

# FWD를 이용한 포장구조 평가 및 유지보수방법

박 태 순\*

## 1. 서 론

FWD(Falling Weight Deflectometer)는 1970년대 네덜란드의 쉘 석유중앙연구소에서 개발된 것을 시초로, 그 후 개량 및 개조되어 세계 각국으로 보급되었다. 국내에서는 1988년에 한국도로공사에서 처음으로 Dynatest사의 FWD를 도입하였으며 1997년에 국립건설시험소에서 Kuab사의 FWD를 두 번째로 도입하여 시험 운영 중이다. 따라서 국내의 포장관련 측정장비로서는 비교적 새로운 장비라고 할 수 있다. 현재 FWD는 세계적으로 보급되어 각종 포장의 구조 평가나 지지력 평가에 널리 활용되고 있으며, 최근에는 도로의 유지보수에 빠져서는 안 되는 중요한 장비로 자리잡고 있다.

현재 세계적으로 310대 정도의 FWD가 가동 중인 것으로 알려져 있다. 미국과 유럽이 각각 1/3을 소유하고, 나머지 1/3을 그 밖의 나라들이 소유하고 있다. 국가별 소유대수로는 미국 108대, 일본이 뒤를 이어 23대, 중국이 6대, 인도가 3대로 우리나라에 비하여 FWD 소유는 우위를 차지하고 있으며 활용면에서도 매우 적극적이다. 특히, 일본과 미국의 경우에는 도로포장 유지보수를 전문으로 하고 있는 민간회사가 FWD

를 많이 보유하고 있는 것으로 알려져 있다.

현재 미국에서 FWD는 PMS(Pavement Management System-포장유지관리)에서 포장의 구조적 강도를 추정하기 위한 비파괴 장비로, 또 SHRP에서 LTPP(Long Term Pavement Performance-포장의 장기 공용성) 시험구간의 구조강도측정을 위한 중요한 장비로서 자리를 잡고 있다.

본고에서는 FWD 사용법 및 기능에 대한 기초지식과 FWD 장비에 대한 설명을 요약하였으며 FWD 측정 결과의 분석방법 및 포장 각 층의 탄성계수를 해석하는 역해석 기법과 역해석 결과의 이용방법에 대하여 현재 미국 교통국에서 포장의 유지보수를 위해서 실제 사용하고 있는 방법을 저자가 경험한 사항을 토대로 실무차원에서 서술하였다.

## 2. FWD 개요 및 측정절차

### 2.1 FWD의 개요 및 제원

전 세계적으로 FWD를 생산하는 제작사는 노르웨이의 Phoenix사, 덴마크의 Dynatest사, 스웨덴의 Kuab사 모두 3개 회사가 있다. FWD 제작사마다 특징이 있으나 Dynatest사의 FWD가 주종을 이루고 있는 점을 감안하고, 타 회사의

\* 서울산업대학교 토목공학과 조교수

FWD도 충격을 가하는 방법에서 차이가 있을 뿐 구조는 동일하기 때문에 Dynatest사의 FWD를 중심으로 구조에 대하여 서술하였다(그림 1 참조).

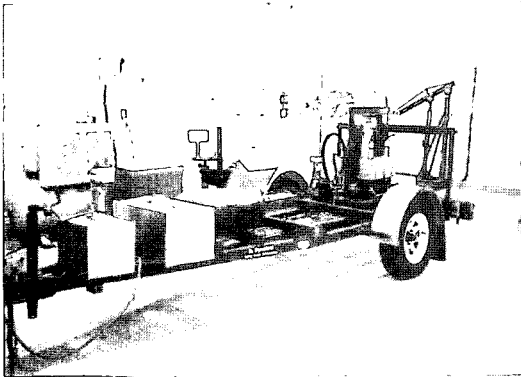


그림 1. Dynatest사의 FWD (인디애나 교통국소유)

FWD는 FWD를 운반하는 트레일러 부분과 하중낙하 장비, 재하판, 7개의 센서(Accerometer-가속도계) 및 차량내부의 컴퓨터 시설로 구분할 수 있다. 센서는 12인치 간격으로 설치되어 있으며, 목적에 따라 센서의 간격과 위치를 바꾸어 측정을 실시하기도 한다. 그림 2는 FWD의 전형적인 하중재하 및 센서의 위치를 보인 것이다. FWD는 1인의 오퍼레이터에 의해서 운영되며 FWD의 작동은 차량 내부에 탑재되어 있는 컴퓨터 프로그램에 의해서 운영된다. FWD는 포장체의 처짐을 측정하기 위해서는 직경 300mm의 판을 사용하며, 지반의 처짐을 측정하기 위해서는 직경 450mm의 판을 사용하고 측정 시 시험하중을 새로이 결정하여야 한다.

