



포장 프로파일이 포장 피로수명에 미치는 영향 분석

Effect of Surface Profiles on Pavement Fatigue Life

박 대 육* 안 덕 순** 권 수 안***
Park, Dae-Wook An, Deok-Soon Kwon, Soo-Ahn

Abstract

The simulation of dynamic load was conducted based on surface profile on asphalt concrete pavement, vehicle speeds, and suspension types using a truck simulation program. The results of the simulated dynamic load based on different surface profile, vehicle speeds, and suspension types are analyzed. As pavement roughness and vehicle speed are increased, the dynamic load was increased. Walking beam suspension produces greater dynamic load than air spring suspension. Pavement damage index is calculated based on covariance of dynamic load and Paris-Erdogan fracture parameter, n which is based on creep compliance tests of asphalt mixtures used in Korea. The higher covariance of dynamic load, confidence level, and fracture parameter are used, the greater pavement damage index is obtained. Specification of pavement roughness can be developed in various vehicle speeds and asphalt mixtures, and pay factor can be determined after constructing asphalt concrete pavement using pavement damage concepts.

Keywords : *surface profile, dynamic loading, suspension, pavement damage index, flatness*

요 지

본 논문에서는 아스팔트 콘크리트 포장의 표층 프로파일과 차량특성인 차량속도와 현가장치를 다르게 하여 트럭 시뮬레이션 프로그램을 통한 동적하중을 분석하였다. 다양한 포장 상태의 프로파일을 입력하여 동적하중을 분석하였으며, 프로파일, 차량의 현가장치, 차량속도에 따른 동적하중 변화를 분석하였다. 포장 거칠기가 증가할 수록 동적하중이 증가하였으며, 속도가 증가할 수록 동일한 포장 거칠기 하에서 동적하중이 증가하였다. Walking beam 현가장치가 Air spring 현가장치에 비해 더 큰 동적하중을 보였다. 동적하중 공분산을 이용하여 포장파손 지수를 결정하였으며, 동적하중 공분산과 신뢰도, 아스팔트 혼합물의 파괴매개변수가 증가할 수록 포장파손지수도 증가하였다. 본 연구의 결과를 이용하여 차량속도와 표층 아스팔트 혼합물 파괴특성에 근거한 포장 평탄성 규정에 이용할 수 있으며, 아스팔트 콘크리트 포장 시공 후 포장 평탄성에 근거한 지불규정에 효과적으로 사용할 수 있다고 판단된다.

핵심용어: 표층 프로파일, 동적하중, 현가장치, 포장파손 지수, 평탄성

* 정회원 · 군산대학교 토목공학과 조교수(E-mail : dpark@kunsan.ac.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로시설연구실 연구원

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로시설연구실 책임연구원

1. 서 론

일반적으로 차량과 포장의 반응 영향은 포장면에 재해되는 하중과 밀접한 관계가 있으며, 하중의 크기와 분포는 차량의 속도와 포장 표면 평탄성과 밀접한 관계를 가지고 있어 보다 정확한 하중 정량화를 위하여 이러한 두 요소를 고려하여 동적하중 분포 특성을 분석하는 것이 필수적이다. 차량속도가 증가할수록 하중은 증가하고 그 증가 정도는 표면 평탄성과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 알려지고 있다(Al-Rashid et al., 1972). 표면의 평탄성은 포장 반응 평가 시 중요하게 고려되어야 할 요소이며 표면 평탄성이 좋지 않은 표면은 매끄러운 표면과 비교하여 적게는 1.5배, 많게는 3배에 이르는 피로균열 파손을 일으키는 것으로 알려져 있다(Gillespie et al., 1992). Sweatman(1983)이 호주에서 포장의 평탄성, 현가장치, 차량속도를 다르게 하여 현장 시험한 결과 Walking beam 현가장치가 Air spring 현가장치에 비해 포장 파손에 대한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 또한 포장 거칠기와 속도가 증가할 수록 동적하중계수가 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 포장표면의 프로파일 데이터를 이용하여 포장 평탄성, 차량속도 및 차량 현가장치(Suspension)를 다르게 하여 동적하중을 모사하였다. 모사한 동적하중과 아스팔트 혼합물의 파괴매개 변수(Fracture parameters)를 이용하여 포장파손 지수(Pavement Damage Index)를 구하여 프로파일 상태에 따라 아스팔트 콘크리트 포장의 피로균열에 의한 수명 감소 변화를 분석하였다.

