



아스팔트포장의 경계층 영향에 대한 해석적 기초연구

Fundamental Study on Analysis of the Bonding Effect on Asphalt Pavement

최 준 성

Choi, Jun Seong

Abstract

To examine adequacy of existing multi-layer elastic analysis of layer interface conditions, this study compared outputs of finite element analysis and multi-layer elastic analysis as vertical load was applied to the surface of asphalt pavements. Structural pavement analysis considering influence of a horizontal load was also carried out in order to simulate passing vehicle loads under various interface conditions using ABAQUS, a three dimensional finite element program. Pavement performance depending on interface conditions was quantitatively evaluated and fundamental study of layer interface effect was performed in this study.

As results of the study, if only vertical load is applied, subdivision of either fully bonded or fully unbonded is enough to indicate interface condition. On the other hand, when horizontal load is applied with vertical load, pavement behavior and performance are greatly changed with respect to layer interface condition.

Keywords : asphalt pavement structures, interface condition, horizontal load, finite element analysis, performance

요 지

본 연구에서는 기존의 아스팔트 콘크리트 포장구조해석에 사용되는 다층탄성해석에서 경계면의 영향을 평가하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS와 다층탄성 프로그램인 KENLAYER를 이용하여 연직하중이 작용하는 경우의 경계면 특성에 따른 포장성능에 관한 비교·분석을 실시하였다. 그리고 실제 주행하중에 의해 발생하는 수평하중이 포장체에 미치는 영향을 고찰하기 위해 수평하중을 고려한 포장구조해석도 실시하였다. 이를 위해 ABAQUS를 이용하여 경계면 상태에 따른 포장구조체 내부에서 발생하는 변형률 및 처짐을 분석하고, 경계면의 접합상태에 따른 효과를 분석하였다. 이러한 과정을 통해 경계면 상태에 따른 포장체의 공용성에 관한 기존의 정성적 평가로부터 수치해석을 통해 정량적 평가를 실시하고, 경계면 효과에 대한 기본연구를 실시하였다.

연구 결과, 기존 해석에서 사용되는 연직하중만 작용하는 경우와 실제 주행하중을 모사하는 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 경우, 수평하중의 작용으로 인해 공용횟수가 약 1/300로 감소하여 포장구조해석시 수평하중을 고려한 해석이 절실히 필요함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 아스팔트 콘크리트 포장구조체, 경계면 영향, 수평하중, 유한요소해석, 공용성, 포장구조체 공용횟수

* 정회원 · 인덕대학 건설환경설계학과 교수 · 공학박사



1. 서론

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

과거 아스팔트포장 구조체 내의 아스팔트층과 쇠석기층, 보조기층과 같은 일반 토체 사이에서의 관계를 단지 완전접합이라는 가정 하에 포장설계를 하였다. 그러나 반복되는 차량하중으로 인해 각층에서 발생하는 변형률의 차이로 인해 완전접합된 경계층에 균열이 발생하여 초기의 포장 거동과는 다른 양상을 보이게 된다. 따라서 포장층의 평균적인 경계면 마찰계수(interface friction)의 산정방안을 정립하여 보다 실제적이고 합리적인 아스팔트포장 구조체의 거동을 구현하는 것이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 선정된 대표 단면에 대해 수치해석을 실시하여 경계면 조건의 변화에 따라 포장체에 발생하는 응력 및 변형률을 비교하고, 공용성 분석을 통해 경계면 조건에 따른 포장의 수명을 예측 및 비교하여 경계면의 영향 분석의 필요성을 강조하였다.

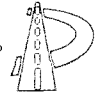
2. 수치해석을 통한 포장체의 거동 분석

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

아스팔트포장에서 포장체를 다층구조모델로 보는 역학적 설계법의 가장 중요한 가정사항은 각 층 사이가 완전 접합(fully bonded)된 것으로 가정한다는 것이다. 이러한 가정은 포장체의 모델링과 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 접합상태를 정확히 모델링하는 것이 포장의 실제 거동을 이해하는데 중요한 사항이다(Romanoschi and Metcalf, 2001). 표 1은 대표적인 다층탄성 프로그램들을 설명한 것이다.

표 1. 대표적인 다층탄성해석 프로그램(Monismith, 1992)

이름	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



2.1 Interface에 영향을 미치는 역학정수

기존 연구결과를 살펴보면, Uzan(1976)은 경계면을 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, 경계면에 영향을 주는 변수로는 전단응력-변위곡선의 기울기를 나타내는 interface reaction modulus(K), 전단강도(S_{max}), 그리고 파괴후의 마찰계수(μ) 등으로 발표되었다.

