

# 도로포장상태 평가를 위한 진동계측의 이용

김수일\*

(Use of Dynamic Measurement for Pavement Condition Evaluation)

(Soo-Il Kim)

## 1. 서론

포장도로는 신설된 후 계속적인 차량의 통행과 기후 조건의 변화등으로 시간이 경과함에 따라서 그 상태가 저하된다. 따라서 포장도로는 일정기간이 지난 후에는 쾌적한 차량의 통행을 보장하기 위하여 유지보수를 실시하여야 한다. 이러한 유지보수를 효율적이고 과학적으로 수행하는 것은 대단히 중요하다. 미국과 같은 선진국의 경우 도로 신설의 투자비 보다 유지보수에 사용되는 예산이 더 많아지고 있는데 효율적인 유지관리 시스템의 개발로 투자비를 적정화하고자 하는 노력이 크게 증가되고 있다.

도로 포장 구조체가 도로 이용자에게 어느 정도의 안전성, 쾌적성 및 신속성을 제공하고 있는가를 평가하는 것은 포장관리의 중요한 고려사항이며 그 결과는 포장의 공용성 개념으로 표현된다. 포장상태 조사시 포함되는 항목들은 포장유지관리 시스템을 운영하는 기관마다 약간씩 차이는 있으나 대체로 노면조도, 노면장애, 구조적 능력, 미끄럼저항등 이다.[1] 이중 진동계측장비가 많이 사용되는 항목은 노면조도와 구조적 능력평가 부분으로서 이 두 항목에 포함되는 진동계측장비와 그 이용방법에 관해서 논하고자 한다.

## 2. 노면조도 상태 조사를 위한 진동계측[2][3]

포장노면의 조도(roughness)는 승차감을 나타내기 때문에 노면의 조도가 나쁠수록 사용자가 부담하여야 할 비용은 증가되고 도로가 제공할 서비스수준은 저하된다. 그림 1은 일반적인 노면의 조도를 보여준다.

그림 1에서 보는 바와 같이 노면의 요철은 그 파장이 긴 경우도 있고 짧은 경우도 있으며 그 상태가 무작위하게 나타나기 때문에 노면 측정장비는 이러한 조건을 모두 신속하게 측정할 수 있는 장비라야 한다.

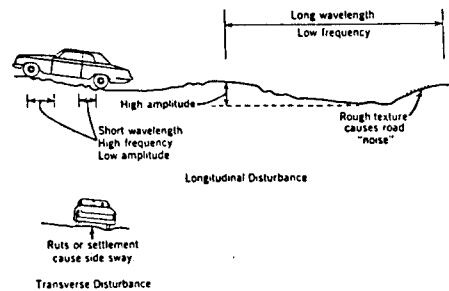


Fig. 1 Types of roughness

노면의 조도를 측정하는 장비로는 Profilometer, Roughometer, Road Meter 등이 있는데 이중 진동계측 방법을 이용하는 장비들을 소개한다.

### 1) Slope Profilometer

그림 2는 Slope Profilometer를 보여준다. 이 장비는 가상 수평축으로 부터의 노면 경사각을 측정하는 장비이다. 가상 수평면은 추나 자이로스코프를 수평으로 놓여있는 강체봉에 연결하고 강체봉과 추사이의 각도를 측정함으로써 산정한다. 강체봉과 노면사이의 상대적인 경사각은 중심축 간격이 30cm인 두개의 작은 바퀴사이의 상대변위를 측정함으로써 결정된다.

강체봉과 추 사이의 각도와 바퀴사이의 상대변위로 부터 노면의 경사각이 산정되며 변위나 경사각의 측정에는 변위계가 사용된다. 노면조도는 경사각의 분산을 산정함으로써 평가한다. 이 장비는 5-8km/hr의 속도로

\* 연세대학교 토목공학과 교수

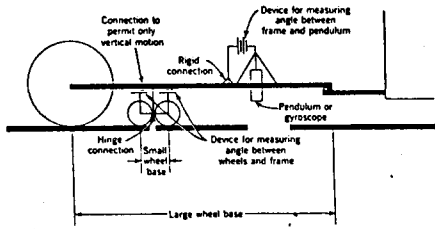


Fig. 2 Principle of the slope profilometer  
운용된다.

