

## 현장 탄성계수에 근거한 노상 다짐관리방안 연구

### A Study on Establishing the Subgrade Compaction Control Methods Based on the In-situ Elastic Modulus

최준성 Choi, Jun Seong  
한진석 Han, Jin Seok  
김종민 Kim, Jong Min

정회원 · 인덕대학 토목환경설계과 부교수 · 공학박사 (E-mail : soilpave@induck.ac.kr)  
정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 (E-mail : for1000dayshan@nate.com)  
정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : jongmin@sejong.ac.kr)

#### ABSTRACT

In many countries including Korea, the design concept of pavement structure has been converted from empirical method to mechanistic-empirical method since the advent of compaction control based on resilient modulus proposed by AASHTO in 1986. Studies of last decades indicates that the classical compaction control method based on relative compaction and plate bearing test(PBT) will necessarily move to the methods taking advantage of light falling weight deflectometer(LFWD) and dynamic cone penetrometer(DCP) in addition to PBT. In this study, the validity of resilient modulus prediction equation proposed by Korean Pavement Design Guide is verified by comparison with physical properties of subgrade soil and the results of structural analysis. In addition, correlational equations between elastic modulus measured by various field tests and resilient modulus estimated by empirical model are proposed. Finally, a field test-based compaction control procedure for subgrade is suggested by using proposed correlational equations.

#### KEYWORDS

subgrade, resilient modulus, PBT, LFWD, DCPT, compaction control

#### 요지

1986년 AASHTO 설계법에서 회복탄성계수를 이용한 다짐관리 기법이 제안된 이후, 국내외에서 경험적 설계법에서 역학적-경험적 설계법으로 전환되고 있다. 10여년의 연구결과 노상 다짐관리는 기존의 다짐도와 평판재하시험에서 평판재하시험 및 소형 충격 재하시험, 동적 콘 관입시험으로 전환되어질 예정이다. 본 연구에서는 노상 재료의 물성치와 구조해석을 통해 한국형 도로포장 설계법에서 제시된 회복탄성계수 예측식을 검증하였으며, 실제 평판재하시험, 소형충격재하시험, 동적 콘 관입 시험등의 현장시험을 통해 경험적 모델로 추정된 회복탄성계수와 현장 탄성계수 측정값간의 상관관계식들을 개발하였다. 또한 제안된 상관관계를 이용하여 현장시험을 통한 노상의 다짐관리방안을 제안하였다.

#### 핵심용어

노상, 회복탄성계수, 평판재하시험, 소형 충격 재하시험, 동적 콘 관입시험, 다짐관리

#### 1. 서론

본 연구는 역학적-경험적 설계법의 적용을 위해 포장 하부구조 중 노상재료의 역학적 특성을 이용한 다짐기

준 마련을 위한 연구이다(국토해양부 2006~2009). 노상 재료의 흙 분류 및 함수비, 체 분류에 따른 역학적 특성은 재료 고유의 탄성계수를 나타내며, 연구 전개 편의

에 따라 회복탄성계수, 경험적 모델 탄성계수, 현장 탄성계수로 나누어 연구하였다.

회복탄성계수는 다짐시료를 성형하여 반복재하시험 표준  $M_R$  시험법으로 측정하는 탄성계수이다. 그러나 표준  $M_R$  시험법은 시료성형 조건이 매우 까다롭고, 시험 결과 또한 시험자의 숙련도에 따라 오차가 큰 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 한국형 도로포장설계법에서 제안한 인공신경망 공식(박현일 외, 2005)을 이용하여 회복탄성계수를 산출하였으며, 이를 통해 보다 쉽고, 빠르게 각 현장별 다짐재료의 회복탄성계수를 산출할 수 있었다.

본 연구에서는 인공신경망 공식을 통해 얻은 회복탄성계수와 구분을 위하여 경험적 모델로부터 추정된 경험적 모델 탄성계수라 지칭하였다. 또한 노상 다짐현장에서 평판재하시험, 소형 충격재하시험, 동적 콘 관입시험으로 얻은 탄성계수 값은 현장에서 얻은 탄성계수이므로, 현장 탄성계수라 칭하였다. 현장에서의 다짐관리란 적정 다짐 후에 설계 시 사용된 경험적 모델 탄성계수보다 현장 탄성계수가 크게 나와야 적정 다짐관리가 되는 것이다.

현장 시험은 현재 노상 다짐기준인 다짐도와 평판재하시험 외에 현장에서 탄성계수를 직접 측정할 수 있는 소형 충격재하시험과 동적 콘 관입시험을 실시하였다.

## 2. 경험적 모델 탄성계수 인공신경망 공식 검증

한국형 도로포장설계법에서 제시되어 있는 인공신경망 공식을 이용한 경험적 모델로부터 추정된 경험적 모델 탄성계수를 본 연구에 이용하기에 앞서, 노상 재료의 기초물성 값으로 회복탄성계수가 제대로 구현되는지 여부를 확인하기 위하여 인공신경망 공식을 검증하였다.

검증은 기존연구에서 제시된 국내 7종류의 노상토 반복 재하시험 표준  $M_R$  시험결과를 표 1과 같이 활용하였다(박현일 외 2005, 김지환 외 2008). 표준  $M_R$  시험 기초물성 값은 표 2와 같으며, 본 연구에서는 이를 이용하여 경험적 모델 탄성계수를 산출하여 두 탄성계수 간의 오차를 비교 검토하였다. 이 때 인공신경망 공식에서 요하는 기초물성 값은 최대 건조 단위중량, 최적함수비, 균등계수, 200번체 통과량 등이다.

