

DYNAFLECT에 의한 아스팔트 콘크리트 포장도로의 분산도 특성에 관한 연구

A Study on the Spreadability Characteristics of Asphalt Concrete
Pavement using Dynaflect

金 秀 一*
Kim, Soo-Il

崔 正 勳**
Choi, Jung-Hoon

柳 知 衡***
Yoo, Ji-Hyeung

ABSTRACT

Dynaflect is known as a very effective equipment for the structural evaluation and rehabilitation of pavements. It is increasingly used in the design, construction and maintenance of the various pavement structures. In this study, two-layered asphalt concrete pavements with the various moduli and thicknesses are selected as the analytical models. The deflections on the surface corresponding to sensor positions of Dynaflect are analyzed utilizing the multi-layered elastic computer program.

From the study of the characteristics of spreadability (SPR), it is found that the SPRs are unique when the moduli ratio of pavements E_1/E_2 are identical. It is also found that the SPR has a linear relationship with the logarithm of moduli ratio E_1/E_2 in the range of 1.0 to 50. The regression equation to predict the moduli ratio E_1/E_2 from the SPR and the pavement thickness h is proposed. A series of charts to estimate the elastic moduli of two-layered asphalt concrete pavement system are also developed.

要 旨

도로포장의 구조평가 및 유지관리를 위하여 매우 효율적인 장비로 알려진 Dynaflect의 이용이 날로 증가하고 있어, 이에 대한 연구가 절실하다. 따라서 본 연구에서는 도로포장에 사용되는 재료의 탄성계수에 따른 해석모형을 설정하고, 이를 다층토 이론에 근거한 컴퓨터 프로그램을 통하여 Dynaflect의 처짐곡선을 산출함으로써 표층 두께와 탄성계수에 따른 분산도의 특성을 연구하였다.

* 正會員, 延世大學校 工科大學 土木工學科 教授

** 延世大學校, 工科大學 土木工學科 大學院

*** 正會員, 延世大學校, 工科大學 土木工學科 大學院

모델해석 결과, 분산도는 포장체 두 층의 탄성계수비가 같을 때는 표층이나 그 이하부의 탄성계수 크기에 관계없이 일정함을 밝혔으며, 탄성계수비와 분산도 및 표층두께의 상관관계식을 제안하였다. 또한 이층 아스팔트 콘크리트 포장의 탄성계수를 추정할 수 있는 도표를 개발하였다.

1. 서 론

Dynalect는 포장의 탄성계수, 덧씌우기 두께 및 잔존수명을 예측하는데 사용되는 동적 비파괴시험으로서 신뢰성이 좋아 그 이용도가 높아지고 있다. 시험에서 얻어지는 측정치는 다섯지점에서 표면처짐으로서 이를 해석하는 방법은 층구조이론(Layered theory)을 이용하는 해석적 방법과 측정된 시험자료를 통한 경험적 방법이 있는데, 해석의 주된 내용은 아스팔트 포장의 탄성계수 추정이다.

Dynalect의 처짐과 탄성계수의 상호관계에 관한 연구는 다층토이론의 발전에 따라 이론적 해석이 가능하게 되었다. Majdzadeh¹⁾는 1977년 이층 아스팔트 콘크리트 포장에서 기층곡률지수(Base curvature index, BCI), 최대처짐치(Dynalect maximum deflection, DMD)와 표층곡률지수(Surface curvature index, SCI) 및 두 층의 탄성계수 E_1 , E_2 의 관계를 제안하였으며, Vaswani²⁾는 분산도, 최대처짐치와 E_2 , 최대처짐치와 처짐곡선의 면적 및 E_2 의 관계, 포장두께와 포장의 탄성계수(E_1)의 관계를 연구하였다. Kiewit, et al.³⁾은 Dynalect 시험시 발생되는 다섯째 측정점의 처짐치(W_5)와 노상토의 탄성계수 사이에 밀접한 관계가 있다는 것을 밝혀냈다. 또한 Bandyopadhyay⁴⁾는 최대처짐치와 표층곡률지수에 대한 온도보정지수(Temperature adjustment factor)와 계절보정지수(Seasonal adjustment factor)를 제안하고, 최대처짐치와 표층곡률지수에 의해 포장의 덧씌우기 두께를 결정하는 도표를 개발하였다. 지금까지의 연구결과 이층 아스팔트 콘크리트 포장에서 Dynalect의 분산도와 두층의 탄성계수비($\frac{E_2}{E_1}$) 사이에 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀졌다.

본 연구에서는 표층두께와 표층 및 노상층의 탄성계수에 따른 다양한 이층 아스팔트 콘크리트 포장의 해석모델을 설정하고, University of

Kentucky의 Huang⁵⁾에 의해서 개발된 다층토 해석 프로그램을 이용하여 해석적 방법으로 Dynalect 다섯개 감지기의 처짐을 산정하였으며, 산정한 처짐으로부터 각각의 해석모델에 대한 분산도를 계산하고, 탄성계수비에 따른 분산도의 특성을 연구하여 표층두께와 탄성계수비 및 분산도의 상관관계식을 제안하였다.

표층두께가 20, 23, 25, 32 cm인 이층아스팔트 콘크리트 포장에서 Dynalect의 최대처짐치와 분산도를 이용하여 탄성계수를 추정하는 도표⁶⁾가 개발되어 있는데, 근래에 들어 자동차 하중과 교통량의 증가 등으로 인해 포장두께가 두꺼워짐으로써 기존의 도표만으로는 두꺼운 포장의 탄성계수를 추정하기가 어렵게 되었다. 따라서 본 연구에서는 표층두께가 35, 40, 45, 50 cm인 이층 아스팔트 콘크리트 포장의 탄성계수를 추정하는 도표도 개발하였다.

