

大氣溫度에 따른 아스팔트鋪裝 内部 溫度變化와 變形特性에 關한 研究

A Study on the Variation of Temperature and the Deformation Characteristics in Asphaltic Concrete Pavement by Air Temperature

강민수* · 김수삼** · 이석근***

Kang, Min Soo · Kim, Soo Sam · Lee, Suk Keun

Abstract

The condition of temperature gradients in asphaltic concrete (Ascon) pavement have been analyzed based on the data collected from 5 major sites in Korea. From this, considering heat transfer by insolation flux and air temperature within pavement slab, temperature variation on the surface of pavement was computed and numerical model using the theory of thermal conductivity was applied to estimate the temperature gradients in depth. To investigate the present condition of asphalt generally used in Korea, the asphalt property tests were applicated on 5 different AP-3 (AC 85~100), and AP-5 (AC 60~70) asphalts classified by penetration index. Uniaxial compression test and indirect tensile test were also carried out for varying temperature conditions to analyze the effect of temperature on the deformation characteristics of Ascon pavement by calculating the variation of static elastic modulus and layer coefficients.

요 지

국내 아스팔트포장의 온도변화 특성을 파악하기 위하여 국내 주요 5개 지역을 선정하여 포장의 내부온도를 측정하였고, 이를 바탕으로 포장체 연수치를 검토함과 동시에 포장체의 표면온도변화를 산정하고 열전도 이론을 이용하여 내부온도를 예측하는 수치모형을 도입 프로그램화함으로써 실측자료와 예측자료를 비교, 검토하고 그 적용성을 검증하였다. 그리고, 아스팔트혼합물의 온도의 영향을 분석하고자 국내에서 현재 생산 중인 아스팔트 재료 즉, 포장용아스팔트 AP-3(AC 85~100)와 AP 5(AC 60~70)를 선정하여 아스팔트물성시험과 Ascon 공시체를 마샬배합설계법에 따라 제작하여 온도에 따른 일축압축시험과 간접인장시험의 정적탄성계수시험을 시행함으로써 아스팔트혼합물의 온도에 따른 변형특성을 파악하고자 하였고, 이로부터 온도변화에 따른 포장내부 온도예측 모델을 정립하고 온도에 따른 변형계수 변동을 분석, 대기온도와 변형계수 관계를 도출함으로써 지역에 따른 적정 아스팔트 선정을 위한 기초자료를 제시해 보고자 하였다.

* 정회원 · 중앙대 대학원 박사과정

** 정회원 · 중앙대 토목공학과 정교수

*** 정회원 · 경희대학교 토목공학과 조교수

1. 서 론

국내 아스팔트포장의 변형거동에 영향을 미치는 인자로서 크게 차륜에 의한 교통하중과 포장체의 온도를 들 수 있다. 특히, 자연환경에 의한 온도는 아스팔트 포장설계에서 고려하지 않으면 안되는 중요한 요소이다.

본 연구에서는 포장체 내부의 온도변화 특성을 파악하기 위하여 현장 계측을 실시하였으며, 우선적으로 계측지역을 선정하기 위하여 전국 주요 착안지점의 기상자료를 기초자료로하여 최근 10년간의 기온 중 월평균최고기온의 분포특성을 분석하여 검토하고 그 온도특성이 현저한 서울, 대구, 마산, 전주, 대관령 등의 5개지역을 선정, 내부온도를 측정하였다. 또, 열전도이론을 이용하여 내부온도를 예측하는 수치모형을 도입 프로그램화 함으로서 실측자료와 예측자료를 비교, 검토하고 그 적용성을 검증하였다.

그리고, 아스팔트혼합물의 온도의 영향을 분석하고자 국내에서 현재 생산 중인 아스팔트 재료 즉, 포장용아스팔트 AP-3(AC 85~100)와 AP-5(AC 60~70)를 선정하여 아스팔트물성시험과 Ascon 공시체를 마살배합설계법에 따라 제작하여 온도에 따른 일축압축시험과 간접인장시험의 정적탄성계수시험을 시행함으로써 아스팔트혼합물의 온도에 따른 변형특성을 파악하고자 하였고, 이로부터 온도변화에 따른 포장내부 온도예측 모델을 정립하고 온도에 따른 변형계수 변동을 분석, 대기온도와 변형계수 관계를 도출함으로써 지역에 따른 적정 아스팔트선정을 위한 기초자료를 제시해 보고자 하였다.

2. 이 론

2.1 대기온도와 포장표면온도의 관계

포장체내의 온도는 기상과 하부지반의 상태 등의 환경요인에 의한 일사량, 대기온도, 풍향, 풍속, 운량, 강우량, 노상토함수량 등의 외부적인 조건과 포장체 자체의 물리적특성 및 포장구조의 종류에 의한 내부적인 조건에 의하여 영향을 받는다. 이 중 특히, 대기온도 및 일사량은 기상조건이 좋은 날 풍속이 강하지 않은 상태에서 포장체의 온도변화에 영향을 미치는 가장 큰 요인이 된다. 맑은 날 주간(주간)의 열수지를 고려할 때 포장표면온도가 항상 높으므로 포

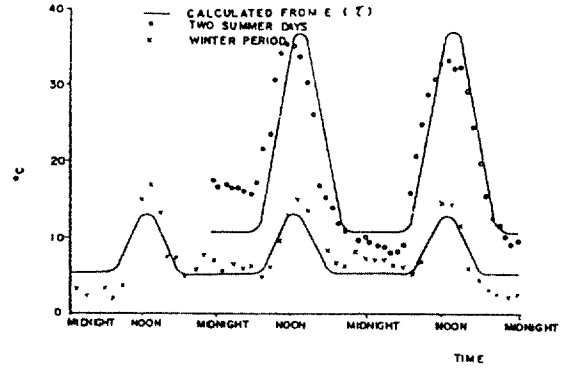


Fig. 2-1. Daily Variation of Temperature Difference between Surface and Ambient Air in Brisbane by E.J. Dickinson, 1978⁽²⁰⁾

장표면에서 대기쪽으로 온도경사가 발생하여 열손실이 발생하게 된다. 따라서, 일사에 의한 포장 표면온도는 일사량의 변화함수인 Haversine 형태로 변화하므로 포장층내의 열전달을 발생시키는 온도구배를 구하기 위하여 포장 표면온도와 기온의 차이를 조사해야 한다. 포장표면이 받는 태양에 의해 받는 일사량은 다음식으로 표시된다.⁽²³⁾

$$I(\tau) = \frac{2 \cdot S}{z} \sin^2 \frac{\pi \cdot \tau}{z} \quad (2-1)$$

여기에서, τ : 시간(hr)
 (일출시간 1시간 전을 $\tau=0$ 으로 본다.)
 S : 전천 일사량(wh/m²)
 $I(\tau)$: 시에 있어서의 일사 Flux
 z : 일출 1시간 전부터 일몰 1시간 후

반면, 포장표면에서의 에너지 손실량은 포장표면의 온도가 항상 대기온도보다 높다는 가정하에서 포장표면온도와 대기온도의 차로써 다음 식과 같이 표시될 수 있다.

$$E(\tau) = (\theta_0 - \theta_a) = h \cdot X \quad (2-2)$$

여기에서, $E(\tau)$: 표면에서 τ 시에 발생하는 열손실량
 h : 표면열전달계수
 θ_0 : 포장표면온도
 θ_a : 대기온도

임의의 시간에 있어서의 에너지 손실량은 Fig. 2-1에서 볼 수 있듯이 주야간에 일정한 에너지 Flux와

주간에만 Haversine 함수적으로 변하는 에너지 Flux로 표시할 수 있다.