표 1. 표준  $M_R$  시험을 통한 노상 회복탄성계수

단계	응력상태(kPa)			탄성계수(MPa)						
	구속 응력	축차 응력	체적 응력	SG-1	SG-2	SG-3	SG-4	SG-5	SG-6	SG-7
1	0	14	14	118.9	71.1	55.	60.5	68.1	85.2	133.4
2		28	28	97	58.8	42.9	51	61.9	72.6	95
3		51	51	87.8	55.8	41.1	47.5	58.8	71.3	84.9
4		55	55	78.8	53.8	39	44	59.8	72.9	80.6
5		69	69	77	48.9	37.8	43.2	58.7	73.1	77.6
6	10	14	44	-	-	-	-	-	-	-
7		28	58	-	-	-	-	-	-	-
8		51	81	-	-	-	-	-	-	-
9		55	85	-	-	-	-	-	-	-
10		69	99	-	-	-	-	-	-	-
11	21	14	77	155.9	95.6	90.4	105.4	141.8	106.1	184.9
12		28	91	148.6	49.1	71.4	82.2	115	107.7	153.3
13		51	114	118.7	77.9	66.3	42.5	111.2	103.4	136
14		55	118	109.2	74.1	63.1	69.9	108.1	103.1	125
15		69	132	105	43.9	61.4	65.3	105.8	99.4	121.2
16	41	14	137	173.1	122	103.4	151.5	198.1	147.5	230.2
17		28	151	168.6	103	88.6	110.3	158.2	132.1	186.5
18		51	174	143.2	94	84.8	100.6	144.2	122.7	160.9
19		55	178	129.6	88.9	76.8	89	136	119.2	156.7
20		69	192	124.2	87.2	76.9	83.4	127	113.7	141.5

표 2. 노상 표준  $M_R$  시험 시료의 기초 물성

기초물성	SG-1	SG-2	SG-3	SG-4	SG-5	SG-6	SG-7
OMC (%)	10	7.9	10.3	13.2	8.6	6.2	6.2
$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	2.04	2.15	2.01	1.85	2.08	2.34	2.27
균등계수	7.08	9.27	7.33	-	23.33	16.67	40.74
#4 통과량 (%)	98.4	90.3	89.7	99.4	95.2	70.8	69.1

경험적 모델 탄성계수는 표 3과 같이 구속응력 0, 10, 21, 41kPa 별로 14, 28, 51, 55, 69kPa의 축차응력이 가해져 총 20개의 체적응력 상태에서 탄성계수를 예측하게 된다. 이때 20개의 체적응력 상태 중에서 실제 차량이 유발하는 구속응력과 축차응력을 고려하여 한 개의 체적응력을 지정해 주어야 한다. 이를 위하여, 표 4의 아스팔트 포장 단면을 고려한 모델을 통해 설계차량의 주행속도에 따른 응력범위를 표 5와 같이 범용 유한요소해석으로 산정하였다(김지환 외, 2008). 주행 속도에 따른 국내 도로의 설계속도 0~100km/h를 고려하여 설계 차량으로부터 응력 발생범위가 구속응력 23.65~31.74kPa, 축차응력 32.09~51.05kPa 임을 알 수 있었다.

표 3. 노상 경험적 모델 탄성계수

응력상태(kPa)				탄성계수(MPa)						
단계	구속 응력	축차 응력	체적 응력	SG-1	SG-2	SG-3	SG-4	SG-5	SG-6	SG-7
1	0	14	14	117.4	117.8	117.4	117.3	115.9	116.1	100.4
2		28	28	117.4	117.8	117.4	117.2	115.7	115.9	99.3
3		51	51	117.3	117.7	117.3	117.1	115.5	115.7	97.4
4		55	55	117.3	117.7	117.3	117.1	115.4	115.7	97.1
5		69	69	117.2	117.7	117.2	117	115.3	115.5	95.9
6	10	14	44	117.4	117.8	117.4	117.2	115.7	115.9	98.9
7		28	58	117.3	117.7	117.3	117.1	115.5	115.7	97.7
8		51	81	117.2	117.7	117.2	117	115.2	115.5	95.7
9		55	85	117.2	117.7	117.2	117	115.2	115.4	95.3
10		69	99	117.1	117.6	117.1	117	115	115.3	94
11	21	14	77	117.3	117.7	117.3	117.1	115.4	115.7	97.2
12		28	91	117.2	117.7	117.2	117	115.2	115.5	95.8
13		51	114	117.1	117.6	117.1	116.9	114.9	115.2	93.6
14		55	118	117.1	117.6	117.1	116.9	114.9	115.2	93.2
15		69	132	117	117.6	117	116.8	114.7	115	91.8
16	41	14	137	117.1	117.6	117.1	116.9	114.9	115.2	93.6
17		28	151	117	117.6	117	116.8	114.7	115	91.9
18		51	174	116.9	117.5	116.9	116.6	114.3	114.7	89.3
19		55	178	116.8	117.5	116.8	116.6	114.2	114.6	88.8
20		69	192	116.8	117.4	116.8	116.5	114	114.4	87.2

표 4. 국내 아스팔트 포장단면을 고려한 단면모델

	표층	표층	기층	보조기층	노상	참고사항
두께(cm)	하	5	15	30	-	※ 암반층 : 8m (가정)
	중	10	25	40	-	
	상	20	35	60	-	
탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	하	하중주파수 및 온도 에 따른 탄성계수		K-e 모델을 이용 한 비선형 탄성계수		
	중					
	상					
포아송비	0.3	0.3	0.35	0.4		
단위중량 (kg/cm <sup>3</sup> )	0.00235	0.00235	0.0023	0.00191		
온도(°C)	시험도로 표면온도 : 52.5°C(2004.7.22), -4.5°C(2004.1.3)					
Speed(Km/h)	10, 30, 60, 100					

표 5. 속도에 따른 비구속층 응력범위 산정 결과

응력 종류	층	차량주행속도			
		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h
수직 응력 범위 (kpa)	보조 기층	43.96~228.84	26.64~90.09	19.54~48.89	16.49~37.59
	노상	43.50~51.05	35.52~40.31	32.84~37.56	32.09~36.81
구속압 범위 (kpa)	보조 기층	21.01~88.44	14.06~31.52	10.12~19.92	8.56~16.40
	노상	28.04~31.74	25.21~28.87	24.26~27.92	23.65~26.99

국내도로에서 발생 가능한 구속응력 범위의 중간값과 축차응력 범위의 중간값인 13단계 범위에서 회복 탄성계수와 경험적 모델 탄성계수 값을 표 6과 같이 비교 검증함으로써 인공신경망 공식의 사용성을 확인하였다.