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(SanPaulo)의 고속도로 5km 구간에 대해서 마찰력 측정을 실시하여 타이어와 포장 표면의 평균 마찰계수 $\mu=0.48$ 을 얻었다.

Romanoschi and Metcalf(2001)는 경계면의 영향을 분석하기 위해 직접전단시험을 실시하여, 그림 1의 시험 결과를 얻었다. 일반적인 전단응력과 변위 관계를 나타낸 그림 1을 다음과 같이 3개의 구간으로 나눌 수 있다.

- 선형전단구간(linear shear panel, 0-1)
interface reaction modulus가 큰 값을 갖는 선형 거동으로 전단응력이 증가함에 따라 전단변위가 증가한다. 경계면에서의 전단응력이 S_{max} 에 도달할 때 경계면의 파괴가 발생한다.
- 파괴후구간(postfailure panel, 1-2)

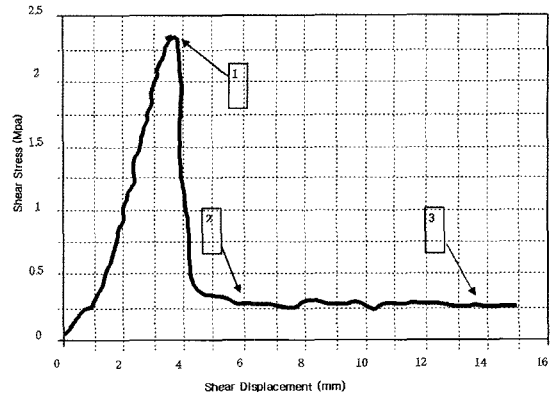


그림 1. 실험을 통한 전단응력-변위 관계도 (Romanoschi and Metcalf, 2001)

경계면에서 두 층이 완전히 분리되지 않은 상태에서 경계면에서는 일정수준의 전단 저항이 발현된다.

마찰구간(friction panel, 2-3)

경계면에서 두 층이 완전히 분리된 상태에서 마찰 모델이 두 층의 접합의 특성을 결정한다.

아스팔트층 사이의 경계면을 설명하기 위해 제안된 경계면 구성모델은 그림 1의 선형전단구간과 마찰구간의 2단계로 나누어 설명될 수 있다. 1단계는 전단응력이 경계면의 전단강도(S_{max})보다 작은 경우로써, 이 경우 경계면에서의 전단변위 또는 두 층의 상대변위가 전단응력에 비례(Goodman model)하며, Uzan(1976)이 사용한 식과 동일한 식(1)이 적용된다.

$$\tau = K \cdot d \quad (1)$$

여기서, K : interface reaction modulus

d : shear displacement

2단계는 경계면이 파괴된 후에 시작된다. 두 층 사이의 상호작용은 마찰계수 μ 로 표현되는 단순 마찰로 설명된다(Romanoschi and Metcalf, 2001)



2.2 해석 조건

경계면의 상태에 따라 포장체의 거동이 어떻게 변화하는가를 분석하기 위해 다층탄성프로그램과 유한요소해석 프로그램을 이용하여 bond와 unbond 상태에서의 포장체의 거동을 분석하였다. 본 연구에서는 다층탄성 프로그램으로는 표 1에서 보인 프로그램 중 KENLAYER 를, 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS 를 각각 사용하였다. KENLAYER에서는 경계면을 bond와 unbond의 두 가지로 구분하며, ABAQUS 에서는 접합상태를 의미하는 tied와 두 층 사이의 마찰계수를 사용하는 unbond로 나뉘어진다.

유한요소해석에 있어서 요소의 크기는 작을수록 정확한 해석이 가능하나 이는 총 요소수의 증가를 가

져오고 해석시간의 증가를 초래한다. 따라서 본 연구에서는 경제적인 해석시간과 보다 정확한 해석 값을 얻기 위하여 요소의 구성시 주 해석대상이 되는 부분을 더욱 세밀하게 설정하였다. 해석결과 유한요소망의 너비가 6m 이상일 경우에는 해석결과에 영향을 주지 않으므로(이강진, 1999) 해석시간의 경제성을 고려하여 유한요소망의 폭을 하중 중심으로부터 6m로 구성하였다.

