

# 아스팔트 혼합물의 점탄성과 차량의 이동 속도가 포장 거동에 미치는 영향

## Asphalt Concrete Pavement Response to Moving Load and Viscoelastic Property

조명환\* · 김낙석\*\* · 서영국\*\*\*

Jo, Myoung-hwan · Kim, Nakseok · 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: 25 km/hr, 50 km/hr, and 80 km/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, ABAQUS was used to model each test section and a step loading approximation has been adopted to simulate the effect a moving vehicle. For viscoelastic analysis, relaxation moduli of asphalt mixtures were obtained from laboratory test. Field responses reveals 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 longitudinal strain, and strain reduction was more significant in lateral direction.

Keywords : asphalt pavement, vehicle speed, test road, viscoelastic, step-loading

### 요 지

본 논문에서는 차량의 주행속도가 아스팔트 포장의 변형률 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 현장시험을 실시하고 그 결과를 3차원 유한요소해석과 비교, 분석하였다. 한국도로공사 시험도로에서 기층의 두께가 다른 세 단면(A2, A5, A8)을 선정하고, 각 단면별로 세 가지의 주행속도(25, 50, 80km/hr)에 대한 종, 횡방향 변형률을 측정하였다. ABAQUS를 이용한 수치해석에서는 시험차량인 덤프트럭(단축-탠덤축)의 축하중을 단계하중(step loading)으로 모사하였으며, 시험도로 아스팔트 혼합물에 대한 선형 점탄성 물성 계수( $E(t)$ )를 적용하여 보다 현실적인 거동해석을 실시하였다. 주어진 시험 조건에서 아스팔트 층 하부에서 측정된 종, 횡방향 변형률의 차이(이방성)는 모든 단면에서 목격되었고, 수치해석결과 차량의 주행속도가 증가함에 따라 임계 지점에서 발생하는 최대 변형률의 크기는 감소하는 것으로 예측되었다. 또한, 최대변형률의 크기도 횡방향 변형률이 종방향 변형률에 비하여 약 27% 정도 작았으며, 차량의 속도가 증가함에 따라 최대 변형률의 감소폭도 횡방향 이 약간 큰 것으로 나타났다.

핵심용어 : 아스팔트 포장, 주행속도, 시험도로, 점탄성, 단계하중

### 1. 서 론

현재 공용중인 아스팔트 콘크리트 포장이나 새로 포설될 아스팔트 콘크리트 포장의 공용성능을 예측하는 것은 포장 기술자에게 매우 중요한 일이다. 이러한 공용성능을 예측하기 위해서 포장의 파손에 영향을 미치는 지배요소(차량하중, 환경조건, 재료특성 등)들이 실제 설계에서 어떠한 영향을 미치는지 정량화해야 할 필요성이 있다. 탄성이론에 의하면 최대 변형률은 아스팔트 콘크리트 표층 하부에서 발생한다. 따라서 대부분의 포장설계 모델은 피로 균열의 경우 아스팔

트 층 하부에서 발생하는 인장변형률을 사용하여 반복적인 차량의 하중에 대하여 예측하며, 소성변형의 경우 누적 수직 변형률을 사용하여 예측하고 있다.

일반적으로 차량의 바퀴하중에 의해 포장체에 발생하는 응력과 변형률은 정적하중을 사용하여 계산 된다(Westergaard, 1925; Huang, 2004). 그러나 실제 공용상태에 있는 포장의 경우 응력과 변형률은 동적하중상태에서 발생하며, 이러한 동적 하중 상태는 연성 재료를 사용하고 있는 아스팔트 콘크리트 포장의 표층에 더 많은 영향을 미치게 된다. 여러 연구들을 통해서 이러한 동적하중 상태에 대한 포장의 동적

\*정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 박사과정 (E-mail : navdragon@naver.com)

\*\*정회원 · 교신저자 · 경기대학교 토목환경공학부 교수 (E-mail : nskim1@kyonggi.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 (E-mail : seoyg89@ex.co.kr)

거동을 확인하기 위하여 수행되었지만 대부분의 연구는 일정한 크기를 가진 하중을 사용하였고(Zaghloul and White, 1993) 시간에 따른 하중의 크기와 아스팔트 콘크리트 포장의 점탄성 특성을 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 차량의 이동 속도를 변화시키며 현장의 포장 거동을 측정하고, 재료의 점탄성 특성과 차량의 이동속도를 고려한 유한요소 해석을 통하여 포장의 예측거동을 분석하고자 한다.

## 2. 연구목적

최근 십 수 년 동안 포장해석방법에 대한 많은 발전이 있었지만 차량의 이동 하중이 포장 거동에 미치는 영향에 대한 정확한 평가는 아직도 부족한 상태다. 특히, 차량의 이동 하중이 포장 거동에 미치는 영향은 아스팔트 콘크리트 포장의 파손 원인을 파악하는데 매우 중요한 역할을 하기 때문에, 본 연구에서는 시험조건 및 해석조건으로 다양한 하중 속도(저속, 중속 그리고 고속)와 아스팔트 콘크리트 포장의 구조적 특성에 따른 현장계측, 그리고 3차원 유한요소해석을 수행하여 차량의 이동하중이 포장 거동에 미치는 영향에 대해서 평가하고자 한다.

