



# 노상 및 보조기층의 평판재하시험 대체를 위한 소형충격재하시험 활용방안 연구

## A Study for Using Method of The Plate Load Test with The Light Falling Weight Deflectometer in Subbase and Subgrade

김종민\*      최준성\*\*      한진석\*\*\*      문성호\*\*\*\*  
 Kim, Jong Min      Choi, Jun Seong      Han, Jin Seok      Mun, Seong Ho

### 1. 서론

현재 우리나라에서 시행되고 있는 노상토 및 보조기층의 다짐기준은 평판재하시험 기준을 따르고 있다. 그러나 평판재하시험을 위해서는 10ton 이상의 중하중 차량이 필요하며, 하중에 따른 시간별 침하량을 측정하기 위해 한 지점에서 1시간 이상 소요시간이 필요한 단점이 있다. 또한, 중하중 차량의 접근성이 용이하지 못한 교대 및 터널 내 구간에서는 평판재하시험 수행에 제약을 받고 있다. 이러한 평판재하시험에 따른 비용 및 간편성, 신속성, 접근성의 단점을 보완하고자, 보조기층의 회복탄성계수를 측정할 수 있으며, 적은 비용으로 간편하고 신속하게 시험을 수행할 수 있고, 이동이 수월하여 접근성이 용이한 시험법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 평판재하시험을 보완 대체할 수 있는 시험법으로 소형 충격 재하시험 (Light Falling Weight Deflectometer 이하 LFWD)을 제안하였으며, 이를 이용한 노상과 보조기층의 다짐관리 가능 여부 및 평판재하시험과의 상관관계를 이용한 평판재하시험 보완 시험법으로서의 기초 연구를 소개하고자 한다.

### 2. LFWD 소개

LFWD는 10~20kg의 추를 90cm 이하의 높이에서 자유낙하시켜 얻은 충격량으로, 지반의 변위량을 측정하여 회복탄성계수 (Resilient Modulus 이하 MR)를 환산하는 장비이다.

#### 2.1 LFWD의 외형

LFWD는 <그림 1>과 <그림 2>에서 보는바와 같이 한사람만으로도 실험이 가능한 소형, 경량의 장비이다.



<그림 1> LFWD 외형

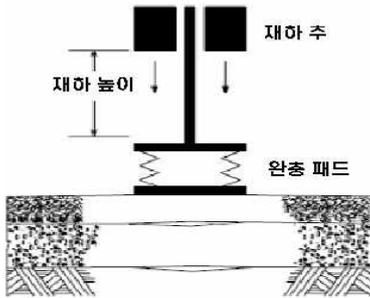


<그림 2> LFWD 외형 및 실험전경

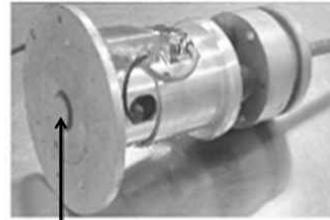
\* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · 02-3408-3293 (Email : jongmin@sejong.ac.kr)  
 \*\* 정회원 · 인덕대학 건설환경설계과 교수 · 공학박사 · 02-950-7565 (Email : soilpave@induk.ac.kr)  
 \*\*\* 학생회원 · 세종대학교 토목환경공학과 · 박사과정 · 02-464-0716 (Email : for1000dayshan@nate.com)  
 \*\*\*\* 정회원 · 도로교통기술연구원 책임연구원 · 공학박사 · 031-371-3360 (Email : smun@freeway.co.kr)

## 2.2 LFWD의 기본원리

LFWD는 <그림 3>에서 보는 바와 같이 재하 추의 자유낙하 에너지로 지반의 탄성침하량을 <그림 4>에 보이는 geophone을 이용하여 측정하고 데이터로거를 이용하여 MR값으로 환산한다.



<그림 3> LFWD의 기본원리



Geophone

<그림 4> LFWD의 Geophone

측정된 탄성침하량은 Timoshenko의 탄성이론을 이용하여 MR 값으로 계산하며, 이는 식 (1)과 같다.

$$\frac{q_d}{w_d} \gamma \frac{\pi}{2} (1 - v^2) \quad (1)$$

여기에서,  $E$ 는 탄성계수,  $q_d$ 는 하중판에 작용한 응력,  $w_d$ 는 처짐,  $v$ 는 포아송비,  $\gamma$ 은 하중판의 반지름을 의미한다.