2. 이층 탄성 이론

아스팔트 콘크리트 포장은 통상 포장층의 상층부로 올라갈수록 탄성계수가 큰 재료를 사용함으로써 노상의 응력이나 변위를 균질층인 경우보다 감소시킬 수 있도록 설계, 시공되고 있다. 이러한 다층구조로 형성된 포장체의 해석방법은 Burmister⁷⁾에 의해서 연구된 이층구조이론에서 출발한다.

Burmister는 이층구조에서의 응력과 변위를 Fig. 1과 같은 경계조건 및 연속조건하에서 유도하였다. 응력과 변위의 경계조건은 일층 표면의 하중작용지점 밖에서는 연직응력(σ_{x1})과 전단응력(τ_{rx1})이 존재하지 않고, 지층 무한깊이에서는 응력(σ_{x2} , σ_{r2} , τ_{rx2})과 수직 및 수평변위(W_2^* , u_2)가 영이 된다는 것이다.

이층구조 해석시 중요한 또 한가지의 조건은 경계층의 응력과 변위의 연속조건이다. 두 층은 일체로 거동하는 것으로 가정하므로 경계층에서는 수직응력(σ_{x1} , σ_{x2}), 전단응력(τ_{rx1} , τ_{rx2}), 수

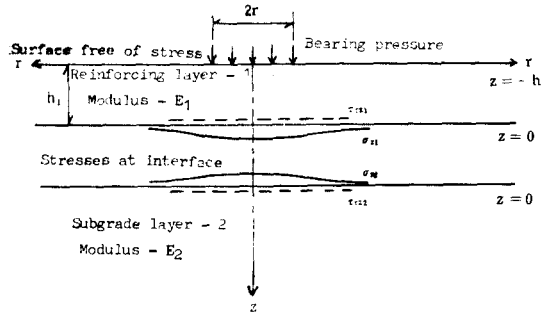


Fig. 1. Boundary and continuity conditions of stress and displacement for a two-layer system.

직변위 (W_1^* , W_2^*)와 수평변위 (u_1, u_2) 등의 일층과 이층값이 모두 같다. 경계층의 수평변위는 같고 두층의 탄성계수 값은 다르므로 수평응력 (σ_{r1}, σ_{r2})은 다르게 되고 응력, 변형율의 관계식으로부터 수평응력을 구한다.

이층구조이론은 삼차원 축대칭 탄성문제의 평형방정식, 적합방정식 및 응력과 변위에 대한 탄성방정식으로부터 유도된다.⁸⁾ Fig. 2와 같은 다층구조의 삼차원 축대칭 문제에서 평형방정식은 식(1)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

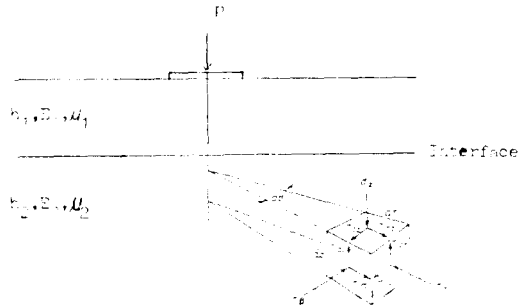


Fig. 2. Generalized two-layered elastic system.

또한 적합방정식은 식(2)와 같다.

$$\nabla^4 = 0 \quad (2)$$

여기서, $\nabla^2 = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\}$ 이다.

한편 탄성론에 의한 응력은 식(3)과 같이 쓸

수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{\partial}{\partial z} \left[(2-\mu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \\ \sigma_r &= \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \\ \tau_{rz} &= \frac{\partial}{\partial r} \left[(1-\mu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \right\} (3)$$

식(3)에서 μ 는 포아송비이고, ϕ 는 응력함수(Stress function)이다.

변위의 방정식은 다음 식(4)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} W^* &= \frac{1+\mu}{E} \left[(1-2\mu) \left(\nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right] \\ u &= -\frac{1+\mu}{E} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right] \end{aligned} \right\} (4)$$

식(4)에서 W^* 는 연직변위이며, u 는 수평변위이고, E 는 탄성계수이다.

Burmister는 이층구조 해석을 위해서 응력함수 ϕ 를 Bessel Function $J_0(mr)$ 과 상수 A, B, C, D를 포함하는 다음 식(5)로 표현하였다.

$$\phi = J_0(mr) [Ae^{mz} - Be^{-mz} + Cze^{mz} - Dze^{-mz}] \quad (5)$$

여기서 m 은 Bessel 함수에 사용되는 상수이다.

식(5)를 식(3)과 식(4)에 대입하고, 식(1)의 평형방정식과 식(2)의 적합방정식에 의해 미지수를 소거함으로써, 일층과 이층의 응력 및 변위를 산정할 수 있다.

3. Dynaflect의 기본이론

Dynaflect는 보통 승용차나 웨폰등에 견인되어 포장의 동적처짐을 측정하는 전자기계장치이다.⁶⁾ 이는 진동하중 발생장치, 처짐감지장치, 제어 및 측정장치로 구성되어 있으며, 두 개의 철륵을 통해 일정 크기의 주기적 힘이 포장면에 작용할 때 다섯개의 지점에서 처짐을 측정할 수 있다.

Fig. 3는 Dynaflect 시험장치를 보여주고 있는데, 하중은 두 개의 철륵에 의해 포장층에 전달되며, 이때 발생하는 하중은 주기가 8Hz인 454

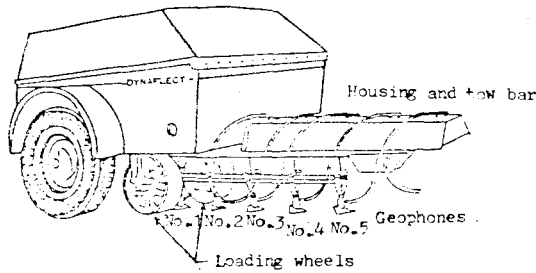


Fig. 3. The Dynaflect system in operating position.

kg(1000lbs)의 동하중이다. 9) 하중에 의해 발생된 처짐은 각각 30.5 cm(12")씩 떨어진 다섯개의 감지기에 의해 측정된다.

