FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용한 아스팔트 포장의 취약 노상구간 판정기술

문 성 호 | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

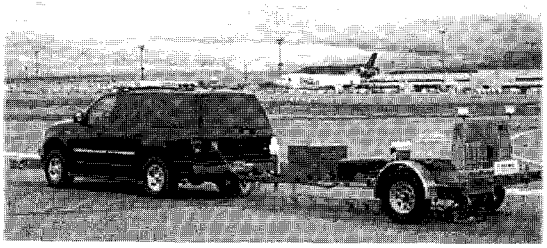
도로 포장의 노면상태를 개선하기 위하여 덧씌우기를 비롯한 다양한 표면처리가 광범위하게 수행되어 왔다. 그러나 하부구조인 노상토에 문제가 있을 경우 이와 같은 표면처리는 일시적인 효과만 있을 뿐 아스팔트 층의 손상은 반복적으로 발생한다. 그러므로 적절한 보수대책을 수립하기 위해서는 아스팔트 포장의 건전성에 대한 정확한 평가가 필요하며, 아스팔트 포장체의 주기적인 구조적 건전성 평가는 도로의 유지관리 측면에서 매우 중요하다. 이러한 도로 포장체의 구조적 건전성 평가를 위하여 다양한 비파괴시험(NDT, Non-Destructive Testing)에 기반한 건전성 평가 방법들이 개발되어 왔다. 이 NDT 방법들은 실험의 간편성, 빠른 실험속도, 경제적인 실험수행 등의 장점을 가지고 있다. 그리고 NDT 시험은 간접적인 응답을 계측하여 강성을 추정하는 역해석 과정이 필요하다. 따라서 시험결과를 이용하여 강성을 추정하는 역해석 알고리즘이 수치적으로 안정적이면서 일관되는 결과를 줄 수 있어야만 NDT 시험법의 신뢰성과 활용성이 증대된다.

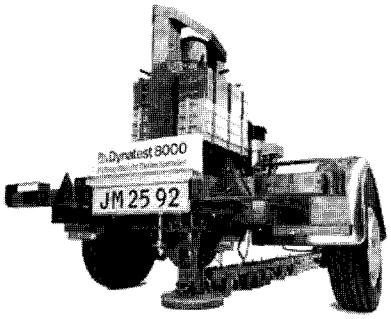
포장체의 건전성 평가에 적용되고 있는 대표적인 NDT 방법은 크게 다음과 같은 두 가지로 분류할 수 있다.

- 처짐에 근거한 시험법(deflection basin method) : FWD(Falling Weight Deflectometer), HWD (Heavy Weight Deflectometer) 등을 이용하는 방법
- 표면파 시험법 (surface wave method) : SASW (Spectral Analysis of Surface Wave), MASW (Multi channel Analysis of Surface Wave), HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 등을 이용하는 방법

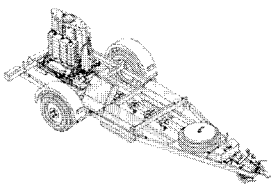
FWD/HWD 시험은 그림 1과 같은 FWD/HWD 장비를 이용하여 그림 1과 같이 포장구조체의 표면에 충격을 가하고, 정해진 간격으로 설치된 속도계(geophone)를 이용하여 표면 속도를 계측하며 이를 변위로 환산하여 표면처짐(surface deflection)을 산정한 다음, 각 위치에서의 최대 처짐을 이용하여 포장구조체의 층 두께 및 층 탄성계수를 역해석(inverse analysis)을 통하여 추정하게 된다. HWD 시험법은 FWD 시험법에 비해 하중이 커지는 것을 제외하고는 FWD 시험법과 거의 동일하다. 일반적으로 FWD의 재하 하중 범위는 7~120kN이며 HWD는 30~240kN이다. FWD/HWD 등과 같은 처짐에 근거한 시험은 시험의 간편성뿐만 아니라,

이 시험법에서 재하하는 하중의 주된 진동수 성분이 0~60Hz로서 트럭의 주행에 의해 도로에 작용되는 하중의 동특성과 매우 유사하기 때문에 도로포장체의 구조적 건전성 평가에 널리 이용되고 있다.

