[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 20, No. 5 (2000. 10)

초음파 측정법에 의한 아스팔트 세멘트의 점탄성 특성 평가

Viscoelastic Property Evaluation of Asphalt Cement by Ultrasonic Measurement

이재학*
Jai-Hak Lee*

초 록 이 연구에서는 점탄성 재료중의 하나인 아스팔트 세멘트의 점탄성 특성을 초음파를 이용하여 측정하는 방법에 대하여 고찰하였다. 2.25MHz의 주파수에서 -20℃부터 60℃까지의 온도변화에 따른 파속도와 감쇠를 측정한 후, 선형 점탄성 이론에 근거하여 저장 및 손실 종탄성율, 손실 탄젠트, 저장 및 손실 종컴플라이언스와 같은 물성변화를 구하였다. Maxwell과 Voigt-Kelvin 점탄성 모델을 이용하여 응력완화 및 크리프 거동과 점도의 변화도 예측하였다. 또한 중첩원리와 이동인자의 타당성을 문헌에 보고된 결과와 비교함으로써 입증할 수 있었다.

주요용어: 아스팔트, 점탄성, 초음파, 파속도, 감쇠

Abstract This study investigates the method to measure the viscoelastic properties of asphalt cement, one of the viscoelastic materials, using the ultrasound. The wave speed and attenuation were measured from -20℃ to 60℃ at the frequency of 2.25MHz. Then, the storage and loss longitudinal moduli, loss tangent, storage and loss longitudinal compliances were found depending on the temperatures based on the linear viscoelastic theory. Stress relaxation, creep, and viscosity were predicted using Maxwell and Voigt-Kelvin viscoelastic models. The validity of superposition principle and shift factor were verified by comparing the present results to the data reported in the literatures.

Keywords: asphalt, viscoelasticity, ultrasound, wave speed, attenuation

1. 서 론

점탄성 재료는 온도와 하중시간 (혹은 주파수)에 따라서 기계적 성질이 크게 변화한다. 저온에서는 탄성체와 같은 물성을 보유하지만 고온에서는 점성 유체와 비슷한 물성으로 변화한다. 다시 말하면 유리전이온도보다 낮은 온도에서는 탄성 고체처럼 거동하나 유리전이온도 근처에서는 뚜렷한 점탄성 거동을 나타낸다. 점탄성 재료의 물성이 복잡하고 흥미로운 이유가 바로 여기에 있다. 아스팔트 세멘트는 점탄성 재료중의 하나로 온도와 하중을 받는 시간에 민감하다. 저온에서는 탄성체, 고온에서는 유체와 같은 물성을 갖는다. 고속으로 주행하는 차량은 짧은 시간에 하중을 아스팔트에 전달하고, 저속으로 주행하는 차량은 하중전달 시간이 길다. 아스팔트의 물성이 온도 및 하중시간 변화에 따라서 어떻게 변하는가를 알아보는 것은 흥미로운 일일 것이다.

아스팔트의 경우 50년대 초반의 Van Der Poel[1]으로부터 시작하여 수많은 연구자들이 아스팔트의 점탄성이 온도 및 주파수에 따라서 어떻게 변하는가를 측정해왔다. Poel[1]은 온도, 주파수, 아스팔트 경도와 종류에 따른 물성을 최초로 측정하였으나 이를 복소탄성율로서 분리하지는 못하였다. Brodnyan[2]은 25℃를 기준으로 아스팔트의 reduced curve를 Ferry[3]가 개발한 중첩법을 사용하여 구하였다. 또한 그들은 시간-온도 중첩원리

(접수: 2000. 8. 25) * 한국산업기술대학교 기계설계학과(Dept. of Mechanical Design Eng., Korea Polytechnic Univ., Shihung, 429-793)

(time-temperature superposition principle)의 타당성이 아스팔트에도 적용될 수 있다는 것을 입증하였는데, 아스팔트의 온도에 관한 특성은 일반 고분자 재료와 유사하게 WLF equation[4]을 따른다는 것을 보여주었다. Dobson[5]은 2-200Hz 의 주파수 영역에서 점탄성 재료의 동적-기계적 해석을 할 수 있는 장치를 만든 후 아스팔트를 대상으로 10-60℃ 온도범위에서 master curve, 손실 탄젠트(loss tangent), 이동 인자(shift factor)를 구하였다. Dobson[6]은 또한 아스팔트의 물성이 어떻게 master curve 로 변환되는지를 보여주었는데 하나는 복소횡탄성율이 주파수에 의존하는 것이고 다른 하나는 온도에 의존하는 것이었다. 이 외에도 아스팔트의 점탄성 특성에 관하여 많은 연구[7-17]가 진행되어 왔다.

