

차량의 이동하중과 하중형태가 연성 포장의 거동 특성에 미치는 영향 평가

Effects of Moving Dynamic Vehicle Loads on Flexible Pavement Response

조명환* · 김낙석** · 남영오*** · 임종혁****

Jo, Myoung-Hwan · Kim, Nakseok · Nam, Youngho · Im, Jonghyuk

Abstract

The most important elements in flexible pavement design criteria are stress and strain distributions. To obtain reasonable stress and strain distributions in pavements, moving wheel loads must be applied to analyze the pavement responses. In this study, finite element analysis was used to identify the three-dimensional states using the vehicle load into a constant-position / time-variable load (25, 50 and 80km/hr). In an elastic system, the strain is the same in both longitudinal and transverse directions under a single wheel. However, the same is not necessary in a viscoelastic system. Test results showed that the maximum values between transverse and longitudinal strains the bottom of asphalt concrete base layers under 25km/hr were about 40 percent.

Keywords : moving load, flexible pavement, design criteria, viscoelastic system, stress-strain distribution

요 지

일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장의 수치해석은 순간적으로 최대 하중이 재하 되는 크리프 컴플라이언스(creep compliance) 개념을 가지고 수행되지만 실제 차량의 하중은 시간에 따라 크기가 변화하게 된다. 따라서 본 연구에서 차량의 이동 속도를 변화(25km/hr, 50km/hr, 80km/hr)시키며 현장의 포장 거동을 측정하고, 비선형 접지압력과 차량의 이동속도를 고려한 3차원 유한요소해석으로부터 얻어진 포장의 예측 거동을 비교 분석하였다. 현장거동에서 차량의 중간바퀴와 뒷바퀴에서 발생하는 횡방향 변형률과 종방향 변형률이 아스팔트 콘크리트 기층 하부에서 약 40%정도 차이가 나는 것으로 나타났으며 예측거동에서도 유사한 경향을 보여주었다. 그러나 예측거동의 경우 재료의 점탄성을 고려하지 못하고, 실제 하중의 이동을 완벽하게 고려하지 못했기 때문에 임계지점으로 차량이 접근하는 경우와 접근후에 대해서 정확한 설명이 힘든 것으로 나타났다.

핵심용어 : 이동하중, 연성포장, 설계기준, 점탄성계, 응력-변형도 분포

1. 서 론

도로는 사용자에게 안락하고 편안하며, 안전한 상태로 제공되어야 하며, 이를 위하여 최대한 정확하고 타당한 방법으로 포장의 잔류수명을 예측하여야 한다. 연성포장의 경우 포장 파손은 차량의 바퀴 자국을 따라 종방향으로 발생하는 소성 변형(rutting)이나 피로균열(fatigue cracking)을 사용하여 결정된다. 일반적으로 연성포장은 아스팔트 표층, 기층, 노상 등으로 구성된 다층구조로 차량의 이동하중에 의해서 포장의 상부와 하부에 압축에서 인장으로의 급격한 변형을 변화를 발생시키며, 반복적인 인장반복 변형에 의해서 피로 균열이

발생하게 된다.

탄성이론에 의하면 최대 변형률은 아스팔트 표층의 하부에서 발생한다. 따라서 대부분의 포장설계 모델은 피로 균열의 경우 아스팔트 층 하부에서 발생하는 인장변형률을 사용하여 반복적인 차량의 하중에 대하여 예측하며, 소성변형의 경우 누적 수직 변형률을 사용하여 예측하고 있다. 이때 차량의 바퀴하중에 의해 포장체에 발생하는 응력과 변형은 일반적으로 정적하중 상태로 해석을 수행하여 얻어지게 된다 (Westergaard, 1925; Huang, 2004). 하지만 실제 공용상태에 있는 포장의 수명을 예측하기 위하여 사용되는 임계상태의 응력과 변형률은 동적하중상태에서 발생한다. 그리고 이러한 동적 하중 상태는 연성 재료를 사용하고 있는 포장의 표층에

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

**정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 교수

***정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 석사과정

****정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 석사과정

더 많은 영향을 주게 된다.

여러 연구들을 통해서 이러한 동적하중 상태에 대한 포장의 동적거동을 확인하기 위하여 수행되었지만 대부분의 연구는 일정한 크기를 가진 하중을 사용하였고(Zaghloul and White, 1993) 시간에 따른 하중의 크기를 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 차량의 이동 속도를 변화시키며 현장의 포장 거동을 측정하고, 비선형 접지압력과 차량의 이동속도를 고려한 하중재하방법으로 얻어진 포장의 예측 거동을 비교 분석하고자 한다.

2. 동적하중 재하시험

2.1 현장 동적하중 재하시험 구간

차량의 이동하중이 연성포장의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 한국도로공사에서 운영하고 있는 중부내륙고속도로 여주 JCT에 위치하고 있는 시험도로의 A5단면에 대하여 동적하중 재하시험을 수행하고자 한다. 시험도로 A5 단면은 7개 층으로 구성되어 있으며, 아스팔트 콘크리트 층은 아스팔트 표층, 아스팔트 중간층, 그리고 아스팔트 기층으로 구성되어 있고 각 층의 두께는 표 1과 같다. 표 1에 아스팔트 콘크리트 층 두께와 함께 각 층의 탄성계수도 나타냈으며, 탄성계수의 경우 한국형 포장설계법 3차년도 보고서(건설교통부, 2004)를 참조하였다.