표 6. 노상 회복 탄성계수와 경험적 모델 탄성계수 값의 오차율

	SG-1	SG-2	SG-3	SG-4	SG-5	SG-6	SG-7
표준 M <sub>R</sub> 시험값	118.7	77.9	66.3	42.5	111.2	103.4	136
인공신경망 경험모델 M <sub>R</sub> 값	117.1	117.6	117.1	116.9	114.9	115.2	93.6
오차율(%)	-1.4	51	76.6	175.1	3.3	11.4	-31.2

표 6을 보면 기초물성 값을 이용한 인공신경망 공식이 균등계수가 측정되지 않은 SG-4를 제외하고 SG-1, SG-5, SG-6, SG-7에서 오차율 ±10% 이내의 비교적 정확한 값을 계산하고 있음을 확인하였다. 따라서, 균등계수가 측정되는 모든 현장에서 표준 M<sub>R</sub> 시험을 대신하여 인공신경망 공식으로 경험적 모델 탄성계수를 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

### 3. 노상의 역학적 특성 평가 제안

노상의 역학적 특성을 이용한 다짐관리는 노상 재료 물성치로 얻은 경험적 모델 탄성계수와 노상 다짐 후 현장에서 얻은 현장 탄성계수를 비교하여 설계에서 요구하는 경험적 모델 탄성계수보다 현장 탄성계수가 더 크게 나오는지 여부를 확인하는 방식이다. 현장 탄성계수를 측정하기 위하여 현재 다짐기준인 다짐도 및 평판재하시험 외에 소형 충격재하시험(Light Falling Weight Deflectometer 이하 LFWD)과 동적 콘 관입시험(Dynamic Cone Penetrometer Test 이하 DCPT)을 역학적 특성평가 시험으로 제안하고, 기존 시험 방법들과 동일한 현장에서 실시하였다. LFWD와 DCPT는 현장 시험에 앞서 현장 탄성계수 측정 적용성을 확인하기 위하여 실내 토조시험을 실시하였다.

현장 시험은 한국건설기술연구원의 "LTTP 연구"와 연계하여 총 4개 구간에서 실시하였다. 4종류의 현장측정시험은 동일 지점에서 수행하였으며, 4개의 현장시험 중 중하중 차량 이용으로 인한 시험여건 제약이 가장 큰 평판재하시험 지점을 기준으로 수행하였다. 시험 순서는 LFWD시험, 평판재하시험, DCPT시험, 다짐도 시험 순으로 실시하였다. 다짐도 시험 시 채취한 시료는 실내 시험을 통하여 다짐시험, 함수비 측정 시험, 체 분석 등

의 기초물성 시험을 실시하였으며, 기초물성 값을 인공 신경망 공식에 대입하여 경험적 모델 탄성계수를 산정하였다.

### 3.1. LFWD와 DCPT 실내 토조시험

LFWD와 DCPT의 노상 현장 탄성계수 측정 적용성 평가를 위하여 실내 토조시험을 실시하였다. 시험은 노상토를 토조 내부에서 95% 이상의 상대다짐도로 다짐한 후 LFWD와 DCPT 시험을 같이 시험하였다. 토조는 내경 0.9m, 높이 0.65m, 두께 5mm의 원통형으로 그림 1과 같다(최준성, 2008).



그림 1. 토조 외형

시험에 사용된 노상 시료의 기본 물성값은 표 7과 같다.

표 7. 실내 토조시험 노상 재료 물성치

흙분류	$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	최적함수비(%)
SW	2.13	11.3

LFWD와 DCPT 장비가 현장 적용 적정성을 갖기 위해서는 다음 세가지 조건을 만족하여야 한다. 첫째, 노상 재료의 역학적 특성을 반영하여야 하며, 둘째, 측정값을 신뢰할 수 있도록 동일 재료의 동일 다짐도의 경우 일정한 값을 보여야 한다. 셋째, 국내 노상 1층의 다짐 두께 기준은 완료 후 최대 20cm 이내이므로, 최소 20cm 이상의 다짐 상태 측정이 가능하여야 한다. 이 세가지 조건의 충족 여부를 실내 토조시험을 통하여 검증하였다.

### 3.2. LFWD 적용성 시험 결과

LFWD는 10kg의 추를 낙하시켜 이로 인한 순간 침하량을 측정하여 탄성계수를 산정하는 장비이다. 이때, 낙하 높이와 하중판 지름은 시험자가 임의로 정할 수 있다. 따라서, LFWD 적정성 평가는 임의의 낙하 높이와 임의의 하중판 지름에서 일정한 탄성계수 값이 나오는지 여부를 표 8, 표 9와 같이 확인하였으며, 이와 더불어

어 그림 2와 같이 20cm 다짐 두께마다 토압계를 설치하여 LFWD 충격하중이 20cm 이상 유효한지 여부를 그림 3과 같이 확인하였다.

표 8은 LFWD 하중판을 지름 20cm로 장착한 후 높이 75cm, 50cm에서 낙하시킨 후 측정 값이며, 표 9는 하중판 지름 30cm로 장착한 후 측정된 결과 값이다. 각 높이에서 낙하 횟수는 3회 실시하였으며, 이는 다짐 후 표면이 고르지 못하여 발생할 수 있는 침하량 측정 오류를 방지하기 위하여 3회 실시하였다.

표 8. 지름 20cm 하중판 LFWD 시험 결과

height	Drop	Radius	Load	Stress	deflec.	ELFWD
		mm	kN	kPa	$\mu\text{m}$	Mpa
75cm	1	100	4.9	69	374	50
	2	100	4.9	70	375	
	3	100	4.9	69	379	
50cm	1	100	3.5	50	300	50
	2	100	3.6	51	272	
	3	100	3.6	51	275	

표 9. 지름 30cm 하중판 LFWD 시험 결과

height	Drop	Radius	Load	Stress	deflec.	ELFWD
		mm	kN	kPa	$\mu\text{m}$	Mpa
75cm	1	150	4.9	65	336	49
	2	150	4.9	69	309	
	3	150	4.9	70	313	
50cm	1	150	3.6	51	225	52
	2	150	3.6	51	223	
	3	150	3.6	51	218	

시험결과 추 낙하 높이 및 하중판 지름에 따라 측정되는 응력(stress) 값과 침하량(deflec.) 값은 각기 다르다. 그러나 이를 이용하여 측정된 탄성계수  $E_{LFWD}$ 는 50, 50, 49, 52Mpa로 오차율  $\pm 4\%$  이내로 매우 고른 값을 보였다.

