

현장 도로평가장비를 이용한 입상재료층의 비선형 재료상수 추정에 관한 연구

Evaluation of the Nonlinearity Parameter in Unbound Material for Asphalt Concrete Pavement using Field-NDT Equipment

서주원* · 최준성** · 김수일***

Seo, Joo Won · Choi, Jun Seong · Kim, Soo Il

Abstract

This study examines which models are more suitable for representing mechanical property of unbound materials to analyze behavior of asphalt pavement structure. Results from FWD (Falling Weight Deflectometer) test were used to apply to non-linear elastic model. The new method which can deduct material constants of nonlinear elastic model is suggested from FWD test data rather than laboratory resilient modulus (M_R) test. It is confirmed that the material constants are within the common range in subbase. Test output from FWD and MDD (Multi-Depth Deflectometer) was used to verify reliability of the model. From the results of verification, this study shows that a non-linear elastic model agrees to MDD test data more than a linear elastic model does.

Keywords : flexible pavement, resilient modulus (M_R), FWD, MDD

요 지

국내의 경우 도로포장설계시 외국의 설계법을 단순히 도입하여 사용하고 있지만 건설재료, 기후 및 교통조건 등이 외국과 상이하기 때문에 근본적인 제한성이 있다. 특히, 국내 포장구조해석에서 아스팔트층 거동특성만을 중요시하는 해석은 포장구조체가 각 층의 영향을 받는 종합적인 거동특성을 보인다는 포장구조체 시스템적인 특성을 고려한다면 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서, 도로포장 설계시 합리적이고 경제적인 설계를 할 수 있도록 포장구조체의 해석시스템을 구축하여야 한다. 본 연구에서는 포장하부의 다층구조로서의 역학적 거동을 정확히 해석하기 위하여 비파괴 시험장비인 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용하여 층 재료 자체의 성질을 대변하는 모델 중 포장하부를 구성하는 재료에 대한 비선형 탄성모델의 적용성을 검토하고, 복잡한 실험을 통해 얻어지는 비선형탄성모델의 구성인자인 재료상수를 FWD 시험자료로부터 직접 추정하는 체계를 제안하였다. 먼저, FWD 시험의 비선형성을 고찰하고, 실내 M_R 시험을 통해 결정되는 재료상수를 현장에서 수집된 FWD 자료로부터 추정하는 체계를 제안하였다. 제안된 체계로부터 추정된 재료상수는 실내시험을 통해 제안된 국내 보조기층의 재료상수 범위 내에 있음을 알 수 있었다. FWD를 이용한 비선형모델 적용의 신뢰성을 검증하기 위하여 깊이별 처짐 측정장비인 MDD(Multi-Depth Deflectometer) 현장시험자료를 이용하였다. 검증결과, 본 연구에서 제안한 비선형탄성모델을 적용한 방법이 기존의 선형탄성모델보다 실제 MDD 실측값에 더 가까운 결과를 나타낼 수 있었다.

핵심용어 : 아스팔트 콘크리트 포장구조체, 회복탄성계수(M_R), FWD, MDD

1. 서 론

아스팔트 포장구조체의 구조상태와 기능성을 평가하고 이를 통하여 도로포장의 잔존수명을 예측하여 효율적인 유지관리 및 덧씌우기 설계를 하기 위해서는 포장구조체의 역학적 상태를 정확하게 파악해야 한다. 포장구조체의 실제거동을 예측하기 위해서 각 층의 응력분포 등을 정확히 산정할

수 있다면 설계하중 또는 예상 교통량에 대한 포장의 설계를 역학적으로 할 수 있고, 포장구조의 내구성을 결정할 수 있을 것이다.

최근 주행차량 등의 반복하중에 따른 재료물성을 나타내는 비선형모델이 포장재료적인 측면에서 활발히 연구되고 있다. 하지만 포장구조체의 역학적 상태를 파악하기 위해 사용되는 해석프로그램들에서는 이러한 연구결과들이 반영되지

*정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 (E-mail : pooh@yonsei.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 인덕대학 건설환경설계과 부교수 · 공학박사 (E-mail : soilpave@induk.ac.kr)

***정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : geotech@yonsei.ac.kr)

못하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 FWD 시험의 비선형성을 고찰하고, 복잡한 실내시험 등을 통해 얻을 수 있는 비선형물성을 비파괴시험장비인 FWD를 이용하여 수집된 현장 데이터로부터 직접 추정하는 체계를 제안하고자 한다.

2. 포장구조체의 입상재료 특성

일반적으로 포장재료는 응력과 변형(선형 또는 비선형), 일정한 응력수준(점성 또는 비점성) 아래에서 변형의 시간 종속성 및 응력이 제거된 후(탄성 또는 소성) 재료가 원상태로 회복되는가의 세 가지 특성에 대한 이론형태로 구분되어진다. 이들 개념에 대한 일반적인 형태는 그림 1에 나타내었다.

포장체 내부의 응력분포를 포장체 내의 하나의 요소를 기준으로 볼 때, 시간변화에 따른 차량하중의 이동으로 발생하는 포장체의 응력변화가 요소에 작용하는 응력변화와 같게 된다. 즉 차량하중의 연속적인 재하로 포장층 내부의 요소는 반복적인 하중재하를 경험하게 된다.

