

# 포장하부구조의 지지력 평가를 위한 동적 콘 관입 실험의 현장적용성 연구

## A Study of Field Application of Dynamic Cone Penetrometer Test to Evaluate the Sub-Layer Stiffness

김 부 일\*      전 성 일\*\*      이 문 섭\*\*\*  
Kim, Booil      Jeon, Sung IL      Lee, Moon Sup

### 1. 서 론

포장설계법의 하부구조 입력변수로는 아스팔트 포장의 경우 실내 CBR값, 콘크리트 포장의 경우 노상반력계수가 적용된다. 또한 현재 개발단계에 있는 한국형 포장설계법에서는 탄성계수가 주요한 입력변수로 설정되어 있다. 하지만 이러한 입력변수는 포장설계과정에서만 반영이 되고 있으며, 실제 시공현장의 시공품질 평가과정에서 이러한 입력변수값은 크게 반영되고 있지 못한 실정이다. 특히 재료의 성능·공용성은 재료의 강성·강도와 큰 관련이 있음에도 불구하고, 현장에서 이루어지는 포장 하부구조(노상, 보조기층)의 시공·품질관리는 실내에서 측정된 최대 건조밀도를 기준으로 하여 적절한 현장밀도를 제어하는데 초점이 맞추어져 있다. 포장하부구조의 지지력을 평가하기 위해 그동안 많이 사용되었던 방법으로는 평판재하실험(Plate Bearing Test), 현장 CBR 실험 (California Bearing Ratio Test) 등이 있으나, 실험을 수행하는데 있어 많은 인력과 시간이 소비되는 단점이 있어, 시공현장에서 이와 같은 실험을 수행한다 하여도 일부 구간에 단편적으로 이루어져, 전체 구간의 지지력 데이터를 확인할 수 없는 한계가 있다.

기존의 많은 연구자들은 현장에서 포장하부구조의 강성을 측정할 수 있는 간편한 방법으로 동적 콘 관입 실험(Dynamic Cone Penetrometer Test, 이하 DCP로 표기)을 제안하였다. 일반적으로 DCP는 간단한 장비들로 구성되어져 이동성이 좋으며, 최소 2명에서도 수행이 가능한 장점이 있다. 또한 실험결과를 분석하는 방법이 어렵지 않아 일반 현장 실무자들도 사용이 가능하며, 기존 연구자들이 제안한 관계식을 통해 각 층의 물성을 간접적으로 추정할 수 있다. 하지만 DCP는 굵은 골재가 포함되어 있는 재료의 경우 실험적 오차가 많이 발생하기도 하며, 데이터 분석시 주관적 판단에 의해 좌우되는 단점이 있다. 기존 연구자들이 제안한 여러 관계식들이 차이를 보이는 것은 이러한 부분에 있어 파생되는 오차가 큰 몫을 차지할 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 총 4개 현장의 노상층과 보조기층에서 DCP·평판재하실험·현장 CBR 실험·FWD(Falling Weight Deflectometer)실험을 동시에 수행하여, 각각의 실험 데이터들간에 상관관계 분석을 통해, DCP의 현장적용성을 평가하였다.

### 2. 실험방법

포장하부구조의 현장지지력을 평가하기 위해 평판재하실험(Plate Bearing Test), 현장 CBR실험(California Bearing Ratio Test), 동적 콘 관입실험(Dynamic Cone Penetration Test, DCP), FWD(Falling Weight

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 · 031-910-0240 (E-mail : bikim@kict.re.kr)  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사 · 031-910-0542 (E-mail : jeonsi@kict.re.kr)  
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사 · 031-910-0690 (E-mail : truepath@kict.re.kr)

Deflectometer) 실험을 수행하였다.

본 연구에서 수행된 현장지지력 실험은 국내에서 건설중인 LTPP 시험구간에서 이루어졌다. 본 실험은 총 4개 현장에서 노상과 보조기층에 25m~50m 간격으로 수행되었으며, 각각의 구간 길이는 약 500m 정도이다.