그림 2와 같이 토조 내 토압계를 설치하여 다짐을 한 후 LFWD의 충격하중이 미치는 영향의 깊이를 확인하였다. 시험은 지름 30cm 하중판을 장착한 후 높이 50cm와 75cm에서 추를 낙하시켜 실시하였다. 지름 20cm 하중판은 지름 30cm 하중판 보다 충격 응력값이 크므로 실시하지 않았으며, 시험 결과는 그림 3, 그림 4와 같다.

그림 2의 토압계 1은 그림 3과 4의 토압계 500kpa이며, 토압계 2는 그림 3과 4의 토압계 200kpa이다. 그림 3과 그림 4를 보면 노상 다짐표면에서 40cm 깊이에 위치한 토압계 200kpa에서 측정된 토압 값은 상당

히 미미하다. 그러나 20cm 깊이에 위치한 토압계 500kpa에서 측정된 토압 값은 충격하중의 영향을 받는다고 판단할 수 있을 만큼 매우 뚜렷한 파형을 보였다. 따라서, LFWD 시험은 노상의 역학적 특성인 탄성계수를 측정할 수 있으며, 추 낙하 높이 및 하중판 지름과 상관없이 일정한 탄성계수 값을 측정할 수 있다. 또한, 현재 노상 1층 다짐 두께인 20cm 전체를 충격하중 영향을 주어 탄성계수를 산출할 수 있는, 현장 탄성계수 측정에 매우 유용한 시험임을 확인하였다.

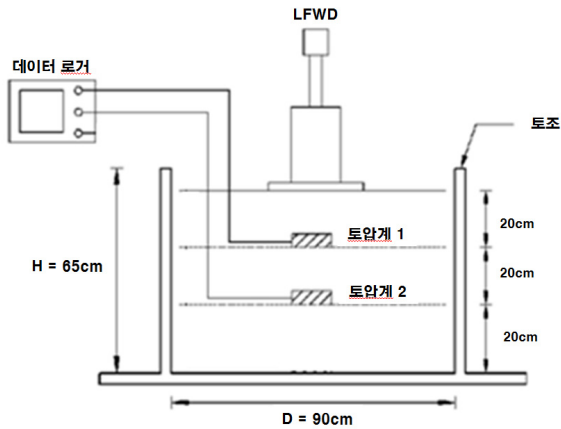


그림 2. 토조 외형

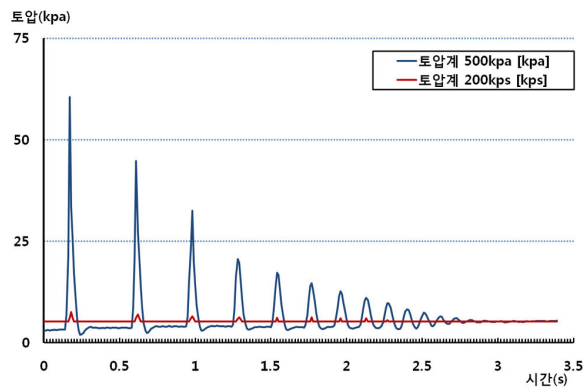


그림 3. 높이 75cm 낙하 토압 영향

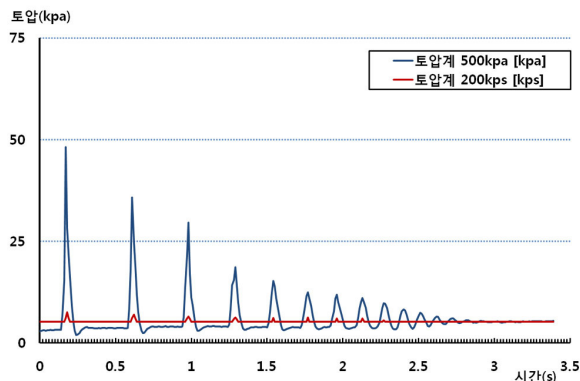


그림 4. 높이 50cm 낙하 토압 영향

### 3.3. DCPT 적용성 시험 결과

DCPT는 8kg의 헤머의 충격하중으로 노상 표면을 콘으로 관입시켜 관입량을 측정하는 시험이다. 콘 관입은 최대 1m까지 가능하며, 총 관입량을 총 타격 횟수로 나누어 평균 관입량을 계산하거나, 타격 횟수별 관입량을 개별적으로 계산하여 노상의 다짐도 및 노상 깊이별 상태를 확인할 수 있다.

그림 5는 각 타격별로 DCPT의 관입량을 정리한 결과이다. 동일 노상 재료를 이용하여 95% 이상의 다짐도로 다졌으므로 DCPT 관입량 변화 추이 및 30회 이전의 타격 당 관입량 범위 역시 약 10mm에서 20mm 사이로 동일한 경향을 보인다. 타격당 관입량이 약 10mm 정도의 범위를 보이는 것은 노상 재료의 크기가 일정하지 않기에 DCPT 콘 관입에 대한 저항도가 깊이 및 관입 위치별로 틀리기 때문이다. 또한, 30회 이상에서 급격하게 관입량이 큰 이유는 다짐 레머로 다짐 시 토조 바닥에서 반사되는 충격파에 의한 시료의 교란 때문이다. 그리고, 마지막 타격에서 관입량이 급격히 떨어지는 것은 DCPT 콘 끝이 토조 밑바닥에 닿았음을 의미한다.

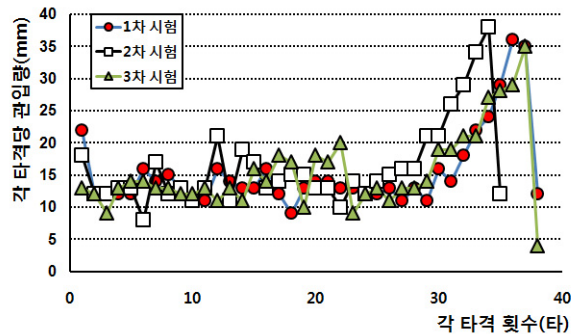


그림 5. DCPT 각 타격당 관입량

그림 6은 그림 5의 데이터를 누적 관입량으로 변환한 그래프이다. 누적 관입량 그래프는 그래프의 기울기 변화를 통해, 노상 깊이별 탄성계수 및 다짐 상태 변화를 보다 쉽게 파악할 수 있다. 그림 6에서는 노상 재료의 입도 분포가 토조내에서 고르게 분포되었음을 알 수 있으며, 타격 횟수 30회 이하, 관입 깊이 400mm 이하에서 다짐이 고르게 이루어졌음을 알 수 있다.