FWD는 작동 프로그램의 변경으로 정적시험 또는 동적시험(또는 시간계열 시험)이 가능하다. 현재 실무에서는 주로 정적시험을 실시하고 있으며, 연구목적으로는 동적시험을 실시하고 있으나 본격적인 실용화에는 어느 정도의 시간이 필요한 실정이다.

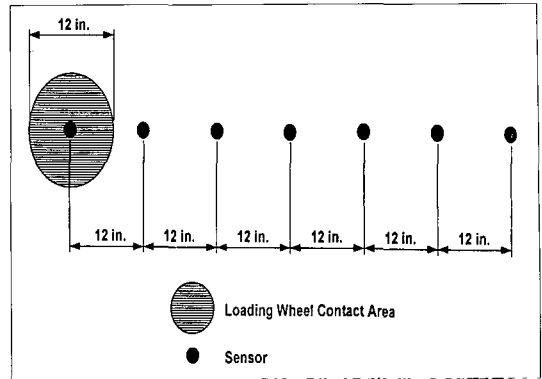


그림 2. FWD의 전형적인 재하판 및 센서의 배열

## 2.2 측정절차

FWD의 충격재하 장비를 이용하여 포장표면에 충격을 가하면 포장체에서는 충격이 발생하고 이때 발생된 처짐이 센서를 통하여 측정된다. 현재 FWD 측정방법은 ASTM D4694-87에 "Standard Test Method for Deflection with a Falling Weight Type Impulse Load Device"로 규정되어 있으며 시험과 관련된 규격으로 ASTM D4695-87에 "Standard Guide for General Pavement Deflection Measurement"로 규정되어 있다. 이들 규정에 따르면 충격하중은 하버사인(harversine) 또는 반사인파형(half-sine wave) 형태를 사용하여야 하며 최대하중은 적어도 11,000파운드(50 KN), 하중이 가해지는 시간은 20m초에서 60m초(m초 : 10-3초) 사이, 하중 상승시간(최대하중이 발생하는데 소요되는 시간, rise time)은 10m초에서 30m초 사이가 되어야 한다. 시험에 사용되는 재하판의 크기는 직경 12인치(300mm)와 18인치(450mm)를 사용하는데 위에서 서술한 것처럼 포장표면에서 측정 시에는 직경 300mm 판을 사용하고 노상표면에서는 450mm를 사용한다. 처짐 측정장비로는 속도계 또는 가속도계를 사용하며 포장의 최대 수직변형을 측정한다.

FWD를 사용하여 정적 및 동적시험을 수행할 수 있다. 정적시험은 재하판에 가해지는 충격에 의해서 발생하는 각 층의 최대 처짐이 센서에 기록되며, 동적시험은 각 층의 처짐이 충격이 가해지는 시간(약 25m초)동안 각각의 센서에 기록된다. 하중이 작용하는 시간동안의 처짐이 시간에 따라 측정되므로 시간계열시험(full time history test)이라고도 부른다. 본 고에서는 정적 시험을 위주로 설명하고자 하며 그림 3은 정적 시험 결과 예를 보인 것이고, 그림 4는 동적시험 결과 예를 보인 것이다.

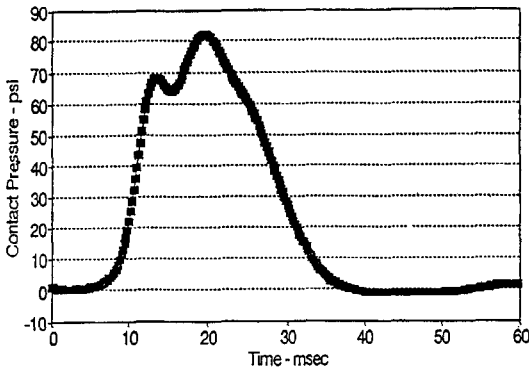


그림 3. FWD 정적시험 결과

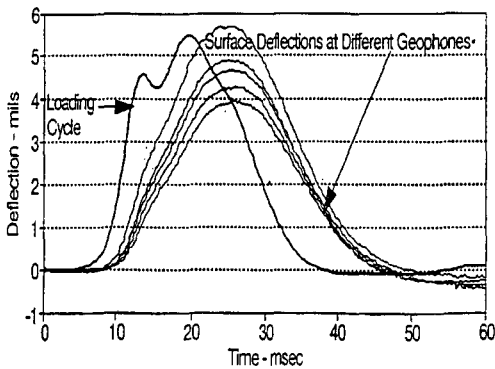


그림 4. FWD 동적시험 결과

FWD의 측정 절차는 사전에 측정 하고자 하는 위치를 현장에서 정한다. 일단 측정 할 위치가 결정되면 다음과 같은 순서로 측정을 실시한다.