A5단면에는 그림 1과 같이 총 24개의 KM 100HAS 변형률계가 매설되어 있으며, 측정범위는 $\pm 5,000$ microstrain이다. 그림 1은 A5 단면의 표층과 중간층에 매설된 변형률계의 위치를 나타낸 것으로 휠패스(wheel path)를 중심으로 'L'자 형태로 배치되어 있으며, 종방향과 횡방향 형태가 함께 매설되어 있다. 이때 매설되는 깊이 방향으로 한 층의 두께가 얇기 때문에 그림 1과 같이 각 세트는 층마다 엇갈리게 구성되어 상호 간섭이 적도록 배치되어 있으며, 표층변형률계의 경우 표층에서 3cm 깊이에 매설되어 있으며, 기층 변형률계의 경우 표층으로부터 27cm에 매설되어 있다.

표 1. A5 단면 재료 물성

층 구분	층 두께(cm)	탄성계수(MPa)
표층	5	4,252
중간층	7	4,715
기층	18	5,043

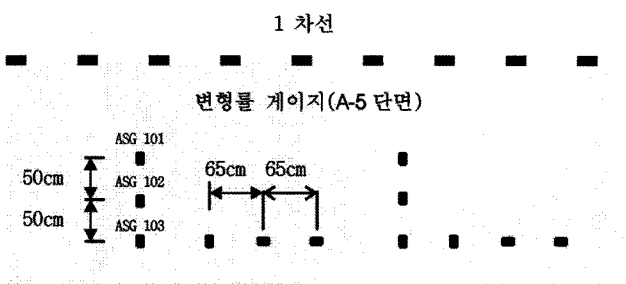


그림 1. A-5 단면의 변형률 게이지

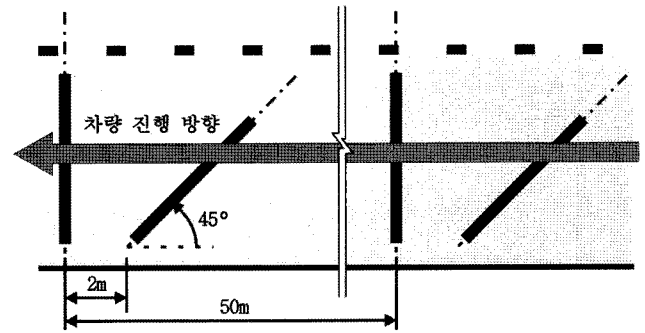


그림 2. 동적하중 재하시험

2.2 차량 정보와 시험조건

동적하중 재하시험은 1.5톤 3축 덤프트럭을 사용하였으며, A5 단면의 ASG 103 변위계와 ASG 106 변위계를 기준으로 표면에 차량 진행 방향으로 그린 유도선을 사용하였다. 차량의 속도는 차량의 운전자 측 타이어가 ASG103 변형률계 위치를 통과할 때의 평균속도를 측정하였으며, 변형률계 위치로 부터 이격거리와 평균 통과속도는 피에조 센서(piezo sensor)를 사용하여 그림 2와 같이 측정하였다. 이때 차량의 운행 속도는 저속(30km/hr), 중속(50km/hr), 그리고 고속(80km/hr)으로 구분하여 수행하고자 하며, 본 연구에서 사용하는 피에조 센서측정방식에 관련된 사항은 김낙석 등(2006)의 문헌에 나타나 있다.

2.3 차량의 이론적 속도 모형

일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장에서 수치해석을 위한 차량 하중은 크기만을 고려하게 되며, 이때 하중의 형태는 그림 3(a)와 같이 해석이 수행되는 최초시간 $t=0$ 에서 순간적으로 최대 하중이 재하 되는 크리프 컴플라이언스 개념을 가지게 되고, 해석이 끝나는 시점까지 일정한 하중이 재하된 상태가 유지된다. 하지만 실제 차량의 하중 크기는 일정하지 않으며, 또한 위치에 따라서 변화하게 된다.

Kenlayer 프로그램을 개발한 Huang(2004)은 차량의 하중 변화를 그림 3(b)와 같이 일정한 위치와 시간에 대한 동적하중 함수로 표현하였으며 차량의 이동 하중 효과를 수치해석에 손쉽게 적용할 수 있도록 식 (1)과 같이 차량의 속도와 시간에 대한 함수로 제시하였다. 식 (1)을 살펴보면 차량의 하중을 시간에 대한 'd'의 주기형태로 표현하였으며 주기 d는 식 (2)를 통해서 구할 수 있다. 이러한 함수를 통해서 차량의 속도영향을 고려한 포장의 거동을 예측할 수 있다.

$$F(t) = F_0 \times \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi \times t}{d}\right) \quad (1)$$

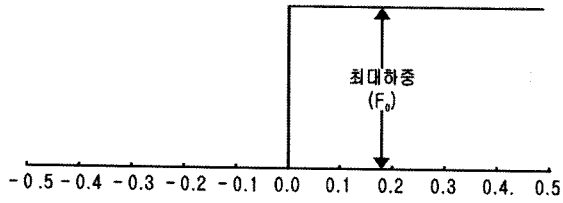
여기서, $F(t)$: 동적하중함수

t : 시간(sec)

