

## 차량의 이동하중을 고려한 연성포장의 수치해석 기법 연구

### A Study on Numerical Analysis of Flexible Pavements under Moving Vehicular Loads

박 석 순\* · 김 낙 석†

Park, Seoksoon · Kim, Nakseok

**Abstract** The important elements in pavement design criteria are the stress and strain distributions. To obtain reasonable stress and strain distribution, tire contact area and tire pressures are very important. This study presents a viscoelastic characterization of flexible pavement subjected to moving loads. 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 numerical analysis. A 3-dimension finite element model was used to simulate each test section and a step loading approximation has been adopted to analyze the effect of a moving vehicle on pavement behaviors. For viscoelastic analysis, relaxation moduli,  $E(t)$ , of asphalt mixtures were obtained from laboratory test. 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 longitudinal strain, and strain reduction was more significant in lateral direction.

**Keywords** Dynamic Load, Isotropic, Viscoelastic, Numerical Analysis, Step Loading

**요 지** 포장 설계기준에서 중요한 요인은 응력과 변형률 분포도이다. 합리적인 응력과 변형률 분포도를 달성하기 위한 차량타이어의 접촉면적과 공기압은 매우중요하다. 본 연구에서는 이동하중 하에서 연성포장의 점탄성 특성에 관한 내용을 다루고 있으며 현장 측정시험을 통하여 실제 도로의 중횡변형률을 수치해석 결과와 비교분석 하였다. 포장거동에 대한 차량이동하중의 영향을 적절히 모사하기 위하여 단계하중을 이용한 3차원 유한요소 해석이 수행되었다. 점탄성 해석을 위하여 아스팔트 혼합물의 이완계수,  $E(t)$ , 가 실험실에서 제작된 시료의 실험으로부터 측정되었다. 현장조사 결과에 의하면, 중횡변형률은 서로 상이한 값을 보였으며 전반적으로 변형률의 크기는 차량의 속도가 증가함에 따라 감소함을 보였다. 전반적으로 횡방향 변형률은 종방향 변형률에 비하여 작은값을 보였으며 그 차이는 횡방향에서 더욱 두드러진 경향을 보였다.

**핵 심 어** 동하중, 이방성, 점탄성, 수치해석, 단계하중

† 교신저자 : 정희원, 경기대학교 토목공학과 교수  
E-mail : nskim1@kyonggi.ac.kr  
TEL : (031)249-9710 FAX : (031)244-6300  
\* 정희원, (주)청수엔지니어링대표 공학박사

## 1. 서론

아스팔트 콘크리트 포장 설계에서 사용되고 있는 설계인자인 응력과 변형률은 차량 하중에 의해 발생하며 설계수명 산정뿐만 아니라 아스팔트 콘크리트 포장의 피로균열과 소성변형 등의 파손 수준과 포장의 잔류수명을 예측하는데 사용된다. 설계수명이 나 잔류수명을 예측하기위한 응력과 변형률은 차량의 타이어와 포장 표면사이에 발생하며, 일반적으로 차량하중은 이동속도를 고려하지 않는 정적하중으로 가정하여 수치해석을 수행한다(Westergaard, 1925; Huang, 2004). 이때 아스팔트 콘크리트 포장재료는 균질하며, 모든 층은 등방성 재료로 가정한 다층 탄성해석기법을 사용하고 있다(Yorder et al., 1975).

그러나 실제 공용상태의 차량 하중은 속도를 가지고 이동하는 동적 상태이기 때문에 하중에 대한 가정의 차이는 실제 차량에 의한 포장 거동과 수치해석 결과의 차이를 발생시키게 된다. 국외의 경우 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 1970년대 초반부터 포장 설계에 사용되는 차량 하중을 현실화하기 위한 연구가 수행되고 있지만(Myers et al., 1999; Sebaaly et al., 1989) 현장에서 발생하는 포장의 실제 거동에 대한 연구는 아직도 부족한 상태이며, 국내의 경우 차량하중에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 한국도로공사 시험도로의 아스팔트 콘크리트 포장 구간(A5 단면과 A8 단면)에 대하여 동적하중 재하시험을 수행하여 차량의 이동하중이 아스팔트 콘크리트 포장의 거동에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 그리고 이러한 이동 하중을 현실성 있게 모사할 수 있는 수치해석 기법으로 단계하중을 적용하여 실제거동과 수치해석 결과의 차이를 비교 검토하고자 한다. 이때 차량의 이동 하중은 아스팔트 콘크리트 포장 재료의 점탄성 재료 특성과 맞물려 수치해석 결과의 차이를 발생시킬 수 있기 때문에 아스팔트 콘크리트 포장 재료의 점탄성영역에 대해서 수치해석을 수행해야 차량의 이동 효과를 정확하게 예측할 수 있다. 따라서 수치해석은 탄성해석이 아닌 점탄성 해석을 수행한 준정적해석을 수행하고자 한다.

## 2. 현장 정보

### 2.1 현장 시험 위치

아스팔트 콘크리트 포장에서 차량의 이동하중이 포장 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 동적하중 재하시험을 수행하고자 한다. 동적하중 재하시험 대상 도로는 현장의 접근성과 안전성을 고려하여 한국도로공사 시험도로를 선택하였다. 한국도로공사에서 운영 중인 시험도로는 Fig. 1과 같이 중부 내륙고속도로로 여주 JCT 하행선 방향에 위치하고 있으며 총 연장 7.7km, 2차로로 구성되어 있고 15개의 단면으로 구성 되어 있다. 시험도로포장의 표층 두께는 5cm로 고정하여 시공 되었으며 기층 두께 및 재료, 보조기층 두께를 달리하여 시공되었다.

