

아스팔트 포장의 점탄성 거동 모델에 관한 연구

A Study on the Viscoelastic Model of Asphalt Concrete Pavement

조병완* · 태기호** · 노동우***

Jo, Byung Wan · Tae, Ghi Ho · Noh, Dong Woo

Abstract

Existing basic mechanical models which are methods characterizing viscoelastic materials were first reviewed to account for viscoelastic behavior of the asphalt pavement structure in this paper. A viscoelastic mechanical model considering a single load of vehicles subsequently was suggested and an equation that indicates the time-dependant behavior of asphalt pavements was derived from the proposed model. Non-destructive tests using falling weight deflectometer(FWD) were performed for a test section to estimate the application of the model. Both deflections and strains procured by the equation were compared to testing results according to loading history. By observing field measurements and theoretical evaluations, if two results are compared by the features of deflection according to time history, it could be concluded that the proposed model is expected to be suitable for prediction of the behavior of asphalt pavements because there is hardly difference between field data and calculated data.

Keywords : viscoelasticity, mechanical model, non-destructive test, deflection

요 지

본 연구에서는 아스팔트 포장의 표층을 구성하고 있는 아스팔트 혼합물의 점탄성(Viscoelasticity) 거동을 규명하기 위하여 먼저 기존의 일반적인 역학적 모델을 고찰하였으며, 차량의 단일 축 하중을 고려한 점탄성 모델식을 제안하고 그 모델에 대한 기본식을 유도하였다. 또한, 제안된 모델식의 검증에 위해서 시험구간에 대하여 비파괴시험을 실시하였으며 하중 이력에 따른 변형률과 처짐값을 산출하고 이를 제안된 모델식의 계산값과 비교분석하였다. 분석 결과, 시험값과 모델식의 결과값의 오차가 거의 없음을 알 수 있었으며, 시간에 따른 처짐의 양상만을 비교해 볼 때, 본 연구에서 제안한 모델식에 의해서 실제 하중에 의한 포장의 처짐을 예측하는 것이 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 점탄성, 역학적 모델, 비파괴 시험, 처짐값

1. 서 론

아스팔트 포장의 구조해석 기법은 크게 다층탄성이론(Multi layered theory)과 유한요소해석기법(Finite element method)으로 구분할 수 있으며, 현재까지는 1943년 Burmister에 의해 제안된 다층탄성이론(Burmister, 1943)에서 발전되어 연속체 역학을 기초로 하는 층 이론을 통한 수치해석이 구조해석의 주를 이루고 있다. 그러나 이러한 다층탄성이론은 비교적 간단하고 해석시간이 빠른 반면 포장구조체에 가해지는 하중을 정하중으로 가정하여 해석하므로 정확한 해를 얻을 수 없는 단점이 있으며, 포장구조해석을 수행하는데 있어 실제 조건들을 반영하는데 한계가 있다(건설교통부, 2002). 즉, 포장구조체에 가해지는 실제하중은 정하중이 아니라 차량의 이동에 의한 동하중이며, 포장 재료는 선형탄성거동을 하기보다는 비선형탄성, 소성, 점탄성거동 등의 시간의존성

과 응력의존성을 나타내게 된다. 특히 하중을 직접받는 표층은 아스팔트 혼합물의 점탄성 성질에 의해서 시간과 온도에 따른 거동을 나타내기 때문에 다층탄성이론으로는 정확한 결과를 얻기가 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 점탄성의 역학적 모델들을 고찰하고 새로운 모델을 제안하여 포장에 가해진 하중에 따른 아스팔트 표층의 변형률과 처짐을 구하는 것으로 아스팔트 표층에 대한 점탄성 모델의 적용을 검토하고자 하였다. 또한 모델의 검증을 위해 비파괴 시험장비인 KUAB 2m-FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용하여 서울시 아스팔트 포장구조체에서 현장시험을 실시하고, 시험의 결과값과 모델식의 계산값을 비교분석하였다.

2. 포장의 점탄성 거동

아스팔트 포장의 표층은 아스팔트 혼합물로 이루어져 있으

*정회원 · 함양대학교 토목공학과 교수(E-mail: joycon@hanmail.net)

**정회원 · 부천대학 토목과 실기실습전임강사(E-mail: civilianho@dreamwiz.com)

*** (주) 비우컨설턴트 도로부 · 공학석사

며 아스팔트 재료는 탄성과 점성의 두 가지 성질을 모두 나타내는 전형적인 점탄성체로 알려져 있다. 점탄성 물질은 점성을 가진 성분으로 인하여 시간의존성을 지니고 있기 때문에 재료에 일정한 응력이나 변형을 가하면 대응하는 변형과 응력 분포가 시간에 따라 변하며, 역학적 거동은 응력 속도 혹은 변형률 속도에 의존한다. 또한 아스팔트 혼합물은 그 성분에 수많은 고분자물질을 포함하고 있기 때문에 온도의존성을 가진다. 즉, 저온에서 고체영역에 대해서는 탄성거동을 나타내고 점차 고온이 됨에 따라 탄성률이 저하하고 유동적으로 되며 점성거동을 보인다(한국도로공사, 1995). 따라서, 아스팔트 포장층을 분석하는 데에 점탄성 이론을 적용시키는 것은 필수적이다. 따라서 본 장에서는 아스팔트 포장에 점탄성 이론을 적용하기 위해서 기본적인 역학적 모델과 크리프 계수에 대한 특성을 파악하고자 한다.

2.1 역학적 모델(Mechanical Models)

점탄성 거동에 대한 역학적 모델은 일반적으로 탄성을 나타내는 Spring 요소와 점성을 나타내는 Dashpot 요소를 조합한 모델을 사용한다. 탄성은 Spring 요소를 사용하여 Hooke's law이 적용되며 다음 식(1)과 같이 표현되어진다.

$$f = E\varepsilon \quad (1)$$

또한, 점성은 Dashpot 요소에 의해 설명이 가능하며, Newton's law의 점성계수 λ 를 사용하여 다음 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \lambda \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 λ 는 점성계수이며, t 는 시간을 의미한다. 일정한 응력이 작용할 때, 식(2)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{ft}{\lambda} \quad (3)$$

점탄성 거동에 대한 가장 단순한 모델로서, 그림 1에 보이는 바와 같은 Maxwell model과 Kelvin model이 있으며, 각각 Spring 요소와 Dashpot 요소를 직렬 또는 병렬로 연결하여 나타낼 수 있다(Lakes, 1998). 이 모델들은 매우 간단하고, 점탄성의 정성적인 거동을 파악하는 데에는 매우 유용한 것으로 보고되고 있다.