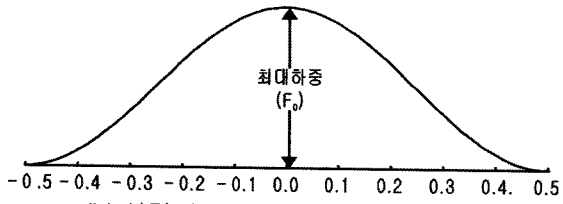
F_0 : 최대하중

d : 주기

$$d = 12 \times \frac{\text{radian}}{\text{차량의 속도}} \quad (2)$$



(a) Creep Compliance 개념의 차량 하중



(b) 시간의 함수로 표현된 차량 하중

그림 3. 수치해석을 위한 차량 하중

3. 동적하중 재하시험 결과 및 분석

동적재하 시험에 사용된 차량의 실제 운행 속도와 차량의 이격거리를 표 2에 나타내었다. 실제 동적하중 재하시험에서 운전자의 집중력 및 덤프트력을 운전석 위치의 영향으로 실험에서 목표로 하고 있는 정확한 위치와 속도로 운전하는 것이 쉽지가 않기 때문에 운행오차가 발생한다. 표 2를 살펴보면 실제 차량의 운행속도의 경우 저속에서 약 5km/hr, 고속에서는 약 2.5km/hr 정도 감소된 상태로 운행되었음을 알 수 있다. 차량의 평균 이격거리는 약 8.11cm-14.7cm 정도로 나타났으며, 변동폭은 ±4cm이었다.

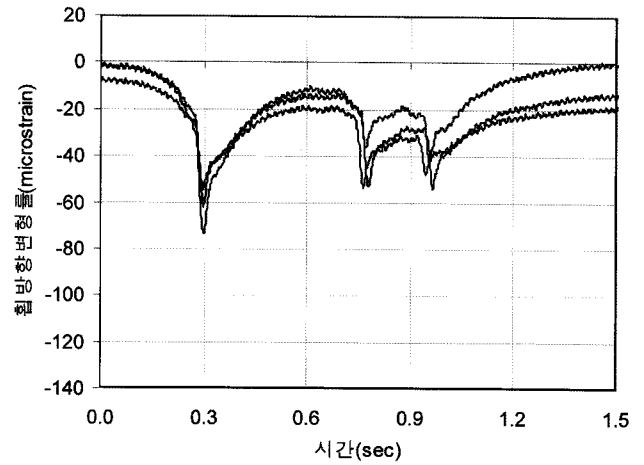
3.1 아스팔트 콘크리트 포장 표층 하부

그림 4는 A5 단면의 표층 하부에서 발생한 횡방향 변형률 (lateral strain)로 시험에 사용된 차량의 운전석 앞바퀴가 ASG 104 변위계를 통과할 때 획득된 자료이며, 그림 5는 운전석 앞바퀴가 ASG 102 변위계 위를 통과할 때 획득된 종방향 변형률(longitudinal strain) 분포를 시간변화에 대하여 나타낸 그림이며, 차량의 이동속도가 50km/hr인 경우 표층 하부 변위계의 오작동으로 인하여 포장의 거동을 획득하는데 실패하였다.

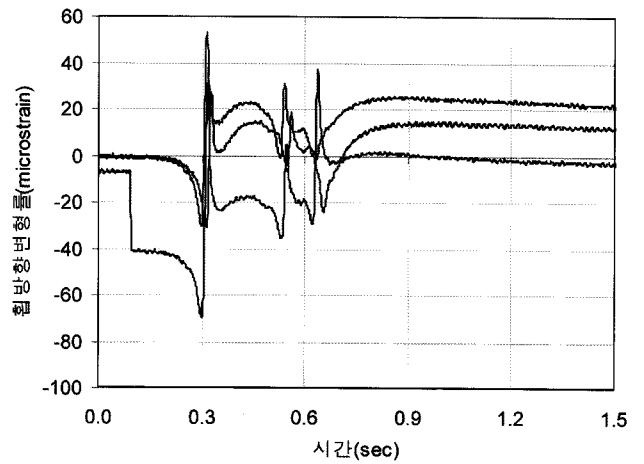
그림 4와 그림 5를 살펴보면 횡방향 변형률과 종방향 변형률이 각각의 방향성의 차이에 따라서 시간에 따른 변형률의 경향에 차이가 있는것을 알 수 있다. 횡방향 변형률을 나타낸 그림 4(a)와 4(c)의 경우 차량이 변형률계로 접근함에 따라서 변형률의 크기가 점진적으로 증가하며 최대압축변형률이 발생한 이후 점진적으로 감소하는 형태를 보여주고 있다.

표 2. 차량의 운행 정보

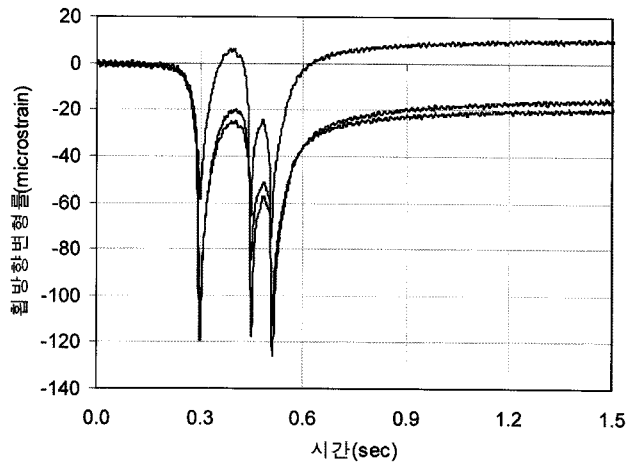
구분	평균운행속도 (km/hr)	평균이격거리 (cm)
A	24.7	8.11
B	50.6	11.30
C	77.3	14.68



