KSS Spring Conference 2006 / March 24~25, 2006 / Seoul / Korea

차량 주행속도를 고려한 아스팔트 포장구조체의 해석시스템 구축
Development of Analysis System for Asphalt Pavement Structures under Various Vehicle Speeds

김수일[1], Soo-Il Kim, 서주원[2], Joo-Won Seo, 유영규[3], Young-Gyu Yoo, 최준성[4], Jun-Sung Choi

[1] 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University
[2] 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University
[3] 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University
[4] 인덕대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Induk Institute of Technology

SYNOPSIS : The purpose of this study is to propose a pavement analysis system which considers dynamic effects resulted from the various vehicle speeds. Vehicle loading effects were estimated by loading frequency and dynamic loads under various vehicle speeds. In addition, a proposed analysis model takes the non-linear temperature using a predictive model for dynamic modulus in asphalt layer and the non-linear stress in the unbound material. To examine adequacy of existing multi-layer elastic analysis of non-linear temperature in asphalt layer and non-linear stress conditions in unbound material, this study divided layers of asphalt pavement structures with 10 layers in asphalt, 2 layers in subbase and 1 layer in subgrade. In order to verify the pavement analysis system that considers various speeds, deflections of pavement calculated using ABAQUS, a three dimensional finite element program, were compared with the results of field tests under various speeds.

Key words : Asphalt pavement structures, Elastic modulus, Various speeds, Frequency, Finite element analysis

1. 서 론

차량은 주행하중변화에 따라 포장체에 가해지는 하중의 지속시간이 달라지고, 하중의 크기 역시 변화하므로, 정확한 포장구조 해석을 위해서는 차량 주행속도에 따라 달라지는 영향인자들을 파악하는 것이 중요하다. 한편 환경하중으로 인한 포장파손은 교통하중처럼 포장에 직접적으로 파손의 원인을 제공하지는 않지만 포장체의 온도 변화로 재료의 물성변화의 원인이 되므로 아스팔트포장의 경우 포장체내에서의 온도 변화와 하중주파수 변화는 탄성계수(Elastic Modulus) 변화에 크게 영향을 미칠 것이다. 따라서 주행차량의 특성을 파악하기 위하여 차량의 주행속도에 따라 포장체에 가해지는 하중의 동적특성 및 아스팔트층의 온도변화 등을 이용하여 차량의 주행속도에 따른 하중 및 하중주파수 영향과 아스팔트층 온도 및 보조기층 응력의 비선형성을 고려한 포장구조해석이 필요하다.

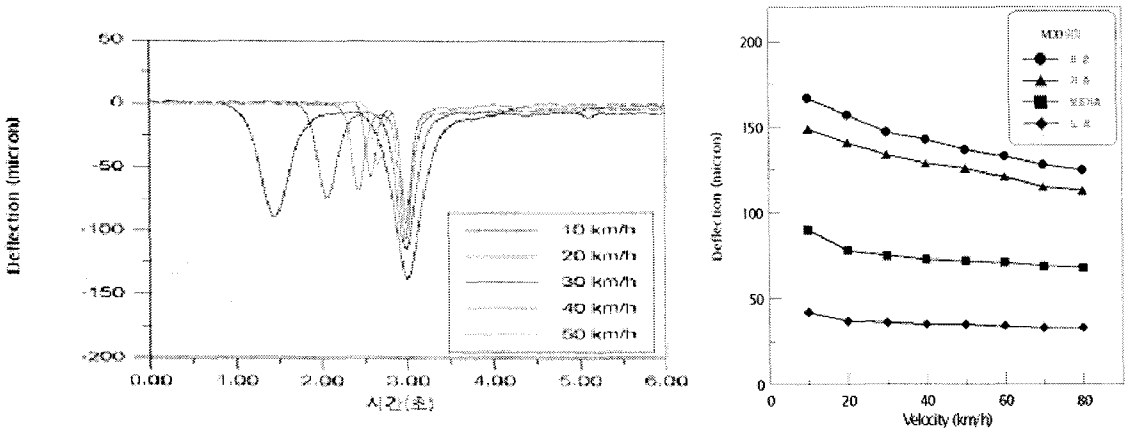
본 연구에서는 다양한 국내외 연구결과와 현장시험결과를 활용하여, 주행차량의 속도에 따른 하중지속시간의 변화 및 크기변화를 예측할 수 있는 회귀분석식을 개발하고자 한다. 개발된 회귀분석식을 이용하여 하중을 정량화하고 아스팔트층 온도 및 비구속층 응력의 비선형성을 고려한 차량주행속도에 따른 해석시스템을 구축하고자 한다.

