大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第26卷 第5D號 · 2006年 9月
pp. 831~838

이동하중에 의한 시험도로 아스팔트 포장의 거동 분석

Behavior of Asphalt Pavement Subjected to a Moving Vehicle I: The Effect of Vehicle Speed, Axle-weight, and Tire Inflation Pressure

서영국* · 이광호**
Seo, Young Gook · Lee, Kwang-Ho

Abstract

An experimental/analytic study has been conducted to understand the adverse effects of low vehicle speed, high axle load and high tire pressure on the performance of asphalt pavements. Of 33 asphalt sections at KHC test road, two sections having different base layer thickness (180 mm versus 280 mm) are adopted for rollover tests. During the test, a standard three-axle dump truck maintains a steady state condition as moving along the wheel path of a passing lane, and lateral offsets and real travel speed are measured with a laser-based wandering system. Test results suggest that vehicle speed affects both longitudinal and transverse strains at the bottom of asphalt layer (290 mm and 390 mm below the surface), and even slightly influences the measured vertical stresses at the top of subbase and subgrade due to the dynamic effect of rolling vehicle. Since the anisotropic nature of asphalt-aggregate mixtures, the difference between longitudinal and transverse strains appears prominent throughout the measurements. As the thickness of asphalt pavement increases, the measured lateral strains become larger than its corresponding longitudinal strains. Over the limited testing conditions, it is concluded that higher axle weight and higher tire pressures induce more strains and vertical stresses, leading to a premature deterioration of pavements. Finally, a layered elastic analysis overestimates the maximum strains measured under the 1st axle load, while underestimating the maximum vertical stress in both pavement sections.

Keywords : *test road, asphalt, axle load, tire pressure, vehicle speed*

요 지

본 연구에서는 차량의 주행속도, 차축하중 그리고 타이어 압력변화에 따른 아스팔트 포장의 주요 응답 특성을 분석하고자 하였다. 시험도로 아스팔트 포장 중 기층의 두께가 서로 다른 A5(180mm)와 A8(280mm)단면을 선정하여 표준 3축 덤프트럭에 의한 아스팔트의 변형률과 수직응력의 변화를 계측하였다. 모든 주행시험은 각 포장 단면의 주행차로에서 진행되었으며 실제 주행속도와 이동경로는 레이저 원더링 시스템을 적용하여 실시간으로 관찰, 기록하였다. 아스팔트 포장의 변형률은 차량의 주행속도가 증가할수록 그 크기가 감소하는 일반적인 점탄성 거동을 보였다. 특히 수직응력은 차축하중 뿐만 아니라 주행속도에도 영향을 받는 것으로 보아 속도별 차량의 운동특성이 각 차축으로 전달되는 연직하중의 크기에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 일반적으로 타이어 공기압이 증가하고 차축하중이 증가할수록 아스팔트 하부의 최대 인장변형률은 증가하였다. 두 아스팔트 포장 단면에서 다층탄성해석을 수행한 결과 변형률은 계측된 결과보다 크게 예측되었으며 수직응력은 수치해석결과가 계측결과보다 작게 평가되었다.

핵심용어 : 시험도로, 아스팔트, 차축하중, 타이어 압력, 주행속도

1. 서 론

아스팔트 포장의 거동은 일반적으로 타이어 접지 형상, 타이어 압력, 차륜하중, 그리고 주행속도와 같은 다양한 하중변수와 밀접한 관련이 있다. 특히 차량의 주행속도는 포장내부의 온도변화와 함께 아스팔트 포장의 주요응답과 피로나 소성변형과 같은 공용성에 크게 영향을 미치는데 이는 주로 아스팔트 혼합물의 재료적 성질인 점탄성 혹은 점탄소성에 주로 기인한다. 대규모 포장 손상이 발생하기 전 단계의 아스팔트 혼합물은 시간-온도 중첩이론에 의해서 고온에서 고속하중에 의한 물성이 저온에서 저속하중에 의한 경우와 같고(적어도 거의 유사하고), 탄성재료와는 달리 그 거동에 있어서도 속도와 온도에 복합적으로 영향을 받는다. 이러한 아스팔트 혼합물이 포장내부에서 보이는 복잡한 구조적 응답을 이해하기 위해서 지난 수년간 포장연구는 시험도로 혹은 시험주로와 같은 실규모의 현장계측에서 그 해답을 얻고자 하였다.

*정회원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터 · 공학박사 (E-mail : seoyg89@freeway.co.kr)
**정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구개발실 · 공학박사 (E-mail : LKW@freeway.co.kr)

미국은 1952년 아이다호에 건설된 초기의 시험도로를 통해서 4개의 다른 차축하중에 의한 아스팔트 포장의 실제 응답변화를 분석하여 시험도로만이 가지는 장점을 충분히 활용하였으며 이 후 1962년 AASHO-시험도로 연구의 초석이 되었다(Highway Research Board, 1955, 1962). 1960년대 초부터 본격적으로 개발하기 시작한 역학-경험적 포장 설계법은 최근의 NCHRP-설계법(NCHRP 1-37A, 2002)에 이르기 까지 기술적 측면에서 많은 고도화가 이루어 졌으며 그 바탕에는 시험도로연구에서 축적한 계측 및 공용성 자료가 중요한 역할을 하고 있다.

지난 2002년 말에 준공한 한국도로공사의 시험도로는 한국의 도로환경을 현실적으로 모사하여 포장의 장기공용수명을 예측하고 역학-경험적 한국형 포장 설계법 개발을 위한 주요 응답 자료의 생성과 현장 검증을 위한 공간으로 활용되고 있다. 영동고속도로 여주 분기점에서 충주방향으로 중부내륙고속도로와 나란하게 위치하고 있는 시험도로에는 토압계, 변형률 측정기를 포함하여 총 1900여개의 센서가 33개 단면의 아스팔트 포장과 25단면의 콘크리트 포장에 매설되어 있다. 2003년 말부터 2004년 초까지 두 차례의 초기 계측을 시행하여 매설된 계측기의 망실여부 및 성능검토를 완료하였고 2006년 현재 약 70%이상의 계측기가 그 기능을 유지하고 있다. 2004년 이후로 지금까지 시험도로에서는 매년 평균 두 번씩(주로 봄과 가을) 정기계측을 실시해 오고 있다. 약 한 달 정도 소요되는 정기계측에서는 최대한 다양한 환경 및 하중변수를 고려하여 포장의 변형률, 수직변위, 수직응력, 그리고 포장온도와 같은 계측자료를 수집하여 데이터베이스 형태로 정리하고 있다.