(a) 25km/hr



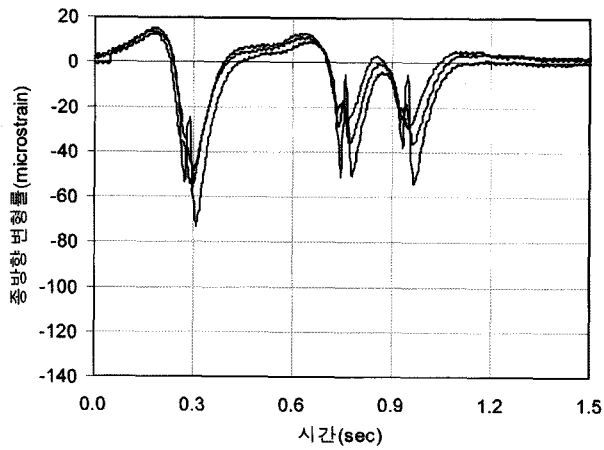
(b) 50km/hr



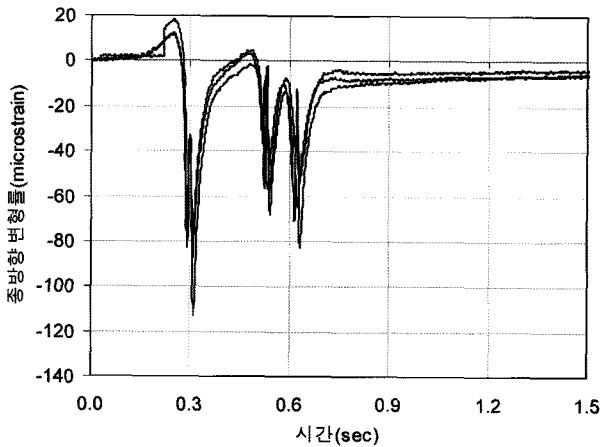
(c) 80km/hr

그림 4. 아스팔트 표층 하부 횡방향 변형률

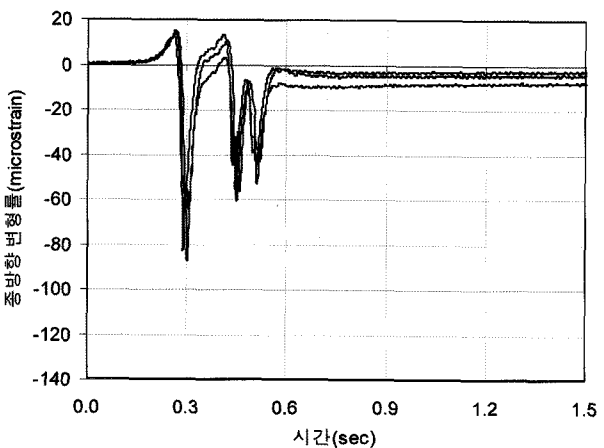
그러나 종방향 변형률의 경우는 차량이 접근함에 따라서 인장변형률이 발생한 후 점진적으로 최대압축변형률이 발생하는 형태를 보여주고 있다. 이러한 경향은 차량의 이격거리의 영향으로 최대변형률은 일치하지 않지만 시간에 따른 횡방향 변형률 또는 종방향 변형률은 각각 속도에 따라서 유사한 경향을 보여주고 있다.



