

# 비파괴시험을 이용한 아스팔트 포장의 유지관리

최준성\*

## 1. 머리말

포장도로는 교통하중과 기후조건 등의 작용으로 노화됨에 따라 계속해서 노면상태가 변하고 포장구조체가 노후하게 되어 주행성, 안정성 및 쾌적성이 저하되며 결국에는 교통안전과 소통에 지장을 주게 된다. 그러나 포장상태를 정기적으로 평가하여 적절한 유지보수를 실시한다면 포장 공용성을 향상시킬 뿐 아니라 도로의 수명을 연장시킬 수 있다. 따라서 포장도로의 유지관리를 효율적이고 과학적으로 수행하는 것은 도로를 신설하는 것 못지 않게 중요한 일이다. 또한 최근 환경문제와 더불어 예산문제 등으로 인하여 신설 도로의 구축에 많은 어려움이 있다. 그러므로 수십년 동안 기존도로에 투자한 막대한 비용에 대해 최대의 편익효과를 얻기 위하여 합리적이고 효율적인 유지관리가 절실히 필요한 상황이다.

공용중인 도로와 공항의 합리적 유지관리를 위해서는 아스팔트 포장상태를 정확히 평가할 수 있는 체계가 필요하며, 그 첫번째 요구조건은 이상적인 포장도로의 각 층의 물성을 신뢰성 있게 추정하기 위한 장비의 선정이다. 포장도로의 해석 모델은 1940년대초 Burmister의 다층탄성이론과 유한요소해석이론을 기초로 정립되었으나 포장도로의 물성추정 장비의 미비로 합리적인 유지관리

에 문제점이 많았다. 그러나 이러한 문제점은 시험장비의 발달과 더불어 해결되기 시작하였으며, 근래에 들어서는 물성추정 하드웨어적인 요소는 신뢰성이 좋은 비파괴시험장비의 개발로 많은 발전을 이루었으나 소프트웨어적인 해석기법연구가 절실히 필요한 실정이다. 본 고에서는 최근 관심이 증폭하고 있는 고속도로, 국도, 공항의 유지관리시스템(PMS, Pavement Management System)의 구조적, 기능적, 안정적 측면에서의 평가시 구조적 평가의 기본이 되는 비파괴시험장비의 이용 현황과 활용방안에 대하여 국내외의 동향 및 연구결과를 토대로 기술하고자 한다. 미끄럼저항 측정장비 및 종방향 노면요철 측정장비 등 기능적 평가를 수행하는 장비는 이미 소개된 바(학회지 제1권 2호) 여기서는 생략하기로 한다. 본 고에서는 구조적 평가에 초점을 맞추어 비파괴시험장비를 통한 아스팔트 포장도로의 유지관리에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 왜 비파괴시험장비를 이용하는가?

유지관리라는 표현에는 앞에서 설명한 유지보수를 전제로 하고 있다. 팻칭, 표면처리등 유지공

\* 정희원 · 인덕대학 토목환경설계과 (soilpave@mail.induk.ac.kr)

법은 교통에 지장을 주지 않도록 상시 유지보수를 위하여 조사 및 민원에 의해 해결하나, 포장도로가 시일이 경과됨에 따라 교통량의 누적에 의한 표면마모, 표면변형, 균열 등 저하된 서비스 지수를 향상하고, 포장단면을 보강개선하기 위한 덧씌우기 및 재포장은 정기적인 보수공법이 필요하므로 과학적인 평가를 통하여 장기적으로 유지관리할 수 있는 체계가 필요하다.

아스팔트 포장은 일정기간동안 충분한 내구성과 공용성을 발휘하도록 교통여건, 자연여건 및 사용재료를 기준으로 하여 설계되며, 충분히 관리되어도 반복 교통하중 및 기상변화의 영향을 받아 포장도로의 개방과 함께 파손이 동시에 진행되어 진다. 아스팔트포장을 유지관리하는 데 있어 포장의 파손현상과 그 원인을 잘 이해하는 것은 중요한 일이며, 포장의 파손은 노상토의 지지력, 교통량, 포장두께의 세 가지의 균형이 깨어짐으로 일어난다고 볼 수 있다. 이러한 파손의 원인은 노면성상과 포장구조가 서로 관계되어 있어 분리하기가 어려우나 유지관리를 위하여 분류하여 구분하고 있다. 자세한 설명은 앞의 다른 논고에서 언급되었으리라 보고 본 고에서는 생략하기로 한다. 그러므로 아스팔트 포장도로는 개방과 동시에 파손이 진전되므로 정기적인 평가를 통하여 포장도로의 수명을 연장하기 위한 유지관리가 필요함을 알 수 있다.

장기적으로 아스팔트 포장도로를 유지관리하기 위해 사용되는 방법으로는 노면을 관찰하는 방법으로 첫째, 미국의 AASHO 도로시험의 결과로부터 얻어진 PSI(Present Serviceability Index)를 이용하는 방법, 둘째 노면의 소성변형을 중시하여 일본건설성토목연구소가 1981년 포장의 공용성을 노면의 특성치에 의해 수치적으로 나타낸 MCI(Maintenance Control Index) 평가지수를 유지보수의 기준으로 활용하고 있다. 이러한 평가지수치를 통하여 표면처리, 덧씌우기, 재포장등을 실시

하도록 제시하고 있다. 하지만 이러한 노면관찰에는 포장구조의 정확한 평가가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 그러므로 아스팔트 포장도로의 장기적인 공용성을 평가하기 위하여 장기포장 공용성(LTPP; Long Term Pavement Performance)모델을 개발하고 아스팔트 포장도로의 파괴기준식을 개발하기 위하여 공용성 추적조사를 실시하고 있다. 이러한 장기포장 공용성 모델은 여러 종류의 유지관리 계획, 교통하중, 기후 인자, 노상에 따라 여러 포장형태의 장기 공용성에 대한 정보를 제공할 수 있다.