2) GMR Profilometer

GMR Profilometer는 General Motors Corporation에서 개발하였는데 차량의 진동변위를 가속도계와 변위계를 이용하여 측정하는 장비이다. 그림 3은 이 장비의 작동원리를 보여주고 있다. 이 장비는 시험차량을 50-90km/hr의 속도로 주행시키면서 차량 중간부에 놓여있는 감지용 바퀴를 이용하여 노면 평탄성을 측정한다.

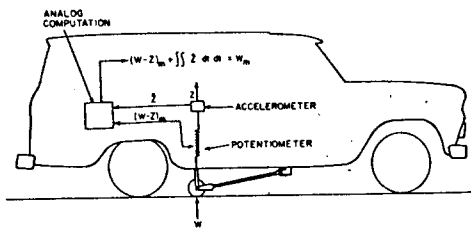


Fig. 3 Principle of the high speed GMR profilometer

3) Roughometer

Roughometer[4]는 그림 4에서 보여주고 있다. 이 장비는 관성에 의해서 상대적으로 고정면에 놓여 있다고 판단되는 Frame과 Frame 안에 부동의 상태로 연결된

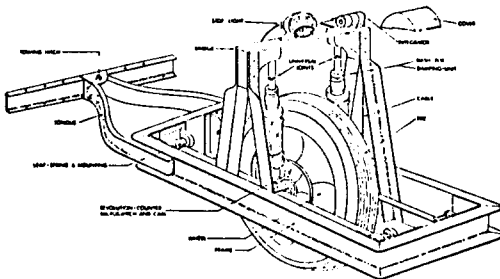


Fig. 4 Roughometer trailer

바퀴사이의 상대변위를 측정함으로써 노면조도를 평가한다.

이 장비중 Frame의 고정상태는 그림에서 보는바와 같이 Dashpot Damping Unit에 의해서 유지되며 상대변위는 요철측정용 바퀴축과 Frame을 강선으로 연결하고 Integrator를 장치함으로써 측정한다. 또한 축의 한쪽에는 바퀴의 회전수를 측정할 수 있는 Counter를 설치하여 측정 위치 및 길이를 결정할 수 있도록 하였다. 노면의 조도는 마일당 몇 인치의 상대변위가 발생했을가를 가지고 평가하며 장비의 운행속도는 30-50km/hr이다.

4) PCA Road Meter

PCA(Portland Cement Association) Road Meter[5]의 작동원리는 그림 5에서 보여주고 있다. 이 장비는 축

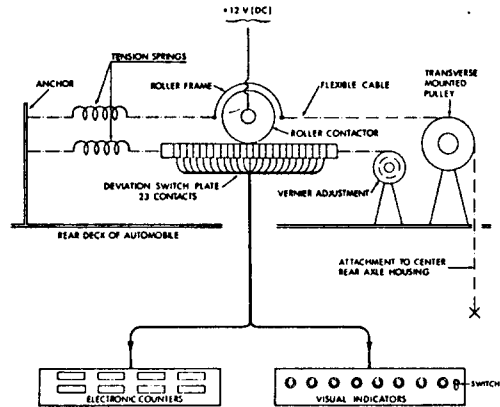


Fig. 5 PCA road meter

정을 위하여 특별한 차량이 사용되지 않으며 어떤 승용차에든지 측정장치를 연결하여 쓸 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그림 5의 오른쪽 끝 부분의 케이블을 뒷 바퀴축에 연결한 후 수직으로 승용차의 뒷부분으로 끌어 올려서 승용차 뒷좌석에 놓여 있는 측정장비 중 편차를 감지하는 바퀴위를 통과하여 고정축에 연결한다.