점탄성 거동을 온도와 주파수의 함수로서 측정하기 위하여 일반적으로 동적-기계적 방법(dynamic mechanical analysis)과 유전방법(dielectric analysis)이 널리 이용되고 있다. 동적-기계적 방법은 사인형태의 변형에 대한 응력을, 유전방법은 두 전극 사이에 압착된 시료에 가해지는 진동전압에 대한 유전상수를 측정한다. 이 외에 초음파를 이용하는 방법이 있다. 점탄성 재료는 경화가 진행되는 동안에 그 물성도 변하게 되는데 이 물성은 파속도, 감쇠 등의 초음파 특성과 밀접한 관계가 있다. 초음파법은 각 온도에서 측정한 파속도와 감쇠로부터 선형 점탄성 이론에 근거하여 복소탄성율(complex modulus)을 구한다.

점탄성 재료 특히 에폭시가 경화하는 동안에 변화하는 물성을 초음파를 이용하여 측정하고자 하는 노력이 많이 있었다. Winfree[18]는 에폭시가 경화되는 동안에 파속도와 감쇠가 어떻게 변화하는 가를 보여주었다. 또한 Winfree와 Parker[19, 20]는 파속도를 이용하여 경화도(degree of cure)를 측정하는 방법을 제시하였다. 아스팔트의 경우 점탄성이 온도 및 주파수에 따라서 어떻게 변하는가를 측정해왔으나 주파수 영역이 20kHz 미만인 자유 진동 혹은 강제 진동법 등에 의한 동적-기계적 방법내지는 유전방법에 의존하였다. 이 연구에서는 온도변화에 따른 아스팔트의 저장 및 손실 종탄성율, 손실 탄젠트, 저장 및 손실 종컴플라이언스와 같은 물성변화를 초음파를 이용하여 구하는 방법을 제시하고자 한다. 또한 Maxwell과 Voigt-Kelvin 점탄성 모델을 이용하여 응력완화(stress relaxation) 및 크리프(creep) 거동과 점도의 변화도 예측한다.

2. 관계이론

완전 탄성고체의 경우 응력-변형의 관계는 후크의 법칙에 따라 동일상(in-phase)에 있으나, 완전 점성유체의 경우는 응력은 변형과 항상 90° 위상차를 보인다. 점탄성 재료는 이 위상차가 0° 와 90° 사이의 어떤 값을 가질 것이다. 이러한 위상차에 의한 복잡한 응력-변형 거동을 유효하게 해석하기 위하여 복소 응력(complex stress)과 복소 변형율(complex strain)을 도입한다. 복소 탄성율은 후크의 법칙에 따라 식 (1)과 같이 복소 응력과 복소 변형율의 비(ratio)로서 정의된다.

$$C^* = \sigma^*/\varepsilon^* = \sigma/\varepsilon \exp(i\delta) \quad (1)$$

여기서 C^* = 복소 탄성율
σ^* = 복소 응력
ε^* = 복소 변형율
σ = 응력
ε = 변형율
δ = 위상각 이다.

이 복소탄성율은 가해진 변형과 같은 위상에 있는 실수부, 즉 저장 종탄성율(storage longitudinal modulus)과 다른 위상(out of phase)에 있는 허수부, 즉 손실 종탄성율(loss longitudinal modulus)으로 식 (2)와 같이 표시된다.

$$C^* = C' + iC'' \quad (2)$$

여기서 C' = 저장 종탄성율
C'' = 손실 종탄성율이다.

점탄성 재료에 관한 파의 운동방정식[18]은 아래 식(3)과 같다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (C' + iC'') \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

여기서 ρ = 밀도
u = 변위
t = 시간이다.