2. 주행차량의 속도에 따른 하중영향 분석

2.1 차량의 주행속도에 따른 아스팔트 포장구조체의 거동 특성

차량의 주행속도 변화가 포장체에 미치는 영향을 연구하기 위해서는 주행하중의 동적영향을 고려하여야 한다. 동적영향의 인자는 하중의 최대크기와 주기에 달려있다. 하중의 최대크기와 주기는 주행하중의 속도에 의해 영향을 받는다. 주행하중이 포장체의 한 점에 접근함에 따라 그 점에서의 수직응력은 증가하고 주행하중의 바퀴가 그 점 위에 놓일 때 최대값에 도달하게 된다. 그 후 차량이 멀어짐에 따라 응력은 감소하게 된다.

그림 1과 그림 2는 MDD(Multi-Depth Deflectometer : 깊이별 처짐측정장비) 를 이용한 현장시험결과로서, 서울 외곽순환도로 김포구간에서의 주행차량에 따른 포장체의 처짐에 대한 속도의 영향을 보여주고 있다. 그림 1과 그림 2를 살펴보면 주행차량의 속도가 증가할 수록 포장구조체 내부거동의 응답시간과 내부처짐이 감소하는 결과를 볼 수 있다.



(a) 속도변화에 따른 MDD 처짐 (b) 속도변화에 따른 깊이별 처짐변화

그림 1. 주행차량의 속도에 따른 포장체 내부거동변화

2.2 차량속도에 따른 응답신호 분석

Amara Loulizi 등(2002)은 차량속도 변화가 아스팔트 포장체에 미치는 하중주파수의 영향을 연구하기 위해 Virginia Smart Road에서 아스팔트 시험도로 구간에 대한 시험계측을 실시하였다. 차량주행속도는 8km/h, 24km/h, 40km/h, 70km/h로 설정하였으며, 계측된 결과를 이용하여 포장 깊이별 하중주파수 영향을 분석하였다. 다양한 깊이에 매설되어 있는 토압계의 동적응력신호를 분석하여 정리한 결과, 차량주행속도에 따른 하중지속시간을 그림 3에 나타내었다. 그림 3을 살펴보면 차량 속도가 일정할 때 포장 표면으로부터 40cm 깊이 까지는 하중 지속시간이 증가하는 경향을 보이다가 40cm이하의 깊이에서는 하중지속시간의 증가폭이 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 다양한 재료와 두께를 가지는 버지니아 시험도로구간에서의 하중지속시간을 나타내었다. 이는 버지니아 시험도로 계측 결과로서, 포장재료 변화가 압축응력의 지속시간 변화에 미치는 영향이 거의 없다는 것을 보여주고 있다. 그림 5는 비파괴 도로 평가장비인 FWD를 이용하여 깊이별 압축응력의 응답시간을 계측한 결과이다. 그림 5를 살펴보면, 다양한 속도를 이용한 주행시험결과와는 달리 표면에서의 깊이변화(포장 표면으로부터 40mm, 190.5mm, 419.1mm, 596.9mm의 깊이)에 따른 FWD하중 응답시간을 Haversine 곡선과 비교한 결과, 0.03초로 거의 동일한 결과를 얻었음을 알 수 있다. 그림 4와 5를 살펴보면 FWD 충격하중은 표면으로부터 깊이방향으로 일정한 응답시간을 보임을 알 수 있으나

주행차량의 하중은 속도가 감소하거나 깊이가 증가할수록 응답시간이 증가함을 알 수 있다.

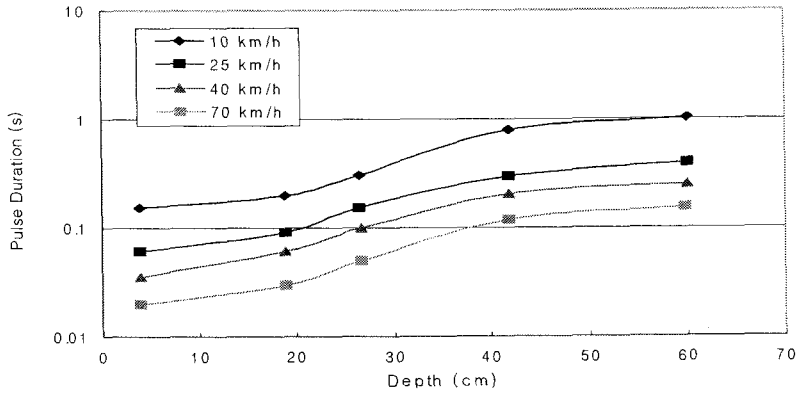
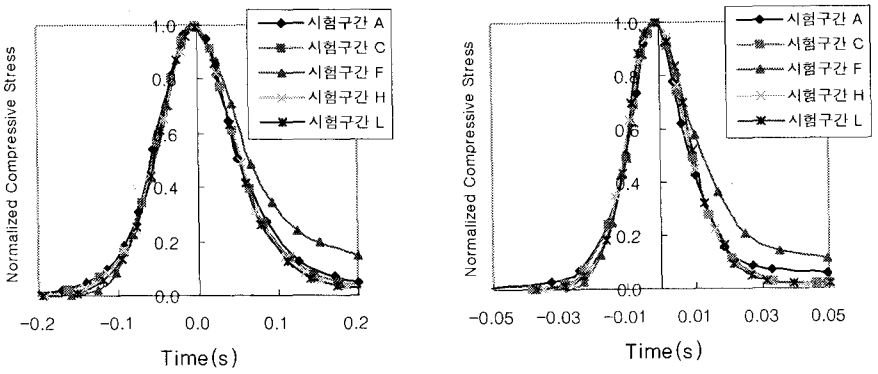