본 연구에서는 시험도로 계측을 통해 하중속도, 타이어 공기압 그리고 차축하중이 아스팔트 포장의 변형률 및 포장하부의 수직응력의 변화에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여, 시험도로 아스팔트 포장 중에서 두 단면(A5와 A8)을 선정하여 표준 3축 덤프트럭에 의한 주행시험을 실시하였다. 위의 두 포장단면은 기층의 두께(A5-180mm와 A8-280mm)를 제외하고 모든 포장층의 재료와 두께가 동일하다. 시험 중 각 차륜의 정확한 진행위치와 주행속도를 측정하기 위하여 레이저를 이용한 원더링 측정시스템을 적용하였다(서영국 외 2인 2006). 단, 본 연구에서는 횡방향 주행이격에 따른 영향은 검토하지 않았으며, 주행이격이 큰 결과는 분석에서 제외하였다. 타이어의 압력은 가능하면 각 차축별로 현실적인 공기압을 반영하여 1축 단륜의 타이어 압력은 150psi(1,035kPa)로 고정하고 텐덤축의 2축과 3축 복륜 타이어의 압력만을 각각 최대 공기압인 120psi(828kPa)와 150psi에서 10psi(69kPa)씩 낮추어 총 3단계로 조절하여 시험을 실시하였다. 포장 단면별로 계측한 아스팔트 하부의 최대 인장 변형률과 보조기층 상부의 수직응력을 다층탄성이론으로 해석한 결과와 비교, 검토하였다. 해석에 사용한 재료입력변수 중에서 아스팔트 혼합물의 강성은 실내실험으로 구한 동탄성계수의 특성 곡선으로부터 결정하였다. 포장의 깊이별 실측온도와 하중속도의 깊이별 영향 주파수(Ioulize *et al.,* 2002)를 고려하여 각 시험조건에 해당하는 동탄성계수를 계산하였다. 단, 보조기층과 동상방지층을 포함한 노상은 선형 탄성재료로 가정하여 해석하였다.

2. 시험도로 현장계측

2.1 아스팔트 포장단면과 계측기 매설

한국도로공사의 시험도로는 여러 포장단면과 재료의 성능을 비교검토 하고 각각의 공용성능을 평가하여 우리 실정에 맞는 포장 설계법을 개발하고자 건설되었다. 교통 및 환경하중의 변화에 의한 포장응답은 공용성 예측모형 개발을 위한 기초자료로 활용되고 있으며, 각 포장의 단면은 새로운 재료 및 유지보수공법의 현장검증 수단으로도 운영될 예정이다. 총 33개의 아스팔트 포장 중에서 본 연구를 위해서 두 단면(A5와 A8)을 선정하였다. A5단면은 그림 1과 같이 표층 50mm, 중간층 70mm, 그리고 아스팔트 기층 180mm로 총 300mm 두께이고 A8단면은 표층 50mm, 중간층 70mm, 그리고 아스팔트 기층 280mm로 총 400mm 두께의 아스팔트층으로 구성하였다. 포장하부에는 보조기층, 동상방지층, 그리고 노상을 설치하였다. 두 단면 모두 아스팔트 표층은 일반 19mm 밀입도 혼합물을 사용하였으며 초기 공극률과 최적 아스팔트 함량은 각각, 4.2%와 4.9%로 설계되었다. 아울러 중간층과 기층은 각각 BB5와 BB3혼합물을 적용하였다.

시험도로 건설과 동시에 매설된 주요 계측기로는 A5단면의 경우 표층과 중간층, 그리고 기층 상, 하부에 각각 6개의 종, 횡방향 아스팔트 변형률 계측기와 보조기층상부와 노상상부에 각각 3개씩 토압계가 설치되어 있으며, 포장시공 후 100mm 직경의 코어를 채취하여 포장내부의 표층에서 기층하부까지 깊이별로 온도센서를 매립하였다. A8단면에는 중간층 하부, 기층상부와 기층하부에 각각 5개의 종, 횡방향 아스팔트 변형률 계측기와 보조기층 상부에 3개의 토압계를 설치하였다. 주행차로의 차륜부를 따라 동일한 간격으로 설치된 아스팔트 변형률 계측기(KM100HAS, 전기저항식)는 시험차량의 진입과 진출에 따른 포장층의 변형률을 관찰하고자 하였다. 계측기 매설당시 토압계(KDE-200KPA, 전기저항식)는 포장하부의 굵은 골재에 의한 비정상적인 신호 및 계측기 손상을 예방하기 위하여 표준모래를 이용하여 센서부를 보호하였다. 그림 1은 A5단면의 단면도와 센서 매설위치를 보여주고 있다. 각 센서의 매립과정 및 시공 후 초기 응답에 관한 세부내용은 한국도로공사 연구보고서에 자세하게 기술되어 있다(한국도로공사, 2002).

2.2 이동하중재하시험-시험차량제원과 시험변수

재하시험에 사용한 차량은 3축 14.5톤 덤프트럭으로 1축은 단륜이고 2축과 3축은 탠덤축(Tandem)으로 구성된 복륜(dual tire)으로 구성되어 있다. 모든 타이어는 12R22.5형식으로 단륜과 복륜으로 사용될 경우 최대 권장 타이어 압은 각각 120psi(830kPa)와 110psi(759kPa)이다. 그러나 실제 고속도로를 주행하는 덤프트럭의 타이어 공기압이 위의 기준보다 높았으며 - 2005년과 2006년에 시험도로에서 조사한 전륜과 후륜타이어의 공기압은 대부분 150psi(1,035kPa)이상으로 측정 - 이는 타이어 자체의 수명을 연장하는 측면에서는 유리하다고 알려져 있다. 하지만, 타이어 압력이 아주 높은 상태의 주행은 노면과의 접지압의 변화를 크게 하여 타이어의 편마모를 유도한다고도 보고되고 있다(De Beer *et al.,* 1997). 시험차량의 각 축간 거리와 차폭은 그림 1에 도

