

차량속도에 따른 연성 포장의 최대인장변형률에 관한 연구

A Study on Maximum Tensile Strain of Vehicle Speeds in Flexible Pavement

조명환* · 김낙석** · 최호근*** · 서영국***

Jo, Myoung-hwan · Kim, Nakseok · Choi, Hogeun · Seo, Youngguk

Abstract

This study presents a viscoelastic characterization of flexible pavement subjected to moving loads. A series of field tests have been conducted on three pavement sections (A2, A5, and A8) at the Korea Expressway Corporation (KEC) test road. The effect of vehicle speed on the responses of each test section was investigated at three speeds: 25km/hr, 50km/hr, and 80km/hr. During the test, both longitudinal and lateral strains were measured at the bottom of asphalt layers and *in-situ* measurements were compared with the results of finite element (FE) analyses. A commercial FE package was used to model each test section and a step loading approximation has been adopted to simulate the effect a moving vehicle. Field responses reveal the strain anisotropy (i.e., discrepancy between longitudinal and lateral strains) and the amplitude of strain normally decreases as the vehicle speed increases. In most cases, lateral strain was smaller than the longitudinal strain, and strain reduction was more significant in lateral direction.

Key words : Asphalt Pavement, Vehicle Speed, Test Road, Viscoelastic, Step-loading

1. 서 론

아스팔트 콘크리트 포장을 설계할 때, 반복적인 차량 하중에 의해서 아스팔트 콘크리트 포장 층 하부에서 발생하는 최대변형률과 누적수직변형률을 사용하여 포장의 공용수명을 예측하게 된다. 따라서 공용수명을 보다 정확하게 예측하기 위해서 포장 파손에 영향을 미치는 지배요소(차량하중, 환경조건, 재료특성 등)들이 실제 설계에 어떠한 영향을 미치는지 정량화되어야 한다. 여러 연구들을 통해서 포장 파손에 영향을 미치는 지배 요소 중 동적하중 상태에 대한 연구가 수행되었지만 대부분의 연구가 일정한 크기를 가진 하중을 사용하였고(Zaghloul and White, 1993) 시간에 따른 하중의 크기와 아스팔트 콘크리트 포장의 점탄성 특성을 고려하지 않았다. 그러나 실제 공용상태에 있는 포장의 응력과 변형률은 동적하중상태에서 발생하며, 이러한 동적 하중 상태는 연성 재료를 사용하고 있는 아스팔트 콘크리트 포장의 표층에 더 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 차량의 이동 속도를 3가지로 구분하여(저속, 중속 그리고 고속) 현장의 포장 거동을 측정하고, 아스팔트 콘크리트 포장 재료의 점탄성 특성과 차량의 이동속도를 고려할 수 있는 3차원 유한요소 모델을 사용하여 차량의 이동하중이 포장 거동에 미치는 영향에 대해서 평가하고자 한다.

2. 속도 변화에 따른 현장 거동 분석

차량의 속도가 포장의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 한국도로공사에서 운영중인 시험도로의 여러 단면 중 대표적인 A2, A5, 그리고 A8 단면을 선정하여 현장 동적하중 재하시험을 수행하였으며, 각 단면에 사

* 정회원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 박사수료(E-mail: dragonjo@unitel.co.kr)