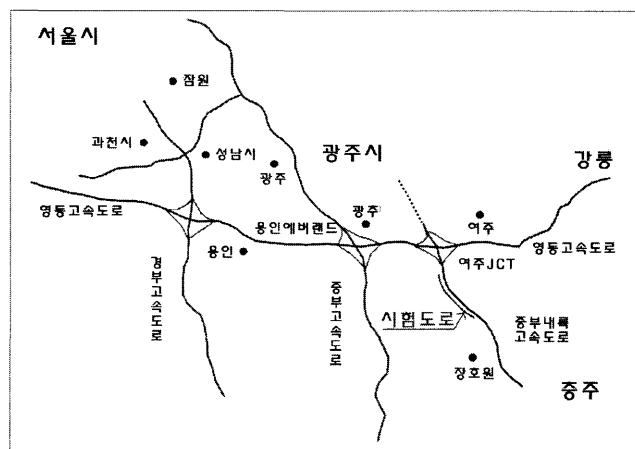


Fig. 1. 한국도로공사 시험도로 위치

1) 현장 계측시스템

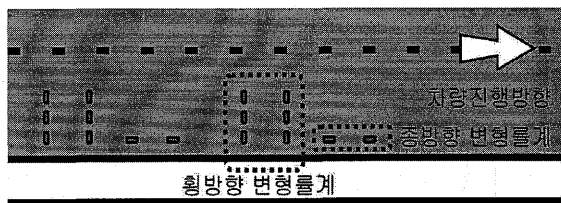
본 연구에서 차량의 동적하중 재하시험은 시험도로 15개 단면 중 A5 단면과 A8의 단면에서 수행코자 한다. A5 단면과 A8 단면에 사용된 층간 재료는 모두 동일하며 Table 1과 같이 기층 두께를 변수로 사용한 단면이다. 그리고 A5 단면과 A8 단면에서 이동하중에 따른 포장의 거동을 측정하기 위하여 설치된 계측기는 Table 1과 Table 2와 같다. 각 계측기의 배치는 Fig. 2와 같이 표층, 중간층, 그리고 기층에 대하여 ‘L’ 형태로 변형률계가 매설되어 있으며, 차량의 진행 방향에 대하여 종방향과 횡방향으로 구분하여 변형률을 측정 할 수 있도록 되어있다. 또한 변형률계의 매설 위치는 상호 간섭으로 미치는 영향을 줄이기 위해서 깊이 방향으로 층마다 엇갈리게 설치되어 있다.

Table 1. A5 단면 및 A8 단면 특징

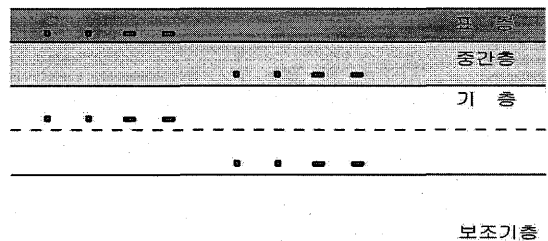
구 분	층 두께(cm)	
	A5 단면	A8 단면
표 층	5	5
중간층	7	7
기 층	18	28
보조기층	30	30
선택층	30	30

Table 2. 매설 계측기 종류 및 사양

계측기 종류	변형률계	토 압 계
모델명	KM100HAS	KDE-200KPA
측정방식	ER	ER
입출력저항	350Ω	350Ω
측정범위	± 5,000	200kPa



(a) 평면도



(b) 종단면도

Fig. 2. A5 단면 및 A8 단면의 변위계 위치

### 3. 현장의 동적하중 재하시험

#### 3.1 동적하중 재하시험 방법

차량의 이격거리와 차량의 이동속도는 피에조 센서 측정방식을 사용하였다. 피에조 센서 측정방식은 종래의 비디오 판정방식, 수계측 판정방식과는 다른 실시간 계측방식으로써, 센서와 연결된 컴퓨터에 실시간으로 주행 차량의 이격거리를 수신하고 저장되는 방식이다. 차량의 이격거리 측정 시스템은 윈터링 측정센서, 연결케이블, 데이터 로거, 휴 대용 컴퓨터로 구성되어 있으며, Fig. 3에 피에조 센서 측정 방식에 대한 개략도를 나타내었다. 피에조 센서 측정방식은 수직센서와 경사센서의 위상차로 주행하중의 위치를 추적하게 되며, 수직센서와 경사센서(45°)의 거리로 주행속도를 알 수 있는 방식이다. 피에조 센서를 포장도 위에 설치할 때 길 어깨(아래방향)쪽을 기준으로 거리를 측정하였으며 1번과 3번 센서는 속도를 2번과 4번 센서는 이격거리를 측정하는데 사용되어진다. 차량의 주행속도는 진입지점과 진출지점을 구분하여 각각 센서를 설치하여 위상차 및 지점 거리를 이용하여 진입속도, 진출속도 그리고 수행속도를 산정할 수 있다(김낙석 등, 2006).