(a) 25km/hr

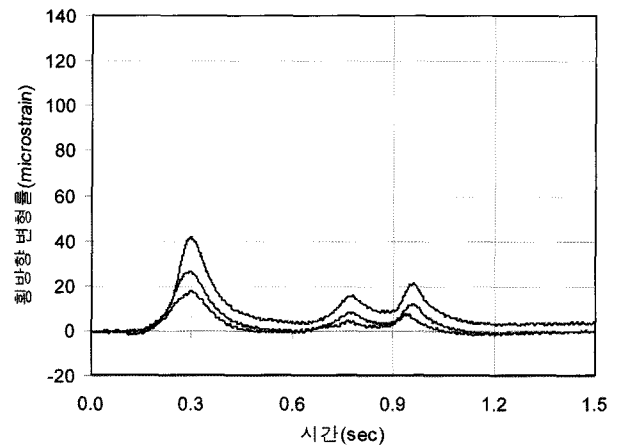


(b) 50km/hr

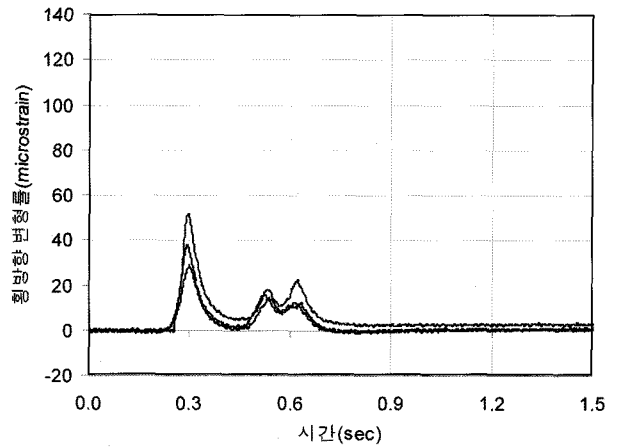


(c) 80km/hr

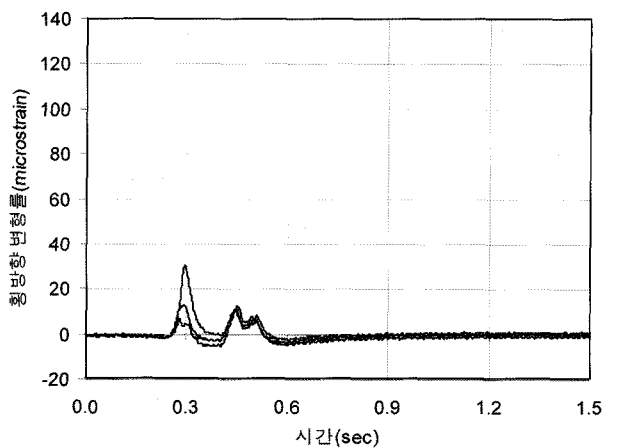
그림 5. 아스팔트 표층 하부 종방향 변형률



(a) 25km/hr



(b) 50km/hr



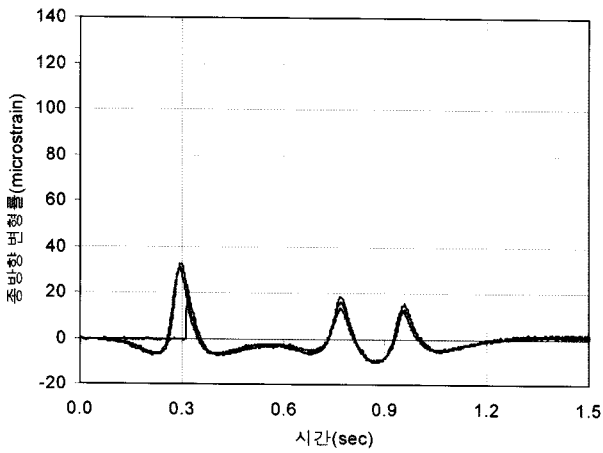
(c) 80km/hr

그림 6. 기층 하부 횡방향 변형률

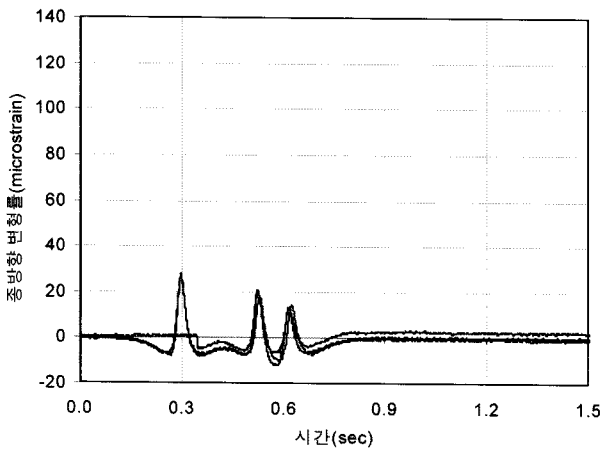
3.2 아스팔트 콘크리트 포장 기층 하부

그림 6과 그림 7은 A5단면의 기층 하부에서 발생한 횡방향 변형률과 종방향 변형률 분포를 시간변화에 따라 나타낸 그림이며, 그림 4와 그림 5에서 보여준 포장 거동과 같이 차량의 접근성 영향으로 시간에 따른 거동의 차이점을 보여주고 있다. 타이어 접지면적과 차량의 이격거리의 영향에 관한 조명환 등(2006)의 논문을 살펴보면 차량 앞바퀴의 이격거리가 10cm 전후인 경우 표층은 타이어 접지면적의 영향으로 변형률 값의 변동폭이 크며, 기층 하부는 표층보다 변

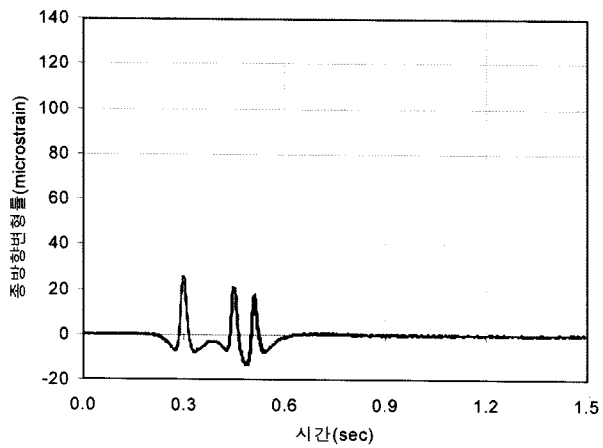
동폭은 작은 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 차량의 이격거리 영향으로 실제 얻어진 앞바퀴 최대 변형률의 경우는 이격거리에 대한 영향으로 직접적인 비교가 힘들지만, 그림 6과 그림 7을 살펴보면 중간바퀴와 뒷바퀴의 경우 변형률 최대값의 변동폭이 작게 나타났다. 따라서 중간바퀴의 경우 속도별 최대 변형률의 크기 비교가 앞바퀴에 비하여 상대적으로 가능할 것으로 사료되며, 비교결과 횡방향 변형률의 최대값이 종방향 변형률 보다 약 40%정도로 작은 것으로 측정되었다.