그림 2와 같이 반복적인 하중을 받는 포장재료는 변형을 경화(strain-hardening)를 통하여 재료가 안정화되어 반복재하횟수가 충분히 증가하면 변형률은 회복변형률(recoverable strain) 성분이 지배적이 된다. 이 때의 응력-변형률 곡선의 기울기를 회복탄성계수(M_R : Resilient Modulus)라 정의하며, 식 (1)과 같이 반복축차응력(σ_d)에 대한 축차변형률(ϵ_r)의 비로 표시된다.

노상 및 보조기층 재료의 회복탄성계수는 축차응력, 구속 응력 또는 체적응력의 크기에 따라 변화하는 응력 의존적인 물성치이다. AASHTO T294-92시험에서도 노상토의 경우에는 회복탄성계수가 축차응력에만 영향을 받는다고 가정한 축차응력모델을, 보조기층 재료는 체적응력의 영향만을 고려한 체적응력모델을 적용하고 있다. 국내에서도 체적응력모델이 보조기층 재료에 합당하게 적용될 수 있음이 확인된 바 있다(권기철, 1999). 축차응력모델은 그림 3과 같이 대수 그래프에서 회복탄성계수와 축차응력이 직선관계로 표현되며, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

$$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \quad (2)$$

여기서, σ_d = 축차응력

K_1, K_2 = 실험으로 결정되는 재료상수

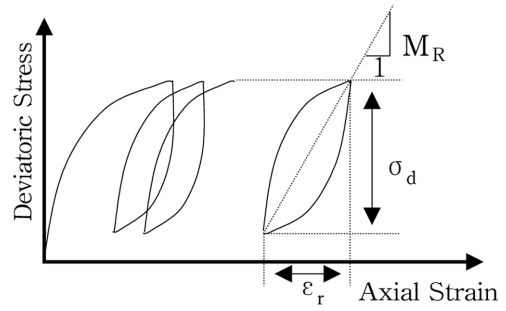


그림 2. 반복하중 하에서 포장체의 응력-변형률 관계

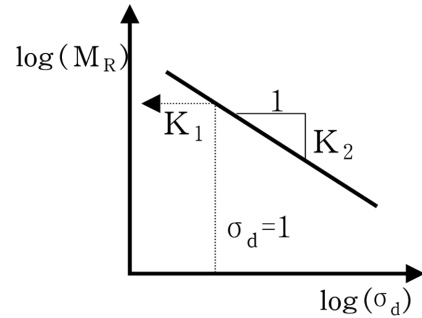


그림 3. 축차응력모델

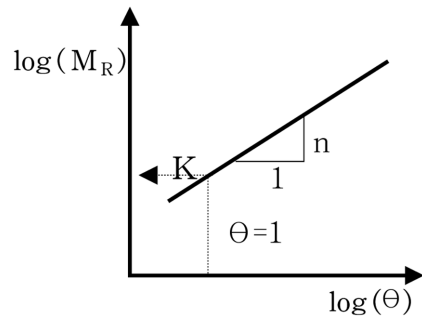


그림 4. 체적응력모델

현재 가장 널리 사용되는 입상재료의 구성모델은 Biarez (1962)가 제안한 체적응력모델로 AASHTO 포장설계법에서도 이를 받아들이고 있다. 체적응력모델은 식 (3) 및 그림 4와 같이 표현된다.

$$M_R = K \cdot \theta^n \quad (3)$$

여기서, θ = 체적응력

K, n = 실험으로 결정되는 재료상수

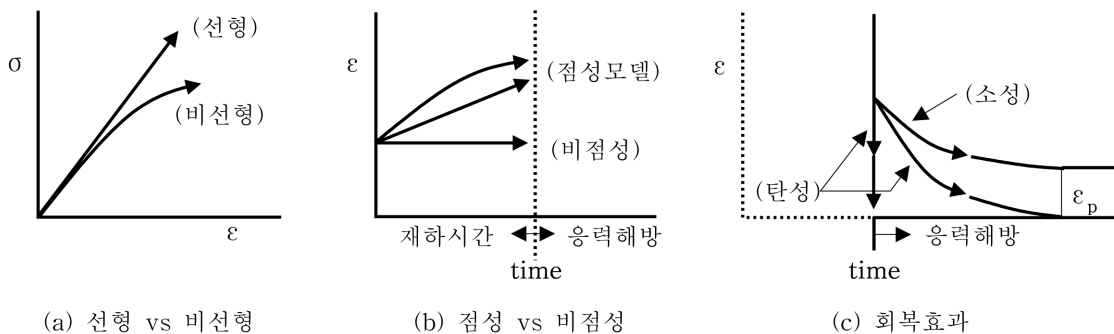


그림 1. 포장재료의 거동특성

체적응력모델은 모델의 편리성으로 인하여 매우 폭넓게 적용되고 있으나, 축차응력의 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다. Uzan(1985)은 식 (4)와 같이 체적응력과 축차응력을 동시에 고려하는 모델을 제안하였다.

$$M_R = \beta_0 \cdot I_1^{\beta_1} \cdot \sigma_d^{\beta_2} \quad (4)$$

여기서, I_1 = 평균주응력 ($I_1=1/3(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)$)
 σ_d = 축차응력
 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = 실험으로 결정되는 재료상수

회복탄성계수 모델 중 응력의 영향 뿐 아니라 흙의 종류, 함수비 또는 포화도, 입자분포, 건조밀도 등 재료자체의 특성을 구성모델에 직접적으로 고려한 형태의 모델들이 개발되고 있다(이석근, 1995). 본 연구에서는 권기철 등(1999, 2000)이 국내 입상재료의 비선형 거동분석모델로 적합하다고 제안한 체적응력모델과 Uzan 모델을 활용하고자 한다.