Dynaflect에 의해 발생된 다섯개 측정의 처짐을 도시하면, Fig. 4과 같은 곡선형태가 되는데, 처짐곡선의 크기 및 형상은 포장내의 응력 및 변형율의 크기에 비례해서 형성되므로 포장체의 상태를 평가하는데 중요한 지표가 된다.

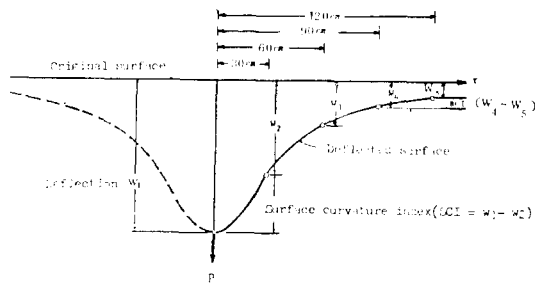


Fig. 4. Typical Dynaflect deflection bowl and deflection basin parameters.

Dynaflect의 자료를 이용해 포장을 해석할 때 많이 사용되는 처짐지수와 그 특성을 알아 보면 다음과 같다.

- 1) 최대처짐치 (Dynaflect maximum deflection, DMD)

Dynaflect의 최대처짐량이자 감지기 일련의 변위량을 말하며, 포장의 구조적 특성 및 지지력의 지표가 된다.

- 2) W_5 (Fifth sensor deflection)

다섯번째 감지기의 처짐량으로서 노상의 강성에 반비례한다. 포장두께나 표층의 강성에 영향을 적게 받으므로 노상의 강도를 추정하는데 중요한 수치이다.

- 3) 표층곡률지수 (Surface curvature index, SCI)

표층곡률지수는 W_1 과 W_2 의 차로써 표층의 상대적 강도를 나타내며, 아스팔트층의 하중전달 능력을 나타내기도 한다.

- 4) 기층곡률지수 (Base curvature index, BCI)
 W_4 와 W_5 의 차를 말하며 기층, 보조기층과 노상의 상대적 강도를 나타낸다.

- 5) 분산도 (Spreadability, SPR)

W_1 부터 W_5 까지의 합과 최대처짐치 (W_1)와의 비를 백분율로 나타낸 것으로 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$SPR = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5}{5W_1} \times 100(\%) \quad (6)$$

이 값은 표층의 하중분산능력을 나타내며, 표층부의 탄성계수 E_1 과 노상의 탄성계수 E_2 의 비에 관계가 깊다.

4. 해석모델 및 결과분석

4.1 해석모델

Dynaflect 시험을 통한 아스팔트 콘크리트 포장의 해석시에는 일반적으로 포장구조를 아스팔트 표층과 노상으로 이루어진 이중구조로 간주한다. 본 연구에서 고려한 아스팔트 포장의 단면도는 Fig. 5와 같다.

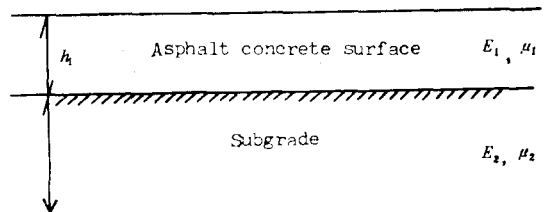


Fig. 5. Asphalt concrete pavement structure for analysis.

아스팔트 표층의 탄성계수는 도로 포장에 사용되는 $500 \sim 400,000 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위에서 10개를 취했으며, 노상의 탄성계수는 $50 \sim 8,000 \text{ kg/cm}^2$ 사이에서 9개를 취하여 컴퓨터 해석을 하였다. 포아송비는 응력과 변위에 큰 영향을 미치지 않으므로 두층 모두 0.2를 사용하였으며, 표층두께는 20, 23, 25, 30, 35, 40, 45, 50 cm에 대해 해석하였다. 해석모델에 사용된 아스팔트 콘크리트 표층의 두께와 두층의 탄성계수는 Ta-

Table 1. Thicknesses and elastic moduli for analytical model.

| | |
|-----------------------------|--|
| Thickness(cm) | 20, 23, 25, 32, 35, 40, 45, 50 |
| E_1 (kg/cm ²) | 500, 1,000, 2,000, 5,000, 10,000 20,000, 50,000, 100,000, 200,000, 400,000 |
| E_2 (kg/cm ²) | 50, 100, 200, 500, 1,000, 2,000, 4,000, 8,000 |

ble 1 과 같다.

4.2 Dynaflect 의 환산 정하중

Dynaflect 에서 발생하는 하중은 주기가 8Hz

인 454 kg(1,000 lbs)의 동하중이다. 정역학적탄성이론에 의해 Dynaflect 의 처짐을 해석하기 위해서는 454kg 의 동하중을 정하중으로 환산해야 하는데, 지반의 특성에 따라 환산 정하중이 달라지므로 정확한 환산식을 얻기는 어렵다.