그림 3 차량 속도에 따른 깊이별 하중 지속시간



(a) 차량주행속도 8km/h일 경우 (b) 차량주행속도 40km/h일 경우

그림 4 아스팔트 포장체의 재료 변화에 따른 하중지속시간의 영향

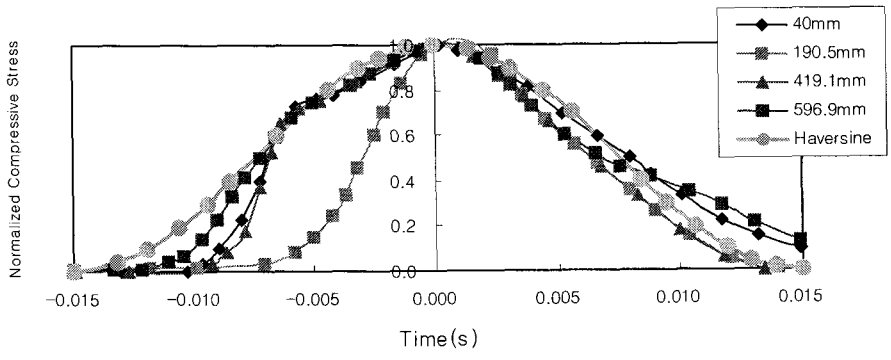


그림 5 FWD하중에 의한 깊이별 하중지속시간의 변화

3. 차량주행속도를 고려한 하중정량화

3.1 차량주행속도에 따른 하중주파수 산정식 제안

Amara Loulizi 등(2002)의 연구결과에 의하면 2.2절에서 전술한 바와 같이 차량속도 변화에 의한 하중주파수가 포장 깊이에 따라 변화하지만 아스팔트 포장 재료와 온도에 의한 하중주파수 변화는 거의 없다. Amara Loulizi 등(2002)은 여러 가지 시험결과를 토대로 차량속도에 따른 깊이별 하중주파수 산정식을 Bell-shaped 정규분포곡선으로 제안하였다. 또한 아스팔트층 깊이에 대하여 식 (1)~(5)와 같이 Bell-shaped 곡선이 차량속도에 따라 표준편차가 생기는 것을 관계식으로 제안하여 수정할 수 있도록 제시하였다. 식 (1)~(5)는 차량속도에 대한 Bell-shaped 곡선의 표준편차 s에 대한 관계식이며 R^2값은 모두 0.99 이상이었다. 식 (1)~(5)를 이용하여 산정한 변수 s를 Bell-shaped 곡선을 나타내는 식 (6)을 사용하여 하중지속시간 t를 산정할 수 있었다.

아스팔트 포장 표면으로부터 42 mm 깊이에서의 $s = 0.294v^{-1.0441}$ (1)
아스팔트 포장 표면으로부터 190 mm 깊이에서의 $s = 0.770v^{-1.1524}$ (2)
아스팔트 포장 표면으로부터 267 mm 깊이에서의 $s = 0.633v^{-1.0439}$ (3)
아스팔트 포장 표면으로부터 419 mm 깊이에서의 $s = 1.338v^{-1.0034}$ (4)
아스팔트 포장 표면으로부터 597 mm 깊이에서의 $s = 1.461v^{-0.9667}$ (5)

$$y(t) = e^{-t^2/s^2} \qquad (6)$$

여기서, s = Bell-shaped 곡선의 표준편차, v = 차량 속도 (km/h), t = 하중지속시간 (seconds)