## 3. 속도 변화에 따른 현장 거동 분석

### 3.1 현장 시험 조건

차량의 속도가 포장의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 한국도로공사에서 운영중인 시험도로의 여러 단면 중 대표적인 A2, A5, 그리고 A8 단면을 선정하여 현장 동적 하중 재하시험을 수행하였으며, 각 단면의 구조적 특성을 표

1에 나타내었다. 표층과 기층의 재료와 두께는 모든 단면에 대하여 동일하게 적용하였고 기층의 두께만 다르다. 동적하중 재하시험은 기준이 되는 변위계로부터 차량의 주행 이격 거리가 최소화 될 수 있도록 변위계가 위치한 포장의 표면에 차량 진행 방향으로 표시한 유도선을 사용하였다. A5 단면의 경우 그림 1과 같이 ASG103 변위계와 ASG 106 변위계를 기준으로 하였으며, A2 단면과 A8 단면은 ASG 202 변위계와 ASG 205 변위계를 기준으로 15톤 덤프트럭을 사용하였다.

동적하중 재하시험에 사용된 차량은 상재하중이 없는 공차의 3축 덤프트럭을 사용하고, 운행속도는 저속(10 혹은 25km/hr), 중속(50km/hr), 그리고 고속(80km/hr)을 목표로 하였으며, 운전자가 목표 주행속도와 차량의 주행위치를 최대한 일정하게 유지할 수 있도록 실험을 수행하였다. 아스팔트 콘크리트 포장에 발생하는 변형률은  $\pm 5,000\mu\epsilon$ 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 자세한 사항은 참고문헌 김낙석 등(2006)의 문헌에 나타나 있다.

### 3.2 동적하중 재하시험 결과 및 분석

동적하중 재하시험 결과 차량의 실제 주행 속도와 차량의 이격거리를 표 2에 나타내었다. 표 2를 살펴보면 실제 동적 하중 재하시험에서 운전자의 집중력 및 덤프트럭을 운전하는 운전석 위치의 영향으로 실험에서 목표로 하고 있는 정확한 위치와 속도로 운전하기는 쉽지가 않기 때문에, 차량의

표 1. 단면별 구조적 특성

구 분	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

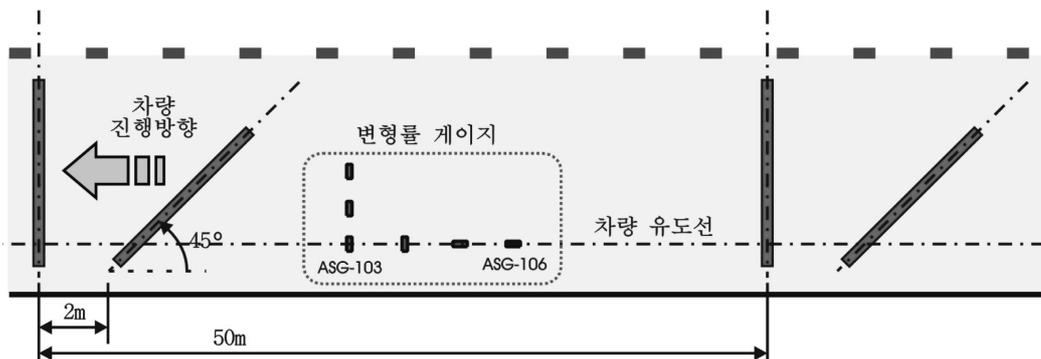


그림 1. 동적하중 재하경로와 이격거리 측정(A5 단면의 경우)

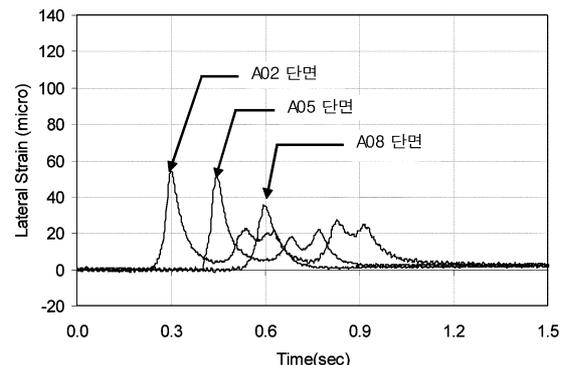
표 2. 동적하중 재하시험 주행 정보

저 속(30km/hr 또는 10km/hr)								
구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)	구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)	구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)
A210-1	33.62	6.50	A530-1	6.96	24.63	A810-1	7.35	8.98
A210-2	29.62	8.53	A530-2	6.96	25.06	A810-2	10.05	9.23
A210-3	34.84	7.03	A530-3	10.42	24.49	A810-3	-24.05	12.02
<b>평균</b>	32.69	7.35	<b>평균</b>	8.11	24.73	<b>평균</b>	8.7	9.11
중 속(50km/hr)								
구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)	구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)	구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)
A250-1	9.58	50.96	A550-1	13.77	51.61	A850-1	13.38	51.61
A250-2	12.30	51.94	A550-2	10.06	49.13	A850-2	10.79	51.12
A250-3	15.64	48.98	A550-3	10.06	51.12	A850-3	11.19	50.35
<b>평균</b>	12.51	50.63	<b>평균</b>	11.30	50.62	<b>평균</b>	12.09	51.37
고 속(80km/hr)								
구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)	구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)	구분	이격거리 (cm)	평균주행속도 (km/hr)
A280-1	16.52	78.79	A580-1	13.30	76.57	A880-1	16.70	76.57
A280-2	16.62	76.57	A580-2	13.30	77.57	A880-2	13.89	77.57
A280-3	failure	failure	A580-3	17.45	77.66	A880-3	11.20	77.66
<b>평균</b>	16.57	77.68	<b>평균</b>	14.68	77.27	<b>평균</b>	11.79	77.07