본 연구에서는 환산 정하중을 구하기 위하여 기존의 W_1 -SPR 관계도에서 임의로 몇 개의 점을 택하여, 포장층의 탄성계수와 접지면적 등을 고정시킨 다음 작용하중 만을 달리하면서, 다층토 해석 프로그램에 의해 W_1 과 SPR 을 구하였다. 다양한 작용하중에 대한 W_1 과 SPR의 컴퓨터 계산값을 기존 도표값과 비교한 결과 정하중을 433kg으로 했을 때 두 값이 가장 잘 일치한

Table 2. Comparison of W_1 and SPR between values from existing charts with the computed.

| 표두께 (cm) | E_1 (kg/cm ²) | E_2 (kg/cm ²) | W_1 (표) (mm) | W_1 (계산) (mm) | W_1 의 오차 (%) | SPR (표) (%) | SPR (계산) (%) | SPR의 오차 (%) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 20 | 280000 | 700 | .0229 | .0231 | 0.87 | 83.0 | 82.4 | -0.72 |
| | 280000 | 5600 | .0051 | .0051 | 0 | 67.5 | 67.5 | 0 |
| | 420000 | 175 | .0508 | .0531 | 4.50 | 92.0 | 91.7 | 0.33 |
| | 140000 | 4200 | .0076 | .0076 | 0 | 64.0 | 64.3 | 0.47 |
| | 42000 | 5600 | .0076 | .0074 | -3.08 | 55.0 | 55.7 | 1.27 |
| | 28000 | 70 | .2286 | .2316 | 1.33 | 83.0 | 82.5 | -0.60 |
| | 70000 | 1400 | .0203 | .0206 | 1.35 | 68.0 | 67.0 | -1.47 |
| | 7000 | 140 | .1016 | .1008 | -1.50 | 61.0 | 60.0 | -1.64 |
| | 14000 | 2800 | .0152 | .0157 | 3.61 | 53.0 | 54.0 | 1.89 |
| 23 | 280000 | 4900 | .0051 | .0051 | 0 | 71.0 | 70.4 | -0.85 |
| | 28000 | 5600 | .0076 | .0076 | 0 | 55.0 | 55.2 | 0.36 |
| | 14000 | 175 | .1308 | .1323 | 1.17 | 74.0 | 73.3 | -0.95 |
| | 140000 | 1400 | .0155 | .0155 | 0 | 76.0 | 74.9 | -1.45 |
| | 42000 | 2800 | .0127 | .0122 | -4.00 | 61.0 | 61.3 | 0.49 |
| | 70000 | 350 | .0508 | .0511 | 0.50 | 81.0 | 80.1 | -1.11 |
| | 7000 | 700 | .0533 | .0533 | 0 | 58.0 | 58.8 | 1.38 |
| | 420000 | 700 | .0178 | .0183 | 2.74 | 87.5 | 86.7 | -0.91 |
| | 28000 | 70 | .2032 | .2080 | 2.20 | 85.0 | 84.6 | -0.47 |
| 25 | 140000 | 5600 | .0051 | .0051 | 0 | 67.0 | 66.7 | -0.45 |
| | 14000 | 5600 | .0076 | .0079 | 3.61 | 52.5 | 53.5 | 1.90 |
| | 7000 | 700 | .0508 | .0503 | -1.00 | 60.5 | 60.5 | 0 |
| | 3500 | 175 | .1778 | .1727 | -2.87 | 65.5 | 65.1 | -0.61 |
| | 420000 | 1400 | .0102 | .0104 | 1.96 | 85.0 | 84.5 | -0.59 |
| | 70000 | 2100 | .0127 | .0127 | 0 | 69.5 | 69.1 | -0.58 |
| | 700 | 350 | .1270 | .1321 | 4.00 | 51.0 | 52.8 | 3.53 |
| | 28000 | 2800 | .0127 | .0127 | 0 | 60.5 | 60.5 | 0 |
| | 14000 | 350 | .0737 | .0729 | -1.09 | 71.0 | 70.3 | -0.99 |

| | | | | | | | | |
|----|--------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 32 | 28000 | 350 | .0234 | .0244 | 4.21 | 92.0 | 92.3 | 0.33 |
| | 280000 | 3500 | .0051 | .0051 | 0 | 81.0 | 80.0 | -1.23 |
| | 7000 | 70 | .2286 | .2342 | 2.44 | 82.5 | 81.5 | -1.21 |
| | 2100 | 350 | .1016 | .0980 | -3.54 | 60.0 | 60.9 | 1.50 |
| | 42000 | 2800 | .0102 | .0099 | -2.88 | 67.0 | 67.3 | 0.45 |
| | 70000 | 700 | .0229 | .0234 | 2.04 | 82.0 | 81.6 | -0.49 |
| | 14000 | 175 | .1016 | .0998 | -1.75 | 80.5 | 80.0 | -0.62 |
| | 3500 | 2100 | .0203 | .0216 | 6.35 | 52.5 | 53.3 | 1.52 |
| | 28000 | 350 | .0508 | .0500 | -1.50 | 81.0 | 80.0 | -1.23 |

다는 것을 밝혀냈다. Table 2는 Dynaflect의 환산정하중을 433kg으로 추정하고 W_1 과 SPR을 계산하여 기존 도표값과 비교한 것이다.

Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 기존 표와 컴퓨터 계산 값의 오차가 W_1 은 최대 6.35%, 평균 1.84%이고, SPR은 최대 3.53%, 평균 0.93%이므로 433kg의 정하중을 이용하여, 다층토이론에 의한 해석적 방법으로 Dynaflect의 처짐을 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 표층의 두께와 분산도 및 탄성계수비의 관계

표층과 노상의 탄성계수가 상이하고 이들의 비가 일정한 경우에 대하여 다층토탄성이론에 의해 컴퓨터 해석한 결과로 부터 Table 3과 같은 표층두께에 따른 분산도를 얻었다.

Table 3에서 보는 바와 같이 탄성계수 비가 일정하게 되면 표층과 노상의 탄성계수가 각각 다른 경우에도 분산도는 아스팔트 콘크리트 표층의 두께에 따라 거의 같게 됨을 알 수 있다.

