

주행차량의 수평하중을 고려한 층 경계면의 인장변형률 영향계수 개발

Estimation of Tensile Strain Effect Factor of Layer Interface Considering Lateral Loads of Moving Vehicle

서주원* · 최준성** · 김수일***

Seo, Joo Won · Choi, Jun Seong · Kim, Soo Il

Abstract

Structural pavement analysis considering lateral loads of moving vehicle was carried out in order to simulate passing vehicle loads under various interface conditions. To verify of existing multi-layer elastic analysis of layer interface effect parameters, this study compared outputs by using ABAQUS, a three dimensional finite element program and KENLAYER, multi-layer elastic analysis as vertical load was applied to the surface of asphalt pavements. Pavement performance depending on interface conditions was quantitatively evaluated and fundamental study of layer interface effect parameters was performed in this study. As results of the study, if only vertical loads of moving vehicle is applied, subdivision of either fully bonded or fully unbonded is enough to indicate interface effect parameters. On the other hand, when lateral loads are applied with vertical loads, pavement behavior and performance are greatly changed with respect to layer interface conditions. The thinner thickness of the asphalt layer is and the smaller elastic moduli of the asphalt layer is, the more pavement behavior is influenced by interface conditions. In addition, regression analysis equation analytically computing tensile strain which was considered thicknesses and elastic moduli of the asphalt layer and layer interface effect parameters at the bottom of the asphalt layer was presented using database from numerical analyses on national pavement model sections.

Keywords : asphalt pavement structures, tensile strain effect factor, layer interface condition, horizontal load, finite element analysis, pavement performance

요 지

본 연구에서는 실제 주행차량의 수평하중이 다양한 층 경계면 마찰계수 상태의 포장구조체에 미치는 영향을 고찰하기 위해 수평하중을 고려한 포장구조해석 모델링을 구축하였다. 기존 해석프로그램의 경계층 평가분석을 고찰하기 위하여 기존 다층탄성해석프로그램인 KENLAYER와 구축된 모델링을 이용한 상용 유한요소해석프로그램 ABAQUS로부터 연직하중과 수평하중이 작용하는 경우 및 하중조합의 경우 포장체 거동을 비교분석하였다. 또한 각각의 하중상태하에서 경계층 상태에 따른 포장구조체의 공용성을 평가한 후, 연직하중과 수평하중이 동시에 가해지는 포장구조체의 경계면 상태에 따른 영향계수의 데이터베이스를 구축하였다. 기존의 주행차량의 연직하중만을 고려한 경우와 실제 주행차량의 수평하중과 연직하중을 고려한 경우 포장구조체에 미치는 영향을 분석한 결과, 수평하중의 작용으로 인해 공용수명이 약 1/300로 감소하므로, 포장구조해석시 주행차량의 수평하중을 고려한 층 경계면 영향계수 개발이 필요함을 알 수 있었다. 또한 국내 고속도로의 대표단면을 이용하여 수치해석을 실시한 결과, 아스팔트층의 두께가 얇을수록, 또한 아스팔트층의 탄성계수가 작을수록 경계면 상태에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 포장구조해석시 주행차량의 수평하중을 고려하기 위하여 포장구조체 공용수명에 영향을 미치는 아스팔트층의 두께, 탄성계수, 그리고 경계면 조건으로부터 아스팔트층 하부의 인장변형률을 결정하는 인장변형률 예측식을 제안하였고, 공용중인 포장구조체의 두께와 탄성계수를 이용하여 인장변형률 예측식을 해석적으로 검증하였다. 또한 제안된 예측식을 이용하여 아스팔트층과 보조기층 사이의 접합여부에 따른 인장변형률 영향계수를 개발하였다.

핵심어 : 인장변형률 영향계수, 아스팔트 콘크리트 포장구조체, 경계면 마찰계수, 수평하중, 유한요소해석, 포장구조체 공용수명

*연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 · 공학석사 (E-mail : pooh@yonsei.ac.kr)

**정희원 · 인덕대학 건설환경설계과 조교수 · 공학박사 (E-mail : soilpave@induk.ac.kr)

***정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : geotech@yonsei.ac.kr)

1. 서 론

아스팔트 콘크리트포장에서 포장구조체를 다층구조모델로 보는 역학적 설계법의 가장 중요한 가정사항은 각 층 사이가 완전 접합(fully bonded)된 것으로 가정한다는 것이다. 그러나 이러한 가정은 경계면의 상태를 정확히 묘사하는 것이 아니며, 경계면의 상태를 측정할 수 있는 표준화된 시험 방법이 없기 때문에 현장상태를 대변하는 접합 상태를 선정하는 것이 쉽지 않다. 과거에는 아스팔트 콘크리트 포장구조체 내의 아스팔트층과 쇠석기층, 보조기층과 같은 각 층 사이의 관계를 단지 완전 접합(fully bonded)이라는 가정하에 포장설계를 하였다. 그러나 반복되는 차량하중으로 인해 각 층에서 발생하는 변형률의 차이로 인해 시공직후 완전 접합된 경계면에 서서히 균열이 발생하여 초기의 포장 거동과는 다른 양상을 보이게 된다.

다층구조로 이루어진 아스팔트 콘크리트포장의 각 층은 물성이 다른 재료로 구성되어 있으므로, 포장구조체에 작용하는 하중이 하부로 전달되는 과정에서 층의 경계부분에서는 경계면(interface) 효과로 인해 상부층과는 다른 응력 및 변형률을 나타낸다. 그로 인해 하부로 전달되는 하중에 변화가 발생하여 포장체 전체의 거동에 변화가 발생한다. 따라서 포장층의 경계면 효과에 대한 데이터 베이스를 구축하고 기존 분석과정의 보정방안을 정립하여 보다 실제적이고 합리적인 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 거동을 구현하는 것이 필요한 실정이다.

2. 하중상태 및 경계면 상태에 따른 포장구조체의 공용성 평가

2.1 연직하중이 작용하는 경우의 공용성 평가

본 절에서는 포장구조체에 연직하중이 작용하는 경우, 경계면 상태가 접합과 비접합에 따라 포장구조체 내부에 발생하는 응력, 변형률 및 변위를 분석하기 위하여 다층탄성프로그램인 KENLAYER와 상용 유한요소해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 결과를 비교하였다. 또한 ABAQUS를 이용하여 경계면의 조건을 다양하게 변화시켜 포장구조체의 거동을 분석하였다.