이러한 장기포장 공용성 모델과 파괴기준식은 아스팔트 포장도로의 구조적 거동으로부터 포장도로의 공용성능 즉 포장수명(잔존수명)을 추정할 수 있다. 구조적 거동은 피로균열을 대변하는 아스팔트 표층 또는 아스팔트 기층의 인장변형률과 소성변형률 대변하는 노상의 압축변형률과 탄성계수로서, 직접 공용중인 도로에 계측기를 매설하여 측정할 수도 있으나 대부분 포장도로에서 일정기간 공용후(교통량 통과 후) 아스팔트 포장도로의 탄성계수를 추정하여 구조해석을 통해 수치해석적으로 산정한다. 즉 장기적인 아스팔트 포장의 과학적이고 합리적인 유지관리뿐만 아니라 역학적 포장설계법에는 아스팔트 포장의 각 층의 탄성계수가 필요한 것이다. 이러한 각 층의 탄성계수는 일정기간 공용후 각 층의 보링코아를 채취하여 실내에서 실험할 수도 있으나 각 층의 보링코아를 일정간격으로 다수 확보하기도 어렵고, 또한 일정기간 교통량 통과후 주기적이고 정기적인 평가를 수행하는데 있어, 교통방해와 공용중인 포장도로의 파손 및 코아부근에서 추후 포장도로의 파손이 예상되므로 실험목적인 시험도로 등 특수도로이외에는 실시할 수가 없다. 또한 국내 포장도로 전체를 관리할 수가 없고, 실내와 현장에서의 하중조건 및 환경조건을 고려하기가 어렵기 때문에 현장에서의 조건을 그대로 유지하고,

포장도로의 손상을 주지 않는 비파괴시험장비가 필요한 것이다. 또한 아스팔트 포장도로는 비파괴시험장비를 이용하여 포장도로의 물성을 추정 후 공용성저하가 예상되면, 교통을 우회시키거나 한 차로만을 운영하는 방법을 사용할 수도 있다. 이러한 방법은 아직은 사용중인 방법은 아니나 공용중인 포장도로에 휴식기(Rest period)를 제공하면 자체적으로 공용성이 나아지는 치료효과(Healing)가 있음이 연구결과 밝혀졌고, 이에 대한 실무적용을 위해 유럽포장설계법에서 연구중에 있기 때문에 국내에서도 활발한 토론이 필요한 실정이다.

덧씌우기 설계방법에서도 주로 많이 쓰이는 기존의 덧씌우기 두께설계방법인 CBR에 의한 방법과 유효포장 두께지수에 의한 방법 이외에 비파괴시험장비를 통한 역학적 분석방법에 의한 설계방법이 있다. 이는 비파괴시험장비를 이용하여 파괴기준식으로부터 잔존수명을 산정하여 예상설계교통량에 도달할 수 있는 덧씌우기 두께를 결정하는 방법이다. 이를 위하여 비파괴시험으로부터 얻은 시험치를 이용하여 탄성계수를 산정한 후 환경인자에 대한 보정을 실시한다. 이와 같이 포장도로의 해석과 비파괴 진단장비의 발전은 아스팔트 포장도로의 유지관리뿐만 아니라 설계, 시공등을 통일된 역학적인 개념으로 운영하게 될 것이다.

### 3. 비파괴시험장비의 종류

아스팔트 포장도로의 물성(탄성계수)을 추정하는 방법은 크게 시험 시편을 이용한 실내시험과 직접 현장에서 시험하는 현장 시험으로 구분되는데, 오늘날 현장 시험 중 비파괴시험이 포장도로를 손상시키지 않을 뿐 아니라 시험이 번거롭지 않기 때문에 대부분을 차지하게 되었다. 현장 비파괴시험으로부터 추정된 현위치 물성(탄성계수)

은 포장도로의 설계 및 보수를 역학적인 해석으로 수행하는데 사용된다. 비파괴시험으로부터 추정된 포장도로의 물성(탄성계수)은 포장도로의 기하학적 형태, 포장두께, 예상되는 추후 교통량 등의 요소와 함께 포장도로의 잔존수명과 포장도로 각 층의 응력, 변형률, 처짐등 포장도로의 예상거동을 파악하여 역학적 설계의 기초데이터로 사용된다. 비파괴시험을 통한 포장도로 평가방법은 탄성파를 이용한 방법과 처짐을 이용한 방법으로 크게 나눌 수가 있다.

#### 3.1 비파괴시험장비

탄성파를 이용한 방법은 그림 1과 같이 포장구조에 충격을 가하여 충격에너지가 지반을 따라 탄성파의 형태로 전달되며, 이러한 탄성파 속도는 전달되는 매질의 물성에 의존하게 되므로 탄성파 속도를 측정함으로써 물성(탄성계수)을 추정하는 것이다. 탄성파는 체적파(Body Wave)와 표면파(Surface Wave)로 구분된다. 체적파는 지반의 내부 및 표면을 따라 고루 전파되는 탄성파로서 압축파(Compressional Wave)와 전단파(Shear Wave)가 이에 속한다. 현장에서 동적 물성인 동적 탄성계수와 포아송비는 체적파인 압축파와 전단파의 속도 및 표면파의 속도로부터 탄성론에 의하여 구할 수가 있다. 표면파 속도는 표면파 주파수해석(SASW: Spectral Analysis of Surface Wave)시

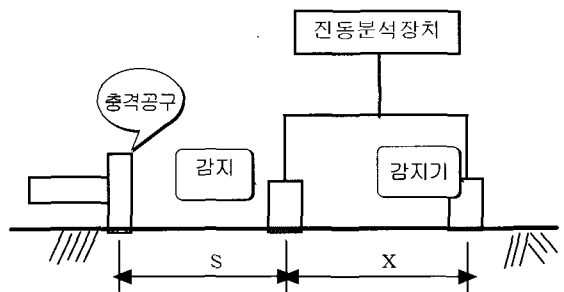


그림 1. 탄성파시험 개요도

험에도 이용된다. 또한 정규진동을 이용한 방법도 있다. 탄성파시험은 주로 이론을 응용한 시험용으로, FWD 등 현장 비파괴시험장비를 응용한 시스템은 아니다.