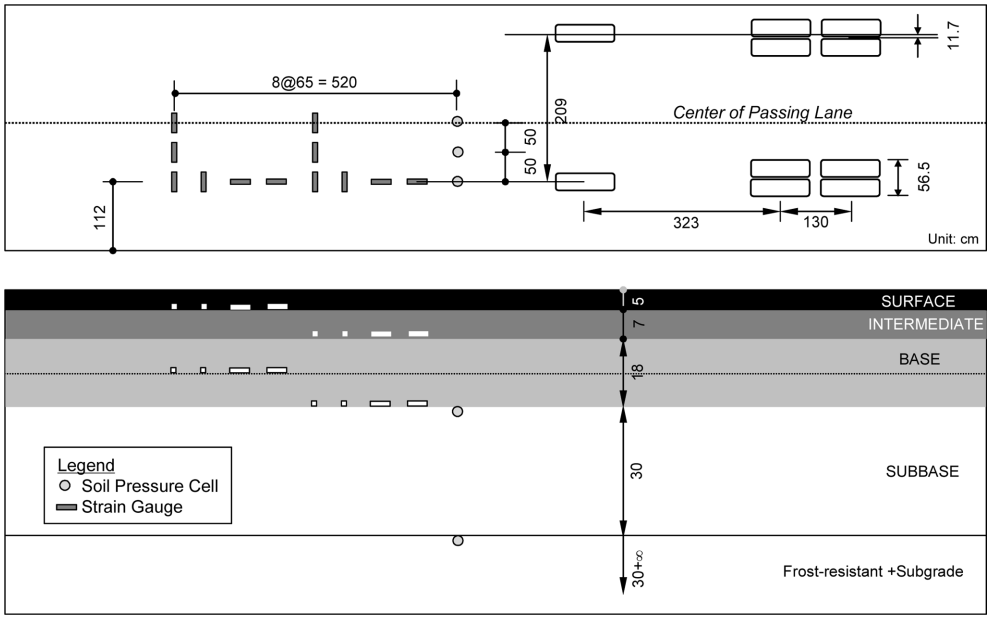

그림 1. A5단면의 계측기 매설위치(상-평면도, 하-측면도) 및 포장단면 두께와 차량의 재하위치 및 차량재원

식하였다. 본 연구를 위하여 시험에 적용한 최대 타이어 압력은 전륜, 중륜, 그리고 후륜이 각각 150psi, 120psi, 그리고 150psi이고 전륜을 제외한 중륜과 후륜의 공기압을 10psi(69kPa)씩 낮추어 총 3단계에서 주행시험을 시험하였다. 타이어 압력은 이동식 공기압축기와 압력게이지를 사용하여 각 목표수준으로 조절하였다. 아울러 차축하중에 의한 포장의 응답영향을 검토하기 위하여 적재함에 추가하중을 전혀 싣지 않은 "공차"와 일정한 두께와 무게를 갖는 철판을 재하하여 최대 적재상태를 근사하게 모사한 "만차"의 두 가지 하중변수를 적용하였다. 만차를 모사하기 위한 재하철판의 총 무게는 약 6.6톤이고 최대한 하중의 편심이 발생하지 않도록 적재하였다. 각 차륜의 연직하중은 이동식 전자저울과 고무판으로 차량이 정지한 상태에서 측정하였다. 표 1에 정리되어 있는 것처럼 각 차륜의 최대하중은 공차의 경우 27.2-22.9-21.9kN 이고 만차의 경우 31.5-36.0-36.6kN이다. 공차의 경우 1축에서 가장 큰 하중이 계측되었으며 만차의 경우 텐덤축에서 최대 축하중이 재하되고 있음을 확인할 수 있다. 주행시험은 각각의 재하조건에서 타이어 공기압력별로 50km/h에서 정속주행시험을 하였다. 또한 속도에 따른 아스팔트 포장의 변형률과 수직응력의 변화를 관찰하기 위하여 단일 타이어 공기압(1축 150psi, 2축 120psi 그리고 3축 150psi)조건에서 세가지 주행속도(10, 50, 그리고 80km/h)로 시험을 실시하였다.

모든 주행시험은 운전자측 전륜의 중심이 종방향 아스팔트

표 1. 타이어 공기압과 재하상태에 따른 각 차륜별 중량

타이어 공기압 [psi(kPa)]		운전자측 차륜하중(kN)			재하상태
중륜	후륜	전륜	중륜	후륜	
120(828)	150(1,035)	27.2	21.5	21.9	공차
110(759)	140(966)	26.1	22.9	21.9	
100(690)	130(897)	26.2	22.3	21.7	
120(828)	150(1,035)	31.5	36.0	36.6	만차
110(759)	140(966)	30.9	34.8	34.1	
100(690)	130(897)	30.5	35.8	35.8	

변형률계의 중심을 지나도록 유도하였으며, 각 시험 변수별로 최소 3차례 반복시험을 실시하였다. 각 주행시험의 시간간격은 최소 10분으로 설정하여 특히 저속주행에 의한 아스팔트 포장의 변형이 충분히 회복하도록 하였다. 실제 주행경로와 지정된 경로 사이의 차이는 레이저 원더링 측정 시스템을 이용하여 매 주행시험마다 관찰하였다. 본 시험에 적용된 원더링 시스템은 두 개의 거리측정용 레이저 센서를 아스팔트 변형률계의 시점과 종점에 설치하여 차량이 실제 주행한 경로를 측정하고 이로부터 타이어의 중심이 각 센서의 중심으로부터의 벗어난 이격거리를 계산하도록 하였다.

주행 중 포장의 모든 응답(아스팔트 변형률과 보조기층과 노상상부의 연직응력)은 시험도로의 수동계측 시스템을 이용하였고, 포장 깊이별 온도변화는 매 10분마다 자동으로 계측하여 시험기간 중의 온도변화를 시험도로 계측실의 서버에 저장하였다. 아울러 포장 노면에 발생한 균열 및 소성변형 등 주요 포장손상에 대해서도 시험 전, 후에 변화를 기록하였다.

3. 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 특성곡선

주행 속도와 온도별 아스팔트 혼합물의 점탄성 거동을 고려하기 위하여 포장에 적용한 모든 아스팔트 혼합물에 대하여 동탄성계수 측정시험을 실시하였다. 다양한 주파수를 갖는 일축 인장-압축형태의 반복하중을 다양한 온도의 직경 100mm 높이 150mm 원주형 시편에 재하 하여 선형 점탄성 영역에서의 변형률을 구하였다. 각 시험 조건별로 재하응력과 변형률 크기의 비로 동탄성계수를 결정하였다. 본 연구에서 적용한 시험온도는 -10, 10, 35, 54.5°C이고 각 시험온도별 하중 주파수는 25, 10, 5, 1, 0.5, 0.05, 0.01Hz이다. 시편에 생길지도 모르는 영구변형을 최대한 제한하기 위하여 모든 시험은 저온-고주파수에서 고온-저주파수 조건으로 진행하였다. 동탄성계수의 특성곡선(master curve)은 시간-온도 중첩이론(time-temperature superposition)을 바탕으로 모든 측정 데이터를 기준온도인 10°C에 대하여 시간변수(하

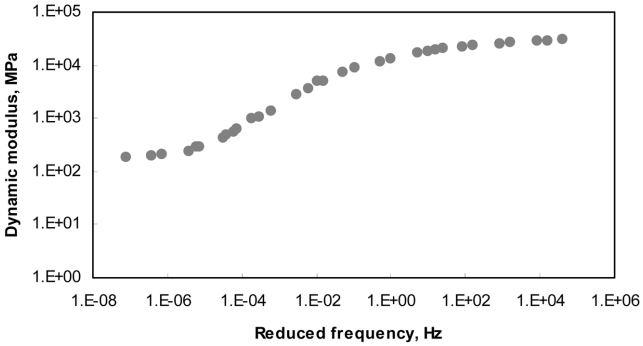

그림 2. 시험도로 A5와 A8단면의 기층 혼합물(BB3)의 동탄성계수 특성곡선(master curve)

