

# 경량 FWD 시험을 이용한 노상토의 지지력 평가 기법

## Evaluation Method of Bearing Capacity of the Road Subgrade using Light Falling Weight Deflectometer

박태순\* · 진명섭\*\* · 김찬우\*\*\* · 서경원\*\*\*\*

Park, Tae Soon · Jin, Myung Sub · Kim, Chan Woo · Seo, Kyoung Won

### 1. 서론

국내 도로공사 현장에서 노상토의 지지력 평가는 평판재하시험(PBT)에 의해 이루어지고 있다. 평판재하 시험은 반력의 확보 문제, 시험장소의 제약, 장시간의 시험시간, 그리고 시험자의 숙련도에 의해 결과가 좌우 되는 문제점과 토질의 비선형 특성을 반영하지 못한 다는 제약 때문에 현장에서 현실적인 시험기법의 개발이 요구되어왔다. 이러한 평판재하시험의 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 경량 FWD(Light Falling Weight Deflectometer, 이하 LFWD라 칭함)를 이용한 노상토의 탄성계수를 이용하는 간편한 방법이 연구되어 왔다(Masaki et al., 2000)(阿部長門 등, 2003)(日本舗装工學會, 2000).

본 연구는 LFWD를 사용하여 국내 노상토의 많은 부분을 차지하고 있는 실트질 모래(SM) 지반을 대상으로 시험을 수행한 결과이다. 시험결과는 탄성계수, 지지력계수 및 다짐도의 상관관계를 분석하여 LFWD의 지지력평가 기법을 개발하였다.

### 2. LFWD 시험장비

#### 2.1 시험장비 개요

LFWD 시험 장비는 덴마크에서 제작한 시험장비로 자유낙하 시킨 낙하 추(falling weight)의 충격하중에 의해 발생하는 처짐을 측정하며, 처짐과 하중 관계에 의하여 탄성계수를 산출해 낸다. 로드셀의 정밀도는  $1\% \pm 0.1\text{kN}$ 이며 변위계의 정밀도는  $\pm 2\%$  이상이다. LFWD는 아스팔트 포장, 쇠석기층, 노상 등의 광범위한 도로 및 지반에 대하여 탄성계수를 산출해 낼 수 있는 최신형 장비이다.

#### 2.2 탄성계수의 산출

LFWD 시험장비에서 탄성계수의 산출은 Timoshenko 탄성이론에 바탕을 두고 있으며, 무한 깊이의 탄성 물체 위에 있는 기초의 즉시 침하량 산정식을 탄성계수로 변환 한 식에 의하여 구할 수 있다. LFWD 시험에서 탄성계수의 산정식은 식 (1)과 같다.

$$E = \frac{q_d}{w_d} D (1 - \nu^2) \quad (1)$$

여기서,  $E$  : 탄성계수,  $q_d$  : 재하판에 작용한 응력,  $w_d$  : 처짐,  
 $D$  : 재하판의 직경,  $\nu$  : 포아송비

\*정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 교수 · (tpark@snut.ac.kr)  
\*\*정회원 · 한남대학교 토목환경공학과 교수 · (jinms@mail.hannam.ac.kr)  
\*\*\*정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 대학원 · (brown77@empal.com)  
\*\*\*\*정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 대학원 · (skw97104617@empal.com)



### 3. 현장 시험

#### 3.1 현장 및 토질 특성

현장 시험 구간으로 선정된 지역은 일산 국도 구간 3개 지점, 안산 국도 구간 2개 지점, 일동-이동간 국도 구간 2개 지점이다. 시험 구간의 토질 분류 및 물성시험 결과는 표 1에 나타내었으며, 노상토의 토질분류는 모두 실트질 모래(SM)이다. 다짐도는 실내다짐시험으로부터 구해진 최대건조단위중량에 대한 들밀도 시험에서 구한 건조단위중량의 비로 산정 하였다.