3. 현장시험장비를 통한 비선형 재료상수의 추정

본 장에서는 현재 널리 상용중인 FWD 시험의 비선형성을 고찰하고, 실내 M_R 시험을 통해 결정되는 재료상수를 현장에서 수집된 FWD 시험자료로부터 직접 추정할 수 있는 체계를 제안하였다. 또한, 본 연구에서 제안한 FWD 를 이용한 비선형모델 적용의 신뢰성을 검증하기 위하여 깊이별 처짐 측정장비인 MDD 시험자료를 이용하였다.

3.1 FWD 시험결과를 통한 입상재료의 비선형성 고찰

일반적인 선형해석은 하중단계별 FWD 실측 표면 처짐을 5.8kgf/cm^2 등분포하중일 때의 정규화 처짐으로 환산하여 물성을 추정하고, 이로부터 포장체의 거동을 분석한다. 이러한 기존의 해석방법은 하중과 처짐이 선형관계라는 가정 하에 적용되는 것이므로, 본 절에서는 각 하중단계로 역산된 탄성계수와 이에 따른 포장체 내부거동을 분석함으로써 FWD

시험의 비선형성을 고찰하였다.

시험에 사용된 FWD는 Dynatest 8000E로서, 그림 5와 같이 표면처짐 측정을 위한 속도계는 각각 하중재하 중심점과 30cm 간격으로 떨어진 위치에 총 7개를 설치되어 있으며, FWD 충격하중이 포장구조체에 가해짐과 동시에 표면 처짐 및 깊이별 처짐을 측정한다. FWD 하중재하중심은 MDD 시험공으로부터 30cm 떨어진 곳에 위치하며, 깊이별 처짐은 포장구조체 내부 각 층에 설치된 MDD 로부터 측정한다.

FWD 및 MDD 현장시험은 1996년 11월 27일~1997년 11월 27일까지의 원주 동화페도 구간에서 실시된 것으로 시험구간 포장단면은 표 1과 같고, 검증에 사용될 시험결과는 동화페도의 Site 2 구간에서 1997년 각 계절을 대표하는 값을 선정하였으며, 이를 일례인 표 2와 표 3에 나타내었다(최준성, 1998). 시험구간은 페도 구간이므로 공용성 변화가 없어 온도에 따른 보정을 실시하면 일정한 탄성계수를 나타낼 것으로 판단된다.

현장에서 측정된 FWD 시험 자료와 이를 이용한 역해석으로부터 추정된 물성의 비선형성을 고찰하기 위하여 FWD 시험에 적용된 하중과 하중단계별로 역산한 탄성계수, 그리고 이 물성을 이용한 거동분석결과 산정된 변형률의 관계를 비교하였다. 비교를 위한 해석프로그램으로 탄성계수의 역해석은 DYN-BAL(최준성, 1998), 포장체의 거동분석은 자중을 고려하도록 수정한 KENLAYER를 각각 사용하였다.

동화페도구간에서 실시된 FWD 실측자료를 이용하여 시험에 적용된 하중과 하중단계별로 역산한 탄성계수, 그리고 이로부터 산정된 변형률을 비교한 일례를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 본 연구의 대상이 되는 보조기층과 노상과 같은

표 1. 시험위치의 포장단면(최준성, 1998)