2.1.1 유한요소망의 구성

해석대상인 아스팔트 콘크리트 포장구조체는 아스팔트층, 보조기층, 노상의 3층으로 구성되어 있고 노상 밑에는 암반층이 존재한다고 가정하였다. 노상하부에 존재하는 암반층은 독립된 하나의 해석층으로 고려하지 않고 경계조건으로 가정하였다. 또한 최적의 노상두께는 동적영향이 미치지 않는 8m이고, 그 아래에 암반층을 설치하였다. 유한요소망의 너비가 6m 이상일 경우에는 해석결과에 영향을 주지 않으므로 해석시간의 경제성을 고려하여 유한요소망의 총 폭을 6m로 구성하여 그림 1의 유한요소망을 해석에 사용하였다(신대영, 2001).

보조기층과 노상의 경계면 요소들의 연결은 tied contact의 개념을 사용하여 완전접합으로 연결하였으며, 아스팔트층과 보조기층사이에는 경계면의 상태에 따른 영향을 살펴보기 위

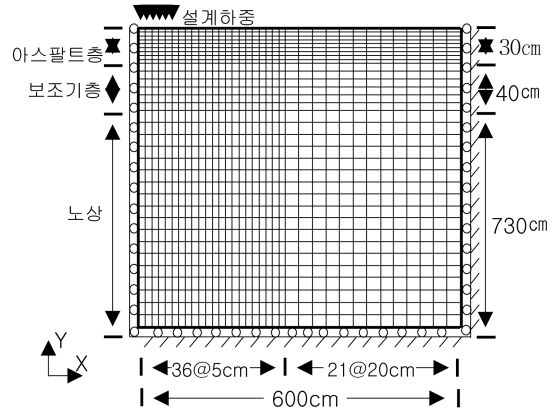


그림 1. 축대칭 유한요소망

표 1. 수치해석 입력물성

	아스팔트층	보조기층	노상	비고
두께(cm)	30	40	-	암반층 : 8m로 가정
탄성계수 (kg/cm ²)	40,000	3,000	1,500	
포이송비	0.30	0.35	0.40	
단위중량 (kg/cm ³)	0.00235	0.00230	0.00190	

해 다양한 조건을 설정하여 해석을 실시하였다. 우선 접합 상태를 구현하기 위해서 tied contact 개념을 이용하였으며, 비접합 상태인 경우에 대해서는 마찰계수 μ 로 표시되는 단 순마찰개념을 이용하였다.

2.1.2 경계면 상태에 따른 포장구조체 영향 분석

해석에 사용된 단면으로는 그림 1과 같이 아스팔트층, 보조기층, 노상의 3층 구조로 가정하였으며, 일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장구조체에 사용되는 각 층의 재료에 대한 탄성계수의 범위는 아스팔트층의 경우 10,000~70,000 kg/cm², 보조기층의 경우 1,000~5,000 kg/cm², 노상의 경우 500~3,000 kg/cm²이다(건설교통부, 2000). 본 해석에서는 두께와 탄성계수가 모두 중수준인 단면에 대해서 수치해석을 실시하였으며, 각 층별 두께, 탄성계수와 포이송비를 비롯한 기타 물성을 표 1에 나타내었다.

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

선택된 단면과 물성에 대해 KENLAYER와 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 실시한 결과를 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 그림 2와 그림 3은 경계면을 접합과 비접합(ABAQUS에서는 $\mu=0.3$) 상태로 둔 경우의 포장구조체에 발생한 깊이별 처짐과 인장변형률을 나타내었다. 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.

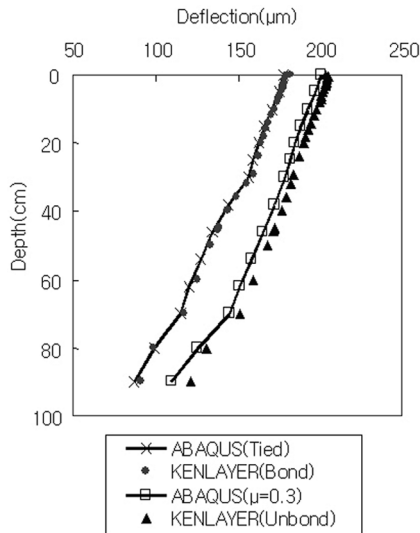


그림 2. 경계면 상태에 따른 깊이별 처짐

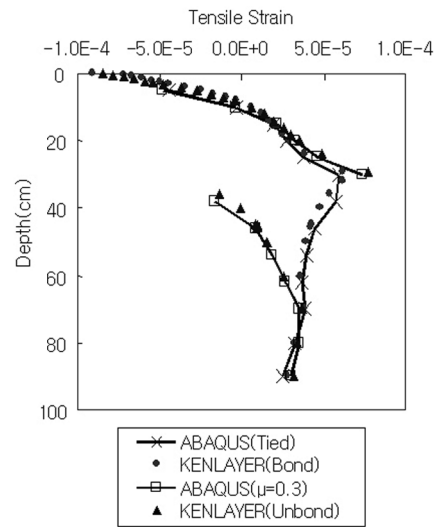


그림 3. 경계면 상태에 따른 깊이별 인장변형률

또한 피로파괴의 원인이 되는 아스팔트층 하부에서 발생한 인장변형률은 ABAQUS를 이용한 해석 결과, 접합 상태에서의 아스팔트층 하부에서 인장변형률이 5.900×10^{-5} 을 보였으며, $\mu=0.3$ 인 경우 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.

Asphalt Institute(AI)에서 제안한 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 대와 3.882×10^7 대로 경계면 상태의 변화로 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 유효요소해석결과와 유사하게 약 53% 감소하였다. AI의 파괴기준식을 이용하여 해석결과를 포장구조체의 수명을 나타내는 공용횟수로 환산하여 표 2에 나타내었다.