(1) 동적 콘 관입 실험 (DCP, Dynamic Cone Penetration Test)

DCP는 Steel Rod 하단에 팽이 모양의 콘(cone)을 부착하고 상부에 있는 해머(hammer)를 통해 노상 또는 입상재료층에 낙하·관입하여 콘(cone)의 관입량에 달하는 타격횟수를 연속적으로 실측하는 실험이다. DCP의 결과는 DCPI(Dynamic Cone Penetration Index)로 나타내는데, 1번 타격으로 관입되는 깊이를 의미한다. 본 연구에서는 30cm까지 관입을 시켜서 측정된 DCPI의 평균값을 사용하였다. DCP 장비의 형상 및 제원은 그림 1에 나타내었다.

(2) FWD(Falling Weight Deflectometer) 실험

FWD는 충격 하중재하에 의한 처짐량 측정방법의 대표적인 장비로서 일정 하중을 충격 완화 장치를 갖춘 재하판에 낙하시켜 그때의 충격하중에 의한 포장체의 처짐량을 측정하는 장비이다. 본 연구에서는 한 지점에서 1,250kgf, 2,500kgf 두 개의 하중이 적용되었으며, FWD 실험을 통해 측정된 처짐량 데이터는 역산해석프로그램 'Modulus 5.1'을 이용하여 탄성계수를 추정하였다.

(3) 평판재하실험 (PBT : Plate Bearing Test)

평판재하실험은 노상층 또는 입상재료층에 재하판을 설치하고 연직 하중을 단계적으로 가하여 지지력(q)-시간(t)-침하량(s) 등을 실측하여 지반의 전단과피유형, 극한·항복 지지력, 지반반력계수(K), 변형계수(E), 스프링상수(k) 및 전단계수 등을 구하는 시험이다. 현재 평판재하실험은 KS F 2310에 규정되어 있다. 일반적으로 도로에서는 단계적으로 하중강도와 침하량을 측정하여 지지력계수를 산정하는데, 콘크리트 포장에서는 침하량 1.25mm에서, 아스팔트 포장에서는 침하량 2.5mm에서의 하중강도를 구하고, 아래식에 따라 산출한다.

$$K_s = \frac{P}{S} \tag{1}$$

여기서,  $K_s$  = 지지력계수(kg/cm<sup>3</sup>),  $P$  = 하중강도(kg/cm<sup>2</sup>),  $S$  = 침하량(cm)

(4) 현장 CBR(California Bearing Ratio) 실험

현장 CBR 실험은 KS F 2320에 규정되어 있다. CBR값은 노상층 또는 입상재료층에 직경 5cm의 관입피스톤을 공시체표면에 관입시켜 2.5mm 또는 5.0mm 관입시킬 때의 하중강도를 각각 정해진 표준하중강도에 대한 백분율로 나타내어진 것을 말한다. CBR값 산출식은 아래와 같다.

$$CBR = \frac{q}{q_0} \times 100 \tag{2}$$

여기서, CBR = 지지력비(%)

$q$  = 관입량에 따른 하중강도 (MN/m<sup>2</sup> 또는 kN)

$q_0$  = 관입량에 따른 표준하중강도 (MN/m<sup>2</sup> 또는 kN)

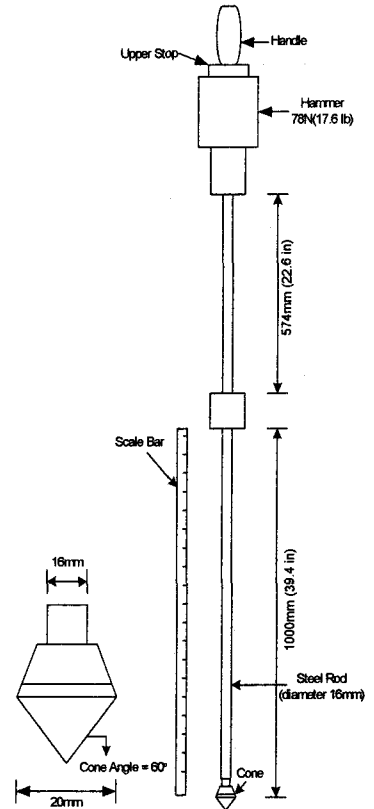


그림 1. 동적 콘 관입 실험(DCP)



