

공내 재하시험기(PMT)를 이용한 포장체의 탄성계수 결정

Pressuremeter Applications to Resilient Modulus in Pavement Subgrade

임유진* · 박성원**

1. 도 입

포장체의 하부 지지층인 노상은 통상 인식되고 있는 것과는 달리 상부층인 표층, 기층, 보조기층의 거동에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려진 바 있다(Puppala et al, 1999). 말뚝기초 등과 같은 지반 구조물은 지지력의 산정이 최우선이 되지만 노상은 이와 달리 침하량의 크기, 침하속도 및 침하양상이 포장체의 수명과 공용성에 보다 더 영향을 주게됨으로, 이러한 포장공용성을 평가하기 위해서는 포장체의 강성효과 즉, 정확한 회복탄성계수(이하 Mr)의 산정이 중요하다. 그러나 노상의 Mr은 함수비, 온도 등 주변환경에 민감한 영향을 받음으로서 이의 효과적인 산정이 어려우며 특히, 실내시험에 의한 Mr의 결정은 시험절차가 번거롭고 시험결과에 영향을 미치는 여러 가지 변수가 상존하는 단점이 있다. 따라서 종래의 경험지수인 CBR값을 구하여 이를 Mr로 대체할 수 있는 여러 관련식이 제안되었다(Huekelom and Klomp, 1967; Barker et al., 1977).

언급된 바와 같이 포장설계에서는 기초구조물처럼 극한 지지력이 크게 중요하게 고려되지는 않지만 허용 가능한 침하량은 극히 제한됨으로써 오히려 안전율은 상당히 커진다고 볼 수 있다. 최근의 중차량 증가세와 민항기의 대형화 추세를 감안한다면 포장체에서의 허용침하량은 더욱 줄어들 것으로 예상된다. 그러므로 이와 같이 축중 재하시의 침하량을 정확히 예측하기 위해서는 미소 변형률(small strain) 상태에서 포장 각 층의 유효탄성계수의 정확한 산정이 요구된다. 또한 포장체는 기초와는 달리 포장체 하부에 발생하는 응력수준이 낮고 재하 빈도가 훨씬 많으며 급속재하, 즉 재하시간이 매우 짧은 특성을 보인다. 그러므로 이와 같은 복잡한 거동을 받는 포장체의 탄성계수를 효과적으로 예측하기 위해서는 변형률, 응력수준, 재하속도 및 재하빈도를 모사할 수 있는 시험법이 필요하다. 이와 같이 포장체의 성능평가에 사용 가능한 시험법으로는 FWD(Falling weight deflectometer), 동삼축시험기 등이 있으나 공내재하시험기 만큼의 가격 대비 성과를 제공하지 못하는 것으로 알려져 있다.

공내재하시험법(pressuremeter test: 이하 PMT)은 그림 1.과 같이 원주형의 가압 probe을 오거로 천공한 구멍내의 원하는 깊이에 위치시키고 공벽의 방사방향으로 압력을 가해줌으로써 토체의 압력에 대한 변형특성을 실시간으로 제공해 줄 수 있는 장치이다. 압력은 재하 및 제하를 반복해서 가할 수 있으므로 비교적 간단하고 저렴한 공내시험기의 특성을 살리면 응력-변형률-재하속도-반복하중 사이의 관계식을 설정해 줄 수 있다. 그림2는 Rocktest사에 의해 생산되는PMT(PENCEL형)로서 일반 PMT보

* 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 전임강사(yujin@mail.paichai.ac.kr/Tel. 042-520-5402)

** 한국건설기술연구원 도로시설연구그룹 선임연구원(s-park@kict.re.kr/Tel. 031-9100-168)



다 probe의 직경(D=35mm)이 작고 길이(L=230mm)가 짧은 제원을 갖는다.

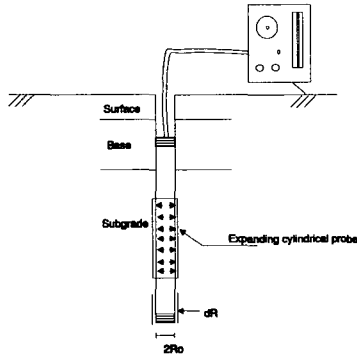


그림 1. PMT시험의 모식도

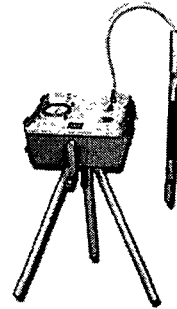


그림 2. PMT (PENCELL)

2. PMT에 의한 탄성계수 결정

2.1 PMT의 작동원리

그림 3은 PMT에 의한 측정값을 도시한 것이다. 그림과 같이 공내의 압력(p)과 토체의 변형정도(ΔR)의 상관성을 이용해 탄성계수를 계산할 수 있다. 탄성계수 E는 그림 상의 제하-재제하 부분으로부터 식 (1)로 계산된다. 여기서 p_1 , p_2 는 공벽에 가해지는 내압의 크기, ΔR 은 probe 반경의 증가분이며 R_0 는 probe의 초기반경이다. 일반적으로 포아송비 $\nu=0.33$ 로 가정한다. 한계압력(limit pressure) PL은 이론상 원주형공동의 무한확장시에 해당하는 압력이지만 시험에서는 도달되기 어려우므로 probe의 체적이 초기 체적의 두 배가되었을 때의 내공압력으로 실용상 정의한다. 이를 probe반경으로 환산하면 $(\Delta R/R_0)L=0.41+1.41(\Delta R/R_0)$ 에 해당하며 이때의 내압이 PL이 된다. Menard(1968)는 다짐관리에 PMT가 사용될 수 있음을 고려하여 CBR과 한계압력PL사이의 상관식을 식 (2)로 제안한 바 있다(단, 단위 =kPa).

