

포장하부의 성능평가를 위한 고속 비파괴시험 장비

유태석¹⁾ · 한승환²⁾

1. 머리말

FWD (Falling Weight Deflectometer)는 도로 및 공항포장의 구조적 상태 및 내하력을 평가하기 위해 세계적으로 가장 널리 사용되는 비파괴시험 장비이다. 도로에는 7~120kN의 재하 범위를 가지는 그림 1과 같은 FWD를, 공항과 같이 두꺼운 포장 두께를 가지는 경우에는 FWD와 같은 원리를 가지지만 30~240kN의 재하 범위를 가지는 그림 2와 같은 HWD (Heavy Weight Deflectometer)를 사용한다.

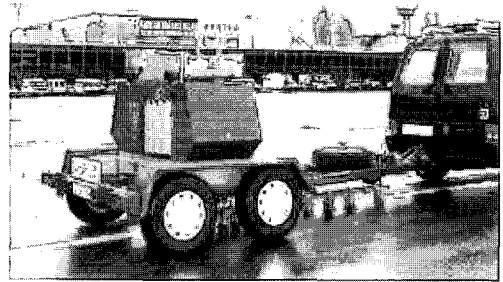


그림 2. HWD의 전경

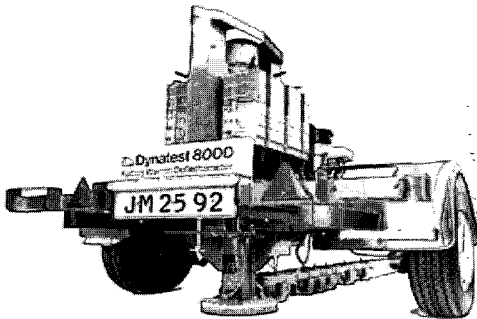
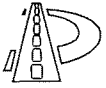


그림 1. FWD의 전경

이것은 포장의 표면에 충격하중을 가하여 형성되는 표면처짐 형상을 얻어내는 장비로 기존의 평판재하시험과 Benkelman beam 장비에 의한 시험에 비해 측정속도가 빠르고 이동차량에 의한 효과를 모사할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 처짐시험을 실시하기 위해서는 몇 분간 정지상태에서 유지하여야 하는데 이러한 방식은 교통량이 많은 구간에서는 교통지체를 일으킬 수 있고 교통량이 작은 구간에서도 고속으로 주행하는 차량으로 인해 운전자와 조종원 모두는 위험에 노출될 수밖에 없다. 또한 구간이 길 경우에는 많은 측정시간을 필요로 하게 되는데 만약 시간에 제약이 있다면 측정간격이 넓어질 수밖에 없

1) 정희원 · 한국도로공사 포장연구그룹 연구원

2) 정희원 · 한국도로공사 포장연구그룹 책임연구원



고 데이터의 신뢰성은 떨어지게 되어 PMS와 같은 대규모 조사가 필요한 프로젝트에의 적용은 무리가 따르게 된다.

이러한 결점을 보완하기 위해서 고속으로 포장 하부의 지지력을 평가하는 장비들이 개발되고 있으며 본 고에서는 이 가운데 미국에서 개발된 RWD, 스웨덴의 RDT 및 덴마크의 HSD의 성능과 측정원리를 살펴보고 현장에 적용하는 경우의 적용성을 고찰해 보기로 하였다.

2. Rolling Weight Deflectometer⁽³⁾

2.1 개요

본 장비는 퍼듀대학의 Harr가 1970년대 중반에 최초로 시도한 방법을 사용하여 처짐을 측정하도록 되어있다. 최초에 개발된 제품은 최고속도 10km/hr에서 222kN의 하중에 의한 최대처짐을 측정할 수 있도록 만들어졌고 최근에 최고속도 32km/hr에서 40kN의 하중에 의한 최대처짐을 측정할 수 있도록 진전되었으며 Quest Integrated Inc. 및 Dynatest Consulting Inc.의 공동연구에 의해 향후 70~80km/hr까지 측정속도를 높일 계획을 가지고 있는 상태이다. 그림 3은 RWD의 전경을 보여주고 있다.