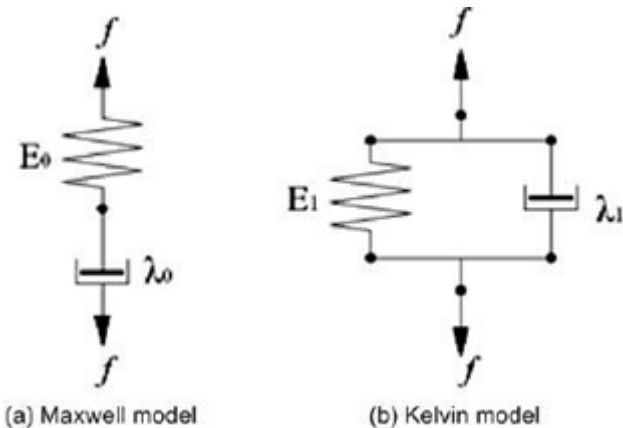


그림 1. 점탄성 모델

2.2 Maxwell model

이 모델에서는 그림 1의 a)에서와 같이 Spring과 Dashpot가 직렬로 연결되어 있으므로, 외력이 가해진 경우에 Spring에 작용하는 응력을 f_s , Dashpot에 작용하는 응력을 f_d 라 하면 다음의 식을 만족시킨다.

$$f_s = f_d = f \quad (4)$$

한편, 전체 변형률 ε 은 Spring에서 발생하는 변형률 ε_s 과 Dashpot에서 발생하는 변형률 ε_d 의 합이 된다. 즉,

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_d \quad (5)$$

이 식을 시간 t 에 관하여 미분하고, 식(1), 식(2)을 사용하여 나타내면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_d}{\partial t} = \frac{1}{E_0} \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{\lambda_0} f_d \quad (6)$$

여기서 식(4)과 같이 응력이 모두 같으므로, 결국 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E_0} \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{f}{\lambda_0} \quad (7)$$

이 식이 Maxwell model의 기본 식이며, 일정한 응력 조건에서는 식(1)과 식(3)에 의하여 다음의 관계를 만족시킨다.

$$\varepsilon = \frac{f}{E_0} + \frac{ft}{\lambda_0} = \frac{f}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) \quad (8)$$

여기서, $T_0 = \lambda_0/E_0$ 이며 완화 시간(Relaxation time)으로 정의한다. 만일 어떤 응력 f_0 가 모델에 순간적으로 작용하면 Spring은 초기 변형 f_0/E_0 을 나타내며, 이 변형이 일정하게 유지되면 응력은 시간이 지남에 따라 점차 감소하다가 결국에 0이 된다. 이것을 점탄성체의 응력완화라 하며, Maxwell model은 이러한 응력완화 현상을 설명하는 모델이다.

2.3 Kelvin model

Kelvin model은 그림 1의 b)에서와 같이 Spring과 Dashpot가 병렬로 연결되어 있기 때문에 외력이 가해지면, 응력과 변형률에 관한 다음 식이 성립한다.

$$f = f_s + f_d \quad (9)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_s = \varepsilon_d \quad (10)$$

식(9)에 식(1)과 식(2)을 대입하고, 식(10)과 같이 변형률을 모두 같게 하여 정리하면 다음의 Kelvin model의 기본 식이 구해진다.

$$f = E_1 \varepsilon + \lambda_1 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (11)$$

일정한 응력하에서 식(11)은 다음의 식(12)과 같이 적분식으로 나타낼 수 있고, 이것을 계산하면 식(13)을 구할 수 있다.

$$\int_0^t \frac{d\varepsilon}{f - E_1 \varepsilon} = \int_0^t \frac{dt}{\lambda} \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] \quad (13)$$

여기서 $T_1 = \lambda_1/E_1$ 으로 정의하며 지연 시간(Retardation time)을 나타내는 값이다. 지연 시간을 갖는 점탄성체의 성질을

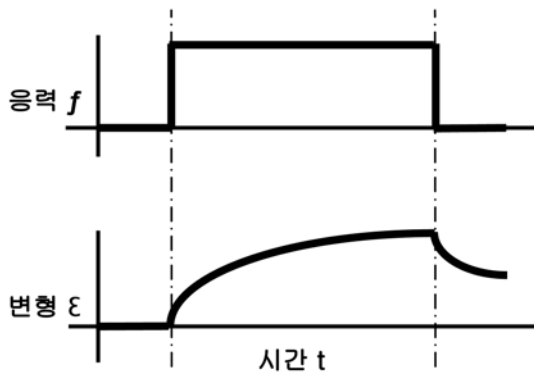


그림 2. 응력에 대한 크리프 변형

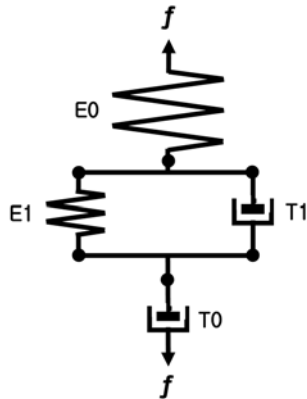


그림 3. Burgers model

응력의 입력에 대한 크리프(지연탄성)라고 정의하며, Kelvin model은 이러한 크리프 현상을 설명하는 모델이라 할 수 있다. 그림 2는 일정한 응력이 작용할 때에 크리프에 의한 변형을 보여준다.

2.4 Burgers model

앞에서 살펴 본 간단한 두 개의 모델은 점탄성의 거동을 파악하는 데에 유용하지만 이 두 모델만으로 아스팔트의 점탄성 거동을 효과적으로 나타내는 데에는 어려움이 있다. 따라서 Maxwell model과 Kelvin model을 여러 개 이은 모델들이 제안되고 있다(Irving *et al.*, 1997).

Burgers model은 그림 3과 같이 Maxwell model과 Kelvin model을 직렬로 이은 모델이며, Dashpot의 점성 계수 대신에 완화 시간인 T_0 와 지연 시간인 T_1 을 사용하여 나타내었다. 이는 점탄성의 완화현상과 크리프의 특성 모두를 적용하여 실제의 물질에 가까운 거동을 표현할 수 있다는 점에서 앞서 언급한 두 모델보다 정확하다고 예측할 수 있다.