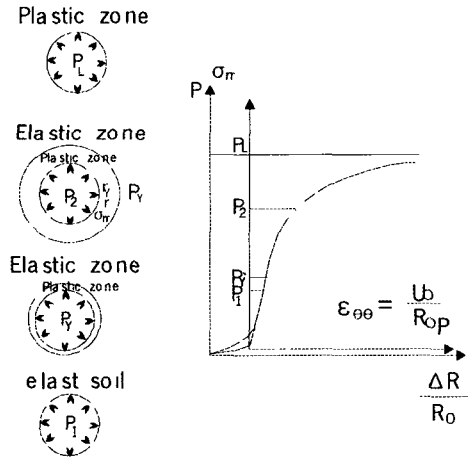


그림 3. PMT시험결과와 한계압력

$$E = (1 + \nu)(p_2 - p_1) \frac{\left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_2\right]^2 + \left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_1\right]^2}{\left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_2\right]^2 - \left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_1\right]^2} \quad (1)$$



$$CBR = 0.017 P_L \quad (2)$$

현장 CBR시험은 표층을 제거하고 각 포장 구성층 위치에서 시험을 실시하여야 하므로 반교란식(semi-destructive) 시험이라고 할 수 있으며 실내 CBR시험은 교란 후 재성형된 샘플의 제작이 필요하다. 또한 현장 및 실내 CBR공허 scale 효과를 고려하기 어렵다. 반면 저렴한 가격으로 시험을 실시할 수 있고 현장 실무자들이 대체적으로 시험절차와 성과를 이해할 수 있는 장점이 있다. 그러나 포장공용성이 지지력 기준이 아니고 허용침하량 기준이어야 하므로 PMT를 사용하여 이를 산정하고자 할 경우는 한계압력 PL보다는 탄성계수 E의 결정이 보다 중요하다고 할 수 있다.

2.2 PMT를 이용한 포장체의 해석법

PMT시험결과를 이용하여 소요 포장단면두께를 결정하는 방법에는 두 가지가 있다. 첫째는 노상에 대한 PMT시험결과로부터 PMT곡선상 재하-제하 부의 탄성계수(ER)를 구하여 그림 4.와 같은 차트로 부터 소요 축중에 상당하는 포장전두께를 구하는 방법이다(Briaud, 1979). 그림 4.의 차트는 공항활주

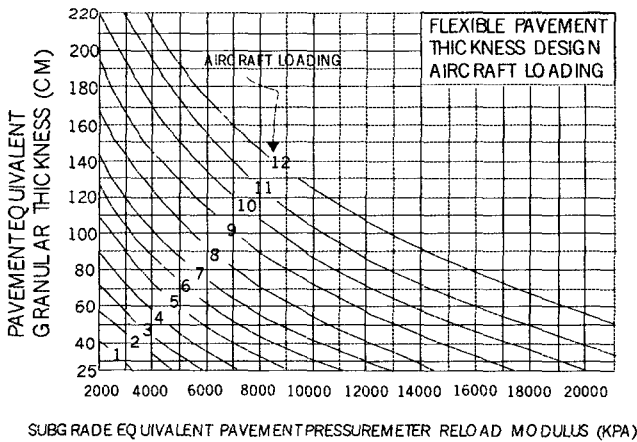


그림 4. PMT시험에 의한 가요성포장두께의 결정

로에 대한 PMT시험과 현장 반복 평판 재하시험 결과로부터 작성된 것이다. PMT로부터 구한 노상의 등가 탄성계수(Eequiv.)를 구하고 예상되는 항공기(또는 차량)의 최대 축중을 고려하면 소요 포장두께를 구할 수 있다. 등가 탄성계수(Eequiv.)는 그림 3.의 반복재하시험 즉, 재하-제하부분의 기울기를 표층 직하부 소정 깊이에서 구하여 이를 등가 탄성값으로 환산한다. Briaud(1992)는 축하중에 의한 직하부층의 변형을 분포를 직삼각형으로 가정하여 5개층에 대한 등가탄성계수 Equiv.를 식 (3)으로 제안하였다. 따라서 축중크기를 등급으로 분류(표 1.참조)하고 계산된 등가탄성계수를 그림 3.의 차트에 적용하여 총소요포장두께(required)를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{E_{eqv.}} = (1/100) \times \left(\frac{22.1}{E_1} + \frac{33.5}{E_2} + \frac{24.6}{E_3} + \frac{14.8}{E_4} + \frac{5}{E_5} \right) \quad (3)$$