3. 실험결과 분석

3.1. DCPI-M<sub>FWD</sub> 관계 분석

표 1은 DCPI-M<sub>FWD</sub>의 회귀분석결과를 모형별로 비교한 것이다. 회귀분석에서는 총 6가지의 모형을 사용하였는데, 본 결과를 볼 때 DCPI-M<sub>FWD</sub> 사이에는 상관성이 있음을 알 수 있다. 이 모형 중 결정계수가 가장 큰 값을 나타내고 있는 것이 역함수 모형이며, 이에 본 연구에서는 DCPI-M<sub>FWD</sub> 관계식을 다음과 제안하였다.

$$M_{FWD} = 993.10 \left( \frac{1}{DCPI} \right) + 33.95 \quad (3)$$

여기서, M<sub>FWD</sub> = 탄성계수 (FWD 치짐데이터를 역산해석하여 산출한 값) (MPa)

DCPI = 동적 콘 관입 지수 (Dynamic Cone Penetration Index) (mm/blow)

그림 2는 DCP-M<sub>FWD</sub>의 회귀분석결과와 기존 관계식을 비교한 것이다. 본 실험결과를 보면, DCPI가 약 8mm/blow이하에서는 곡선의 기울기가 크며, 8mm/blow이상에서는 곡선의 기울기가 완만한 것을 알 수 있다. 또한 기울기가 완만한 부분에서 데이터의 편차가 크게 나타남을 알 수 있다. 본 그림에서는 Abu-Farsakh et al과 Chen et al이 제안한 식과 비교하였는데, DCPI 10~60mm/blow 범위내에서 적용이 가능한 Chen et al 관계식은 본 연구에서 제안한 식과 상당히 유사함을 알 수 있다. 또한 Abu-Farsakh et al 관계식은 본 연구에서 제안한 식과 약간의 차이를 나타내고 있으나, 전반적으로 유사한 형태의 곡선을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 상관성을 통해 추후 역학적-경험적 포장설계법의 도입시 포장하부구조의 탄성계수를 DCP를 통해 추정할 수 있으며, 시공품질관리 측면에서 DCP의 활용이 크게 확대될 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. DCPI-M<sub>FWD</sub> 회귀분석 비교

| 모형     | 회귀식  | 결정계수           |
|--------|--|----------------|
| 선형함수   | $y = -20.756x + 355.2$                                 | $R^2 = 0.6267$ |
| 로그함수   | $y = -164.44 \ln(x) + 515.2$                           | $R^2 = 0.7427$ |
| 지수함수   | $y = 397.22e^{-0.107x}$                                | $R^2 = 0.6033$ |
| 거듭제곱함수 | $y = 859.38x^{-0.8222}$                                | $R^2 = 0.6721$ |
| 역함수    | $y = 993.10 \left( \frac{1}{x} \right) + 33.95$        | $R^2 = 0.7747$ |
| 로그-역함수 | $\ln(y) = 2.34 \left( \frac{1}{\ln(x)} \right) + 3.84$ | $R^2 = 0.6434$ |