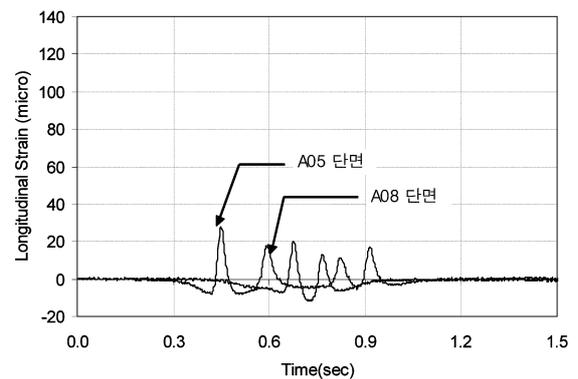
주행속도는 약 ±4km/hr 정도의 오차와 약 7-35cm의 이격거리(차륜부 계측기의 중심으로 부터의 거리)를 가지고 주행되었음을 알 수 있다. 최근의 연구(서영국 등, 2006a; 조명환 등, 2006) 결과가 보여 주는 것처럼 실제 아스팔트 포장의 거동은 주행이격에 매우 민감하게 반응한다. 그러나 본 연구에서는 이격거리의 영향보다는 차량의 주행속도에 따른 포장의 거동 분포를 중심으로 분석하고자 한다.

그림 2는 시험도로의 A2, A5단면 및 A8단면에서 수행된 동적하중 재하시험 중 50km/hr의 속도에서 측정된 포장 거동을 횡방향 및 종방향 변형률로 구분하여 시간이력에 대해서 나타낸 것이다. 이때 각 변형률의 측정 위치는 아스팔트 층 하부로 A2 단면의 경우는 표층 표면으로부터 17cm 지점이고, A5 단면과 A8 단면은 각각 표층 표면으로부터 27cm와 37cm 지점이다. 그림 2(b)의 종방향 변형률 그림에서 A2 단면의 경우는 변위계로부터 입력신호를 받아 드릴 수 없어서 본 연구에서는 생략했다. 그림 2(a)를 살펴보면 A2 단면과 A5 단면의 최대 변형률의 값이 큰 차이가 없는 것으로 나타났지만 이는 차량의 이격거리가 10cm 전후이기 때문인 것으로 사료되며, A5 단면과 A8 단면의 경우는 단면 두께가 작은 A5 단면에서 보다 큰 변형률이 발생한 것을 확인할 수 있다.

또한 그림 2를 살펴보면 횡방향 변형률과 종방향 변형률은 차량이 각각의 변형률계로 접근함에 따라 확연히 다른 거동 차이를 보여주고 있다. 횡방향 변형률의 경우 차량이 변형률계로 접근함에 따라 변형률의 크기가 점진적으로 증가하여 최대인장변형률이 발생한 이후 점진적으로 감소하는 형태를 보여주지만 종방향 변형률은 차량이 접근함에 따라서 순간적으로 압축변형률이 발생한 후 점진적으로 최대인



(a) 횡방향 변형률



(b) 종방향 변형률

그림 2. 이동하중에 따른 현장 거동(50 km/hr)

장변형률이 발생한 후 차량이 변형률계로부터 멀어지면서 다시 압축변형률이 발생하는 형태를 보여주고 있다(서영국 등, 2006b)

## 4. 포장의 예측 거동 분석

### 4.1 유한요소해석 모델

아스팔트 콘크리트 포장에서 차량의 이동 속도가 아스팔트 콘크리트 포장의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 3차원 유한요소모델을 만들었다. 이때, 3차원 유한요소모델에 사용된 각 단면의 재료 물성은 전절의 표 1에 나타내었다. 유한요소모델의 해석 크기를 1.4m×1.6m×2.4m로 결정하고 해석 위치의 중요도에 따라 가장 조밀한 부분은 하중이 재하되는 부분으로 1cm의 요소 크기를 사용하였고 하중이 재하되는 부분에서 멀어질수록 2cm-30cm의 요소 크기를 사용하였다.

#### 4.1.1 포장 재료의 점탄성 특성

차량의 이동하중이 아스팔트 포장에 재하되면, 조건에 따라 크게 3가지 변형 성분(탄성, 점탄성, 그리고 소성)이 존재할 수 있다. 탄성 변형은 아스팔트 혼합물이 저온에서 고속하중을 받는 경우 주로 발생하고, 점탄성 변형은 다양한 온도에서 아스팔트 혼합물의 시간 의존적인 거동을 의미하며, 소성 변형은 전체 변형 중에서 회복되지 않는 성분이다. 차량의 이동하중을 고려한 아스팔트 포장의 역학적 모형은 이러한 하중-시간관계와 온도 조건에서 유발되는 변형률을 예측하는 것을 목표로 하고 있다.

일반적으로 아스팔트 재료의 비선형 점성 처짐은 응력의 크기(stress level), 시간(time), 그리고 온도(temperature)와 같은 3가지 요소의 영향을 받게 된다. 여기서 시간과 온도 요소를 하나의 변수인 감쇠시간(reduced time)으로 표현할 수 있다. 감쇠시간은 시간-온도 중첩이론에 따라 물리적 시간에 선형 점탄성 이동계수를 적용하여 계산할 수 있다(Park and Kim, 1997).