(a) 25km/hr



(b) 50km/hr



(c) 80km/hr

그림 7. 기층 하부 종방향 변형률

4. 3차원 유한요소해석

4.1 해석모형의 물성 및 크기

한국도로공사에서 운영 중인 시험도로의 아스팔트 콘크리트 포장 구간 중 A5 단면을 유한요소해석 프로그램을 사용하여 3차원 모델화하였으며, A5 단면의 단면 특성 및 재료 물성은 표 1과 아스팔트 포장의 하부 구조인 보조기층, 동상방지층, 노상의 경우는 Holewinski *et al.*(2003)이 제시한 25°C의 탄성계수와 포아송비를 사용하였다. 단위중량의 경우

차량의 이동하중과 하중형태가 연성 포장의 거동 특성에 미치는 영향 평가

는 일괄적으로 한국형 포장설계법 3차년도 보고서(건설교통부, 2004)에서 사용된 물성을 사용하였다.

유한요소해석모형의 요소 크기는 정확한 해석을 할 수 있을 만큼 충분히 조밀해야 하지만 요소의 수가 증가하게 되어 결과적으로 해석 시간이 증가된다(Park *et al.*, 2005). 또한 너무 조밀한 요소 크기를 사용할 경우 유한요소해석을 위하여 64bit의 하드웨어가 필요하지만 본 연구에서는 32bit의 컴퓨터에서 해석이 수행되어 요소크기 선정에 제한이 따른다. 따라서 본 연구에서는 시험도로 A5 단면의 해석 크기를 4m × 4m × 3m로 결정하고 해석 위치의 중요도에 따라 가장 조밀한 부분은 하중이 재하되는 부분으로 1cm의 요소 크기를 사용하였고 하중이 재하되는 부분에서 멀어질수록 3cm-10cm의 요소 크기를 사용하였다.

4.2 하중의 크기와 속도

하중의 크기는 그림 8과 같이 타이어의 접지면적을 원형이나 직사각형이 아닌 동적하중 재하시험에 사용된 타이어의 형태를 고려하였으며, 하중의 크기도 비선형 접지압력을 사용하고자 한다. 타이어의 접지면적과 접지압력은 조명환 등(2006)의 논문을 참조하였으며, 하중재하 속도는 식 (1)을 사용하여 계산된 하중속도를 사용하였으며 계산된 하중재하주기를 표 3에 나타내었다.

4.3 해석 결과 및 분석

3차원 유한요소모델에 대한 선형탄성해석을 수행하였으며, 차량의 이동 속도별 아스팔트 콘크리트 포장의 예측거동을 아스팔트 콘크리트 표층 하부(표층 표면으로부터 3cm 지점)와 아스팔트 기층 하부(표층 표면으로부터 27cm 지점)로 구분하여 그림 9에 25km/hr와 80km/hr의 속도로 예측된 거동을 나타내었다. 그림 9를 살펴보면 선형탄성해석조건으로 인하여 차량의 이동 속도는 표층 하부 및 기층 하부에서 발생하는 최대 변형률에 영향을 미치지 않고 단지 변형률의 주기 또는 폭에만 영향을 주고 있기 때문에 50km/hr의 경우는 생략하였다.

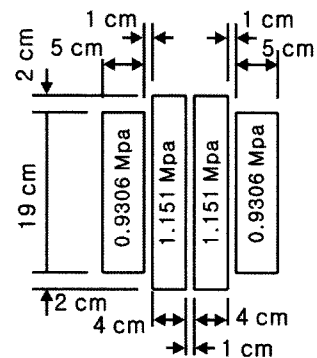
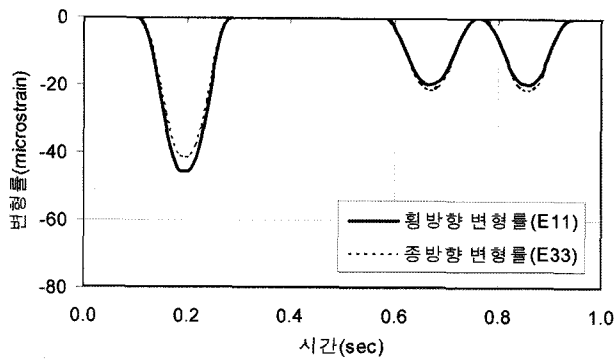


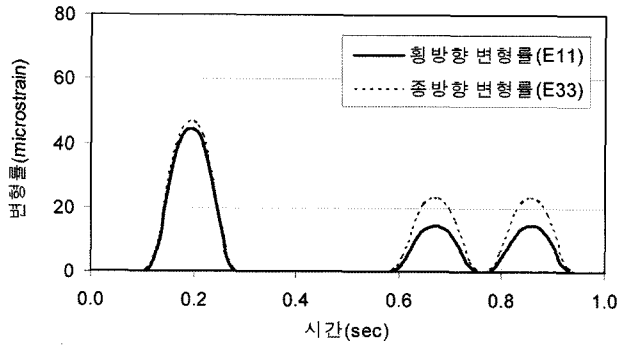
그림 8. 하중의 크기

표 3. 하중 속도에 따른 하중 주기

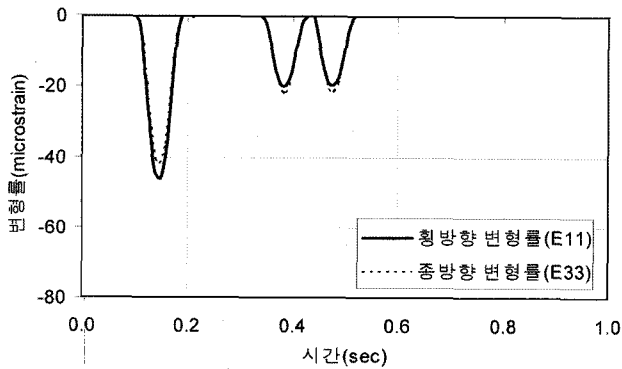
차량의 속도	25km/hr	50km/hr	80km/hr
하중 주기	0.19	0.09	0.06