처짐을 이용한 방법은 하중을 표면에 가하여 일련의 표면처짐들을 측정하고, 최대처짐값 또는 표면처짐곡선으로부터 층 탄성이론과 같은 해석 방법을 이용하여 포장도로의 상태평가 및 물성(탄성계수)을 역해석하여 추정하는 것이다.

최근 미국과 유럽등지에서 도로 및 공항의 각종 포장구조평가 및 지지력평가와 유지관리 및 보수에 가장 많이 쓰이고 있는 비파괴시험장비는 FWD(Falling Weight Deflectometer)로, 포장도로의 물성을 추정하기 위하여 포장 표면의 처짐 형

상을 이용한 것은 1938년 미국 캘리포니아 도로국에서 포장 표면에 처짐 측정 장치를 설치하여 트럭 하중에 의한 처짐을 측정한 것이 그 시초였다. 그 이후 최근까지 포장도로의 표면 처짐을 측정하기 위한 많은 비파괴시험장비들이 표 1과 같이 개발되었다. 이외에도 표 1의 비파괴시험장비들을 응용한 RWD(Rolling Weight Deflectometer), HWD(Heavy Weight Deflectometer) 등이 있다. 그러나 이러한 비파괴시험도 각 장비에 따라서 장점과 단점을 지닌 바 그 목적에 따라 활용하여야 한다. 표 2는 각 비파괴 시험장비에 따른 장단점을 나타낸 것이고 그림 2~그림 10은 각 비파괴시험장비의 전경을 나타낸 그림이다. 각 방법의 자세한 설명은 참고문헌을 활용하기 바란다.

표 1. 비파괴 시험장비 개발동향

분류	장비명	측정치	추정치
탄성파시험	진동분석장비	탄성과	층두께, 탄성계수
정적 처짐측정	평판 재하 시험	처짐	지지력계수
준정적 처짐측정	벤켈만 빔	최대 처짐	경험적 잔존수명, 덧씌우기 두께
자동 처짐 측정	La Croix Deflectograph, Traveling Deflectometer	최대 처짐	경험적 잔존수명, 덧씌우기 두께
정현진동하중에 의한 처짐측정	Dynalect, Road Rater	처짐 곡선	탄성계수
충격 하중에 의한 처짐측정	Falling Weight Deflectometer (FWD)	처짐 곡선	탄성계수
주행식 동적변위측정	Rolling Dynamic Deflectometer(RDD)	연속적 변위분포도	탄성계수
간편식 충격하중에 의한 처짐측정	Handy FWD	최대 처짐 및 처짐곡선	탄성계수