시험위치	각 층의 두께(cm)				포장상태
	AC 표층	AC 기층	보조기층	노상	
동화페도	15	15	30	-	구포장

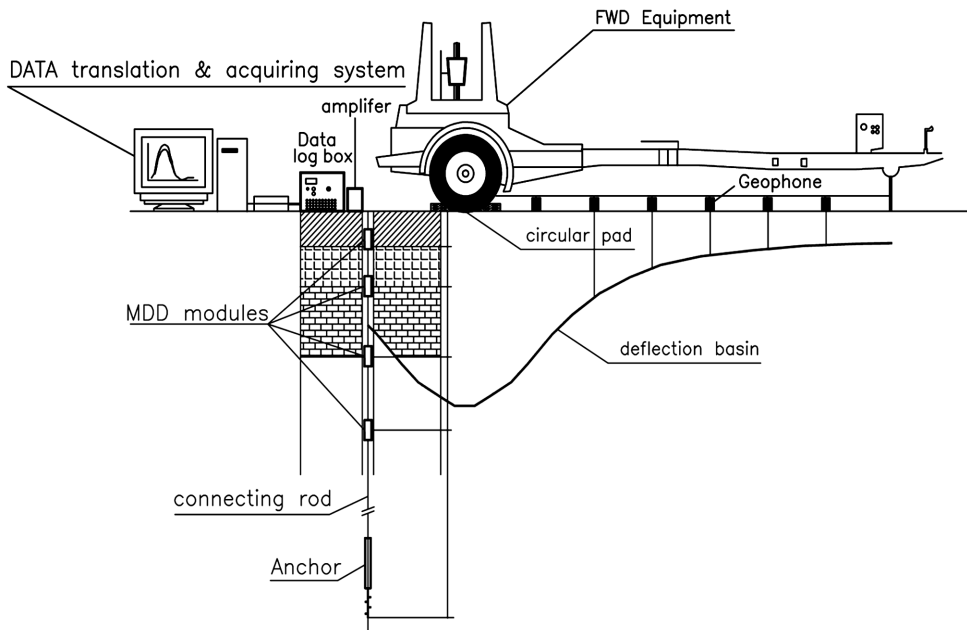


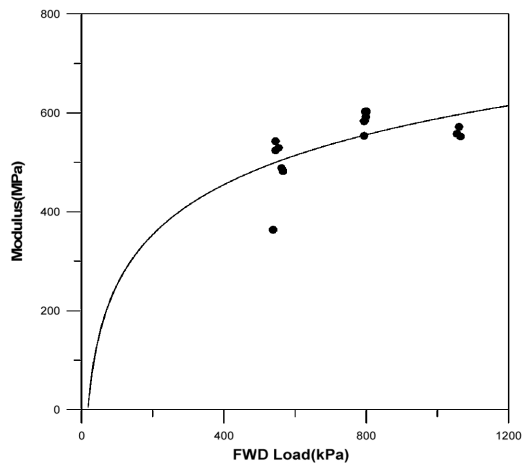
그림 5. FWD 충격하중과 MDD의 조합설치 개요도

표 2. MDD 현장시험 결과(동화페도구간, Site 2)

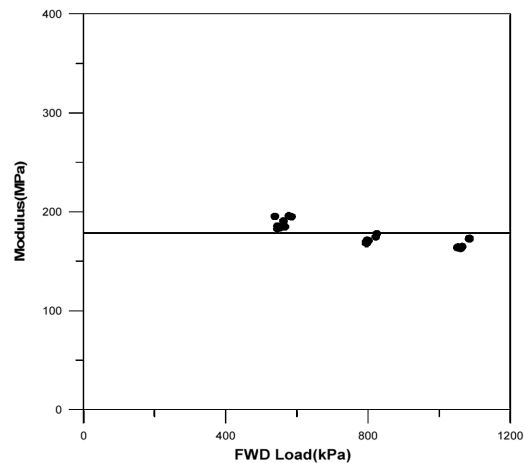
		MDD 깊이별 처짐 (micron)			
시험날짜		4월 30일 17:00	6월 24일 16:00	9월 5일 14:00	11월 27일 13:00
MDD 채널	모듈매설위치(cm)	SITE 2			
CH1	7.3	94.7	112.9	87.8	88.2
CH2	22.0	97.5	116.1	90.2	90.8
CH3	52.0	83.8	91.4	75.2	-
CH4	82.0	76.3	-	55.2	64.8

표 3. FWD 현장시험 결과일레(동화페도구간, Site 2)

시험날짜	시간	하중 단계	하중 (kPa)	FWD 표면처짐 (micron)						
				W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
4월 30일	11:00	1	577	115	85	65	49	37	29	22
			585	115	85	66	49	38	29	23
		2	822	173	128	99	75	57	44	36
			825	173	128	99	75	57	44	35
		3	1086	235	177	138	105	80	60	46
			1084	234	176	137	104	79	60	46
	15:00	1	538	128	88	68	49	36	28	20
			562	133	93	70	51	37	29	22
		2	801	199	138	105	78	58	44	35
			797	197	137	104	77	58	44	34
		3	1061	267	188	144	107	81	60	48
			1065	266	188	144	107	80	60	48
	16:00	1	566	143	97	73	53	39	29	23
			545	130	91	68	50	37	28	22
		2	794	199	139	106	78	58	44	35
			794	197	138	105	78	58	44	35
		3	1051	264	187	143	106	79	60	47
			1056	264	188	143	107	80	60	47
	17:00	1	545	127	90	69	50	38	29	22
			553	128	92	69	5	38	29	22
		2	796	194	138	105	77	59	44	35
			799	194	137	105	77	59	44	35
		3	1056	258	186	142	106	80	60	47
			1055	257	185	141	106	79	60	47