중속도)축과 나란하게 이동하여 구성하였다. 그림 2는 시험도로 단면 A5와 A8의 기층으로 사용된 BB3 혼합물의 동탄성계수의 특성곡선이다. 또한 수치해석에 적용할 각 시험조건별 동탄성계수를 결정하기 위하여 위 동탄성계수 특성곡선을 아래의 식 (1)과 같은 S-형 곡선(sigmoidal function)으로 정의하고 MS-Excel의 Solver를 이용하여 아래의 회귀분석계수를 결정하였다.

$$\log|E^*| = a + \frac{b}{1+\frac{1}{\exp^{d+e\log(f\cdot a_T(T))}}} \quad (1)$$

여기서,

E^* = 동탄성계수 MPa

a, b, d, e = 회귀분석계수

f = 하중속도, Hz

a_T = 시간-온도이동계수(time-temperature shift factor)

T = 온도

4. 시험 결과 분석

4.1 DaqView

모든 계측자료는 일차적으로 Binary형식으로 저장되고 이러한 계측신호를 현장에서 바로 검토하기 위하여 전용재생 프로그램인 DaqView를 사용하였다. 윈도우즈 전용 프로그램인 DaqView는 각 재하시험에서 저장된 모든 신호를 한 화면에서 동시에 비교할 수 있기 때문에 각 신호의 이상 유무의 판단 및 분석에 필요한 신호를 추출하는데 유용하다. 또한 DaqView를 이용해서 텍스트 형식의 파일로 변형이 가능하기 때문에 MS-office Excel을 비롯한 범용 프로그램에서 각 시험결과를 별도로 정리, 분석할 수 있다.

4.2 아스팔트의 변형률 및 연직하중의 변화

그림 3은 A5단면에서 동적하중 재하시험 후 측정한 결과로 전형적인 인장 변형률과 연직응력의 변화를 보여준다. 이 결과는 공차상태에서 80km/h 정속으로 주행하는 덤프트럭에 의해서 기층 하부에 발생하는 인장변형률과 보조기층 상부와 노상 상부에 발생한 수직응력의 변화를 보여주고 있다. 여기서 종방향 변형률(Long.)은 그림 1의 오른쪽 끝단의 아스팔트 변형률 계측기에서 측정된 값이고 횡방향 변형률(Lat.)은 위 종방향 변형률로부터 차량 진행 방향으로 약 2

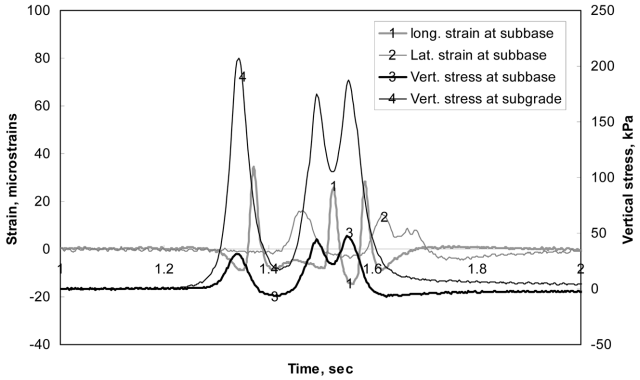

그림 3. 아스팔트 보조기층 하부의 종, 횡방향 인장 변형률, 보조기층 하부와 노상상부의 연직 하중의 변화(재하속도 80km/h, 공차, A5단면)

미터 떨어진 횡방향 변형률 계측기에서 측정된 값이다. 최대 종방향 변형률은 공차의 경우 하중이 상대적으로 큰 전륜(1축)에서 주로 발생하며 시험 조건에 따라 그 크기가 횡방향 변형률의 약 두 배 이상 크게 발생하는 경우도 있었다. 재하차량의 각 차축이 계측기 위를 통과하면서 종방향 변형은 압축, 인장 그리고 다시 압축으로 변하는 응답을 보이는 반면, 횡방향 변형은 각 차륜이 통과하는 위치에서 최대인장이 발생한 직후 점차 0으로 수렴하고 있음을 관찰할 수 있었다. 이러한 아스팔트 포장의 횡방향 변형은 재하조건과 포장온도에 따라 그 회복 특성이 다르고 일반적으로 선행차륜의 하중이 후륜에 의한 포장변형에 미치는 영향이 있음을 알 수 있다. 종방향 변형은 차량의 진행방향으로 인접한 차축의 영향이 상대적으로 작아 각 차축이 독립적으로 이동, 재하된 경우와 유사한 응답을 보이고 있으며 실제로 차량이 통과하고 난 후 종방향으로는 잔류변형이 거의 발생하지 않았다. 본 시험에 사용된 덤프트럭의 2축과 3축 사이의 종방향 간격이 1축과 2축간의 길이에 비하여 짧기 때문에(약 1.3 미터) 종방향 변형의 경우 2축과 3축사이의 압축변형이 서로 중첩되어서 1축에서 발생하는 압축변형보다 크게 발생하였다. 이러한 아스팔트 포장 거동의 이방성과 중첩의 영향은 앞선 연구의 결과(Owende *et al.*, 2001; Huhtata *et al.*, 1990; Siddharthan *et al.*, 1998; Al-Qadi *et al.*, 2004)에서도 잘 보고되고 있다.

그림 4는 만차상태로 저속(약 10km/h 내외)주행한 경우

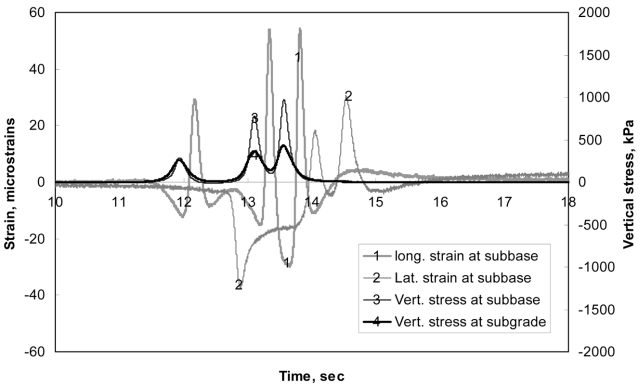

그림 4. 아스팔트 보조기층 하부의 종, 횡방향 인장 변형률, 보조기층 하부와 노상상부의 연직 하중의 변화(재하속도 10km/h, 만차, A5단면)

A5단면의 주요 포장응답을 보여준다. 앞서 공차-고속주행에 비하여 종방향 변형률의 경우 텐덤축에서 인장 변형률이 크게 발생하였고 최대 인장 변형률은 공차주행에 비하여 약 1.8배 증가하였다. 아울러 2축과 3축사이의 압축 변형률도 공차보다 약 2배 이상 증가하였다. 횡방향 변형률의 경우는 공차-고속주행결과와는 달리 1축에서 압축변형이 발생하였으며 후륜에서의 인장변형은 공차-저속주행의 경우보다 약 2.4배 크게 관측되었다. 보조기층 상부와 노상 상부에 발생하는 수직응력의 최대값은 각각 약 971kPa과 429kPa로 고속-공차주행에 비해 각각 4.7배, 9.5배 이상 증가하여 저속으로 진행하는 중차량이 포장하부에 소성변형을 유발할 가능성이 상대적으로 크다는 것도 확인할 수 있다.