또한, 각 탄성계수비에 따른 분산도를 아스팔트 표층의 두께별로 분류하여 나타낸 것이 Table 4이며, 이중 표층두께가 40cm인 경우의 분산도와 탄성계수비를 반대수 용지에 도시하면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 탄성계수비가 1.0에서 50 사이에 있을 때, 분산도와 탄성계수비의 대수값 $\log \frac{E_1}{E_2}$ 은 거의 선형관계를 보이고 있으므로 분산도와 탄성계수비는 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$SPR = a_1 + a_2 \log \frac{E_1}{E_2} \quad (7)$$

Table 4에서 보는 바와 같이 탄성계수비가 1

Table 3. Relationship between E_1/E_2 and spreadability.

| E_1/E_2 | SPR | E_1 (kg/cm ²) | E_2 (kg/cm ²) | SPR(%) | | | |
|-----------|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | 35cm | 40cm | 45cm | 50cm |
| 0.5 | | 500 | 1000 | 44.35 | 43.66 | 43.23 | 43.08 |
| | | 1000 | 2000 | 44.40 | 43.74 | 43.26 | 43.11 |
| | | 2000 | 4000 | 44.29 | 43.64 | 43.15 | 42.95 |
| 1 | | 500 | 500 | 49.89 | 49.86 | 49.86 | 49.91 |
| | | 1000 | 1000 | 49.89 | 49.89 | 49.83 | 49.89 |
| | | 2000 | 2000 | 49.89 | 49.89 | 49.89 | 49.89 |
| 2.5 | | 500 | 200 | 56.38 | 57.43 | 58.23 | 58.94 |
| | | 10000 | 4000 | 56.24 | 57.50 | 57.85 | 58.88 |
| | | 20000 | 8000 | 56.00 | 57.50 | 58.70 | 58.22 |
| 5 | | 500 | 100 | 61.10 | 62.85 | 64.24 | 65.42 |
| | | 5000 | 1000 | 61.17 | 62.83 | 64.23 | 65.41 |
| | | 20000 | 4000 | 61.20 | 63.04 | 64.59 | 65.43 |
| 10 | | 500 | 50 | 66.11 | 68.33 | 70.13 | 71.61 |
| | | 2000 | 200 | 66.08 | 68.33 | 70.16 | 71.61 |
| | | 20000 | 2000 | 66.10 | 68.18 | 70.41 | 71.50 |
| 20 | | 1000 | 50 | 71.43 | 73.90 | 75.82 | 77.41 |
| | | 2000 | 100 | 71.43 | 73.88 | 75.84 | 77.40 |
| | | 10000 | 500 | 71.50 | 73.90 | 75.80 | 77.47 |
| 100 | | 20000 | 200 | 83.20 | 85.26 | 86.86 | 88.18 |
| | | 50000 | 500 | 83.18 | 85.39 | 86.92 | 88.07 |
| | | 100000 | 1000 | 83.18 | 85.22 | 87.17 | 88.26 |
| 200 | | 10000 | 50 | 87.28 | 89.01 | 90.31 | 91.34 |
| | | 20000 | 100 | 87.30 | 89.03 | 90.34 | 91.35 |
| | | 100000 | 500 | 87.21 | 89.02 | 90.26 | 91.61 |
| 1000 | | 50000 | 50 | 93.34 | 95.22 | 96.31 | 97.04 |
| | | 100000 | 100 | 93.89 | 95.24 | 96.29 | 97.28 |
| | | 200000 | 200 | 93.86 | 95.24 | 96.25 | 97.17 |

일때는 표층두께에 관계없이 분산도가 49.89로 거의 일치하고 있으므로 표층의 두께는 회귀곡

선의 기울기에만 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 따라서 탄성계수비와 분산도의 관계를 얻기 위해, 회귀곡선의 절편, a_1 은 49.89로 고정하고 기울기, a_2 는 식(8)과 같이 표층두께, h 의 2차함수로 회귀분석을 할 수 있다.

$$a_2 = -6.66 + 0.947h - 0.008h^2 \quad (8)$$

Table 4. Spreadabilities with respect to E_1/E_2 .

| h(cm) | SPR(%) | | | | | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|----|--|
| | 20 | | 35 | | 30 | | 45 | | 50 | |
| 1.00 | 49.89 | 49.89 | 49.89 | 49.92 | 49.89 | 49.86 | 49.90 | | | |
| 1.25 | 50.37 | 50.78 | 51.19 | 51.48 | 51.75 | 51.80 | 51.95 | | | |
| 2.00 | 51.41 | 52.72 | 53.86 | 54.84 | 55.67 | 56.26 | 56.79 | | | |
| 2.50 | 52.01 | 53.61 | 55.12 | 56.35 | 57.44 | 58.26 | 58.73 | | | |
| 5.00 | 53.95 | 56.53 | 59.03 | 61.12 | 62.87 | 64.30 | 65.45 | | | |
| 10.00 | 56.77 | 60.22 | 63.52 | 66.06 | 68.31 | 70.17 | 71.59 | | | |
| 20.00 | 60.45 | 64.78 | 68.46 | 71.40 | 73.88 | 75.85 | 77.41 | | | |
| 25.00 | 61.87 | 66.39 | 70.14 | 73.28 | 75.80 | 77.66 | 79.32 | | | |
| 40.00 | 65.15 | 69.92 | 73.64 | 76.79 | 79.16 | 81.07 | 82.59 | | | |
| 50.00 | 66.72 | 71.57 | 75.46 | 78.49 | 80.64 | 82.59 | 84.01 | | | |

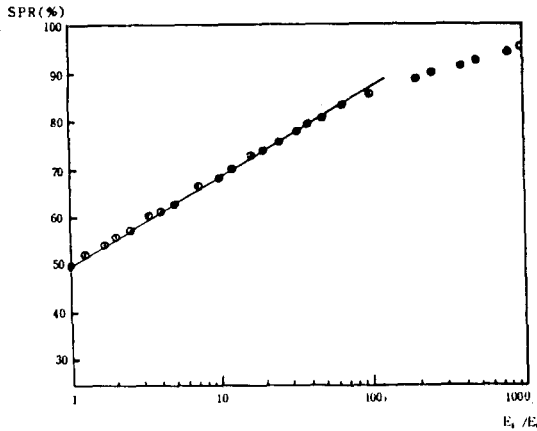


Fig. 6. SPR- E_1/E_2 relation for 40cm surface.