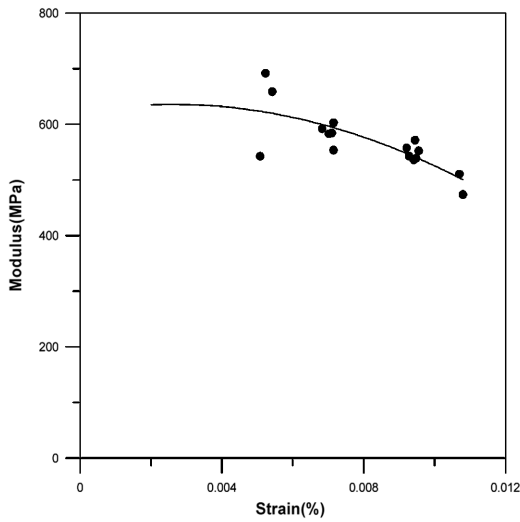


(a) 보조기층

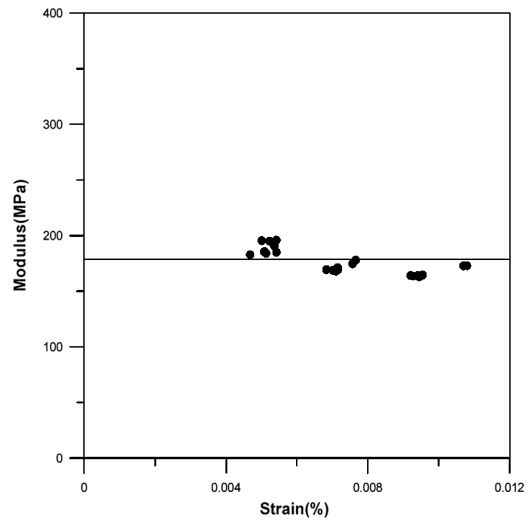


(b) 노상

그림 6. 층별 FWD 적용하중-역산탄성계수 일레(동화페도구간, 1997.4.30)



(a) 보조기층



(b) 노상

그림 7. 층별 역산탄성계수-변형률 일례(동화폐도구간, 1997.4.30)

입상재료층은 계절별 온도분포 변화에 따라 물성이 변화하는 아스팔트층과는 달리 4계절 자료 모두 그림 6과 그림 7에서 보이는 바와 같은 하중-역산탄성계수-변형률의 관계를 보였다. 그림 6의 하중과 탄성계수의 관계로부터 보조기층의 탄성계수는 가해지는 하중의 크기에 영향을 받는 비선형 거동을 보이고, 노상의 탄성계수는 가해지는 하중과 무관하게 일정한 값을 갖는 선형거동을 보임을 알 수 있다. 또한 그림 7의 변형률과 탄성계수의 관계로부터 노상과는 달리 보조기층의 경우 탄성계수가 변형률의 크기에 영향을 받는 비선형거동을 보임을 알 수 있었다. 이는 다양한 두께와 탄성계수 조합의 243개 아스팔트 포장구조체 단면을 대상으로 각 층의 해석모델결정에 대한 수치적 해석결과, 포장하부층인 노상의 경우 기존에 적용되어왔던 선형탄성모델을 사용하고, 보조기층의 경우 내부응력의 영향을 고려한 비선형 탄성모델을 사용한 기존 연구결과와 비슷한 양상을 보였다(최준성, 2003).

3.2 FWD 시험을 통한 비선형 재료상수 추정절차

그림 6 및 그림 7과 같이 보조기층의 경우 FWD 시험결과의 역해석으로부터 산정된 탄성계수가 하중, 변형률의 크기에 영향을 받는 비선형 거동을 나타냄을 알 수 있었다.

본 절에서는 실내 M_R 실험을 통하여 결정되는 재료상수 (K, n)를 현장에서 수집된 FWD 시험자료로부터 산정할 수 있는 절차를 제안하였다. 그리고 이 방법을 적용하여 포장하부층인 보조기층의 지반 내 응력상태를 고려한 비선형 물성을 회귀분석을 통해 산정하였다. FWD 시험을 이용해 비선형 재료상수 및 지반 내 응력상태를 고려한 비선형 물성을 추정하는 전체적인 흐름도를 그림 8에 나타내었다.

3.2.1 탄성계수 추정결과

FWD 시험을 이용한 일반적인 해석방법은 하중단계별로 구한 표면처짐을 $570kPa(5.8kgf/cm^2)$ 등분포하중일 때의 정규화 처짐으로 환산하여 역해석프로그램을 이용하여 탄성계수를 역산하고, 이때의 거동을 분석하였다. 표 4는 DYN-BAL을 이용하여 각 하중 단계별로 탄성계수를 역산한 결과

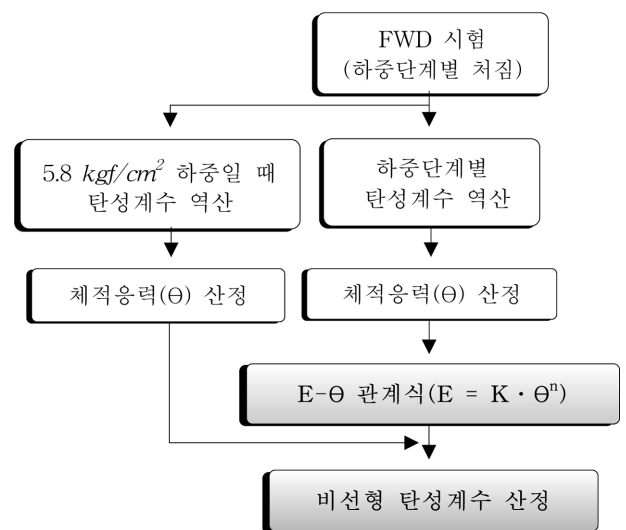


그림 8. FWD 시험을 통한 비선형 재료상수 및 탄성계수 추정절차

와 설계하중인 $570kPa(5.8kgf/cm^2)$ 일 때의 탄성계수를 역산한 결과이다.