본 연구에서는 주행차량 속도에 따른 하중지속시간 t를 이용하여 아스팔트 포장 표면으로부터 42mm, 190mm, 267mm, 419mm, 597mm 깊이에 해당하는 하중주파수를 산정하였다. 그림 6은 비선형 회귀분석식을 이용하여 차량속도에 따른 깊이별 하중주파수 변화를 나타내었다. 또한, 그림 6을 이용하여 회귀분석을 통해 깊이별 하중주파수 산정식 식 (7)을 제안하였고, 표 1은 식 (7)의 계수 a, b를 나타낸다.

$$Frequency(f) = ae^{bd} \qquad (7)$$

여기서, a, b = 하중주파수 함수의 영향 계수, d = 포장 표면에서의 깊이, f = 하중주파수 (Hz)

표 1 속도에 따른 해석 입력변수

속도(km/h)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
a	8.2083	17.0644	26.1878	35.4908	44.9309	53.3884	64.1274	73.425	83.6579	94.0141
b	-0.00382	-0.00383	-0.00376	-0.00394	-0.00373	-0.00369	-0.0037	-0.00375	-0.00378	-0.0038

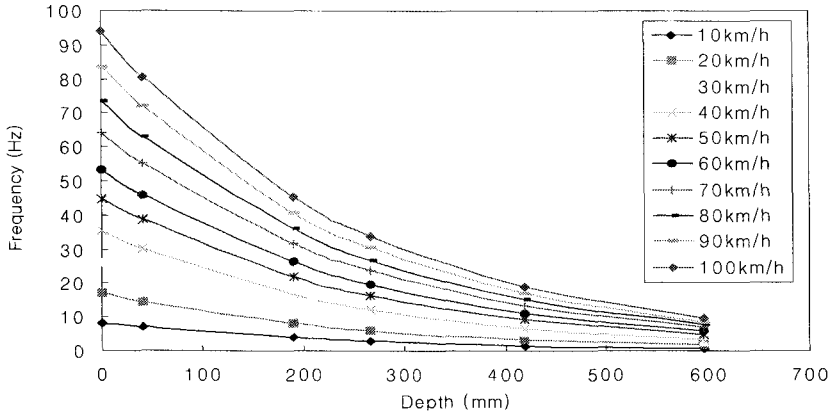


그림 6 차량 속도에 따른 깊이별 하중주파수

3.2 속도변화에 따른 주행하중의 영향계수

대부분의 아스팔트 콘크리트 포장체의 역학적 설계법에서는 포장체에 작용하는 차량속도에 따른 하중 영향을 고려하지 않은 모델에 기초하고 있다. 만일 차량주행속도에 따라 아스팔트 콘크리트 포장체에 가해지는 하중주파수 및 하중의 영향을 고려한다면, 주행차량에 의한 아스팔트 포장의 거동은 변하게 된다. 이러한 경우 차량속도에 의한 하중주파수 영향뿐만 아니라, 주행하중에 의한 깊이별 하중 영향이 작용할 경우 아스팔트 포장의 응력과 변형률이 차량속도에 따라 변화할 것이다. 따라서 이러한 문제를 검토하기 위해, 본 연구에서는 차량속도에 따른 차량하중의 포장 깊이별 영향에 대해 검토하고자 한다.

그림 7은 영국 자동차 공업협회 (SMMT: the Society of Motor Manufacturers and Traders Limited)에서 일반적인 차량 종류(32.5~44.7 tons)에 대해 아스팔트 콘크리트 시험도로에서 strain gauged load cells로 주행속도 변화에 따른 동적하중을 측정한 결과를 접지압의 형태로 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 시험도로에서 측정된 결과로부터 차량의 하중이 가장 많이 전달되는 트레일러(Trailer Axle)에 대한 측정데이터를 기준자료로 이용하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 실제 주행속도 증가에 따라 포장체에 가해지는 하중이 증가하는 경향을 볼 수 있었으며, 이로 인해 차량속도에 의한 거동이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 식 (8)은 측정된 결과를 이용하여 회귀분석을 통해 차량 속도에 따른 접지압의 관계를 나타낸 식이다.