차체와 뒷 바퀴축과의 상대변위는 1/8인치씩 간격을 가지는 23개의 편차 스위치 중 어느 위치에 편차감지용 바퀴가 놓이는지에 의해 측정된다. 이 장비는 차량 속도가 80km/hr의 고속운행으로 측정이 이루어지는 장점을 가지고 있다.

3. 포장도로의 구조적 능력 평가를 위한 진동계측[2][6]

포장도로의 구조적 능력의 평가는 포장체 각 층의 탄성계수를 추정한 후 이 추정치들을 이용하여 포장체 각 층의 응력 및 변형율을 산정함으로써 이루어진다. 아스팔트 콘크리트 포장인 경우에는 Burmister의 층 탄성 이론이, 시멘트 콘크리트 포장인 경우에는 탄성지반위의 판 해석이론이 해석에 적용된다.

도로 포장체의 구조적 능력을 경험적으로 판단하기 위하여 처음 사용된 측정장비는 Benkelman Beam으로서 1940년대 후반에 개발되었다. 이 장비는 준 정적 시험 장비로서 트럭 뒷축의 복분사이에 그림 6에서 보는바와 같은 측정기를 설치한 후 차량을 서서히 진행시켜

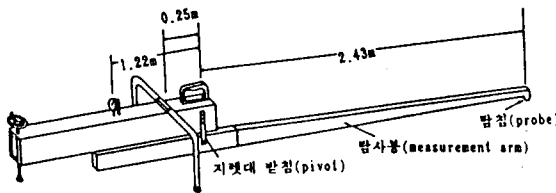


Fig. 6 Benkelman Beam

서 바퀴하중에 의한 처짐이 회복되는 양을 측정하는 장비이다. 이 장비의 단점은 측정에 시간이 많이 소요되며 이 처짐으로부터는 여러층으로 구성된 포장체 각 층의 물성을 추정할 수 없다는 점이다.

측정을 신속하게 하면서도 여러점의 처짐을 동시에 측정할 수 있도록 개발된 장비들이 비파괴 진동계측 장비들이다. 여러점에서 측정된 처짐으로부터 그림 7에서 보는 바와 같은 deflection basin이 얻어지며 이 deflection basin을 만족시키는 포장체 각 층의 물성이 반복 역산 과정을 통하여 얻어진다.

Deflection basin을 얻기위한 장비는 Dynaflect와 Road Rater와 같은 정현진동하중을 가하는 장비와 FWD와 같은 충격하중을 가하는 장비로 대별된다. 또한 deflection basin으로부터 포장체 각 층의 물성을 측정하는 대신 Rayleigh파의 전달이론을 이용하여 무작위 진동의 주파수 해석으로부터 각 층의 물성을 추정하는 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave)[7] 방법도 있는데 이들 중 몇가지에 관해 소개하면 다

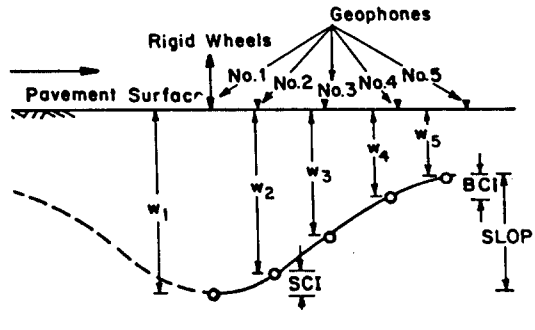


Fig. 7 Deflection basin

음과 같다.