** 정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 교수

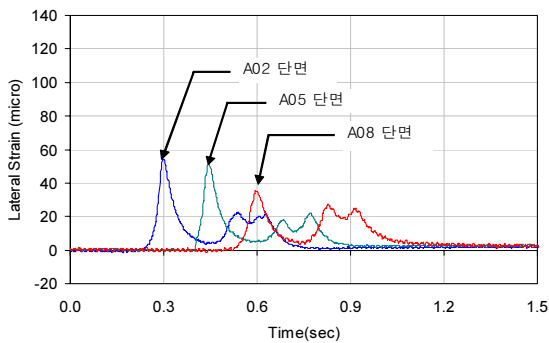
*** 정회원 · 동부건설(주), 현장소장

**** 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

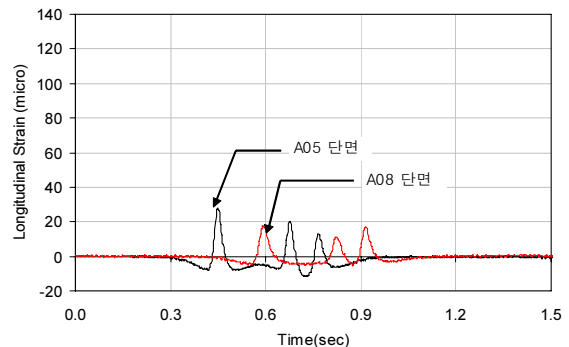
용된 변위계는 $\pm 5,000\mu\epsilon$ 의 측정 범위를 가지고 있는 KM100HAS 변위계를 사용하여 횡방향(차량의 진행 방향과 직각 방향)과 종방향(차량의 진행 방향) 변형률로 구분하여 측정하였다. 차량의 이격거리와 속도는 피에조 센서 측정방식을 사용하였으며, 피에조 센서 측정방식에 관련된 사항은 김낙석 등(2006)의 문헌에 나타나 있다. 표 1은 각 단면의 구조적 특성을 나타낸 것이며, 그림 1은 중속(50km/hr)으로 수행된 동적하중 재하시험 결과를 시간이력에 대한 아스팔트 콘크리트 층 하부의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 횡방향 변형률 분포이며 A2 단면과 A5 단면의 최대 변형률 값이 큰 차이가 없는 것으로 나타났지만 이는 차량의 이격거리효과 때문인 것으로 사료되며, A8 단면의 경우는 단면 두께가 작은 A5 단면 보다 큰 변형률이 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 차량이 횡방향 변형률계로 접근함에 따라 변형률의 크기가 점진적으로 증가하여 최대인장변형률이 발생한 이후 점진적으로 감소하는 형태를 보여주고 있다. 종방향 변형률을 나타낸 그림 1(b)에서 A2 단면은 변위계로부터 입력신호를 받아 드릴 수 없어서 본 연구에서는 생략되어있으며, 차량이 접근함에 따라서 순간적으로 압축변형률이 발생한 후 점진적으로 최대인장변형률이 발생한 후 차량이 변형률계로부터 멀어지면서 다시 압축변형률이 발생하는 형태를 보여주고 있어 횡방향 변형률 분포와는 다른 형태를 보여주고 있다.

표 1. 단면별 구조적 특성

구분		표층	중간층	기층	보조기층	선택층	노상
A2 단면	층 두께(cm)	5	7	8	30	30	-
	탄성계수(MPa)	4,252	4,715	5,043	73	43	43
	포아송비	0.30	0.30	0.35	0.40	0.45	0.45
A5 단면	층 두께(cm)	5	7	18	30	30	-
	탄성계수(MPa)	4,252	4,715	5,043	73	43	43
	포아송비	0.30	0.30	0.35	0.40	0.45	0.45
A8 단면	층 두께(cm)	5	7	28	30	30	-
	탄성계수(MPa)	4,252	4,715	5,043	73	43	43
	포아송비	0.30	0.30	0.35	0.40	0.45	0.45



(a) 횡방향 변형률



(b) 종방향 변형률

그림 1. 이동하중에 따른 현장 거동(50 km/hr)

3. 포장의 예측 거동 분석

3.1 유한요소해석 모델

아스팔트 콘크리트 포장에서 차량의 이동 속도가 아스팔트 콘크리트 포장의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 3차원 유한요소모델을 만들었으며, 차량의 이동속도는 저속(10 km/hr 및 25 km/hr), 중속(50 km/hr), 고속(80 km/hr)로 구분하였다. 유한요소모델의 크기는 1.4m × 1.6m × 2.4m을 사용하였으며, 해석 위치의 중요도에 따라 조밀한 부분은 1cm의 요소 크기를 사용하였고 하중이 재하되는 부분에서 멀어질수록 5cm-30cm의 요소 크기를 사용하였다. 아스팔트 혼합물의 선형 점탄성 거동은 맥스웰 모델로부터 얻어진

Prony series를 사용하였으며, Prony series는 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 $\sigma(t)$ 와 $\epsilon(t)$ 는 시간 t 에서의 응력과 변형률을 말하며, $E(t)$ 는 Relaxation modulus를 말한다(Kim et al., 2002).