편미분 방정식 (3)의 해로서 u(x, t)를 식 (4)와 같이 시도한다.

$$u(x,t) = u_0 \exp\left\{ iwt - \left(\alpha + \frac{iw}{c}\right)x \right\} \quad (4)$$

여기서 $\omega = 2\pi f$
α = 감쇠
c = 파속도이다.

u(x, t)를 t와 x에 관하여 각각 편미분하면

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -u_0 w^2 u(x,t) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = u_0\left(\alpha + \frac{iw}{c}\right)^2 u(x,t) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 식 (3)에 대입하면 식 (7)를 얻는다.

$$-\rho w^2 = (C' + iC'')\left[\alpha^2 + \frac{i2\alpha w}{c} - \left(\frac{w}{c}\right)^2\right] \quad (7)$$

식 (7)의 실수와 허수부를 각각 분리하여 정리하면 C'과 C'' 두 개의 미지수를 갖는 연립방정식의 형태를 취하게 된다.

$$-\rho w^2 = \left[C'\left(\alpha^2 - \frac{w^2}{c}\right) - 2\frac{\alpha w}{c}C''\right] \quad (8)$$

$$0 = 2C'\frac{\alpha w}{c} + C''\left(\alpha^2 - \frac{w^2}{c^2}\right) \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 풀면 저장 종탄성율과 손실 종탄성율을 파속도와 감쇠의 함수로 식 (10), (11)과 같이 각각 표기할 수 있다.

$$C' = \rho c^2 W^2 (W^2 - 1)/(W^2 + 1)^2 \quad (10)$$

$$C'' = 2C'W/(W^2 - 1) \quad (11)$$

여기서 $W = \frac{w}{\alpha c}$ 이다.

손실 종탄성율과 저장 종탄성율의 비는 동적-기계적 분석에서 또 하나의 유용한 변수로서 손실 탄젠트(혹은 dissipation factor라고도 불리운다) $\tan\delta$는 아래와 같이 정의된다.

$$\tan\delta = C''/C' \quad (12)$$

탄성고체에 대한 후크의 법칙에서 인장변형의 경우 컴플라이언스(compliance)는 탄성율의 역수가 되는 것과 같이, 점탄성 재료의 복소 컴플라이언스 D^*는 복소 탄성율 C^*와 역관계로서 다음과 같이 나타내어진다.

$$D^* = 1/C^* = \varepsilon^*/\sigma^* = \varepsilon/\sigma \exp(-i\delta) \quad (13)$$

식 (13)을 정리하면 복소 컴플라이언스는 복소 탄성율처럼 가해진 변형과 같은 위상에 있는 실수부, 즉 저장 종컴플라이언스(storage longitudinal compliance)와 다른 위상(out of phase)에 있는 허수부, 즉 손실 종컴플라이언스(loss longitudinal compliance)로 아래와 같이 나뉘어진다.

$$D^* = D' - iD'' \quad (14)$$

여기서 D' = 저장 종컴플라이언스
D'' = 손실 종컴플라이언스 이다.

한편 식 (2)와 식 (13), (14)로부터 저장 및 손실 종컴플라이언스는 각각 저장 및 손실 종탄성율의 함수로 식 (15), (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D' = C'/(C'^2 + C''^2) \quad (15)$$

$$D'' = C''/(C'^2 + C''^2) \quad (16)$$

점탄성 거동의 해석을 위하여 탄성요소로서 스프링을, 점성요소로서 대시포트(dashpot)를 사용한 기계적 모델을 자주 이용한다. 이 중에서 스프링과 대시포트가 직렬로 연결된 Maxwell 점탄성모델과 병렬로 연결된 Voigt-Kelvin 점탄성모델은 대표적이라 할 수 있다(Fig. 1참조).

Maxwell 점탄성모델

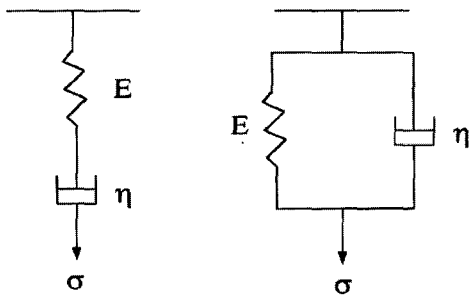
스프링과 대시포트가 직렬로 연결된 Maxwell 모델의 경우에서의 총변형은 스프링과 대시포트 각각의 변형의 합으로 아래와 같다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{스프링}} + \varepsilon_{\text{대시포트}} \quad (17)$$

한편

$$\sigma_{\text{스프링}} = E\varepsilon_{\text{스프링}}$$

$$\sigma_{\text{대시포트}} = \eta\frac{d\varepsilon_{\text{대시포트}}}{dt}$$



(a) Maxwell model (b) Voigt-Kelvin model

Fig. 1 Two viscoelastic models which characterize asphalt cement

여기서 E = 영 탄성율
η = 점도이다.