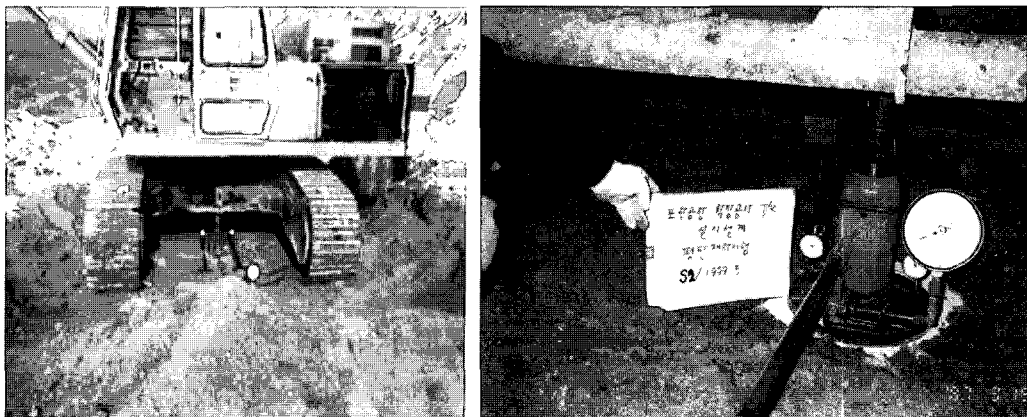


그림 2. 백호 및 덤프트럭을 이용한 평판재하시험의 전경

표 2. 비파괴 시험 장비의 장단점 비교

장비명	장 점	단 점
평판 재하 시험	장비의 취급이 용이하고 탄성계수 추정이 가능하다.	• 시험에 시간이 많이 걸리고 정확도가 떨어진다.
벤켈만 빔	장비의 취급이 용이하고 풍부한 시험자료를 갖고 있으며 포장구조체의 물성 추정이 가능하다.	• 측정 오차가 발생하기 쉽고, 측정 기준점이 처짐곡선 내에 존재하는 경우가 발생한다. • 시험 차량의 주행 속도가 느리기 때문에 실제 하중조건과 상이하다. 작업 진행이 늦다. 포장체내의 변형을 추정이 용이치 않다.
Traveling Deflectometer, Deflectograph	벤켈만 빔 시험에 비해 작업 속도가 빠르고 계측이 자동화되어 있다.	• 벤켈만 빔의 단점과 동일하고 계측이 자동화되어 있는 반면 특정의 측점에 장치를 정확히 놓기가 어렵다.
Dynalect,	• 정확한 처짐 측정이 가능하다. • surface reference가 일정하게 유지된다.	• 진동하중과 진동수가 고정되어 있다. 해석 방법에 따라 비선형 거동을 고려해야 한다. • 시험 하중이 실제 하중 조건과 상이하다. 시험 진동수가 포장 구조체의 공진 진동수에 근접할 때 처짐이 크게 발생할 우려가 있다.
Road Rater	• 정확한 처짐 측정이 가능하다. • surface reference가 일정하게 유지된다. • 진동 하중과 진동수의 조절이 가능하다.	• 정하중이 큰 경우 감지기의 측정 감도가 저하된다. 해석 방법에 따라 비선형 거동을 고려해야 한다. • 시험 진동수가 포장 구조체의 공진 진동수에 근접할 때 처짐이 크게 발생할 우려가 있다.
Falling Weight Deflectometer (FWD)	• 시험하중을 실제 차량 하중 조건에 근접시킬수 있으므로 비선형을 고려하지 않아도 된다. • 포장체내의 공동을 확인할 수 있다. • 시멘트 포장의 경우 줄눈부에서 하중 전달 정도를 추정할 수 있다.	• 실제 도로의 점탄성을 고려하기가 곤란하다.
Rolling Dynamic Deflectometer (RDD)	포장의 구조적상태의 연속적 정보화가 가능하며, 연속적인 변위분포도를 구하여 등급별 구간화를 할 수 있다.	• 측정 오차가 발생하기 쉽고, 측정 기준점이 처짐곡선 내에 존재하는 경우가 발생한다. • 측정된 자료들의 분해능 및 신뢰성 검증중.
Handy FWD	소형이므로 운반등 기동성이 용이하며, 간이포장의 경우 층별탄성계수 추정이 가능하다.	• 일반포장에서는 아스팔트층 탄성계수 추정은 용이하나 층별 탄성계수 추정은 검증연구중이며 다층탄성이론에 의한 역해석이 어렵다.

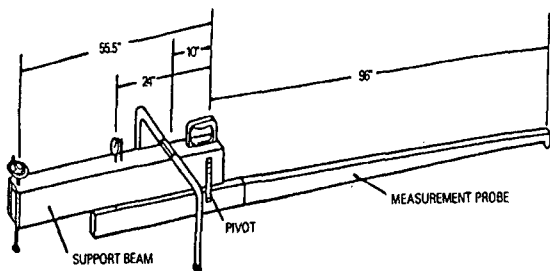


그림 3. 벤켈만빔

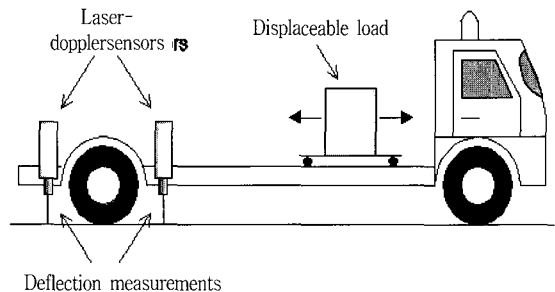
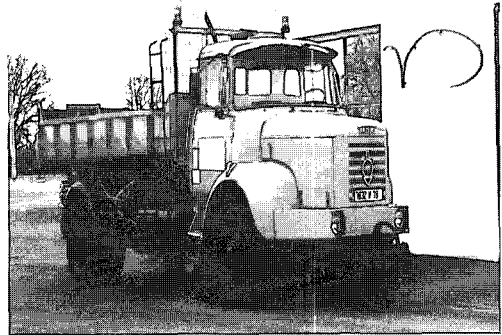