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad \text{식 (1)}$$

3.2 차량의 이동 속도 고려 방법

Papagiannakis et al.(1996)은 차량의 이동하중을 모사하기 위하여 한 점에서 사인과 모양으로 작용하는 동적 하중 함수를 사용하여 차량의 속도와 하중의 반복 재하 효과를 고려하였다. 그러나 본 연구에서는 임의의 속도를 가진 타이어가 포장의 표면을 이동하는 형상을 보다 현실성 있게 모델화하기 위하여 한 개의 바퀴 하중이 가지고 있는 접지 면적이 시간의 변화에 따라서 차량의 진행방향(종방향)으로 연속적으로 이동하는 단계하중 형태를 사용하고자하며, 단계하중의 개념을 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 그림 2와 그림 3을 살펴보면 차량 하중이 접근하는 3번 요소의 경우 시간이 T_1 에서 T_2 로 흐름에 따라 하중의 크기가 $P=0$ 에서 P_{max} 로 변하게 되며, 동시에 하중이 지나가는 1번 요소의 경우 P_{max} 에서 $P=0$ 으로 하중이 제거되는 형태가 된다. 그리고 3번 요소의 경우 타이어 접지면적 안에 포함될 때까지 P_{max} 를 유지한다.

3.3 속도 변화에 따른 해석 결과 및 분석

차량의 이동 속도가 포장 거동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 3차원 유한요소해석을 통하여 예측된 아스팔트 콘크리트 포장 층 하부의 최대 인장변형률을 차량의 이동속도와 변형률의 방향성으로 구분하여 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 최대 인장변형률의 예측 위치는 추후 연구에서 현장 거동과의 비교를 위하여 동적하중 재하시험의 시험 조건과 유사하도록 변위계와 차량 중심축 사이의 이격거리를 타이어 중심축으로부터 10cm 위치로 일괄 적용하였으며, 차량 진행방향에 대해서 횡방향(차량의 진행방향과 직각 방향)과 종방향(차량의 진행 방향)으로 구분하였다. 그림 4를 살펴보면 단면(아스팔트 콘크리트 층 두께 차이)에 상관없이 횡방향 변형률이 종방향 변형률보다 약 27% 정도 작은 것을 알 수 있으며, 동일 단면에서 이동 속도가 증가함에 따라 최대 인장변형률은 감소하는 형태를 보여주고 있다.

차량의 이동속도가 동일할 경우, 예측 거동은 단면의 두께가 증가함에 따라서 최대 인장변형률의 크기가 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 10km/hr에서 80km/hr로 차량의 이동속도가 증가함에 따라 층 두께가 가장 작은 A2 단면의 최대 인장변형률은 횡방향 변형률의 경우 약 8%의 감소폭을 보여주었으며, 종방향 변형률은 약 7%의 감소폭을 보여주었다. 아스팔트 콘크리트 포장 층의 두께가 30cm인 A5 단면의 경우, 차량의 이동속도가 증가함에 따라 최대 인장변형률은 A2 단면과 비슷한 수준으로 감소하는 것으로 나타났으며, 층 두께가 40 cm인 A8 단면의 경우, A2 단면이나 A5 단면보다 이동속도의 증가에 대한 최대 인장변형률의 감소폭이 더 크게 나타났다. 또한 A8 단면의 경우 횡방향 변형률과 종방향 변형률의 감소율을 살펴보면 각각 27%와 11%의 감소폭을 보여주었으며, A2 단면이나 A5 단면보다 횡방향 변형률과 종방향 변형률의 감소폭에 차이가 큰 것으로 나타났다.