아스팔트 혼합물의 선형 점탄성 거동을 수학적으로 표현하기 위하여 다양한 해석 모델을 구성하는데, 보통 한 개의 스프링과 한 개의 보이트(Voight) 요소로 구성된 켈빈(Kelvin)-보이트 모델이나 한 개의 스프링과 한 개의 맥스웰(Maxwell) 요소들이 서로 나란하게 연결된 일반 맥스웰 모델을 사용한다. 일반적인 점탄성 재료의 구성방정식은 식 (1)이나 식 (2)와 같다. 본 연구에서는 일반 맥스웰 모델의 Prony series를 사용하여, 하중에 의한 시간의 함수로 표현된 현재의 응력이 현재의 변형률과 변형률 속도(strain rate) 그리고(또는) 과거의 변형률 속도 이력의 함수로 표현하였다.

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

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

여기에서,  $\sigma(t)$ : 시간 t에서의 응력(stress)  
 $\varepsilon(t)$ : 시간 t에서의 변형률(strain)  
 $D(t)$ : 크리프 컴플라이언스  
 $E(t)$ : 리렉세이션 계수  
 $\tau$ : integration parameter

#### 4.1.2 차량의 이동 속도 고려 방법

포장 해석에서 이동 중인 차량하중의 영향은 차량이 정지

해 있는 경우와 다르다. 이동하는 차량의 경우 정적인 영향과 연속적으로 하중이 변화하는 동적인 영향을 함께 갖고 있으며, 이러한 이동 하중의 영향을 평가하기 위한 해석적 접근 방법으로 타이어나 아스팔트 포장의 접촉 조건을 사용하기 위하여 각각을 모델화하는(two-solid) 조건을 사용하게 된다. 그러나 이러한 접근 방법은 해석 시간이나 포장체의 모델링에 많은 시간과 노력이 필요하기 때문에 일반적으로 해석의 효율을 높이기 위하여 유한요소모형에서 타이어나 부분은 생략하고, 포장 거동은 이미 측정하여 알고 있는 접지 응력과 아스팔트 포장만을 모델화(one-solid)하는 접근방법으로 해석을 수행한다(Yoo and Al-Qadi, 2007). 본 연구에서도 타이어나 포장체의 모델화에 이러한 접근 방법을 사용하고자 한다.

Papagiannakis *et al.*(1996)은 차량의 이동하중을 모사하기 위하여 한 점에 대해서 사인과 모양으로 작용하는 동적 하중 함수를 식 (3)과 같이 제안하였으며, 차량의 속도와 하중의 반복 재하(frequency) 효과를 고려하고자 하였다. 식 (3)을 살펴보면 차량의 하중을 시간에 대한 'D'의 주기형태로 표현하였으며 주기는 식 (4)를 통해서 구할 수 있다(Huang, 2004). 이러한 함수를 통해서 차량의 속도영향을 고려한 포장 거동을 예측할 수 있다. 그러나 시간의 함수로 표현되는 이동하중은 포장체 표면의 한 지점을 결정하고 그 지점에 대해 시간의 변화에 따라 하중 크기가 변화하기 때문에 차량의 진입과 진출에 대한 현장 거동을 명확하게 설명하기 힘들다는 단점이 있다.

$$P(x+t) = A \times \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{dt}{D}\right) \quad (3)$$

$$: -\frac{D}{2} \leq t \leq \frac{D}{2}$$

여기서,  $F(t)$ : 동적하중함수

$t$ : 시간(sec)

$F_0$ : 최대하중

$d$ : 주기

$$D = 12 \times \frac{\text{radian}}{\text{차량의 속도}} \quad (4)$$

따라서 본 연구에서는 임의의 속도를 가진 타이어나 포장의 표면을 이동하는 모델을 현실성 있는 해석적 접근방법으로 한 개의 바퀴 하중이 가지고 있는 접지 면적이 시간의 변화에 따라서 차량의 진행방향(종방향)으로 연속적으로 이동하는 형태의 하중을 사용하고자 한다. 이때 연속적인 하중은 사다리꼴 형태의 하중(trapezoidal loading)과 각 하중의 누적 효과를 고려한 단계하중(step-loading)으로 모사하였다. 이러한 접근방법을 통해서 단계하중은 차량의 진행방향으로 하중이 처음 재하된 요소(element)에서 하중이 다음 요소로 이동하게 되며, 마지막 요소에 하중이 도달하게 되면 한 번의 차량 이동이 끝나게 된다(Yoo *et al.*, 2006). 그림 3은 단계하중의 개념을 나타낸 것이다. 그림 3에서 차량의 하중이 접근하는 3번 요소의 경우 시간이  $T_1$ 에서  $T_2$ 로 흐름에 따라 하중의 크기는 그림 4와 같이  $P=0$ 에서  $P_{\max}$ 로 변하게 되며, 동시에 하중이 지나가는 1번 요소의 경우  $P_{\max}$ 에서

