

## 도로기초에서 교통 및 환경하중에 의한 비선형 현장 응력 거동 평가

### Evaluation of Traffic Load and Moisture-Induced Nonlinear In-Situ Stress on Pavement Foundation Layers

박성완<sup>1)</sup>, Seong-Wan Park, 황규영<sup>2)</sup>, Kyu-Young Hwang, 안동석<sup>3)</sup>, Dong-Seok An  
정문경<sup>4)</sup>, Mun-Kyoung Jeong, 서영국<sup>5)</sup>, Young-Guk Seo

<sup>1)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg, Dankook Univ.

<sup>2)</sup> (주)건화 도로사업본부 부장, Director, Kunhwa Consulting & Engineering Co., Ltd.

<sup>3)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg, Dankook Univ.

<sup>4)</sup> 한국건설기술연구원 책임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology.

<sup>5)</sup> 한국도로공사 책임연구원, Senior Researcher, Korea Expressway Corporation.

**SYNOPSIS:** Better understanding of in-situ mechanical behavior of pavement foundations is very important to predict long-term effects on the system performance of transport infrastructure. In order to do that, resilient stiffness characterization of geomaterials is needed to properly adopt such mechanistic analysis under both traffic and environmental loadings. In this paper, in situ monitoring data from KHC test road was used to analyze the non-linearity of stress conditions under traffic and moisture loadings. Then, the predicted non-linear response using finite element method with a selected constitutive model of foundation geomaterials are verified with the field data.

**Keywords :** Field monitoring, Nonlinearity, Pavement foundations, Test road, Finite element analysis

## 1. 서론

현재 도로포장 하부의 설계를 위한 정량화된 방법으로 차량하중에 의한 반복재하 조건에서 유발되는 재료의 응력-변형률 관계를 반영한 회복탄성계수가 설계 및 해석의 입력물성 값으로 사용되고 있다. 이에 반하여 장기공용성 측면에서 포장체 기초부에 대한 영구변형에 관한 연구는 매우 미진한 실정이다. 이는 장기적인 관점에서 영구변형 발생 예측이 재료의 특성, 환경적인 조건, 포장체의 공용기간동안 응력분포 등을 고려해야 하는 관계로 매우 어렵기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 한국도로공사 시험도로의 아스팔트 포장체에서 동적재하시험을 실시하였을 때의 현장에서 계측된 결과를 토대로 교통하중, 환경하중과 포장단면의 재료구성과 같은 다양한 조건이 변화하여 유발되는 도로기초의 토압 및 변형계측결과를 살펴보고 이에 대한 재료의 합리적인 예측 모형의 선정, 그리고 응력변화 특성을 고려한 포장하부의 현장응력 예측방법을 살펴보았다.

## 2. 시험도로 단면구성과 계측기 매설위치

시험도로의 아스팔트 포장은 역학적 거동 특성을 파악하기 위한 목적으로 기층두께, 기층재료, 보조기층 두께, 동상방지층 유무를 변수로 하여 연장이 2,710m구간에 총 33개 단면으로 구성되어 있다. 이 중에서 토압계측은 A5, A14단면(그림 1)을 대상으로 2004년 9월과 11월, 2005년 8월, 2006년 4월에 계측한

결과를 토대로 분석하였으며, 변형률계측은 2004년 9월과 11월의 계측자료를 분석하였다.

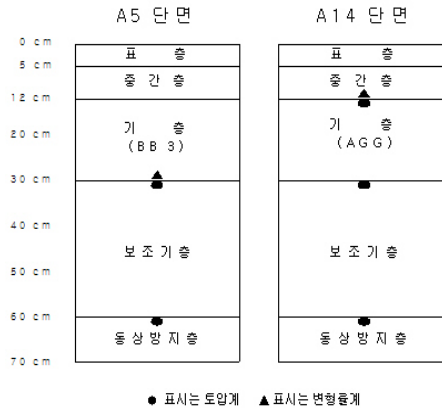


그림 1. 포장체 단면 구성과 계측기 위치

### 3. 토압 계측 분석

그림 2는 A5단면의 깊이 및 계절별 토압분포를 나타낸 결과로서, 여름철인 8월과 9월에 측정된 토압은 4월과 11월의 토압계측치보다 크게 발생하여 동일한 단면에서도 계절의 변화에 따라 토압이 상이하게 분포하는 것으로 나타났고, 토압 크기의 차이는 포장체 상부층 일수록 크게 발생하였다.