2. 차량특성 및 입력변수

본 연구에서 중차량의 동적하중을 분석하기 위하여 TruckSim을 이용하였으며, 3축의 10륜의 트럭을 사용하여 동적하중을 분석하였다. 3축 트럭의 동적하중 분석을 위하여 트럭 전축(Front axle)의 현

가장치를 Flat leaf 스프링으로 고정시키고 후축(Rear axle)의 현가장치는 Taper leaf, Air spring, Walking beam 현가장치를 이용하였다. 포장 프로파일 데이터는 미국연방도로국의 평탄성지수 기준에 따라 6구간으로 나누어 입력하였으며, 트럭의 속도는 60~120km/hr까지 증가시켜 각각 입력하였다. 표 1에 동적하중 모사를 위한 트럭의 재원과 입력변수를 요약하였다.

표 1. 차량특성과 입력변수 요약

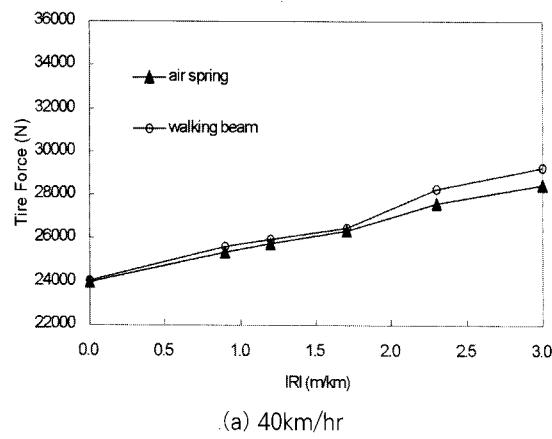
차량 종류	3축 10륜
차량 총중량(kN)	204.6
정하중 분배율(%)	전륜: 26, 후륜: 74
현가장치	전륜: Flat Leaf, 후륜: Air Spring, Walking Beam, Taper Leaf
포장평탄성지수(m/km)	0, 0.9, 1.2, 1.7, 2.3, 3.0
속도(km/hr)	40, 60, 100, 120, 160

3. 동적하중 분석

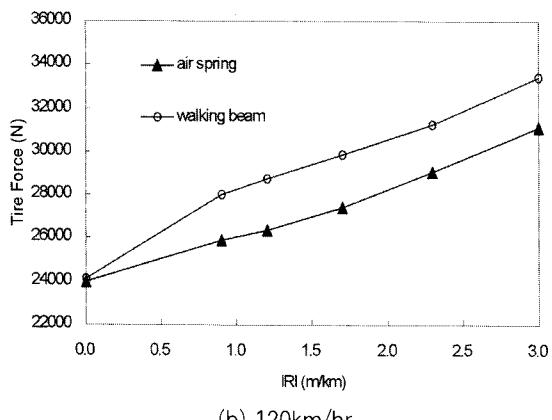
3축 10륜 트럭 차량의 현가장치, 포장표면 프로파일, 차량속도를 다르게 하여 동적하중을 모사하였다. 그림 1에 후축 복축의 동적하중을 현가장치에 따라 속도를 다르게 하여 나타내었다.

그림 1에서 보듯이 현가장치에 따라 동적하중이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. Walking Beam 현가장치가 Air 스프링 현가장치에 비해 동적하중이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 평탄성지수가 0m/km일 경우 동적하중이 24kN으로 속도에 무관하였으나, 평탄성지수가 증가할수록 속도 증가에 따라 타이어 동적하중도 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 40km/hr의 저속도의 경우 Air spring과 Walking beam 현가장치의 동적하중 차이는 비교적 작았으나 속도가 120km/hr의 고속에서는 두 현가장치 사이에 동적하중 차이가 큰 것으로 나타나 속도가 증가할 때 현가장치에 의한 영향도 증가하는 것으로 판단된다. 미국등 선진국에서는 화물보호를

위하여 Air spring을 주로 사용하고 있으나 한국은 Walking beam 현가장치를 주로 사용하는 것으로 알려져 있다.