표 1. 토질의 분류 및 물성 시험 결과

시험위치	토질분류	소성 지수 (PI)	자연 함수비 (%)	건조 단위중량(t/m <sup>3</sup> ) (들밀도시험) A	최대건조 단위중량(t/m <sup>3</sup> ) (OMC) (실내다짐시험) B	다짐도 (%) A/B
일산 1	SM	N.P	16.2	1.664	2.102 (12.7%)	79.2
일산 2	SM	N.P	11.5	2.043	2.102 (12.7%)	97.2
일산 3	SM	N.P	16.3	1.600	2.102 (12.7%)	76.1
안산 1	SM	N.P	20.7	1.728	1.847 (14.5%)	93.6
안산 2	SM	N.P	11.0	1.834	1.847 (14.5%)	99.6
일동-이동간 1	SM	15.6	2.7	1.936	1.918 (11.6%)	100.9
일동-이동간 2	SM	15.6	2.6	2.012	1.918 (11.6%)	104.9

#### 3.2 현장 시험 결과

LFWD 시험은 예비시험을 통해 결정된 시험조건인 재하판의 직경 30cm, 그리고 낙하 추의 하중 10kg을 적용하여 시험을 실시하였다. LFWD 시험결과는 표 2와 같다.

표 2. LFWD 시험 결과

시험위치	토질분류	LFWD 시험		
		시험조건 (직경-하중) (cm-kg)	처짐량 (mm)	탄성계수 (MPa)
일산 1	SM	30-10	1.06	19.4
일산 2	SM	30-10	0.46	53.1
일산 3	SM	30-10	1.43	10.3
안산 1	SM	30-10	0.77	43.3
안산 2	SM	30-10	1.11	29.9
일동 - 이동간 1	SM	30-10	0.49	70.4
일동 - 이동간 2	SM	30-10	0.37	92.7

평판재하시험에 의한 지지력계수 기준은 건설교통부(2000) 도로설계편람에 의해 시멘트 콘크리트 포장의 경우 처짐량이 0.125cm일 때의 하중강도의 비이고, 아스팔트 콘크리트 포장의 경우는 처짐량이 0.25cm일 때의 하중강도의 비이다. 따라서 본 현장 시험에서는 평판재하시험을 실시하여 하중강도-침하량 곡선에서 처짐량이 0.125cm일 때와 0.25cm일 때의 지지력계수를 함께 산출하였다. 평판재하시험 결과는 표 3과 같다.



표 3. 평판재하시험 결과

시험위치	토질분류	평판재하시험	
		처짐량 (mm)	지지력계수 (MPa/m)
일산 1	SM	1.25	16.5
		2.50	16.4
일산 2	SM	1.25	109.0
		2.50	105.8
일산 3	SM	1.25	36.5
		2.50	30.5
안산 1	SM	1.25	129.4
		2.50	103.9
안산 2	SM	1.25	43.1
		2.50	45.1
일동 - 이동간 1	SM	1.25	235.2
		2.50	278.3
일동 - 이동간 2	SM	1.25	293.0
		2.50	340.1

4. 다짐관리 기법간의 상관성 분석

4.1 탄성계수와 지지력계수의 상관관계

LFWD 시험에서 산출된 탄성계수와 평판재하시험에 의해 산출된 지지력계수와 상관관계를 분석하였다. 평판재하시험에 의해 산출된 지지력계수는 아스팔트 콘크리트 포장의 경우에 해당하는 처짐량이 0.25cm인 경우를 사용하였다. 탄성계수와 지지력계수의 상관관계를 회귀분석 한 결과는 그림 1에 나타내었고, 상관관계식은 다음 식(2)와 같으며 결정계수 R<sup>2</sup>이 0.916으로 탄성계수와 지지력계수간에 통계적으로 매우 양호한 관계가 성립함을 알 수 있다.