차량의 동적하중 재하 시험을 위하여 15톤 3축 덤프트럭을 사용하였으며 덤프트럭의 타이어 접지면적과 공기압력을 살펴보았다. 타이어 접지면적의 측정은 타이어 하부에 종이를 놓고 스프레이를 사용하여 접지된 타이어의 외부 면적을 측정 하였으며, 측정 결과는 Fig. 4(a)과 같다. Fig. 4(a)를 살펴보면 타이어 접지 형상은 4개의 트레드를 가지고 지그재그 모양을 나타내고 있다. 하지만 수치해석에서는 트레드 홈을 직선화하여 Fig. 4(b)와 같이 타이어 접지면적을 단순화하였으며, 각 트레드의 접지압력은 축하중 측정을 통하여 얻어진 접지압력을 사용하였다. 그리고 시험 차량의 목표 운행 속도는 50km/h와 80km/h로 하였다.

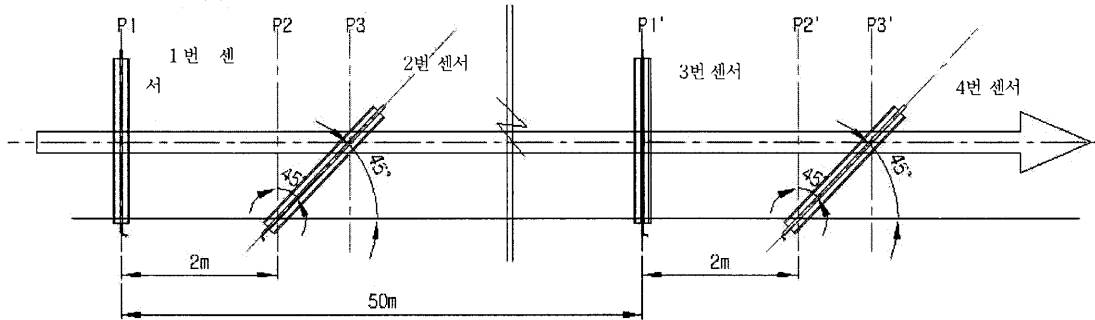


Fig. 3. 피에조 센서 측정 방식 개략도

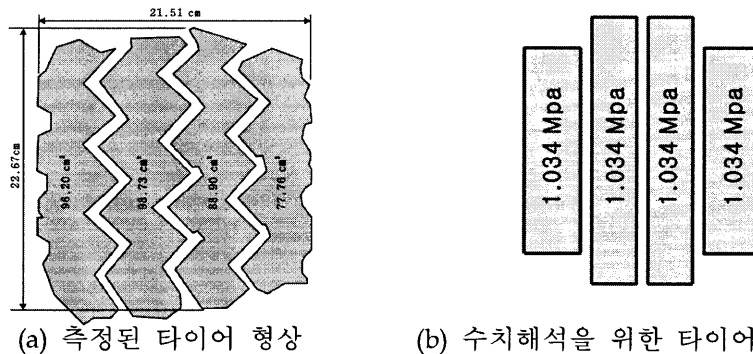


Fig. 4. 시험차량의 타이어 형상 및 접지압력 가정

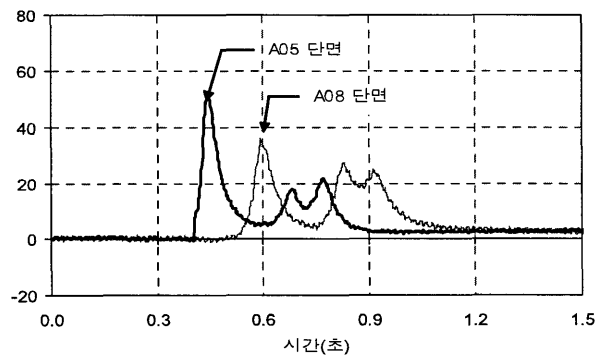
### 3.2 시험 결과 및 분석

#### 1) 수평방향 변형률의 이방성

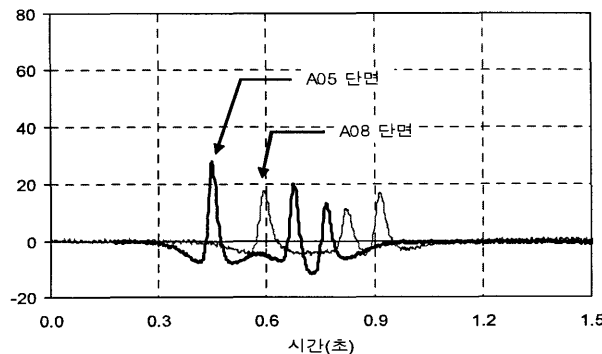
동적하중 재하시험으로부터 얻어진 현장 거동을 Fig. 5에 시간이력에 대한 수평변형률로 나타내었으며, 이때 수평변형률은 차량이 변형률로 접근함에 따른 이방성(방향성)을 확인하기 위하여 횡방향 변형률과 종방향 변형률로 구분하였다. 여기서 횡방향 변형률은 차량 진행방향에 대하여 직각 방향을 의미하며, 종방향 변형률은 차량의 진행 방향을 의미한다. 각 변형률의 측정 위치는 Fig. 1의 아스팔트 콘크리트 층 하부(기층 하부) 변위계로부터 측정된 것으로 A5 단면은 표층 표면으로부터 27cm 위치이고, A8 단면은 표층 표면으로부터 37cm 위치에서 측정되었다.