대부분의 다층탄성해석프로그램에서는 경계면을 접합 상태와 비접합 상태의 두 가지로 구분하였으나, 실제 포장구조에서는 Romanoschi(2001)의 연구 결과와 같이 경계면의 마찰

특성에 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 실험 결과의 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 4와 표 3에서는 경계면이 접합 상태인 경우와 비접합 상태인 경우 마찰계수 μ 를 0.3~2.0으로 변화시켜 포장구조체의 처짐과 인장변형률을 나타내었다. 마찰계수를 이용하여 경계면 조건 변화에 따른 해석 결과 연직하중만이 작용하는 경우에는 마찰계수가 0.3~2.0으로 변화로 최대 5.6%의 공용횟수의 차이만을 보여 연직하중만이 작용하는 경우에는 마찰의 영향으로 인한 포장구조체의 공용기간에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 기존의 다층탄성프로그램에서와 같이 접합 상태와 비접합 상태에 대한 구분만으로도 충분히 경계면의 영향을 구현할 수 있다고 사료된다. 그러나, 실제 포장구조체에 작용하는 차량의 주행

표 2. 프로그램 해석 결과에 따른 인장변형률과 공용횟수

프로그램	경계면 조건	인장변형률(ϵ_t)	공용횟수(대)	경계면 조건에 따른 공용횟수의 차이(%)
ABAQUS	bond (tied)	5.900×10^{-5}	8.020×10^7	51.6
	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	

표 3. 경계면 상태에 따른 포장구조체의 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($\times 10^{-5}$, ϵ_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

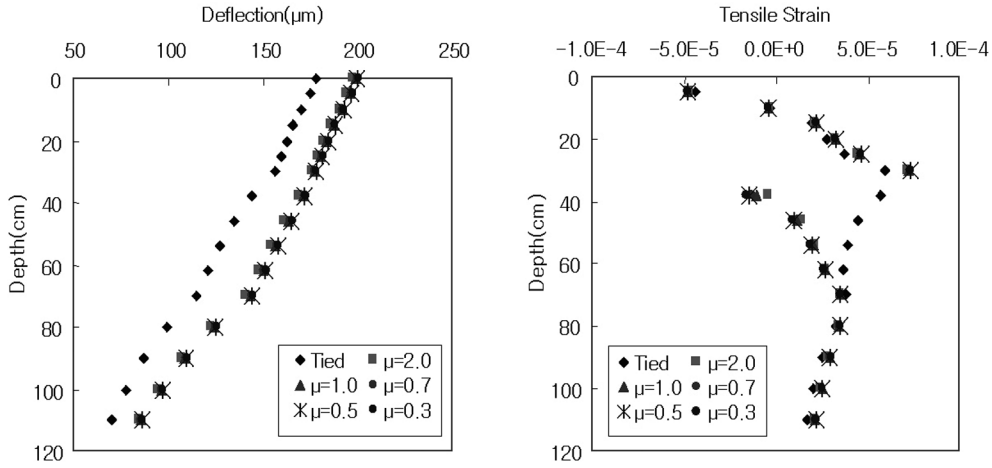


그림 4. 경계면 상태에 따른 포장구조체의 거동분포 (ABAQUS)

하중은 연직하중만이 작용하는 것이 아니라, 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하므로, 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 것에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

2.2 연직하중과 수평하중이 작용하는 경우의 공용성

대부분의 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 역학적 설계 방법에서는 포장 표면에 작용하는 하중으로 연직하중만을 고려하는 반응모델(response model)에 기초한다. 만일 연직하중과 수평하중이 포장표면에 가해진다면, 포장층 사이 특히 최 상부층 사이에서 큰 전단력이 발생할 것으로 예상된다. 이러한 경우 층 사이의 접합의 정도뿐만 아니라, 연직하중만이 작용할 경우 인장응력이 발생하지 않은 곳에서 인장응력의 발생으로 인한 영향도 중요하다. 이러한 문제를 검토하기 위해 연직하중과 수평하중이 작용하는 경우의 경계면의 상태에 따른 표면처짐과 포장수명의 영향을 살펴 보았다.

2.2.1 유한요소망의 구성

해석에 사용된 유한요소망의 해석 범위는 2.1절에서 제안한 범위를 따랐으며, 수평하중을 고려한 주행하중을 구현하고 포장구조체의 크기와 경계조건을 최적화하기 위하여 3차원 유한요소망을 구성하였다. 경제적인 해석시간과 보다 정확한 해석 값을 얻기 위하여 요소의 구성 시 주 해석대상이 되는 부분만을 더욱 세밀하게 설정하여 그림 5와 같이 구성하였다.

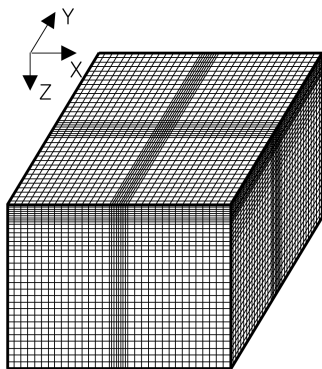


그림 5. 3차원 유한요소망

2.2.2 영향인자 분석을 위한 입력물성

현재 사용중인 아스팔트 콘크리트 포장구조체는 3층 또는 4층으로 구성된 다층 구조체이며, 본 연구에서는 아스팔트기층을 갖는 포장구조체를 대상으로 표층과 아스팔트기층을 하나의 아스팔트층으로 묶어 3층으로 해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 물성은 일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장구

표 4. 입력물성

물성	층	아스팔트층	보조기층	노상
	두께 (cm)	상	45	60
중		30	40	-
하		15	20	-
탄성계수 (kg/cm ²)	상	70,000	5,000	3,000
	중	40,000	3,000	1,500
	하	10,000	1,000	500
포이송비		0.30	0.35	0.40
단위중량 (kg/cm ³)		0.00235	0.00230	0.00191

표 5. ABAQUS 해석 수행 조건

단면	탄성계수	경계면 조건
상-상-상	상-중-중	bond : tied unbond : $\mu = 0.3 \sim 2.0$ ※ $\mu = \tan \phi$
	중-중-중	
	하-중-중	
중-중-중	상-중-중	
	중-중-중	
	하-중-중	
하-하-하	상-중-중	
	중-중-중	
	하-중-중	
상-중-중	중-중-중	
중-중-중		
하-중-중		
중-상-중	중-중-중	
중-중-중		
중-하-중		

조체에 사용되는 각 층의 재료에 대한 탄성계수와 단위중량 등(유지형, 1990)의 값 중에서 표 4와 같이 선정하였다.