이러한 관계로부터 $E(\tau)$ 는 일사량 산정식과 같은 형태의 주간의 Extra Flux 항과 주야간의 지속적인 에너지 Flux의 합으로 근사적으로 표현될 수 있다. 따라서,

$$E(\tau) = [A\gamma S \frac{\tau=24}{\tau=0} + [B\gamma S \frac{1}{z} \sin^2 \frac{\pi \cdot \tau}{z}]] \quad \tau=z \quad \tau=0 \quad (2-3)$$

이 된다. 여기서 A, B는 S에 의한 계수이고, 각각 $A = \frac{\bar{X}_n}{24\bar{X}}$, $B = \frac{z(X_{max} - \bar{X}_n)}{24\bar{X}}$ 과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, \bar{X} 는 하루 중의 X값의 평균치, \bar{X}_n 는 X의 야간평균치이고, X_{max} 는 X의 최대값이다. 이식을 하루 24시간에 대하여 적분하면,

$$\int_0^{24} E(\tau) d\tau = 24ArS + BrS \int_0^z \frac{1}{z} \sin^2 \frac{\pi \tau}{z} d\tau = rS(24A + \frac{B}{2}) \quad (2-4)$$

이 된다. 여기서, 계수 A, B를 구하여 Dickinson (1978)은 오스트레일리아의 Canbarra와 Brisbane에서의 자료로부터 시간과 복사열의 함수로 된 에너지 손실량을 다음 식과 같이 구하였다.⁽²⁰⁾

$$E(\tau) = \gamma S [0.0368 - 1.53 \times 10^{-6} S + (0.234 + 7.33 \times 10^{-5} S) \frac{1}{z} \sin^2 \frac{\pi \cdot \tau}{z}] \quad (2-5)$$

포장표면온도와 내부온도를 계산하는 경우 포장 내부의 온도구배가 없는 시각 즉, 포장내부 상하부의 온도가 같을 때에서부터 시작하는 것이 편리하다. 이러한 조건은 일출시간에서 대략 2시간 이후에 발생하게 된다.

2.2 열전도 이론

2.1절에서 구한 포장표면온도를 경계조건으로 하여 포장체를 반무한체로 가정한 경우 깊이에 따른 포장온도분포를 계산하기 위하여 열전도 이론을 이용한다.

일정한 온도의 반무한체에 대하여 그 표면에서 일정하게 가열된 경우에 열의 이동으로 온도는 상

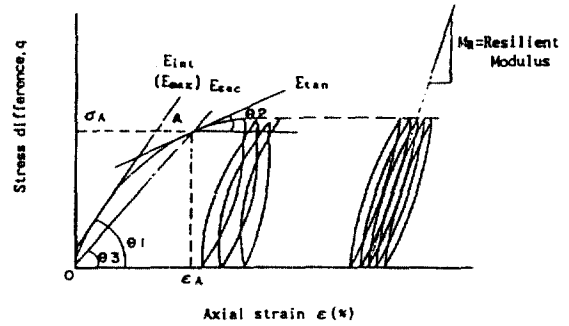


Fig. 2-2. The Relationship of Stress and Strain

승한다. 이와 같은 온도의 시간적 변화($d\theta/dt$)는 다음의 비정상 열전도 방정식으로 표현된다.^(10,22)

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{K} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2-6)$$

여기에서, θ : 온도($^{\circ}C$)

x : 표면으로부터의 거리(m)

t : 시간(sec)

k : 열전도율($Wm/^{\circ}K$)

ρ : 재료의 밀도(kg/m^3)

H : 재료의 비열($W \cdot sec/kg \cdot ^{\circ}K$)

K : 열확산율(m^2/sec) = $\frac{k}{\rho \cdot H}$

2.3 정적탄성계수의 일반적 정의

응력과 변형율의 함수로서 탄성계수는 포장재료의 역학적인 특성치를 결정하기 위한 중요한 물성치로 사용되며, 시험방법에 따라 정적인 하중을 가하여 이에 따른 변형의 함수로서 표현되는 정적탄성계수와 반복진동하중을 가하여 변형율의 연속적인 변화 특성을 고려하는 동적시험에 의한 동적탄성계수로 구분된다.

정적탄성계수는 Fig. 2-2와 같이 초기접선탄성계수(Initial Tangent Modulus of Elasticity), 접선탄성계수(Tangent Elastic Modulus), 할선탄성계수(Secant Modulus of Elasticity, 세컨트 계수) 등 세가지로 정의되고 식으로 나타내면, 다음과 같다.

$$E_{int} = \left[\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right]_{\varepsilon=0} = \tan \theta_1 \quad (2-7)$$

Table 3-1. The Location of the Measurement Station

지역 구분	매설위치	도로명	이정	상하행 선구분	계측방법
서울	기흥 휴게소	경부선	35 Km	하행	수동식 및 자동기록계
대관령	평창군 진부면도로공사 영동지사 대관령지부 부근	영동선	159.3 Km	하행	자동기록계
대구	경산 Bus Stop 도로공사 경북지사 대구지부 부근	경부선	317.1 Km	하행	수동식
마산	진영 휴게소	호남, 남해선	396 Km	하행	수동식
전주	정읍 휴게소	호남선	116 Km	상행	수동식

$$E_{\tan} = \left[\frac{d\sigma}{dE} \right]_{E=E_A} = \tan\theta_2 \quad (2-8)$$

$$E_{\sec} = \frac{\sigma_A}{E_A} = \tan\theta_3 \quad (2-9)$$

2.4 상대강도계수

아스팔트포장의 설계를 위하여 실질적인 포장층의 두께를 포장두께지수(SN, Structural Number)로 전환해야 한다. 이를 위하여는 포장 각층의 재료특성을 나타내는 탄성계수(E_{AC}), 노상도지력비(CBR), 지역계수(R) 등으로부터 관계도표를 이용하여 상대강도계수(Layer Coefficient : a_i)를 산정하여야 한다.

이 상대강도계수는 SN치와 두께사이의 실험적관계를 나타내며, 포장을 구성하는 구조로서 포장두께지수에 대한 일반식은 상대강도계수(a_i)와 두께(D_i)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (2-10)$$

여기서,

- a₁, a₂, a₃ : 표층, 기층, 보조기층의 상대강도계수
- D₁, D₂, D₃ : 표층, 기층, 보조기층의 설계두께
- m₁, m₂ : 기층, 보조기층의 배수계수

3. 계 측

3.1 계속지역선정 및 계측방법

최근 10년간의 기상자료를 바탕으로 지역적 동질성을 대표할 수 있는 지점을 검토하여 5개 지역을 선정하였다. 그 선정된 지역은 Table 3-1과 같고,

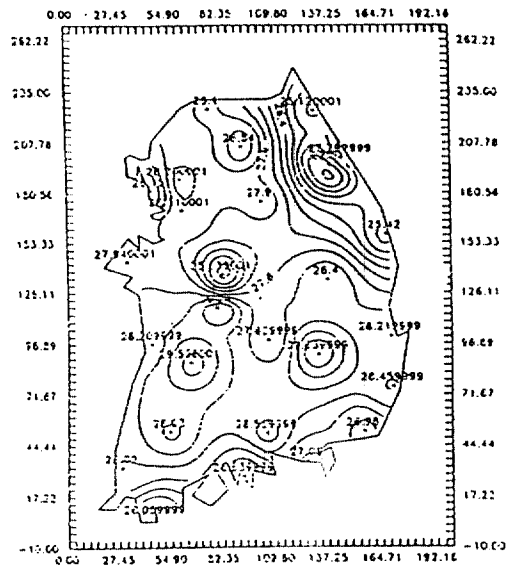


Fig. 3-1. Monthly Mean Maximum Air Temperature (MMAT, July) in Korea during 1979-1989

Fig. 3-1과 같이 제시된 전국의 최근 10년간 월평균 최고온도(Monthly Mean Maximum Air Temperature, MMAT)의 분포자료⁽³⁾를 근거로 하여 현장답사를 실시한 후 결정하였다.