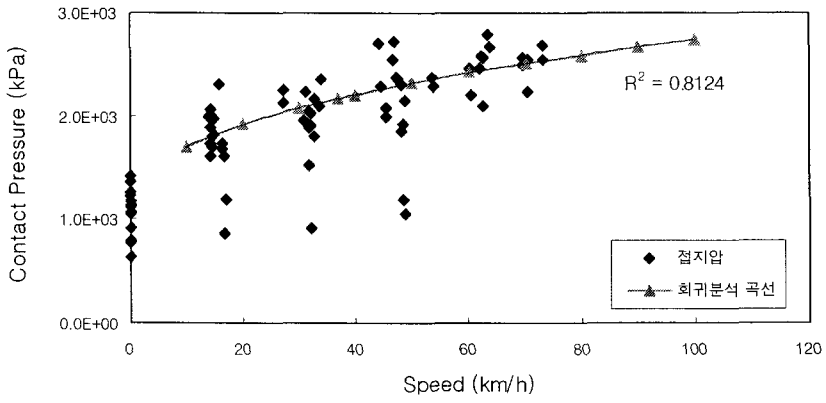


그림 7 차량속도에 따른 동적 접지압

$$y = \frac{-200148 + 43304.41v^{0.4378}}{184.2 + v^{0.4378}} \quad (8)$$

여기서, v = 차량속도 (km/h), y = 동적 하중계수

3.3 주행속도에 따른 하중 정량화

그림 8은 주행차량 속도에 따른 하중지속시간의 변화와 하중크기의 변화를 FWD 하중주파수에 해당하는 37km/h의 기준속도로 정규화 하여 도식화 한 그림이다. 주행속도변화가 포장구조체에 미치는 영향을 정량화 하기 위하여 식 (8)을 이용하여 속도에 따른 동적 하중계수를 산정하였고 식 (9)를 이용한 면적계산을 통해 기준속도에 대한 에너지 영향계수로 환산하였다. 산정된 결과들을 이용하여 차량 속도에 따른 하중과 에너지의 관계를 표 2에 나타내었다.

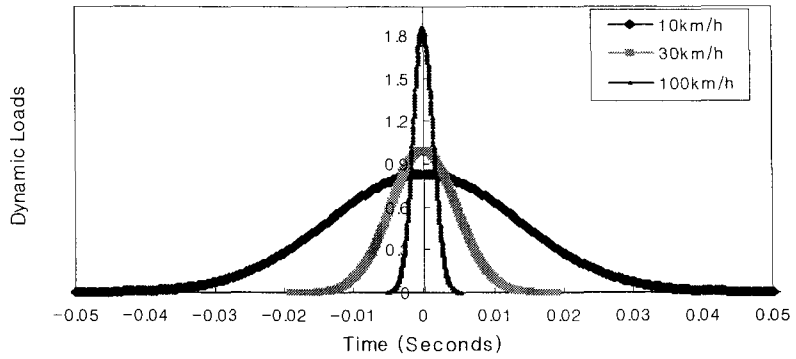


그림 8 주행차량 속도에 따른 하중-하중지속시간 곡선 (일례)

$$y(t) = \int_{-t}^{t} e^{\frac{-t^2}{s^2}} \quad (9)$$

여기서, s = bell-shaped 곡선의 표준편차, t = 하중지속시간 (sec)

표 2 차량속도에 따른 차량하중 에너지 변환계수

속 도 (km/h)	에너지 변화계수 (면적 S)	동적하중 변환계수 (하중크기 D)	차량하중 영향계수 (S×D)
10	3.81	0.79	3.00
20	1.94	0.88	1.71
30	1.29	0.96	1.23
37	1.00	1.00	1.00
40	0.97	1.02	0.99
50	0.78	1.07	0.84
60	0.59	1.11	0.65
70	0.57	1.16	0.65
80	0.49	1.19	0.58
90	0.43	1.23	0.53
100	0.39	1.26	0.49

비고 : 기준속도를 비파괴시험장비인 FWD의 하중주파수에 해당하는 37km/h로 선정하였다.

식 (10)은 표 2의 결과를 회귀분석하여 차량속도에 따른 차량하중의 영향계수를 나타낸다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 차량속도가 증가함에 따라 하중의 크기는 증가하지만, 하중지속시간이 감소함으로써 아스팔트 포장체에 미치는 영향이 감소함을 알 수 있었다. 그림 9는 주행차량 속도에 따라 아스팔트 포장체에 미치는 차량하중의 영향계수를 나타낸다.