시간 변화에 따른 수평방향 변형률을 나타낸 Fig. 5를 살펴보면 차량이 각 단면의 변형률계로 접근함에 따라 수평변형률의 횡방향과 종방향(이방성)에 따라서 확연히 다른 거동을 보여주는 것을 알 수 있다. Fig. 5(a)는 차량의 진행에 따라 발생하는 횡방향 변형률을 나타낸 것으로 차량이 변형률계로 접근하면서 변형률의 크기가 점진적으로 증가하다 최대인장변형률이 발생한 이후 점진적으로 감소하는 형태를 보여주고 있다. 그러나 종방향 변형률을 나타낸 Fig. 5(b)의 경우 차량이 변형률계로 접근함에 따라 압축변형률이 발생한 후 점진적으로 최대인장변형률이 발생하고, 차량이 변형률계로부터 멀어지면서 다시 압축변형률이 발생하는 형태를 보여주고 있다.

이러한 변형률의 이방성은 차량이 변형률계의 상부를 통과한 후 횡방향 변형률이나 종방향 변형률 모두 잔류 변형률의 영향으로 1축의 영향이 2축 및 3축으로 전달되지만 횡방향 변형률의 경우는 인장 변형률이 전달되며, 종방향 변형률의 경우는 압축변형률이 전달되는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5을 살펴보면 수평변형률의 이방성은 1축 하중에 의한 최대 변형률의 크기에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 아스팔트 콘크리트 포장의 설계나 설계기준을 개발할 경우 차축의 위치와 변형률을 정확하게 고려하기 위해서는 수평방향 변형률의 이방성도 함께 고려되어야 할 것으로 사료된다.



(a) 횡방향 변형률



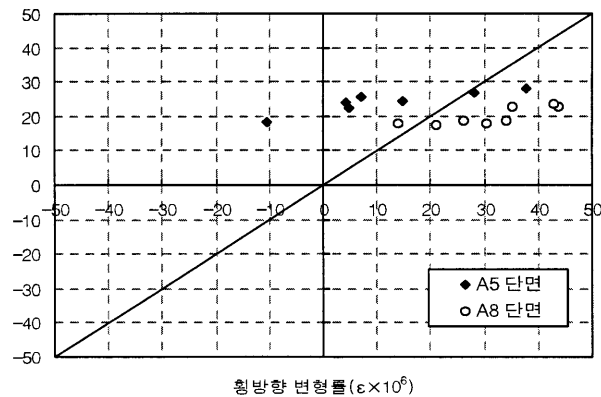
(b) 종방향 변형률

Fig. 5. 이동하중에 따른 현장 거동(50km/hr)

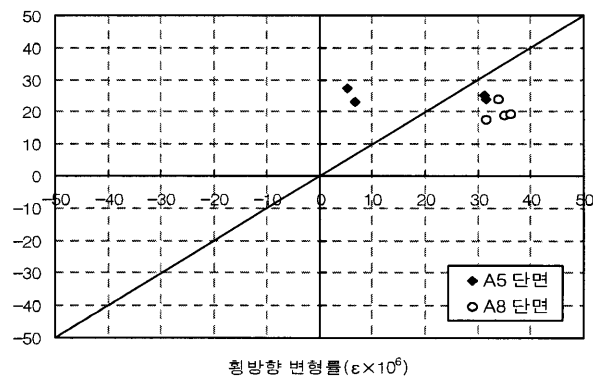
2) 수평방향 변형률의 최대 크기와 이방성

동적하중 재하시험결과로부터 아스팔트 콘크리트 층 하부에서 발생하는 수평변형률의 이방성(방향성)을 전 절의 Fig. 5로부터 확인할 수 있었으며, 본 절에서는 수평방향 변형률의 이방성을 보다 명확하게 확인하기 위하여 Fig. 6에 시간과 이격거리의 영향을 제거하고 차량의 목표 운행속도별로 횡방향 변형률에 대한 종방향 변형률의 그래프를 나타내었다. 횡방향 변형률에 대한 종방향 변형률의 크기 비를 나타낸 Fig. 6를 살펴보면 A5 단면의 변형률이 전반적으로 A8 단면보다 큰 것을 알 수 있으며, 이러한 크기 차이는 A8 단면 두께가 A5 단면보다 두껍기 때문이다. 그러나 A5 단면과 A8 단면의 두께 영향을 제외하고 Fig. 6을 살펴보면 두 단면 모두 횡방향 변형률에 대한 종방향 변형률이 수평축과 거의 평행한 것을 알 수 있으며, 이러한 경향으로부터 수평방향 변형률의 이방성에 따른 크기 비가 일정하지 않고 횡방향 변형률의 크기에 대하여 변화한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 보여주고 있는 종방향 변형률과 횡방향 변형률의 비가 일정하지 않고 차이를 보여주는 원인을 분석하기 위하여 Fig. 7에 수평방향 변형률을 횡방향 변형률과 종방향 변형률로 구분하고 이격거리에 대하여 나타내었다. Fig. 7을 살펴보면 변형률계와 차량 하중의 이격거리가 커질수록 변형률의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 변형률의 감소폭은 수평변형률의 이방성에 따라서 서로 다른 것으로 나타났으며, 타이어의 중심축으로부터 이격거리가 발생함에 따라서 횡방향 변형률의 감소폭이 종방향 변형률보다 큰 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 7과 같이 이격거리에 따른 횡방향 변형률과 종방향 변형률의 크기 변화량의 차이가 Fig. 7의 횡방향과 종방향 크기 비의 변화율이 없는 형태로 나타난 것으로 사료된다.