이 모델의 기본 식은 앞에 언급된 식(8)과 식(13)에 의해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{f}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0}\right) + \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right)\right] \quad (T_0 = \lambda_0/E_0, T_1 = \lambda_1/E_1) \quad (14)$$

또한, 상태별 변형을 설명하기 위해서 식(14)에서 T_0 와 T_1 를 탄성계수와 점성계수로 풀어 쓰면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon(t) = \frac{f_0}{E_0} + \frac{f_0}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1 t}{\lambda_1}\right)\right] + \frac{f_0}{\lambda_0} t \quad (15)$$

3. FWD 비파괴 현장시험

3.1 개요

비파괴 시험은 포장구조 상태를 진단하기 위한 시험으로 포장의 훼손이 없이 진동하중 또는 충격하중을 가하여 발생하는 처짐 값으로써 각 포장 층의 탄성계수를 측정하는 시험이다. 비파괴 장비(Nondestructive Testing, NDT)는 일반적으로 두 가지로 분류되어 진다. 하나는 FWD 장비와 Dynaflect 장비를 사용하여 구한 처짐을 근거로 하는 장비이고, 두 번째로는 표면파의 스펙트럴 해석(Spectral Analysis of Surface Waves, SASW)과 같은 파전달 기법을 사용하는 장비이다(Lytton, 1989). 충격하중으로 포장표면의 처짐을 유발하고 이를 측정하는 장비인 FWD는 1963년 Bretonniere에 의해서 제작된 이후 WES, Dynatest, KUAB, Phoenix 모델 등의 여러 가지 종류의 FWD가 개발되어 현재에 이르고 있다(Boutros *et al.*, 1985).

Hoffman과 Thompson은 FWD, Road Rater 모델 400B와 벤켈만 빔을 비교하여 FWD가 실제 차량하중에 의하여 발생하는 포장도로의 처짐 형상을 가장 잘 나타낼 수 있는 장비임을 밝힌바 있다(Hoffman *et al.*, 1982). 또한 Bohn, A. 등도 실제 차량과 FWD 하중조건에 의한 응력-시간 이력과 변형률-시간 이력을 비교하여 FWD가 포장구조체에 가해지는 차량하중조건을 가장 잘 나타낼 수 있는 장비라는 결론을 내린바 있다(Bohn *et al.*, 1972).

따라서 본 연구에서는 비파괴 시험장비로서 KUAB 2m-FWD장비를 선정하여 올림픽대로의 포본구간에 대하여 시험하였고 기준이 되는 축하중을 1 kN으로 하였으며, 시험 구간에 대해 200 m 간격으로 낙하하중을 가하여 이 때 발생하는 처짐량을 측정하였다.

3.2 FWD의 구조 및 시험방법

포장의 처짐 결과를 평가하는데 장비의 형태가 대단히 중요한 원인이 된다. NDT 처짐 장비에는 정적 처짐 장비, Steady-state 처짐 장비, FWD 처짐 장비인 세 가지의 기본 범주가 있다. FWD 장비는 충격 처짐 장치로 분류된다. 즉, 일정 중량의 물체를 미리 결정된 높이로 올려서 특별히 설계된 판에 낙하시켜 그 충격을 포장면에 전달하는 장치이다. FWD 장비에서의 충격 하중의 모양은 움직이는 바퀴 하중 모양과 매우 유사하기 때문에, 움직이는 트럭이나 항공기 하중에 의해 생긴 실질적인 처짐을 효과적으로 나타낼 수가 있다.

FWD 장비의 구성은 운반 트레일러, 처짐량 측정장비와 컴퓨터 시스템으로 구성되어 있고, 이를 조정하는 소프트웨어가 있다. 운반 트레일러는 처짐량 측정 장비를 견인할 수 있는 차량으로 제작되었으며 운전실 외에 실내에서 조사자가 작업할 수 있는 공간을 갖추고 있다. 처짐량 측정 장비는 하중 재하판, 하중 발생 장치, 고무 완충 장치 및 거리 측정기 등으로 구성되어 있다. 컴퓨터 시스템은 컴퓨터 일체와 전원공급장치, 처짐량 측정자료를 데이터로 전환하는 시스템 본체 및 모니터링 시스템으로 구성되어 있다.

그림 4와 그림 5는 각각 KUAB 2 m-FWD 장비의 체제와 처짐량 측정장비를 보여준다.

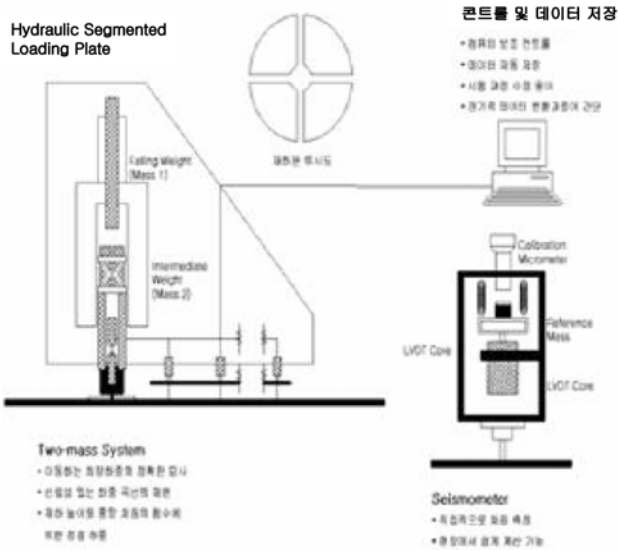


그림 4. KUAB 2m-FWD 장비의 체계도

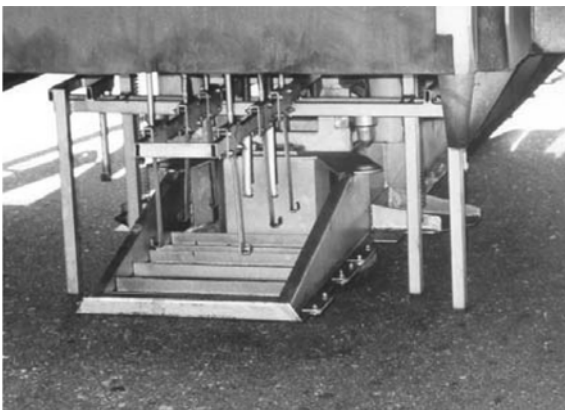


그림 5. 처짐량 측정 장비

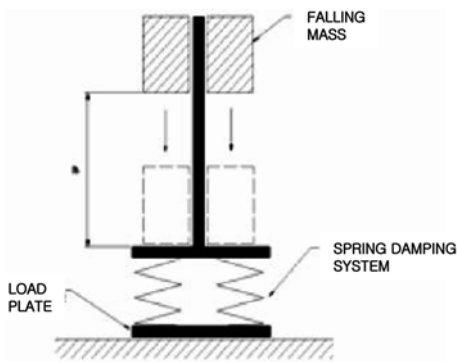


그림 6. FWD 하중재하 체계도

그림 6은 FWD 장비의 낙하 하중에 대한 체계도이다. 그림에 나타난 바와 같이 낙하 중량물(Falling mass)은 정해진 높이에서 Spring damping system 위로 자유 낙하되며, 300 mm 직경의 여러 개의 분열된 원반형의 하중판 위에 재하되며 매끄럽지 못한 포장의 표면에서도 끌고루 분산되고, 포장 표면 및 대기 온도 측정은 적외선 포장 온도계에 의해 측정된다.