포장내부의 온도계측은 일일 기준 매시간 실시하는 것으로 하고, 단 맑은날 일사량이 가장 높은 낮 시간에는 30분 간격으로 측정하였다. 또, 백엽상 기준으로 그늘에서의 대기온도와 일조를 받는 외기온도로 나누어 계측하고, 포장내부의 온도분포를 분석하기 위해 기준이 되는 포장표면에서의 온도를 얻기 위해 Fig. 3-2에 나타난 바와 같은 3가지 조사

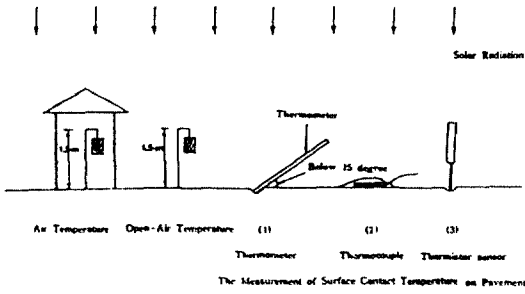


Fig. 3-2. Diagram for the Measurement of Air Temperature and Surface Contact Temperature

방법을 이용하여 온도센서를 매설하지 못하였을 때의 알맞은 표면온도측정방법을 발견하고자 하였다.

포장내 Thermocouple 매설시에는 기존 아스팔트 포장에서 Core를 채취하여 내측의 단면부에 Thermocouple 을 상부에서부터 깊이 1, 5, 8.5, 15, 20 cm와 아스팔트층과 노상토의 경계층 깊이 등 총 6 점의 위치에 매설하였다.

포장의 표면온도의 기준은 여러가지가 될 수가 있으나, 본 연구에서는 깊이 1cm에서의 온도를 포장의 표면온도로 간주하여 측정하여 표면접촉온도와 비교하였다. 각 매설위치별 경계층 깊이 즉, 아스팔트 포장의 전 두께는 기흥 26 cm, 경산 26.5 cm, 진영 28.5 cm, 정읍 33 cm, 대관령 20 cm으로 측정되었다.

3.2 계측결과

3.2.1 포장내부온도

경산, 정읍, 진영지역의 아스팔트 포장 내부온도를 계측한 결과 기상상태가 계측기간 중 비교적 양호했던 8월14일을 중심으로 일일의 포장내부 온도분포를 나타내면 Fig. 3-3~3-5와 같다.

각 지역의 계측결과에서 공통적으로 포장내부온도는 표면에 가까울수록 내부온도의 변화폭이 크고, 깊이가 깊어질수록 작아지며, 야간보다는 주간 변화폭이 크다. 또, 외부온도에 대한 포장체의 온도 변화는 재료자체의 열이 전도되는 시간만큼 그 변화양상이 표면에 가까운 쪽에서 먼저 일어나고 심도가 깊어질수록 어느 정도의 시간지연이 있음을 보여준다. 경산, 정읍, 진영 지역의 포장내부 최고온도와 그 시점의 대기온도 및 시간은 Table 3-2와 같다.

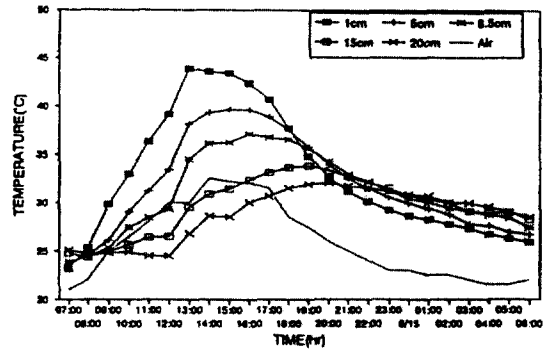


Fig. 3-3. The Temperature Gradients in Pavement (Kyoung San).

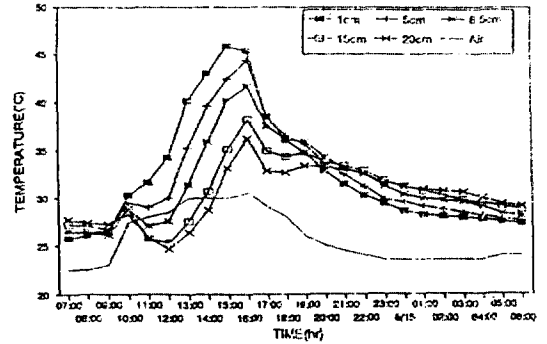


Fig. 3-4. The Temperature Gradients (Jin Young)

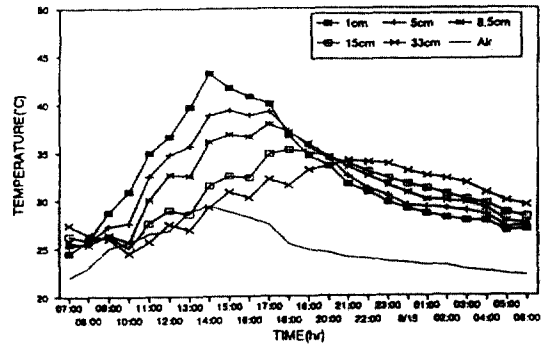


Fig. 3-5. The Temperature Gradients (Jung Eup)

Table 3-2. The Maximum Pavement Temperature and Air Temperature

지역구분	포장내부 최고온도	대기온도	시 간
경 산	43.9°C	30°C	13 : 00
정 읍	43.2°C	29.4°C	14 : 00
진 영	45.9°C	30°C	15 : 00

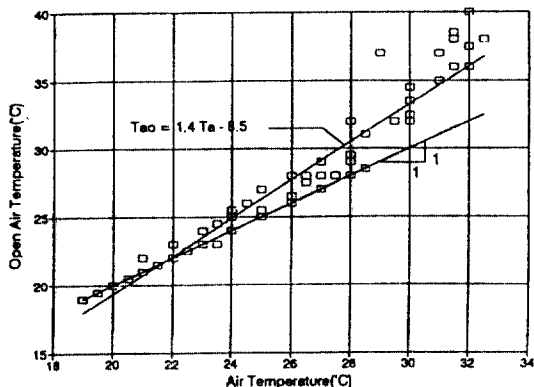


Fig. 3-6. The Comparison of Air Temperature and open Air Temperature

3.2.2 대기온도와 외기온도

대기온도와 외기온도를 비교하면 대체적으로 주간 외기온도는 대기온도보다 상당히 높게 나타났으며, 대기온도와 외기온도는 각각 백엽상안과 바깥의 온도 즉, 일조의 유무로 구분되기 때문에 야간에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 경산지역의 경우 대기온도와 외기온도의 관계는 Fig. 3-6과 같고, 이를 단순회기분석한 결과 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$T_{ao} = 1.4T_a - 8.5 \quad (3-1)$$