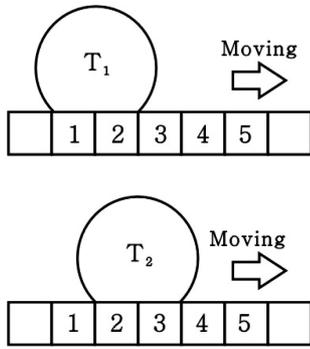


그림 3. 차륜의 이동효과를 모사하는 방법

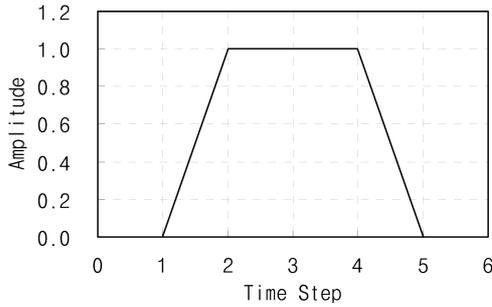


그림 4. 각 차륜 하중의 형상

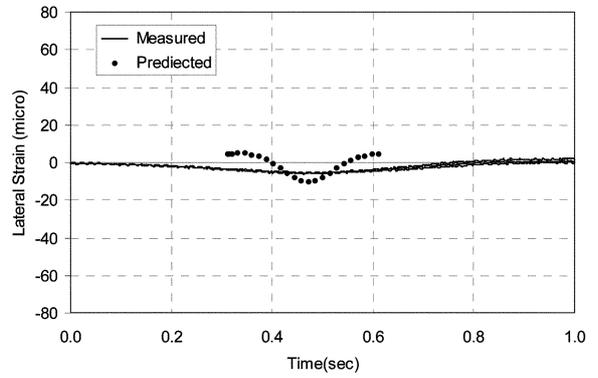
P=0으로 하중이 제거되는 형태가 된다. 그리고 2번 요소의 경우 타이어 접지면적 안에 포함될 때까지  $P_{max}$ 를 유지한다.

#### 4.2 속도 변화에 따른 해석 결과 및 분석

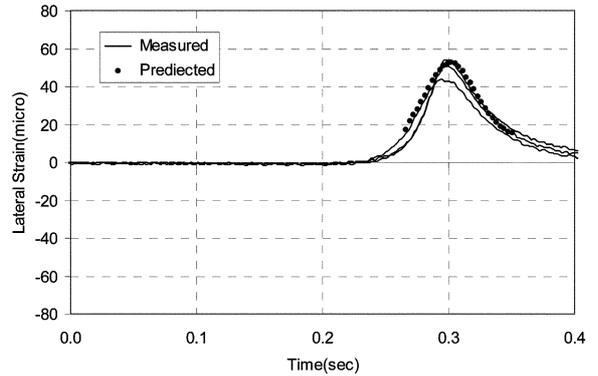
본 연구에서는 이동 하중에 대한 해석적 접근방법으로 단 계하중을 사용하였으며, 차량의 이동 속도를 저속, 중속, 고속으로 구분하여 유한요소해석을 수행하였다. 현장 시험에서 A2단면과 A8단면의 경우 저속구간은 10km/hr의 차량속도를 기준으로 동적하중 재하시험을 수행하였으며, A5단면은 25 km/hr이 사용되었다. 중속과 고속의 경우는 단면별 차이가 모두 50km/hr와 80km/hr의 속도로 각각 수행되었다. 그러나 본 연구에서 수행된 저속구간의 경우 단면별 평균 주행 속도의 차이가 10km/hr이며, 아스팔트 콘크리트 포장의 경우 점탄성 특성으로 저속구간에서 10km/hr의 영향을 무시할 수 없으므로 유한요소해석에서는 10km/hr와 25km/hr 속도 모두를 고려해 총 4가지 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

##### 4.2.1 현장거동과의 비교 및 분석

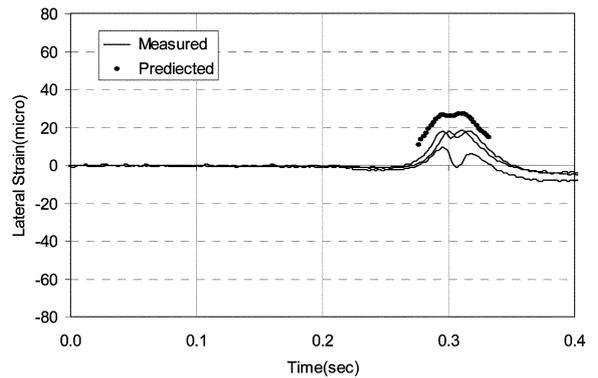
차량의 이동 속도가 아스팔트 포장의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 A2 단면, A5 단면 및 A8 단면에 대하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 포장체의 온도가 25일 경우로 해석을 수행하였으며, 포장체의 온도는 동적하중 재하시험이 수행된 5월의 포장체 온도 측정결과를 사용하였다. 그림 5, 그림 6 및 그림 7은 포장의 기층 하부에서 동적하중 재하시험으로부터 얻어진 앞바퀴(1축)의 현장거동과 유한요소해석으로부터 예측된 거동을 시간의 흐름에 대해서 나타낸 것이다. 해석 결과를 비교하기 위하여 사용된 기층 하부는 각 단면별 전체 아스팔트 층의 하부로 피로 균열 해석 분석을 위하여 전통적으로 사용되는