본 해석에 사용된 차량 하중인 8.2 ton 단축 차량의 뒷축은 복륜으로 되어있고 정지상태에서의 접지면적은 약 1200 cm²이다. 실제 8.2 ton 단축 차량의 타이어모양을 수치해석에서 구현하기 위하여 실제 타이어의 접지면적과 동일한 접지압을 받는 등가의 모델로 전환하여야 한다(이강진, 1999). 실제 차량 주행시 포장구조체 표면의 거침이나 차량의 현가장치에 의해서 접지면적과 접지압은 변하게 되나 본 연구에서는 이러한 영향을 무시하고, 연직방향의 접지압을 3.42 kg/cm², 수평방향의 접지압을 1.71 kg/cm²으로 설정하여 해석하였다. 본 절에서 수행한 ABAQUS 해석조건을 정리하면 표 5와 같다.

2.2.3 수평하중의 영향

본 절에서는 연직하중만 작용하는 경우와 연직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 경우 포장구조체에 미치는 영향을 분석하고 포장구조해석시 수평하중 영향 고려의 필요성에 대한 검토를 실시하였다. 주행차량으로 인해 포장구조체에 가해지는 하중은 연직하중과 수평하중이 있고, 수평하중의 크기는 연직하중의 약 50%에 해당한다(Cardoso, 1995). 그러나 기존의 포장구조해석에서는 대개 수평하중의 영향을 무시하였으며, 이러한 해석방법이 포장의 예상공용횟수와 실제 포장수명에 큰 차이를 보이는 원인들 중 하나일 것으로 판단된다. 본 연구에서는 연직하중의 50%에 해당하는 수평하중을 대상으로 연구를 실시하였고 추후 수평하중의 현장실측에 대한 연구가 활발히 진행된다면 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

수평하중의 영향 검토를 위해 2.2.1절의 3차원 유한요소망을 이용하였으며, 포장구조체에 작용하는 하중의 크기와 하중 재하면적은 2.2.2절에서 제안한 값을 사용하였다. 해석단면과 포장재료의 물성은 표 4의 대표단면에 제시된 값 중 중수준의 값을 사용하였다. 그림 6과 그림 7은 각각 연직하중만이 작용한 경우와 연직하중과 수평하중이 동시에 작용한 경우의 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장변형률을 나타낸 것으로 경계면 상태에 따라 아스팔트층 하부에 발생한 최대 인장변형률을 표 6에 정리하였다.

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

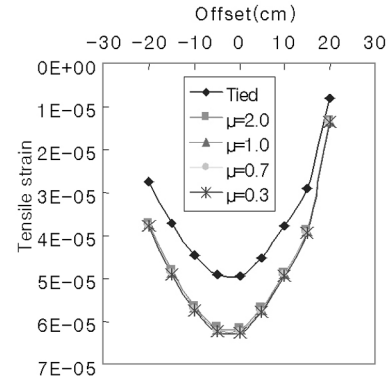


그림 6. 연직하중이 작용한 경우의 인장변형률(아스팔트층 하부)

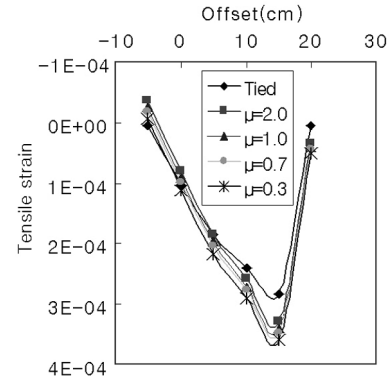


그림 7. 연직하중과 수평하중이 작용한 경우의 인장변형률(아스팔트층 하부)

경우는 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 포장구조해석시 수평하중을 고려한 해석이 필요함을 알 수 있었다.

2.3 다양한 포장구조체 조건 및 경계면 상태에 따른 포장구조체의 거동 민감성 분석

다양한 포장구조체의 조건에서 경계면 상태에 따른 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장변형률을 분석하기 위해 본 절에서는 2.2.2절의 표 5와 같이 3가지 두께의 포장 단면에서

표 6. 경계면 상태에 따른 아스팔트층 하부의 최대 인장변형률 비교 (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	
	공용횟수($\times 10^5$, 대)	1,456	700	679	672	664	
	공용횟수 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	
	공용횟수($\times 10^5$, 대)	4,454	2,814	2,497	2,360	2,125	
	공용횟수 감소율(%)	0.0	36.8	43.9	47.0	52.3	bond 기준

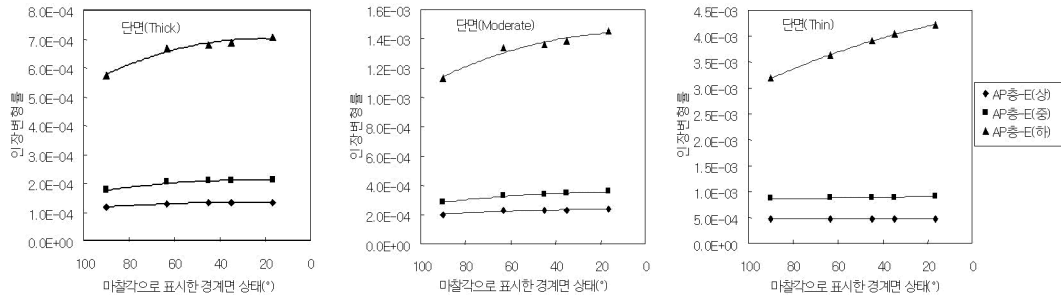


그림 8. 아스팔트층의 탄성계수별 아스팔트층 하부의 인장변형률 분포

아스팔트층의 탄성계수를 변화시켜 해석을 수행하였으며, 또한 아스팔트층과 보조기층의 두께를 각각 변화시켜 해석을 수행한 후 포장구조체에 미치는 영향을 분석하였다.

2.3.1 포장구조체의 물성이 변화하는 경우의 평가

본 절에서는 경계면 상태에 따라 공용횡수에 영향을 미치는 변수를 선정하기 위해서 포장구조체의 물성 중 탄성계수에 대해서 고찰하였다. 포장구조체의 탄성계수의 변화에 따른 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장변형률의 변화를 살펴보기 위해서 층의 두께는 2.2.2절의 표 5와 같이 상·중·하의 세 개의 수준으로 나누고, 각각의 경우에 대하여 아스팔트층의 탄성계수를 상·중·하 수준으로 나누어서 비교하였다. 또한 경계면 상태를 나타내는 마찰계수 μ 를 마찰각 ψ 를 이용하여 나타내었으며, 마찰계수와 마찰각의 관계는

$\mu = \tan\phi$ 와 같다. 접합상태를 마찰계수로 나타내면 큰 값을 갖는다고 볼 수 있으므로, 접합상태를 나타내기 위해서 마찰각 $\phi=90^\circ$ 를 적용하였다.