표층두께 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50cm에 대하여 1.0에서 50까지의 탄성계수비와 분산도들 선형 회귀분석하여 회귀상수 a_1, a_2 와 상관계수, r 을 Table 5에 나타내었으며, 이를 도시하면 Fig.7과 같다.

따라서, 이층 아스팔트 콘크리트 포장의 탄성계수비가 1.0에서 50 사이에 있을때 분산도와 탄성계수비 및 표층두께의 관계는 식(9)로 나타낼 수 있다.

Table 5. Regression coefficients and correlation coefficients.

| coeff. | h(cm) | | |
|--------|---------|---------|---------|
| | 20 | 25 | 30 |
| a_1 | 49.8900 | 49.8900 | 49.8900 |
| a_2 | 8.9776 | 12.2565 | 14.5093 |
| r | 0.9839 | 0.9940 | 0.9985 |

| coeff. | h(cm) | | | |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| | 35 | 40 | 45 | 50 |
| a_1 | 49.8900 | 49.8900 | 49.8900 | 49.8900 |
| a_2 | 16.7236 | 18.3539 | 19.7905 | 20.8053 |
| r | 0.9998 | 0.9998 | 0.9987 | 0.9988 |

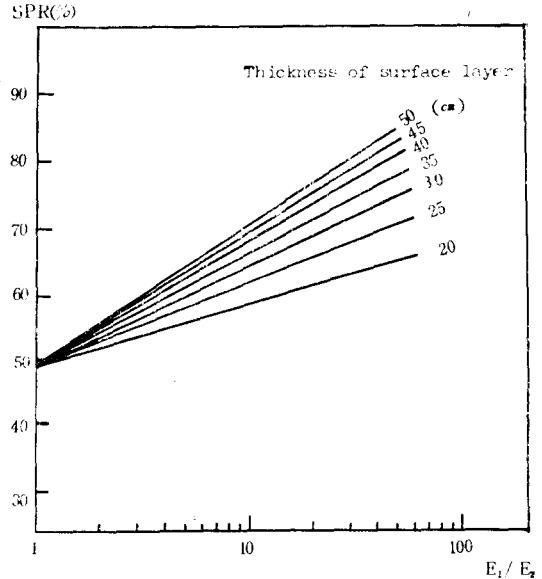


Fig. 7. SPR- E_1/E_2 relation by linear regression analysis.

$$SPR = 49.89 + (-6.66 + 0.947h - 0.008h^2) \log \frac{E_1}{E_2} \quad (9)$$

실제 Dynaflect 시험에 의해 분산도와 표층두께는 알 수 있으므로 미지값인 탄성계수비의 식으로 나타내면 식(10)과 같다.

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{(SPR - 49.89) / (-6.66 + 0.947h - 0.008h^2)} \quad (10)$$

식(10)에 해석모델의 표층두께와 이론적분산도값을 대입하여 탄성계수비를 구하면 Table 6과 같다.

Table 6. The comparison of the real E_1/E_2 with the estimated.

| E_1/E_2 | $h(\text{cm})$ | estimated E_1/E_2 | | | | | | | |
|----------------|----------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | ave. |
| 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1.25 | 1.13 | 1.19 | 1.23 | 1.25 | 1.26 | 1.25 | 1.26 | 1.26 | 1.22 |
| 2.00 | 1.47 | 1.72 | 1.87 | 1.98 | 2.06 | 2.10 | 2.16 | 2.16 | 1.91 |
| 2.50 | 1.71 | 2.04 | 2.29 | 2.44 | 2.57 | 2.65 | 2.67 | 2.67 | 2.34 |
| 5.00 | 2.80 | 3.57 | 4.25 | 4.71 | 5.07 | 5.36 | 5.65 | 5.65 | 4.47 |
| 10.00 | 5.72 | 7.24 | 8.65 | 9.31 | 10.00 | 10.63 | 11.19 | 11.19 | 8.96 |
| 20.00 | 14.55 | 17.35 | 18.89 | 19.46 | 20.06 | 20.61 | 21.39 | 21.39 | 18.90 |
| 25.00 | 20.86 | 23.62 | 24.65 | 25.23 | 25.50 | 25.45 | 26.45 | 26.45 | 24.54 |
| 40.00 | 47.93 | 46.46 | 42.88 | 40.95 | 38.82 | 37.87 | 38.06 | 38.06 | 41.85 |
| 50.00 | 71.37 | 63.74 | 57.20 | 51.77 | 46.71 | 45.21 | 44.58 | 44.58 | 54.37 |
| error ave. (%) | | 26.09 | 15.58 | 3.49 | 2.57 | 1.98 | 4.42 | 6.89 | 5.50 |

Table 6에서 보는바와 같이 두층의 탄성계수 비가 1.0에서 50 사이에 있을때 식(10)에 의해 추정된 $\frac{E_1}{E_2}$ 값과 실제 컴퓨터해석시 사용한 $\frac{E_1}{E_2}$ 값의 오차가 표층두께 20cm 일때 26.09%로 가장 크고, 두께가 두꺼울수록 오차는 급격히 감소하고 있다. 따라서 표층두께 20cm 인 경우를 제외하면 식(10)을 이용하여 아스팔트 콘크리트 포장의 탄성계수비를 추정할 수 있을 것으로 판

단된다.