- ① 재하판을 측정하려는 포장면 상에 위치시킨다. 이때 FWD 오퍼레이터는 시험 전에 포장면 상에 페인트로 측정할 위치를 표시하고 재하판에 부착되어 있는 카메라를 이용하여 정확한 위치를 포착하여 시험을 실시하여야한다.
- ② 정확한 위치가 포착되면 FWD 작동 프로그램을 열고 시험자의 이름, 시험장소, 날짜, 포장의 종류, 시험 방법 및 간단한 메모를 기록한다. 그림 5는 FWD 작동 프로그램에 나타난 기록의 예를 보인 것이다.

```

R80 1812 960417US41N 36120(사용한 FWD의 Serial 번호/지정된 위치 명칭)
70X30000002-1450474R 03111 R
150 0 305 610 914 121015241629 5.0 0 12 24 36 48 60 72(사용한 FWD)의 직경, 센서의 간격)
CAPWDDATAFWD(시험 배열용 차량의 디렉토리 및 파일명)
US41 NORTH(시험한 도로의 번호 및 방향)
S 1400(SRP(시각영상) 수확일) 23 19 1813 73 65
S 2347539PL 23 19 1813 73 65
138240572753761.224 5.100
Ld 199 1409 87.8
131 2161 .925 .2800 ( 각 센서의 반라디안 값)
132 2162 .989 .0970
133 2163 .905 1.008
134 2164 .964 .0720
145 2165 .994 .0830
146 2166 .981 .0890
137 2167 .903 .0900

STEPHAN MILLER (시험자 이름)
UNDEIRSEAL(시험의 목적-이 경우는 콘크리트 포장의 인덕시탈을 위해서 시험한 경우)
*000-0.0 000-0.0 at
*
S 1710HDL 13 12 161029 155 53 Height(.....)
429 156 77 59 49 36 27 250(센서의 직경) 130(부러 137 년키 mil) 6769 (재하중 단위; 파운드)
575 125 103 80 64 49 37 30 9137
726 162 132 102 82 62 48 38 11572
    
```

그림 5. FWD 작동프로그램의 첫 번째 화면

- ③ 실제 측정 전에 예비 하중을 재하판에 가한다. 예비하중을 가하는 목적은 버퍼(재하판에 하중을 가하는 고무)가 원활하게 작동하도록 준비 운동을 시키는 과정이다.
- ④ 준비가 완료되면 시험 목적에 맞는 하중을 선택하여 하중을 작용시킨다. 주로 사용하는 하중은 7,000파운드, 9,000파운드, 11,000 파운드를 사용한다.

⑤ 시험이 완료되면 파일이름을 정하여 저장하고 시험 결과가 들어있는 디스켓을 포장구조해석자에게 전달하여 복사한 후에, 해석자는 데이터 베이스 관리자에게 다시 디스켓을 전달하여 향후 추적조사 자료로 보관한다.

### 2.3 측정결과와 보관 및 관리

FWD의 시험도 매우 중요한 절차이지만 많은 시간과 노력이 담긴 FWD 시험결과를 데이터 베이스로 보관하는 절차는 더욱 중요한 절차이다. 이 절차는 향후 지속적으로 자료를 시간별 또는 계절별로 측정하여 시간의 경과에 따른 포장의 강도와 탄성이 어떠한 시점에서 저하되며, 포장의 유지관리에 가장 핵심이 되는 이러한 저하 현상이 포장의 공용성과 어떠한 관계가 성립되는가를 판단 할 수 있는 부분이라 할 수 있다.