그림 8은 포장의 층 두께가 두꺼운 경우, 보통, 그리고 얇은 경우에 대하여 아스팔트층의 탄성계수 EAP가 상·중·하 수준에서 경계면의 상태가 저하됨에 따라 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장변형률을 나타낸 것이다. 표 7은 각 탄성계수별 신설포장구간에서의 경계면상태인 접합상태에서 도로가 개통되어 공용됨에 따라 포장의 성능이 저하되고 마찰계수가 감소함에 따라 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장변형률을 나타내었다.

표 7을 통해 각 단면별 경계면의 조건에 따라 인장변형률의 변화량을 분석한 결과, 아스팔트층의 탄성계수가 큰 상수준에서 중수준으로 변화함에 따라 아스팔트층 하부에서 발

표 7. 단면별 아스팔트층 하부의 인장변형률($\epsilon_t, \times 10^{-4}$)

단면	아스팔트층 탄성계수	경계면 상태					변형률의 변화량 ($\Delta\epsilon_t$)
		Tied ($\psi=90^\circ$)	$\mu=2.0$ ($\psi=63.4^\circ$)	$\mu=1.0$ ($\psi=45^\circ$)	$\mu=0.7$ ($\psi=35^\circ$)	$\mu=0.3$ ($\psi=16.7^\circ$)	
상 (thick)	상	1.173	1.308	1.322	1.327	1.336	0.163
	중	1.752	2.021	2.070	2.092	2.130	0.379
	하	5.741	6.673	6.800	6.874	7.046	1.305
중 (moderate)	상	2.028	2.273	2.316	2.335	2.367	0.339
	중	2.859	3.287	3.409	3.467	3.580	0.721
	하	11.330	13.351	13.646	13.849	14.529	3.189
하 (thin)	상	4.085	4.703	4.744	4.767	4.813	0.728
	중	7.183	8.805	8.917	8.982	9.135	1.951
	하	31.897	36.228	39.097	40.407	42.141	10.254

표 8. 단면별 공용횡수의 감소율(%)

단면	아스팔트층 탄성계수	경계면 상태				
		Tied ($\psi=90^\circ$)	$\mu=2.0$ ($\psi=63.4^\circ$)	$\mu=1.0$ ($\psi=45^\circ$)	$\mu=0.7$ ($\psi=35^\circ$)	$\mu=0.3$ ($\psi=16.7^\circ$)
상 (thick)	상	0.0	30.1	32.5	33.4	34.8
	중	0.0	37.5	42.2	44.2	47.5
	하	0.0	39.0	42.7	44.7	49.0
중 (moderate)	상	0.0	31.3	35.5	37.1	39.9
	중	0.0	36.8	43.9	47.0	52.3
	하	0.0	41.7	45.6	48.2	55.8
하 (thin)	상	0.0	37.1	38.9	39.8	41.7
	중	0.0	48.8	50.9	52.1	54.7
	하	0.0	34.2	48.8	54.1	60.1

생한 인장변형률은 112.7~168.2% 변화하였으며, 탄성계수가 비교적 작은 중수준에서 하수준으로 변화함에 따라 인장변형률이 244.8~425.5% 변화하여 탄성계수가 작은 범위에서는 탄성계수가 큰 범위에 비해 경계면 조건에 따라 인장변형률에 2.2~2.5배 정도 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

그림 8에서와 같이 탄성계수가 작은 단면일수록 경계면 상태의 변화에 따라 인장변형률의 변화량이 증가하여 단면의 두께와 아스팔트층의 탄성계수가 하수준인 경우 인장변형률이 접합 상태인 경우와 비교하여 32.2%가 증가하였다. 경계면 상태의 저하로 인한 인장변형률의 변화로 공용횡수의 감소율을 알아보기 위해 AI 파괴기준식을 이용하여 공용성을 분석하여 표 8에 나타내었다. 분석결과, 가장 큰 감소율을 보인 경우는 단면의 두께와 아스팔트층의 탄성계수가 하수준인 단면으로 공용횡수가 약 60% 감소함을 알 수 있었다.

2.3.2 포장구조체의 두께가 변화하는 경우의 평가

노상을 제외한 포장구조체 각 층 두께의 변화에 따른 접지압의 변화를 살펴보기 위해서 각 층의 물성은 중수준으로 고정시키고 두께를 상·중·하로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 아스팔트층과 보조기층의 두께 변화에 따른 인장변형률의 변화를 분석하기 위해서 층의 탄성계수는 중수준으로 고정시키고, 아스팔트층과 보조기층의 두께를 각각 상·중·하 수준으로 나누어서 비교하였다.

그림 9는 포장구조체의 탄성계수를 일정하게 고정하고, 아스팔트층의 두께별 경계면의 상태가 저하됨에 따라 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장변형률을 나타낸 것이다. 그림 9에서 보는 바와 같이 아스팔트층의 두께가 작은 단면일수록 경계면 상태의 변화에 따라 인장변형률의 변화량이 증가하