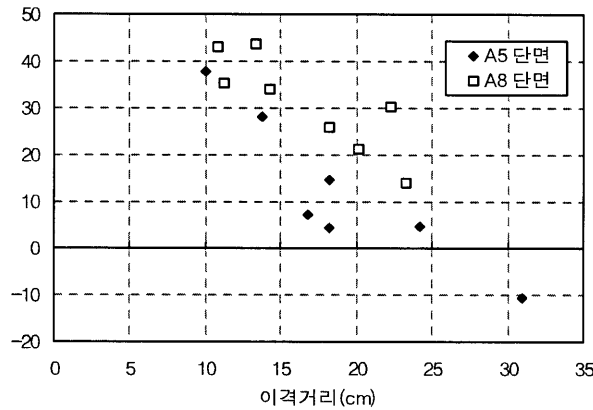


(a) 50km/hr

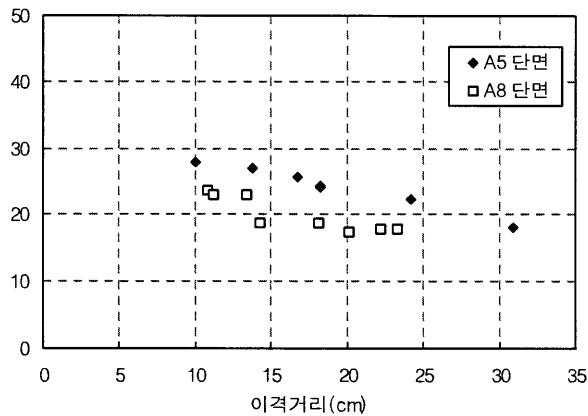


(b) 80km/hr

Fig. 6. 수평방향 변형률의 최대 크기와 이방성



(a) 횡방향 변형률



(b) 종방향 변형률

Fig. 7. 변형률 vs. 이격거리 그래프(50km/h)

## 4. 수치해석

### 4.1 동적하중함수를 적용한 수치해석

#### 1) 축대칭과 정적하중을 적용한 수치해석방법 검토

전통적으로 아스팔트 콘크리트 포장에 대한 피로수명을 예측할 때 아스팔트 콘크리트 층 하부에서 발생하는 인장변형률을 사용하게 되며, 인장변형률은 정적하중과 탄성재료특성을 적용한 2차원 수치해석인 축대칭(axisymmetric)을 사용하여 얻어진다. 그러나 축대칭을 적용한 2차원 수치해석방법은 본 연구의 동적하중 재하시험에서 얻어진 수평변형률의 이방성을 고려할 수 없다. 또한 3차원 수치해석을 사용하더라도 정적해석을 적용할 경우 차량의 동적효과를 고려하지 않기 때문에 본 연구의 현장 거동에서 보여준 이동 하중의 접근성을 고려하지 않기 때문에 수평 방향의 이방성을 정확하게 묘사할 수 없을 것으로 사료된다.

따라서 아스팔트 콘크리트 포장 파손 중 최근 관심 대상인 상부에서 균열이 발생해서 하부로 전이되는 피로 균열의 정확한 메카니즘 분석이나 피로수명을 정확하게 예측하기 위해서는 본 연구의 현장 거동에서 보여준 수평방향 변형률의 이방성도 고려되어야 하며, 수평방향 변형률의 이방성을 정확하게 고려하기 위해서는 아스팔트 콘크리트 포장의 응력과 변형률을 산정할 때 3차원 정적하중에 대한 수치해석만으로는 부족하며, 동적하중에 대한 아스팔트 포장의 거동 특성이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

2) 동적하중 함수

전 절에서 아스팔트 콘크리트 포장에 대한 동적하중 재하시험 결과 횡방향 변형률과 종방향 변형률의 차이(이방성)를 나타내었으며, 차량 속도의 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 본 절에서는 아스팔트 콘크리트 포장에 대하여 차량의 이동하중을 고려한 수치해석을 수행코자 한다. 차량의 이동하중에 대하여 Papagiannakis et al.(1996)은 차량의 동적하중 특성을 Fig. 8과 같이 한 점에 대하여 사인과 모양으로 작용하는 동적하중 함수를 식 (1)과 같이 제안하였다. 이때 식 (1)에서 주기  $d$ 는 식 (2)를 사용하여 구할 수 있다.