그림 4. Deflectograph의 개략도



(a) 견인차량을 이용한 Deflectograph



(b) 덤프트럭을 이용한 Deflectograph

그림 5. 상업화된 Deflectograph



그림 6. 상업화된 Dynaflect

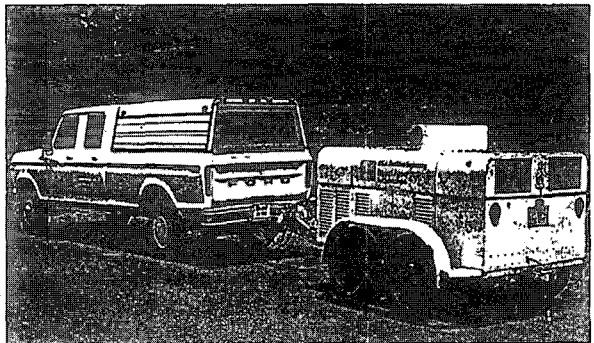


그림 7. 상업화된 Road Rater

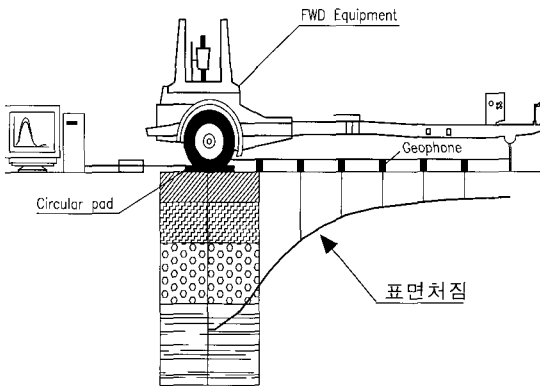


그림 8. FWD 비파괴시험

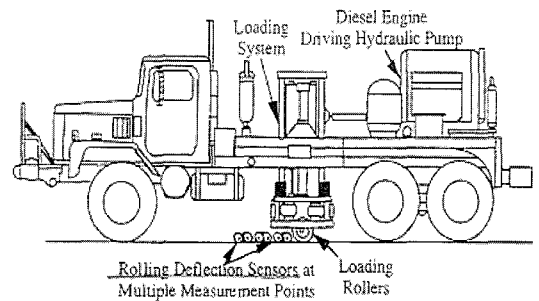


그림 9. Rolling Dynamic Deflectometer 의 개략도

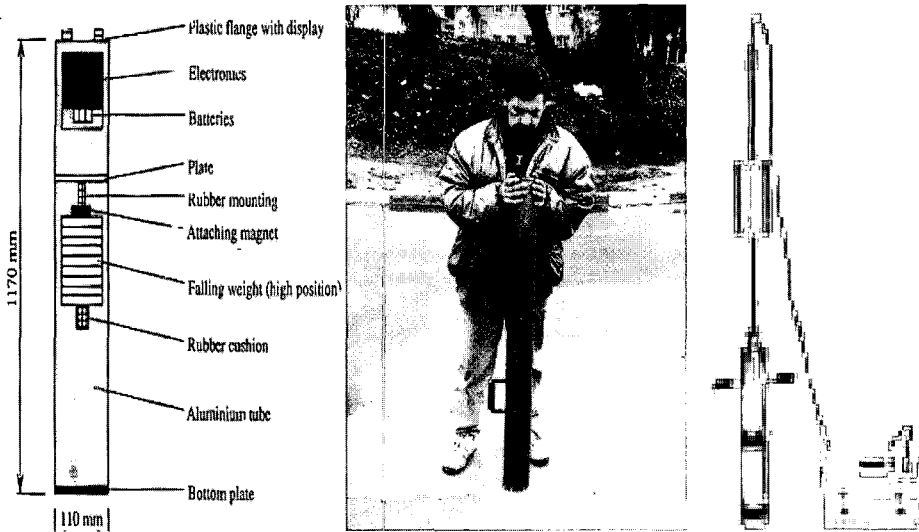


그림 10. HFWD의 개략도 및 현장시험

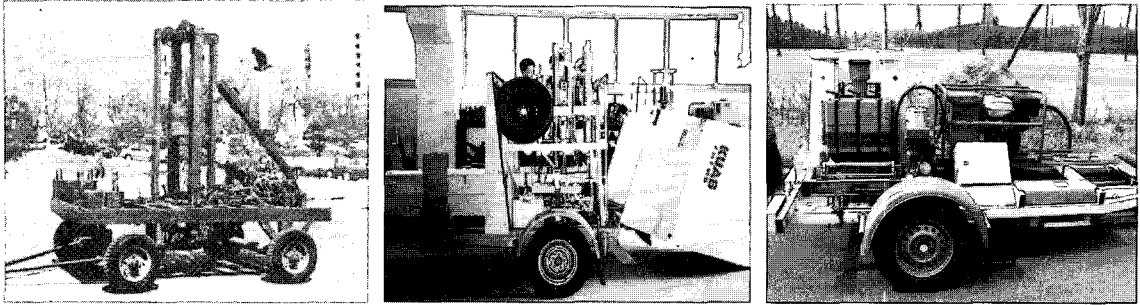
본 고에서는 전 세계적으로 활발히 사용되고 있는 비파괴시험장비인 Falling Weight Deflectometer (FWD)를 이용한 아스팔트 포장도로의 유지관리 방법을 소개하기로 한다.

### 3.2 Falling Weight Deflectometer

#### 3.2.1 FWD 이용현황 및 종류

FWD 시험은 시험과정이 간단하고 실제의 교통하중을 가장 정확히 묘사할 수 있기 때문에 가장 우수한 장비로 평가받고 있으며, 앞으로 많은 고속도로와 국도의 확장으로 인해서 더욱더 많은 FWD가 필요할 것으로 추정된다. 일본에서는 1983년 홋카이도공업대학과 운수성 항만기술연구소에서 FWD를 최초로 도입한 이후 1990년 이후 대규모 도로 및 포장회사에 급속히 도입되어 1996년 10월까지 20대 이상에 달하는 것으로 보고되고 있다. 한편 중국에서도 최근 FWD 활용이 늘어나면서 1999년 2대 보유에서 현재 10대 이상으로 급격히 늘고 있는 추세이다. 미국에서는 도

로포장 유지보수를 전문으로 하는 민간회사가 FWD를 많이 보유하고 있는 것으로 알려져 있으며 현재 PMS(Pavement Management System : 포장유지관리시스템)에서 포장의 구조적 물성을 추정하기 위한 비파괴시험장비로, 또 SHRP(Strategic Highway Research Program : 전략적 도로전략사업)에서 LTPP(Long Term Pavement Performance, 포장의 장기공용성) 추적조사의 구조강도측정을 위한 중요장비로서 자리를 잡고 있다. 특히, FWD를 이용한 시계열데이터로 포장의 특성변화를 관찰하는 데 유리하며 하중과 처짐곡선의 그래프에서 얻어지는 에너지의 소산량이 포장구조의 특성을 반영하는 지에 대한 연구를 수행중이다. 미국내 35개 이상의 도로관리청에서 FWD를 활용하고 있으며, 최근에 각 관리청에서 FWD 조사자료의 정도를 높이고 신뢰성을 키우기 위한 방편으로 전국에 4개의 FWD 칼리브레이션 센터를 건립하여 운영중에 있다. 유럽에서는 덴마크의 Dynatest사, 노르웨이의 Pheonix사, 스웨덴의 KUAB Model 등 FWD제작에서 앞서고



(a) 연세대학교 FWD 시제품

(b) 국내 KUAB FWD 내부모습

(c) 국내 DYNATEST FWD

그림 11. 국내보유 FWD 종류

있으며, 그 활용이 이미 보편화되어 있는 추세이다.