(a) 운행 속도 10 km/hr



(b) 운행 속도 50 km/hr

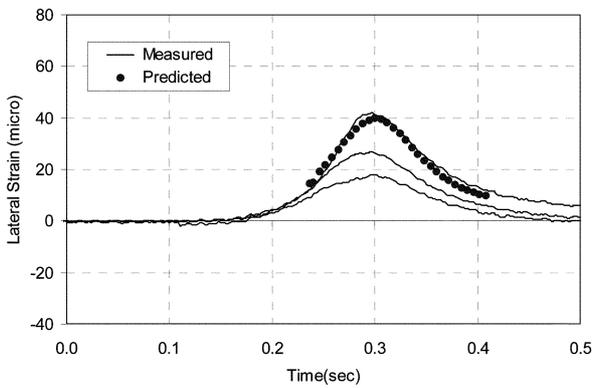


(c) 운행 속도 80 km/hr

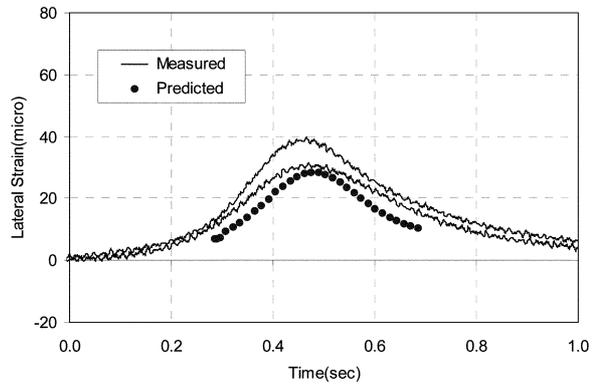
그림 5. A2 단면 횡방향 변형률

지점이다. 이때, 아스팔트 층 하부 및 트럭의 앞바퀴 하부 ( $x=0, y=0$ )를 기준으로 하여 비교하는 것이 타당하나 동적하중 재하시험에서 차량의 이격이 발생하였으며, 예측 거동도 발생한 이격거리가 발생한 지점에 대해서 횡방향 변형률 (E11)을 나타내었다.

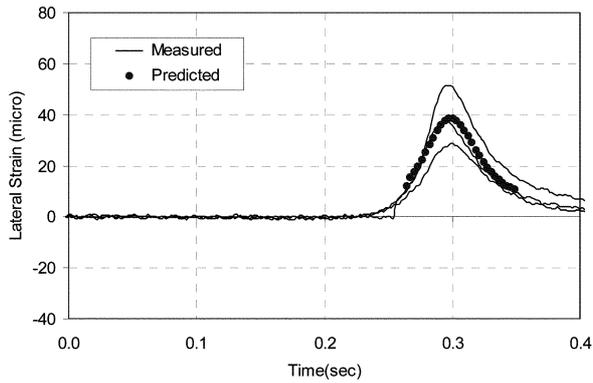
그림 5, 그림 6 그리고 그림 7을 살펴보면 단계하중을 사용한 예측거동이 현장 거동처럼 차량 하중이 임의 지점으로 접근하면서 시간 변화에 따른 변형률을 유사하게 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 5에서 그림 7을 살펴보면 실제 현장 거동이 발생하는 시점부터 바퀴하중의 영향이 소거되는 시간까지 종방향에 대한 접근성을 정확하게 묘사하지 못하는 것으로 나타났다. 이렇게 바퀴하중에 의해서 발생하는 현장의 포장 거동을 전체 시간에 대해서 예측하지 못한 이유는 유한요소해석에 사용된 데스크탑 컴퓨터의 CPU와 메모리 용량의 한계로 인하여 해석 모델의 크기가  $1.4m \times 1.6m \times 2.4m$ 로 제한적이기 때문이다.