덴마크 Dynatest사에서 제공하는 Dynatest 3031 LFWD 매뉴얼에 따르면, LFWD로 측정되는 회복탄성계수 값은 다짐 재료에 따라 범위를 달리하며, 대체적인 범위는 <표 1>과 같다. 본 연구에서는 국내 노상 및 보조기층의 실내 토조시험을 실시하여 LFWD 시험특성 분석과 다짐 재료에 따른 회복탄성계수를 비교분석하고자 한다.

<표 1> 재료별 회복탄성계수 범위

재 료	탄성계수 범위
부드러운 진흙	1 ~ 20 Mpa
단단한 진흙	20 ~ 50 Mpa
모 래	30 ~ 70 Mpa
자 갈	60 ~ 200 Mpa

## 3. LFWD를 이용한 토조 실내 시험

토조 실내 시험은 LFWD의 하중판 지름 및 하중판 높이에 따른 응력 변화가 ELFWD에 미치는 영향을 확인하고자 실시하였다. 이를 위해 본 실내 시험에서는 SW 계열의 노상 및 GW 계열의 보조기층 재료를 이용하여 LFWD 10kg 하중에 하중판 지름을 30cm, 20cm 두 지름으로 시험하였으며, 높이는 각기 50cm, 75cm로 조절하여 시험하였다.

### 3.1 실내시험 방법

실내 토조 시험에 앞서 노상 및 보조기층 재료의 다짐시험으로 최대건조단위 증량과 최적함수비를 구하고, 최적함수비  $\pm 2\%$ 가 되도록 시료를 준비하여 밀폐된 통에 24시간 이상 보관한다. 토조는 LFWD의 경계조건을 고려한 하중판 지름 30cm 2배 이상인 지름 90cm, 높이 65cm 인 철제 원형토조를 제작하였으며 <그림 5>, <그림 6>과 같이 보조기층 시험에서는 토조 내에 노상토를 다짐 두께 20cm로 깔고, 그 위에 보조기층 다짐규정에 맞게 다짐두께 15cm로 2층 다짐을 하였다.

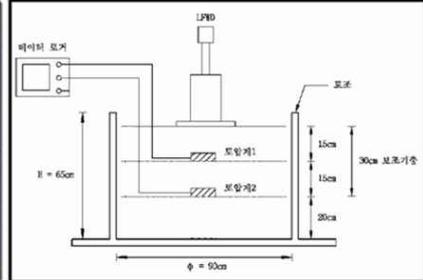


노상 재료의 시험에서도 토조 내에 노상토를 다짐 두께 20cm로 깎 후, 노상토의 다짐두께 15cm로 2층 다짐 하였다.

〈그림 6〉에서 보이는 노상토와 1층 보조기층(혹은 노상토) 사이 그리고, 1층 보조기층(혹은 노상토)과 2층 보조기층(혹은 노상토) 사이에 위치한 토압계는 LFWD 충격하중의 깊이에 따른 영향을 파악하기 위하여 삽입하였으며, 이 토압계는 데이터로거를 이용하여 충격하중 측정 및 데이터를 저장하였다. 또한 LFWD 본체의 Geophone 외에 중심에서 23cm, 35cm 떨어진 지점에 Geophone 2, 3을 추가 연결하여 충격하중에 따른 침하량 및 ELFWD를 측정하였다.



〈그림 5〉 토조 외형



〈그림 6〉 토조 내 보조기층 다짐

### 3.2 실내시험 결과

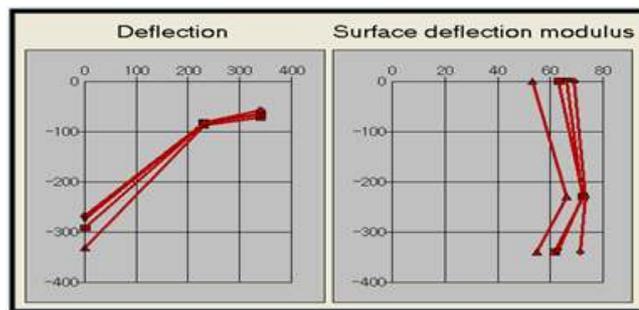
#### 3.2.1 토조 내 노상토, 보조기층 LFWD 탄성계수(ELFWD) 측정 결과

토조 시험에 사용되는 노상토 및 보조기층의 기본 물성치를 파악하기 위하여 체분석 및 다짐 시험을 실시하였으며 그에 따른 흙분류와 최대건조단위중량 및 최적함수비는 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 노상토 및 보조기층의 기본 물성치