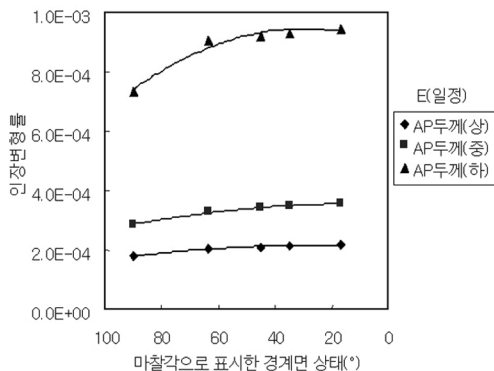


그림 9. 아스팔트층 두께 변화에 따른 변화

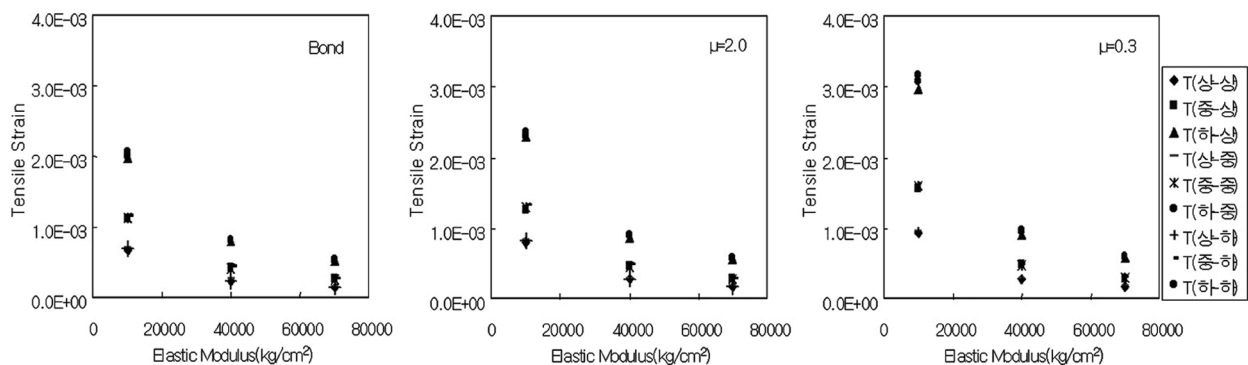


그림 11. 아스팔트층의 탄성계수별 아스팔트층 하부의 인장변형률 분포 (일례)

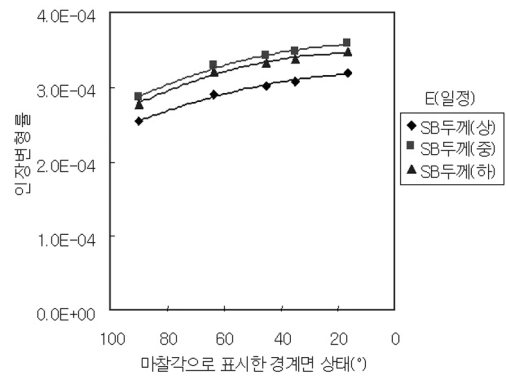


그림 10. 보조기층 두께 변화에 따른 변화

여 아스팔트층의 두께가 하수준인 경우 인장변형률이 접합 상태인 경우와 비교하여 28.92%가 증가하였으며, 공용횡수로 환산한 경우 56.6% 감소하였다. 또한 포장구조체의 탄성계수를 일정하게 고정하고, 보조기층의 두께별 경계면의 상태가 저하됨에 따라 아스팔트층 하부에서 발생하는 인장변형률을 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 보는 바와 같이 마찰계수 μ 가 2.0인 경우 보조기층의 두께가 상·중·하 수준에서의 인장변형률의 차이가 1.3%로 가장 크게 나타났으며, 이를 통해 인장변형률에 영향을 미치는 요소로 보조기층의 두께는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

3. 경계면 조건을 고려한 회귀분석식 개발

3.1 수치해석 결과를 이용한 영향인자 결정

본 절에서는 국내 대표단면에 대해 유한요소해석을 실시하여 얻어진 데이터베이스를 분석하여 피로파괴의 원인이 되는 아스팔트층 하부의 인장변형률에 영향을 미치는 요소들을 결정하고, 이들 요소에 대한 회귀분석을 통하여 유한요소 해석에 소요되는 시간을 절약할 수 있는 회귀분석식을 제안하고자 한다. 포장구조체의 거동과 수명에 영향을 미치는 인자를 구별하기 위해 다양한 포장조건에 대해 수치해석을 실시한 결과, 포장구조체의 수명에 영향을 미치는 인자로는 2.3절에서 나타난 결과와 같이 아스팔트층의 탄성계수와 두께 그리고 층 사이의 경계면 조건을 들 수 있었다. 따라서 본 절에서는 2.3절의 결과를 바탕으로 추가적인 수치해석을 실시하여 이러한 영향인자가 아스팔트층 하부에 발생하는 인장변형률에 미치는 영향에 대한 정량화를 실시하고, 이러한 인자를 독립변수로 하는 회귀분석식을 구성하였다.

3.1.1 각 단면에 대한 수치해석 결과

2.3절의 분석결과에 기초하여 데이터베이스구축을 위해 추가적인 해석 단면을 결정하였다. 아스팔트층과 보조기층의 두께를 변화시킨 9가지 경우와 아스팔트층의 탄성계수를 변화시킨 3가지, 그리고 5가지 경계면 조건에 대하여 전체 135가지 경우에 대한 해석을 실시하였다. 각 경계면 조건에서 아스팔트층의 탄성계수변화에 따른 아스팔트층 하부의 인장변형률 분포에 대한 전체 해석결과를 그림 11에 나타내었다.

해석결과, 각 경계면 조건에서 아스팔트층의 탄성계수가 증가함에 따라 아스팔트층 하부의 인장변형률이 지수함수의 형태로 감소함을 알 수 있었으며, 보조기층의 두께변화는 아스팔트 하단의 인장변형률 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

3.1.2 아스팔트층 하부의 인장변형률 산정을 위한 회귀분석식 개발

본 연구에서는 아스팔트 콘크리트포장에서 각 층의 두께와 탄성계수 그리고 마찰계수로 표현한 경계면 상태를 이용하여 포장구조체의 피로파괴 산정 기준이 되는 아스팔트층 하부의 인장변형률을 결정하였다. 이러한 과정을 통해 얻어진 데이터베이스를 이용하여 수평하중의 크기가 연직하중의 50%인 경우 아스팔트층의 탄성계수 E_{AP} 와 아스팔트층의 두께 T_{AB} 마찰각으로 표시한 경계면 상태 μ 로부터 아스팔트층 하부의 인장변형률 ϵ_t 를 결정할 수 있는 회귀분석식을 제안하고자 한다.

본 연구에서는 다변수 함수의 비선형 회귀분석을 위해 합성곡선(master curve)을 이용하였다. 이를 위해 우선 아스팔트층의 두께와 탄성계수와의 상관관계를 통해 변동계수(shift factor)를 결정하고, 결정된 변동계수를 이용하여 합성곡선을 작성하여 그림 12와 같이 나타내었다.