해석단면으로는 표 2의 대표단면중 중수준의 단면인 아스팔트층의 두께가 30cm, 보조기층(쇄석기층 포함)이 40cm, 노상이 반무한한 3층 구조를 선택하였다. 또한 3층 해석을 위한 각 층의 탄성계수 역시 경계면 상태변화에 따라 가장 민감한 단면으로 파악된 등가 아스팔트층의 탄성계수를 40000kgf/cm², 보조기층의 탄성계수는 3000kgf/cm², 노상의 탄성

표 2. 대표단면

물성		층		
		AC 층	보조기층	노상
두 계 (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

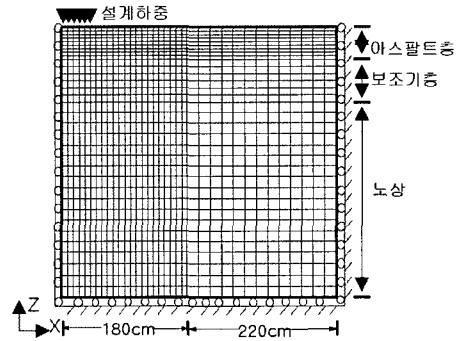
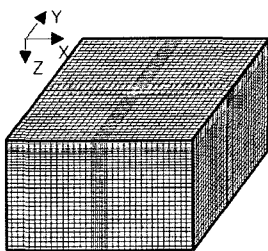
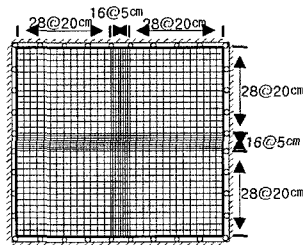


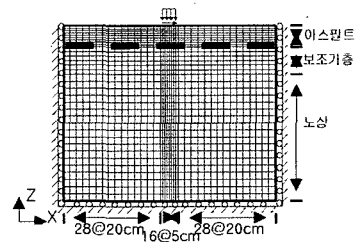
그림 2. 2차원 해석단면 및 하중분포



(a) 3차원 유한요소망



(b) 유한요소망의 평면도



(c) 주행방향에서 본 유한요소망

그림 3. 3차원 해석단면 및 하중분포



계수는 1500kgf/cm²로 선정하였다. 포아송비는 아스팔트층을 0.30, 보조기층을 0.35, 노상을 0.40으로 취하였으며, 단위중량은 각 층에 대하여 각각 0.00235 kgf/cm³, 0.00230 kgf/cm³, 0.00191 kgf/cm³로 가정하였다(최준성, 1998). 수치해석에 사용된 모델은 그림 2와 같이 연직하중만이 작용하는 경우는 axis-symmetric으로 모델을 구성하여 KENLAYER와 ABAQUS를 이용하였으며, 수평하중이 작용하는 경우는 그림 3과 같이 ABAQUS를 이용하여 3차원 모델을 구성하였다.

실제 포장체에 가해지는 하중은 타이어 접지압의 분포형상에 따라 달라지나 이는 현가장치, 도로표면 거칠기 및 타이어 종류등 많은 변수들에 의해 다르므로 본 연구에서는 포장도로설계시 사용되는 원형등분포하중과 실제도로에서 주행하중시험시 페인트칠로 측정된 타이어 접지면적을 이용하였다. 또한 수평하중의 경우, 교량설계시 제동하중을 주행하중의 10%로 가정하나 본 연구에서는 최대하중이 가해지는 경우를 모사하고자 Cardoso et al. (1995)가 측정된 마찰력으로부터 산정하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 모델하중은 axis-symmetric 모델에서는 설계하중과 같은 반경 15cm, 접지압 5.8 kg/cm²의 원형 등분포하중으로 가정하였으며, 3차원 모델에서는 axis-symmetric 모델의 원형하중과 동일한 재하면적과 크기를 갖도록 하여, 재하 면적 30×40cm, 접지압 3.42kg/cm²의 연직하중과 Cardoso 등 (1995)의 연구 결과의 $\mu=0.48$ 을 사용하여 1.71 kg/cm²의 수평하중으로 가정하였다.

2.3 현장 주행시험 결과를 이용한 수치해석모델의 검증

본 연구에서 제작한 수치모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 수도권 외곽순환 고속도로 중 김포구간에 실시된 현장 주행시험에서 실측한 깊이별 처짐 자료(이강진, 1998)를 이용하였다. 시험이 실시된 구간은 수도권 외곽순환 고속도로 중 김포시 고초면에

위치하는 구간으로 김포대교 남쪽 하행선 구간이며, 표 3은 시험위치에 대한 포장단면 자료이다. 포장내부의 처짐을 측정하기 위해 각 층의 하단부에 MDD(Multi Depth Deflectometer)를 1개씩 총 4개를 설치하였다. 주행시험에 사용된 주행하중은 정적 축중계로 측정된 단축 8.2ton의 트럭이 사용되었으며, 해석에 사용된 포장체의 물성은 MDD 깊이별 상대처짐을 이용하여 정적으로 역산한 각 층의 탄성계수가 사용되었다(이강진, 1998).