## 3. FWD와 포장체의 처짐 및 분석방법

FWD의 측정 결과는 위에서 서술한 것처럼 포장 각 층의 처짐량이다. 포장체의 표면에 트럭, 항공기, 승용차 등으로 인한 하중이 가해지면 포장체에서는 처짐이 발생하고 처짐유역(deflection basin)이라고 불리는 주발(bowl)

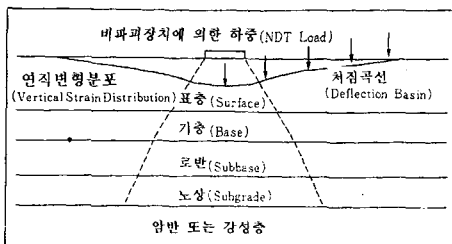


그림 6. FWD의 충격하중에 의해서 발생하는 포장체의 응력분포

형태의 침하가 발생하게 된다(그림 6 참조). 처짐 유역의 크기, 깊이 및 형태는 포장의 두께, 강성, 포장 하부의 재료 및 하중의 크기에 따라 변화하게 된다. 처짐량의 증감은 대개의 경우 골재 및 노상이 응력구속(stress dependant) 조건을 지니고 있기 때문에 선형으로 나타나지 않게 된다. FWD를 이용하여 각 거리에 있는 센서로부터 처짐량이 측정되면 그 때의 하중, 재하판의 반경, 재하판의 압력이 동시에 측정된다. 이렇게 측정된 변수들을 처짐 유역으로 해석하게 되면 포장면 하부 깊이에 대하여 포장 층의 강성을 추정 할 수 있다.

FWD의 가장 바깥쪽 센서(D6)는 노상의 특성을 나타내며, 가장 내부의 재하판 하부의 센서(D0)는 포장표면의 특성을 나머지 센서(D1, D2, D3, D4, D5)는 기층, 보조기층 및 노상과 각 층의 특성을 나타낸다. 재하판 부근의 처짐 유역 경사는 상부 포장 층의 강성과 함수관계가 성립한다. 표 1은 FWD의 시험결과를 이용하여 포장의 상태를 추정 할 수 있는 처짐 유역 변수를 정리한 것이다.

## 4. 역해석 기법

역해석이란 현장에서 FWD를 이용하여 얻은 포장 각 층의 처짐값을 사용하여 각 포장 층의 재료의 특성, 특히 탄성계수를 컴퓨터 프로그램을 사용하여 추정해내는 방법이다. 역해석 절차는 하중의 형태와 재료의 특성에 따라 정적선형, 정적비선형, 동적선형 및 동적비선형으로 나눌 수 있으며 실무에서 가장 널리 사용되고 있는 방법은 정적선형 역해석 방법이다. 표 2는 현재 사용되고 있는 역해석 프로그램을 요약 정리 한 것이다. 역해석 프로그램중 SHRP에서는 Modulus를 추천하고 있다.

역해석 프로그램을 수행하기 위해서는 우선 초기 탄성계수를 추정하여 프로그램을 수행하게

<표 1> 처짐 유역 변수

변 수	공 식
최대처짐 (Maximum Deflection)	$D_0$
면 적 (Area)	$A = 6[1 + 2(D_1/D_0) + 2(D_2/D_0) + (D_3/D_0)]$ 센서의 간격 = 305mm(12인치)
형성계수 (Shape Factors)	$F_1 = (D_0 - D_2)/D_1$ $F_2 = (D_1 - D_3)/D_1$
표면 곡률계수 (Surface Curvature Index)	$SCI = D_0 - D_r$ 여기서 r은 305mm 또는 50mm (재하판의 중심으로부터 350mm 또는 50mm 떨어져 있는 센서의 처짐)
처짐비 (Deflection ratio)	$Qr = D_r/D_0$ 여기서 $D_r \approx D_0/2$

주) 1.  $D_0$  = 재하판 중심의 처짐( $r=0$ )  
2.  $D_1, D_2, D_3$  = 재하판으로부터 첫 번째, 두 번째, 세 번째 처짐

된다. 이때 초기 탄성계수는 해석에 큰 영향을 미치기 때문에 과거의 경험과 실험 결과를 토대로 하여 프로그램을 수행하여야 한다.

측정시의 하중 및 변형량에 대응하는 포장층의 등치탄성계수를 결정하기 위하여 이용되는

해석방법으로는 아래의 어느 방법을 이용하여도 좋다. 즉, 반복계산 데이터 베이스 검색법, 엄밀해석(현재로는 2층 포장시스템에만 이용가능) 및 연립방정식(다층탄성해석 출력 데이터로부터 얻어진 비선형 회귀식을 이용)을 이용할 수 있다.