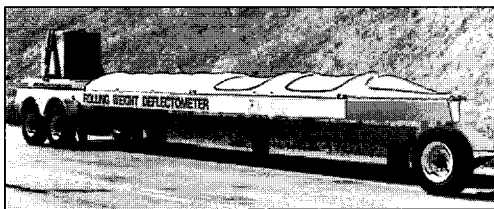


그림 3. RWD의 전경

2.2 측정원리

RWD는 포장의 처짐측정 속도를 높이기 위해

서 비접촉 광학센서를 사용한다. 최대처짐의 측정 원리는 그림 4와 같이 나타나지는데 보 형식의 프레임에 4개의 센서가 설치되어 있으며 하나는 바퀴근처에 3개는 처짐의 영향을 받지 않는 곳에 등 간격으로 설치되어 있다.

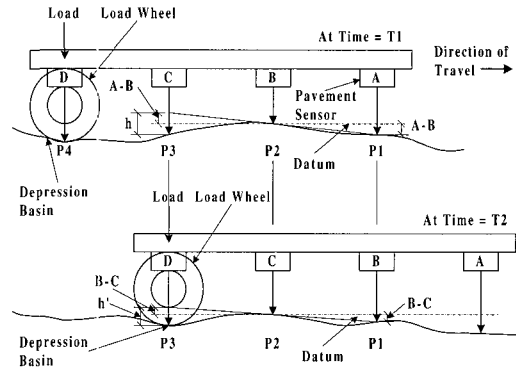


그림 4. RWD의 최대처짐 측정방법

측정과정은 2단계로 나누어지는데 첫 번째 단계에서는 각각 274cm떨어진 센서의 수직거리를 측정하고, 두 번째 단계에서는 떨어진 센서거리 만큼 이동하여 수직거리를 측정한다. 이렇게 측정된 각각의 값은 다음의 식을 통해 최대처짐으로 환산된다.

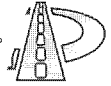
$$\text{시간 } T_1 \text{에서 : } A - (A - B) = C - h + (A - B)$$

$$\therefore h = A - 2B + C$$

$$\text{시간 } T_2 \text{에서 : } B' - (B' - C') = D' - h' + (B' - C')$$

$$\therefore h' = B' - 2C' + D'$$

위의 과정에서 구해진 결과를 이용하면 P3지점에서의 최대처짐은 $h-h'$ 으로 구해진다. 이러한 측정원리를 통해서 얻어진 값이 적절한 값을 제시하기 위해서는 센서가 동일한 경로를 따라 이동하면서 동일 지점을 찾아야 하고 센서자체의 움직임이 발생하지 않도록 하여야 한다. 본 장비에서 동일한 측정위치의 확인은 정밀한 거리측정계



를 사용하여 오차가 2%(274cm에 대하여 50mm)를 넘지 않도록 하였고 현장적용 시에 적절한 보정을 통해 0.5%이하가 될 수 있다고 보고하고 있다. RWD의 길이는 10.97cm로 센서를 지탱하는 보의 길이는 매우 길어서 차체의 진동과 열변형 등에 의해서 센서는 필연적으로 움직임이 발생할 수 있는데 이것은 보의 내부에 레이저를 설치하여 각 센서의 위치를 감시하여 보상하는 방법으로 해결하였으며 그림 5와 같다. 그림에서 beam splitter는 약 15%의 레이저 빔을 position sensor에 굴절시켜 높이의 변화를 감시하여 위치의 변화를 보정할 수 있다.

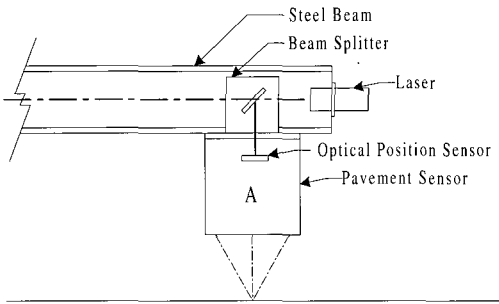


그림 5. 보의 변형을 보정하기 위한 시스템

개발된 RWD에 사용되는 센서의 정밀도는 수직거리의 측정을 위한 센서의 경우 20micron 이하의 오차를 센서의 보상을 위한 센서의 경우 5micron 이하의 오차를 가지고 있는 것으로 보고되고 있다.

2.3 현장적용

1997년 9월에 워싱턴주의 아스팔트 포장 차단 구간에 대하여 RWD 현장시험이 실시되었다. 포장단면은 입상기층 위에 16.7cm의 아스팔트가 포설된 곳으로 1년 정도 차량소통이 이루어진 비교적 신설구간 이어서 PCI 평가가 거의 100에 가까운 수치를 나타내었다.