한편, Falling mass에 의한 펄스의 결과는 반정현파와 유사하다는 것을 다음의 그림 7을 통해 알 수가 있다. 하중의 지속시간은 대개 30~40 msec이고, 최대 진폭은 질량이 순간적으로 풀어질 때 Spring에 저장된 변형 에너지를 사용하여 그 시스템의 초기 포텐셜 에너지를 계산하여 근사적으로 얻

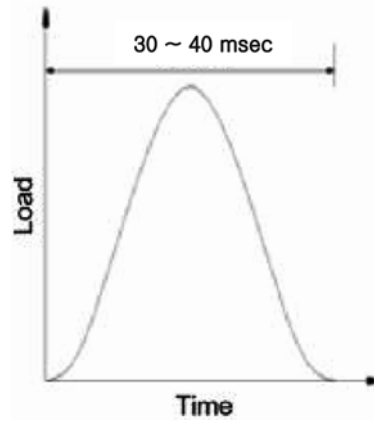


그림 7. FWD 충격하중의 특성

어 질 수 있다. 하중은 일정질량을 연직으로 자유 낙하시킴으로써 재하판 상부에 놓인 하중계로 측정된다. 처짐은 재하 중심과 그 곳으로부터 0.2, 0.3, 0.45, 0.6, 0.9, 1.5 m 간격으로 배치된 7개의 속도계에 의하여 측정된 연직방향 속도를 수치 적분하여 구하게 된다.

3.3 FWD 시험대상 구간

FWD 시험대상 구간의 선정은 굴착복구 등으로 포장 수명이 비교적 단기성인 서울시 아스팔트 포장의 단면(폭 20 m 이상)에 대해서 선정하였다. 선정 범위로는 교통량과 중차량 교통회수가 많은 구간에 대하여 사거리, 교량 및 터널 구간을 제외한 도시고속도로와 주간선도로 중에서 포장 유형별, 소성 및 균열 등 포장 파손이 빈번하게 발생하는 구간으로 제한하였다. 결과적으로, 대도시의 교통 특성을 가장 잘 반영하고 있는 올림픽대로를 시험 노선으로 선정하고, 올림픽대로의 방화대교 하단~마곡동 구간을 시험대상으로 선정하였다.

올림픽대로의 포장 각층의 물성치는 표 1과 같으며, 구간의 포장단면은 그림 8에 나타내었다(서울시, 2001).

3.4 시험 결과

본 연구에서는 KUAB 2m-FWD 장비를 이용하여 시험 구간에 대해 시점에서부터 200 m 간격으로 표면 처짐을 측

표 1. 시험대상 구간의 포장 층의 물성

층 명칭	두께(mm)	포이송비	탄성계수 (MPa)
표층	120	0.35	9982
기층	200	0.40	1023
보조기층	330	0.40	420
노상	Infinite	0.45	85

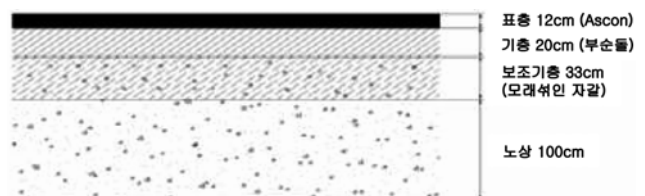


그림 8. 시험대상 구간의 포장단면(올림픽대로)

표 2. 측정 위치별 최대 처짐값

Sensor ID	최대 처짐값 (μm)				
	0 m	200 m	400 m	600 m	800 m
D0	50.4	53.0	51.8	68.0	78.9
D20	47.8	48.6	49.4	62.4	70.6
D30	44.1	45.6	47.0	53.8	62.8
D45	43.3	44.4	46.2	51.2	59.2
D60	41.0	42.4	45.5	43.8	54.8
D90	38.4	40.2	41.8	40.8	45.3
D150	25.6	28.8	32.5	30.8	27.4

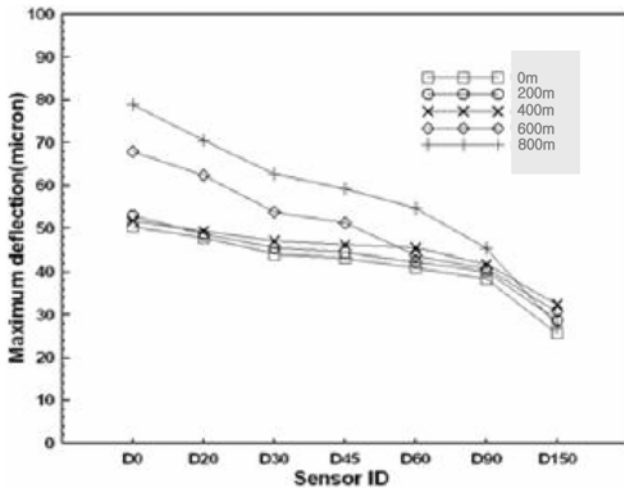


그림 9. 측정 위치별 표면처짐형상

정하였다. 각 측정 위치별로 7개의 처짐 측정센서에서 측정된 위치별 최대 처짐값은 표 2와 같다.