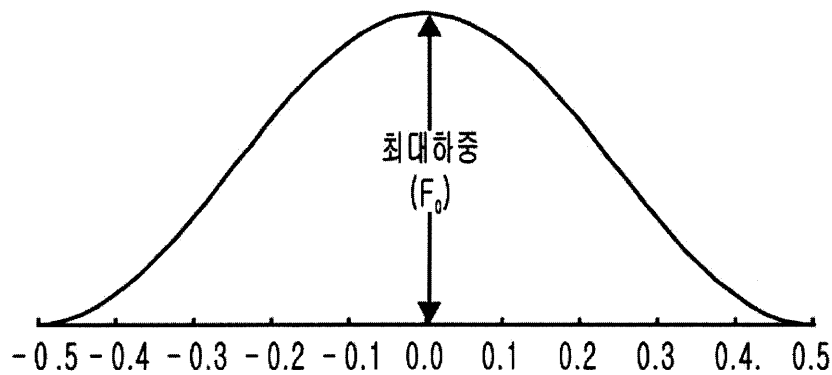


Fig. 8. 시간의 함수로 표현된 차량 하중

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

$$d = 12 \times \frac{\text{radian}}{\text{차량의속도}} \tag{2}$$

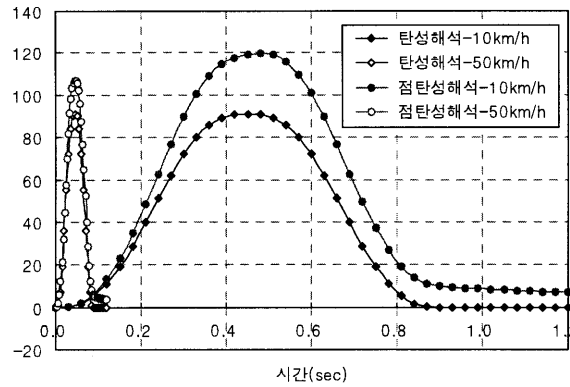
3) 동적하중 함수의 수치해석 결과

차량의 이동하중이 아스팔트 포장의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 동적하중 함수를 사용하여 A5 단면의 아스팔트 기층 하부에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 8은 아스팔트 콘크리트 포장 재료의 탄성과 점탄성 특성 그리고 해석 결과를 횡방향과 종방향 변형률로 구분하여 나타낸 것이며, Fig. 9.에서 점탄성 해석은 Table 3.과 같이 서영국 등(2006) 시험도로 아스팔트 콘크리트 재료의 점탄성 물성치로부터 얻어진 relaxation modulus prony series를 사용하였다. Fig. 9를 살펴보면 탄성해석 결과가 점성해석보다 작은 변형률을 나타내었다.

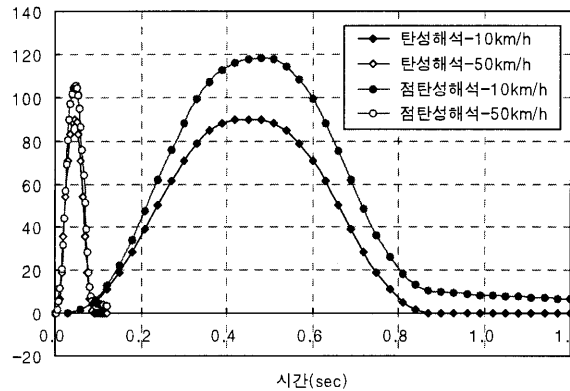


Table 3. 아스팔트 콘크리트 포장의 relaxation modulus prony eries

Relaxation Time	ASTM	BB1	BB3	BB5
2.00E+16	24	3	43	20
2.00E+15	21	4	33	18
2.00E+14	52	11	81	44
2.00E+13	106	25	160	92
2.00E+12	229	61	327	198
2.00E+11	487	148	667	421
2.00E+10	1,039	358	1,366	901
2.00E+09	2,223	868	2,820	1,937
2.00E+08	4,800	2,114	5,912	4,211
2.00E+07	10,549	5,204	12,772	9,356
2.00E+06	24,025	13,142	29,171	21,726
2.00E+05	58,461	35,112	73,131	54,731
2.00E+04	158,336	104,934	208,563	156,849
2.00E+03	485,750	372,169	662,988	519,301
2.00E+02	1,530,821	1,461,573	2,006,005	1,741,661
2.00E+01	3,712,894	3,971,125	4,261,995	4,400,462
2.00E+00	4,796,417	5,009,645	5,298,626	5,728,214
2.00E-01	5,258,801	4,954,805	5,397,872	5,881,753
2.00E-02	4,376,895	3,596,185	4,296,794	5,636,864
2.00E-03	3,123,855	2,246,248	2,983,849	3,006,029
2.00E-04	2,014,815	1,281,398	1,897,106	1,813,689
2.00E-05	1,227,471	699,100	1,147,922	1,041,308
2.00E-06	722,954	372,040	674,549	581,248
2.00E-07	417,830	195,571	389,934	319,645
2.00E-08	238,869	102,119	223,284	174,334
2.00E-09	135,730	53,145	127,180	94,664
2.00E-10	76,857	27,606	72,220	51,279
2.00E-11	43,436	14,329	40,941	27,742
2.00E-12	24,520	7,433	23,187	14,998
2.00E-13	13,834	3,855	13,124	8,105
2.00E-14	7,802	1,999	7,427	4,379
2.00E-15	4,396	1,036	4,199	2,364
2.00E-16	2,551	552	2,445	1,313
E $\infty$	114,182	99,721	76,863	83,116



(a) 횡방향 변형률



(b) 종방향 변형률

Fig. 9. 동적하중함수의 거동 특성

또한 Fig. 9의 (a)의 횡방향 변형률은 시험도로 현장의 거동 특성을 유사하게 모사하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 9의 (b)의 종방향 변형률은 시험도로의 거동 특성(Fig. 5 (b))과 달리 차량의 이동에 따라 진입과 진출로 인하여 나타나는 압축변형률 거동특성을 나타내지 못 하였다. 이러한 수치해석결과의 차이는 차량의 이동하중을 고려하기 위하여 식 (1)과 같은 동적하중 함수를 사용하였지만 식 (1)은 한 지점에 대해 시간의 변화에 따라 하중의 크기가 변화하기 때문에 동적하중 함수는 차량의 속도의 영향과 아스팔트 콘크리트 재료의 영구 변형 및 지연되는 회복량을 모사할 수는 있지만 차량의 진입과 진출효과를 고려할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 차량의 이동에 따른 아스팔트 포장의 거동 특성을 보다 정확하게 모사할 수 있는 방안에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