여기서, T_a : 대기온도

T_{ao} : 외기온도

3.2.3 표면접촉온도

측정시 표면에서의 온도가 구름이나 바람 등의 영향으로 어떤 일정치를 보여주는 것이 아니라 연속적으로 변화하는 관계로 계속시 어느 일정한 시간내(약 0.5~1분) 가장 지배적인 온도를 측정온도로 하였다. 경산지역의 표면접촉온도의 대기온도와 관계를 나타내면 Fig. 3-7과 같다. 대체적으로 Thermocouple을 사용하여 측정한 표면온도가 온도계로 측정된 값보다 크게 나타났으나 상당히 일조의 영향에 민감하였다. 온도계에 의한 계측은 바람 등의 외부조건에 노출되어 있으므로 표면접촉온도의 측정은 Thermocouple에 의해야 할 것으로 판단된다. 대기온도와 표면접촉온도의 관계식을 회기분석한 결과를 각 지역별로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{경산 } T_s = 1.85T_a - 15.2(\text{Thermocouple}) \quad (3-2)$$

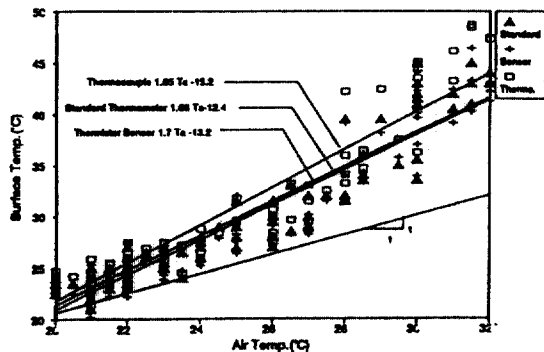


Fig. 3-7. The Relationship of Air Temperature and Surface Contact Temperature (Kyung San)

$$T_s = 1.69T_a - 12.4(\text{온도계})$$

$$T_s = 1.70T_a - 13.2(\text{봉센서})$$

$$\text{진영 } T_s = 1.88T_a - 17.0(\text{Thermocouple}) \quad (3-3)$$

$$T_s = 1.48T_a - 9.18(\text{온도계})$$

$$\text{정읍 } T_s = 2.46T_s - 28.5(\text{Thermocouple}) \quad (3-4)$$

$$T_s = 2.18T_s - 22.1(\text{온도계})$$

여기서, T_a : 대기온도

T_s : 표면접촉온도

4. 온도예측프로그램

4.1 포장체 표면의 온도산정

포장체 내부의 온도변화 예측을 위해서는 먼저 그 경계값으로 포장내에서 초기에 포장이 가지고 있는 기준 온도가 설정되어야 하므로 계산시점온도(CST, Calculation Starting Temperature), 즉포장체 내부의 온도변화의 차이가 거의 없는 시점에서의 온도를 결정해야 한다.

포장체 표면온도는 흡수열량과 방출열량의 차에 의해서 변화하므로 먼저 흡수열량과 방출열량을 Dickinson에 의한 방법⁽²⁰⁾을 인용 우리나라의 환경인자를 대입하여 흡수열을 구하였다.

$$I_T = \frac{2 \cdot S_u}{Z_{t1}} \sin^2 \frac{\pi \cdot t_1}{Z_{t1}} \quad (4-1)$$

여기에서, I_T : t시간에서의 흡수열

S_u : 하루의 총 입사열(Wh/m^2)

Z_{t1} : 시간(hr, 일출 1시간전부터 일몰 1시간후)

t_1 : 시간(hr, 해뜨기 1시간전인 $t_1=0$)

$$\rho C_v \frac{\partial T_p}{\partial t} - \nabla(k\nabla T_p) - S = 0 \quad (4-4)$$

또, 방출열량은

$$E_T = S_0 \left[A + \frac{B}{Z_{t_2}} \sin^2 \frac{\pi \cdot t_2}{Z_{t_2}} \right] \quad (4-2)$$

여기에서, E_T : t시간에서의 방출열

Z_{t_2} : 시간(24 hr)

A, B 계수

t_2 : 시간(hr, 해뜨기 1시간 전인 $t_2=0$)

으로 계산된다. 따라서, 포장체 표면의 온도변화는 I_T 와 E_T 의 차로써 구할 수 있다. 즉,

$$T_p = CST + \alpha(\gamma I_T - E_T) \quad (4-3)$$

여기에서, T_p : 포장체 표면의 온도변화

CST : 시점온도(°C)

I_T : 흡수열

E_T : 방출열

γ : 일사량에 대한 흡수계수, 0.85

α : 포장체 표면의 전도상수, 0.098

4.2 포장체 내부의 온도변화

앞에서 구한 표면온도변화에서 포장체 내부의 온도 변화를 예측하기 위해서 열전도 편미분방정식을 유한차분으로 풀이한 기존의 열전도해석 프로그램인 Teach-C를 수정하여 이용하였다.⁽²⁴⁾

2차원의 대상 매질에 대하여 주어진 경계에서 온도가 변할 경우, 매질의 열전도계수, 비중, 밀도 등의 변수에 의해서 내부 온도변화를 예측하고자 하는 것으로, 본 프로그램에서 이용한 열전도 편미분방정식은 다음과 같다.

여기에서, ρ : 밀도

C_v : 비열

T_p : 온도

t : 시간

k : 열전도계수

S : 에너지 변화

이의 유한 차분법에 의한 해는 다음 식으로 전개된다.

$$D_p(T_p^{new} - T_p^{old}) + \sum_c A_c(T_p^{new} - T_c^{old}) - (B_p T_p^{new} + C_p^{old}) = 0 \quad (4-5)$$

여기서, T_p : 온도

D_p : 전열용량

A_c : 열컨덕턴스

B_p, C_p : 전열저항에 의한 재료상수

old, new : 시간 $t + \delta t$ 와 t 를 의미함.

4.3 표면온도 및 계수의 산정

방출열량의 계산에 사용되는 입력자료의 경산, 진영, 정읍 및 기흥지역에 대한 계산결과를 정리하면 Table 4-1과 같고, 계수 A와 B는 일사량 S의 함수이므로, A와 S의 회기분석결과는 오차에 대한 수정을 거쳐 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = 0.0139 + 3.85 \times 10^{-6} S \quad (4-6)$$

$$B = 1.333 - 1.55 \times 10^{-4} S \quad (4-7)$$

이들 계수 A, B값과 일사량(S)을 식 (2-4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

Table 4-1. Values of Parameters Calculated from the Measured Data

지역 및 날짜	\bar{X} (°C)	\bar{X}_n (°C)	\hat{X} (°C)	S (Wh/m ²)	z (h)	A	B	h (W/m ² ·K) (assuming r=0.85)
경산(8/12)	6.295	3.78	14.8	3064.1	14	0.0252	1.021	23.4
경산(8/14)	7.05	5.68	13.9	5167.1	14	0.03357	0.68	20.9
정읍(8/14)	7.69	6.05	13.8	4058.7	14	0.3028	0.588	11.4
건영(8/12)	4.695	3.24	10.0	2461.3	14	0.0287	0.84	24.0
기흥(8/12)	5.96	2.37	16.2	1411.2	14	0.0166	1.3536	20.4
기흥(8/14)	5.03	3.79	9.6	2964.1	14	0.0314	0.674	24.1

$$E(\tau) = \gamma S [0.0139 - 3.85 \times 10^{-6} S + (1.333 - 1.55 \times 10^{-4} S) \frac{1}{z} \sin^2 \frac{\pi \cdot z}{z}] \quad (4.8)$$

포장표면온도의 계산은 이 흡수열량과 방출열량의 차로 구하는 식 (4-3)을 이용하며, 이때 사용되는 CST, 즉, 계산시점온도는 경산, 정읍, 진영, 기흥지역에서 실측한 자료로부터 오전 7시의 온도로 일률적으로 정하여 대기온도와 비교한 결과 다음과 같은 관계를 가지는 것으로 나타났다.

$$\log CST = 0.086T_{air} + 1.2 \quad (4-9)$$

여기서, T_{air} : 평균대기온도

5. 실험

5.1 재료의 선정 및 시료준비

본 실험에서는 국내에서 현재 생산 중인 포장용 아스팔트를 아스팔트 침입도별 분류에 따른 4개사의 AP-3와 1개사의 AP-5를 선정하여 실험에 사용하였다. 각 제조회사별 호칭은 각각 A, B, C, D 그리고 AP-5로 부르기로 한다.