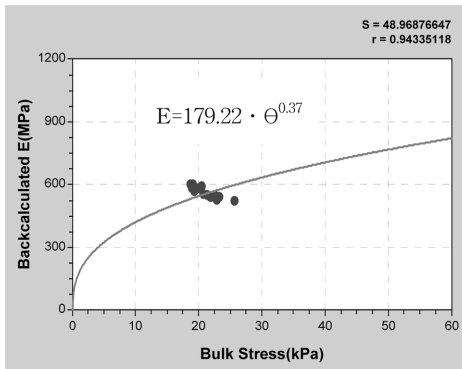
3.2.2 비선형 재료상수와 탄성계수 추정

일반적으로 비선형 재료상수는 현장에서 채취한 재료를 실내 M_R 시험 등을 통해 산정된다. 본 절에서는 시험절차와 시험장치가 복잡한 실내 M_R 시험 대신 그림 8과 같이 FWD 현장시험을 통하여 수집된 자료로부터 회귀분석을 통하여 재료상수를 직접 산정하였다.

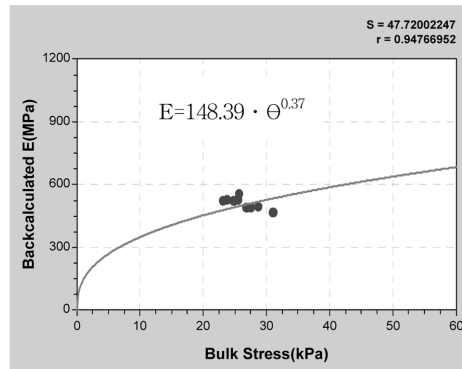
그림 9는 계절별로 실시된 FWD 시험의 각 하중 단계별로 역산된 탄성계수와 체적응력의 관계를 나타낸 것으로, 현재 보조기층 재료모델로 많이 사용되는 $K-\theta$ 모델을 적용하여, $K-\theta$ 모델의 비선형 재료상수 추정과정을 나타낸 것이다. 각 층의 체적응력(θ)은 각 층의 중앙부에서의 값이 층 전체 체적응력을 대표한다고 가정하여, 식 (3)에서 제시한 바와 같이 각 층 중앙부에서의 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 합으로 산정되었으며 모든 하중단계에서 (+) 값이 산정되었다. 국내 실험 자료를 바탕으로 보고된 재료상수의 범위는 전국에 걸쳐 K

표 4. 탄성계수의 역해석 결과 일례 - 봄

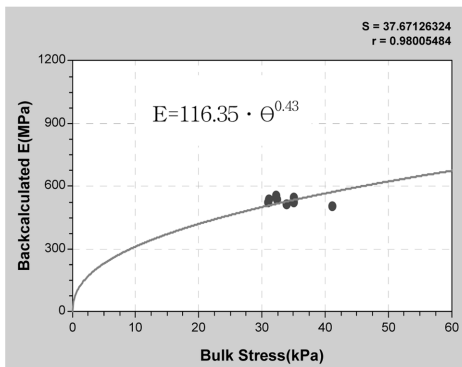
시험날짜	시간	하중단계	하중 (kPa)	탄성계수 역해석 결과(MPa)			
				AC 표층	AC 기층	보조기층	노상
4월 30일	11:00	1	577	7771	5713	659	196
			585	7483	6481	692	195
		2	822	7681	4718	750	175
			825	7201	5635	700	178
		3	1086	6253	10212	474	173
			1084	6521	8794	511	173
	설계하중	570	6831	7353	592	177	
	15:00	1	538	6197	21035	364	195
			562	8209	8842	489	191
		2	801	7295	8591	603	171
			797	7521	8193	603	171
		3	1061	7427	9308	572	163
			1065	7628	9391	552	165
	설계하중	570	7391	9600	558	170	
	16:00	1	566	6226	11609	482	185
			545	8521	7747	543	186
		2	794	7227	9708	554	169
			794	7508	9103	583	169
		3	1051	7540	10004	536	164
			1056	7884	9433	539	164
	설계하중	570	7520	9608	544	169	
	17:00	1	545	7352	12539	524	183
			553	9773	7282	529	184
		2	796	7985	8335	584	168
799			7189	10289	592	169	
3		1056	7892	10033	543	164	
		1055	7914	9795	558	164	
설계하중	570	7538	11272	505	172		



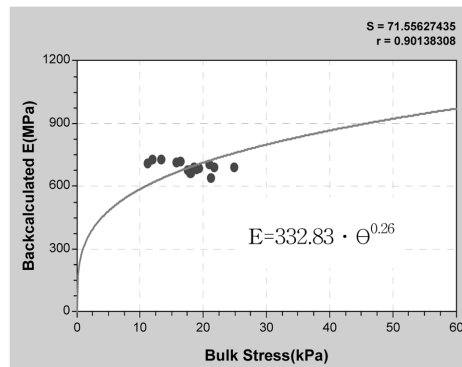
(a) 4월 30일



(b) 6월 24일



(c) 9월 5일



(d) 11월 27일

그림 9. FWD 시험에 의한 보조기층의 체적응력-탄성계수

표 5. 보조기층의 재료상수 산정결과 및 탄성계수 산정(동화폐도)