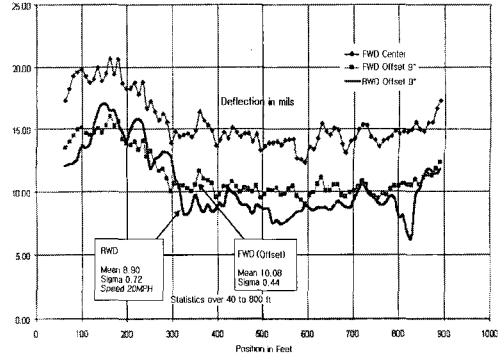


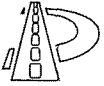
그림 6. RWD와 FWD의 시험결과 비교

이 가운데 300m 구간에 대하여 FWD와 RWD를 적용하여 그림 6과 같이 최대치점을 구하여 비교하였다. RWD의 경우 32km/hr의 속도로 측정하였는데, 초기 100m와 마지막 30m는 차량의 가속과 회전에 각각 사용되었고 약 1분의 시간이 소요되었다. 반면 FWD는 3m마다 최대치점을 측정하였고 시험시간은 2시간이 소요되었다. RWD의 경우 같은 구간을 2회 측정하여 평균값을 사용하였는데 그림 6과 같은 결과를 나타내어 장애물로 인해 시험경로를 잠시 벗어난 구간과 기어변속으로 인해 데이터의 편차가 발생한 구간을 제외하고 비교적 유사한 결과를 나타내는 것으로 보고되고 있다.

3. Rolling Deflection Tester⁽²⁾

3.1 개요

RDT는 스웨덴 국립 도로청과 스웨덴 국립 도로 및 교통 연구소가 빠르고 신속하며 안전하게 포장의 내하력과 표면상태를 조사하기 위해서 제작한 것으로 운전사와 조종원 두사람이 하루 최대 300km까지 조사하는 능력을 보유하는 것으로 알려져 있다. 이 장비는 1964년에 볼보의 타이



탄 트럭으로 연구용 시제품을 만든 이후에 사용하기 편리한 완성품으로 그림 7과 같이 최근에 제작되었다.

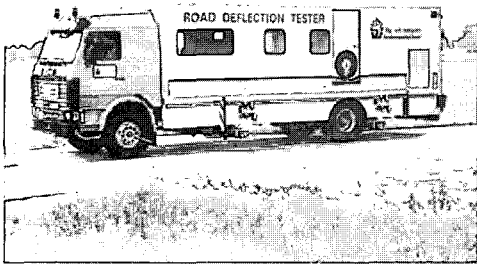


그림 7. RDT의 전경

3.2 측정원리

본 장비는 Scania R143에 2개조의 레이저 센서를 탑재하고 표면의 처짐을 측정하도록 되어있는데 1개조는 20개의 레이저 센서가 포함되어 있다. 그림 8에서와 같이 한 개조의 센서는 뒷바퀴에서 50cm떨어진 곳에 위치하여 하중에 의해 처짐이 발생할 때의 표면 형상을 측정하도록 되어있고 한 개조의 센서는 앞바퀴에서 250cm 떨어져서 처짐이 발생하지 않는 경우의 표면형상을 측정하도록 되어있다.

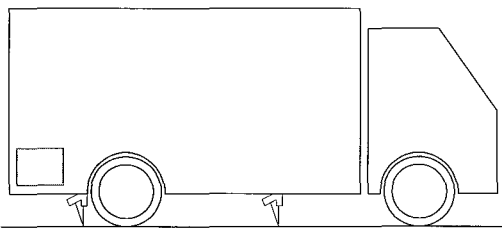


그림 8. RDT의 개략도

엔진은 뒷바퀴에 위치하여 앞바퀴와 뒷바퀴의 하중차이를 크게 하도록 하였고 400kg의 추가 음

직일 수 있도록 하여 시험을 실시하는 경우 앞바퀴는 약 30kN, 뒷바퀴는 약 120kN이 재하될 수 있도록 하였다.