흥미롭게도 표 1과 같이 하중재하상태에 따른 축하중의 분포는 동일한 공기압력을 적용하여도 차량 고유의 기계적 특성(현가장치의 탄성계수 및 점성계수, 차량 프레임의 구조 및 강성, 등)에 따라 매우 다름을 알 수 있다. 더군다나 이동 중에는 노면조도와 주행속도 변화에 따른 차량의 3차원 운동의 영향으로 실제 각 차륜에서 작용하는 연직하중은 매 순간 변하므로(서영국, 1996) 특히 고속에서의 아스팔트 포장의 응답은 매우 복잡한 특성을 보인다.

4.3 하중속도에 의한 아스팔트 하부의 변형률 변화

그림 5부터 8은 차량의 속도 변화에 따른 아스팔트 포장 하부에 발생하는 종, 횡방향 변형률의 최대값을 분석한 결과로 일반적으로 차량 속도가 증가할수록 변형률이 작게 발생하여 아스팔트 혼합물의 전형적인 점탄성 거동이 포장의 구조적 응답에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 아스팔트층의 두께가 상대적으로 얇은 A5단면의 경우 공차와 만차에 의한 시험결과를 비교하여 보면, 공차의 경우 1축 단륜 타이어에 의한 종방향 변형률이 측정속도 범위 내에서 가장 크고, 만차의 경우 텐덤축에서 종방향 변형이 약간 크게 발생하였다. 따라서 축하중의 크기가 어느 정도는 각 차축에서 발생하는 변형률의 절대/상대적 크기에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 공차상태에서 발생한 최대 인장변형률은 만차에 비하여 그 크기가 약 89% 수준이었고, 만차상태에서 저속으로 주행한 경우 아스팔트 기층 하부에 횡방향으로 압축변형이 발생하였다. A5단면에서는 재하상태와 무관하게 대부분 횡방향 변형률이 종방향 변형률보다 그 크기가 작았다.

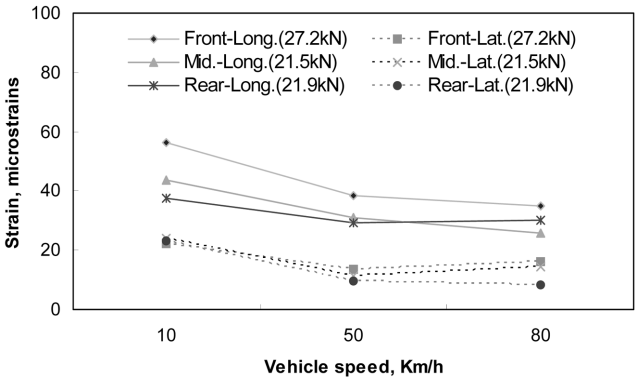

그림 5. 주행속도에 따른 아스팔트 층 하부에 발생하는 종, 횡방향 변형률의 변화: A5단면, 공차주행, 그리고 최대 타이어 압력

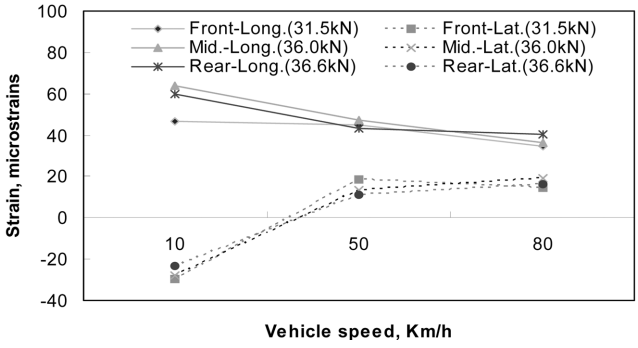

그림 6. 주행속도에 따른 아스팔트 층 하부에 발생하는 종, 횡방향 변형률의 변화: A5단면, 만차주행, 그리고 최대 타이어 압력

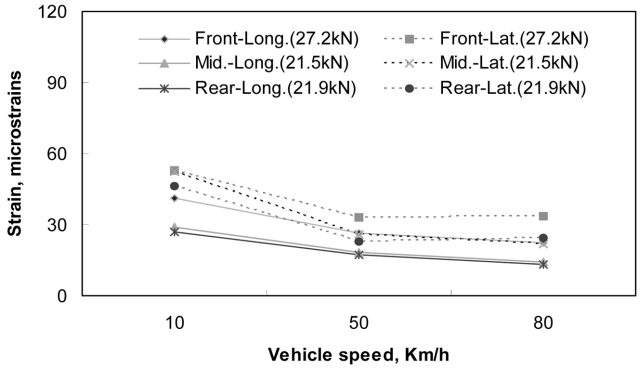

그림 7. 주행속도에 따른 아스팔트 층 하부에 발생하는 종방향, 횡방향 변형률의 변화: A8단면, 공차주행, 그리고 최대 타이어 압력

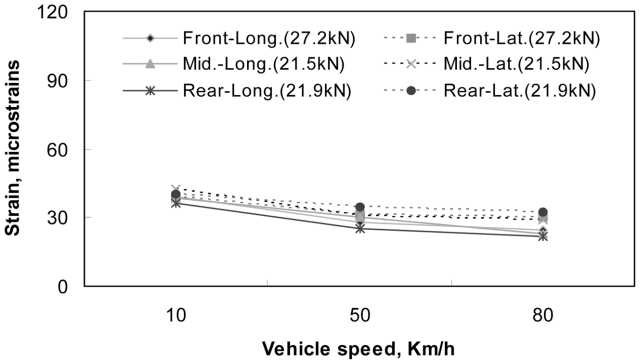

그림 8. 주행속도에 따른 아스팔트 층 하부에 발생하는 종방향, 횡방향 변형률의 변화: A8단면, 만차주행, 그리고 최대 타이어 압력

A8단면과 같이 포장의 두께가 증가하면 아스팔트 층 하부의 최대 인장변형률은 상대적으로 작아지기 때문에 일반적으로 포장하부에서 시작되는 균열을 억제하는 효과가 있음을 알 수 있다. 하지만 공차의 경우 축하중이 가장 큰 1축에 의한 변형이 가장 크고 만차의 경우 텐덤축에서 변형이 크게 발생하여 포장두께와 함께 축하중의 크기가 여전히 포장내부의 최대 변형률의 발생위치와 크기에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. A5단면과 달리, A8단면에서는 기층하부에서의 압축변형은 발생하지 않았다. 그러나 만차에 의한 최대 인장변형률은 공차에 오히려 20%작게 발생하였다. 이와 같이 제한된 시험결과를 바탕으로 공차의 경우가 만차에 비하여 더 쉽게 포장하부에서 균열에 의한 손상이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 아울러 일부 조건을 제외하고 공차의

경우가 만차의 경우에 비하여 하중속도 증가에 따른 변형률 감소효과가 컸다.