국내의 경우 한국도로공사에서 1995년 구입하여 고속도로에서 사용중인 DYNATEST FWD, 건교부에서 구입하여 국도의 유지관리에 사용중인 KUAB FWD 2대뿐으로, 전체 국내도로의 평가 및 유지관리 계획 수립을 위해서는 절실히 부족한 상태이다. 또한 수입되어 있는 FWD 장비는 고장수리시에 많은 애로가 있으며, 각 센서 점검, 전원공급 장치의 문제점, 전체 시스템의 calibration에 많은 어려움이 있다. 또한 운영 소프트웨어가 외국에서 개발된 바 개선이 어렵고, 외국의 자료에 의한 데이터베이스가 사용되어 국내의 경우에 부적합한 경우도 발생한다. 그러므로 FWD를 국내에서 직접 개발해서 수입대체효과에 의한 경제적인 이득뿐만 아니라 추후 FWD를 적극적으로 활용하여 포장도로의 구조평가를 정확하게 해서 유지관리에 사용되는 국가예산까지 절약하기 위하여 한국생산기술연구원과 연세대학교, 한국도로공사의 산학연 협력체제로 기초연구가 진행중에 있으며, 이는 추후 다른 포장평가장비의 국산화 개발과 표준화 사업의 연계성을 제시할 모델이 될 것이며, 국산화된 도로 유지관리장비의 개선을 통해 향후 북방지역 및 외국의 도로 설계, 시공, 유지관리시스템 구축사업에 동참할 수 있는 기술

력을 확보할 것으로 기대되고 있다.

FWD의 종류는 다양하지만 그 중 대표적으로 상업화된 장비는 덴마크의 Dynatest사와 스웨덴의 KUAB Model, 국내에는 없는 노르웨이의 Phoenix FWD, 미국의 Foundation Mechanics사의 Jils 시리즈가 있다. 우리나라에서는 연세대학교에서 1990년 연구용으로 자체제작한 바 있으며, 한국도로공사에서 1995년 Dynatest Model 8000을, 한국건설기술연구원에서 1998년 Phoenix FWD를 수입, 보유하고 있다. 그림 11은 국내 보유의 FWD 장비이며, 그림 12~그림 16은 전세계에서 사용되는 FWD 장비이다.

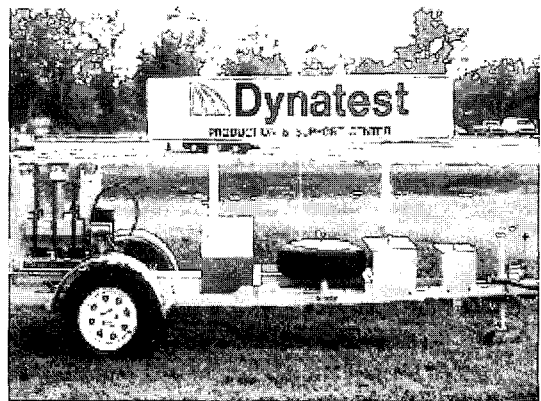


그림 12. Dynatest 8000E



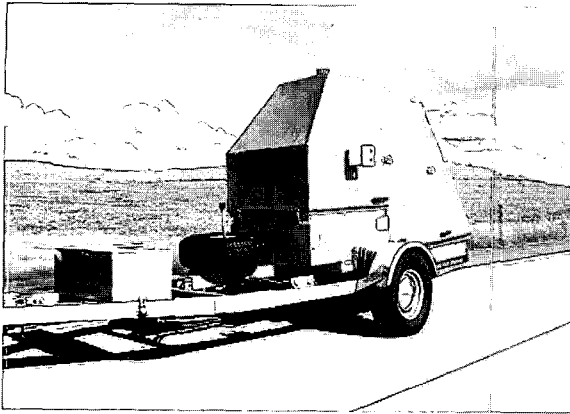


그림 13. KUAB FWD



그림 14. PRI-2100

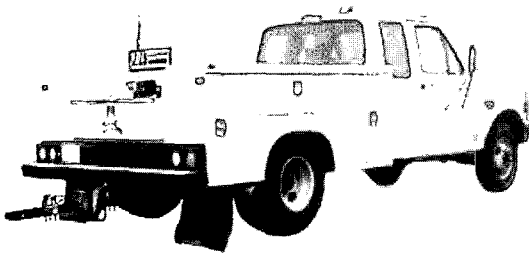


그림 15. JLS-20T FWD

### 3.2.2 FWD 시험결과의 해석

FWD 시험은 그림 8과 같이 포장체 표면에 재하하중을 자유낙하시켜 발생된 표면처짐을 재하

지점으로부터 일정한 간격으로 배치된 속도계 (Geophone)로부터 처짐을 측정하여 표면처짐곡선을 구하고 이를 역해석함으로써 각종의 물성(탄성계수)을 추정하여 포장 구조체의 구조적 평가를 수행하게 된다. FWD 시험시 하중 및 처짐의 최대값과 시간에 따른 변화값을 각각 저장한다. FWD 시험의 자세한 설명은 학회지 1권 2호의 특집논단 및 참고문헌을 활용하기 바란다.

FWD 비파괴시험결과를 분석하기전에 해당구간의 포장단면, 토질조사자료, 보수시기, 지하수위 상태, 현장의 조건(성토구간, 교량구간, 중차량의 통행량등)을 조사하여야 한다. 특히 요즘 활발히 추진되고 있는 신공법 및 개질재의 경우등 특수한 상황을 FWD 측정결과에 참고하여 해석에 오류를 범하지 않도록 하여야 한다.

FWD 시험은 향후 지속적으로 시간별·계절별로 측정하여 시간의 경과에 따른 포장도로의 물성저하현상과 이를 통한 공용성 관계정립, 공동현상파악과 덧씌우기 시기 결정을 판단할 수 있으므로 많은 시간과 노력이 담긴 시험결과를 데이터베이스로 보관하는 절차가 더욱 중요하다. FWD 측정결과는 포장층 표면의 처짐량인 표면처짐곡선으로써, 포장의 두께·물성(탄성계수)·포장하부지반의 재료 및 하중의 크기에 따라 변화하게 된다. 표면처짐곡선은 구성재료의 응력구속조건에 의하여 선형으로 나타나지 않는다. FWD를 이용하여 측정된 표면처짐곡선은 그 때의 하중, 재하판의 직경, 재하판의 압력과 함께 동시에 측정되며, 이렇게 측정된 자료들을 이용하여 표 3의 처짐평가지수와 역해석과정을 통한 물성추정값을 산정하여 구조적 평가, 진단, 유지관리정책을 수립한다. 해석결과를 이용하는 방법은 가장 단순한 방법으로 처짐평가지수를 상호 비교하여 구간별로 포장도로시스템의 상태를 단순비교하는 것이다. 그러나 이 방법은 포장체의 역학적인 특성을 충분히 고려하지 못하기 때문에 역해석 과정을

통한 물성추정치에 의한 포장 평가방법이 활발히 연구되고 있다.