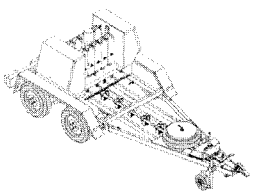




(a) 대표적인 FWD 장비인 Dynatest 8000



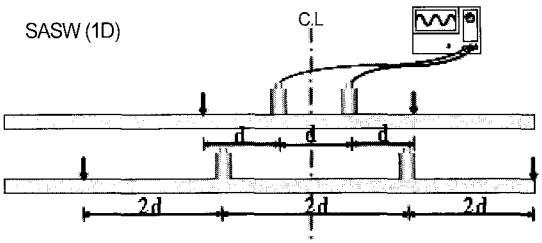
(b) FWD 트레일러



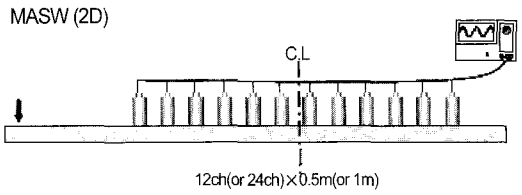
(c) HWD 트레일러

그림 1. FWD 또는 HWD 시험장치의 구성

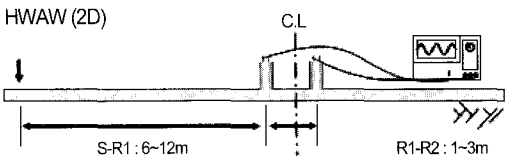
한편 기존의 일반적인 표면파 시험 방법인 SASW 시험과 MASW 시험은 그림 2와 같다. 이 방법에서는 수평층상 지반에서 발생하는 표면파의 파장별 전달속도(분산곡선)를 계측하고, 이론적으로 실험에서 얻어진 분산곡선과 동일한 분산곡선을 도출하는 지반의 전단파 속도 주상도를 역산과정을 통하여 추정한다. 최근에 개발된 신호처리 기법인 HWAW 방법을 이용한 표면파 기법은 기존의 SASW나 MASW와 같은 표면파 기법들이 가지는 여러 가지 문제점을 해결하기 위해 개발된 방법으로 기존 방법에 비해 실험이 매우 간편하며, 배경잡음의 영향을 매우 효과적으로 제거할 수 있다. 또한 기존 방법들이 포장체와 같이 표층 강성이 매우 큰 경우 분산곡선 결정과정에서 모드점프 현상으로 인하여 전문가의 주의 깊은 해석을 필요로 하나 HWAW 기법은 모드점프에 의한 문제점을 신호처리 과정에서 자동으로 고려하여 분산곡선을 결정함으로써 포장체 건전성 평가에 있어 기존의 방법들보다 유리하다(박형춘, 2001, 2004).



(a) SASW 시험



(b) MASW 시험



(c) HWAW 시험

그림 2. 표면파 시험법의 계측시스템 구성 개요

도로 포장의 건전성을 평가하기 위하여 층상구조체의 파동전달해석기술은 범용 유한요소해석 프로그램으로부터 이 문제만을 위한 프로그램까지 매우 다

(a) 대표적인 FWD 장비인 Dynatest 8000

양하게 개발되어 있다. 예를 들어서 다층탄성이론, 유한요소법, 등가두께법(MET, Method of Equivalent Thickness), 평판이론(plate theory), 이론공식(closed-form solution)을 이용하는 방법 등이 있다(PCS, 1993). 층상구조체의 파동해석을 위한 대표적인 프로그램으로는 BISAR, CHEVRON, ELSYM 5, WESLEA 등이 있다. 그리고 SASSI와 같은 지반-구조물 상호작용해석용 프로그램도 포장체의 해석에 활용될 수 있다. FWD 시험의 순해석(froward analysis) 도구로 사용될 수 있는 해석기술에 대한 개괄적인 기술동향을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 층상구조체의 파동전달해석기술에 대한 국내외 기술동향

해석 방법		주요 참고문헌 또는 프로그램
유한요소 해석법		Lee et al. (1988), CAPA-3D (Scarpas, 1993), PAZXIS Version 8, FEACONS III, MICH-PAYE (Harichandran et al., 1990)
다층탄성이론		Thomson (1950), Haskell (1953), Kausel & Rosset (1981),Rizzi and Doyle (1992), Foinquinos et al. (1996), Kim & Kim (1998), Al-Khoury et al. (2001, 2002), Liang & Zeng (2002), Sun (2002), Wu et al. (2006), 대표적인 프로그램 : BISAR, CHEVRON, ELSYM 5, WESLEA
SSI 해석프로그램		SASSI (Lysmer et al., 1988)
대표적인 FWD 순해석 SW	BISAR	Jong et al. (1973)
	CHEVRON	Warren & Diechmann (1963)
	CIRCLY	Wardle (1977)
	ELSYM 5	Kopperian et al. (1986)
	Everstresss	The Washington State Dept.. of Transportation, USA Guzina & Osburn (2002)
	KENLAYER	Tabatabaee, N. (Civil Eng. Dep., Sharif Univ. of Tech., Iran)
	LAMBDA	Al-Khoury et al. (2000, 2001)
	MODCOMP	Irwin (1983)
	WESLEA	개발자 : USAE Waterways Experiment Station Van Cauwelaert et al. (1989)

FWD의 처짐값은 하중이 가해지는 판에서부터 그림 3과 같이 속도계가 정해진 간격으로 이격되어 있다. 이격된 거리에 따라서 그림 3과 같이 D0, D8, D12, D18, D24, D36 및 D60으로 표기될 수 있다. 직접하중이 가해지는 D0 부분은 아스팔트 구조체에 있어 표층, 기층 및 노상의 모든 탄성계수에 영향을 받는 반응값을 얻을 수 있고, D60의 경우에는 특히 노상 탄성계수의 영향을 직접 받는다.