반복해석 방법은 포장의 층 구조에 대하여 탄성계수를 가정하고 하중으로부터 반경방향의 여러 개의 포면 변형량을 계산하고 변형량의 계산치와 측정치를 비교하고, 이 방법을 반복하여 각 회마다 각 층의 탄성계수를 바꾸어 계산치와 측정치와의 차가 어느 정도 범위 내에 들어 갈 때까지 또는 반복회수가 최대치에 도달할 때까지 반복해서 실시하는 것이다.

다른 해석방법으로서는 이미 알고있는 층탄성계수 및 두께를 조합하여 앞에서 계산한 변형곡선의 데이터 베이스를 이용하여 그 곡선이 측정된 변형곡선과 정확하게 일치할 때까지 검색하는 방법이다.

포장의 거동을 해석할 때 포면의 변형 및 다른 응답(반응)은 일반적이고 층탄성계수를 입력

<표 2> 역계산 프로그램 요약

프로그램명	개발자	계산방법	서브루틴	역계산방법	비선형 해석	강성층 분석	최대층수	초기계수 설정	계수의 범위설정	Convergence Routine
BISDEF	USACE-WES	다층탄성이론	BISAR (Proprietary)	Iterative	불가	Yes	3층이 가장적합	필요	필요	절대오차의 자동합계
BOUSDEF	ZHOU, et. al. 오레곤대학	등가깊이이론	MET	Iterative	가능	Yes	5층가능 (3층이 가장 적합)	필요	필요	오차백분율의 합계
CHEVDEF	USACE-WES	다층탄성이론	CHEVRON	Iterative	불가	Yes	3층이 가장적합	필요	필요	절대오차의 자동의 합계
ELMOD/ELCON	PULLJDTZ DYNATEST	등가깊이이론	MET	Iterative	노상안가능	Yes	4층까지가능	필요없음	필요없음	5개 센서의 상대오차
ELSDEF	TEXAS A&M	다층탄성이론	ELSYMS	Iterative	불가	Yes	3층이 가장적합	필요	필요	절대오차의 자동의 합계
EVERCALC	J. MAHONEY	다층탄성이론	CHEVRON	Iterative	가능	Yes	3층까지	필요	필요	절대오차의 합계
MODCOMP3	L. IRWIN, SZEKENYI	다층탄성이론	CHEVRON	Iterative	가능	Yes	5층까지	필요	필요	센서의 상대오차
MODULUS	TTI	다층탄성이론	WESLEA	Data Base	가능	Yes	4층이 가장적합	필요	필요	상대자승오차의합계
WESDEF	USACE-WES	다층탄성이론	WESLEA	Iterative	불가	Yes	5층까지	필요	필요	절대오차의 자동의 합계
MICHBK	미시간주립대	다층탄성이론	CHEVRON	Iterative	불가	Yes	4층이 가장적합	필요	필요	상대자승오차의합계

치로서 이용한 다층탄성포장해석 프로그램으로부터 계산한다(순해석). “역해석에서는 층단성계수는 최종적인 표면의 변형이 측정된 변형에 가장 잘 일치하도록 선택적으로 수정된다.

### 5. 정확한 FWD시험 및 분석을 위한 준비사항

결과 분석을 실시하기 전에 해당 구간의 포장 단면, 토질조사 자료, 보수시기, 지하수위 상태, 현장의 조건(성토구간, 교량구간, 중차량의 통행량 등)을 조사하여야 한다. 특히, FWD 운영자 및 해석자는 다음과 같은 사항을 유의해서 FWD시험을 수행하여야 한다.

1. 측정된 구간 별로 각 센서에 대한 처짐량 값 도시 : 어느 한 구간이 다른 구간에 비하여 지나치게 처짐값이 작거나 클 경우 우선 조사 대상으로 분류하고, 각 센서의 처짐값은 재하판에서 멀어질수록 작아진다. 만일의 경우, 작아지지 않을 경우에는 FWD 조작 실수 또는 프로그램의 오류 등으로 인하여 발생하기 때문에 FWD 운영자는 이러한 점에 유의하여 FWD를 점검하여야 한다.
2. 과적 차량 검문소, 성토구간 및 하천 구간 등 특정구간이 있는 경우 FWD 운영자는 반드시 해당되는 시험파일에 현장의 상태를 상세하게 기록한다. 과적 차량 검문소가 도로 주위에 있는 경우 다른 구간에 비하여 처짐량이 매우 작게 기록된다. 그러나, 성토 구조물상에 도로가 건설된 경우 처짐량이 다른 구간에 비하여 현저하게 커지게 된다. 따라서 이러한 상황을 FWD 측정결과에 참고하여 해석에 오류를 범하지 않도록 하여야 한다.
3. FWD 운영자는 시험 전에 센서의 배열을 포장구조 해석자의 지시를 받고 배열한다. 특수한 목적이 있는 시험의 경우에는 센서의 배열이 매우 중요하기 때문이다.
4. FWD 운영자는 핸드폰과 즉석 사진기를 차량에 함께 가지고 있어야 하며, 이상한 시험 결과가 있을 경우에는 포장구조 해석 책임자에게 즉시 연락을 취하여야 한다. 특수한 상황이 발견될 때에는 반드시 사진을 찍어둔다.