그 결과, 하중이 직접 재하되는 지점(D0)에서의 최대 처짐값은 800 m에서 78.9 μm 로 가장 높은 수치를 나타냈으며, 가장 먼 지점(D150)에서의 최대 처짐값은 25 μm ~33 μm 의 수치를 보였다. 또한, 표 2에서 600 m와 800 m 지점의 처짐이 다른 지점에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내는 것으로 보아 이 지점의 포장상태가 다른 지점에 비해 다소 불량함을 알 수 있었다. 처짐 형상은 그림 9에 보이는 바와 같이 재하 지점(D0)에서 멀어질수록 최대 처짐값이 점차 줄어드는 완만한 곡선의 형태를 보이며, 일반적인 아스팔트 포장의 표면 처짐과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

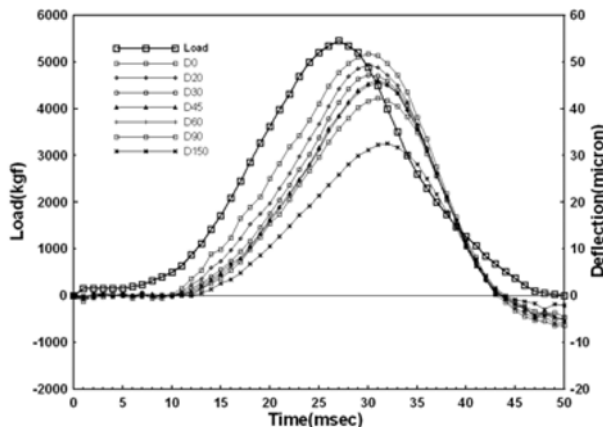


그림 10. FWD 하중이력과 표면처짐 곡선

본 연구에서는 측정 위치별 최대 처짐 결과를 비교하여, 포장 내부의 상태가 가장 양호하다고 판단되는 400 m 지점의 데이터를 모델식의 비교 대상으로 선정하였다. 그림 10은 시험 대상구간 시점(방화대교 하단)으로부터 400 m 지점에서 측정된 시간에 대한 FWD 하중이력과 처짐측정센서에서 측정된 포장체의 표면처짐곡선을 나타내고 있다.

그림 10에서 보는 바와 같이 하중재하 중심에서 측정된 처짐측정센서(D0)의 표면처짐이 가장 크고, 거리가 멀수록 표면처짐이 감소함을 알 수 있으며, 하중재하 중심에서 멀어짐에 따라 충격파의 도달시간이 증가하기 때문에 최대처짐이 발생하는 시점이 약간씩 지연되는 것을 볼 수 있다. 또한, 아스팔트 포장은 점탄성 거동을 하기 때문에 하중이 제거된 후에 처짐의 전부나 대부분이 회복하는 탄성체와는 달리, 그림에서와 같이 하중이 제거된 후에도 관성에 의한 감쇠진동이 발생하는 것을 볼 수 있다.

4. 아스팔트 포장의 점탄성

4.1 개요

아스팔트 포장에 가해지는 하중은 이동 차량에 의한 타이어 압력이다. 따라서 차량의 타이어가 지나갈 때 포장이 받게 되는 하중은 일정하지 않으며, 시간에 따라 값이 다르게 된다. 또, 포장의 구조해석을 위한 비파괴시험에 사용되는 FWD장비에서도 시간 의존적 이동 하중의 영향을 고려하기 위해 30 msec 단위의 충격하중을 사용한다.

포장 해석은 이와 같은 짧은 시간동안의 이동 하중을 고려하여 실시된다. 이러한 하중의 특성 때문에 일정한 응력에서의 점탄성 거동을 나타내는 일반화된 모델은 실제의 거동과 차이를 보이게 된다. 따라서 좀 더 실제에 가까운 거동의 예측을 위해서는 짧은 순간에 가해지는 이동하중을 고려하여 일반화된 모델에서 점성 변형률에 의한 크리프 상수 값이 무시될 수 있다(Huang, 1993).

4.2 하중 특성을 고려한 역학적 모델

본 연구에서는 이동 하중의 특성을 고려하는 점탄성 역학적 모델식을 제안하였으며 다음의 그림 11에 나타내었다.

그림 11에서 보이는 바와 같이 제안된 모델은 하나의

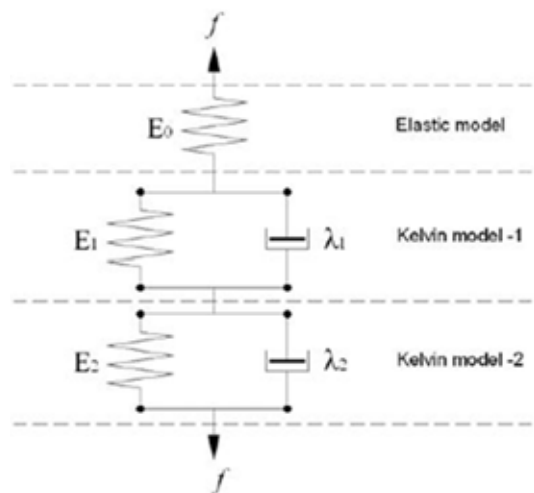


그림 11. 하중 특성을 고려하여 제안된 역학적 모델

Elastic model과 두 개의 Kelvin model로 구성되어 있으며, 각각의 탄성계수와 점성계수를 나타내고 있다. 2장에서 논의한 점탄성 이론에 의해서 제안된 모델은 전체적으로 다음과 같은 성질을 지닌다.

$$f = f_e = f_{k_1} = f_{k_2} \quad (16)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{k_1} + \varepsilon_{k_2} \quad (17)$$

여기서, 아래첨자 e, k_1, k_2 는 각각 Elastic model, Kelvin model-1, Kelvin model-2를 나타낸다.

Elastic model은 Hooke's law에 의해서 식(18)과 같이 표현할 수 있으며, 식(16)을 적용하면 식(19)을 얻을 수 있다.

$$f_e = E_0 \varepsilon_e \quad (18)$$

$$\varepsilon_e = \frac{f_e}{E_0} = \frac{f}{E_0} \quad (19)$$

한편, Kelvin model은 Spring과 Dashpot가 병렬로 연결되어 있으므로 그림 11의 Kelvin model-1에 대하여 다음의 식(20)과 식(21)이 성립하며, 2장의 식(1)과 식(2)에 의하여 응력과 변형률의 관계를 나타내는 식으로 나타내고 식(20)을 적용하면 식(22)을 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{k_1} = \varepsilon_{s_1} = \varepsilon_{d_1} \quad (20)$$

$$f_{k_1} = f_{s_1} + f_{d_1} \quad (21)$$

$$f_{k_1} = E_1 \varepsilon_{k_1} + \lambda_1 \frac{d\varepsilon_{k_1}}{dt} \quad (22)$$

여기서, s, d 는 각각 Spring과 Dashpot를 나타낸다. 식(22)은 전형적인 선형미분방정식의 형태로서 적절히 정리하고 양변을 적분하면 식(23)과 같이 나타낼 수 있으며, 적분 공식에 의해서 방정식을 풀면 식(24)를 얻게 된다(Erwin Kreyszig, 2000).

$$\int_0^{\varepsilon_{k_1}} \frac{1}{f_{k_1} - E_1 \varepsilon_{k_1}} d\varepsilon_{k_1} = \frac{1}{\lambda_1} \int_0^t dt + C_1 \quad (23)$$

$$\varepsilon_{k_1} = \frac{f_{k_1}}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\lambda_1} t + C\right) \right] \quad (24)$$

여기서 C_1, C 는 적분상수를 나타내며, 식(4.9)에 초기조건 ($t=0: \varepsilon_{k_1}=0$)을 적용하면 식(25)을 얻을 수 있으며, 식(16)에 의해서 f_{k_1} 는 f 와 같으므로 최종식은 식(26)과 같다.

$$\varepsilon_{k_1} = \frac{f_{k_1}}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\lambda_1} t\right) \right] \quad (25)$$

$$\varepsilon_{k_1} = \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\lambda_1} t\right) \right] \quad (26)$$

또, Kelvin model-2에 대해서도 같은 방법을 적용하면 세 모델에 대한 기본식은 다음 표 3과 같다.