$$y = \frac{1}{-5.7286 + 5.01v^{0.0823}} \qquad (10)$$

여기서, v = 차량속도 (km/h), y = 차량하중 영향계수

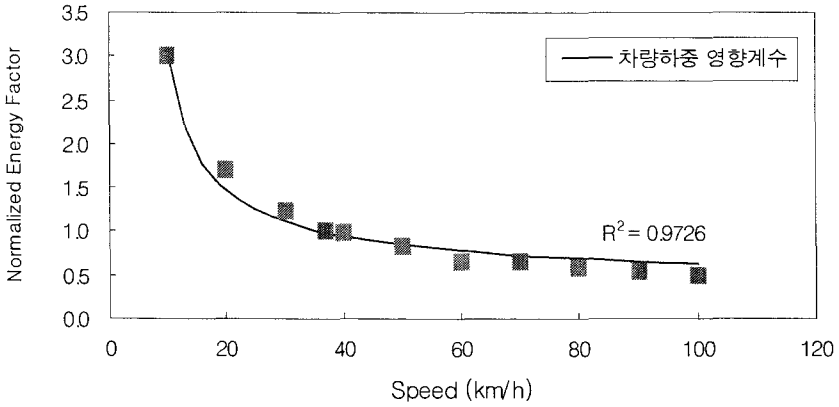


그림 9 차량속도에 따른 차량하중 영향계수

3.4 차량주행속도 영향을 고려한 해석시스템 구축

본 연구에서는 주행차량의 속도에 따른 동적영향을 정량화하기 위하여 주행차량의 속도에 따른 국내외 현장시험데이터로부터 하중의 지속시간 변화와 하중크기의 변화를 분석한 후 주행차량 속도변화에 따른 영향계수를 개발하였다. 또한 포장체 해석시스템을 구축하기 위하여 아스팔트층의 온도에 의한 비선형성 및 포장하부구조의 응력 비선형성을 고려할 수 있는 층 분할 모델링을 실시하였다. 층 분할 모델링은 아스팔트층을 최대 10층으로 분할하여 비선형성을 고려할 수 있도록 하였고, 보조기층은 2층, 노상은 하나의 층으로 해석을 실시하였다. 아스팔트층의 물성은 이관호 등(2004)이 제안한 동탄성계수 예측모델을 이용하였다(최준성, 2004). 그림 10은 차량주행속도에 따른 아스팔트 콘크리트 포장체의 거동을 분석하기 위한 해석시스템 흐름도이다.

3.5 현장 주행시험결과를 이용한 해석시스템 검증

본 연구에서 제안한 해석시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여 수도권 외곽순환 고속도로 중 김포구간에서 1998년 7월 16일 실시된 현장 주행시험의 깊이별 처짐 실측자료(이강진, 1999)를 이용하였다. 시험이 실시된 구간은 수도권 외곽순환 고속도로 중 김포시 고촌면에 위치하는 구간으로 김포대교 남쪽 하행선 구간이며, 표 3은 시험위치에 대한 포장단면 자료이다. 주행시험에 사용된 주행하중은 단축 8.2ton의 트럭이 사용되었으며, 포장내부의 처짐을 측정하기 위해 각 층의 하단부에 MDD (Multi Depth Deflectometer)를 1개씩 총 4개를 설치하였으며 설치 위치는 표면으로부터 8cm, 27cm, 58cm, 112cm이다. 현장 실측 데이터와 본 연구에서 제안된 차량주행속도를 고려한 해석시스템을 비교 검증하기 위하여 차량 주행속도에 따른 하중주파수 및 온도 영향을 고려한 동적입력물성을 사용하여 수치해석을 하였다. 표 4는 수치해석시 사용한 입력물성이다.

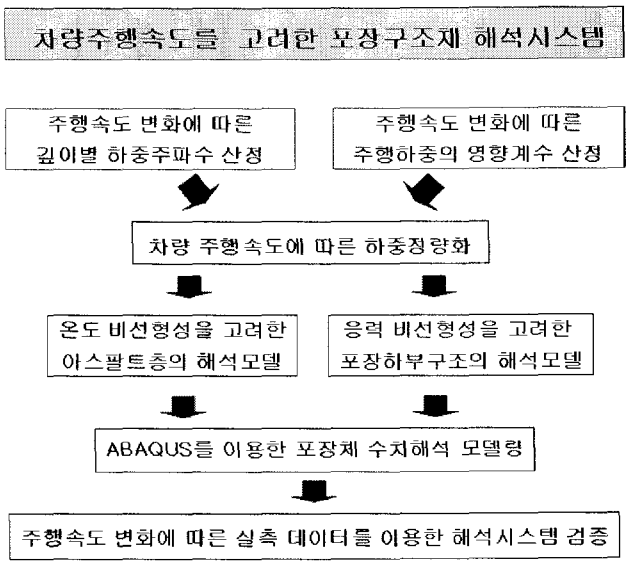


그림 10 주행차량을 고려한 아스팔트 포장체의 해석시스템 흐름도

표 3 수치해석 입력물성

층 / 물 성	표층	기층	보조기층	노상
두께(cm)	10	25	45	720
탄성계수 (kg/cm^2)	하중주파수 및 온도에 따른 탄성계수		FWD를 이용한 역산탄성계수	
포아송비	0.30	0.30	0.35	0.40
단위중량(t/m^3)	2.33	2.33	2.25	2.04

표 4 시험위치에 대한 포장단면 자료

시험위치	각 층의 두께(cm)				포장상태	비고
	H_1	H_2	H_3	H_4		
김포 신설구간	10	25	45	·	신설포장	H_1 : 표층 H_2 : 기층 H_3 : 보조기층 H_1 : 노상

본 연구의 주행차량 속도를 고려할 수 있는 포장구조 해석시스템의 검증을 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 해석결과를 실제 현장 주행차량 시험결과와 비교하였다. 이를 위하여 수치해석시 3.3절에서 전술한 주행속도에 따른 차량하중 영향계수를 사용하였고, 아스팔트층 온도 및 하부구조의 응력 비선형성을 고려할 수 있는 해석모델을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 해석된 결과를 이용하여 차량주행속도에 따른 깊이별 처짐 실측 결과와 비교하였다.