x = DCPI , y = M<sub>FWD</sub>

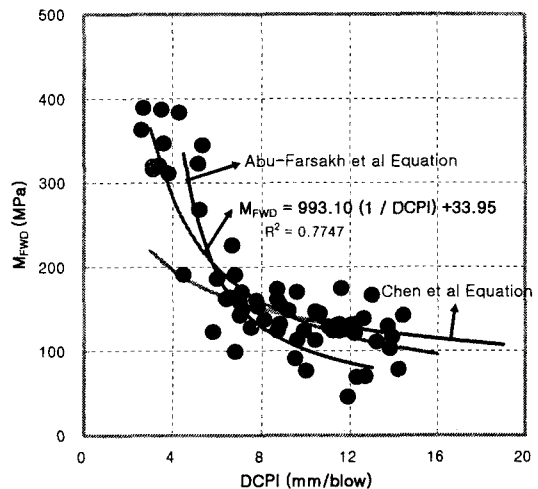


그림 2. DCP-M<sub>FWD</sub>의 회귀분석결과와 관계식 비교

### 3.2. CBR-M<sub>FWD</sub>, CBR-DCPI 관계 분석

그림 3과 그림 4는 CBR-M<sub>FWD</sub>, CBR-DCPI 관계를 분석한 것이다. 본 연구에서는 CBR과 M<sub>FWD</sub>, DCPI와의 상관관계가 매우 낮음을 알 수 있다. 기존 연구자들에 의해 제안된 연구내용을 보면, CBR-M<sub>FWD</sub>, CBR-DCPI 사이에 충분한 상관관계가 있음을 보고한 바 있다.

이와 같이 본 연구가 기존 연구와 전혀 상반된 결과를 도출한 것은 추후 충분한 논의가 필요한 내용이다. 하지만 본 연구진은 현장지지력실험의 수행과 데이터분석과정에서 현장 CBR실험의 문제점을 인식하게 되었으며, 데이터의 변동성이 큰 부분, 다른 실험들과의 상관성이 전혀 존재하지 않는 부분이 다음과 같은 이유 때문일 수도 있다고 판단하였다.

일반적으로 현장 CBR 실험은 직경 5cm의 가는 붓을 관입시키기 때문에, 실험위치 표면과 내부에 골재의 크기 및 존재여부에 따라 CBR값이 큰 차이를 나타낼 수 있다. 하지만 FWD실험과 평판재하실험의 경우 재하판이 직경 30cm로 재하면적이 넓기 때문에 상대적으로 실험위치 표면과 내부에 골재크기 및 존재여부에 영향을 받지 않는다. DCP실험의 경우 골재의 크기와 위치에 따라 큰 영향을 받으나, 데이터 분석시 필터링 작업을 수행하기 때문에, 콘(cone)이 골재에 걸려 타격횟수가 크게 나오는 것은 모두 제거되어 이와 같은 영향을 충분히 줄여줄 수 있다. 이와 같이 현장 CBR 실험만이 상대적으로 골재의 크기 및 존재여부에 큰 영향을 받으며, 이는 실제 현장적용에 있어 큰 오차를 유발할 수 있는 가능성이 있다는 것을 나타내는 것이다. 이와 같은 내용은 충분히 검증된 것이 아니기에 추후 이를 검증할 수 있는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