4.4 이층 아스팔트 콘크리트 포장의 탄성계수 추정

표층두께가 35, 40, 45, 50cm 인 이층 아스팔트 콘크리트 포장에서 Table 1의 해석모델에 대하여 4.2에서 구한 환산정하중을 작용시켜, 다층 토 해석프로그램을 수행하면 Dynaflect 다섯개

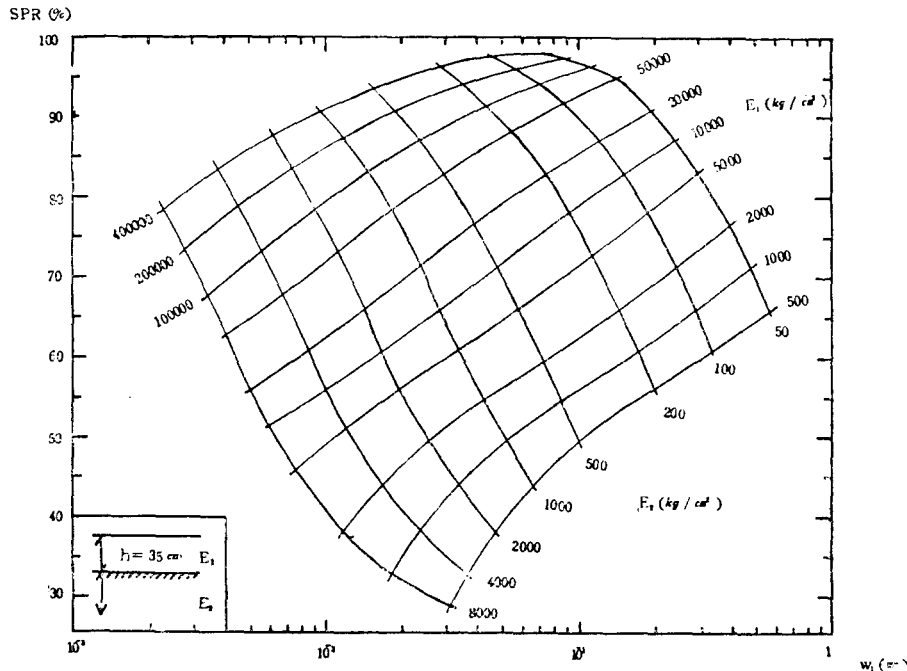


Fig. 8. Spreadability-maximum deflection relation for 35cm asphalt concrete pavements.

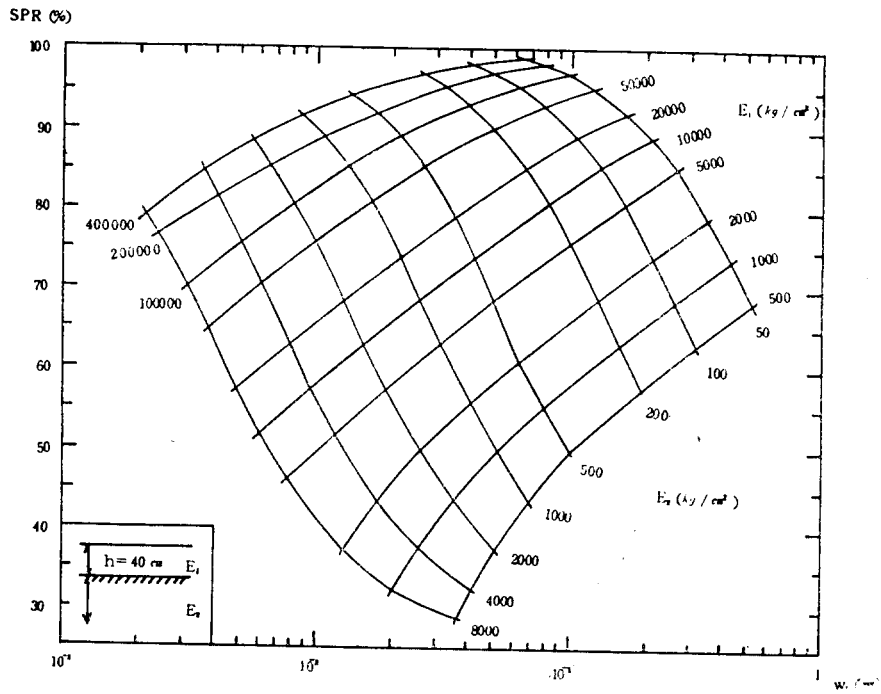


Fig. 9. Spreadability-maximum deflection relation for 40 cm asphalt concrete pavements.

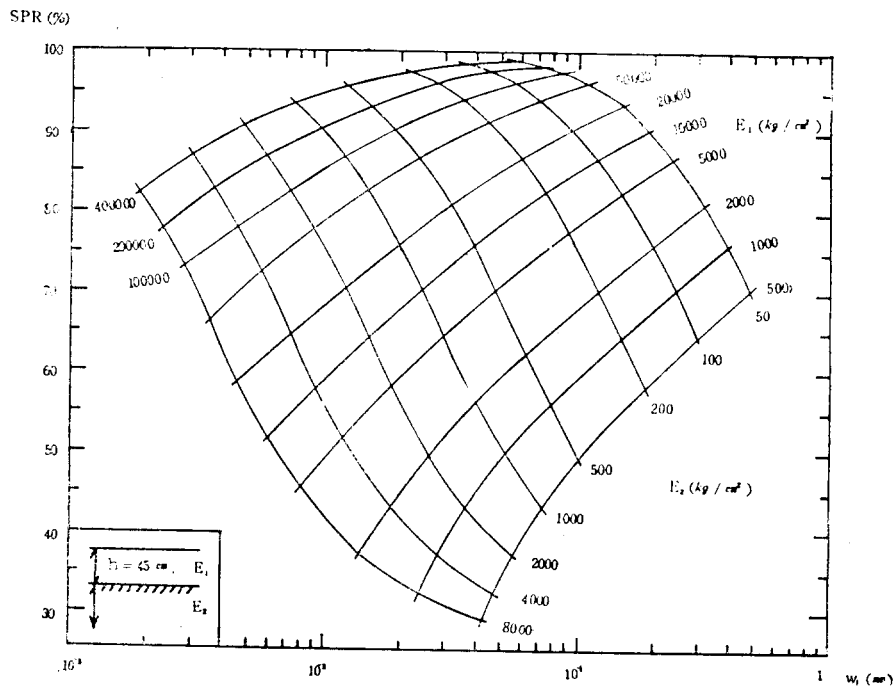


Fig. 10. Spreadability-maximum deflection for 45cm asphalt concrete pavements.