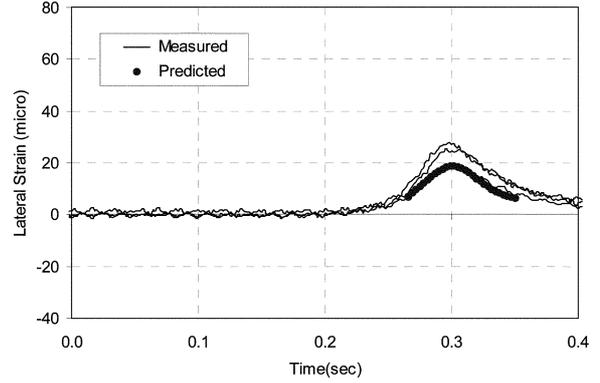
(a) 운행 속도 25km/hr



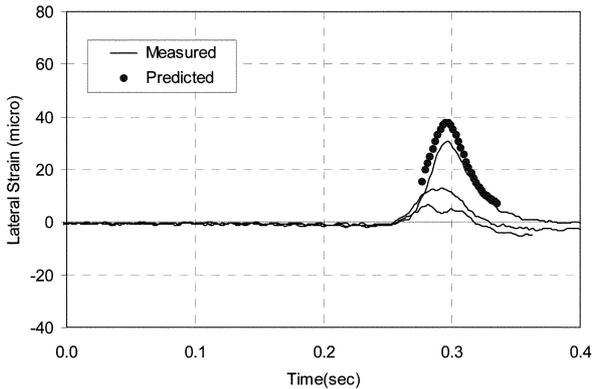
(a) 운행 속도 10 km/hr



(b) 운행 속도 50 km/hr

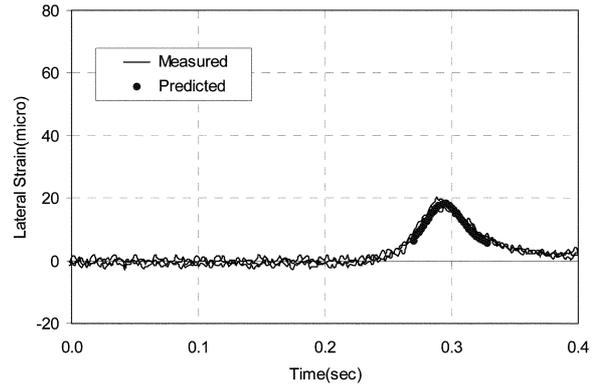


(b) 운행 속도 50 km/hr



(c) 운행 속도 80 km/hr

그림 6. A5 단면 횡방향 변형률



(c) 운행 속도 80 km/hr

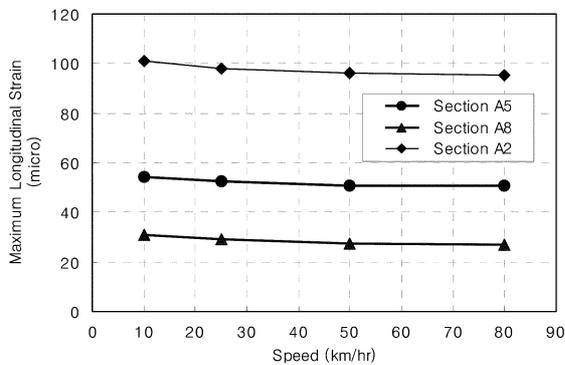
그림 7. A8 단면 횡방향 변형률

또한 그림 5(a)의 경우를 살펴보면 예측거동과 실제 현장 거동 사이에 변형률의 크기나 형태가 다른 경우에 비해서 차이가 큰 것으로 나타났다. 이렇게 예측 거동과 실제 거동 사이에 차이가 크게 나타난 이유는 차량의 하중에 의해 발생한 변형률을 계측한 위치의 이격거리가 약 30cm 전후이기 때문인 것으로 파악된다. 또한 포장의 거동을 예측하기 위하여 사용된 모델의 요소 크기가 차량의 하중과의 거리를 감안하여 5cm의 크기를 사용하였으며, 이러한 요소의 크기가 커진 영향도 실제 현장 거동보다 예측거동이 크고, 형상에 차이를 주고 있는 것으로 사료된다. 하지만 아스팔트 콘크리트 포장의 설계와 공용성 예측시 인장변형률의 계측 위치는 이격거리가 발생하지 않은 위치에서 계측된 변형률을 사용하게 되고, 그림 5에서 그림 7에 나타난 바와 같이 차량의 이격거리가 크지 않은 위치에서는 단계 하중이 현장 거동을 유사하게 모사하고 있는 것을 알 수 있다.

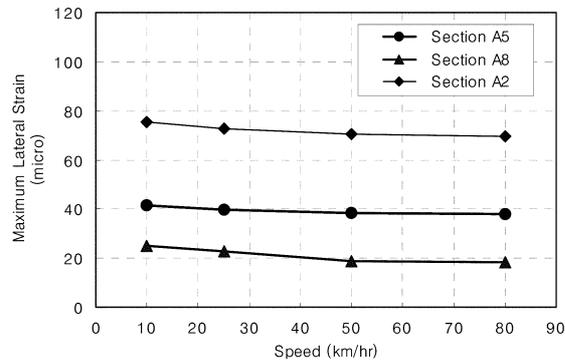
#### 4.2.2 차량의 속도의 영향 평가

차량의 속도가 포장의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 3차원 유한요소해석 결과를 단면별로 종방향과 횡방향 변형률로 구분하여 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 사용된 종방향 및 횡방향 변형률은 차량 하중이 변형률 게이지 위에 위치한 경우 즉 그림 5, 그림 6 그리고 그림 7과 같은 변형률의 시간이력 분포에서 변형률이 가장 크게 나타나는 값을 사용하였다. 이때 변형률의 측정 위치는 아스팔트 콘크리트 포장층 하부(A2단면: 표면으로부터 17cm, A5단면: 표면으로부터 27cm, A8단면: 표면으로부터 37cm)와 타이어의 중심축으로부터 10cm 떨어진 지점을 일괄적으로 적용하였다. 그림 8을 살펴보면 예측된 포장의 거동 분석 결과 횡방향 변형률이 종방향 변형률보다 약 27% 정도 작게 예측되었다.

동일 단면에서 차량의 속도가 최대변형률에 미치는 영향을



(a) 종방향 변형률



(b) 횡방향 변형률

그림 8. 차량의 속도에 따른 최대 변형률 비교(기층 하부, 27cm)

살펴보면, 이동 속도가 증가함에 따라 최대 변형률은 감소하는 형태를 보여주고 있으며, 이러한 경향은 최대변형률의 방향성(횡방향 및 종방향)에 관계없이 나타나고 있다. 차량의 속도에 따른 최대 변형률의 감소폭은 아스팔트 콘크리트 포장 층의 영향으로 두께가 증가할수록 더 커지는 것으로 나타났다. 아스팔트 콘크리트 포장 층 두께가 가장 작은 A2 단면의 경우 약 6%의 감소폭을 보여주었다. 또한 아스팔트 콘크리트 포장 층 전체 두께가 30cm인 A5 단면의 경우 속도로 인하여 최대 변형률이 A2 단면보다 약간 작은 약 7% 감소하는 것으로 나타났으며, 층 두께가 40cm인 A8 단면의 경우는 그 차이가 증가하여 횡방향 변형률의 경우 27%, 종방향 변형률의 경우는 17%의 감소폭을 나타내었다.