이들 각 아스팔트의 품질기준치와 물성시험결과는 Table 5-1 그리고 마샬시험 시행결과는 Table 5-2에 나타내었다.

5.2 Ascon 변형계수시험

5.2.1 일축압축시험

정적탄성계수를 측정하기 위해 시험은 일축식 압축시험기를 사용하여 압축하중을 Ascon 공시체의 원형단면에 가해지도록 시료를 거치시킨 후 1mm

/min의 속도로 일정변형율을 가하는 변형을 제어 방식으로 실시하였다. 본 시험에서의 시험조건은 각 제조회사별 AP-3와 AP-5 아스팔트의 시험온도를 5, 15, 45, 65°C로 증가시킨 상태에서 시험을 실시하였다.

5.3.2 간접인장시험

간접인장시험의 시험조건은 일축압축시험과 동일하며, 공시체에 온도변화를 주어 시험온도가 된 후 공시체의 원주면 상 하면에 직경방향으로 1mm/min의 재하속도로 변형율이 일정하도록 띠하중을 가하여 수평방향으로 늘어나면서 시료의 파괴가 일어나도록 간접인장시켰다.

6. 분석 및 고찰

6.1 포장내부온도의 변화

Fig. 6-1은 8월의 계측자료로 부터 경산, 정읍, 진영지역의 최고포장내부온도와 최고대기온도의 관계

Table 5-1. The Result of Asphalt Property Test

구분	침입도 25°C (mm)	신도 25°C (cm)	연화점 (°C)	비중	
AP-3	기준	85~100	100 이상	-	-
	A	88	150 이상	50	1.0362
	B	85	150 이상	49	1.0308
	C	95	150 이상	46	1.0381
AP-5	D	98	150 이상	49	1.0391
	기준	60~70	100 이상	-	-
	AP-5	61	150 이상	52	1.0471

Table 5-2. The Result of Marshall Test and O.A.C

AP종류	구분	밀도 (g/cm ³)	공극률 (%)	포화도 (%)	안정도 (kg)	Flow값 (1/100 cm)	O.A.C
AP-3	A	2.355	3.6	79	840	36	5.7
	B	2.348	3.6	80	995	29	5.9
	C	2.359	3.5	79	898	27	5.6
	D	2.56	3.4	79	942	37	5.7
AP-5		2.372	3.6	78	1040	26	5.8

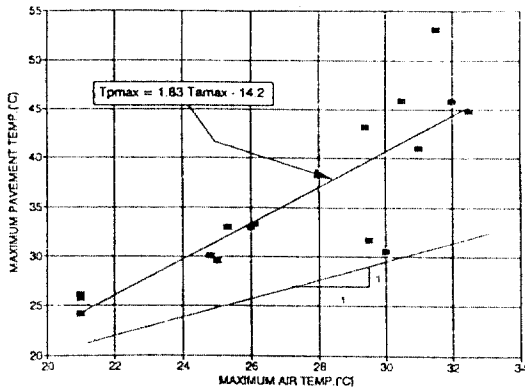


Fig. 6-1. The Relationship between The Maximum Air Temperature and The Maximum Pavement Temperature

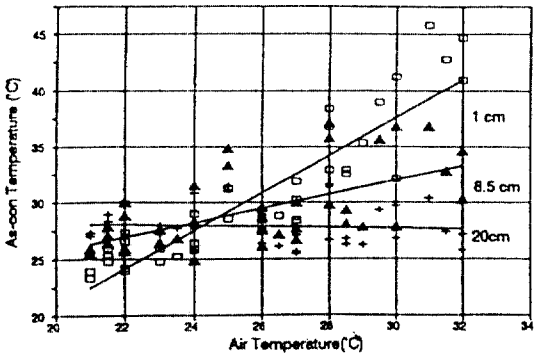


Fig. 6-2. The Relationship between The Pavement Temperature and The Air Temperature

를 나타낸 것으로 포장온도는 대기온도와 비교하여 항상 높게 나타나며, Fig. 6-2는 경산지역 포장내부 온도와 대기온도의 관계를 나타낸 것이다. 이로부터 포장내부온도는 깊이가 깊어질수록 그 변화폭이 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 6-3은 온도와 깊이와의 관계를 시간적변화로 나타낸 것으로 06시를 경계로 표면의 온도와 저면의 온도차이가 큰 오른쪽으로 꺾여진 포물선의 형태를 보여주며 다시 15시를 경계로 하여 표면부근의 온도가 먼저 하강하기 때문에 왼쪽으로 꺾여진 포물선 형태를 보여준다.

계측기간 중 경산, 진영, 정읍 지역의 표면온도가 가장 최대치를 보이는 시점의 포장내부온도의 변화는 Fig. 6-4와 같으며 다음과 같은 포물선식으로 나타낼 수 있다.

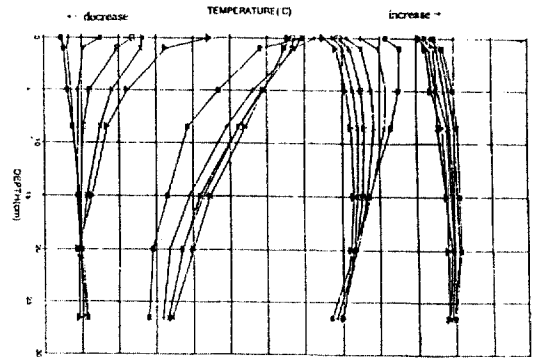


Fig. 6-3. The Variation of Temperature by Depth According to Time

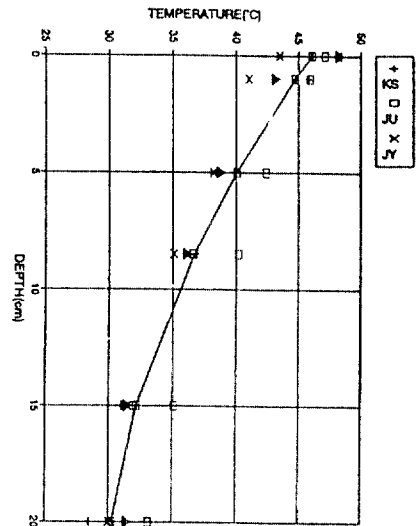


Fig. 6-4. The Result of Temperature Variation in Pavement by Regression Analysis

$$T_{asp} = 46.1 - 1.35 \times d + 0.028d^2 \quad (6-1)$$

여기서, T_{asp} : 포장내부온도

d : 심도(cm)