식 (17)의 양변을 시간에 관하여 미분하여 정리하면

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} - \lambda \frac{d\sigma}{dt} \tag{18}$$

여기서 $\lambda = \frac{\eta}{E}$ = 완화시간(relaxation time) 이다.

미분방정식 (18)으로부터 동적-기계적 응답 특성 또는 크리프(creep), 응력완화(stress relaxation) 거동을 알아낼 수 있다.

동적-기계적 응답특성을 구하기 위하여 $\sigma(t) = \sigma_0 \exp(i\omega t)$ 를 미분방정식 (18)에 대입하여 $\varepsilon(t)$를 구하면 다음과 같다.

$$\varepsilon(t) = [\frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{i\eta\omega}] \exp(i\omega t) \tag{19}$$

여기서 E = $\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$ 이다.

$\sigma(t)$를 $\varepsilon(t)$로 나누면 복소 탄성율 C^*를, $\varepsilon(t)$를 $\sigma(t)$로 나누면 복소 컴플라이언스 D^*를 식 (20), (21)과 같이 각각 구할 수 있다.

$$C^* = C' + iC'' = \frac{E(\lambda\omega)^2}{1+(\lambda\omega)^2} + i[\frac{E(\lambda\omega)}{1+(\lambda\omega)^2}] \tag{20}$$

$$D^* = D' - iD'' = D - i\frac{D}{\lambda\omega} \tag{21}$$

여기서 D = $\frac{\varepsilon_0}{\sigma_0}$ 이다.

따라서 Maxwell 모델을 이용하여 구한 저장 종탄성율 C′, 손실 종탄성율 C″, 저장 종컴플라이언스 D′와 손실 종컴플라이언스 D″는 각각 식 (22)~ (25)와 같다.

$$C' = \frac{E(\lambda\omega)^2}{1+(\lambda\omega)^2} \tag{22}$$

$$C'' = \frac{E(\lambda\omega)}{1+(\lambda\omega)^2} \tag{23}$$

$$D' = D \tag{24}$$

$$D'' = \frac{D}{\lambda\omega} \tag{25}$$

저장 종컴플라이언스는 식 (24)에서 보는 바와 같이, 단순히 스프링의 컴플라이언스로서 시간 혹은 주파수에 무관하다.

크리프의 경우에는 순간적으로 응력σ_0이 가해지므로 미분방정식은

$$\sigma_0 = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{26}$$

이 되며 적분하면 아래와 같다.

$$\varepsilon(t) = (\frac{\sigma_0}{\eta})t + \varepsilon_0 \tag{27}$$

따라서 크리프 컴플라이언스 D(t)는 식 (28)과 같이 얻어진다.

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{t}{\eta} + D = D[1 + \frac{t}{\lambda}] \tag{28}$$

응력완화의 경우에는 순간적으로 변형 ε_0 가 가해진 후 일정하게 유지되므로 미분방정식은

$$\sigma = -\lambda \frac{d\sigma}{dt} \tag{29}$$

이 되며 적분하면 아래와 같다.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(\frac{-t}{\lambda}) \tag{30}$$

따라서 응력완화 E(t)는 식 (31)과 같이 얻어진다.

$$E(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = E\exp(\frac{-t}{\lambda}) \tag{31}$$

Voigt-Kelvin 점탄성모델

스프링과 대시포트가 병렬로 연결된 Voigt-Kelvin 모델의 경우에서의 총응력은 스프링과 대시포트 각각의 응력의 합으로 아래와 같다.

$$\sigma = \sigma_{스프링} + \sigma_{대시포트} \tag{32}$$

한편

$$\sigma_{스프링} = E\varepsilon_{스프링}$$

$$\sigma_{대시포트} = \eta \frac{d\varepsilon_{대시포트}}{dt}$$

인 관계가 성립하므로 Voigt-Kelvin 모델의 경우 응력과 변형율은 식 (33)과 같은 관계가 있다.