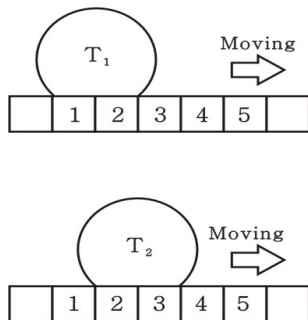


그림 2. 차량의 이동효과를 모사하는 방법

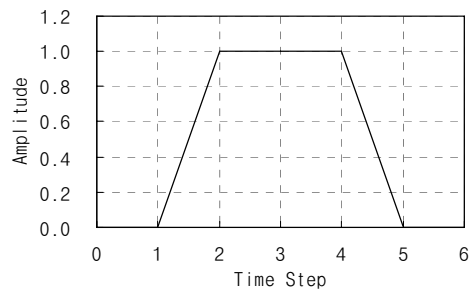
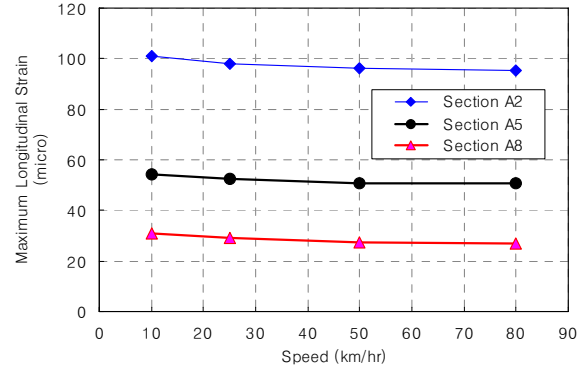
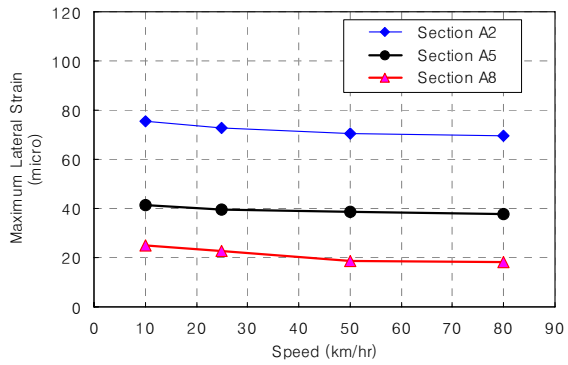


그림 3 각 차량 하중의 형상



(a) 횡방향 변형률

(b) 종방향 변형률

그림 4. 차량의 속도에 따른 최대 변형률 비교(기층 하부, 27 cm)

4. 결론

차량의 이동 속도가 아스팔트 콘크리트 포장의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동적하중 재하시험과 단계하중을 사용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 현장거동과 예측거동으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현장 시험을 통하여 아스팔트 콘크리트 층 하부에서 발생하는 변형률 분포가 차량의 진행방향에 따라 차이가 나는 것을 확인하였으며, 3차원 유한요소해석에 적용된 단계하중이 현장의 변형률 분포 분포곡선을 잘 나타내는 것으로 나타났다.
2. 아스팔트 콘크리트 포장 층에 발생하는 최대 인장 변형률은 진행 방향에 대해서 횡방향과 종방향 변형률의 크기가 약 27% 정도 차이가 나는 것으로 나타났으며, 동일 단면에 대한 비교에서 차량의 속도가 증가함에 따라 최대 인장 변형률의 크기가 감소하는 것으로 나타났다.
3. 동일 단면에서 차량의 이동속도가 증가함에 따라 아스팔트 콘크리트 층 하부에서 발생하는 최대 인장 변형률은 방향성(횡방향 및 종방향)에 관계없이 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 단면의 두께가 증가할수록 횡방향 변형률과 종방향 변형률의 감소폭이 차이가 나는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술연구원 과제인 “시험도로 포장의 역학적 거동분석 및 예측기법 개발 연구”의 주요 성과물입니다.

참고문헌

- 김낙석, 정진훈, 이재훈, 박창우(2006), “원더링 장비 적용을 통한 아스팔트 포장 거동 특성 연구”, 대한토목학회 논문집 제26권 제1D호, pp 89-94, 대한토목학회.
- Kim, Y.R., Daniel, J.S., and Wen, H.(2002), “Fatigue performance evaluation of Westrack Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Continuum Damage Approach”, Report No. FHWA/NC/2002-004.
- Papagiannakis, A.T., N. Amoah and A. Taha(1996), “Formulation for Viscoelastic Response of Pavements under Moving Dynamic Loads”, Journal of Transportation Engineering, ACSE Vol. 122, No. 2, pp 140-145.
- Zaghoul, S.M. and White, T.D.(1993), “Use of a Three Dimensional Dynamic Finite Element Program for Analysis of Flexible Pavement”, Transportation Research Record 1388, TRB, National Research Council, Washinton, D.C., pp. 60-69.