1) Dynaflect[8]

Dynaflect는 그림 8에서 보여준다. 이 Dynaflect는 정현진동하중에 의하여 발생하는 포장체의 동적인 변위를 측정할 수 있는 전기기계적 시스템이다. 소형 트레일러에 탑재되어 사용되는 이 장비는 1000파운드의 정규진동하중을 포장면에 재하하는 장비로서 진동하중은 8 Hertz의 고정된 주기로 서로 반대방향으로 회전하는 두개의 질량에 의하여 발생된다. 발생된 진동하중은 폴리우레탄으로 피막된 두개의 강재바퀴를 통해서 포장체 표면에 전달된다. 강재바퀴의 폭은 4인치이며 바퀴의 외경은 16인치이고, 두바퀴의 중심간격은 20인치이다. Dynaflect의 정적하중은 2000파운드이다. 진동하중에 의한 포장체의 진동은 210ohm, 4.5Hz의 속도계를 이용하여 측정하게 되는데 이 속도계는 두바퀴

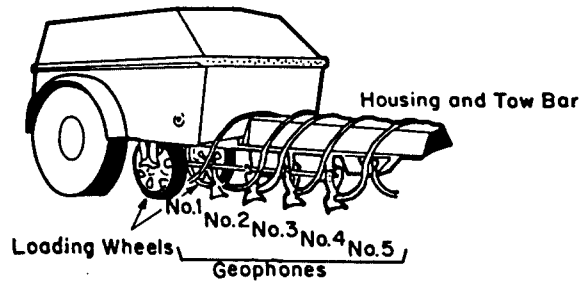


Fig. 8 Dynaflect

의 중간위치 및 1피트 간격의 종방향으로 5개 설치하게 되어 있다.

본 장비의 특징은 하중재하 및 속도계의 설치가 모두 자동적으로 되기 때문에 시험시에는 차량운전원 1

인으로서 모든 시험을 실시할 수 있으며, 시험기간 역시 매우 짧다는 장점을 갖고 있다. 본 장비는 현재 한국도로공사에서 보유하고 있으며, 우리나라 고속도로 포장평가용으로 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2) FWD(Falling Weight Deflectometer)[9][10][11]

FWD는 개발한 회사별로 여러가지 제품이 있으나 그 기본원리는 같으며 그림 9는 Dynatest사에 의해 개발된 FWD를 보여준다. Dynatest의 FWD는 포장면위에 놓여 있는 30cm 직경의 강성이 큰 하중판과 스프링으로 연결되어 있는 저판위에 일정질량을 갖는 하중을 자유낙하 시켜서 하중판을 통하여 포장면에 충격하중을 가하고 이 충격하중에 의한 최대처짐치들을 이용하여 deflection basin을 산정하는 장비이다.

충격하중의 크기는 낙하질량과 낙하고를 조절함으로써 임의로 조절할 수 있으며 하중판위에 Load Cell을 설치함으로써 감지된다. 충격하중의 재하시간은 스프링의 강성을 조절함으로써 변화 시킬수가 있으나

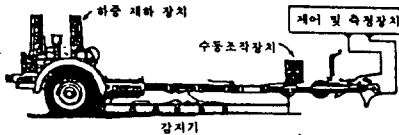


Fig.9 FWD

Dynatest사의 FWD의 경우는 25-30msec을 기준 재하시간으로 정하고 있는데 이는 표준트럭하중이 50km/hr의 속도로 주행할 때의 재하시간에 속한다.

포장체 표면의 처짐은 하중재하판의 중심과 방사방향으로 배열되어 있는 7개의 속도계(Geophone)에 의해서 감지된 속도를 적분함으로써 얻어진다. FWD에 의한 진동은 그 형상이 복잡하기 때문에 진동이 정현곡선인 Dynaflect의 경우에 비해 변위 산정을 위한 계산과정에 Inverse Fourier Transform을 실시하여야하는 복잡성은 있으나 재하하중을 변경시킬 수 있다는 장점이 있어 근래 많이 사용된다.