2.2절에서 제안된 유한요소망과 주어진 현장 조건에 따라 수치해석을 진행하였으며, 신설 포장상태이

표 3. MDD를 이용해 얻어진 포장단면 자료

물성 \ 층	표 층	기 층	보조기층	노 상	
두께(cm)	10	25	45	770	
탄성계수(kg/cm ²)	Site1	3,000	6,500	3,300	1,100
	Site2	3,400	6,800	4,650	1,150
	Site3	6,100	9,500	4,700	1,170
	Site4	7,400	13,800	4,800	1,200
포아송비	0.30	0.30	0.35	0.40	
단위중량(kg/cm ³ , ×10 ⁻³)	2.33	2.33	2.25	2.04	

표 4. 수치해석에 의한 처짐과 실측처짐 비교

구간 \ 매설위치	No.1	No.2	No.3	No.4	
Site1	해석(μm)	259.3	161.6	83.7	20.7
	실측(μm)	271.0	165.3	89.9	19.9
	오차(%)	4.31	2.26	6.93	3.75
Site2	해석(μm)	234.6	145.8	77.2	19.1
	실측(μm)	227.3	137.5	76.7	17.8
	오차(%)	3.10	0.84	0.67	7.01
Site3	해석(μm)	193.5	129.1	72.2	18.1
	실측(μm)	186.5	125.2	75.3	18.0
	오차(%)	3.64	3.01	4.08	0.66
Site4	해석(μm)	168.5	116.8	67.9	17.0
	실측(μm)	176.0	106.9	64.6	17.1
	오차(%)	4.27	5.34	4.90	0.33

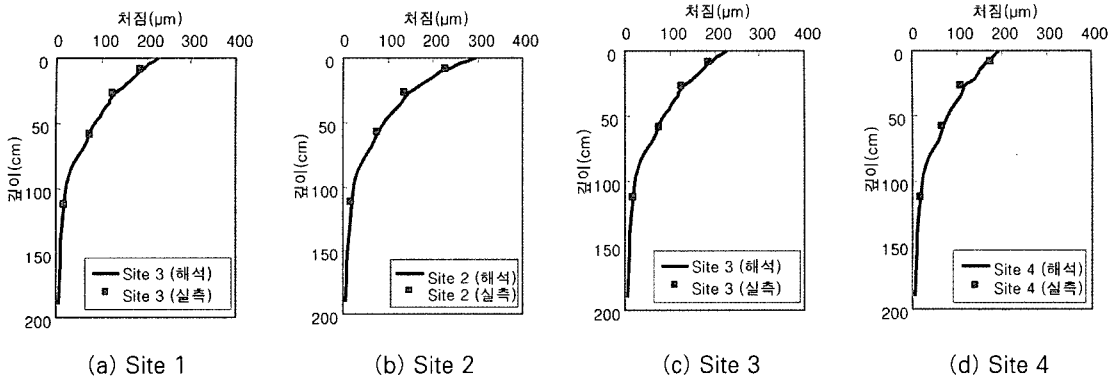
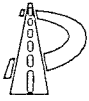


그림 4. 수치해석에 의한 깊이별 처짐과 MDD 실측처짐

므로 경계면의 상태를 접합으로 판단하여 해석을 실시하였다. 주행하중에 대한 보다 정확한 모사를 위해 연직하중과 수평하중을 작용하중으로 고려하였으며, Cardoso 등(1995)이 브라질 상파울로(SanPaulo)의 고속도로 5km 구간에 대해서 마찰력 측정을 실시한 결과에 기초하여 본 연구에서는 수평하중의 크기를 연직하중의 50%로 작용시켰다.

표 4와 그림 4는 수치해석의 결과와 MDD를 이용한 실측결과를 비교한 것으로 최대 오차는 Site 4의 노상에서 7.01%의 차이가 발생하였으나, 본 연구에서 고려 대상인 아스팔트층 하부에서 발생한 처짐의 상대오차는 5.34%로 본 연구에 사용된 3차원 수치해석 모델은 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

3. 수치해석 결과

본 절에서는 2절에서 현장데이터를 통해 검증된 접합상태와 비접합상태를 모사화할 수 있도록 개발된 수치해석 모델을 기존 연직하중하에서 접합상태를 해석할 수 있는 KENLAYER 프로그램 해석결과와 비교하였다. 또한 주행차량의 하중특성 영향을 분석하고자 기존 설계 및 도로해석에 사용되고 있는 연직하중만이 가해지는 경우와 연직하중 및 수평하중이 동시에 작용하는 경우를 정량적으로 비교하고자 도로의 공용성을 나타내는 공용횡수를 산정하였다.