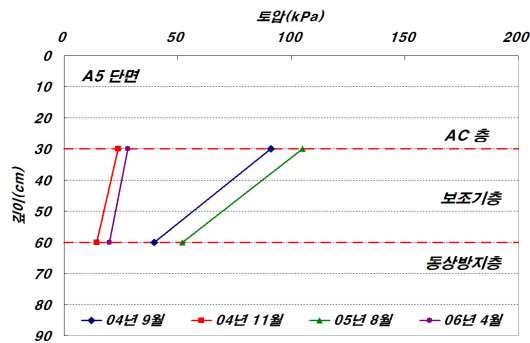
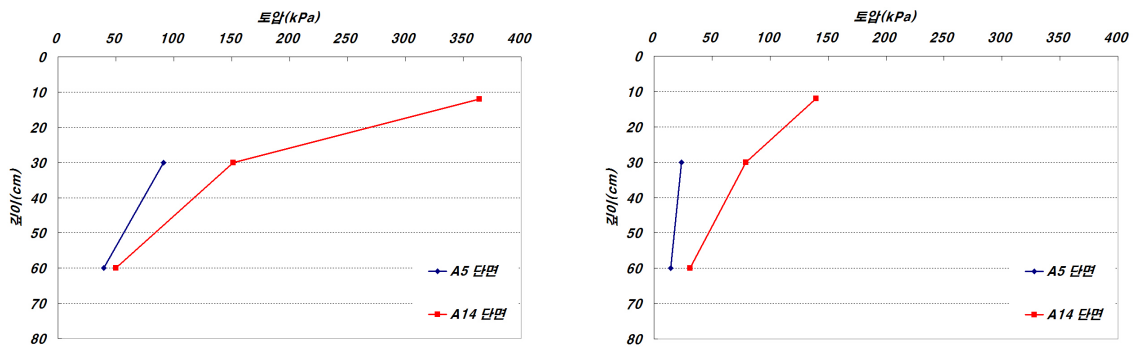


그림 2. A5단면의 깊이별 토압분포

그림 3은 A5와 A14단면에서 기층하부에 발생된 토압을 상호 비교하였다. 기층재료가 아스팔트 안정처리기층(BB3)으로 구성되어 있는 A5단면에서 토압이 작게 발생하였는데, 이는 기층에 강성이 큰 재료를 사용할수록 하중분산효과가 증가하여 기층하부에 발생하는 토압이 감소한 것으로 판단된다.



(a) 2004년 9월

(b) 2004년 11월

그림 3. 기층 재료에 따른 토압 분포

그림 4는 각 단면의 토압계측결과를 도로기초재료의 함수비 변화에 따라 표현한 것이다. 각 단면에서 시험도로 포장하부의 함수비는 토압을 계측한 시점과 동일한 시점 및 지점에서 WCR(Water Content Reflectometer)형태의 함수량계로 계측되고 있는 자료(박성완 등, 2007)로서 도로기초재료의 함수비는 8.5~10.1% 사이에 존재하는 것으로 파악되었다.

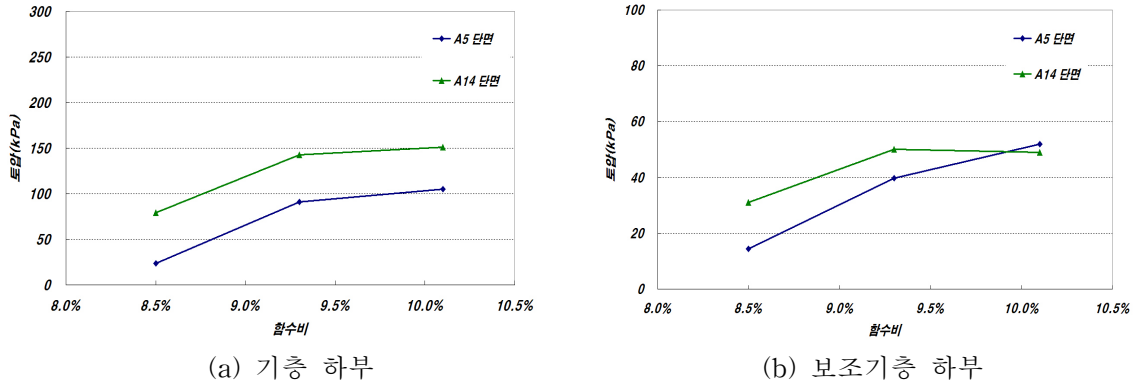


그림 4. 함수비 변화에 따른 토압 분포

기층하부와 보조기층하부에서 함수비가 증가함에 따라 토압이 크게 발생하는 현상을 보였는데, 이는 여름철 온도증가와 높은 강수량으로 인해 온도변화에 민감한 아스팔트층 재료의 강성감소와 포장하부에서 함수비가 증가함에 따라 도로기초재료의 물성이 감소하여 발생된 현상으로 함수비의 변화가 발생토압변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