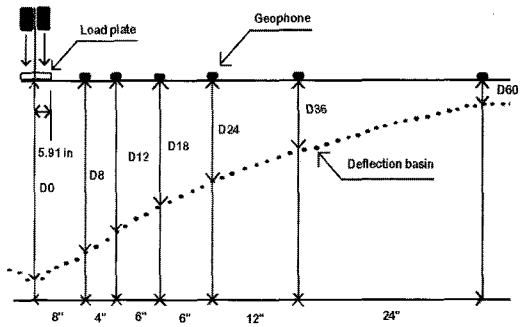


그림 3. FWD의 속도계 이격간격 예(인치단위로 이격)

그림 4에서 보는 바와 같이 그림 4(a)는 D0의 처짐값임으로 포장체의 전반적인 지지력을 나타내고 있고, 그림 4(b)는 D60의 처짐값으로 노상에 대한 건전성을 나타내고 있다. 특히 그림 4에서 보는 것처럼 D0은 그다지 많은 처짐값을 보여주고 있지 않으나 D60의 경우처럼 많은 처짐값을 보여주는 경우에는 노상에 문제가 있다고 판단할 수 있다.

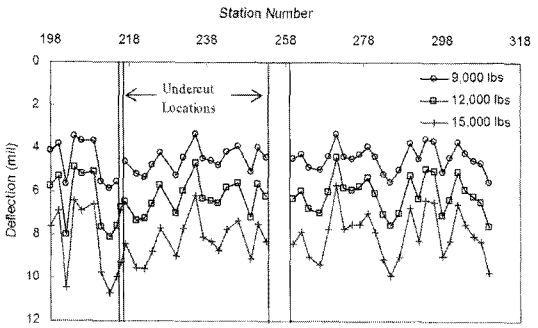
다른 한편으로 BDI(Base Damage Index) 및 F2(Shape Factor 2)를 이용한 노상에 대한 평가를 그림 5에서 보여주고 있다. BDI 및 F2는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$BDI = D12 - D24 \quad (1)$$

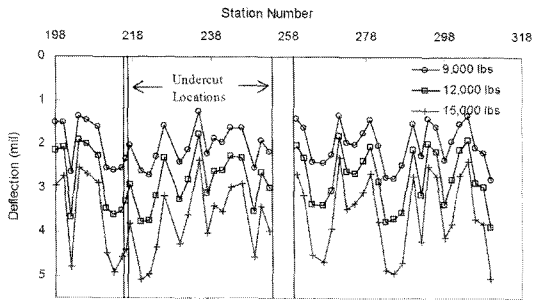
$$F2 = \frac{D12 - D36}{D24} \quad (2)$$

그림 5에서 보는 것처럼 상부의 층인 표층 및 기층에 대한 탄성계수를 변화시키고 FWD 하중에 대

한 처짐을 구하고 BDI 및 F2를 구했을 때 노상의 탄성계수(e.g., Esg)가 일정한 특성을 보여주는 패턴을 보여주고 있다. 따라서 이들을 이용함으로서 노상에 대해 NDT의 간접적 방법으로 건전성을 평가할 수 있다.



(a) D0 처짐값



(b) D60 처짐값

그림 4. US 29 도로에서 측정한 FWD 처짐값

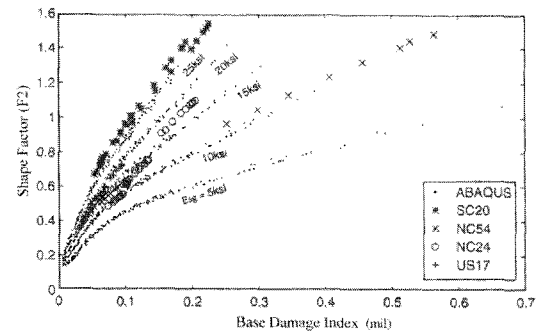


그림 5 BDI 및 F2를 이용한 기층의 건전성 평가

참고 문헌

박형춘, 김동수, "탄성파 이용 비파괴 시험을 위한 하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 위상, 그룹속도 결정," 대한토목학회 논문집, 제21권, 6호, pp. 651-660, 2001.

박형춘, 김동수, "HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정," 대한토목학회 논문집, 제24권, 2C호, pp. 105-115, 2004.