두 그래프 그림 5와 그림 6을 통하여 DCPT는 노상의 현장 탄성계수 변화 및 깊이별 다짐 상태 측정이 유용한 시험임을 알 수 있다. 또한, DCPT의 콘 관입은 최대 1m까지 가능하므로, 노상 다짐 높이 기준인 20cm 내에서 현장 탄성계수 측정이 가능함을 알 수 있다.

따라서, LFWD와 DCPT의 노상 다짐 현장 탄성계수 측정 적용성을 확인하였다.

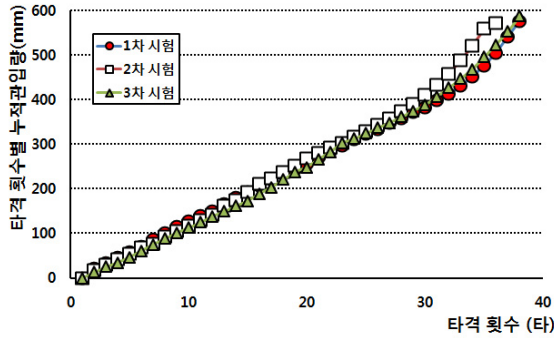


그림 6. DCPT 타격 횟수별 누적 관입량

#### 4. 현장시험을 통한 상관관계식 제안

노상의 탄성계수를 이용한 역학적 다짐관리 일원화를 위해서는 노상 재료의 경험적 모델 탄성계수와 현장에서 측정되는 현장 탄성계수를 직접 비교할 수 있어야 한다. 따라서 현재 다짐기준인 다짐도와 평판재하시험 결과로부터 경험적 모델 탄성계수와의 관계를 정립하거나 정립이 어려운 경우 직관적 현장 탄성계수 측정 장비가 필요하다. 본 연구에서는 다짐도 및 평판재하시험 결과와 경험적 모델 탄성계수와의 상관관계를 비교·분석하였다. 또한 직관적 현장 탄성계수 측정 장비인 LFWD 시험과 DCPT 시험을 추가로 실시하였다. 시험 자료 분석 결과 경험적 모델 탄성계수는 최적화된 시료 성형을 가정하여 인공신경망 공식으로 산정하고, 현장 탄성계수는 불규칙적인 다짐도와 일원화되지 않은 노상 재료에서 측정하는 것으로, 직관적인 비교가 될 수 없었다. 시험여건에 따른 경험적 모델 탄성계수와 현장 탄성계수의 직접적인 비교가 불가하므로 본 연구에서는 경험적 모델 탄성계수와 현장 탄성계수와의 상관관계를 비교·분석하고, 상관관계식을 이용한 다짐관리 지침을 작성하였다. 분석된 상관관계식에 경험적 모델 탄성계수를 대입하여 얻은 현장관리 기준값을 각각 설계  $K_{30}$ , 설계  $E_{LFWD}$ , 설계 DCPT PR이라 지칭하였다.

##### 4.1. 경험적 모델 탄성계수와 다짐도 상관관계 분석

경험적 모델 탄성계수와 현재 노상 다짐기준인 다짐도의 상관관계를 분석하였다. 상관관계 분석 결과 경험적 모델 탄성계수와 다짐도 상관관계는 그림 7과 같이 결정계수  $R^2$  값 0.03 이하로 매우 낮은 상관관계를

보였다. 이는 경험적 모델 탄성계수가 노상 재료의 역학적 특성을 나타내는 물성치지만, 다짐도는 재료적 특성이 아닌 모든 노상 재료의 획일적 기준이기 때문이다. 따라서, 다짐도는 현장 탄성계수 측정을 위한 현장 시험 방법으로 부적합함을 알 수 있다.

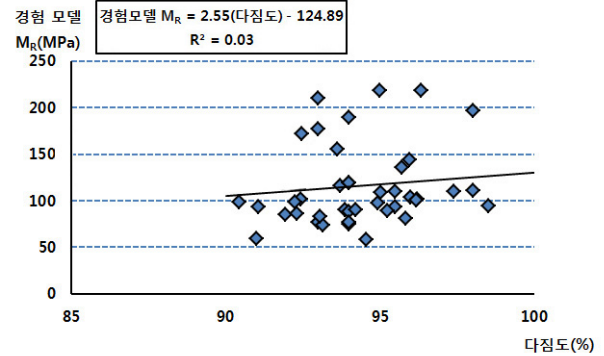


그림 7. 경험적 모델 탄성계수와 다짐도 상관관계

그러나, 다짐도 95% 이상은 반복재하시험 표준  $M_R$  시험에서 시료 성형조건이며, 현장에서 시료가 가지는 최대 탄성계수를 발휘하기 위해 다짐도 95% 이상을 만족하여야 한다(최준성 외, 2011). 따라서, 다짐도는 탄성계수를 이용한 역학적 다짐관리에서도 다짐관리 기준이 아닌 현장 탄성계수의 정확한 측정을 위한 다짐 품질 기준으로 필요함을 알 수 있다.

##### 4.2. 경험적 모델 탄성계수와 $K_{30}$ 상관관계 분석

평판재하시험은 연직 하중에 따른 노상의 탄성 침하량을 측정하는 시험으로 현장 탄성계수 측정에 적합함을 직관적으로 알 수 있다. 이를 증명하기 위하여 현장 시험을 실시하였다. 평판재하시험 후에는 시험 지점 시료를 이용하여 인공신경망 공식으로 경험적 모델 탄성계수를 산출하였다.