차트의 종축으로부터 읽은 총소요포장두께(required)는 식 (4)와 같으며 ti=각 층의 두께, Fi=각 포장층의 등가평가지수(layer equivalency)로서 1(비처리 기층) ~ 2(아스팔트표층)사이의 값을 갖는다.



$$t_0 = \sum_i F_i t_i \quad (4)$$

포장단면두께를 결정하는 두 번째 설계방법은 포장층을 다층의 탄성체로 가정하여 기층과 표층사이의 수평변형율(ϵH)과 노상상부에서의 수직변형율(ϵV)이 허용값 이내가 되도록 하여 rutting과 균열의 발생을 억제토록 하는 것인데 여기서 각 층 특히 기층과 노상에서의 탄성계수 산정을 위해 PMT가 효과적으로 사용될 수 있다. 측정된 탄성계수는 포장해석시 기존의 다층 탄성이론해석 프로그램 등의 필수 입력데이터로 사용되어 각 층에서의 수직/수평변형율, 응력수준을 산정하고 적정 포장두께를 결정하는 데 사용된다(그림 5참조).

표.1 항공기 대표기종별 축중등급의 분류표(Briaud, 1979)

기종	Tire Pressure(MPa)	Max. Weight(kN)	Min. Weight(kN)	Weight range(kN)	하중등급
DC8	1.38	1590	710	850-1050	9
				1050-1290	10
				1290-1560	11
				1560-1850	12
B747-200	1.41	3590	1630	1910-2410	9
				2410-2960	10
				2960-3600	11
DC-10	1.19	1930	1050	1380-1630	10
				1630-2480	11
Hercules C130E	0.66	689	325	383-498	7
				498-623	8
				623-814	9

포장층의 탄성계수는 응력수준, 변형율, 재하속도 및 재하빈도 등에 의해 크게 영향받는 것으로 알려져 있다. 따라서 PMT를 이용해 이들 제 효과를 모두 고려할 수 있는 탄성계수 결정법이 확정될 수 있으면 포장설계법의 진일보가 될 것이다. 이를 위해서는 국내 도로사정에 적합한 PMT의 적정 시험 방법을 수립하여야 하며 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 현재 기초구조물의 해석 및 설계에는 이와 같은 효과를 고려한 PMT의 적용 및 설계가 이루어지고 있다.

3. 결 어

- (1) 공내재하시험기(PMT)를 이용해 노상, 기층 및 보조기층 등 포장하부층의 강성(E)을 현

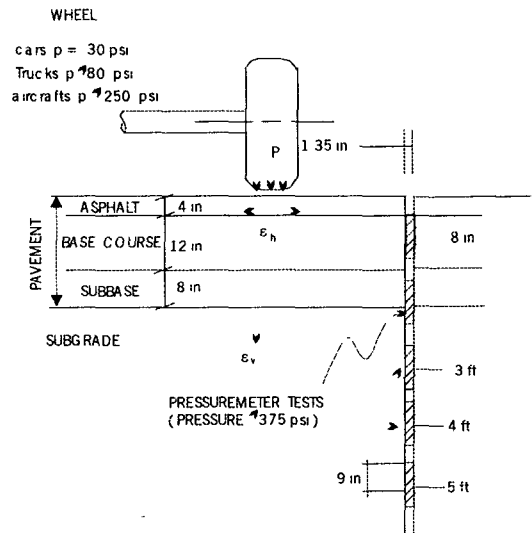


그림 5. 포장하부층에서의 PMT시험개요도



장에서 직접구하여 포장체를 설계하는 기법의 개발 또는 현존 포장체의 구조수명을 예측하는 기법의 개발 가능성을 검토하였다. 현재의 복잡한 Mr결정법 또는 불확실한 CBR결정법을 대체 하거나 이를 보완할 수 있는 현장시험법이 될 수 있음을 확인하였다.

- (2) 응력수준, 변형율, 재하속도 및 재하빈도 등을 함께 고려할 수 있는 장점을 살려 PMT를 이용해 이들 효과를 모두 고려할 수 있는 탄성계수 결정법의 개발이 가능하며 이를 이용한 포장설계법의 보완이 가능하다. 이를 위해서는 국내 도로사정에 적합한 PMT의 적정 시험방법을 수립하여야 하며 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Barker, W., Brabston, W., and Chou, Y.(1977) "A general system for the structural desing of flexible pavements.", Proc. 4th Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements., Vol.1, Univ. of Michigan, pp 209-248
2. Briaud, J.-L. (1979) "The pressuremeter: application to pavement design", Ph.D Dissertation, Dept. of Civil Engg., Univ. of Ottawa
3. Huekelom, W. and Klomp, A. (1967) "Consideration of calculated strains at various depths in connection with the stability of asphalt pavement", Proc., 2nd Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan
4. Puppala, A., Mohammad, L., and Allen, A. (1999) "Permanent deformation characterization of subgrade soils from RLT test", J. Materials in Civil Engineering, Vol.11, No.4, ASCE, 274-282