(a) 40km/hr

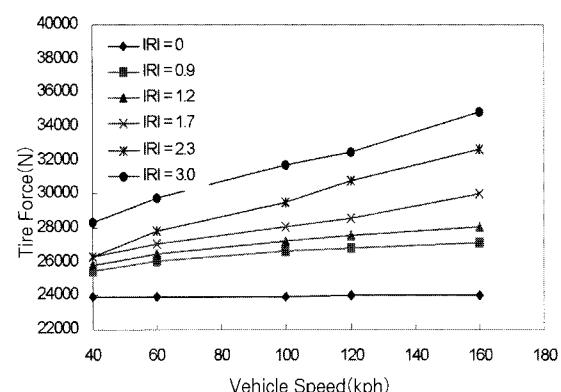


(b) 120km/hr

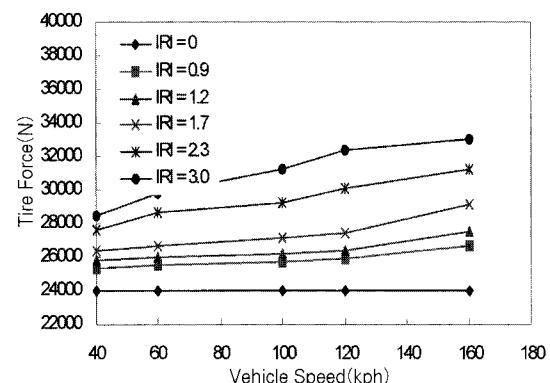
그림 1. 현가장치에 의한 동적하중 분석

포장 평탄성에 따른 동적하중 분포를 분석하기 위하여 그림 2에 현가장치별로 나타내었다. 세 종류의 현가장치인 Taper leaf, Air spring, Walking beam 현가장치를 이용하여 포장 평탄성에 따른 동적하중을 분석하였다. Air spring 현가장치에 의해 발생하는 동적하중이 가장 작았으며, Walking beam 현가장치에 의한 동적하중이 가장 큼을 보였다. 세 종류의 현가장치에 의한 도로 평탄성의 변화에 따른 동적하중을 분석한 결과 완전히 평탄한 0m/km의 경우 속도와 무관하게 약 24kN의 타이어 하중을 보였으

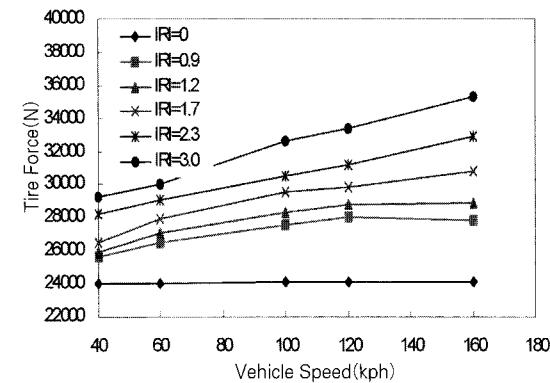
며, 0.9~3.0m/km의 평탄성에서는 속도가 증가할수록 동적하중도 증가함을 보였다. 0.9와 1.2m/km의 비교적 평탄성이 좋은 포장에서는 속도에 따른 동