#### 4.2 단계하중을 적용한 수치해석

##### 1) 단계하중

임의의 속도를 가진 타이어가 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 단계하중(step-loading) 형태를 사용하고자 한다. 단계하중은 Fig. 9와 같은 사다리꼴 형태의 하중에 대한 누적 효과를 고려하는 방법으로 Fig. 10과 같이 차량의 진행방향으로 하중이 처음 재하 된 요소에서 다음 요소로 이동하게 되며, 마지막 요소에 하중이 도달하게 되면 한 번의 차량 이동이 끝나게 된다. 이때 사다리꼴 형태의 하중은 Fig. 11의 4번 요소에 대해서 사다리꼴 형태의 하중이 재하 되며, 차량이

접근하는 4번 요소의 경우 시간이 T1에서 T2로 흐름에 따라 하중의 크기가 P=0에서 P<sub>max</sub>로 변하게 되며, 동시에 하중이 지나가는 2번 요소의 경우 P<sub>max</sub>에서 P = 0으로 하중이 제거되는 형태가 된다. 그리고 3번 요소의 경우 타이어 접지면적 안에 포함될 때까지 P<sub>max</sub>를 유지하게 된다. (Yoo et al., 2006)

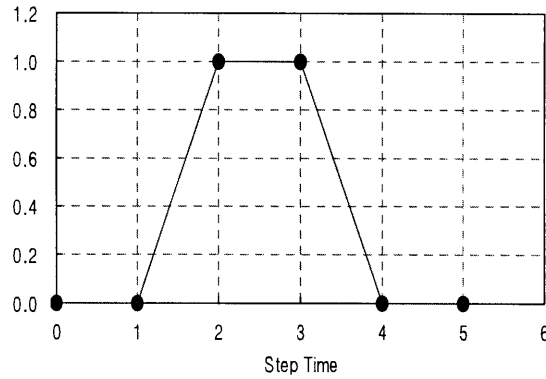


Fig. 10. 하중재하 형태(Yoo et al., 2006)

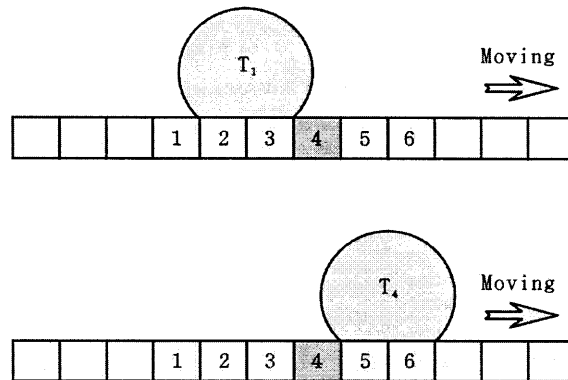


Fig. 11. 차량의 이동 모사

2) 수치해석 모델

차량의 이동을 고려하기 위하여 수치해석 모델의 크기는 Fig. 11과 같이 5.0m의 차량진행방향 길이와 2.5m의 폭, 2.0m의 수직방향 크기의 모델을 사용하였다. 또한 요소의 크기는 동적하중이 재하 되는 부분의 요소는 1cm를 적용하였으며, 이 후에는 4cm, 10cm, 30cm의 요소크기를 중요도에 따라서 각각 적용하였다.

3) 단계하중 모델의 수치해석 결과

Fig. 12는 단계하중 모델을 사용하여 수치해석을 통하여 아스팔트 포장의 거동특성을 나타낸 것이다. Fig. 13(a)를 살펴보면 횡방향 변형률은 단계하중을 사용한 경우 동적하중 함수를 사용한 경우보다 시험도로 현장의 거동을 정확하게 모사하는 것을 알 수 있다. 하지만 탄성해석의 경우 아스팔트 포장의 영구변형이나 회복이 지연되는 부분을 정확하게 모사하지 못한다는 것을 알 수 있다. Fig. 13(b)의 종방향 변형율은 단계하중 모델을 사용함으로써 차량의 진입과 진출의 영향으로 인한 압축변형률의 거동 특성(Fig. 5(b))을 모사 할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 계측결과와 해석결과에 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 아스팔트 포장의 차량의 거동 특성 분석을 위한 수치해석시 차량의 동적하중을 고려해야 하며 현실적 거동특성을

나타내기 위해서는 차량의 동적하중을 단계하중으로 표현함으로써 현실적 아스팔트 포장의 거동 특성을 분석 할 수 있을 것으로 판단된다.