3) SASW[12][13]

SASW방법은 Nazarian[7]등에 의하여 연구되고, 미국의 공군에서 비행장포장의 비파괴 시험방법으로 선택되어 사용되고 있는 방법이다. 표면파의 스펙트럼 해석을 위한 시험은 지표면에 속도계나 가속도계를 일정한 간격으로 2개 수직방향으로 설치하고, 이들 2개의 감지기와 같은 선상의 바깥위치에서 낮은 변형율의 충격이나 무작위 진동을 가하는 시험이다. 이때 전파되는 파의 에너지는 균질 반무한체의 경우 약 67%가 Rayleigh파로 지표면에 전파된다. 따라서 지표면에서 얻어지는 정보는 Rayleigh파의 특성으로서 진동감지기의 속도나 가속도에 대한 시간영역의 Cross Correlation을 Fast Fourier Transform을 통하여 얻게 되는 각종 주파수 영역에서의 위상각에 관한 정보로서, 이 정보로부터 표면파의 파장에 따른 표면파의 속도를 산정하게 된다. 이러한 진동분석을 위하여는 Fast Fourier Transform Analyzer가 많이 사용되고 있으며, 본 시험에 필요한 시험장비의 배열은 그림 10에 나와 있고, Nazarian[7] 등이 현장시험에 사용한 시험패턴은 그림 11에 보여준다.

그림 11에서 각각의 시험패턴에 따라 한계폭의

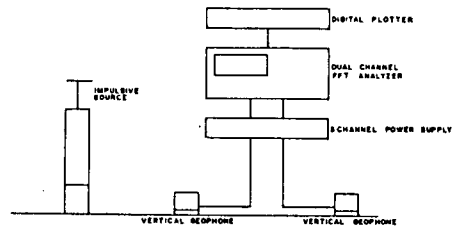


Fig.10 Schematic of experimental arrangement for SASW test

	DISTANCE, FT	RESPONSE SPACES, FT
	0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24	1
GEOPHONE SOURCE		2
		4
		8
		16

Fig.11 Pattern of SASW tests

Cross-Spectrum의 위상각 곡선이 얻어지게 되는데 연세대학교 토질실험실에서 실시한 표면파 시험결과중 대표적인 곡선이 그림 12에 나타나 있다.

그림 12중 Coherence함수는 주파수에 따른 입력정보와 출력정보 사이의 상관관계를 나타내는 함수로서 그 크기가 클수록 상관관계가 높음을 의미하며, 그 크기가 낮은 부분의 위상각 정보는 신뢰성이 낮아서 해석시 사용되지 못한다.

위상각 곡선은 두개의 감지기로부터 포착된 특정한

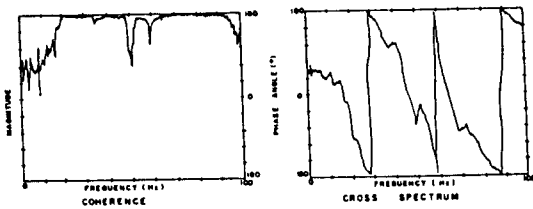


Fig.12 Cross spectrum and coherence of Rayleigh wave propagation

주파수 성분의 Rayleigh파가 갖는 위상각 차(phase lag)를 나타낸 것이다. 위상각 차,  $\theta$ 를 알면 Rayleigh파가 두 감지기간 거리,  $x$ 를 통과하는데 소요된 시간,  $t$ 는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$t(f) = \theta(f) / (360 \times f)$$

여기서  $f$ 는 주파수이다. 통과시간,  $t(f)$ 를 알면 두 감지기간 거리,  $x$ 는 기지의 양이므로, Rayleigh파의 주파수에 따른 위상속도,  $c(f)$ 가 결정되며 Rayleigh파의 파장  $L_r(f)$ 은 다음식으로 산정된다.

$$L_r(f) = c(f) / f$$

그림 13은 Rayleigh파의 파장과 위상속도의 관계를 보여준다. 이 Rayleigh파의 파장과 위상속도의 관계로부터 포장체 각 층의 물성이 추정되는데 이를 위하여는 Thomson-Haskell의 이론을 이용한 역산기법이 사용된다. 그림 13에는 연세대학교 토목공학과 토질실험실에서 개발한 역산기법을 이용하여 추정된 포장체 각층의 물성으로부터 산정된 분산곡선도 함께 보여주고 있다.