동일기준에서의 공용성분석을 위하여 기존 여러 공용성 모델중 AI모델을 선정하여 서로 다른 두 경우의 하중에 대해 해석을 실시하였다.

3.1 연직하중이 작용하는 경우

해석에 사용된 하중은 8.2ton 단축하중을 표준하중으로 정의하였으며, 하중 재하면을 원형등분포하중으로 바꾸기 위하여 접촉면의 반경이 15cm인 원형으로, 접지압이 5.8kg/cm²으로 환산하였다. 경계면 조건은 접합 상태와 비접합 상태를 모사하기 위하여 접합조건과 마찰계수 μ 를 각각 사용하였다.

선택된 단면과 물성에 대해 KENLAYER와 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 실시한 결과를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5와 그림 6은 경계면을 접합과 비접합(ABAQUS에서는 $\mu=0.3$) 상태로 둔 경우의 포장체에 발생한 깊이별 처짐과 인장변형률이다. 접합 상태인 경우 포장 표면에서의 처짐은 ABAQUS, KENLAYER가 각각 178.0, 182.3 μ m로 나타났으며, 비접합 상태인 경우 ABAQUS, KENLAYER는 200.4, 202.9 μ m로 접합상태인 경우와 비교하여 최대 11.2%의 차이를 보임을 알 수 있었다. 또한 피로파괴의 원인이 되는 아스팔트층 하부에서 발생된 인장변형률은 ABAQUS를 이용한 해석 결과, 접합 상태에서의 아스팔트층 하부에서 인장변형률이 5.900×10^{-5} 을 보였으며, $\mu=0.3$ 인 경우

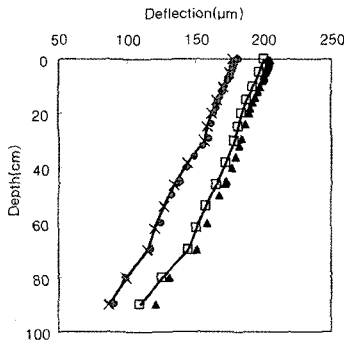


그림 5. 경계면 상태에 따른 깊이별 처짐

7.360×10^{-5} 을 나타내었다. KENLAYER를 이용한 해석 결과, 접합 상태인 경우 6.122×10^{-5} , 비접합 상태인 경우 7.694×10^{-5} 을 보였다.

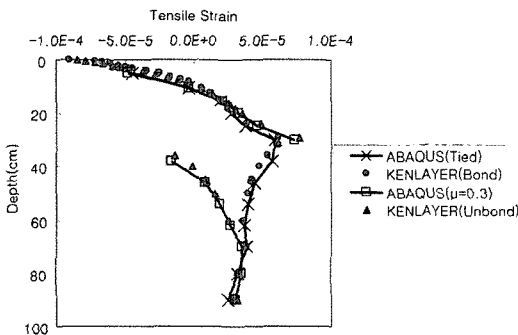


그림 6. 경계면 상태에 따른 깊이별 인장변형률

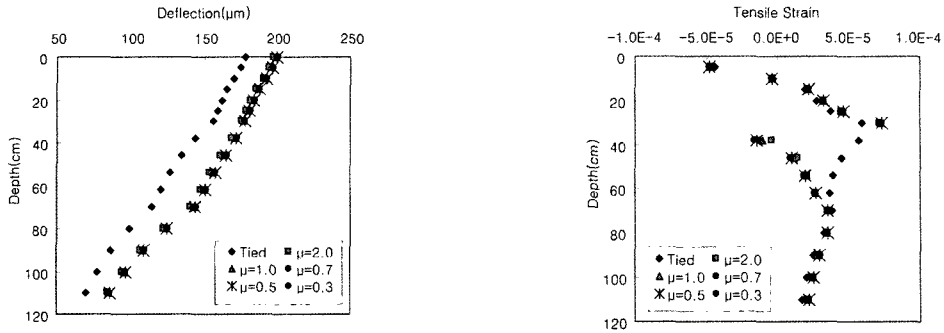
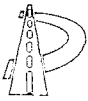
Asphalt Institute(AI)에서 제안한 표준혼합물의 경우의 피로파괴에 대한 파괴기준식을 이용하여 공용성 평가를 실시한 결과, ABAQUS의 경우 통과횟수기준 접합 상태와 비접합 상태($\mu=0.3$)인 경우 각각 8.020×10^7 , 3.882×10^7 대로 경계면 상태의 변

화로 인해 공용횟수가 약 52% 감소함을 알 수 있었다. 또한 KENLAYER를 이용한 해석 결과, 아스팔트층 하부에서의 인장변형률은 접합과 비접합상태에 대해서 각각 7.103×10^7 , 3.348×10^7 대의 공용횟수를 보여 경계면 상태의 변화로 인한 공용횟수가 유한요소 해석결과와 유사하게 약 53% 감소하였다. AI의 파괴기준식을 이용하여 해석결과를 포장체의 수명을 나타내는 공용횟수로 환산하여 표 5에 나타내었다.