표 3의 기본식을 식(17)에 대입하고 시간에 따른 변형률의 형태로 나타내면 결론적으로 식(27)을 얻을 수 있으며, 지연 시간(Retardation time)을 사용하여 나타내면 다음의 식(28)과 같다.

$$\varepsilon(t) = \frac{f}{E_0} + \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\lambda_1} t\right) \right] + \frac{f}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\lambda_2} t\right) \right] \quad (27)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{f}{E_0} + \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] + \frac{f}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] \quad (28)$$

$$(T_1 = \lambda_1/E_1, T_2 = \lambda_2/E_2)$$

표 3. 제안된 모델을 구성하는 세 모델의 기본식

모델	기본식
Elastic model	$\varepsilon_e = \frac{g}{E_0}$
Kelvin model-1	$\varepsilon_{k_1} = \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\lambda_1} t\right) \right]$
Kelvin model-2	$\varepsilon_{k_2} = \frac{f}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\lambda_2} t\right) \right]$

4.3 역학적 모델의 점탄성 거동

아스팔트 표층에서의 시간에 따른 변형률을 계산하기 위해서, 앞서 2장에서 논의한 기본 역학적 모델과 제안된 모델을 다음의 표 4에 나타내었다.

표 4의 4개의 역학적 모델에 대하여 본 연구에서는 시험구간으로 선정된 올림픽대로의 탄성계수를 이용하여 지속적인 하중이 작용할 때 나타나는 시간에 따른 변형률의 변화를 살펴보고자 하며, 그 결과를 그림 12와 그림 13에 나타내었다.

그 결과, 그림 12에서 보이는 바와 같이 Maxwell model은 일정한 하중을 가하면 시간에 따라 변형률이 계속 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 가해지는 하중에 대해 선형탄성으로 증가하는 것이므로 점탄성 거동을 하는 아스팔트 포장에 적용될 수가 없는 것으로 생각된다. 또한 Kelvin model의 경우도, 포장에서 나타나는 초기 탄성 거동을 모델에서 반영하지 못하는 단점이 나타났다. 그러나 Burgers

표 4. 기본 역학적 모델과 제안된 모델

모델	기본식
Maxwell model	$\varepsilon(t) = \frac{f}{E_1} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right)$
Kelvin model	$\varepsilon(t) = \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right]$
Burgers model	$\varepsilon(t) = \frac{f}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right]$
Proposed model	$\varepsilon(t) = \frac{f}{E_0} + \frac{f}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] + \frac{f}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right]$

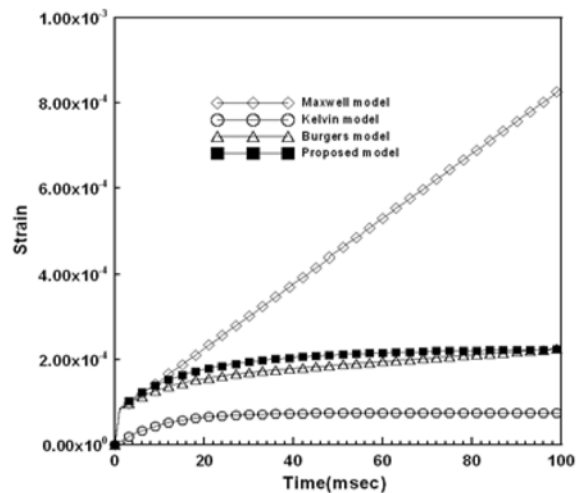


그림 12. 미소시간에 따른 점탄성 변형

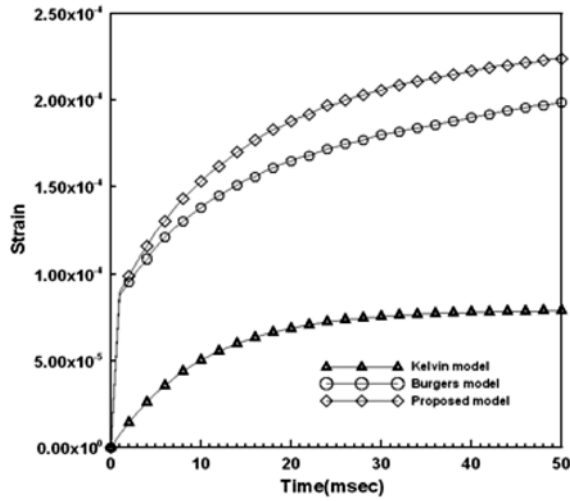


그림 13. 미소시간에 따른 점탄성 변형

model과 제안된 모델은 미소시간동안 거의 유사한 점탄성 거동을 보이는 것으로 나타났으며, 일반적인 크리프 거동과 유사함을 알 수 있다.

그림 13은 하중 재하 초기의 점탄성 거동을 분석하기 위하여 50 msec까지 시간에 따른 변형률을 나타내었다. 그 결과, Kelvin model과 달리 Burgers model과 제안된 모델이 비슷한 거동을 하는 것으로 나타났으며 탄성변형의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 제안된 모델은 포장의 점탄성 거동을 유사하게 예측하는 것으로 생각된다.

4.4 시험 결과에 의한 모델식 검증

FWD 시험에서의 충격하중은 재하 시간동안 반정현파 모양으로 포장체에 가해진다. 본 연구의 현장시험에서 최대하중은 약 27 msec 지점에서 발생하였으며, 하중은 그 후로 점차 감소하여 45 msec 지점에서 0에 가까워지는 것을 알 수 있었다. 이러한 하중 입력은 아스팔트 포장체에 차량이 지나갈 때 바퀴가 지면을 누르는 접지압력이 미소시간동안 빠르게 변화하는 것을 반영한 것이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제안된 모델식에 의한 변형률과 처짐을 계산할 때에도 일정한 하중 대신에 FWD 하중이력을 적용하였으며, 그 결과값을 측정된 값과 비교분석하였다.