이러한 절차를 통해 만들어진 합성곡선은 포장구조체 경계면에서의 마찰계수가 0.3, 0.7, 1, 2 그리고 Bond상태의 5가지 경우에 따라 각각 하나의 곡선식으로 표시될 수 있다. 이 곡선식과 마찰계수와의 관계를 위에서 제시한 다변수 함수의 비선형 회귀분석을 추가로 실시하여 식 (1)과 같이 전체적인 조건에 대한 하나의 회귀분석식을 제안하였다.

$$\epsilon_t = \{0.003144 + 0.000669 \cos(0.040321\phi - 0.580162)\} \times e^{(-2.738 \times 10^{-5} + 4.44 \times 10^{-8}\phi) \times (E_{AP} + 1.667 \cdot 7t_{AP} - 25000)} \quad (1)$$

여기서, ϵ_t 는 아스팔트층 하부의 인장변형률, ϕ 는 경계면사이의 마찰각($^\circ$, $\phi = \tan^{-1} \mu$), E_{AP} 는 아스팔트층의 탄성계수(kg/cm^2)이며, t_{AP} 는 아스팔트층의 두께(cm)이다.

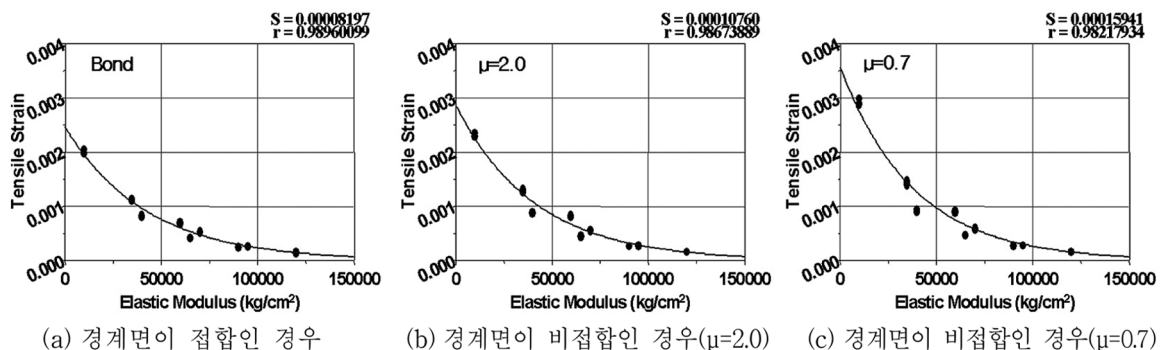


그림 12. 변동계수(shift factor)를 이용한 합성곡선(master curve) 작성 (일례)

3.2 회귀분석식의 수치검증

합성곡선을 이용하여 얻어진 식 (1)의 신뢰성을 검증하기 위해서 수도권 외곽순환 고속도로의 김포구간(이강진, 1998)과 영동고속도로의 경기도 이천 덕평폐도구간(신대영, 2003)의 단면지료를 이용하였다. 검증에 사용된 단면의 두께와 탄성계수는 표 9와 같다. 각 단면의 두께와 물성조건을 이용하여 실제 경계면 조건변화에 따라 ABAQUS 프로그램을 이용한 수치해석을 실시하였으며, 수치해석 결과와 본 연구에서 제안한 식 (1)을 이용하여 얻어진 결과를 비교하였다. 각 경계면 상태에 따른 해석결과와 회귀분석식을 이용하여 얻은 결과를 그림 13에 도시하였으며 해석결과와 회귀식간의 오차를 표 10에 나타내었다. 표 10에서 보이는 바와 같이 해석결과와 회귀분석식 결과의 최대오차가 김포단면에서는 3.5%, 덕평구간에서는 4.2%를 각각 보여 본 연구에서 제안한 회귀분석식은 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

3.3 경계층 상태변화에 따른 인장변형률 영향계수 개발

주행차량의 수평하중이 작용할 경우 층 경계면의 접합여부에 따라 아스팔트 하단의 인장변형률은 변화하며, 인장변형률의 변화는 아스팔트 포장구조체의 공용성에 영향을 준다. 따라서 층 경계면의 접합여부에 따른 아스팔트 하단의 인장변형률 예측식을 이용하여 인장변형률의 영향계수를 개발하였다.

층 경계면 영향계수는 아스팔트층과 보조기층이 완전히 접합되었다고 가정하여 해석을 실시하는 기존의 포장구조해석 결과를 기준으로 경계면의 마찰각이 변화함에 따라 증가하는 아스팔트 하단의 인장변형률의 변화율을 의미하며 식 (2)

표 9. 검증에 사용된 단면의 두께와 물성

물 성	층	물 성		
		아스팔트층	보조기층	노상
김포구간	두께(cm)	35	45	770
	탄성계수(kg/cm^2)	21,570	2,420	3,640
덕평구간	두께(cm)	25	30	1,300
	탄성계수(kg/cm^2)	28,800	1,800	1,200

표 10. 수치해석 결과와 제안된 회귀분석식 결과의 오차(%)

구 간	경계면 상태				
	Tied ($\psi=90^\circ$)	$\mu=2.0$ ($\psi=63.4^\circ$)	$\mu=1.0$ ($\psi=45^\circ$)	$\mu=0.7$ ($\psi=35^\circ$)	$\mu=0.3$ ($\psi=16.7^\circ$)
김포구간	1.3	2.1	1.0	3.5	2.2
덕평구간	4.2	1.4	0.9	3.6	2.5

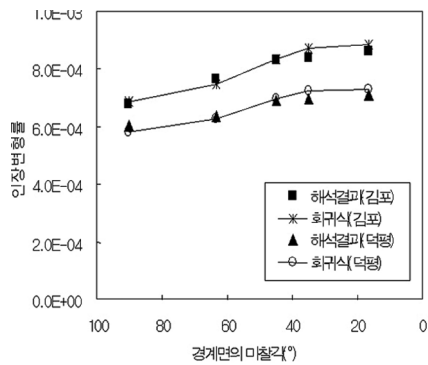


그림 13. 수치해석 결과와 제안된 회귀분석식 결과

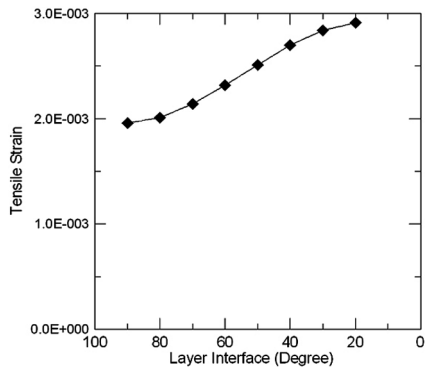


그림 14. 경계면 상태에 따른 인장변형률(일례)

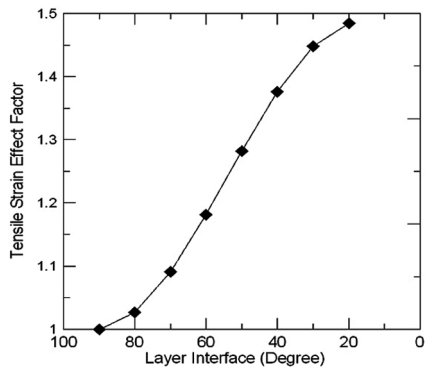


그림 15. 경계면 상태에 따른 영향계수(일례)

와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{\phi} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i(\phi=90^\circ)}} \quad (2)$$

여기서, C_{ϕ} 는 경계면사이의 마찰각($\phi = \tan^{-1}\mu$)에 따른 층 경계면 영향계수, ε_i 는 아스팔트 하단의 인장변형률(식 1), $\varepsilon_{i(\phi=90^\circ)}$ 는 경계면 조건이 완전접합일 때의 아스팔트 하단의 인장변형률을 의미한다.