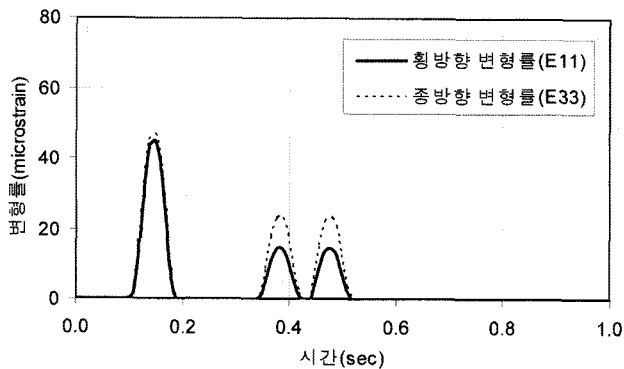
(a) 25km/hr 표층 하부



(b) 25km/hr 기층 하부



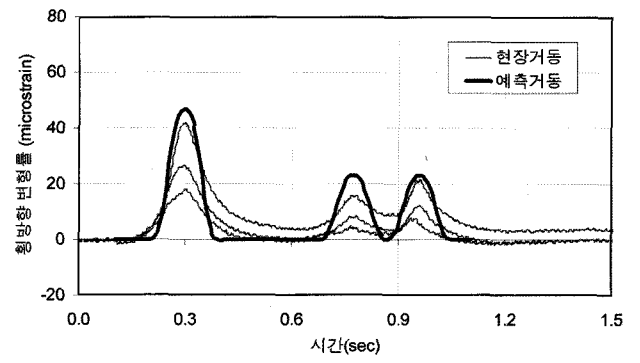
(c) 80km/hr 표층 하부



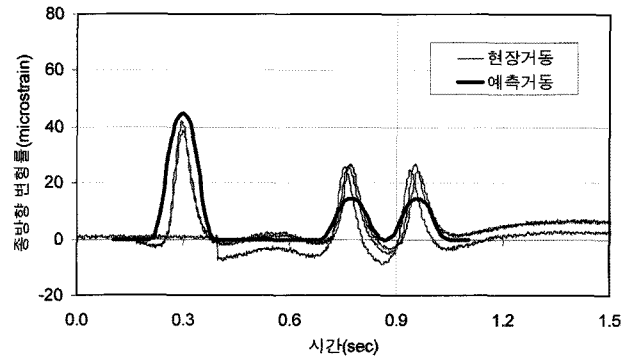
(d) 80km/hr 기층 하부

그림 9. 하중 속도에 따른 포장의 예측거동

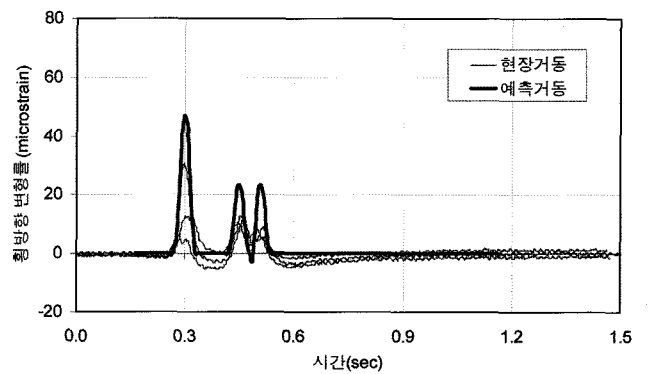
그리고 차량의 진행방향으로부터 구분되는 횡방향 변형률 (lateral strain, E11)과 종방향 변형률(longitudinal strain, E33)의 경우 1축에서는 최대값에 큰 차이를 보여주지 않아 방향성에 대한 영향이 적은 것으로 나타났다. 그러나 기층 하부



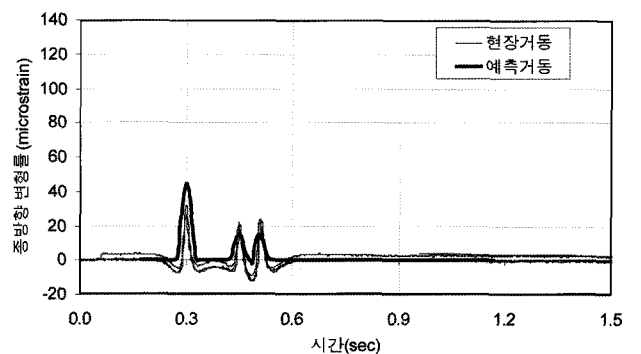
(a) 25km/hr 횡방향 변형률



(b) 25km/hr 종방향 변형률



(c) 80km/hr 횡방향 변형률



(d) 25km/hr 종방향 변형률

그림 10. 현장거동과 예측거동 비교

의 예측 거동을 나타낸 그림 9(b)와 9(d)의 경우 2축과 3축에서 횡방향 변형률이 종방향 변형률보다 약 40% 정도 작게 예측되었으며, 이러한 두 변형률 사이의 차이는 실제 기층 하부에서 측정된 현장의 차이와 유사한 경향을 보여주고 있다.