표 5와 그림 11은 1998년 8월 20일 오후 2시 FWD 시험을 실시한 후 실측된 FWD 표면처짐으로부터 역해석 프로그램 DYN-BAL에 의해 역산된 물성을 이용하여 정해석 프로그램인 SINELA로부터 해석한 깊이별 처짐과 본 연구에서 제안된 해석시스템을 이용하여 ABAQUS로 수치해석한 주행속도별 깊이별 처짐과 실측 깊이별 처짐을 비교한 결과이다. 그림 11을 살펴보면 주행차량의 속도가 10km/h일 때의 최대 상대처짐 오차가 기층에서 33.3%(89μm)정도의 차이가 발생하였으나, 본 연구의 고려 대상인 주행속도를 고려한 수치해석과 실측 데이터의 오차율이 차량속도가 증가할수록 감소하는 결과를 보이고 있다. 또한, 기존의 FWD 역산탄성계수에 의한 포장구조체 내부의 거동은 주행속도에 따라 동일한 결과를 보이나, 본 연구에서 제안한 해석시스템에 의한 내부거동은 주행속도가 증가할수록 감소하는 결과를 얻을 수 있어, 실제 현상과 유사한 거동을 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

표 5 주행속도에 따른 실측 MDD 깊이별 상대처짐

위 치		깊이별상대처짐(㎛)									
		10km/h		20km/h		30km/h		40km/h		50km/h	
		해석	실측	해석	실측	해석	실측	해석	실측	해석	실측
MDD 매설위치	No.1	356.2	267.3	195.4	186.7	139.5	150.4	118.9	142	101.2	129
	No.2	264.0	166.9	149.3	128.4	105.2	109.8	94.6	108	80.0	97.1
	No.3	129.6	90.9	77.5	73.0	58.0	65.5	54.8	656	45.5	58.4
	No.4	24.9	22	19.8	19.2	17.9	17.6	22.5	174	17.8	15.9