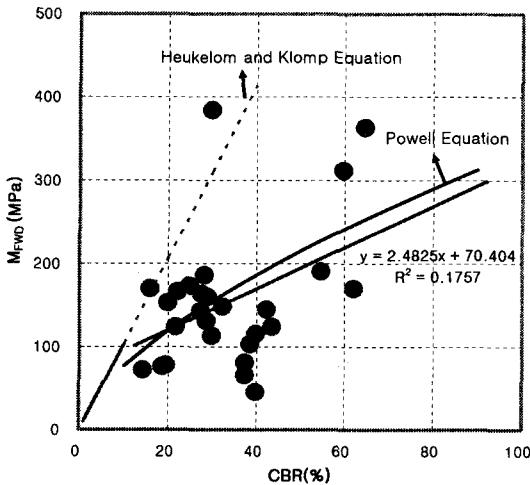


그림 3. CBR-M<sub>FWD</sub> 회귀분석결과

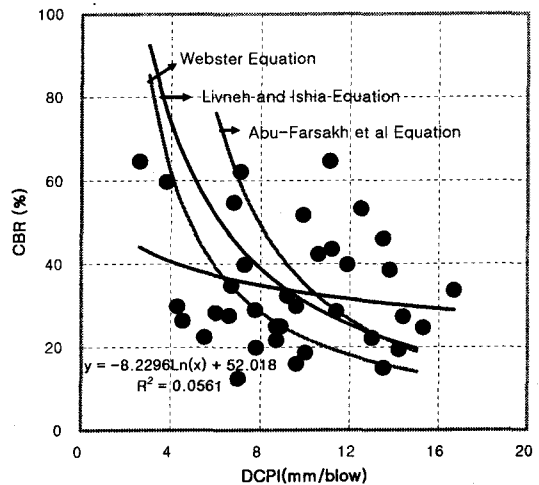


그림 4. CBR-DCPI 회귀분석결과

### 3.3. DCPI-K<sub>30</sub> 관계 분석

그림 5는 DCPI와 K<sub>30</sub>의 회귀분석결과를 나타낸 것이다. 분석결과 결정계수 R<sup>2</sup>가 0.48정도로 낮은 수치를 나타내었으나, 전반적으로 일정한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 추후 샘플수를 늘리고 실험의 변동성을 줄여나간다면 충분한 상관관계를 유도할 수 있다고 판단된다.

이와 같은 분석결과는 기존 콘크리트 포장설계법의 입력변수인 지지력계수를 추정하는데 있어 DCP 실험이 충분히 활용될 수 있으며, 또한 DCP 실험이 시공현장에서 품질관리에도 적용될 수 있다는 것을 보여주는 것이다.



### 3.4. K<sub>30</sub>-M<sub>FWD</sub> 관계 분석

그림 6은 지지력 계수 K<sub>30</sub>과 M<sub>FWD</sub>의 데이터를 회귀분석한 결과이다. 그림에서 나타낸 것과 같이 K<sub>30</sub>이 약 20~40kg/cm<sup>3</sup> 범위에서 데이터가 약간 넓게 분포하고 있으나, 전반적으로 선형관계를 나타내고 있다. 본 회귀분석 결과, 결정계수 R<sup>2</sup>가 0.69를 나타내어 K<sub>30</sub>과 M<sub>FWD</sub>는 상관관계가 존재함을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 K<sub>30</sub>-M<sub>FWD</sub> 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$M_{FWD} = 3.7533 K_{30} + 23.085 \quad (4)$$

여기서, M<sub>FWD</sub> = 탄성계수 (MPa)  
K<sub>30</sub> = 지지력계수 (kg/cm<sup>3</sup>)