(a) Taper Leaf Spring 현가장치



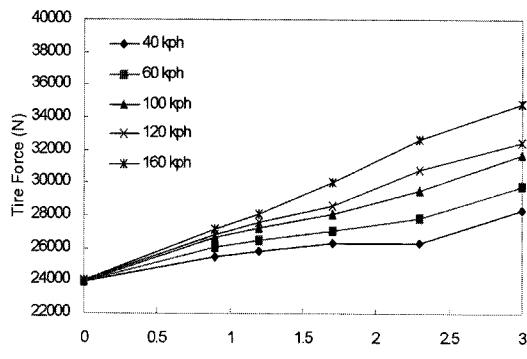
(b) Air Spring 현가장치



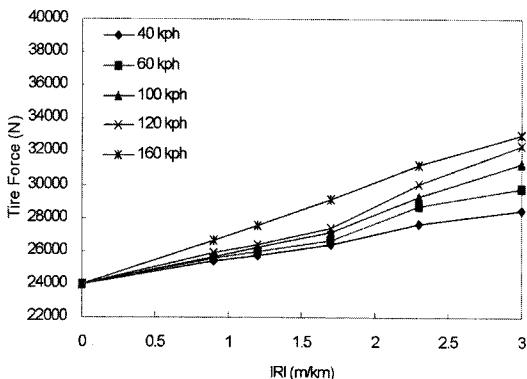
(c) Walking Beam 현가장치

그림 2. 포장 평탄성에 의한 동적하중 분석

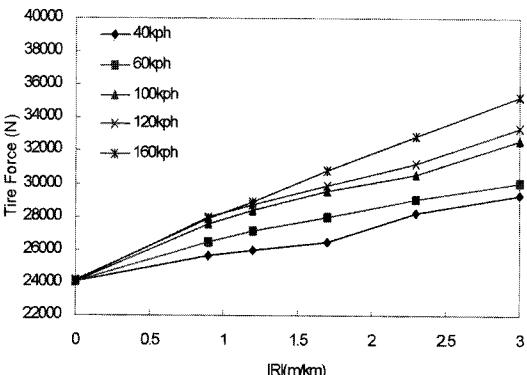
적하중 증가율이 크지 않았으나 1.7m/km의 평탄성에서는 동적하중 증가율이 증가하였으며, 2.3과 3.0m/km의 평탄성이 좋지 않은 포장에서는 동적하중의 증가율이 매우 큰 것으로 나타났다.



(a) Taper Leaf Spring 현가장치



(b) Air Spring 현가장치



(c) Walking Beam 현가장치

그림 3. 차량속도에 의한 동적하중 분석

그림 3에 차량 속도별 동적하중 분석 결과를 나타내었다. Air spring의 경우 저속인 40km/hr와 고속인 120km/hr의 동적하중 분석 결과 큰 차이를 보이지 않았으나 Taper leaf와 Walking beam 현가장치의 경우 속도가 증가할수록 평탄성이 좋지 못한 경우 동적하중의 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

4. 포장평탄성지수와 포장성능과의 관계

포장의 반응은 일반적으로 하중과 밀접한 관계를 가지고 있어 동적하중이 포장성능과 밀접한 관계가 있다고 가정 할 수 있다. 동적하중은 여러 조건에서 발생할 수 있지만 본 연구에서는 프로파일의 상이함으로 인해서만 생기는 것으로 가정하였다. 프로파일이 평坦함으로 인해 발생하는 하중과 평탄하지 못해서 발생하는 하중으로 인해 피로균열수명의 차이 (ΔN_f)가 일어나며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta N_f = \frac{N_{f1} - N_0}{N_{f0}} \quad (1)$$

여기서, ΔN_f = 피로균열 수명의 차이,

N_{f0} = 평탄성이 좋은 포장에서의 하중에 의한 피로균열수명,

N_{f1} = 평탄성이 좋지 못한 포장에서의 하중에 의한 피로균열수명.

식(1)은 모든 조건이 동일할 때 프로파일에 의해 동적하중이 일어난다고 가정할 수 있으며, 이 하중에 의해 피로균열의 주요변수인 변형률 또는 응력을 산정하여 피로균열의 수명 차이를 산정할 수 있다. 이 개념은 한국형 포장설계법의 아스팔트 포장이나 콘크리트 포장에 모두 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 평탄성지수가 포장피로균열 공용수명에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Rawool과 Fernando(2005)에 의해 개발된 동적하중의 변화와

이에 따른 포장파손지수(Pavement damage index), Δ 를 이용하였다. 포장의 포장파손지수를 이용하여 포장의 목표(Target) 평탄성지수에 의한 동적하중과 실제 시공되는 평탄성에 의한 동적하중 차이에서 생기는 포장의 피로균열 공용성 변화를 예측하였다. 포장파손지수를 식(2)에 나타내었으며, Paris and Erdogan방정식을 식(1)에 대입하여 도출하였다(Paris and Erdogan, 1963).