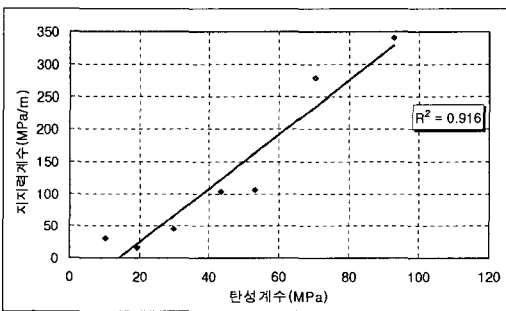


그림 1. 탄성계수와 지지력계수의 상관관계

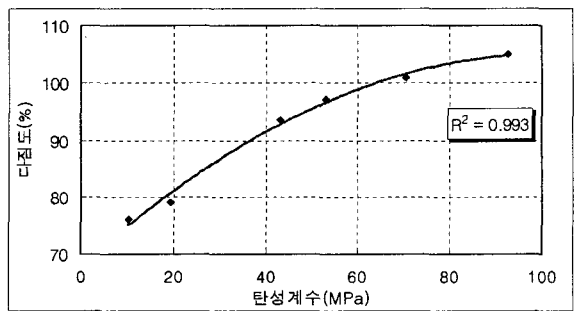


그림 2. 탄성계수와 다짐도의 상관관계

$$k_{30} = 4.193 \times E - 59.685 \tag{2}$$

여기서,  $k_{30}$  : 평판재하시험(직경이 30cm)의 지지력계수(MPa/m)

$E$  : LFWD 시험에 의해 산출된 탄성계수(MPa)

4.2 탄성계수와 다짐도의 상관관계

LFWD 시험에 의해 산출된 탄성계수와 다짐도와 상관관계를 회귀분석 하였다. 분석결과 그림 2에 나타낸 바와 같이 탄성계수와 다짐도는 결정계수 R<sup>2</sup>이 0.993으로 높은 상관관계를 보이고 있다. LFWD 시험에



의한 탄성계수와 다짐도와의 상관관계식은 다음 식(3)과 같다.

$$D = -0.004 \times E^2 + 0.733 \times E + 67.968 \quad (3)$$

여기서,  $D$  : 다짐도(%)

$E$  : LFWD 시험에 의해 산출된 탄성계수(MPa)

따라서, 본 연구에서 수행한 실트질 모래(SM) 지반에 대한 LFWD 시험으로부터 탄성계수를 산출한 후, 위의 식 (3)을 이용하여 다짐도를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었으며, 향후 연구 방향도 함께 제안하였다.

- (1) 평판재하시험에 의한 지지력계수와 LFWD 시험에 의한 탄성계수간에 상관관계를 회귀분석하여 통계적으로 매우 양호한 상관관계식을 개발하였다. 따라서 기존의 평판재하시험에 의한 지지력계수를 탄성계수로 변환하여 다짐관리에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) LFWD 시험에 의한 탄성계수와 다짐도간의 상관관계를 회귀분석 한 결과 결정계수가 매우 높은 상관관계식을 개발하였다. 본 연구에서 수행한 실트질 모래(SM)지반의 다짐도를 판정하는데 이 식을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서는 국내 노상토의 많은 부분을 차지하고 있는 실트질 모래(SM) 지반에 대해서만 LFWD 시험을 수행했지만 향후 연구 과제로써 다양한 토질의 노상 및 보조기층에 대해서도 LFWD 시험을 수행하여 토질조건을 고려한 탄성계수, 지지력계수, 그리고 다짐도의 관계를 확립하고 이에 대한 지지력 평가 및 다짐관리 기법, 기준 등의 시방서를 마련하여야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 건설교통부에서 지원하는 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부로, 연구를 가능케 한 건설교통부에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 건설교통부, 도로설계편람(Ⅱ), 한국건설기술연구원, pp.405-1~405-11, 2000
2. Carl Bro Pavement Consultants, User's Manual PRIMA 100, Carl Bro Intelligent Solutions, pp.1~16, 2001
3. Masaki Kamiura, Etsuo Sekine, Nagato Abe, Teruhiko Maruyama, Stiffness evaluation of the subgrade and granular aggregates using the Portable FWD, Unbound Aggregates in Road Construction, Dawson, pp.217~223, 2000
4. 阿部長門, 上浦正樹, 關根悦夫, 小型FWDによる支持力評価とその適用事例(1), 舗装 38-1, pp.13~17, 2003
5. 日本舗装工學會, 路上・路盤の支持力評価方法, 日本舗装工學會誌 35-12, pp.15~18, 2000