4.4 하중속도와 타이어 압력에 따른 수직응력 변화

사실 지금까지 포장하부의 수직응력은 대부분 정지 시 계측한 차축하중의 크기에 주로 지배를 받고, 주행속도에 의한 영향은 거의 없는 것으로 알려져 왔다. 하지만 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 속도의 변화와 노면조도에 의한 차량의 3차원 운동(Pitching, Rolling Bouncing 그리고 Yawing 등)으로 주행 중 각 차축으로 분산되는 연직하중의 크기가 달라지고 이런 현상이 포장응답에도 영향을 주고 있음을 밝히고자 한다.

그림 9와 10은 A5단면의 보조기층 상부와 노상 상부의 최대 수직응력을 보여준다. 전반적으로 하중속도가 증가할수록 수직응력이 작아짐을 알 수 있다. 공차의 경우 저속에서는 1축에서 보조기층의 상부와 노상의 상부에 각각 72kPa과 34kPa의 최대수직응력이 발생하였으나 속도가 증가하면서 약 50km/h에서는 템덤축에서 최대 수직응력이 발생하였다. 이후 고속으로 갈수록 중륜과 후륜위치에서의 응력은 급속히 감소하는 반면 전륜위치에서의 응력은 비교적 완만한 속도로 감소하는 경향을 보였다.

만차의 경우 최대 수직응력은 템덤축의 후륜에서 보조기층과 노상에서 각각 96.6kPa과 46.46kPa이 발생하였고 공차의 경우와는 달리, 모든 주행속도에서 정지 시 차축하중이 가장 큰 후륜에서 항상 최대 수직응력이 발생하였다. 그리고 주행속도별로 각 차축에서 발생하는 의한 수직응력의 차이도 공차에 비하여 크게 측정되었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 차량의 주행 중 운동으로 인한 하중 분배효과가 공차가 만차에 비하여 크고 속도별로 그 영향도 다르다는 것을 알 수 있다.

그림 11과 그림 12는 타이어 압력에 따른 보조기층과 노상에 발생하는 수직응력의 변화로 주행속도는 50km/h이다. 수평축의 수치는 중륜의 타이어 공기압의 변화를 의미한다. 전반적으로 공차의 경우 중륜과 후륜의 타이어 압력이 증가할수록 최대 수직 응력이 증가하였으나 타이어 압력이 약 110psi 보다 작은 경우 수직응력의 변화는 거의 발생하지 않았다. 특히 타이어 압력을 고정한 전륜위치에서도 중륜과 후륜의 공기압 변화와 동적 하중분포효과로 수직응력의 변화가 관찰되었다. 노상의 경우 보조기층에 비하여 수직응력의 크기가 작았으며 타이어 압력에 의한 영향도 미비하였다. 만차의 경우 전륜위치에서 중륜과 후륜의 타이어 압력이 증가할수록 수직응력이 증가하였다. 타이어 압력증가에 따른 최대 수직 응력의 증가율은 공차에서는 약 27%이고 만차의 경우는 32%로 하중이 증가할수록 타이어 압력증가에 따른 수직응력의 변화가 크게 관찰되었다.