측점의 처짐을 구할 수 있다. 각 표층두께에 대해서 표층과 노상의 탄성계수 조합에 따른 각각의 처짐곡선을 산출하고, 이 곡선으로부터 분산도를 구하여 최대처짐치를 반대수 용지의 대수

측에, 분산도를 산출측에 놓고 도시함으로써 분산도와 최대처짐치의 관계도를 얻을 수 있다. 각 두께 SPR-W₁ 별관계도를 나타내면 Fig. 8~Fig. 11과 같다.

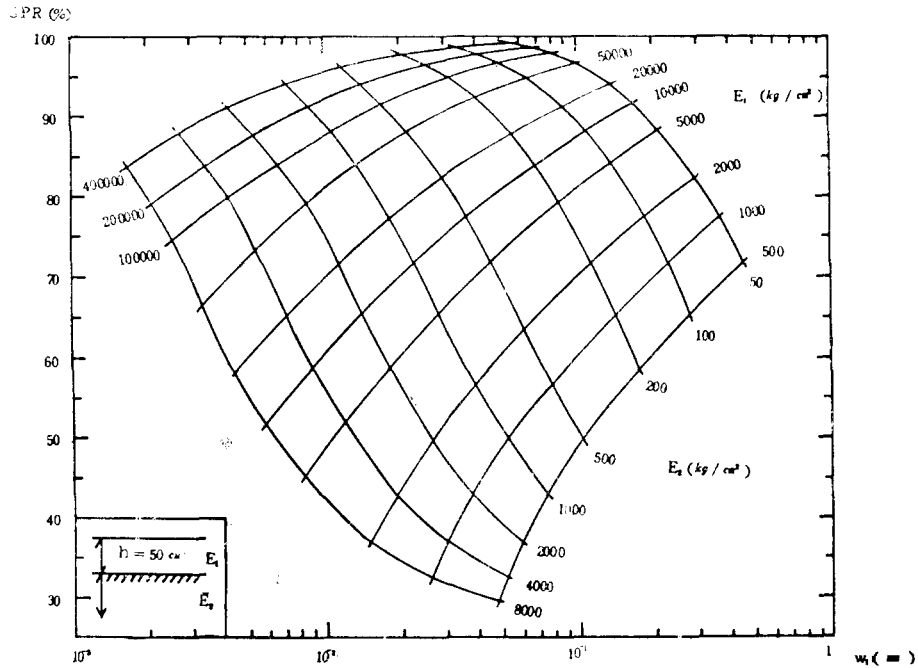


Fig. 11. Spreadability-maximum deflection for 50cm asphalt concrete pavements.

표층두께가 35, 40, 45, 50cm 인 이층 아스팔트 콘크리트 포장의 경우에 Dynaflect의 실측 최대 처짐치와 분산도를 얻게되면, Fig. 8~Fig. 11의 도표를 이용하여 두 층의 탄성계수 E_1, E_2 를 추정할 수 있다.

3) 표층두께가 35, 40, 45, 50cm 인 이층아스팔트 콘크리트 포장체에서 Dynaflect의 최대처짐치와 분산도에 의해 두 층의 탄성계수를 추정할 수 있는 도표를 개발하였다.

5. 결 론

Dynaflect 처짐의 다층토 탄성이론에 의한 해석적 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 이층 아스팔트 포장체의 분산도는 두 층의 탄성계수비에 따라 일정하다.

2) 탄성계수비가 1.0에서 50 사이에 있을때 분산도와 표층두께 및 탄성계수비는 다음식으로 쓸 수 있다.

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{(SPR - 49.89) / (-6.66 + 0.947h - 0.008h^2)}$$

참 고 문 헌

1. Majdzadeh, K., "Pavement Condition Evaluation Utilizing Dynamic Deflection Measurements," Final Report, Ohio Dep. of Transportation, 1977.
2. Vaswani, N.K., "Determining Moduli of Materials from Deflection", Jr. of Transportation Engrg., ASCE, Vol. 103, #TE1, 1977, pp. 125~141.
3. Kiewit, P.D., Koning, D.C., Carmichael, R.F., and Hudson, N.R., "Evaluation and Overlay Design for Flexible Pavements on Low Volume Roads", Proceedings, 4th International Conference

- on Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, 1977, pp.674~696.
4. Bandyopadhyay, S.S., "Flexible Pavements Evaluation and Overlay Design", Jr. of Transportation Engrg., ASCE, Vol.108, #TE6, 1982.
 5. Huang, Y.H., "FPMANUAL(Flexible Pavement Analysis Computer Program)", University of Kentucky, 1984, p.20.
 6. Majdzadeh, K. and Kumar, V., Manual of Operation and Use of Dynaflect for Pavement Evaluation, Resource International, Inc., Columbus, 1983.
 7. Burmister, D.M., "Evaluation of Pavement Systems of the WASHO Road Test by Layered System Methods", Flexible Pavement Studies and Georgia Design Practice, HRB, Vol.35, 1956, pp. 773~814.
 8. Love, A.E., A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, 4th ed., New York, 1944.
 9. Pace, G.M., "Non Destructive Tests for Rigid Pavements Using Dynamic Deflection Measurements", The 5th Paving Conference at the University of New Mexico, 1967.