20개의 레이저 센서 가운데 처음과 마지막 레이저 센서는 시험단면의 시작과 끝을 나타내는 용도로만 사용하고 18개의 센서를 이용하여 포장의 처짐 형상을 알아낸다. 이들 센서는 70km/hr로 차량이 진행되는 경우 20mm마다 데이터를 얻어내게 되는데 얻어진 처짐형상은 FEM을 통해 분석하여 물성을 역산하는데 사용한다. 센서의 배열은 그림 9와 같다.

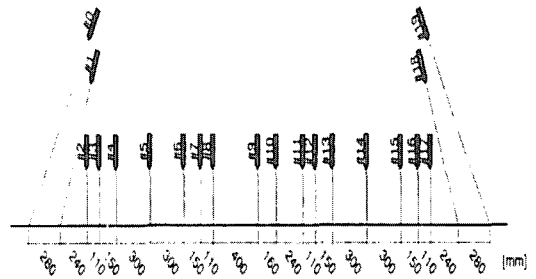
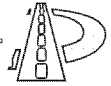


그림 9. RDT의 센서배열

3.3 현장적용

RDT의 현장적용은 FWD와 병행하여 수행되었는데 RDT를 통해서 얻은 처짐 데이터를 얻고 FWD를 통해서 얻은 역산을 통한 노상탄성계수를 얻어 비교하는 방식을 택하였다. 그림 10의 도표 좌변은 RDT의 처짐을 나타내고 우변은 FWD의 노상 탄성계수를 나타내며 표의 위 부분에 위치하는 선분이 RDT 처짐의 변화를 아래 부분에 위치하는 선분이 FWD에 의한 역산 값의 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 처짐이 작게 얻어지는 곳에서는 역산된 탄성계수가 크게 나와 적절한 상관관계를 나타내었다. 그러나 주어진 구간은 아



스팔트 구간으로 강성포장인 콘크리트구간에 적용하는 경우는 처짐이 측정되지 않거나 매우 작게 나타났고 노상탄성계수 역산 값의 정확도가 많은 변동을 보이는 것으로 나타났다.

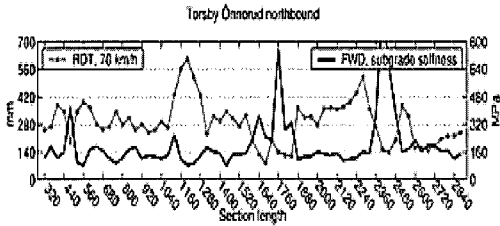


그림 10. RDT와 FWD의 비교

4. High Speed Deflectograph⁽¹⁾

4.1 개요

본 장비는 Greenwood Engineering에서 제작한 것으로 장비개발과 결과값의 해석을 위한 이론적인 작업이 1996년도부터 시작되어 2000년도 3월에 완성되었다. 초기에 덴마크 도로연구소와 GE가 주도적으로 하였고 이론적인 작업을 위해 Delft공대와 덴마크 기술대학이 참여하여 개발된 HSD는 앞서 소개한 장비와 다소 다른 방법으로 포장의 내하력을 평가하도록 되어있다. 앞서의 두 장비는 레이저 센서를 통해 절대거리를 측정하도록 되어있으나 포장 표면의 평탄성이 나빠 처짐을 제대로 구분하지 못하는 경우가 생길 수 있고 포장이 강성인 경우 처짐형상과 포장표면형상과 구분하기가 힘든 경우가 존재하게 된다. 이를 고려하여 본 장비는 다음절에서 설명되는 방식에 의해서 처짐을 계산하여 포장평가를 할 수 있도록 하였다. HSD의 전경은 그림 11과 같다.



그림 11. HSD의 전경

4.2 측정원리

본 장비는 중차량에 설치된 레이저 도플러 센서가 포장의 표면에 레이저를 발사하여 차량하중에 의해서 발생된 포장표면의 처짐속도를 측정하게 된다. HSD의 측정원리는 그림 12와 같이 설명된다.

도플러효과는 물체가 이동하면서 발산하는 파장은 그것에 접근하는 물체에서는 줄어 들고 멀어지는 물체에서는 늘어나는 것으로 발산하는 파장과 상대속도를 알면 변화된 파장을 계산할 수 있다. 따라서 그림 12에서와 같이 발신되는 레이저의 파장과 반사되어 수신되는 레이저의 파장을 분석하여 처짐 속도를 계산할 수 있고 이것의 적분을 통해 절대 변위를 계산할 수 있다.