#### 4. 변형률계 계측결과 분석

그림 5는 아스팔트층 하단의 계절별 인장변형률 변화를 나타낸 결과로서 11월보다는 9월에 측정된 변형률이 크게 발생하여 동일한 단면에서도 계절의 변화에 따라 변형률이 다르게 분포하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 고온으로 인한 아스팔트층 재료의 강성감소로 인한 결과로 판단된다. 따라서, 아스팔트층 하단의 인장변형률은 단면구성, 환경조건에 따라 변화하는 특성을 파악할 수 있었으며, 발생 인장변형률 범위는 약 30~140 $\mu\epsilon$  정도인 것으로 나타났다.

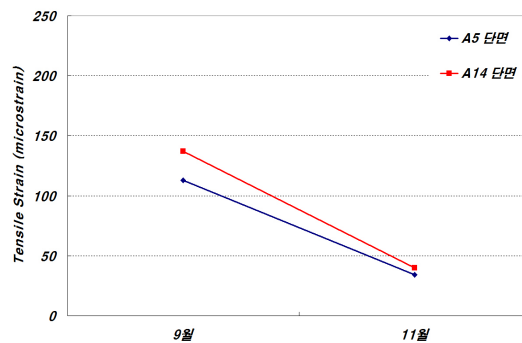


그림 5. 계절별 변형률분포

#### 5. 수치해석을 통한 현장계측과의 비교

수치해석은 계측이 실시된 실제 포장단면의 하중 및 물성조건을 반영해 포장체에 발생하는 응력과 변형률을 예측하여 계측결과와 비교하고자 하였다. 포장체의 해석기법에 따른 비교를 통해 가장 적합한

수치해석기법을 판별하기 위해 선형다층탄성해석(Layered Linear Elastic; LLE), 선형유한요소해석(Linear Finite Element; LFE), 포장체의 응력의존적인 거동을 고려할 수 있는 비선형 유한요소해석(Non-Linear Finite Element; NFE)기법을 이용하여 결과를 비교하였다. 본 논문에서는 KENLAYER(Huang, 2004) 프로그램을 이용하여 다층탄성해석을, 비선형 유한요소해석에는 재료의 응력의존적인 거동특성을 반영하기 위하여 Uzan(1985)의 모형을 활용할 수 있는 FERUT(Park and Lytton, 2004, 박성완 등 2008) 프로그램을 사용하였다.

수치해석시 아스팔트층의 물성은 시험도로의 동일한 단면과 시점에 FWD(Falling Weight Deflectometer)시험을 실시한 자료를 역산하여 사용하였다. FWD 시험결과인 처짐곡선을 역해석하면 포장체 각 층의 물성을 추정할 수 있는데, 본 논문에서는 SHRP(Strategic Highway Research Program)에서 추천하는 MODULUS 6.0 프로그램을 이용하여 역해석을 실시하였으며, 이를 통해 구해진 각 층의 탄성계수를 선형다층 탄성해석시의 입력물성으로 활용하였다. 또한 비선형 해석시 보조기층 및 노상의 물성은 시험도로현장계측을 실시한 시기의 함수비와 동일한 조건에서 회복탄성계수시험을 실시한 자료(박성완 등, 2007)를 통한 Universal모델의 모델계수를 입력변수로 하여 응력의존성을 고려한 수치해석을 실시하였으며, 하중조건은 동적재하시험시의 차량 접지압과 동일하게 689kPa를 적용하였다. 해석에 적용한 입력물성들은 표1과 같다.

표 1. 수치해석시 적용된 물성 및 함수비 조건

구 분		04년 9월		04년 11월	
		A5단면	A14단면	A5단면	A14단면
AC 층		1,000MPa	900MPa	3,500MPa	3,000MPa
탄성조건	보조기층	210MPa		240MPa	
	노상	70MPa		75MPa	
비선형 조건	보조기층	OMC 조건		OMC -2% 조건	
	노상				

표 2는 토압계측결과와 해석기법에 따른 수치해석결과의 토압 상대오차비율을 상호 비교한 것으로 선형다층탄성해석과 선형유한요소해석을 통한 해석보다는 비선형 유한요소해석기법으로 해석한 결과가 실제 계측토압결과와 매우 유사한 경향을 나타내어 상대오차비율이 가장 작게 나타났다.