$$\Delta = \left(\frac{1+zCV_0}{1+zCV_1} \right)^n - 1 \quad (2)$$

여기서, CV_0 = 목표 포장 프로파일에서의 동적하중 공분산

CV_1 = 시공 포장 프로파일에서의 동적하중 공분산

z = 동적하중 분포에 상응하는 표준편차

n = Paris-Erdogan 파괴매개변수

식(2)에서의 공분산은 측정 프로파일을 이용한 차량모사에 의해 구해지므로, 포장파손지수는 포장 표면의 프로파일뿐만 아니라 차량의 현가장치와 속도에도 깊은 관련이 있는 것을 알 수 있다. 동적하중의 공분산은 평탄성이 좋지 않을수록 크게 되고 반대로 평탄성이 좋을수록 공분산은 작게 된다. 시공포장의 공분산이 목표공분산 보다 작을 경우 포장파손지수는 양의 수를 나타내어 포장 피로균열 공용성의 증가를 나타내며, 반대로 시공포장의 공분산이 보다 클 경우 공용성 감소를 의미한다.

Paris-Erdogan 파괴매개변수 n 은 포장표층 아스팔트 혼합물의 파괴 매개변수로서 creep compliance 시험의 선형기울기 m 값으로부터 구하며, 식(3)과 같다(Lytton et al., 1997).

$$n = -2 + \frac{1.97}{m} \quad \text{또는} \quad n = \frac{1}{m} \quad (3)$$

여기서, m 은 creep compliance 시험데이터와 시

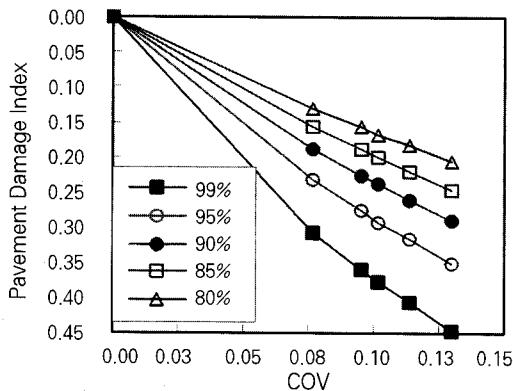
간(sec)를 log-log축척에 나타낸 부분중 선형기울기이다. 일반적으로 피로균열 저항성을 평가하기 위해 서는 10 또는 15°C에서 creep compliance 시험을 수행하여야 하지만 시험자료의 미비로 인하여 n 값을 구하기 위하여 20°C에서 PG64-22+19mm 아스팔트 혼합물에 대해 수행한 creep compliance 시험 결과를 분석하여 m 값은 0.466이었으며, 식(2)를 이용하여 계산한 n 값은 2.23이다(한국건설기술연구원, 2007).

목표 프로파일을 완전히 평탄한 포장 프로파일로 가정할 때 ($CV_0 = 0$), 그럼 2(a)와 같이 동적하중은 정적하중이 됨을 알 수 있으며, 식(2)은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

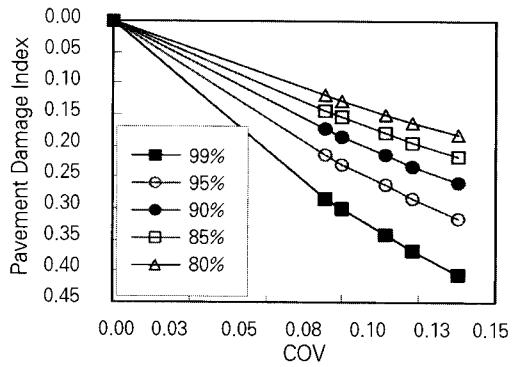
$$\Delta = \frac{1}{(1+zCV_1)^{2.23}} - 1 \quad (4)$$