표 3. 처짐평가지수

지수	공식	비고
최대처짐	D0	· D0 = 재하판 중심의 처짐(r=0) · D1, D2, D3 = 재하판으로부터 첫번째, 두번째, 세번째 처짐
면적	$A=6\{1+2(D1/D0)+2(D2/D0)+(D3/D0)\}$ 센서의 간격 = 305mm(12in)	
형성계수	$F1 = (D0-D2)/D1$ $F2 = (D1-D3)/D1$	
표면곡률 계수	$SCI = D0 - Dr$ 여기서 r은 305 또는 500mm	
처짐비	$Qr = Dr/D0$ 여기서 $Dr \approx D0/2$	

물성추정을 위한 역해석은 비단 지반 및 포장 도로뿐만 아니라 지하구조체, 토류구조물 등에 다양하게 이용되고 있다. 일반적으로 역해석이라 하면 정해석(아스팔트 콘크리트 포장도로인 경우, 다층탄성해석)의 수치해석 결과가 현장 계측결과와 일치하도록 수치해석 모형의 미지 매개변수를 정의하는 해석과정을 말하며, 크게 역순법과 System Identification법 등으로 분류할 수 있다. 역순법(Inverse method)은 계측결과인 변위와 응력으로부터 직접 역해석의 대상인 미지 매개변수를 정의하는 방법으로 기존의 정해석과는 반대되는 문제형성을 사용하는 것으로 정해석 문제의 지배방정식을 역으로 하여 계산하는 방법이다. 역순법은 다른 역해석방법에 대하여 미지 매개변수를 수정하는 과정과 그에 따른 반복역산과정이 없어 계산시간이 적다는 장점은 있으나 지배방정식의 형성과 관련한 복잡함과 비선형성이나 시간에 따른 거동 등 다양한 문제에 적용시 한계가 있다. System Identification법은 실제 시스템의 특성을 잘 나타낼 수 있는 수치모형을 설정하고 실제 시스템의 결과와 수치모형 결과의 차이가 일정한 허용범위 내에 들 때까지 반복적으로 수

치모델의 매개변수를 조정하는 기법으로, 실제 시스템을 대표할 수 있는 수치모델과 효율적인 매개변수 조정 알고리즘을 필요로 한다.

현재 쓰이고 있는 역해석 프로그램들은 현장에서 FWD를 이용하여 얻은 표면처짐곡선으로부터 대부분 역해석 기법에 의하여 탄성계수를 추정하고 있다. FWD 비파괴시험을 통하여 지반 및 포장도로의 물성을 평가하는 방법은 하중과 처짐의 최고치만을 이용하는 정적 역해석 방법과 충격하중이 작용하는 과정에서 시간과 함께 변화하는 하중과 처짐의 시계열데이터(full time history data)를 이용하는 동적 역해석 방법이 있다. 현재 해석시간이 짧고 데이터처리가 간편한 정적 역해석 방법이 주류를 이루나 FWD 동하중에 의한 표면처짐을 정하중에 의한 것으로 간주하여 해석하므로 공학적 관점에서 실제적이지 못한 결과가 얻어지기도 한다. 동적 역해석 방법은 해석시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 해석과정의 어려움으로 아직 현장에서 실제 적용은 못하고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위하여 의사정적 역해석방법이 연구되고 있으며, 추후 입력변수들의 활발한 연구와 컴퓨터의 발전으로 본래의 시계열데이터를 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 역해석방법들을 이용한 물성추정은 아스팔트 콘크리트 포장구조체에 대해서는 비교적 신뢰성이 높은 동탄성계수를 추정하는 반면에, 시멘트 콘크리트 포장과 같이 콘크리트 슬래브와 그 이하층의 물성이 현격하게 큰 차이를 나타내는 포장구조에서는 현재의 역해석 과정에서 신뢰성이 높은 동탄성계수를 얻기가 쉽지 않은 것으로 알려져 있다.

역해석을 통한 탄성계수 추정은 데이터베이스를 이용한 방법과 반복해석과정을 통한 방법으로 크게 구분할 수 있으며, 이에 대한 자세한 설명은 참고문헌을 이용하기 바란다. 표 4는 현재 국내외적으로 많이 사용되고 있는 정적·동적 역해석 프로그램을 요약 정리한 것이다.