6.2 실측치와 예측치의 비교

4장에서 고려하였던 계측자료에서 구한 계수와 계산시점온도의 대기온도와의 관계식을 이용하여 프로그램을 실행시켜 얻은 예측치와 실측치를 비교하면 Fig. 6-5와 같고, 계측자료로부터 계산시점온도를 계산하고 흡수열량과 방출열량에 사용되는 계수를 구하였던 바 온도상승시와 포장최고온도의 예측은 상관도가 높은 비교적 잘 맞는 경향이 있으나,

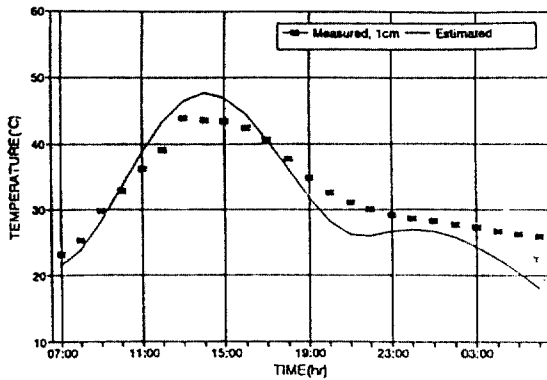


Fig. 6-5. The Comparison of Measured Value with Estimated Temperature (August, Kyung San)

온도하강시의 포장온도는 예측치가 실측치보다 낮은 것으로 나타나고 있다.

이는 포장자체가 갖는 구조적인 요인 즉, 포장의 재료적인 성질이 일정하다고 가정한 것이 그 원인이 될 수 있고, 온도변화를 Sine 함수적으로 해석한 이론적인 배경에 따른 것으로 판단된다. 즉, 실제 포장에서의 열수지는 열량을 흡수하고 열량을 방출하는 과정에서 열량을 흡수하는 시간이 짧고, 포장 내부에 흡수된 열량을 보유하는 시간이 지연됨에 따라 방출시간이 길어지는 것으로 생각할 수가 있다.

6.3 실내시험결과 및 분석

6.3.1 일축압축시험

일정한 변형율을 가한 상태에서 Ascon의 압축강도를 구한 후 공시체의 하중이 작용하는 면의 면적을 고려하여 압축응력을 계산하여 각 제조회사별 Ascon의 응력-변형율도를 온도에 따라 나타내면 Fig. 6-6, Fig. 6-7과 같다.

대체적으로 1.5~2%의 변형이 일어나면 시료는 최대압축응력을 보이고, 파괴되는 것으로 나타나며, 온도별 변화특성은 저온일수록 압축응력이 크고, 파괴시점에 도달하기까지의 응력-변형율 관계가 상당히 선형에 가까운 탄성적거동을 가짐을 알 수 있다. 그러나, 고온으로 갈수록 압축응력은 현저하게 감소하고, 어느 정도의 온도를 넘어서면 온도별 응력차이가 좁혀지면서 그 변형거동도 비선형화되는 경향을 보인다. 이는 온도가 높아지면 골재사이의 결합역할을 하는 아스팔트의 점성류동이 활발해지

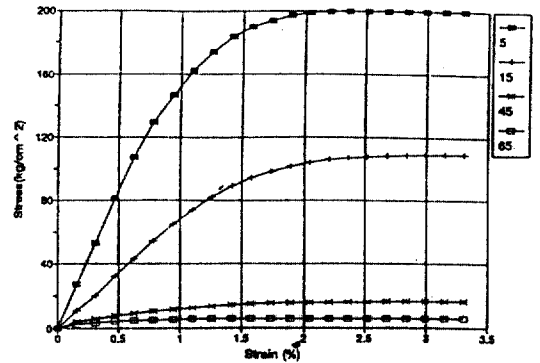


Fig. 6-6. The Relations of Stress and Strain at different Test Temperature (B)

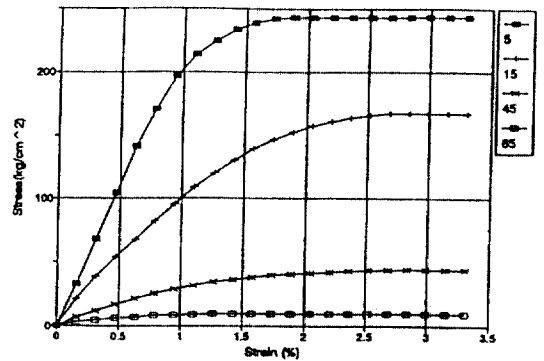


Fig. 6-7. The Relations of Stress and Strain at different Test Temperature (AP-5)

고, 이에 따라 결합력이 급격히 감소하기 때문으로 사료된다. 또, 재료적인 면에서 볼 때, 침입도가 60~70인 AP-5의 압축응력이 AP-3 보다 크게 나타난다.

6.3.2 간접인장시험

제조회사가 다른 2개의 AP-3와 1개의 AP-5에 대하여 시행한 간접인장시험의 결과 각 종류별 응력-변형율 곡선을 온도에 따라 나타내면 Fig. 6-8, Fig. 6-9와 같다.

간접인장시험의 변형거동은 압축시험과 마찬가지로 온도가 상승할수록 최대인장강도는 감소하고 하강할수록 커지는 것을 알 수 있고 높은 온도에서는 그 차이가 상당히 작아짐을 알 수 있다. 최대인장응력은 5°C 에는 약 3% 정도에서 발생하고, 15°C 에서는 3.5% 정도로 증가하다가 다시 45°C 에서는 2.5~2.7%, 65°C 에서는 1.5~2% 정도로 감소하는 경향을 보여준다.

6.3.3 탄성계수의 비교 및 분석

일축압축시험과 간접인장시험의 결과로 탄성계수

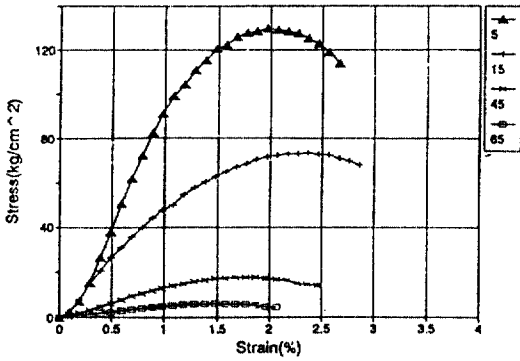


Fig. 6-8. The Relations of Stress and Strain at different Test Temperature (B)

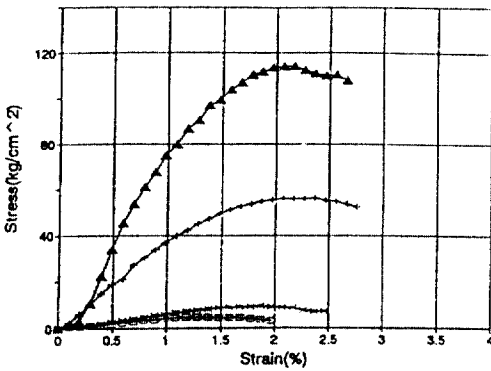


Fig. 6-9. The Relations of Stress and Strain at different Test Temperature (AP-5)

를 정리하면 Table 6-1과 같다.

일축압축시험의 탄성계수가 다소 간접인장시험의 탄성계수보다 대체적으로 크게 나타나고 있고 이는 변형속도가 1 mm/min의 같은 조건으로 시행되었기 때문에 공시체에 대한 재하 특성상 압축강도가 크게 나타났을 것으로 사료된다.