4.5 타이어 압력별 포장의 변형률 변화

그림 13은 타이어 공기압 변화에 따른 A5단면 아스팔트

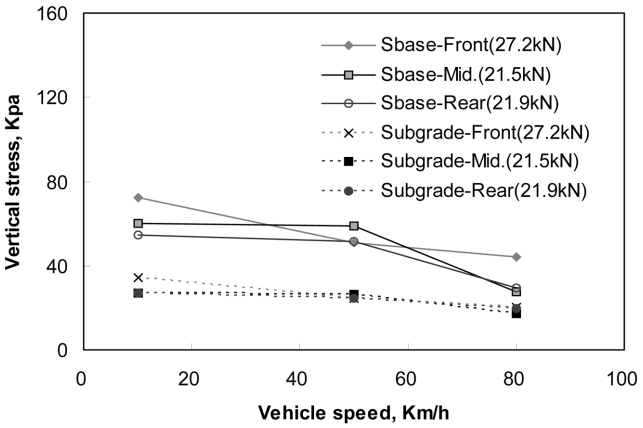

그림 9. 주행속도에 따른 보조기층 상부와 노상 상부에 발생하는 수직응력의 변화: A5단면, 공차주행

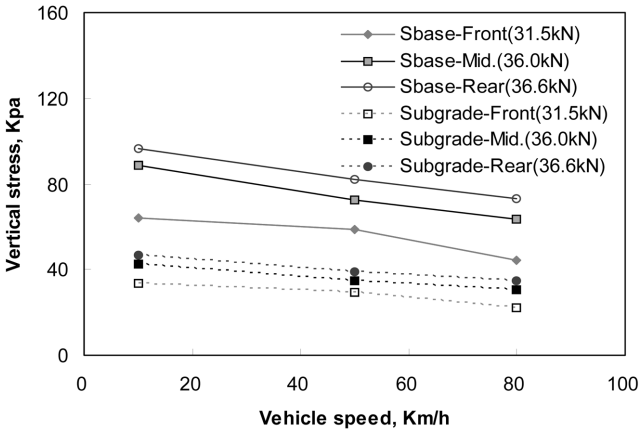

그림 10. 주행속도에 따른 보조기층 상부와 노상 상부에 발생하는 수직응력의 변화: A5단면, 만차주행

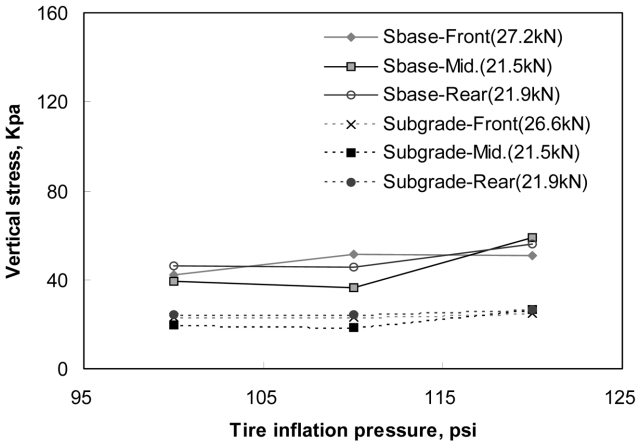

그림 11. 타이어 공기압에 따른 보조기층 상부와 노상 상부에 발생하는 수직응력의 변화: A5단면, 공차주행

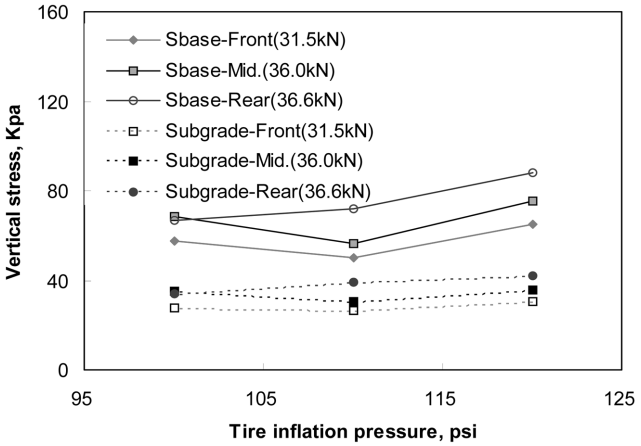

그림 12. 타이어 공기압에 따른 보조기층 상부와 노상 상부에 발생하는 수직응력의 변화: A5단면, 만차주행

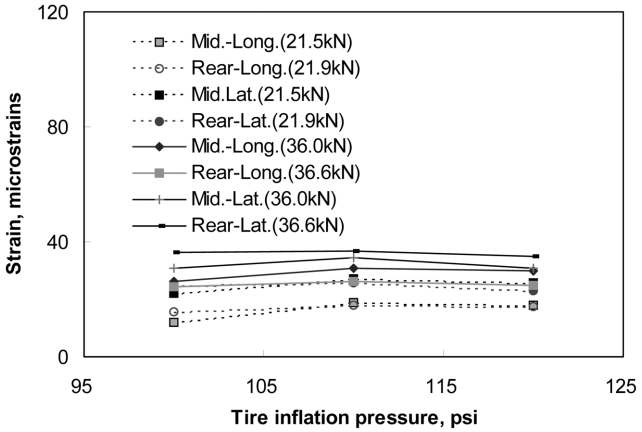

그림 13. 타이어 공기압에 따른 A5단면 아스팔트 포장 하부의 최대 인장변형률

층 하부의 최대 인장 변형률의 변화이다. 본 연구에서 검토한 공기압 변수와 주행속도에서는 공기압의 증가가 아스팔트 포장의 변형률에 크게 영향을 미치지 않았다. 노면에 가까운 포장층에서도 타이어 공기압의 증감에 따른 변형률의 영향은 거의 발견할 수 없었다. Owende(2001)의 연구결과는 타이어 공기압이 증가할수록 아스팔트 하부의 인장 변형률은 증가한다고 밝히고 있어 본 연구와 다른 결과를 보고하고 있다. 하지만 타이어 압력변화가 포장의 변형률에 미치는 영향은 차량의 주행변수와 포장의 구조적 성능에 따라 달라질 수 있다고 사료된다. 본 연구에서는 타이어 제조사가 권장하는 최대 공기압인 110이나 120psi을 초과하는 공기압 영역에서의 포장의 응답을 분석하고자 하였다. 그 이유는 실제 고속도로를 주행하는 중차량의 대부분이 공칭압력보다 높은 공기를 주입하고 운행하는 현실을 반영하고자 했기 때문이다. 반면 Owende이 동일한 규격의 타이어에 적용한 타이어 압력은 최대 110psi이고 시험에 사용한 포장단면은 아스팔트 층의 두께가 50mm 밖에 안 되는 매우 얇은 포장으로 한국도로공사 시험도로 단면과 많은 차이가 있다. 흥미롭게도 Loulizi(Loulizi *et al.*, 2001)가 미국 버지니아 주 시험도로에서 실시한 주행시험에서 본 연구와 유사한 연구결과를 밝히고 있다. 그와 공동 연구진은 시멘트 안정처리 기층(150mm)위의 약 263mm 두께의 아스팔트 층 하부에 발생하는 횡방향 인장 변형률이 일정한 주행속도 8km/h에서 타이어 압력(범위 80~100psi)변화에 크게 영향을 받지 않았고, 수직응력은 타이어 압력이나 주행속도 보다는 포장내부의 온도변화에 더 큰 영향을 받았다고 보고하였다. 앞으로 타이어 압력이 포장의 변형률 혹은 기타 포장의 응답에 미치는 영향은 좀 더 다양한 시험변수연구를 통한 연구와 분석이 필요한 것으로 보인다. 그리고 가능하다면 주행속도에 따른 타이어 압력의 포장거동에 미치는 영향도 살펴보아야 할 것이다.

5. 수치 해석 결과

Kenlayer(Huang, 2004)를 이용하여 시험도로 아스팔트 포장의 다층탄성해석을 수행하였다. 해석에 사용한 하중조건 중 접지면적은 각 타이어의 실제 접지면적을 측정하여 이를 등가 원형 접지형상으로 환산하였다. 1축 단륜 타이어의 경우 측정한 접지면적은 약 0.048m^{2}로 약 0.124m의 접지반경을 갖는 원형 등분포 하중으로 변환하여 해석에 적용하였다. 또한, 타이어의 접지압력은 타이어의 공기압력과 동일하다고 가정하였다. 다른 연구를 통해서 이미 밝혀진 바와 같이 이러한 가정은 실제 하중조건, 특히 타이어의 형상과 공기압에 따른 접지형상 및 비선형 접지압 분포와 상이하지만 본 연구에서는 이와 같은 입력변수의 이상화에 따른 거동 예측과 실제 포장 거동과의 차이를 비교, 검토하고자 하였다.

아스팔트 포장의 각 포장층의 물성은 아스팔트 층의 경우 3.1절에서 구한 동탄성계수 특성 곡선으로부터 현장 시험 당시의 속도와 포장 깊이별 측정온도를 적용하여 결정하였다. 하중 속도는 포장노면에서 실측한 차량의 평균속도를 포장 깊이별 하중 주파수로 산정하여 이를 식 (1)에 적용하였다. 포장하부의 보조기층과 동상방지층을 포함한 노상은 선형탄성으로 가정하였다. 다층 탄성 해석에 적용한 포장의 물성과 아스팔트 층의 깊이별 온도는 표 2에 정리하였다.

