊이별 연직변형률

그림 5. 경계층의 상태에 따른 유한요소해석 결과

4. 결론 및 추후연구

본 연구에서는 선정된 대표단면에 대해 interface의 조건을 변화하여 포장체에 발생하는 응력 및 변형률 그리고 처짐을 비교하고, 공용성 분석을 통해 interface 조건에 따른 포장의 수명을 예측 및 비교하여 interface의 영향을 살펴보았다.

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Interface를 bond와 unbond(ABAQUS에서는 fr=0.5) 상태로 둔 경우 포장체에 발생한 깊이별 처짐을 분석한 결과, bond인 경우 포장 표면에서의 처짐은 ABAQUS, KENLAYER가 각각 79.8, 77.7 ㎛로 나타났으며, unbond인 경우 86.7, 87.2 ㎛로 bond인 경우와 비교하여 최대 10.9 %의 차이를 보임을 알 수 있었다.

2. 연직하중만 작용한 경우, interface의 상태에 따른 깊이별 인장변형률과 연직변형률을 통해 공용성 분석

을 실시한 결과, ABAQUS의 경우 통과횟수기준 bond와 unbond에서 각각 2.613×10^9 , 1.375×10^9 대로 약 2배의 공용수명을 보임을 알 수 있었다. 또한 KENLAYER의 경우 각각 2.474×10^9, 5.366×10^8대의 공용수명을 보여 약 4.6배의 차이를 보였다.

3. 연직하중과 수평하중이 작용한 경우, interface의 상태에 따른 깊이별 인장변형률과 연직변형률을 통해 공용성 분석을 실시한 결과, interface의 조건에 따라 bond인 경우 3.83×10^8 대이며, μ=0.5인 경우는 2.481×10^8 대로 bond의 경우에 비해 약 35 % 정도, 3.647×10^8 대의 공용기간을 보인 μ=2.0인 경우에는 약 32 % 정도 공용성이 각각 감소하였다.

수치해석 프로그램을 이용하여 경계층의 조건에 따른 포장체의 거동과 이에 따른 포장의 공용성 분석을 실시한 결과, 경계층의 상태가 포장 수명에 영향을 미침을 알 수 있었으며, 추후 이에 대한 추가적 모델링과 경계면의 마찰계수에 대한 실내 및 현장 실험이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 김지성(2002), "보조기층재료의 비선형성을 고려한 아스팔트 콘크리트 포장체 해석", 석사논문, 연세대학교.

2. 백종은, 최준성, 김수일(2001), "FWD 시험의 수치모델을 이용한 아스팔트 포장구조체의 기반암 깊이 추정", 대한토목학회 논문집, pp. 643-654.

3. 최준성(1998), "동적표면처짐의 의사정적해석에 의한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정", 박사논문, 연세대학교.

4. 최준성, 신대영, 김수일(2003), "수치해석과 현장시험을 통한 주행하중의 이격거리 영향 분석", 대한토목학회 논문집, pp.167-177.

5. 최준성, 최성록, 김수일(2003), "FWD 하중판 분할영향을 고려한 연성포장체 해석에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, pp.179-190.

6. Cardoso, S.H; F.A.A.; Aps, M.; Marcon, A.F. & Colen, E.(1995), "Uso do mu-meter para a availiação do coeficiente de atrito em pavimentos de redovias e vias urvanas". 29ª RAPv. Vol. 4, pp. 79-93, Caiabá/Mato Grosso.(in Portuguese)

7. Uzan, J.(1976), "Influence of the Interface Condition on Stress Distribution in a Layered System", Transportation Research Record 616, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 71-73.