5. 포장 평탄성 평가

차량의 속도와 현가장치, 표층표면의 평탄성 프로파일을 이용하여 동적하중을 분석하였고 동적하중의 공분산과 아스팔트 혼합물의 파괴매개변수를 이용하여 포장 파손지수, Δ 를 산정하였으며, 각 조건이 포장파손 지수에 어떠한 영향을 미치는지 알아보고자 하였다. 식(4)를 이용하여 평탄성지수가 0m/km인 이상적인 포장 상태에서를 목표포장 상태지수로 하고 평탄성 지수가 3.0m/km인 매우 불량한 상태의 포장 상태의 포장 파손지수를 산정하였다. 그럼 3에 포장파손지수와 공분산을 각각의 신뢰도를 사용하여 Walking beam 현가장치와 Air spring현가장치를 각각 나타내었다. 그럼 4에서 보듯이, 공분산값이 클수록, 즉, 동적하중의 변화가 클수록, 포장균열 공용수명의 감소(Δ 가 음의 수)가 큰 것으로 나타남을 알 수 있다. 또한 신뢰도가 높을수록 동일한 포장파손지수를 유지하기 위하여 평탄성이 좋은 포장이 필요하다. 각각 현가장치를 이용한 포장파손지수를 분석한 결과



(a) Walking beam 현가장치

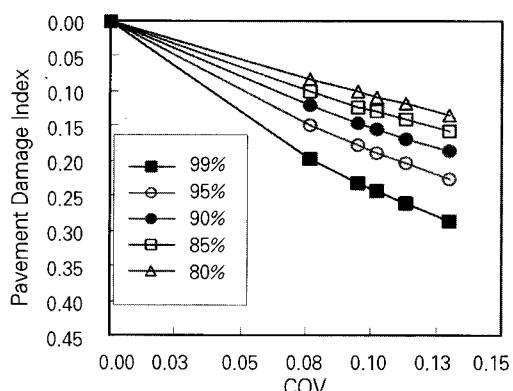


(b) Air spring 현가장치

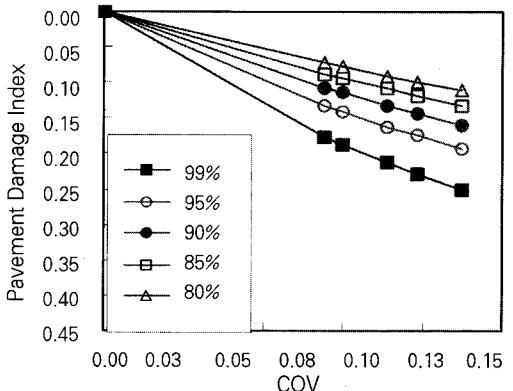
그림 4. 신뢰도에 의한 포장파손지수
(목표 COV₀=0m/km, COV₁=3.0m/km)

Air spring에 의한 포장파손지수가 Walking beam에 의한 포장파손지수보다 작은 것을 볼때 Air spring을 장착한 차량이 포장 균열파손 절감에 더 효과적인 것으로 나타났으나 그 차이는 미비한 것으로 판단된다.

목표 평탄성지수가 0m/km는 이상적인 목표치이므로 현실적인 포장 평탄성지수값을 이용한 포장파손지수를 산정하여 포장 공용성 감소를 예측하기에는 어려움이 있다. 따라서, 식(2)를 이용하여 목표 평탄성지수가 0.9m/km이고 포장 평탄성지수가 3.0m/km일때 포장파손지수를 그림 5에 비교하였다. 그림 4와 경향은 유사하지만 현실적인 목표 평탄성지수 0.9m/km를 사용하여 포장파손지수를 구한



(a) Walking beam 현가장치



(b) Air spring 현가장치

그림 5. 신뢰도에 의한 포장파손지수
(목표 COV₀=0.9m/km, COV₁=3.0m/km)

결과 포장공용성 수명감소를 나타내는 포장파손지수 값은 상대적으로 감소하였다.

6. 결 론

아스팔트 콘크리트 포장의 평탄성지수와 차량특성인 현가장치와 차량속도를 이용하여 동적하중 분석을 실시하였으며, 포장 표층 프로파일에 의한 동적하중의 변화정도인 공분산을 구하여 이에 근거한 피로균열에 의한 포장파손지수를 국내 아스팔트 혼합물의 파괴매개변수를 이용하여 구하였다. 이는 포장에

피로균열에 의한 포장수명의 변화전도는 재하되는 동적하중의 변화정도에 비례한다는 가정 하에 분석하였다. 일반적으로 목표 평탄성지수를 기준으로 산정한 포장파손 지수는 음의 수를 나타내는데 이는 포장공용성의 감소를 나타낸다. 각 조건에 대한 동적하중에 근거하여 포장파손지수를 구하여 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 포장 평탄성 프로파일과 차량특성을 고려하여

동적하중을 분석한 결과 Walking beam 현가장치가 Air spring 현가장치에 비해 포장에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 저속의 차량속도에서는 Air spring과 Walking beam 현가장치의 동적하중 차이점이 미비하였으나 속도가 증가할수록 두 현가장치에 의한 동적하중 차이가 증가하였으므로, 현가장치와 속도의 영향을 고려하여 동적하중 영향을 분석하여야 할 것이다.