대부분의 다층탄성해석프로그램에서는 경계면을 접합 상태와 비접합 상태의 두 가지로 구분하였으나, 실제 포장구조에서는 Romanoschi(2001)의 연구결과와 같이 경계면의 마찰특성에 따라 다양한 종류의 경계면 조건이 발생할 수 있다. Romanoschi는 Louisiana주의 시험포장도로에서 추출한 현장 코어를 이용하여 경계면의 조건, 온도, 그리고 연직하중을 변화시켜 120회의 직접전단시험을 실시한 결과, 마찰계수 μ 의 값이 0.55~0.85인 경우가 전체의 약 70%를 차지하였으며, 시험에서 얻어진 마찰계수의 범위는 0.41~1.89의 값을 보였다. 본 연구에서 사용된 마찰계수 μ 는 Romanoschi의 실험결과와 전 분야를 다루기 위해 0.3~2.0의 값을 사용하였다. 이러한 조건에 대한 해석적 구현을 위해 ABAQUS를 이용하여 서로 다른 크기의 마찰에 대한 경계면에서의 거동을 분석하였다. 그림 7과 표 6에서는 경계면이 접합 상태인 경우와 비접합 상태인 경우 마찰계수 μ 를 0.3~2.0으로 변화시켜 포장체의 처짐과 인장변형률을 나타내었다. 마찰계수를 이용하여 경계면 조건 변화에 따른 해석 결과 연직하중만이 작용하는 경

표 5 프로그램 해석 결과에 따른 인장변형률과 공용횟수

프로그램	경계면 조건	인장변형률(ϵ)	공용횟수(대)	경계면 조건에 따른 공용횟수의 차이(%)	비고
ABAQUS	bond(tied)	5.900×10^{-5}	8.020×10^7	51.6	AI 식 $N_f = 0.0796(\epsilon)^{-3.291}(E_{AP})^{-0.854}$ $V_b = 11\%$, $V_a = 5\%$
	unbond($\mu=0.3$)	7.356×10^{-5}	3.882×10^7		
KENLAYER	bond	6.122×10^{-5}	7.103×10^7	52.9	
	unbond	7.694×10^{-5}	3.348×10^7		



(a) 깊이에 따른 처짐

(b) 깊이에 따른 인장변형률

그림 7. 경계면 상태에 따른 포장체의 거동분포(ABAQUS)

표 6. 경계면 상태에 따른 포장체의 거동(ABAQUS)

경계면 상태	bond	unbond				
	tied	$\mu=2.0$	$\mu=1.0$	$\mu=0.7$	$\mu=0.5$	$\mu=0.3$
표면처짐(μm)	178.0	197.8	199.2	199.7	200.0	200.4
인장변형률($\times 10^{-5}, \epsilon_t$)	5.900	7.224	7.251	7.294	7.325	7.356
공용횟수($\times 10^7$, 대)	8.020	4.120	4.069	3.990	3.937	3.882

우에는 마찰계수가 0.3~2.0의 변화로 최대 5.6%의 공용횟수의 차이만을 보여 연직하중만이 작용하는 경우에는 마찰의 영향으로 인한 포장체의 공용기간에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 기존의 다층탄성 프로그램에서와 같이 접합 상태와 비접합 상태에 대한 구분만으로도 충분히 경계면의 영향을 구현할 수 있다고 사료된다. 그러나, 실제 포장체에 작용하는 차량의 주행하중은 연직하중만이 작용하는 것이 아니라, 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하므로 그에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

3.2 연직하중과 수평하중이 작용하는 경우

본 절에서는 연직하중만 작용하는 경우와 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 경우 포장체에 미치는 영향을 분석하고 포장구조해석시 수평하중 영향 고려의 필요성에 대한 검토를 실시하였다. 주행차

량으로 인해 포장체에 가해지는 하중은 연직하중과 수평하중이 있으며, 수평하중의 크기는 연직하중의 약 50%에 해당한다(Cardoso 등, 1995). 그러나 기존의 포장구조해석에서는 대개 수평하중의 영향을 무시하였으며, 이러한 해석방법이 포장의 예상공용횟수와 실제 포장수명에 큰 차이를 보이는 원인들 중 하나일 것으로 판단된다.