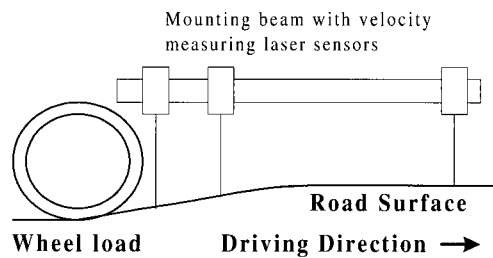
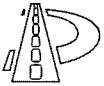


그림 12. HSD의 측정원리



앞서 소개한 장비와 마찬가지로 본 장비는 레이저센서를 통한 데이터의 정확도를 높이기 위해 추가적인 시스템을 갖추어야 하는데 그림 13과 같이 설명된다. 그림에서와 같이 시스템에는 거리 측정계, 하중 측정장치, 표면온도 측정장치와 더불어 레이저센서의 움직임 및 기울어짐을 보정할 수 있는 장치가 필요한데 servo system을 통해 이를 수행하도록 되어있다.

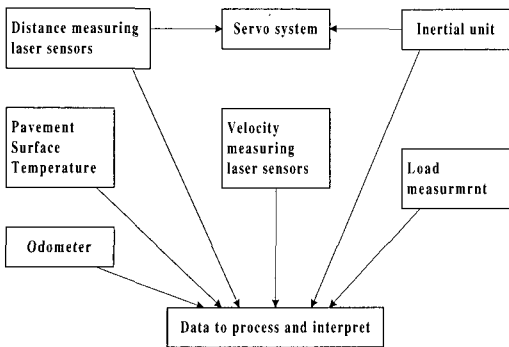


그림 13. HSD의 측정 시스템

실험실에서 얻어진 도플러 센서의 정확도는 0.14mm/s로 나타났는데 HSD의 오차는 센서자체의 정확성과 함께 부가시스템의 정확성, 센서의 숫자, 배열, 현장 적용성 및 데이터 처리과정의 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.

또한 컴퓨터 프로그램인 Veroad를 통해 분석한 결과 아스팔트 포장의 경우는 5~10 mm/s를 콘크리트 포장의 경우는 1~2 mm/s의 처짐속도를 보일 것으로 예상되어 이를 기초로 계산한 결과를 토대로 아스팔트 포장에서 1.5~3.0% 이하의 오차를 갖는 정확도와 콘크리트 포장에서 7~14% 이하의 오차를 갖는 정확도를 가질 것으로 분석하고 있다.

5. 맺음말

현재 포장의 내하력에 사용되는 FWD는 이전에 개발된 장비에 비해서 향상된 속도와 차량하중 특성모사로 많은 연구가 수행되었고 이를 기본으로 광범위한 포장평가에 사용되고 있다. 그러나 교통량의 증가로 인한 지체와 운전자의 안전이 문제점으로 지적되고 또한 PMS와 같이 방대한 조사구간에 적용하기에는 곤란한 점이 있다. 본 고에서는 문헌을 통해 현재 활발하게 연구되고 있는 고속 내하력 측정장비를 조사하였다. 소개된 3가지의 측정방식은 모두 장비속도의 증가를 위해 레이저 센서를 이용한 비접촉식 측정방식을 택하고 있었고 정밀한 거리측정, 센서보정 및 최적화와 같이 차량의 고속주행으로 측정오차를 최소화하기 위한 연구를 병행하고 있었다.

이러한 장비가 향후 그 사용성을 높이기 위해서는 측정결과 자체의 정확도를 높이는 문제와 측정결과를 이용하여 합리적인 포장평가를 하기 위한 적절한 평가방법의 수립, 그리고 지속적인 현장적용과 검증을 필요로 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Gregers Hildebrand, Soren Rasmussen, and Raul Andres. "Development of a Laser-Based High Speed Deflectograph." Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli (Third Volume), ASTM STP 1375, pp. 457~469, 2000.
- (2) Peter Andren, and Carl A. Lenngren. "Evaluating Subgrade Properties With a High-Speed Rolling Deflectometer." Pavement Subgrade, Unbound Materials, and Nondestructive Testing ASCE Geotechnical Special Publication Number 98, pp. 17~30, 2000.
- (3) Robert C. Briggs, Roger F. Johnson, Richard N. Stubstad, and Linda Pierce. "A Comparison of the Rolling Weight Deflectometer with the Falling Weight Deflectometer." Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli (Third Volume), ASTM STP 1375, pp. 444~456, 2000.