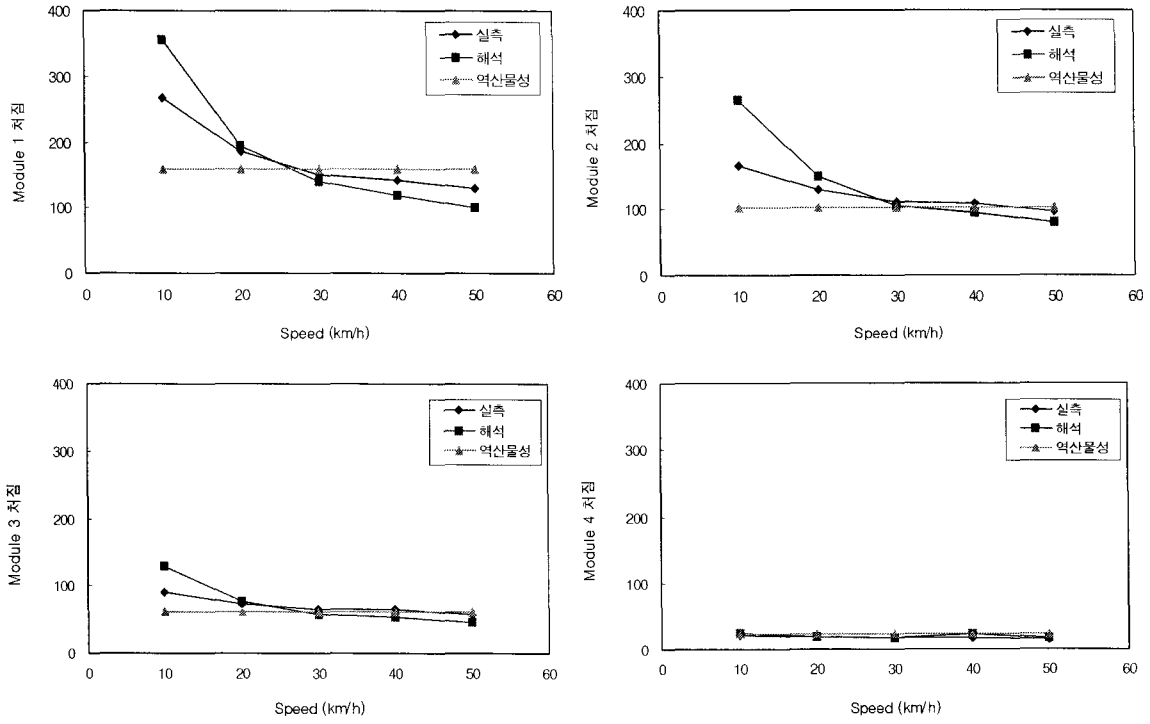


그림 11 주행속도에 따른 MDD 실측결과의 비교

4. 결 론

본 연구에서는 차량주행하중의 속도변화에 의해 유발되는 동적특성 및 AP층 온도 변화가 아스팔트 포장하부구조에 미치는 하중전달량에 대한 기본연구를 실시하였다. 이를 위해 아스팔트 표층, 기층, 보조기층, 노상으로 구성된 4층 아스팔트 콘크리트 포장체를 상용유한요소해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 모델링 하였다. ABAQUS 해석 수행시 입력물성으로 차량의 주행하중을 모사할 수 있는 동적물성, 아스팔트층 온도 및 비구속층의 응력 비선형성을 고려한 입력물성을 이용하여 해석시스템을 구축하였다. 구축된 해석시스템을 이용하여 하부구조의 정량적인 평가를 실시하고 아스팔트포장 각층의 두께 변화와 물성변화에 의한 하부구조의 거동 데이터베이스 구축 및 모델링 실험시의 응력조건을 제시하였다.

본 연구에서는 차량주행속도에 따른 하중주파수 영향을 고려하기 위하여 차량 속도에 따른 깊이별 하중주파수 결정 모델식을 제안하였고, 아스팔트층 온도의 비선형성을 고려할 수 있도록 최대 10층으로 층 분할을 실시하였다. 분할된 각층의 동적특성을 고려하기 위해 탄성계수 예측방정식을 이용하여 27

개 단면에 대한 주행 속도별 아스팔트층 탄성계수를 결정하였다. 비구속층은 응력 비선형성을 고려할 수 있도록 보조기층은 2층, 노상은 단층으로 층 분할을 실시하였고, 하부구조 각층의 탄성계수를 결정하기 위해 K-θ 모델을 이용하여 비구속층의 비선형성을 고려하였다. 따라서 비구속층의 응력 비선형성을 모사할 수 있는 탄성계수를 이용하여 해석시스템을 구축하였다.

주행차량 속도에 따른 하중지속시간을 이용하여 정규화된 응력 곡선을 에너지 영향계수로 환산하였다. 또한 변형률계를 이용한 차량주행속도별 동적 차량 접지압을 이용하여 하중 영향계수로 환산하였다. 각각의 영향인자로부터 주행속도에 따른 차량하중을 고려한 영향계수를 산정하여 ABAQUS 해석을 수행하였다. 주행차량의 속도를 고려할 수 있는 포장구조 해석시스템은 ABAQUS를 이용한 해석결과와 실제 주행차량의 실측결과를 비교하여 검증을 실시하였다. 그 결과, 기존의 FWD 역산탄성계수에 의한 포장구조체 내부의 거동은 주행속도에 따라 동일한 결과를 보이나, 본 연구에서 제안한 해석시스템에 의한 내부거동은 주행속도다 증가할수록 감소하는 결과를 얻을 수 있어, 실제 현상과 유사한 거동을 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김수일, 최준성, 이강진 (1999), "차량 주행속도에 따른 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 거동분석", 대한토목학회논문집, 제19권, 제3-6호, **대한토목학회**, pp.41-52.
2. 이관호 (2004), "아스팔트 포장재료 물성정량화", **아스팔트 포장 설계법 개발 연구 최종보고서**, G2, 건설교통부.
3. 서주원, 최준성, 김수일, 김도형, 김형배 (2001), "주행차량의 내부거동을 통한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성 추정에 관한 연구", **한국도로포장공학회 학술발표회논문집**, 한국도로포장공학회, pp. 33~38.
4. 최준성 (2004), "온도 및 응력의 비선형성을 고려한 해석방안 개발", **아스팔트 포장 설계법 개발 연구 최종보고서**, G5, 건설교통부.
5. Amara Loulizi. (2002), "Measurement of Vertical Compressive Stress Pulse in Flexible Pavement", Transportation Research Board, *TRR 1816*, TRB, Washington, D.C., pp.125-136.
6. Leonard, D. R. (1974), "Loads and Vibrations caused by Eight Commercial Vehicles with Gross Weights Exceeding 32 tons (32.5 Mg)", Transport and Road Research Laboratory, *TRRL 582*, Crowthorne, Berkshire., pp.1-12