4.4.1 시간에 따른 변형률의 영향

FWD 하중이력을 적용하여 모델식으로부터 계산된 시간에 따른 변형률을 다음 그림 14에 나타내었다. 변형률의 최대값은 최대하중이 작용하는 27 msec 지점에서 1.92×10^{-4} 로 계산되었고, 10 msec 까지 하중이 완만하게 증가하는 구간을 제외하면 27 msec에 도달할 때까지 급격한 하중의 변화에 따라 변형률이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 등가 단축하중(0.5 kN)이 작용할 때 모델식에 의한 포장체의 최대 변형률은 1.92×10^{-4} 라 할 수 있으며 초기에 최대변형률에 도달하는 것으로 생각된다.

또한, 시험에서 측정된 변형률과 모델식에 의한 변형률을 그림 15에 나타내었다. 측정된 변형률의 최대값은 30 msec에서 2.02×10^{-4} 로 나타났으며, 모델식의 결과 값은 가해진 하중의 입력에 대해 즉시 변형률을 나타내지만, 시험값에서

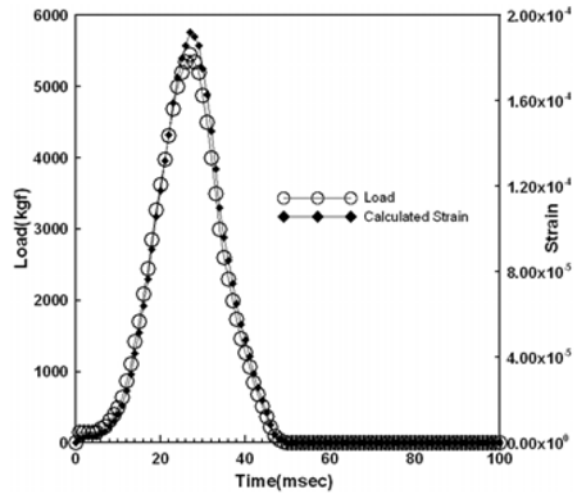


그림 14. 모델식에 의한 FWD 하중이력에 따른 변형률

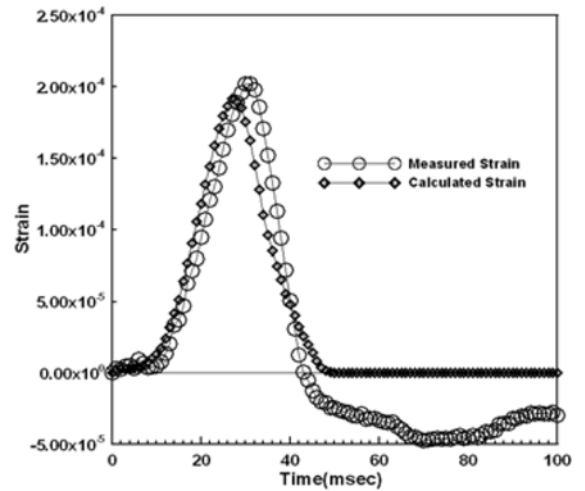


그림 15. FWD 시험에서 측정된 변형률과 계산된 변형률

는 하중의 입력에 대해 약 2~4 msec 정도의 지연이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 측정값은 10 msec 동안 거의 변형률의 증가가 없었으나, 약 40 msec에서 변형률이 급격히 떨어지는 것으로 하중의 감소에 대해 계산값보다 민감하게 거동하는 것으로 나타났다. 이것은 실제 측정된 현장에서 발생한 인접 차량의 공진 때문이라 생각되며, 관성에 의한 감쇠진동을 제외하면, 모델식에 의한 변형률은 FWD에 의해 측정된 변형률의 결과와 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

4.4.2 시간에 따른 처짐의 영향

FWD 하중이력에 따른 모델식의 처짐과 FHWA의 비파괴 시험에 대한 자료에서 제시한 점탄성을 고려한 처짐 곡선을 비교하여 그림 16에 나타내었다(Cheryl Richter, 1997). 그림 16에 나타난 바와 같이 모델식에서 계산된 처짐 곡선은 27 msec에서 약 $50.4 \mu\text{m}$ 로 최대값을 나타내었으며, FWD 하중이력 곡선과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 제안된 모델의 비교를 위해 제시된 FHWA 그래프는 모델식에 의한 그래프와 차이를 나타내지만, 이것은 입력된 하중의 크기가 다르고 포장의 표층 단면 두께도 다르기 때문인 것으로 생각되며, 시간에 따른 처짐의 양상을 비교하면 두 곡선은 매우 흡사하다고 말할 수 있다.

그림 17은 측정된 처짐과 계산된 처짐, 그리고 미연방도로

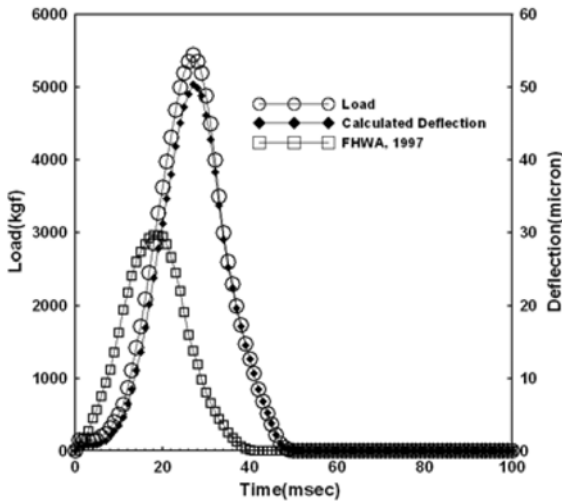


그림 16. 모델식에 의한 FWD 하중이력에 따른 처짐

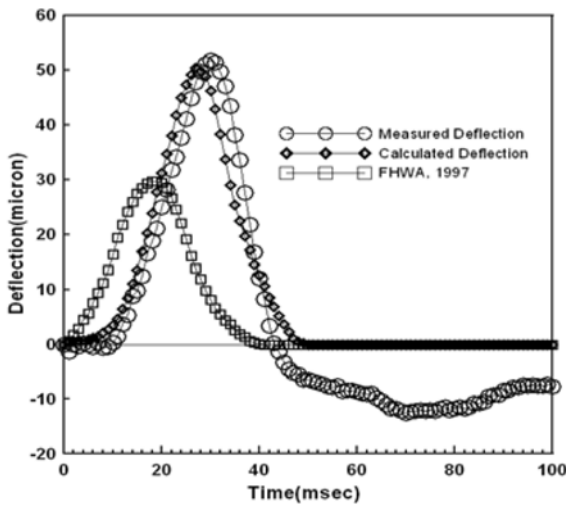


그림 17. FWD 시험에서 측정된 처짐과 계산된 처짐

국에서 제시한 처짐의 시간에 따른 값의 변화를 나타내고 있다. 시험에서 측정된 처짐의 최대값은 30 msec에서 51.8 μm 로 나타났으며, 변형률의 경우와 마찬가지로 계산값과 3 msec 정도의 시간 지연을 보이는 것을 알 수 있다.