표 2. 토압 계측결과와 해석기법별 수치해석결과의 상대오차 비율

구 분		04년 9월		04년 11월	
		A5단면	A14단면	A5단면	A14단면
선형탄성 해석 (LLE)	중간층 하부	-	16.4%	-	79.4%
	기층 하부	63.0%	7.9%	107.6%	39.3%
	보조기층하부	-14.8%	-21.0%	9.1%	-0.2%
선형유한 요소해석 (LFE)	중간층 하부	-	-3.6%	-	61.1%
	기층 하부	48.7%	1.4%	97.0%	30.8%
	보조기층하부	-18.7%	-28.6%	19.3%	-6.5%
비선형 유한요소 해석 (NFE)	중간층 하부	-	-14.5%	-	-10.4%
	기층 하부	-12.7%	-6.6%	-13.8%	-9.7%
	보조기층하부	-16.3%	4.4%	-0.3%	11.5%

그림 6은 깊이방향 토압분포로서 비선형 유한요소해석(NFE)기법으로 해석한 결과에서 A14단면의 중간층 하부에서는 계측토압과 차이를 다소 보이고 있으나(그림 6(c), (d)) 계측토압과의 오차 비율이 15% 이내로 탄성해석기법으로 산출한 결과보다는 오차가 상당히 적은 것으로 나타났다.

또한, 기층 하부와 보조기층 하부로 내려갈수록 그 오차는 더욱 감소하여 계측결과와 해석결과가 매우 근접하였으므로, 본 연구에서 사용한 FERUT 해석프로그램의 비선형 해석방법을 이용한 포장체의 거동분석 예측은 매우 신뢰할 수 있는 수준이라고 판단된다. 따라서 Universal 모델을 적용한 FERUT 해석프로그램의 비선형 유한요소해석기법을 활용하여 실제 포장에서 발생할 수 있는 다양한 상황을 모사하여 포장체의 거동을 분석하는 것은 매우 합리적인 방안이라 판단된다.