구 분	흙분류	$\gamma_{dmax} (t/m^3)$	최적함수비(%)
노상토	SW	2.13	11.3
보조기층	GW	2.35	5.4

노상토 및 보조기층 재료를 이용하여 토조내에서 LFWD 시험을 실시하면, 〈그림 7〉과 같은 결과를 얻을 수 있다. 〈그림 7〉은 LFWD 실험에서 얻은 탄성 침하량 및 표면 탄성계수를 LFWD 자체 해석 프로그램을 이용하여 도시화한 결과의 예이며, 좌측의 그림은 LFWD의 Geophone 3개에서 얻은 탄성침하량을 도시화한 것이고, 우측 그림은 각 Geophone의 데이터를 이용한 표면 탄성계수 계산 값이다.



〈그림 7〉 LFWD 시험 결과 (예)



각 찍인 선들은 한 번의 타격횟수를 나타내며 좌측그림의 세로축은 탄성침하량( $\mu\text{m}$ )을 나타내고, 가로축은 LFWD의 중앙에서부터 각 Geophone과의 거리(mm)를 나타낸다. 우측 그림의 세로축은 LFWD의 중앙에서부터 각 Geophone과의 거리(mm)를 나타내며, 가로축은 각 Geophone에서 얻은 회복탄성계수(MPa)를 나타낸다. 한 지점에서 각 각의 타격횟수에 따라 얻은 탄성침하량과 회복탄성계수는 LFWD 해석 프로그램을 이용하여 하나의 회복탄성계수로 산출되며, 노상토와 보조기층 LFWD 시험 결과값은 <표 3>, <표 4>, <표 5>, <표 6>과 같다.

<표 3> 지름 200mm 하중판을 이용한 노상토 LFWD 시험 결과

hight	Drop	Radius mm	Load kN	Stress kPa	침하량			ELFWD Mpa
					Geophone 1( $\mu\text{m}$ )	Geophone 2( $\mu\text{m}$ )	Geophone 3( $\mu\text{m}$ )	
75cm	1	100	4.9	69	374	92	81	50
	2	100	4.9	70	375	89	79	
	3	100	4.9	69	379	94	80	
50cm	1	100	3.5	50	300	69	65	50
	2	100	3.6	51	272	66	59	
	3	100	3.6	51	275	68	59	

<표 4> 지름 300mm 하중판을 이용한 노상토 LFWD 시험 결과

hight	Drop	Radius mm	Load kN	Stress kPa	침하량			ELFWD Mpa
					Geophone 1( $\mu\text{m}$ )	Geophone 2( $\mu\text{m}$ )	Geophone 3( $\mu\text{m}$ )	
75cm	1	150	4.9	65	336	123	81	49
	2	150	4.9	69	309	122	79	
	3	150	4.9	70	313	122	80	
50cm	1	150	3.6	51	225	83	65	52
	2	150	3.6	51	223	84	59	
	3	150	3.6	51	218	82	59	

<표 5> 지름 200mm 하중판을 이용한 보조기층 LFWD 시험 결과

hight	Drop	Radius mm	Load kN	Stress kPa	침하량			ELFWD Mpa
					Geophone 1( $\mu\text{m}$ )	Geophone 2( $\mu\text{m}$ )	Geophone 3( $\mu\text{m}$ )	
75cm	1	100	4.9	69	342	88	64	71
	2	100	4.9	70	331	92	67	
	3	100	4.7	70	327	88	65	
50cm	1	100	3.6	51	274	62	42	74
	2	100	3.6	51	271	59	41	
	3	100	3.8	50	273	61	42	

<표 6> 지름 300mm 하중판을 이용한 보조기층 LFWD 시험 결과

hight	Drop	Radius mm	Load kN	Stress kPa	침하량			ELFWD Mpa
					Geophone 1( $\mu\text{m}$ )	Geophone 2( $\mu\text{m}$ )	Geophone 3( $\mu\text{m}$ )	
75cm	1	150	4.9	70	292	83	66	68
	2	150	4.9	69	274	82	64	
	3	150	4.9	70	267	82	57	
50cm	1	150	3.6	51	190	54	40	70
	2	150	3.6	50	189	53	38	
	3	150	3.6	51	191	53	39	