수평하중의 영향 검토를 위해 2.3절에서 검증된 3차원 유효요소망을 이용하였으며, 포장체에 작용하는 하중의 크기와 하중 재하면적은 2.2절에서 제한한 값을 사용하였다. 해석단면과 포장재료의 물성은 대표단면에 제시된 값 중 중수준의 값을 사용하였다. 즉, 아스팔트층의 두께가 30cm, 탄성계수가 40,000 kg/cm², 보조기층은 두께 40cm, 탄성계수 3,000 kg/cm²이며 노상의 탄성계수는 1,500 kg/cm²을 사용하였다. 그림 8과 그림 9는 연직하중만이 작용한 경우와 연직하중과 수평하중이 동시에 작용한 경우의 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장변형률을 각각 나타



낸 것으로, 경계면 상태에 따라 아스팔트층 하부에 발생한 최대 인장변형률을 표 7에 정리하여 나타내었다.

해석결과, 연직하중만이 작용하는 경우 경계면이 완전 접합된 상태에서 경계면 상태가 저하되어 마찰계수 $\mu=2.0$ 인 경우 공용횡수가 51.9% 감소하였으며, 경계면 상태가 가장 저하된 $\mu=0.3$ 인 상태에서는 완전접합에 비해 54.4%의 공용횡수가 감소하였다. 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 경우는 완전 접합된 상태에서 경계면 상태가 저하되어 마찰계수 $\mu=2.0$ 인 경우 공용횡수가 36.8% 감소하였으며,

경계면 상태가 가장 저하된 $\mu=0.3$ 인 상태에서는 완전접합인 경우와 비교해 52.3%의 공용횡수가 감소하였다. 경계면의 접합이 약화되어 마찰계수 $\mu=2.0$ 에서 $\mu=0.3$ 으로 변화함에 따라 공용횡수의 감소율이 15.5%로 연직하중만이 작용하는 경우의 감소율 2.5%에 비해 큰 감소율을 보였다. 또한 동일한 경계면 조건에서 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 경우의 공용횡수가 연직하중만 작용하는 경우에 비해 약 1/300로 포장구조해석시 수평하중을 고려한 해석이 필요함을 알 수 있었다.

표 7 경계면 상태에 따른 포장체의 거동(ABAQUS)

경계면 상태		bond	unbond				비고
		tied	$\mu=2.0$	$\mu=1.0$	$\mu=0.7$	$\mu=0.3$	
연직하중	인장변형률($\times 10^{-5}$, ϵ_t)	4.92	6.15	6.21	6.22	6.25	
	공용횡수($\times 10^5$, 대)	1,456	700	679	672	664	
	공용횡수 감소율(%)	0.0	51.9	53.4	53.8	54.4	bond 기준
연직하중 + 수평하중	인장변형률($\times 10^{-5}$, ϵ_t)	28.6	32.9	34.1	34.7	35.8	
	공용횡수($\times 10^5$, 대)	4,454	2,814	2,497	2,360	2,125	
	공용횡수 감소율(%)	0.0	36.8	43.9	47.0	52.3	bond 기준

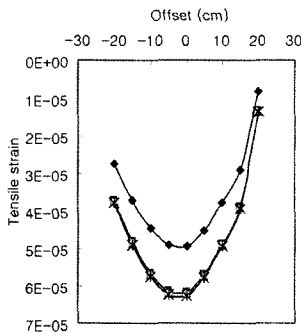


그림 8. 연직하중이 작용한 경우의 인장변형률(아스팔트층 하부)

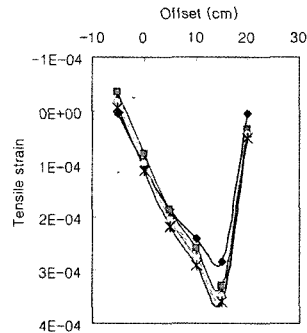
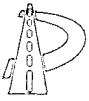


그림 9. 연직하중과 수평하중이 작용한 경우의 인장변형률(아스팔트층 하부)

4. 결론

본 연구에서는 선정된 대표단면에 대해 경계면의 조건을 변화하여 포장체에 발생하는 응력 및 변형률

그리고 처짐을 비교하고, 공용성 분석을 통해 경계면 조건에 따른 포장의 수명을 예측 및 비교하여 경계면의 영향을 살펴보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.