모든 수치해석은 1축 단륜 타이어에 의한 포장의 응답만을 예측하였으며 그 결과는 표 3과 같이 각 단면별로 최대 응력과 최대 인장 변형률의 측정값과 비교하였다. 여기서 측정값은 각 단면별로 저속으로 공차가 주행하였을 경우의 1축 단륜 타이어 위치에서의 최대 인장변형률과 최대 수직응력이다.

예상과 같이 두 결과에는 분명한 차이가 있다. 우선 수치해석에서는 차량의 동적거동의 영향을 충분히 반영하기 어렵다. 그래서 변형률의 경우 두 단면에서 모두 계측값이 해석결과보다 작다. 특히 이 차이는 두 해석 단면 중 A5단면에서 크게 발생하였다. 이는 주행속도와 축하중, 그리고 타이어 압력의 영향 외에도 포장의 노화, 포장 층간분리 및 포장손상 등 실제계측에는 반영되었지만 구조해석에서는 충분히 고려할 수 없는 영향이 존재함을 추정 가능하게 하였다. 수직응력의 경우 두 단면에서 모두 수치해석에 의한 예상이 계측결과보다 작았다.

표 2. 수치해석에 사용한 포장물성 및 아스팔트 각 층의 계측온도

포장층	A5		A8		포아송비
	온도, °C	E* or E, Mpa	온도, °C	E* or E, Mpa	
표층	35.9	3113.4	44.8	1376.1	0.30
중간층	34.8	3088.8	38.5	2131.0	0.30
기층	26.9	4994.0	23.3	6238.0	0.35
보조기층	-	730	-	730	0.40
동상방지층	-	430	-	430	0.40
노상	-	430	-	430	0.45

표 3. 수치해석결과

	A5 단면		A8 단면	
	다층 해석	계측값-공차	다층 해석	계측값-공차
아스팔트 하부 인장 변형률	103.9	56.5	59.5	41.33
보조기층 상부 응력 kPa	28.7	72	13.8	35.9
노상 상부 응력 kPa	12.1	34.6	-	-

6. 결론 및 향후 연구

아스팔트 층 하부의 인장 변형률은 동일한 포장온도에서 저속일수록 증가하여 차량 정체가 포장의 손상에 미치는 영향이 고속주행에 비하여 크다는 사실을 확인하였다. 또한 종방향 거동은 동일한 위치에서의 횡방향 거동과 다르고 이는 아스팔트 혼합물의 비등방성과 다양한 하중재하 특성에 의한 영향으로 보인다. 아스팔트 포장의 역학적 설계를 위한 응답 및 공용성 모형 개발에서 아스팔트 이러한 영향은 정확하게 반영되어야 할 것으로 생각한다.

차량의 각 축이 부담하는 하중의 크기와 분포가 포장하부의 수직응력의 발생 및 그 크기에 미치는 영향은 차량의 주행속도와 그에 따른 동적특성에 많은 지배를 받을 수 있음을 검토하였다. 특히 공차의 경우가 만차보다 차량의 동적특성으로 축하중 재분배효과가 크게 관찰되었다. 타이어 압력 증가에 따른 수직응력의 증가효과는 만차의 경우가 공차에 비하여 약간 크고 공차의 경우 텐덤축의 타이어 압력이 증가할수록 수직응력이 증가하였다. 반면에 타이어 압력 변화가 변형률에 미치는 영향은 미비하였다.

본 연구에서 적용한 동 재하시험은 모두 차륜부에서 진행되었다. 하지만 레이저 원더링 시스템으로 측정한 결과 실제 차량의 주행경로는 그림 1과 같은 지정된 주행경로의 중심에서 ±50mm 내외의 주행이격이 있었으며 실제로 고속에서 +100mm 이상 주행이격이 발생한 경우도 있었다. 여기서 (+) 부호는 실제 주행 경로가 1차로 방향으로 이격이 생긴 경우를 위미한다. 물론 ±50mm 이상 주행이격 생긴 경우와 그에 따른 시험결과는 분석에서 제외하였다. 하지만 최근의 연구는 시험도로 계측을 통한 아스팔트 포장의 응답이 실제 주행경로와 계측기와의 상호 위치에 따라 매우 민감하게 변할 수 있다는 사실에 주목하고 있다(서영국 외, 2006). 따라서 주행 속도 및 타이어 압력에 의한 포장응답의 영향을 주행이격에 의한 거동과 함께 이해되어야 한다고 생각하며 이를 향후 연구과제로 수행하고자 한다.

참고문헌

서영국(1996) **3차원 차량 하중에 의한 곡선교의 동적응답 특성에 관한 연구**, 공학석사학위논문, 서울대학교.

서영국, 권순민, 이재훈(2006) 차량의 횡방향 주행이격에 의한 아스팔트 콘크리트 포장의 응답특성 분석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권 제3D호, pp. 453~459.

한국도로공사 도로교통기술원(2002) **시험도로 건설과 운영에 관한 연구**, 중간연차보고서.

Al-Qadi, I.L., Loulize, A., Elseifi, M., and Lahouar, S. (2004) The virgina smart road: The impact of pavement instrumentation on understanding pavement peformance, *The Journal od AAPT*, Vol. 83, pp. 427-446.

De Beer, M., Fisher, C., and Jooste, F.J. (1997) Determination of pneumatic tire/pavement interface stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers, *Proc., 8th Int. Conf. on Asphalt Pavement*, Vol. 1, pp. 197-227.

Finn, F., Saraf, C.L., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W., and Abdullah, A. (1986) Development of Pavement Structural Subsysems, *NCHRP Report 291, Transportation Research Board*, Washington, D.C.

Hallin, J. P. (2002) *Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Phase II*, NCHRP1-37A.

Hartman, O.A.M., Ward, S.M., Gilchrist, M.D., and O'Mahony, M.J. (2001) Minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, pp. 254-262.

Highway Research Board (1955) *The WASHO Road Test Part 2: Test Data Analysis and Findings*, Special Report.

Highway Research Board (1962) *The AASHO Road Test: Summary Report*, Report#7.

Huang, Y. H. (2004) *Pavement Analysis and Design*, 2nd Ed.

Huhtala, M., Alkio, R., Pihljamaki, J., Pienimaki, M., and Halonan, P. (1990) Behavior of bituminous materials under moving wheel loads, *Proc., Assn. of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 59, pp. 422-442.

Loulizi, A., Al-Qadi, I. L., Flintsch, G.W., and Freeman, T.E. (2001) Using field measured stresses and strains to quantify flexible pavement responses to loading, *Ninth International Conference on Asphalt Pavement*s, Vol. II, 3: pp. 4-5.

Siddharthan, R.J., Yao, J., and Sebaaly, P.E. (1998) Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution, *J. Trans. Engrg.*, ASCE, Vol. 124, No. 6, pp. 557-566.

(접수일: 2006.7.12/심사일: 2006.9.2/심사완료일: 2006.9.2)