압축강도와 인장강도에 의한 탄성계수와 시험온도와의 관계는 반대수지상(Semi-log)에 나타난 경우

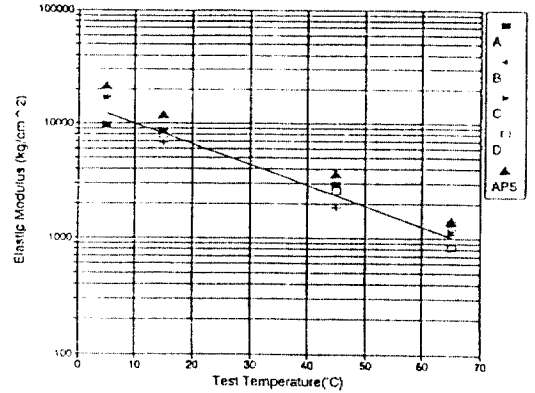


Fig. 6-10. The Relationship between Test Temperature and Elastic Modulus (Uniaxial Compression Test)

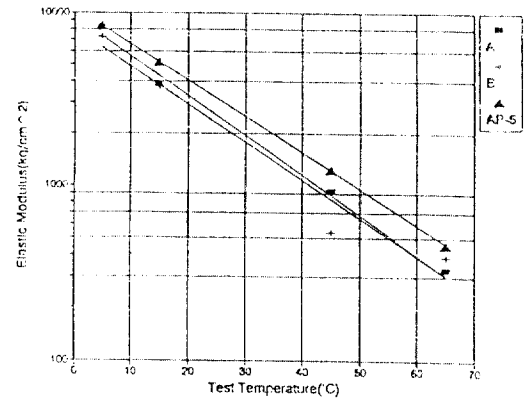


Fig. 6-11. The Relationship between Test Temperature and Elastic Modulus (Indirect Tensile Test)

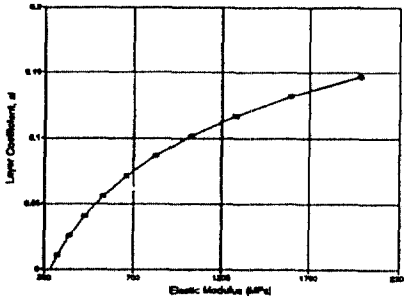
Fig. 6-10과 Fig. 6-11같이 직선화 되는 경향이 있어, 이를 관계식으로 유도한 결과 다음과 같다.

압축강도에 의한 탄성계수

Table 6-1. The Result of the Test

시험온도	일축압축시험(kg/cm ²)					간접인장시험(kg/cm ²)		
	A	B	C	D	AP-5	A	B	AP-5
5°C	17050	9869	16861	9630	21694	8234.2	7244.2	8412.2
15°C	6778	7936	8833	8403	11918	3886.9	3738.2	5145.3
45°C	1848	2591	2900	2954	3642	930.5	538.6	1225.4
65°C	1080	833	1153	1352	1423	328.9	391.4	457.6

(a) AP-3



(b) AP-5

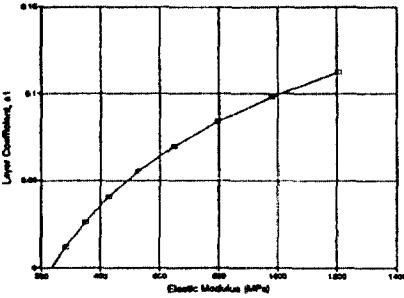


Fig. 6-12. The Relationship between Elastic Modulus and Layer Coefficient

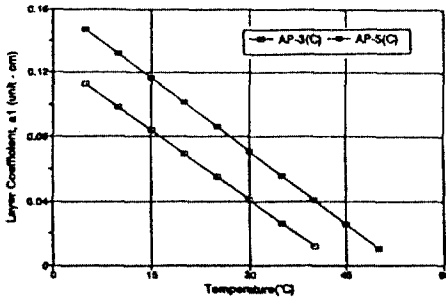


Fig. 6-13. The Relationship between Test Temperature and Layer Coefficient

$$\text{AP-3 : } A - E_{ac} = 10^{0.015(273 - T)} \quad (6-2)$$

$$B - E_{ac} = 10^{0.019(222 - T)}$$

$$C - E_{ac} = 10^{0.019(225 - T)}$$

$$D - E_{ac} = 10^{0.018(230 - T)}$$

$$\text{AP-5 : } E_{ac} = 10^{0.019(232 - T)} \quad (6-3)$$

인장강도에 의한 탄성계수

$$\text{AP-3 : } A - E_{aT} = 10^{0.022(178 - T)} \quad (6-4)$$

$$B - E_{aT} = 10^{0.023(173 - T)}$$

$$\text{AP-5 : } E_{aT} = 10^{0.021(192 - T)} \quad (6-5)$$

이로부터 침입도가 작은 즉, 점도가 큰 아스팔트가 온도에 대한 영향을 작게 받는다는 것을 알 수 있다.

Rutting은 차량의 반복하중에 의해 각 포장층의 영구변형이 계속 축적되어 노면에 처짐이 발생하는 현상으로 이는 포장층에 탄성한계를 넘어선 과도한 하중이 반복작용했을 경우 소성변형(Plastic Deformation)이 일어나고 동시에 아스팔트포장에서는 차량의 바퀴가 접촉하는 곳에서 압축응력에 의한 Ascon의 횡방향 점성류동이 발생하는 것으로 판단된다. (26.32,37)

이러한 과도한 축하중의 작용에 대한 소성변형을 억제하기 위하여는 Ascon의 강도향상이 고려되어야 하며, 혼합물에 사용하는 아스팔트의 점성을 개선할 필요가 있다. 즉, 실험에서도 밝혀진 바와 같이 온도특성이 현저한 지역에 대하여는 가능한 한 점도가 큰, 즉, 침입도가 낮은 아스팔트를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 또, 추가적으로 온도에 대하여 덜 민감한 아스팔트 재료의 개발이 필요하다고 사료된다.

본 연구에서 구한 압축시험의 탄성계수와 Per Ullidtz⁽³⁴⁾ 등이 제안한 아스팔트포장의 층구분에 따른 표층의 상대강도계수를 다음 식 (6-6)에 따라 구하여 비교하면 Fig. 6-12와 같고,

$$a_1 = 0.40 \times \log\left(\frac{E}{3000} \text{ MPa}\right) + 0.44 \quad (6-6)$$

여기서, a_1 : 상대강도계수

상대강도계수와 온도와의 관계로 나타낸 경우는 Fig. 6-13에서 나타낸 바와 같으며, 이때의 관계식은 다음과 같다(T : 온도).

$$a_1 = 0.13 - 0.003T \quad (6-7)$$

상대강도계수는 온도의 증가와 함께 현저하게 감소하여 45~50°C 이상에서는 음의 값을 보여주어 고온에서 포장의 지지능력은 상당히 불안정하게 되는 것으로 판단할 수 있다. 아스팔트종류에 따라서는 탄성계수와 마찬가지로 AP-5의 상대강도계수가 AP-3보다 높게 나타나고 있다.

따라서, 적절한 상대강도계수를 설계에 반영하기 위해서는 신설 및 기존포장의 공용성을 면밀히 평가하고, 특히, 탄성계수가 현저히 감소하는 온도가 높은 여름철의 포장온도를 고려하여 기준치를 산정하여야 하며, 경험식에 의하지 않는 상대강도계수의

기준치 결정을 위한 적절한 강도시험법이 정립되어야 할 것으로 사료된다.