그림 14는 경계면사이의 마찰각이 변화함에 따라 아스팔트 하단의 인장변형률의 변화의 일례로 아스팔트층의 물성과 두께가 각각 하수준일 때를 나타내고, 그림 15는 이때의 인장변형률 영향계수를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평하중이 아스팔트 콘크리트포장의 수평

에 미치는 영향을 분석하기 위해 포장구조체에 연직하중만 작용하는 경우와 연직하중과 수평하중이 작용하는 경우에 대한 거동 분석을 실시하였다. 또한 다양한 경계면 조건에 대한 해석을 실시하고 대부분의 포장구조해석시 가정하는 접합 또는 비접합상태에 대한 적합성을 판단하였다. 국내에서 공용중인 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 표준단면을 기준으로 암반층이 포장 표면에서 8m 깊이에 위치하는 해석단면을 선정하여 검증된 수치모델로 수평하중이 연직하중의 50%로 작용하는 조건에서 각 층의 두께와 탄성계수를 변화시키며 해석을 실시하였다. 이로부터 경계면 조건에 따른 아스팔트층 하부의 인장변형률을 분석하여 영향인자를 선별하고 회귀분석을 실시하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 연직하중만이 작용하는 경우에 대한 수치해석시 기존의 다층탄성프로그램에서와 같이 접합과 비접합에 대한 구분만으로도 충분히 경계면의 영향을 구현할 수 있다고 사료되나, 수평하중이 연직하중과 함께 포장구조체에 작용하는 경우, 수평하중의 작용으로 인해 공용횟수가 약 1/300로 감소하는 경우가 발생하여 포장구조해석시 수평하중을 고려한 해석이 반드시 필요한 것으로 밝혀졌다.
2. 국내 고속도로 대표단면에 대한 수치해석을 실시한 결과, 경계면 조건에 따라 탄성계수가 작은 범위(중-하수준)는 탄성계수가 큰 범위(상-중수준)에 비해 인장변형률에 약 2.2~2.5배 큰 영향을 끼치며, 공용횟수로 환산한 감소율은 단면의 두께와 아스팔트층의 탄성계수가 하수준인 단면에서 약 60% 정도 감소하여 가장 큰 감소율을 보임을 알 수 있었다.
3. 국내 고속도로의 대표단면을 이용하여 수치해석을 실시한 결과, 아스팔트층의 두께가 작은 단면일수록 경계면 상태의 변화에 따라 인장변형률의 변화량이 가장 크게 증가하였으며, 그 변화율은 인장변형률이 접합 상태인 경우와 비교하여 최대 29%가 증가하였으며, 공용횟수로 환산한 경우 최대 57% 감소함을 알 수 있었다.
4. 아스팔트층 하부의 인장변형률에 영향을 미치는 아스팔트층의 두께, 탄성계수, 그리고 경계면 조건을 고려한 다변수 비선형 회귀분석을 위해 합성곡선(master curve)을 이용한 회귀분석을 실시하여 수평하중의 크기가 연직하중의 50%인 경우의 아스팔트층 하부의 인장변형률을 결정하는 회귀분석식을 제안하였으며, 제안된 회귀분석식의 신뢰성을 해석적으로 확인하였다. 또한 제안된 인장변형률 예측식을 이용하여 아스팔트층과 보조기층 사이의 접합여부에 따른 인장변형률 영향계수를 개발하였다.

추후 본 연구결과를 토대로 국내 아스팔트 포장체의 경계면 마찰특성의 현장계측이 이루어지고, 주행차량의 수평하중 실측값을 활용한다면 실제 주행차량의 하중에 의한 경계면 상태변화에 따른 인장변형률의 변화를 좀더 정확하게 예측할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- 건설교통부(2000) 도로설계편람.
신대영, 최준성, 김수일(2003) 수치해석과 현장시험을 통한 주행하중의 이격거리 영향분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권 제3호, pp. 55-68.

- 유지형, 김수일(1990) 처짐 곡선에 의한 3층 아스팔트 콘크리트 포장체의 층별 탄성계수의 추정, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제10권 제2호, pp. 67-78.
- 이강진, 김수일, 최준성(1999) 차량 주행속도에 따른 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 거동분석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권 제3-6호, pp. 41-52.
- 최준성, 김수일, 이승훈, 유지형(1998) FWD 동적특성을 고려한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정에 관한 연구 I : 역해석기법 개발, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제18권 제3-5호, pp. 623-634.
- Cardoso, S. H., Marcon, A. F., and Colen, E. (1995) Uso do mu-meter para a avaliacao do coeficiente de atrito em pavimentos de rodovias e vias urbanas, 29a RAPv, Vol. 4, pp. 79-93, Cuiaba/Mato Grosso (in Portuguese).
- Hibbit, Karlsson, and Sorensen, Inc. (2001) *ABAQUS Theory and Users Manual*.
- Huang, Y. H. (1993) *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall Inc.
- Romanoschi, S. A. and Metcalf, J. B. (2001) The effects of interface Co-ondition and horizontal wheel loads on the life of flexible pavement structures, *Transportation Research Board, TRR 1778*, TRB, Washington, D.C., pp. 123-131.
- Romanoschi, S. A. and Metcalf, J. B. (2001) Characterization of asphalt c-oncrete layer interfaces, *Transportation Research Board, TRR 1778*, TRB, Washington, D.C., pp. 132-139.

(접수일: 2005.2.16/심사일: 2006.8.23/심사완료일: 2006.6.14)