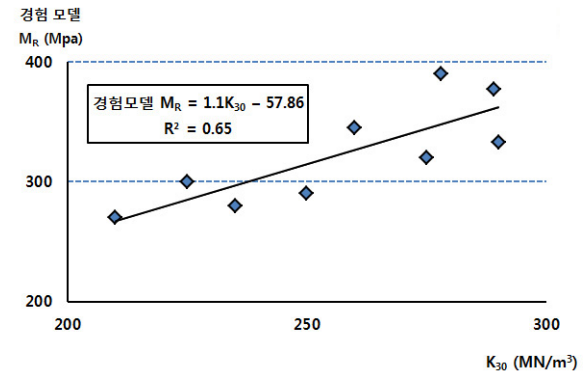


그림 8. 경험적 모델 탄성계수와  $K_{30}$  상관관계

그림 8의 경험적 모델 탄성계수와  $K_{30}$ 의 상관관계 분

석으로부터 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} \text{설계 } M_R &= 1.1 K_{30} - 57.86 \\ R^2 &= 0.65 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $M_R = \text{Mpa}$

$$K_{30} = \text{MN} / \text{m}^3$$

현재 노상  $K_{30}$  값 기준은 아스팔트 콘크리트의 경우 196.1MN/m<sup>3</sup>이며, 시멘트 콘크리트의 경우 147.1MN/m<sup>3</sup>이다. 이를 그림 8의 상관관계식 식 (1)에 대입하면 아스팔트 콘크리트의 경우 경험적 모델 탄성계수 값은 157.79Mpa 이상 나와야 하며, 시멘트 콘크리트의 경우 경험적 모델 탄성계수 값은 103.89Mpa 이상 나와야 한다. 그러나, 노상 재료에 따라서는 157.79Mpa 이 안되는 경우가 발생하므로 이 기준을 적용 시 사용할 수 없는 재료들이 발생한다. 따라서, 현재 일률적인 기준값 적용보다는 경험적 모델 탄성계수에 근거하여 현장에서 사용하는 재료에 대한 다짐관리가 필요하다. 노상에서 평판재하시험을 이용한 현장 탄성계수와 경험적 모델 탄성계수를 다짐관리에 적용한다면 이는 그림 9와 같은 단계로 적용할 수 있다.

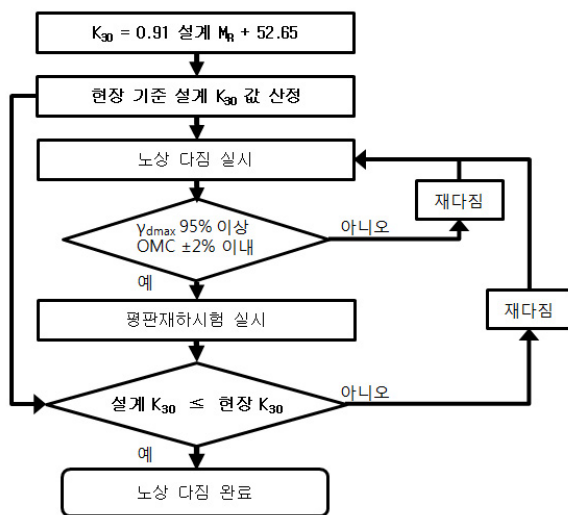


그림 9. 평판재하시험을 이용한 노상 다짐관리 제안

먼저, 노상 재료의 기본물성 값으로 계산된 경험적 모델 탄성계수 값을 이용하거나 포장설계에서 요구하는 설계 탄성계수 값을 식 (2)에 대입하여 현장기준 설계  $K_{30}$  값을 결정한다.

$$K_{30} = 0.91 \text{설계 } M_R + 52.65 \quad (2)$$

여기서,  $M_R = \text{Mpa}$

$$K_{30} = \text{MN} / \text{m}^3$$

둘째, 다짐품질관리 기준인 다짐도 95% 이상 지점에서 평판재하시험을 실시하여 현장  $K_{30}$  값을 측정한다. 셋째, 현장  $K_{30}$  값과 설계  $K_{30}$  값을 비교하여 현장  $K_{30}$  값이 더 큰 경우 경험적 모델 탄성계수가 요구하는 탄성계수를 현장에서 만족하였음을 확인한다.

### 4.3. 경험적 모델 탄성계수와 $E_{LFWD}$ 상관관계

현재 다짐관리 기준인 다짐도와 평판재하시험 외에 현장 탄성계수를 직접 측정할 수 있는 소형 충격재하시험기를 현장에서 시험하였다. 소형 충격 재하시험은 평판재하시험과 마찬가지로 연직 하중에 따른 침하량을 측정하여 탄성계수를 환산하는 시험이다. 그러나 평판재하시험은 정적 하중에 의한 침하량을 측정하며, 소형 충격재하시험은 동적 하중에 의한 침하량을 측정하는 차이점이 있다. 이 외에 평판재하시험은 약 10ton 가까이 되는 중하중으로 시험이 실시되어, 경사 및 구배가 있는 구간에서 시험자 안전상의 위험이 있으며, 시험 장비 설치 및 시험 과정상의 소요 시간이 1시간 가까이 걸리는 단점이 있다. 그러나 소형 충격재하시험은 10kg~20kg의 작은 하중으로 탄성계수를 측정하므로 안전도가 높으며, 장비의 이동이 수월하다. 또한 장비 설치 및 시험이 간편하여 소요 시간 10분 이내로 매우 경제적인 시험법이다(최준성 외, 2009).

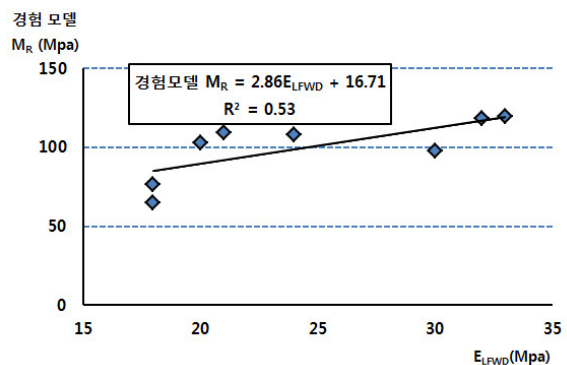


그림 10. 경험적 모델 탄성계수와  $E_{LFWD}$  상관관계

노상 재료의 기초 물성값을 이용한 경험적 모델 탄성계수와 현장에서 소형 충격재하시험으로 얻은 현장 탄성계수  $E_{LFWD}$  간의 상관관계 분석 결과는 그림 10과 같다.