시험날짜	하중 (kPa)	재료상수		탄성계수(MPa)	
		K(MPa)	n	선형탄성 모델	비선형탄성 모델
4월 30일	570	179.22	0.37	592	564
				558	568
				544	569
				505	579
6월 24일	570	148.39	0.37	502	491
				522	477
9월 5일	570	116.35	0.43	497	505
				478	491
11월 27일	570	332.83	0.26	682	730
				687	707
				671	734
				691	708
				592	763
				514	752

= 100~400MPa, n = 0.1~0.7의 값을 갖는다(한국도로공사, 1997). 그림 8를 통해 결정된 재료상수는 이 범위 내에 위치하기 때문에 이러한 비선형 재료상수 추정방법이 신뢰성이 있는 해석결과를 줄 수 있음을 알 수 있었다. 표 5는

그림 8로부터 산정된 재료상수와 설계하중시의 역산탄성계수(선형탄성모델) 및 재료상수를 고려한 비선형 탄성계수(비선형탄성모델)를 나타낸 것이다.

3.3 현장시험을 통한 신뢰성 검증

본 연구에서 제안한 FWD 시험을 이용한 비선형모델 적용의 신뢰성을 검증하기 위하여 MDD 시험의 실측자료와 비교하였다. 보조기층의 응력상태를 고려한 비선형탄성모델의 검증은 FWD 실험으로 구한 표면처짐을 기존의 5.8kgf/cm² 등분포하중일 때의 정규화처짐으로 환산하여 역해석 프로그램인 DYN-BAL에 의하여 추정된 물성으로부터 산정된 깊이별 처짐과, 그림 8과 같은 방법으로 산정된 비선형 탄성계수로부터 결정된 깊이별 처짐을 MDD 실험에 의한 실측 깊이별 처짐과 비교함으로써 실시하였고, 이 결과를 그림 10에 도시하였다. 표 6은 기존의 선형탄성모델 적용시 산정된 깊이별 처짐과 본 연구에서 제안한 비선형탄성모델 적용시 산정된 깊이별 처짐, 그리고 MDD에 의한 실측 깊이별 처짐을 일례로서 나타낸 것이다.

표 6과 그림 10에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제안한 FWD 시험자료로부터 포장구조체 하부, 즉 보조기층에 비선형탄성모델을 적용한 방법이 기존의 선형탄성모델을 적용한 경우보다 실제 MDD 실측값과 비교할 때 적은 오차를 보임을 알 수 있었다.