7. 결 론

이상 아스팔트 포장의 온도에 따른 영향 및 반응을 이론적, 역학적으로 분석한 결과 아스팔트포장은 온도의 변화에 상당히 민감하여 온도에 따른 압축 및 인장강도와 탄성계수의 저하 등을 고려해볼때, 특히 고온에 대한 변형이 상대적으로 크게 일어나는 것으로 나타났다. 이는 적절한 물성치를 갖는 아스팔트의 개선 및 개발을 통하여 적절한 수준의 아스팔트를 사용하는 것이 필요하고, 실제 설계시 적용되는 상대강도계수의 온도변화에 적합한 범위와 기준을 설정하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 분석시 필요한 계측자료의 부족과 실험 전반에 관한 시험조건 한계성이 문제가 될 수 있다. 따라서, 좀 더 정확한 아스팔트 포장의 온도에 따른 특성을 파악하려면 체계적이고 통일된 방법으로 1년 이상의 장기적인 계측이 요구되며, 변형계수 시험시 시험조건을 시험방법, 변형율, 밀도 및 공극률 등의 물성치 변화, 세분화된 온도변화 등 여러가지 조건하에 시험을 다양한 방법으로 실시하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구를 위해 연구비를 지원해 준 한국도로공사와 한국도로공사 도로연구소 아스팔트 포장연구실 연구원들의 전적인 도움에 감사드리며, 실내시험의 일부를 도와 준 토지개발공사 경기지사 시험소 직원들에게도 고마움을 전한다.

참고문헌

1. 강영수, 김수삼, "기상변화에 따른 아스팔트 포장 내부 온도변화 예측모델에 관한 연구", **대한토목학회지**, 제 40권 제 5호, 1992. 10.
2. 김수삼, "대기온도와 동결심도를 고려한 도로포장 설계 요소에 관한 연구", **중앙대논문집** 제 29집, 1985.
3. 기상청, "기상월보", 1980-1989.
4. 심재만, "온도변화에 따른 아스콘 포장의 변형특

- 성에 관한 연구", **중앙대 건설대학원 석사논문**, 1992. 12.
5. 한국건설기술연구원, "가요성 포장설계를 위한 상대강도계수의 정량적 산정에 관한 연구", **건기연 90-HE-112 연구보고서**, 1990. 12.
6. 한국도로공사, "아스팔트 포장 구조해석 연구(1)", **도로연 91-2 연구보고서**, 1991. 12.
7. 이현중, "가요성포장의 바퀴자국 패임에 대한 연구", **한국도로공사, 기술논문집**, 제 11집, 1989.
8. 達下文一等, "アスファルトコンクリート層の變形係數に溫度の影響について", **道路建設**, 昭和 56年 1月, 1981.
9. 峰岸順一 外 3人, "アスファルト混合物の一軸壓縮試驗による彈性定數の測定", **月刊鋪裝**, 28-6, 1993.
10. 村井貞規, 福田正, "鋪裝の熱的性質についての2,3の檢討", **建設圖書**, Vol. 14, No. 6, 1979.
11. Takashi Watanabe et al., "アスファルト混合物の力學特性と構成材料の關係", **土木學會論文報告書**, 第 239號, pp. 107-114, 1975.
12. 森吉昭博, 水澤隆, "アスファルト混合物の熱應力試驗に關する基礎的研究", **土木學會 論文集** 第 384號, V-7, 1987.
13. Basma, A.A. and Al-Suleiman, T.I., "Climatic Considerations in AASHTO Flexible Pavement Design", **Journal of Transportation Engineering**, Vol. 117, No. 2, 1991.
14. Masayuki, A., "Investigations of Temperature in Bituminous pavement", **日本土木學會論文報告集** 246號, 1976. 2.
15. American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures 1986", **American Association of State Highway and Transportation Officials**, 1986.
16. Barber, E.S., "Calculation of maximum pavement temperatures from Weather Reports", **Highway Research Board Bull No. 168**, 1957.
17. Basma, A.A. and George, K.P., "Environmental Factors in Flexible pavement design", **Transportation Research Record #954**, TRB., 1984.
18. Marshall, B.P. and Kennedy, T.W., "Tensile and Elastic Characteristics of Pavement Materials", **Research Report 183-1**. The Texas Highway Department, 1974.
19. Ruth, B.E. and Potts, C.F., "Changes in Asphalt Concrete Mixture Properties as Affected by Absorption, Hardening, and Temperature", **TRR** 515, 1974.
20. Dickinson, E.J., "A Method for Calculating the

- Temperature Gradients in Asphaltic Concrete Pavement Structures Based on Climatic Data”, Australian Road Research, Vol. 8, No. 4, DEC, 1978.
21. Dormon, G.M. and Metcalf, L.T., “Design Curves for Flexible Pavement Based on Layered System Theory”, *Highw. Res. Record*. 1971, 1975.
 22. Gebhart, B., *Heat Transfer*, 2nd Edition, McGraw Hill: New York, 1971.
 23. Gloyne, R.W., “The Diurnal Variation of Global Radiation on a Horizontal Surface with Special Reference to Aberdeen”, *Meteorol. Mag.* 101, 1972.
 24. Goman, A.D. et al., *Computer-Aided Engineer, Heat Transfer and Fluid Flow*, John Wiley & Sons, 1985.
 25. Highway Reserch Board, “Structural Design of Asphalt Concrete Pavement to Prevent Fatigue Cracking”, Proceedings of the Annual Meeting of the Highway Reserch Board, Special Report 140, 1973.
 26. Kinder, D.F., “A Study of both the Viscoelstic and Permmnt Deformation Properties of A.N.S. W. Asphalt”, 13th ARRB-5th REAAA Combined Conference, Material, Vol. 13, pp. 1-11, 1986. 5.
 27. Yoshihiro, K., “Miura Yuji(1976) Study on the Prediction of Temperature in Pavement Structures”, 日本土木學會論文報告集 250號, 1976.
 28. Schmidt, R.J., “Effect of Temperature, Freeze-Thaw, and Various Moisture Conditions on the Resilient Modulus of Asphalt-Treated Mixes”.
 29. SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM Com-pany Limited London, “Shell Pavement Design Manual”, 1978.
 30. Stock, A.F., Brown, S.F. and Brunton, J.M., “Traffic and Temperature Considerations for Structural Computations on Asphalt Pavements”, *Proceedings 14th ARRB Conference* Part 8, 1988.
 31. Straub, A.L., Schenck, J.R.H.N. and Przybycien, F.E., “Bituminous Pavement Temperature Related to Climate”, *Highway Research. Rec.* 256, 1968.
 32. Kennedy, T.W., “Tensile Characterization of Highway Pavement Materials”, *Research Report 183-15F*, Texas State Department of Highways and Public Transportation, 1983.
 33. Uzan, J. and Livneh, M., “Thickness design of flexible pavements with differential layer structures”, *Australian Road Research*, Vol. 10, No. 1, 1980.
 34. Ullidtz, P., *Pavement Analysis*, Elsevier, 1987.
 35. Puzinauskas, V.P., “Properties of Asphalt Cements”, *Research Report No. 80-2*, The Asphalt Institute, 1980.
 36. Witczak, M.W., “Computer program DAMA users manual.university of maryland”, Sept. 1978.
 37. Dass, W.C. and Murfee, J.G., “Load and Temperature Measurements for a Study of Rutting Under High-Pressure Tires”, *Transportaton Research Record* 515, TRB, pp. 196-212, 1991.
 38. Yoder, E.J. and Witczak, M.W., *Principles of Pavements Design*, 2nd Edition”, John Wiley & Sons Inc., New York, NY., 1975.

(接受：1994. 5. 26)