경험적 모델 탄성계수와 소형 충격재하시험  $E_{LFWD}$  간의 상관관계식 (3)을 식(1)과 비교하면 현장 탄성계수의 계수 값이 약 2배 더 크다.

$$\begin{aligned} \text{설계 } M_R &= 2.86 E_{LFWD} + 16.71 \\ R^2 &= 0.53 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $M_R = Mpa$   
 $E_{LFWD} = Mpa$

이는 소형 충격재하시험이 평판재하시험보다 탄성계수 측정에 더 민감하다고 말할 수 있으며, 현장 시험시 탄성계수 측정에 영향을 줄 수 있는 인자들에 대한 주의가 필요함을 뜻한다. 주의해야 할 인자들로는 시험 지면의 평탄화 유지 및 시험 시 장비의 고정 유지 등이 있다 (한진석 외, 2010).

식 (3)을 적용하여 소형 충격재하시험의 현장 탄성계수와 경험적 모델 탄성계수를 이용한 노상 다짐관리 지침은 그림 11과 같은 과정으로 이루어진다.

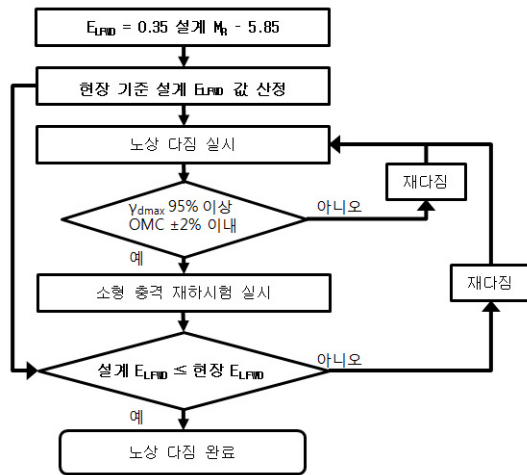


그림 11. LFWD를 이용한 노상 다짐관리 제안

먼저, 노상 재료의 기본물성 값으로 계산된 경험적 모델 탄성계수 값을 이용하거나 도로설계에서 요구하는 설계 탄성계수 값을 식 (4)에 대입하여 현장기준 설계  $E_{LFWD}$  값을 결정한다.

$$E_{LFWD} = 0.35 \text{설계 } M_R - 5.85 \quad (4)$$

여기서,  $M_R = Mpa$   
 $E_{LFWD} = Mpa$

둘째, 다짐품질관리 기준인 다짐도 95% 이상 지점에서 소형 충격재하시험을 실시하여 현장  $E_{LFWD}$  값을 측정한다. 셋째, 현장  $E_{LFWD}$  값과 설계  $E_{LFWD}$  값을 비교하여 현장  $E_{LFWD}$  값이 더 큰 경우 설계 탄성계수가 요구하는 탄성계수를 현장에서 만족하였음을 확인한다.

#### 4.4. 경험적 모델 탄성계수와 DCPT PR 상관관계

소형 충격재하시험과 더불어 현재 다짐관리 기준인 다짐도와 평판재하시험 외에 현장 탄성계수를 직접 측정할 수 있는 동적 콘 관입시험을 현장에서 시험하였다. 동적 콘 관입시험은 연직 하중에 의해 시험이 이루어지지만 노상의 관입도를 측정하는 파괴형 시험이라는 점에서 소형 충격재하시험 및 평판재하시험과 다르다. 시험 장비가 가볍고, 시험 장비 및 시험법이 간편하여 소요시간이 적고, 시험조건 및 시험여건에 따른 제약이 거의 없는 장점이 있다. 그러나, 파괴형 시험으로 인하여 시험 장비의 관입력보다 저항력이 큰 골재가 함유된 노상 재료의 경우 정확한 관입도 측정이 어려운 단점이 있다(한진석 외, 2010). 그러나, 간편한 시험법과 소형 충격재하시험 및 평판재하시험에 비해 상대적으로 매우 저렴한 시험 장비이기에 시험이 가능한 구간에서 현장 시험을 실시하였다.

경험적 모델 탄성계수와 DCPT PR 간의 상관관계를 분석한 결과는 그림 12와 같다.

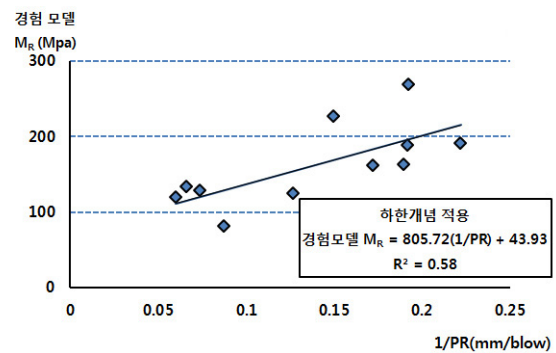


그림 12. 경험적 모델 탄성계수와 DCPT PR 상관관계

상관관계 분석 결과인 식 (5)를 보면, 식 (1) 및 식 (3)과 달리 현장 탄성계수 값이 경험적 모델 탄성계수와 반비례 관계이다.

$$\begin{aligned} \text{설계 } M_R &= 805.72 \left( \frac{1}{DCPT PR} \right) + 43.93 \\ R^2 &= 0.58 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $M_R = Mpa$   
 $DCPT PR = mm / blow$



이는 관입도가 작을수록 현장 탄성계수 값이 클을 의미한다. 또한 제안된 관계식 (5)는 기존 연구에서 제시된 관계식(김부일 외, 2006)과 비교 시 동일한 현장시험값에서 비슷하거나 안전측의 설계값을 추정함을 알 수 있다. 식 (5)를 적용하여 경험적 모델 탄성계수와 DCPT PR의 현장 탄성계수를 이용한 다짐관리 매뉴얼은 그림 13과 같은 과정으로 이루어진다.