따라서, 시간에 따른 처짐 양상만을 비교해 볼 때에 본 연구에서 제안한 모델식에 의해서, 실제 하중에 의한 포장의 시간에 따른 처짐을 예측하는 것이 가능하다고 말할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 점탄성 이론에 의해 역학적 모델식을 제안하고, FWD 시험에 의한 아스팔트 포장체의 처짐값과 모델식의 결과 값을 비교하여 제안식의 실제 적용성을 검토하였다. 연구의 과정에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구의 대상인 올림픽대로의 시험구간에 대하여 FWD 시험을 실시한 결과, 하중이 직접 재하되는 지점(D0)에서의 최대 처짐값은 800 m에서 78.9 μm 로 가장 높은 수치를 나타냈으며, 가장 먼 지점(D150)에서의 최대 처짐값은 25 μm ~33 μm 의 수치를 보였다. 처짐 형상은 재하 지점(D0)에서 멀어질수록 최대 처짐값이 점차 줄어드는 완만한 곡선의 형태를 보이며, 일반적인 아스팔트 포장의 표면 처짐과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

2. 제안식과의 비교를 위해 선정된 400 m 지점의 하중이력에 따른 처짐을 분석한 결과, 하중재하 중심에서 측정된 Seismometer(D0)의 표면처짐이 가장 크고, 거리가 멀수록 표면처짐이 감소함을 알 수 있었으며, 하중재하 중심에서 멀어짐에 따라 충격파의 도달시간이 증가하기 때문에 최대 처짐이 발생하는 시점이 약간씩 지연되는 것을 볼 수 있었다. 또한, 아스팔트 포장의 점탄성 거동에 의해 하중이 제거된 후에도 관성에 의한 감쇠진동이 발생하는 것을 알 수 있었다.
3. 점탄성 이론적 고찰을 바탕으로 이동 하중의 특성을 고려하는 점탄성 역학적 모델식을 제안하였으며 제안된 모델식과 기존의 역학적 모델식을 비교한 결과, Maxwell model은 가해지는 하중에 대해 선형탄성으로 증가하기 때문에 점탄성 거동을 하는 아스팔트 포장에 적용될 수 없었으며, Kelvin model의 경우에는 포장에서 나타나는 초기 탄성 거동을 모델에서 반영하지 못하는 단점이 나타났다. 그러나 Burgers model과 제안된 모델은 미소시간동안 거의 유사한 점탄성 거동을 보이는 것으로 나타났으며, 일반적인 크리프 거동과 유사함을 알 수 있었다.
4. FWD 하중이력에 의해서 모델식에 의한 변형률과 측정된 변형률을 비교분석한 결과, 모델식에 의한 변형률의 최대값은 최대하중이 작용하는 27 msec 지점에서 1.92×10^{-4} 로 나타났고, 측정된 변형률의 최대값은 30 msec에서 2.02×10^{-4} 로 나타났다. 모델식의 결과 값은 가해진 하중의 입력에 대해 즉시 변형률을 나타내지만, 시험값에서는 하중의 입력에 대해 약 2~4 msec 정도의 지연 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 관성에 의한 감쇠진동을 제외하면, 모델식에 의한 변형률은 FWD에 의해 측정된 변형률의 결과와 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.
5. FWD 하중이력에 따른 모델식의 처짐과 FHWA의 비교 시험에 대한 자료에서 제시한 처짐 곡선 및 시험에서의 측정 처짐을 비교하였다. 그 결과, 모델식에서 계산된 처짐 곡선은 27 msec에서 약 50.4 μm 로 최대값을 나타내었고, 시험에서 측정된 처짐의 최대값은 30 msec에서 51.8 μm 로 나타났다. 제안된 모델의 비교를 위해 제시된 FHWA 그래프와 두 처짐값의 비교를 통하여, 본 연구에서 제안한 모델식에 의해서, 실제 하중에 의한 포장의 시간에 따른 처짐을 예측하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 건설교통부(2002) 한국형 포장 설계법 개발 및 포장성능 개선방안 연구: 1단계 1차년도 최종보고서, 아스팔트 포장 설계법 개발, Kprp-G-02, 건설교통부, pp. 75-84.
- 서울시(2001) 서울시 도로관리사업소 도로보수와 설계지침, 건설안전관리본부
- 한국도로공사(1995) 아스팔트 포장 설계의 표준화 연구(I), 중간보고서, 도로연 95-23-10, pp. 19-27.
- Boutros Sebaaly, Trevor, Davis, Michael, G., and Mamlouk, S. (1985) Dynamics of falling weight deflectometer, *Journal of Transport Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 6, pp. 618-632.
- Burmister, D.M. (1943) The theory of stresses and displacements in layered system and applications to the design of airport run-

- aways. Proceedings, *Highway Research Board*, Vol. 23.
- Bohn, A., Ullidtz, P., Stubstad, R., and Sorensen, A. (1972) Danish experiments with the french falling weight deflectometer, proceedings, *3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Univ. of Michigan, Ann Arbor, pp. 1119-1128.
- Cheryl Richter (1997) *Advanced Methods for Using FWD Deflection-Time Data to Predict Pavement Performance*, FHWA, Techbrief
- Erwin Kreyszig (2000) *Advanced Engineering Mathematics, Eighth Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
- Huang Y. H. (1993) *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall.
- Hoffman, M.S. and Thompson, M.R. (1982) Comparative study of selected nondestructive testing device, *Transportation Research Record No.852*, *Transportation Research Board*, Washington, D.C., pp. 32-41
- Irving H. Shames and Francis A. Cozzarelli (1997) *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Taylor & Francis, pp. 167-169.
- Lakes, Roderic S. (1998) *Viscoelastic Solids*, CRC Press, pp. 23-30.
- Lytton, R.L. (1989) *Nondestructive Evaluation of Pavements by Surface Wave Method*, ASTM STP, pp. 119-137.

(접수일:2005.5.18/심사일:2005.9.20/심사완료일:2006.3.14)