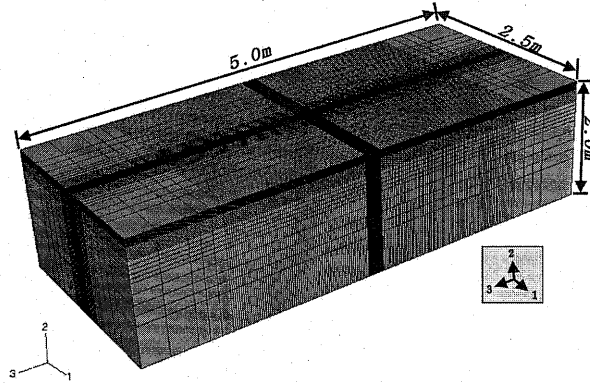
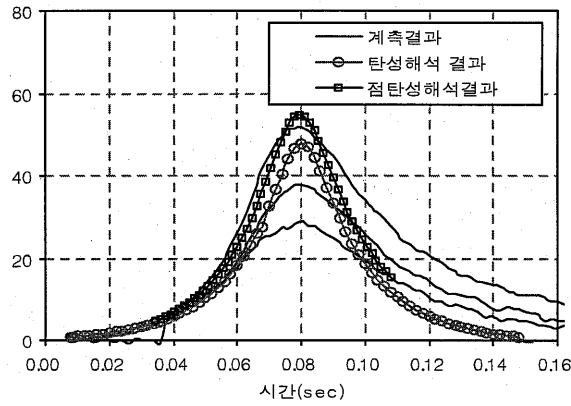
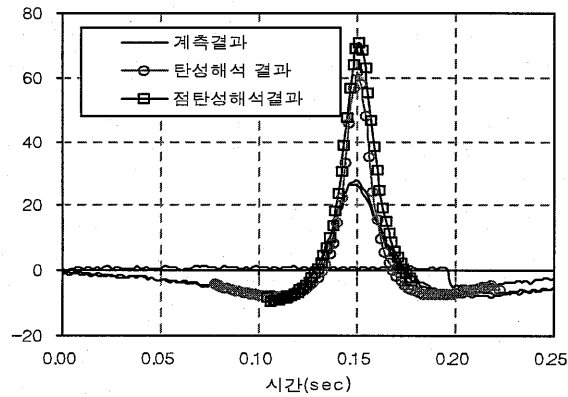


Fig. 12. 동적하중을 고려한 모델



(a) 횡방향 변형률



(b) 종방향 변형률

Fig. 13. 단계하중에 의한 거동 특성

## 5. 결론

본 연구에서는 차량의 이동특성이 아스팔트 포장의 거동특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 시험도로에서 현장계측을 하였다. 또한 아스팔트 포장의 거동 특성을 현실화 할 수 있는 수치해석 방안을 살펴보았다.

(1) 시험도로의 A05단면과 A08단면에 대한 동적하중 재하시험 결과 차량이 접근함에 따라 횡방향 변형률과 종방향 변형률의 거동특성이 상이하게 나타났다. 횡방향 변형률은 차량이 접근함에 따라 최대 인장 변형률을 나타낸 후 점진적으로 감소하였으며, 종방향 변형률은 압축변형률이 발생한 후 최대 인장변형률은 나타내었으며, 차량이 멀어질수록 압축변형률을 나타내었다.

(2) 차량의 동적하중에 의한 영향으로 나타난 아스팔트 포장의 이방성을 현실화 할 수 있는 수치해석 방안으로 동적하중 함수와 단계하중을 고려한 A05단면의 수치해석을 통하여 거동특성을 살펴보았다. 동적하중 함수를 사용한 수치해석 결과는 횡방향 변형률은 시험도로의 거동특성을 유사하게 나타내었다. 그러나 종방향 변형률의 거동특성은 차량의 진입과 진출로 인한 압축변형률의 거동특성을 나타내지는 못하였다.

(3) 단계하중을 고려한 수치해석은 시험도로의 횡방향 변형률과 유사한 거동특성을 나타내었으며, 특히 종방향 변형률의 압축 변형률 거동특성을 나타내었다. 따라서 아스팔트 포장의 거동특성에 대한 현실적 이해를 위해서는 차량의 동적하중을 고려한 수치해석 방법을 사용해야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] Huang, Y.H. (2004). Pavement Analysis and Design. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [2] Myers, L.A., Roque, R., Ruth, B.E., Drakos, C. (1999). Measurement of Contact Stresses for Different Truck Types to Evaluate Their Influence on Near-Surface Cracking and Rutting. Transportation Research Record 1655, Transportation Research Board(TRB), National Research Council, Washington D.C., USA.
- [3] Papagiannakis, A.T., Amoah, N., Taha, A. (1996). "Formulation for visco-elastic response of pavements under moving dynamic loads." Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol.122, No.2, pp.140-145.
- [4] Sebaaly, P.E, Tabatabaee, N. (1989). Effects of Tire Pressure and Type on Response of Flexible Pavement. Transportation Research Record 1227, Transportation Research Board(TRB), National Research Council, Washington D.C., USA.
- [5] Westergaard, H.M. (1925). "Stresses in concrete pavement computed by theoretical analysis." Public Roads, Vol.7, pp.25-35.
- [6] Yoo, P.J, Al-Qadi, I.L., Elseifi, M.A., Janajreh, I. (2006). "Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface condition and lateral shear forces." International Journal of Pavement Engineering, Vol.7, No.1, pp.73-86.
- [7] Yorder, E.J., Witczak, M.W. (1975). Principles of Pavement Design. Secondary Edition, Wiley, New York.
- [8] 김낙석, 정진훈, 이재훈, 박창우 (2006). "원더링 장비 적용을 통한 아스팔트 포장 거동 특성 연구." 대한토목학회논문집, Vol.26 No.1D, pp.89-94.
- [9] 서영국 (2006). 시험도로 아스팔트 포장의 장기공용수명 예측을 위한 점탄소성 유한요소모델의 개발. 한국도로공사 도로교통기술원.

- ▶ 논문접수일 : 2011년 07월 13일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 07월 13일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 07월 27일