### 6. 결과의 이용 및 포장 유지보수에 활용

결과를 이용하는 방법은 가장 단순한 방법으로 각 층의 처짐을 상호 비교하여 처짐량의 고저에 따라 구간 별로 포장시스템의 상태를 단순 비교하는 방법이 있다. 그러나, 이 방법은 포장체의 역학적인 특성을 충분히 고려하지 못하기 때문에 현장에서 역 해석을 실시하기 전에 현장에서 FWD의 측정결과와 오류발생 점점 또는 도면상에 나타나고 있는 포장하부의 노상체 및 입상재료의 종류에 따라 처짐량이 변화하는 양상을 점검하는데 사용한다.

표 1의 처짐유역 변수들을 이용하여 처짐유역의 형상, 표면의 곡률을 분석하여 포장체의 강성을 판단하기도 한다. FWD는 주로 상대적인 비교와 시간의 변화에 의한 처짐유역 변수들을 지속적으로 모니터링 함으로써 데이터 베이스형의 자료관리를 실시하게 된다.

FWD 측정자료 및 역해석 결과는 데이터 베이스로 관리되며 경험 및 통계처리를 이용하여 다음과 같은 포장의 유지보수에 사용되고 있다.

- ① 포장 강도에 대한 혼합물 및 입상재료의 상대적인 기여도를 평가

- ② 재포장 또는 특별한 조치가 필요한 경우 어느 층에서 문제가 발생하고 있는가를 평가
- ③ 보수방법 및 시기결정
- ④ 하중에 의해 포장의 각층에서 발생하는 응력 및 변형율을 계산에 사용
- ⑤ 피로곡선 또는 변경기준과 교통이력을 조합하여 계산된 응력과 변형율을 사용하여 평가하려는 포장의 수명을 계산에 사용
- ⑥ 계산된 포장의 수명과 가까운 장래의 교통 예측을 이용하여 포장의 잔존수명 결정
- ⑦ 포장의 잔존수명이 필요한 설계수명보다 짧아졌을 때 덧씌우기(overlay) 두께의 계산
- ⑧ 경계층의 구조적인 안정도 확인에 사용
- ⑨ 콘크리트 포장의 공동(void) 위치확인 및 언더셀링
- ⑩ 줄눈부의 하중 전달을 시험에 사용

## 7. 맺음말

선진외국에서는 물론 우리나라와 가까운 일본에서도 FWD를 사용하여 포장의 유지보수를 실시하고 있다. FWD가 포장의 유지보수에 널리 사용되고 있는 이유는 공학적인 이론에 근거하여 합리적이며 과학적으로 포장구조 시스템을

평가하기 때문이다. 국내에서는 소수의 전문가 몇몇 사람만이 FWD의 운영 방법과 해석결과와 이용법에 대하여 알고 있어서 이번 특집 기사를 통하여 포장분야에 관심이 있는 여러 사람들에게 새로운 공부거리가 되었으면 하는 마음이다. 가까운 시일 내에 한국도로포장공학회 를 통하여 FWD에 대한 특별 세미나를 개최하고 학회 내에 FWD 연구회 또는 위원회를 설치 운영하여 국내의 FWD 보급과 활용기술을 전파해 나갈 계획을 가지고 있다. 이번 특집 기사를 통하여 FWD에 대한 시험 방법과 활용에 대하여 다소나마 도움이 되었으면 하는 마음이다.

## 참고문헌

- 1) Federal Highway Administration, "Pavement Deflection Analysis" Participant Workbook, NHI Course No. 131127, Publication No. FHWA-HI-94-021, February, 1994
- 2) 鋪裝, "フォーリングウイトデフレクトメータ特集", Vol. 34 No. 7, pp. 3 - 26, 1999, 7月
- 3) SHRP, "Manual for FWD Testing in the Long-Term Pavement Performance Program", SHRP-P-661, National Research Council, Washington, DC, 1993.