(2) 비교적 평탄성이 좋은 포장($1.2m/km$ 이하)의 경우 속도증가에 따라 동적하중 증가율이 크지 않았으나 평탄성이 좋지 못한 포장($1.7m/km$)의 경우 속도증가에 따라 동적하중 증가율이 큰 것을 알 수 있었다. 본 연구에서의 한계점은 $1.2m/km$ 의 평탄성으로 포장 유지관리에서 평탄성 기준을 정하는데 기초자료로 사용가능할 것이라 판단된다.

(3) 차량속도에 따른 동적하중 분석 결과 Air spring 현가장치에서는 저속과 고속차량의 동적하중 차이가 크지 않았으나 Taper leaf와 Walking beam 현가장치에서는 속도에 따른 동적하중의 차이가 큰 것으로 나타나, Taper leaf와 Walking beam의 동적하중은 속도에 따라 급격히 증가하는 것으로 판단된다.

(4) 동적하중의 공분산을 이용하여 포장파손지수 산정 결과 동적하중의 공분산이 증가할수록 포장파손지수도 증가하였다. 또한, 신뢰도가 증가할수록 동일한 포장파손지수를 유지하기 위하여 평탄성이 좋은 포장이 필요한 것으로

판단된다.

(5) 현가장치에 의한 동적하중분석을 통하여 포장파손지수를 분석한 결과 Walking beam 현가장치를 이용한 차량이 Air spring 현가장치를 이용한 차량에 비해서 포장파손지수에 미치는 영향이 컸으나 그 영향은 미비한 것으로 판단된다.

본 연구의 결과를 이용하여 차량속도와 표층 아스팔트 혼합물 파괴특성에 근거한 포장 평탄성 규정에 이용할 수 있다. 포장시공 후 프로파일을 측정하여 동적하중을 분석하여 포장파손지수를 산정하고 이를 근거로 $+5\%$ 이상의 포장파손지수이면 인센티브를 -5% 의 포장파손지수이면 벌금을 물리는 방식으로 포장 평탄성에 근거한 지불규정에 효과적으로 사용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-313-D00822).

참고 문헌

- 한국건설기술연구원, 아스팔트 포장 피로균열 예측모형, KPRP-07-F1, 한국형 포장 설계법 및 성능개선 연구, 건설교통부, 2007
- Al-Rashid, N. I., C. E. Lee, and W. P. Dawkins. A Theoretical and Experimental Study and Dynamic Highway Loading. Research Report 108-1F, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, TX, USA, 1972.
- Fernando, E. G. Applicability of New Flexible Pavement Smoothness Specification for Asphalt Overlays, *Journal of the Transportation Research Record* No. 1575, Transportation Research Board, 1997, pp. 18-24.

- Gillespie, T. D., S. M. Karamihas, D. Cebon, M. W. Sayers, M. A. Nasim, W. Hansen, and N. Ehsan. Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance, UMTRI 92-2, *The University of Michigan Transportation Research Institute*, Ann Arbor, Michigan, USA, 1992.
- Lytton, R. L. J. Uzan, E. Fernando, R. Roque, D. Hiltunen, and S. M. Stoffels. Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Asphalt Mixes, SHRP-A-357, *Strategic Highway Research Program*, National Research Council, Washington, D.C.. 1993.
- Paris, P. C., and F. Erdogan. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Series D*, 85, No. 3, 1963.
- Sweatman, P. F. A Study of Dynamic Wheel Forces in Axle Group Suspensions of Heavy Vehicle. Special Report No. 27, *Australian Road Research Board*, Vermont South, Victoria, Australia, 1983.

접수일: 2009. 3. 4

심사일: 2009. 3. 13

심사완료일: 2009. 5. 15