〈표 3〉과 〈표 4〉에서는 노상토의 ELFWD 값이 49~52 Mpa 범위로 측정되었으며, 표 5와 6에서는 보조기층의 ELFWD 값이 60~82 Mpa 범위로 측정되어 〈표 1〉에서 보인 모래질 노상재료의 ELFWD 범위인 30~70 Mpa에 부합되고, 자갈질 보조기층 재료의 ELFWD 범위인 60~200 Mpa에 부합됨을 알 수 있다. 또한, 〈표 3〉~〈표 6〉을 보면, 동일한 10kg 하중으로 충격량을 가하였을 때 하중판 지름이 작을수록, 하중 재하 높이가 클수록 응력 역시 크게 작용하여 침하량이 커졌음을 알 수 있다. 이와 더불어, 지름이 동일하다면 하중재하 높이에 상관없이 탄성계수 변화 추이는 동일하였으며, 지름과 하중재하 높이가 변하여 응력이 변하였어도 측정된 회복탄성계수 값은 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 이는 현장에서 보조기층 다짐 관리에 있어서 하중판 지름 및 하중재하 높이에 크게 고려하지 않고, 측정자의 임의에 따라 LFWD 시험을 실시하여도 동일한 회복탄성계수를 측정할 수 있음을 나타낸다.

**3.2.2 노상토와 보조기층의 구조해석**

다층 탄성 해석프로그램인 IDYSPAP을 이용하여 노상과 보조기층의 구조해석을 하고, 이를 통하여 얻은 속도별 탄성계수 범위를 LFWD 토압과 비교하여 노상과 보조기층의 응력범위에 해당하는 LFWD 하중재하높이 기준을 정하고자 하였다. 이에 실제 차량이 유발하는 축차응력과 구속응력을 알아보기 위해 콘크리트 포장보다는 하중분담 역할이 큰 아스팔트 포장의 하부를 구조해석 하였다. 국내 아스팔트 포장단면은 〈표 7〉과 같으며, 이를 고려한 단면모델 구성으로부터 설계차량을 기준으로 주행속도에 따른 응력범위는 〈표 8〉과 같다.

〈표 8〉에서 보는바와 같이, 구조해석을 통해 응력 발생범위가 노상토의 경우 구속응력은 23.99~31.74kpa, 수직응력은 32.09~51.05kpa이고, 보조기층의 경우 구속응력은 8.56~88.44kpa, 수직응력은 16.49~228.84kpa로 계산되었으며, 설계차량의 속도가 빠를수록 수직응력 및 구속응력은 작아짐을 알 수 있다.

〈표 7〉 국내 아스팔트 포장단면을 고려한 단면모델 구성

	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> )	하중주파수 및 온도에 따른 탄성계수			K- $\epsilon$ 모델을 이용한 비선형 탄성계수		
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 8〉 속도에 따른 비구속층의 응력범위(kpa)

응력종류	층	차량주행속도			
		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h
수직응력 범위	보조기층	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
구속응력 범위	보조기층	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	27.65~23.99



### 3.2.3 노상토와 보조기층의 깊이에 따른 토압

앞선 <그림 6>과 같이 토조내에 노상 및 보조기층 다짐 후 LFWD 재하하중에 따른 충격량을 깊이별로 측정된 결과값은 <표 9>와 같다. 도로하부 구조에 맞는 LFWD 하중재하 높이를 구하기 위해 <표 9>의 노상과 보조기층의 깊이별 토압 값을 식(2)의 Simpson 공식에 대입하여 평균값을 구하였고, 이를 <표 8>의 속도에 따른 응력범위와 비교하였다.

$$\text{3지점 토압의 평균 값} = \frac{1}{6} (\sigma_t + 4\sigma_m + \sigma_b) \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_t$ 는 표층의 충격응력,  $\sigma_m$ 은 깊이 15cm에서의 토압,  $\sigma_b$ 는 깊이 30cm에서의 토압을 의미한다.