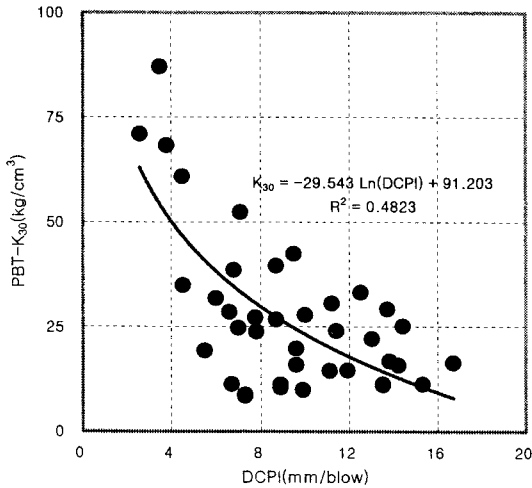


그림 5. DCPI-K<sub>30</sub> 회귀분석결과

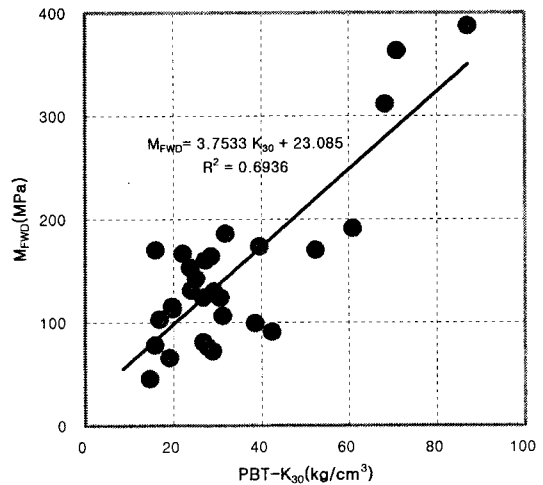


그림 6. K<sub>30</sub>-M<sub>FWD</sub> 회귀분석결과

## 4. 결 론

- ▷ 현장지지력 실험 데이터를 상호 비교한 결과, DCPI, M<sub>FWD</sub>, PBT\_K<sub>30</sub>은 일정한 상관관계가 존재함을 알 수 있었으나, CBR은 다른 결과값들과 비교한 결과 상관관계가 매우 낮은 것으로 나타났다.
- ▷ 현장 CBR 실험이 데이터의 변동성이 크고 다른 실험들과의 상관성이 나타나지 않은 것은 현장 CBR 실험만이 상대적으로 실험위치 표면과 내부에 골재의 크기 및 존재여부에 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 이와 같은 연구내용은 기존 연구내용과는 전혀 상반된 것이어서, 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- ▷ 본 연구에서는 DCPI-M<sub>FWD</sub>, DCPI-PBT\_K<sub>30</sub> 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$M_{FWD} = 993.10 \left( \frac{1}{DCPI} \right) + 33.95 \quad R^2 = 0.77$$

$$M_{FWD} = 3.7533 K_{30} + 23.085 \quad R^2 = 0.69$$



▷ 본 연구결과 DCP는 현장에서 포장하부구조의 강성·강도를 측정하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다. 특히 DCP는 실험방법이 간편하고 빠른 시간내에 수행이 가능하여 시공구간의 전체 이력을 빠르게 파악할 수 있어 시공품질관리 측면에서 활용도가 높을 것으로 판단된다. 하지만 DCP는 실험적 오차 요인이 존재하는 만큼, 샘플빈도를 최대한 늘려서 적용해야 될 필요성이 있다.

### 감사의 글

본 논문은 건설교통부의 연구과제인 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 결과로서, 본 연구가 성공적으로 수행되도록 지원하여준 건설교통부에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. Abu-Farsakh et al. (2005), "Application of DCP in Pavement Construction Control", TRB 2005 Annual Meeting
2. Chen, D. H., J. Bilyeu, and R. He. (1999), "Comparison of Resilient Moduli between Field and Laboratory Testing", In Soils, Geology, and Foundations, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
3. Heukelom, W., and A. J. G. Klomp. (1962), "Dynamic Testing as Means of Controlling Pavements During and After Construction", Proc, 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan.
4. Kleyn, E. G., and Savage, P. F. (1982), "The Application of the Pavement DCP to Determine the Bearing Properties and Performance of Road Pavements", International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway.
5. Livneh, M. (1989), "Validation of Correlations between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests", Transport and Road Research Laboratory(TRL), Report 1219, Berkshire, United Kingdom.
6. Powell, W. D., J. F.Potter, H. C. Mayhew., and M.e. Nunn. (1984), "The Structural Design of Bituminous Roads", TRRL Laboratory Report LR 1132, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, United Kingdom.
7. Scala, A. J. (1956), "Simple Methods of Flexible Pavement Design Using Cone Penetrometers", Proc. 2nd Australian-New Zealand Conf. Soil Mech and Found Engrg.
8. Webster, S. L., R. H Grau., and R. P Williams. (1992), "Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer", U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Instrucion Report, No. GL-92-3.