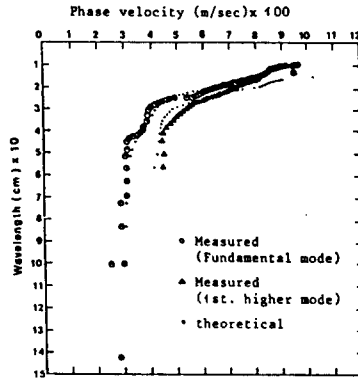


Fig.13 Comparison of measured and theoretical dispersion curve.

또한 그림 14는 SASW시험 결과로부터 추정된 전단파 속도와 Crosshole test에 의한 시험결과를 비교하고 있다.

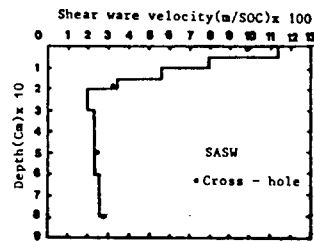


Fig.14 Comparison of shear wave velocities obtained from SASW test and cross-hole test

#### 4. 결언

포장도로의 유지관리를 위하여 사용되고 있는 진동계측에 관해서 살펴 보았다. 본문에서 살펴 본 바와 같이 포장도로의 유지관리를 위해서 사용되는 장비들은 진동공학 측면에서는 대단히 간단하지만 국내에는 아직 도입되지 않거나, 도입이 되었다 하더라도 제대로 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 보다 효율적이고 과학적인 도로의 유지관리를 위하여 과학화된 장비의 국내 개발에 많은 분들의 노력과 협조를 당부한다.

5. 참고문헌

1. TRB, "Collection and Use of Pavement Condition Data," *NCHRP Report 76*, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1981.
2. Yoder, E.J. and Witczak, M.W., *Principle of Pavement Design*, 2nd Ed. John Wiley and Sons, 1975.
3. Hveem, F.N., "Devices for Recording and Evaluation Pavement Roughness," *Bulletin 264*, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1969.
4. Ahlborn, G. and Moyer R.A., "New Developments in BPR Roughness Indicator and Tests on California Pavements." *Bulletin 139*, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1956.
5. Chong, G.J. and Phang W.A., *Special Report 133 : Pavement Evaluation Using Road Meters*, "PCA Road Meter Measuring Road Roughness at 50mph," Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1973.
6. Smith, R.E. and Lytton R.L., "Synthesis Study of Nondestructive Testing Devices for Use in Overlay Thickness Design of Flexible Pavements," *Report No. FHWA/RD83/097*, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 1984.
7. Kim, S.I. and Woo, J.Y., "Evaluation of Moduli of Pavement Systems by Spectral Analysis of Surface Wave Technique," *Proceedings of 11th IRF World Meeting*, Vol. 4, Seoul, pp.112-115, 1989.
8. 김수일, 최정훈, 유지형, "Dynalect에 의한 아스팔트 콘크리트 포장도로의 분산도 특성에 관한 연구," *대한토목학회지*, 제3권, 제1호, pp.53-63, 1987.
9. 김수일, 유지형, "FWD에 의한 4층 아스팔트 포장 구조체의 층별 탄성계수 추정," *대한토목학회논문집*, 제10권, 제2호, pp.67-78, 1990.
10. 김수일, 김문겸, 유지형, "차집곡선을 이용한 3층 아스팔트 포장 구조체의 물성 추정에 관한 연구," *대한토목학회논문집*, 제9권, 제1호, pp.97-107, 1989.
11. 이승원, 김문겸, 김수일, 황학주, "시멘트 콘크리트 포장구조체의 층별물성 및 응력추정에 관한 연구," *대한토목학회논문집*, 제10권, 제1호, pp.47-56, 1990.
12. 우재윤, 김수일, "표면파 기법을 이용한 자연지반 및 포장지반의 전단파 속도 분포 추정에 관한 연구," *대한토목학회논문집*, 제8권, 제4호, pp.49-57, 1988.
13. Nazarian, S. and Stokoe K.H., "Nondestructive Testing of Pavements Using Surface Waves," in *Transportation Research Record 993: Factors Affecting Pavement Performance*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1984.