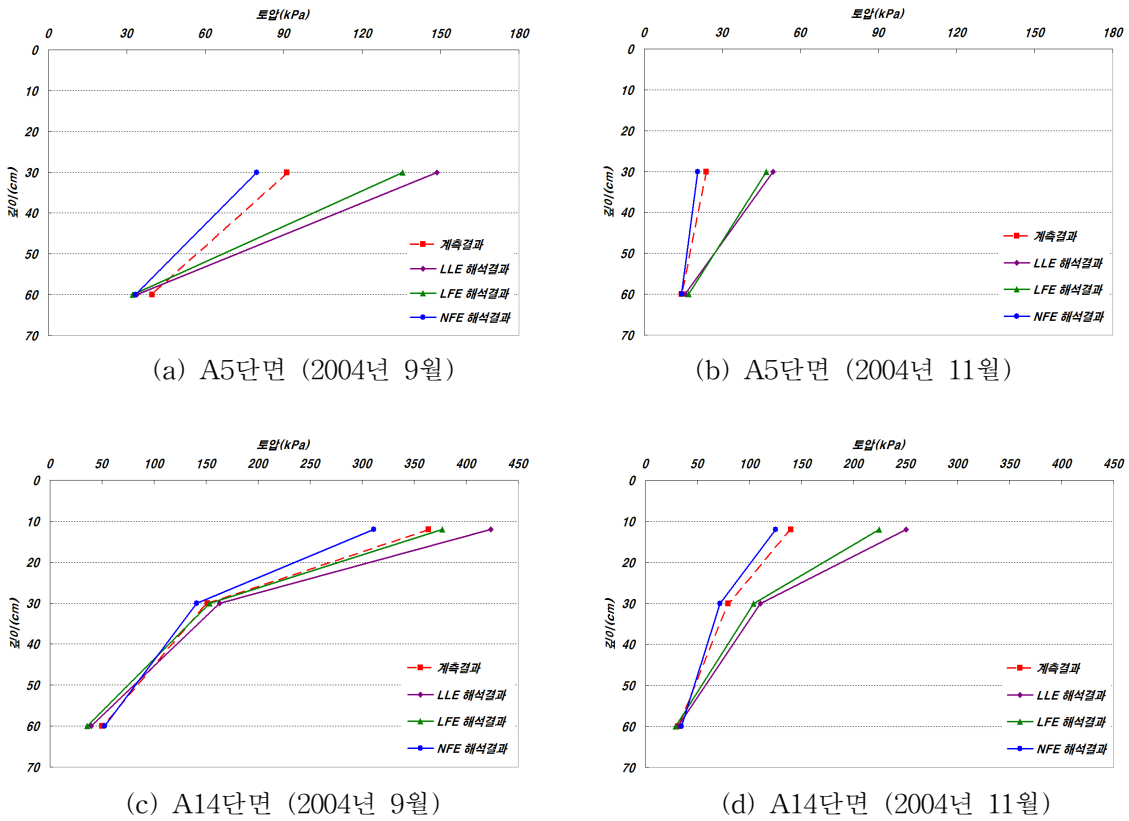


그림 6. 계측결과와 수치해석 결과의 비교

토압계측자료와 해석기법에 따른 수치해석을 통해 비선형해석기법을 통한 결과가 계측결과와 매우 유사한 경향을 나타내어 가장 합리적인 해석방법으로 판단된다. 변형률분석은 비선형해석기법을 통해 분석하였는데 표 3은 아스팔트층 하단의 인장변형률 계측자료와 수치해석의 결과를 나타낸 것으로 토압의 계측결과와는 달리 상호간에 오차는 다소 큰 것으로 나타났다. 아스팔트층은 실제 점탄성적인 거동을 하고 있으나 수치해석에서 아스팔트층은 탄성체로 가정하여 해석한 결과로 기인하며 차량의 동적 거동의 영향을 충분히 반영하지 못하고 포장 층간의 분리와 포장체 손상 등 실제 계측에서는 반영되었지만 수치해석에서는 고려할 수 없는 영향이 존재하기 때문이라 판단된다.

표 3. 변형률 계측결과와 수치해석결과와의 비교

구 분		2004년 9월	2004년 11월
A5단면	계측결과	112.9 $\mu\epsilon$	34.0 $\mu\epsilon$
	수치해석결과	164.4 $\mu\epsilon$	58.9 $\mu\epsilon$

포장구조 설계시 장기적인 관점에서 영구변형을 예측하는 것은 매우 중요한 사항으로 국내외에서 포장체의 영구변형에 대한 많은 연구가 수행되었으나, 아스팔트층에서 발생하는 영구변형에 대한 연구결과가 대부분이고 도로기초는 포장체 거동에 있어 매우 중요한 역할을 함에도 불구하고 이에 대한 연구

는 매우 미진한 실정으로 도로기초 영구변형 실내시험에 대한 시험절차 마련되어 있지 않다. 이는 도로기초에서 발생하는 응력의 범위가 파악되어 있지 않음에 기인하는 것으로, 본 연구에서 파악된 자료와 향후 다양한 단면구성 및 환경조건에서의 응력범위가 조사된다면 도로기초 재료의 영구변형시험에 대한 실내시험조건을 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 총 합

한국도로공사 시험도로 현장에서 얻어진 도로기초의 토압 및 변형계측 결과와 수치해석을 통한 예측 결과를 분석하고 비교한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 1) 포장 단면의 변화와 환경변화는 도로기초에서 발생하는 토압과 변형률에 많은 영향을 미치는 것으로 파악되었다.
- 2) 현장 계측결과와 비교한 결과, 도로기초의 응력의존성을 고려할 수 있는 Universal 모델을 적용한 비선형 유한요소해석기법을 활용하여 포장체의 거동을 분석하는 것이 타 해석 기법보다 합리적인 방법임을 파악하였다.
- 3) 향후, 다양한 포장 단면구성 및 환경조건에서의 응력범위를 파악하여 도로기초 재료의 영구변형시험에 대한 실내시험조건을 마련하고자 한다.

## 감사의 글

본 논문은 “2008년 도로하부 지지력과 동상민감성 상관관계 정립연구(1차년도)”의 일부 결과로, 연구를 가능케 한 국토해양부와 한국건설교통기술평가원에 감사드립니다. 또한 시험도로의 현장자료 활용에 도움을 주신 한국도로공사 관계자분들께도 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 박성완, 이치현, 황규영 (2007), “응력상태와 함수비에 대한 시험도로 노상토의 회복탄성거동”, 한국도로학회논문집 제9권 제1호 pp.47-56
2. 박성완, 황규영 (2008), “도로기초 지반재료의 회복변형 및 응력의존예측”, 한국도로학회논문집 제10권 제1호 pp.49-62
3. Huang, Y. H. (2004), “Pavement Analysis and Design”, second edition, Prentice Hall, NY, US.
4. Liu, W. and Scullion T. (2001), MODULUS 6.0, Texas Transportation Institute, TX, US.
5. Park, S. and Lytton, R. L. (2004), “Effect of Stress-Dependent Modulus and Poisson’s Ratio on Structural Responses in Thin Asphalt Pavements.” *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp.387-394.
6. Uzan, J. (1985), “Characterization of Granular Material”, Transportation Research Record 1022, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp.52-59