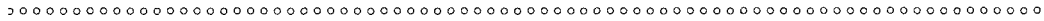
1. 경계면을 접합(bond)과 비접합(unbond, ABAQUS에서는 $\mu=0.3$) 상태로 둔 경우 포장체에 발생한 깊이별 처짐을 분석한 결과, 접합인 경우 포장 표면에서의 처짐은 ABAQUS, KENLAYER가 각각 178.0, 182.3 μm 로 나타났으며, 비접합인 경우 200.4, 202.9 μm 로 접합인 경우와 비교하여 최대 11.2%의 차이를 보임을 알 수 있었다.
2. 연직하중만 작용한 경우, 경계면의 상태에 따른 깊이별 인장변형률을 통해 공용성 분석을 실시한 결과, ABAQUS의 경우 통과횟수기준 접합과 비접합에서 각각 8.020×10^7 , 3.882×10^7 대로 경계면 상태의 변화로 인해 공용횟수가 약 52% 감소함을 알 수 있었다. 또한 KENLAYER의 경우 접합과 비접합상태에 대해서 각각 7.103×10^7 , 3.348×10^7 대의 공용횟수를 보여 경계면 상태의 변화로 인한 공용횟수가 유한요소해석결과와 유사하게 약 53% 감소하였다.
3. 마찰계수를 이용하여 경계면 조건 변화에 따른 해석 결과 연직하중만이 작용하는 경우에는 마찰계수가 0.3~2.0의 변화로 최대 5.6%의 공용횟수의 차이만을 보여 연직하중만이 작용하는 경우에는 경계면 비접합정도를 나타내는 마찰의 영향으로 인한 포장체의 공용기간에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.
4. 연직하중과 수평하중이 작용한 경우, 완전 접합된 상태에서 경계면 상태가 저하되어 마찰계수 $\mu=2.0$ 인 경우 공용횟수가 36.8% 감소하였으며, 경계면 상태가 가장 저하된 $\mu=0.3$ 인 상태에서는 완전접합인 경우와 비교해 52.3%의 공용횟수가 감소하였다. 경계면의 접합이 약화되어 마찰계수 $\mu=2.0$ 에서 $\mu=0.3$ 으로 변화함에 따라 공용횟수의 감소율이 15.5%로 연직하중만이 작용하는 경우의 감소율 2.5%에 비해 큰 감소율을 보였다. 또한 동일한 경계면 조건에서 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 경우의 공용횟수가 연직하중만 작용하는 경우에 비해 약 1/300로 포장구조

해석시 수평하중을 고려한 해석이 필요함을 알 수 있었다.

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

참고문헌

1. 김지성(2002), "보조기층재료의 비선형성을 고려한 아스팔트 콘크리트 포장체 해석", 석사논문, 연세대학교.
2. 신대영, 최준성, 김수일 (2003), "수치해석과 현장시험을 통한 주행하중의 이격거리 영향분석", 대한토목학회논문집, 제23권, 제3호, 대한토목학회, pp.55-68.
3. 이강진, 김수일, 최준성 (1999), "차량 주행속도에 따른 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 거동분석", 대한토목학회논문집, 제19권, 제3-6호, 대한토목학회, pp.41-52.
4. 최준성, 김수일, 이승훈, 유지형 (1998), "FWD 동적특성을 고려한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정에 관한 연구 I : 역해석기법 개발", 대한토목학회논문집, 18권, 제3-5호, pp.623-634.
5. Cardoso, S.H; F.A.A.; Aps, M.; Marcon, A.F. & Colen, E.(1995), "Usó do mu-meter para a avao;ocap do coeficiente de atrito em pavimentos de redovias e vias urbanas". 29a RAPv. Vol. 4, pp. 79-93, Caiab Mato Grosso.(in Portuguese)
6. Farias, M. M.(1997), "The Influence of Horizontal Loads on the Fatigue of Pavements", Balkema.
7. Monismith C. L.(1992), "Analytically Based Asplalt Pavement Design and Rehabilitation:Theory and Practice, 1962-1992". *Transportation Research Record 1354*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C..
8. Stefan A. Romanoschi and John B. Metcalf(2001), "The Effects of Interface



Condition and Horizontal Wheel Loads on the Life of Flexible Pavement Structures”, *Transportation Research Record 1778*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 123-131.

9. Stefan A. Romanoschi and John B. Metcalf(2001), “Characterization of Asphalt Concrete Layer interfaces”, *Transportation*

Research Record 1778, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 132-139.

10. 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.

〈접수 : 2005. 3. 10〉