따라서 아스팔트 콘크리트 포장의 설계나 포장 파손 등에 대한 잔존 수명을 예측할 때, 설계 또는 보수 대상 도로의 교통 신호체계나 기하학적 구조에 의해 발생할 수 있는 차량의 운행 속도 저감 또는 증가효과를 고려해야 정확한 예측이 수행될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 피로 균열의 경우 아스팔트 콘크리트 포장 층 하부에서 발생하는 인장 변형률이 차량의 이동하중에 따라서 변화하며, 인장변형률의 변화폭도 포장 두께가 증가할수록 더 크게 나타나는 경향을 보여주었다. 또한 아스팔트 콘크리트 포장 표면에서 발생하는 top-down 균열에 대한 연구를 수행할 경우도 종방향 변형률과 횡방향 변형률의 영향을 고려해야할 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

차량의 이동 속도가 아스팔트 콘크리트 포장의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 현장에서 동적하중 재하시험

을 수행하였으며, 동일 단면에 대한 해석적 접근방법으로 단계하중을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 이때 차량의 이동 속도는 저속(10km/hr 또는 25km/hr), 중속(50km/hr), 고속(80km/hr)로 구분하였으며 현장거동과 예측거동으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 차량의 이동에 따른 방향성이 포장의 아스팔트 콘크리트 층 하부에서 발생하는 변형률에도 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 차량이 변형률계로 접근함에 따라 횡방향(차량의 진행방향에 대한 직각방향) 변형률의 경우 변형률의 크기가 점진적으로 증가하였고, 최대인장변형률이 발생한 이후 점진적으로 감소하는 형태를 보여주었다. 그러나 종방향(차량의 진행방향) 변형률의 경우 차량이 접근함에 따라서 순간적으로 압축변형률이 발생한 후 점진적으로 최대인장변형률이 발생한 후 차량이 변형률계로부터 멀어지면서 다시 압축변형률이 발생하는 형태를 보여주었다.
2. 차량의 이동하중을 모사하기 위하여 단계하중을 사용함으로써 시간 변화에 따른 실제 변형률 분포를 유사하게 예측할 수 있는 것으로 나타났으며, 차량의 이동 속도가 증가함에 따라 임계 지점에서 발생하는 최대인장변형률의 크기가 감소하는 것으로 예측되었다. 또한 아스팔트 콘크리트 포장 층 두께의 영향으로 층 두께가 증가할수록 최대인장변형률의 감소폭은 더 커지는 것으로 나타났다.
3. 3차원 유한요소해석 결과 하중 조건의 영향으로 횡방향과 종방향 변형률의 시간이력 곡선의 형상뿐만 아니라 최대인장변형률의 크기도 횡방향 변형률이 27% 정도 작은 것으로 예측되었으며, 차량의 속도가 증가함에 따라 최대 변형률의 감소폭도 횡방향 변형률이 소폭 큰 것으로 나타났다.

따라서 차량의 이동 하중이 아스팔트 콘크리트 포장차량의 진행 방향에 대한 변형률의 형태뿐만 아니라 최대 변형률에도 영향을 미치고 있기 때문에, 포장 파손의 원인 분석을 위해서는 보다 정확한 하중 특성을 고려해야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

- 김낙석, 정진훈, 이재훈, 박창우(2006) 윈더링 장비 적용을 통한 아스팔트 포장 거동 특성 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권 제1D호, pp. 89-94.
- 서영국, 권순민, 이재훈(2006a) 차량의 횡방향 주행이력에 의한 아스팔트 콘크리트 포장의 응답특성 분석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권 제3D호, pp. 453-459.
- 서영국, 이광호(2006b) 이동하중에 의한 시험도로 아스팔트 포장의 거동 분석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권 제5D호, pp. 831-838.
- 조명환, 김낙석, 정진훈, 서영국(2006) 타이어 접지 면적과 비선형 접지압력을 고려한 연성포장내의 거동 분석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권 제4D호, pp. 601-608.
- Huang, Y.H. (2004) *Pavement Analysis and Design 2nd Edition*,

- Prentice Hall, New Jersey.
- 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., Amoah, N., and Taha, A. (1996) Formulation for viscoelastic response of pavements under moving dynamic loads, *Journal of Transportation Engineering, ACSE*, Vol. 122, No. 2, pp. 140-145.
- Park, S.W. and Kim, Y.R. (1997) Temperature correction of back-calculated moduli and deflections using linear viscoelasticity and time-temperature superposition transportation research record: *Journal of The Transportation Research Board No. 1570, TRB*, National Research Council, Washington, D.C., pp. 108-117.
- Westergaard, H.M. (1925) Stresses in concrete pavement computed by theoretical analysis, *Public Raods*, Vol. 7, pp. 25-35.
- Yoo, P.Y. and Al-Qadi, I.L. (2007) Effect of transient dynamic loading on flexible pavements, *Transportation Research Board 86th Annual Meeting Paper No.07-2395*, TRB, National Research Council, Washinton, D.C.
- Yoo, P.J, I.L. Al-Qadi, M.A. Elseifi, and I. Janajreh(2006) Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface condition and lateral shear forces, *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp 73-86.
- Zaghloul, 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.

(접수일: 2007.12.6/심사일: 2007.12.21/심사완료일: 2007.12.21)