Al-Khoury, R., Scarpas, and Blaauwendraad, J. (2000), " Spectral Analysis of Wave Propagation in Linear Elastic and Viscoelastic Multi-layer Systems", Procs. 14th Engineering Mechanics Conference, ASCE, May 21~24.

Al-Khoury, R., Kasbergen, C.., Scarpas, A., and Blassuwendraad, J. (2001), "Spectral element technique for efficient parameter identification of layered media, Part II: Inverse calculation," International Journal of Solids and Structures, 38, pp. 8753-8772.

Al-Khoury, R., Scarpas, A., Kasbergen, C. and Blaauwendraad, J. (2002), "Spectral Element Technique for Efficient Identification of Layered Media. Part III. Viscoelastic Aspects", Int'l J. Solids & Structures, Vol. 39, pp. 2189~2201.

Foinquinos R. (1995), "Dynamic Nondestructive Testing of Pavements", Report No. GR95-4, Geotechnical Eng Center, The University of Texas at Austin.

Guzina, B.B. and Osburn, R.H. (2002), "An Effective Ttool for Enhancing the Elastiostatic Pavement Diagnosis", TRB.

Harichandran, R.S., Yeh, M.S. and Baladi, G.Y. (1990), "MICH-PAYE — A Non-linear Finite Element Program for the Analysis of Flexible Pavements", Transportation Research Record 1286, Transportation Research Board, Washington D. C., pp. 123~131.

Haskell, N.A. (1953), "The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media", Bull. Seism. Am., Vol. 43, pp. 17~34.

Irwin, L.H. (1983), " Uuer's guide to

MODECOMP 2, Version 2.4", Report No. 83-8, Cornell Local Roads Program, Cornell University, Ithaca, N.Y..

Jong, D.L., Peatz, M.G.F., and Korswagen, A.R. (1973), "Computer Program BISAR — Layered Systems Under Normal and Tangential Loads", External Report, AMSR.0006.73, Konin Klijke Shell-Laboratorium, Amsterdam, The Netherlands.

Kausel, E. and Bouckovalas, G. (1979), "Computation of Hankel Transforms Using the Fast Fourier Transform Algorithm", Research Report R79-12, Order No. 636, Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge, Massachusetts.

Kim, Y-G. and Kim, Y.R. (1998), "Prediction of Layer Moduli from Falling Weight Deflectormeter and Surface Wave Measurements Using Artificial Neural Network", Transportation Research Records 1639, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 53~61.

Kopperian, S., Tiller, G. and Tsong, M. (1986), "ELSYM 5, Interactive Micro Computer Version", User's Manual, Report No FHWA-TS-87-206, Federal Highway Administration, USA.

Lee, Y.C, Kim, Y.R. and Ranjithan, S.R. (1998), "Dynamic Analysis-based Approach to Determine Flexible Pavement Layer Moduli Using Deflection Basin Parameters", Transportation Research Records 1639, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 36~42.

Liang, R. and Zeng, S. (2002), "Efficient Dynamic Analysis of Multilayered System during Falling Weight Deflectometer Experiments", Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 128, Issue 4, pp. 366~374.

Lysmer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Vahdani, S., and Tajirian, F. (1988), "SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction - Theoretical Manual", University of California at Berkeley and Bechtel Power Corporation.

Rizzi, S.A. and Doyle, J.F. (1992), "Spectral Analysis of Wave Motion in Plane Solids with Boundaries", Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 114, pp. 133~140.

Scarpas, A. (1993), "CAPA-3D Finite Element Sysytem - User's Manual", Section of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU-Delft, The Netherlands.

Sun, L. (2002), "Time-Frequency Analysis of Thin Slabs subjected to Dynamic Ring Loads", Acta Mechanica, Vol. 153, pp. 217~229.

Thomson, W.T. (1950), "Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Media", J. Applied Physics, Vol. 21, pp. 89~93.

Van Cauwelaert, F.J., Alexander, D.R., White, T.D. and Barker, W.R. (1989), "Multilayer Elastic Program for Backcalculating Layer Moduli in Pavement Evaluation: In Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculating Moduli", STP 1026, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania.

Wardle, J. (1977), "Program CIRCLY - A Computer Program for the Analysis of Multiple Complex Circular Loads in Layered Anisotropic Media -- User's Manual", Commonwealth Science Industrial Research Organisation, Australia.

Warren, H. and Diechmann, W.L. (1963), "Numerical Computation of Stresses and Strains in a Multi-Layer Asphalt Pavement System", Internal Report, Cherveron Research Corporation, Richmond, CA.

Wu C-Y., Liu, X-Y., Scarpas, A. and Ge, X-R. (2006), "Spectral Element Approach for Forward Models of 3D Layered Pavement", Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol. 12, No. 2, pp. 149~157.