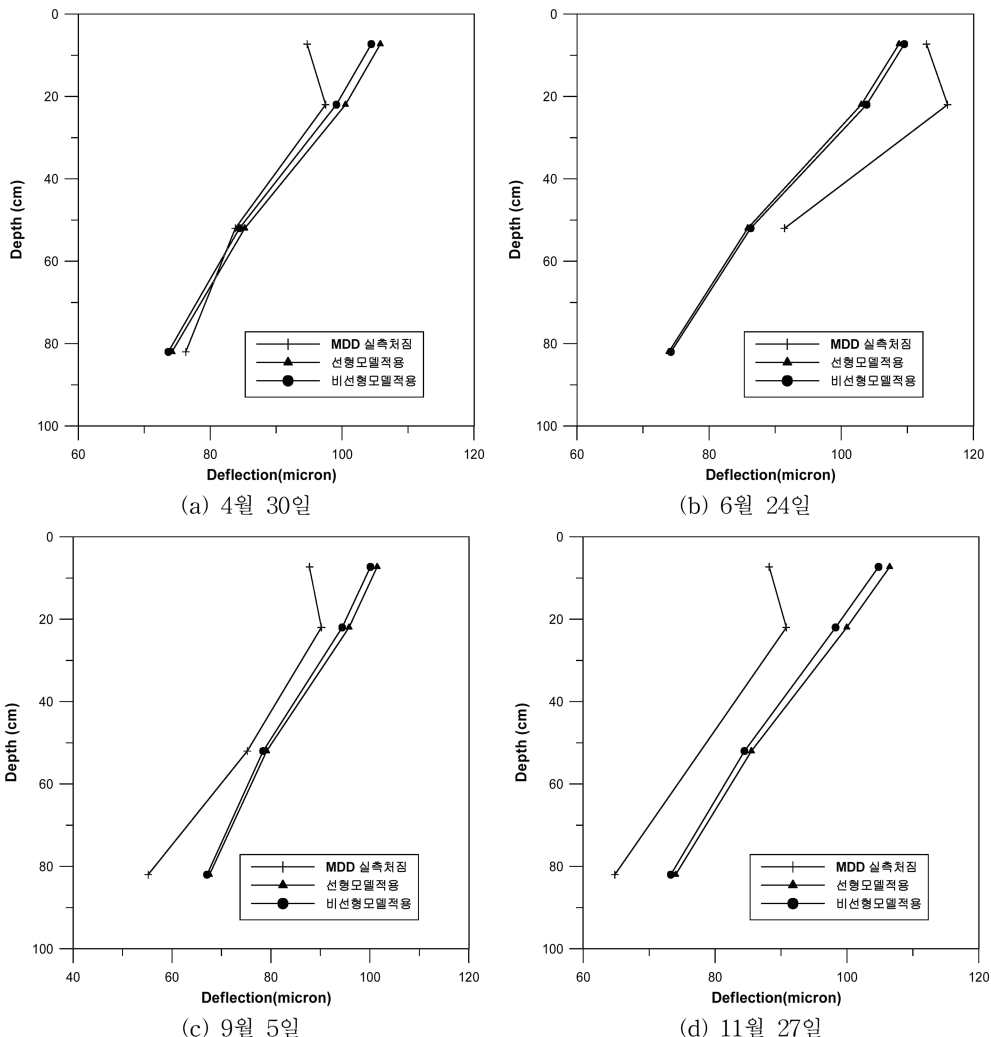


그림 10. 선형모델과 비선형모델 적용 시 깊이별 처짐비교(동화폐도)

표 6. 깊이별 MDD 실측치 및 모델에 따른 해석치(1997년 4월 30일)

MDD 매설깊이 (cm)	실측값 (micron)	선형탄성모델		비선형탄성모델	
		치짐(micron)	상대오차(%)	치짐(micron)	상대오차(%)
7.3	94.7	105.8	11.7	104.4	10.2
22.0	97.5	100.5	3.1	99.1	1.6
52.0	83.8	85.2	1.7	84.4	0.7
82.0	76.3	74.2	2.8	73.7	3.5
상대오차의 평균(%)		-	4.8	-	4.0

4. 결 론

본 연구에서는 포장하부의 다층구조로서의 역학적 거동을 정확히 해석하기 위하여 현재 가장 널리 사용되고 있는 비파괴 시험장비인 FWD를 이용하여 층 재료 자체의 성질을 대변하는 모델 중 포장하부를 구성하는 재료에 대한 비선형 탄성모델의 적용성을 검토하고, 복잡한 실험을 통해 얻게 되는 비선형탄성모델의 구성인자인 재료상수를 FWD 시험자료로부터 추정할 수 있는 방안을 제안하였다.

본 연구에 의한 결론은 다음과 같다.

1. 현장 FWD 시험을 통한 포장하부 재료의 비선형성을 고찰하고, 실내 시험을 통해 결정되는 재료상수를 현장에서 수집된 자료로부터 직접 추정할 수 있는 체계를 제안하였다. 선형거동을 하는 노상의 경우와는 달리 보조기층은 비선형거동을 보이며, 보조기층에서 추정된 비선형 재료상수는 국내 보조기층의 재료상수 범위 내에 있음을 알 수 있었다.
2. 본 연구에서 제안한 FWD 를 이용한 보조기층 재료의 비선형모델 상수 추정기법의 신뢰성을 검증하기 위하여 깊이별 치짐 측정장비인 MDD 시험자료를 이용하였다. MDD 실측치와 해석결과를 비교한 결과, 선형모델을 적용하는 경우에 비해 비선형모델을 적용한 경우가 실측치에 가까운 결과를 보이므로, 본 연구 결과가 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

현재 국내 FWD를 이용한 시험구간은 많으나 실제 물성을 역산하고, 역산된 물성을 검증하기 위하여 MDD 와 같이 내부 거동자료를 얻을 수 있는 계측기가 매설된 현장은 제한되어 있다. 추후 본 연구의 연구결과를 토대로 한국도로공사 시험도로와 같은 LTTP(Long Term Pavement Performance) 구간의 현장도로평가 자료가 데이터베이스화되어 다

양한 현장검증을 통하여 본 기법의 타당성이 입증된다면 비파괴시험장비를 통한 도로평가 시 재료특성을 반영한 역해석 탄성계수로부터 공용성 분석 및 덧씌우기 설계 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부(1988) AASHTO 도로포장 구조설계 지침서, 건설교통부.
 건설교통부(2000) 도로설계편람, 건설교통부.
 권기철(2000) 국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제20권 제3-D호, pp. 301-310.
 권기철, 김동수, 송무효(1999) 국내 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수 특성, 대한토목학회 학술발표회 논문집(IV), 대한토목학회, pp. 133-136.
 이경하, 이광호, 전몽각, 유충식(1996) 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수 추정모델 개발, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp. 5-8.
 이석근(1995) FWD 및 MDD 시험을 이용한 포장거동모델의 검증, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권 제2호, pp. 267-281.
 최준성(1998) 동적표면치짐의 의사정적해석에 의한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정, 박사학위논문, 연세대학교.
 최준성, 서주원(2003) 아스팔트 포장하부구조 층모델 결정에 관한 연구, 한국도로포장공학회 논문집, 한국도로학회, 제5권 4호, pp 13-22
 한국도로공사(1997) 노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_r 시험법 개발에 관한 연구(III), 도로연 97-59-20.
 Uzan, J. (1985) Characterization of granular material, analysis and testing of granular base and subbase, *Transportation Research Board, TRR 1022*, TRB, Washington, D.C., pp. 52-59.
 Witzczak, M. W., Qi, X., and Mirza, M. W. (1995) Use of nonlinear subgrade modulus in AASHTO design procedure, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp. 273-282.
 (접수일: 2006.11.8/심사일: 2007.1.15/심사완료일: 2008.1.17)