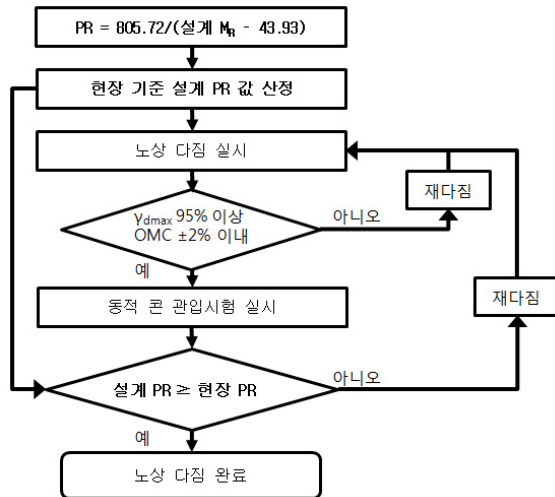


그림 13. DCPT를 이용한 노상 다짐관리 제안

첫째, 노상 재료의 기본물성 값으로 계산된 경험적 모델 탄성계수 값을 이용하거나 도로설계에서 요구하는 설계 탄성계수 값을 식 (6)에 대입하여 현장기준 설계 DCPT PR 값을 결정한다.

$$DCPT PR = 805.72 / (\text{설계 } M_R - 43.93) \quad (6)$$

여기서,  $M_R = M_{pa}$

$$DCPT PR = mm / blow$$

둘째, 다짐품질관리 기준인 다짐도 95% 이상 지점에서 동적 콘 관입시험을 실시하여 현장 DCPT PR 값을 측정한다.

셋째, DCPT PR 값은 노상의 탄성계수가 높을수록 관입량은 적어진다. 따라서 현장 DCPT PR 값과 설계 DCPT PR 값을 비교하여 현장 DCPT PR 값이 더 작은 경우 경험적 모델 탄성계수가 요구하는 탄성계수를 현장에서 만족하였음을 확인한다.

## 5. 결론

본 연구는 현재 경험적 설계법인 다짐도와 평판재하시험을 역학적-경험적 설계법으로 전환하고자 현장 탄성계수 측정에 적합한 시험법 여부를 확인하고, 이와 더불어 현장 탄성계수 측정법으로 알려져 있는 소형 충격재하시험과 동적 콘 관입시험을 추가 수행하여 경험적 모델 탄성계수와 상관을 분석하였다. 현장 시험을 통한 상관관계분석 및 연구 결과는 다음과 같다.

- 회복 탄성계수를 측정하는 반복재하시험 표준  $M_R$  시험은 시험 시료 성형의 어려움과 시험자의 숙련도에 따른 결과 값 오차가 큰 단점으로 인하여 한국형 포장 설계법에서 제시한 인공신경망 공식을 이용하여 경험적 모델 탄성계수를 산정하였다. 이를 위해 시험된 회복 탄성계수와 산정된 경험적 모델 탄성계수의 오차율을 분석하여 경험적 모델 탄성계수 사용이 가능함을 알았다.
- 실내 토조시험을 실시하여 소형 충격재하시험과 동적 콘 관입시험의 현장 탄성계수 측정 시험 적정성을 평가하였다. 두 시험 모두 노상의 역학적 특성을 나타내며, 동일 조건에서 일관된 탄성계수를 측정하고, 노상 다짐두께 최대 20cm를 측정할 수 있음을 확인하였다.
- 현장시험 결과 다짐도는 노상 재료의 일률적인 기준으로 다짐 재료 교유의 역학적 특성을 측정하지 못함을 확인하였으나, 다짐도 95% 이상은 최적의 현장 탄성계수를 측정하는데 있어 필요조건이므로 다짐관리 기준이 아닌, 다짐품질 기준으로 제시하였다.
- 평판재하시험과 소형 충격재하시험은 연직하중에 의한 침하량을 측정하여 탄성계수를 추정하므로, 현장 탄성계수 측정에 적합한 시험법이다. 이에 경험적 모델 탄성계수와 현장 탄성계수  $K_{30}$ ,  $E_{LWD}$  값 간의 상관관계를 분석하였으며, 이를 바탕으로 평판재하시험 및 소형 충격재하시험을 이용한 다짐관리 매뉴얼을 작성하였다.
- 동적 콘 관입시험은 연직하중에 의한 침하량을 측정하지만, 관입에 의한 파괴형 측정법으로 관입력보다 저항력이 큰 골재가 함유된 노상에서는 정확한 측정이 어려운 단점이 있다. 그러나, 간편한 시험법과 상대적으로 매우 저렴한 시험장비 가격이 장점이어서, 시험 가능한 구간에서 현장 시험을 실시하여 경험적 모델 탄성계수와 현장 탄성계수 DCPT PR과의 상관관계를 분석하였다. 분석된 상관관계를 바탕으로

탄성계수를 이용한 노상 다짐관리 매뉴얼을 작성하였다.

본 연구결과는 추후 보다 다양한 노상 현장시험을 실시하여 제안된 상관관계식들의 신뢰성을 높여야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 국책연구과제인 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 결과로 이에 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

한국형 도로포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구 (2006, 2007, 2008, 2009) “C 도로포장 하부구조 다짐관리 지침개발 연구”  
국토해양부(2009) “도로공사 표준 시방서”, 2009  
박현일, 권기철, 오세봉(2005) “인공신경망 모델에 근거한

노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수 추정”, *대한토목학회 논문집*, 제25권 제2호, pp. 61~71

김지환, 강병준, 이준환, 최준성(2008) “응력의존성을 고려한 보조기층 해석모델 개발”, *대한토목학회 논문집*, 제28권 제3D호, pp. 331~338

최준성(2008), “실내 및 현장시험을 통한 DCPT의 노상토 다짐관리기준 정립에 관한 기초연구”, *한국도로학회 논문집*, 제10권 제4호, pp. 103~116

최준성, 김종민, 김부일, 한진석(2009) “노상 및 보조기층의 소형 충격 재하시험 활용방안 연구”, *한국도로학회 논문집*, 제11권 제2호, pp. 85~98

최준성, 김종민, 한진석, 김부일(2011) “현장 탄성계수에 근거한 보조기층 다짐관리방안 연구”, *한국도로학회 논문집*, 제13권 제1호, pp. 33~40

한진석, 최준성, 김종민, 김부일(2010) “탄성계수에 근거한 포장 하부구조 다짐관리 정립”, *한국도로학회 학술대회 논문집*, pp. 21~26

김부일, 전성일, 이문섭(2006) “동적 콘 관입시험의 현장적용성 평가를 위한 현장 지지력시험 상호 비교 연구”, *한국도로학회 논문집*, 제 8권 제4호, pp.75~85

(접수일 : 2012. 4. 24 / 심사일 : 2012. 4. 25 / 심사완료일 : 2012. 5. 22)