<표 9>를 보면, 노상 및 보조기층에서 토압은 하중판의 지름에 상관없이 하중 재하 높이에 따라 일정함을 알 수 있으며, 표면 및 깊이 15cm에서는 충격하중의 영향을 크게 받고, 깊이 30cm에서는 그 영향이 미미함을 알 수 있다. 이 결과 값을 <표 8>과 비교하면, 노상의 경우 LFWD 하중재하 높이 75cm에서 얻은 53.65~55.83kpa은 속도에 따른 응력범위를 벗어나며, 하중재하 높이 50cm에서 얻은 38.02~39kpa은 설계속도 30km/h에 해당한다. 따라서, 노상토에서 LFWD 시험을 시행함에 있어 설계속도 10km/h에서는 하중재하 높이 75~50cm에서 시험하고, 60km/h 이상에서는 하중재하높이 50cm 이하에서 시험하여야 한다. 또한 보조기층의 경우 LFWD 하중재하 높이 75cm에서 얻은 52~54.2kpa은 설계속도 10~30km/h에 부합하고, 하중재하 높이 50cm에서 얻은 36.84~37.97kpa은 설계속도 60~100km/h에 부합한다. 따라서, 보조기층에서 LFWD 시험을 시행함에 있어 설계속도 10~30km/h에서는 하중재하 높이 50cm에서 시험하고, 60~100km/h에서는 하중재하높이 75cm에서 시험하여야 한다.

<표 9> 노상토, 보조기층의 깊이 별 토압 영향

노상토					보조기층				
하중판 지름 (mm)	재하 높이 (cm)	깊이 (cm)	응력 (kpa)	평균토압 (kpa)	하중판 지름 (mm)	재하 높이 (cm)	깊이 (cm)	응력 (kpa)	평균토압 (kpa)
200	75	0	70	55.83	200	75	0	70	54.2
		15	65.4				15	63.8	
		30	3.4				30	0	
	50	0	50	39		50	0	51	37.97
		15	45.3				15	44.2	
		30	2.8				30	0	
300	75	0	69	53.65	300	75	0	70	52
		15	62.5				15	60.5	
		30	2.9				30	0	
	50	0	51	38.02		50	0	51	36.84
		15	43.8				15	42.5	
		30	1.9				30	0	

## 5. 결과

노상 및 보조기층의 실내 토조를 이용한 LFWD 시험 결과를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 가. LFWD는 이동 및 작동이 간편하여 혼자서도 수행할 수 있으며, 평판재하시험을 수행하기 어려운 교대 뒷체움 및 터널 내부 구간에서 대체 수행할 수 있다.
- 나. 다짐 재료를 달리한 실내 토조시험을 통하여 ELFWD는 다짐 재료에 따라 탄성계수 범위가 다름을 확인하였다.
- 다. LFWD는 하중판 지름 및 하중재하 높이에 따른 충격량의 변화에 따라 노상 및 보조기층의 침하량이 변하지만,



ELFWD 값은 변화가 없다

- 라. 10kg의 충격하중을 사용한 경우 노상토에서는 깊이 30cm에서도 충격량에 의한 토압의 변화가 있지만, 보조기층에서는 깊이 30cm에서 충격량에 의한 토압의 변화는 없다.
  - 마. 노상토에서 LFWD 시험을 시행함에 있어 설계속도 10km/h에서는 하중재하 높이 75~50cm에서 시험하고, 60km/h 이상에서는 하중재하높이 50cm 이하에서 시험하여야 한다
  - 바. 보조기층에서 LFWD 시험을 시행함에 있어 설계속도 10~30km/h에서는 하중재하 높이 50cm에서 시험하고, 60~100km/h에서는 하중재하높이 75cm에서 시험하여야 한다.
- 본 연구 결론은 위와 같았으며, 본 연구 후에도 교대 뒷채움 구간과 터널 내부 구간과 같이 평판재하시험이 어려운 구간에서 평판재하시험 대체 방안을 만들고자, LFWD를 이용한 탄성영역 에너지 개념을 연구하고 있다.

**감사의 글**

본 연구는 2008년 한국도로공사 도로교통연구원과의 공동연구과제인 “비파괴 검사를 이용한 보조기층 관리기법 마련 연구용역”의 일부 결과로서, 본 연구가 성공적으로 수행되도록 지원하여준 한국도로공사 도로교통연구원에 감사를 드립니다.

**참고문헌**

Liveh, M, 2000, "Small-Scale Dynamic Device for Subgrade and Granular Layers Characterization", Proc. of the 3rd Transportation Engineering Specialty Conference, CSCE, London, Ontario

Adam, C, 2003 Modeling of the Dynamic Load Plate Test with The Light Falling Weight Device

최준성, 김인수, 김수일, 2000 “도로포장구조체의 물성추정을 위한 비파괴시험장비의 국산화 연구”, 대한 토목학회 2002년도 학술발표회 논문집, pp. 209~212