4.4 현장거동과 예측거동 비교

아스팔트 콘크리트 포장의 피로수명을 예측하기 위하여 사용되는 초기 인장변형률은 아스팔트 콘크리트 층 하부에서 발생하는 값을 사용하게 되며, 그림 10에 25km/hr와 80km/hr에서 얻어진 현장거동과 예측거동을 아스팔트 콘크리트 포장 하부에 대하여 나타내었으며, 50km/hr의 경우는 그림 9와 같은 이유로 생략하였다. 그림 10(a)와 (c)의 경우 최대 인장 변형률이 발생하는 정점을 기준으로 선형탄성해석 조건으로 인하여 대칭적인 거동이 예측되었다. 그러나 현장거동은 아스팔트 콘크리트의 점탄성 특성으로 인하여 정점을 기준으로 하중이 제거된 이후에도 변형이 발생하는 점성거동을 보여주고 있어서 탄성해석의 한계점을 보여주고 있다.

또한 그림 10(b)와 (d)에 나타난 종방향 변형률의 경우 현장거동은 차량이 변형률 게이지로 접근하면서 압축변형률이 발생하고 점차적으로 인장변형률이 발생하는 형태를 보여주고 있지만, 예측거동에서는 식 (1)과 같이 한 점에 대한 하중 크기의 변화 함수를 사용했기 때문에 현장 거동과 같이 임의 지점에 하중이 접근하는 효과를 고려하기 힘든 것으로 나타났다.

아스팔트 콘크리트 포장의 거동을 예측할 때, 식 (1)과 같은 이동 하중 고려 방법은 기존의 크리프 컴플라이언스 개념의 하중보다 주기 개념을 도입함으로써 보다 현실적인 거동을 고려할 수 있지만, 그림 9와 그림 10에서 보여주는 바와 같이 차량의 이동하중을 완벽하게 모사하지는 못하는 것으로 나타났다. 이러한 현장 거동과 예측거동의 차이는 아스팔트 콘크리트 포장의 전통적인 피로균열(균열이 하부에서 발생하여 상부로 진행되는 경우)에 대한 설계수명이나 잔류수명 예측에 큰 영향을 미치지 않을 수 있다. 하지만 온도 균열의 해석이나 상부에서 하부로 균열이 전이되는 피로 균열의 파손형태 또는 균열 진전 모델 등의 개발시는 식 (1) 보다 발전된 이동하중에 대한 경계조건을 사용해야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 차량의 이동 속도가 포장의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 3가지 이동 속도에 대한 현장의 포장 거동을 측정하고, 각 속도를 3차원 유한요소해석에 모델화 하여 얻어진 예측 거동에 대하여 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 횡방향 변형률의 경우 바퀴하중이 변형률계로 접근함에 따라서 변형률의 크기가 점진적으로 증가하며 최대압축변형률이 발생한 이후 점진적으로 감소하는 형태를 보여주었다. 그러나 종방향 변형률의 경우는 차량이 접근함에 따라서 인장변형률이 발생한 후 점진적으로 최대압축변형률이 발생하는 형태를 보여주었다. 이러한 경향은 차량의 이격거리의 영향으로 최대변형률은 일치하지 않지만 시간

에 따른 횡방향 변형률 또는 종방향 변형률에 대하여 속도나 위치에 상관없이 나타났다.

- (2) 아스팔트 콘크리트 층 하부에서 차량의 중간바퀴에 의하여 발생하는 변형률의 크기를 각 속도별로 비교하였으며, 비교결과 차량의 운행속도에 상관없이 횡방향 변형률이 종방향 변형률 보다 약 40% 정도 작은 값을 보여주었으며, 이러한 경향은 예측거동에서도 동일하게 나타나는 것을 확인하였다.
- (3) 예측거동의 경우 재료의 점탄성을 고려하지 못하고, 실제 하중의 이동을 완벽하게 고려하지 못했기 때문에 임계지점으로 차량이 접근하는 경우와 접근후에 대해서 정확한 설명이 힘든 것으로 나타났으며, 피로균열의 파손형태나 균열 진전 모델 등의 개발을 위해서는 보다 정확한 경계조건을 사용해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2006학년도 경기대학교 학술연구비(연구그룹연구과제)지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- 건설교통부 (2004). 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구.아스팔트 포장 설계법 개발(1단계 3차년도 최종보고서). 연구보고서, KPRP-G-04, 한국도로학회.
- 김낙석, 정진훈, 이재훈, 박창우 (2006). 윈터링 장비 적용을 통한 아스팔트 포장 거동 특성 연구. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권, 제1D호, pp. 89-94.
- 조명환, 김낙석, 정진훈, 서영국 (2006). 타이어 접지 면적과 비선형 접지압력을 고려한 연성포장내의 거동 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권, 제4D호, pp. 601-608.
- Holewinski, J.M., S. Soon, A. Drescher, and H.K. Stolarski (2003). *Investigation of Factors Related to Surface-initiated Cracks in Flexible Pavements(Final Report)*. University of Minnesota Department of Civil Engineering, Minesota Department of Transportation.
- Huang, Y.H. (2004). *Pavement Analysis and Design, 2nd Edition*. Prentice Hall, New Jersey.
- Park, D., A.E. Martin, E. Masad (2005). Effects of Nonuniform Tire Contact Stresses on Pavement Response. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No. 11, pp. 873-879.
- Westergaard, H.M. (1925). Stresses in Concrete Pavement Computed by Theoretical Analysis. *Public Raods*, Vol. 7, pp. 25-35.
- Zaghloul, S.M. and T.D. White (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.

© 논문접수일 : 2007년 08월 03일

© 심사의뢰일 : 2007년 08월 06일

© 심사완료일 : 2007년 09월 12일