표 4. 기존 역해석 프로그램 요약

프로그램명	개발자	계산방법	서브루틴	역해석 방법	최대층수	비고	
정적 역해석	WESDEF		다층탄성이론	WES5	Iterative		
	MODCOMP 시리즈	Irwin	다층탄성이론	CHEVRON	Iterative	5층까지	
	ELSDEF	TEXAS A&M	다층탄성이론	ELSYM5	Iterative	3층 가장 적합	
	ELMOD /ELCON	Ullidtz & DYNATEST	등가깊이이론	MET	Iterative	4층까지 가능	초기값과 계수범위 설정이 필요없다.
	CHEVDEF	Bush	다층탄성이론	CHEVRON	Iterative	3층 가장적합	기울기법
	FPEDD1	Udin	다층탄성이론	SINELA	Iterative	4층까지	
	BISDEF	Bush	다층탄성이론	BISAR	Iterative	3층 가장적합	기울기법
	BOUSDEF	Davies, Mamlouk	등가깊이이론	MET	Iterative	5층까지	
	MODULUS	Michalak, Scullion	다층탄성이론	WES5	Data Base	4층 가장적합	데이터베이스이용, 동일한 포장조건에 적용, 직접(패턴)탐색법
	EVERCALC	Washington 대학	다층탄성이론	CHEVRON	Iterative	3층까지	직접탐색법, 초기값 선정을 위한 회귀식
	MFPD	연세대	다층탄성이론	SINELA	Iterative	4층까지	초기값 선정을 위한 회귀식, 가상압반층 고려
	MICHBACK	미시간주립대	다층탄성이론	CHEVRON	Iterative	4층가장적합	
	BALMAT	연세대	다층탄성이론	KENLAYER	Iterative	5층까지	초기값 설정이 필요없다.
의사정적 역해석	DYN-BAL	최준성	다층탄성이론	KENLAYER	Iterative	4층가장적합	FWD 동하중영향 고려, 초기값 설정이 필요없다. 가상압반층 고려
동적 역해석	SCALPOT	Magnuson	주파수응답함수		Iterative		감쇠탄성체, 삼변수 점탄성체
	FWD-FFT	Magnuson	푸리에변환		Iterative		왜곡현상과 물성결정의 어려움
	UTDYNF /UTFWD	Chang 등	Green 연성함수		Iterative		단순화한 모델에 적용
	ILLI-BACK	Chatti 등	유한요소해석	ILLI-SLAB	Iterative		콘크리트포장 적용
	MULTIBACK	Kang	다중주파수함수		Iterative		해석변수 및 해석시간의 과다
	BAL-ANN	연세대	인공신경망	ABAQUS	Data Base 학습법	3층 해석	해석시간이 빠르고, 균열 등 표면결합이 있는 포장체 적용 연구중

#### 4. 맺음말

비파괴시험장비는 공학적인 이론에 근거하여 합리적이며 과학적으로 포장구조 시스템을 평가할 수 있기 때문에 유지관리시스템 구축등 공항

및 도로포장에서 그 사용성이 점차 증가일로에 있다. 또한 기존시스템의 최적화 유지관리시스템 뿐만 아니라 공항 및 도로포장의 역학적 설계법에도 비파괴시험장비는 기본인자로 사용될 것으로 예상되며, 선진외국에서는 물론 우리나라와 가까운 일본과 중국에서도 FWD를 사용하여 포장

의 물성추정 및 유지보수를 실시하고 있다. 최근 유지관리시스템 구축을 위해 비파괴시험장비의 공항 및 도로포장에 응용하려는 움직임과 비파괴 시험장비중 FWD의 관심이 고조된다고 판단되어 다소나마 이해를 돕고자 하며, 비파괴시험장비의 원리이해를 통한 고유의 장비개발과 소프트웨어 적인 해석기법의 국내연구 활성화가 되었으면 하는 바램이다.

비파괴시험장비중 아스팔트 포장에서의 FWD에 대한 관심과 활용도는 세계각국에서 상당히 높은 수준이며, 향후 2002년 도로포장 설계법의 근간을 이룰 역학적 설계법의 주요한 주제이기도 하다. 그러나, 기종간의 상위성, 정도의 문제, 측정방법이나 온도보정방법의 표준화 문제, 다층탄성이론의 해의 유일성과 역해석에서 구해지는 탄성계수의 정도의 문제를 연구중에 있으며, FWD 해석결과의 활용상의 과제로서 평가방법이나 판단지표의 기준치에 관한 문제도 남아 있다. 기술 지식사회로의 변화가 강력히 요구되는 요즘, 지금까지는 선진국의 기술을 들여와서 그냥 모방만 하던 시절이었다면 앞으로는 우리가 주도적으로 관련기술을 개발, 발전시켜서 우리 고유의 기술확립과 선진외국 기술력과의 경쟁력을 확보하여야 할 것이다.

**참고문헌**

1. Nazarian and Stokoe II. "In Situ Determination of Elastic Moduli of Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method," FHWA, Report No.FHWA/TX-87/46+437-2, 1986.
2. National Highway Institute. "Pavement Deflection Analysis-Participant Workbook", Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HI-94-021, 1994, pp.6.47-6.54.
3. 연세대학교 산업기술연구소, "FWD 정밀해석 및 포장구조체 하부구조 평가방법 연구", 한국도로공사 연구보고서, 1997
4. 연세대학교 산업기술연구소, "아스팔트 및 콘크리트 포장구조체의 유지관리를 위한 시스템의 개발", 한국과학재단 연구보고서, 1992
5. 최준성, 비파괴시험을 이용한 포장도로의 평가기법에 관한 연구, 인덕대학 논문집 제 25집, 인덕대학, 2000.5.12. , pp 271-289
6. 최준성, 김수일, "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 현장은도 조건을 고려한 의사정적 역해석기법에 관한 연구", 대한토목학회논문집 제 19권 제 III-6, 대한토목학회, 1999, 11., pp. 1081 -1092
7. 최준성, 이광호, "지반 및 도로평가용 시험장비 소개와 국내활용방안", 대한토목학회지 제 48권 제 6호, 통권 242호, 대한토목학회, 2000.6 , pp 59 -70
8. 최준성, 김인수, 김수일, 도로포장구조체의 물성추정을 위한 비파괴시험장비의 국산화연구, 대한토목학회학술발표회 논문집, 대한토목학회, 2000.10.27, pp. 209-212

**학회지 광고 모집 안내**

학회지에 게재할 포장관련 업계의 광고를 모집합니다.

- 표 2 (앞표지 안쪽면, 칼라) : 200만원
- 표 3 (뒷표지 안쪽면, 칼라) : 200만원
- 표 4 (뒷표지, 칼라) : 300만원
- 간지 (칼라) : 200만원

위 금액은 4회 게재할 요금임.  
연락처 : 학회사무국 (☎ 525-7147)