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{33}$$

동적-기계적 응답 특성을 구하기 위하여 $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp(i\omega t)$를 미분방정식 (33)에 대입하여 $\sigma(t)$를 구하면 다음 식과 같으며

$$\sigma(t) = [E + i\eta\omega]\ \varepsilon_0 \exp(i\omega t) \tag{34}$$

복소 탄성율 C*와 복소 컴플라이언스 D*는 각각 아래 식 (35), (36)과 같이 구하여진다.

$$C^* = C' + iC'' = E + i\eta\omega \tag{35}$$

$$D^* = D' - iD'' = \frac{D}{1 + (\lambda\omega)^2} - i\left[\frac{D\lambda\omega}{1 + (\lambda\omega)^2}\right] \tag{36}$$

따라서 Voigt-Kelvin 모델을 이용하여 구한 저장 종탄성율 C', 손실 종탄성율 C'', 저장 종컴플라이언스 D'와 손실 종컴플라이언스 D''는 식 (35), (36)으로부터 식 (37)~(40)과 같이 구하여 진다.

$$C' = E \tag{37}$$

$$C'' = \eta\omega \tag{38}$$

$$D' = \frac{D}{1 + (\lambda\omega)^2} \tag{39}$$

$$D'' = \frac{D\lambda\omega}{1 + (\lambda\omega)^2} \tag{40}$$

저장 종탄성율은 식 (37)에서 보는 바와 같이, 스프링의 탄성율으로서 시간 혹은 주파수에 무관하다. 점도 η는 손실 종탄성율을 이용하여 식 (38)으로부터 식 (41)과 같이 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{C''}{\omega} \tag{41}$$

Maxwell 모델에서와 마찬가지로, 크리프 컴플라이언스 D(t)는 미분방정식 (33)으로부터 다음 식 (42)와 같이 구할 수 있다.

$$D(t) = D[1 - \exp(\frac{-t}{\lambda})] \tag{42}$$

응력완화의 경우에는 대시포트가 순간적으로 변형을 할 수 없기 때문에 Voigt-Kelvin 모델을 이용하여 해석하기에는 적당하지가 않다.

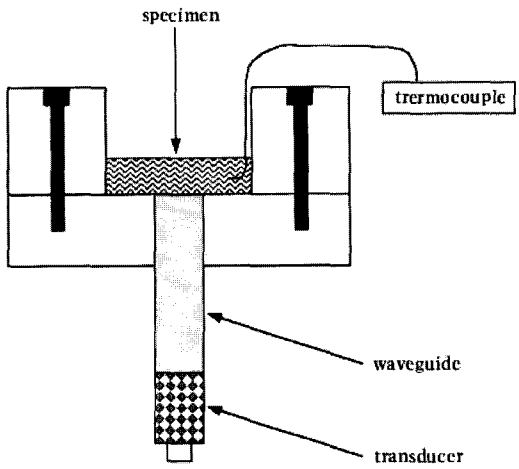


Fig. 2 Ultrasonic testing set-up to characterize ashalt cement

3. 실 험

실험에 사용된 아스팔트는 25℃에서의 침투율(penetration)이 85 - 100 사이로서, 아스팔트를 로(oven)에서 가열한 후 Fig. 2에서 보는 바와 같은 실험장비에 채운다. 고온의 아스팔트로부터 탐촉자를 보호하기 위하여 아스팔트는 지연재(waveguide)에 의해 탐촉자와 격리되어 있으며 온도는 열전대(thermocouple) 온도계를 이용하여 측정한다. 실험 주파수는 2.25 MHz이었고, 온도는 60℃부터 -20℃까지 10℃ 간격으로 측정하였다. 시료 두께 3.2mm, 3.4mm, 3.8mm의 세 가지 경우에 대하여 파속도와 감쇠를 각 온도에서 측정하여 평균값을 계산하였다. 이 결과를 식 (10)과 (11)에 대입하면 저장 종탄성율 및 손실 종탄성율을 각각 구할 수 있다.

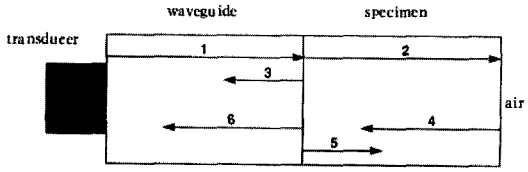
Fig. 3은 이 연구의 실험에 사용된 시스템으로서 탐촉자와 시료사이에 지연재가 있는 경우 파의 투과(transmission)와 반사(reflection)를 보여주고 있다. 오실로스코프에서 측정되는 신호 3과 6으로부터 파속도 c는 식 (43)과 같이 구할 수 있다.

$$c = \frac{2h}{\Delta t} \tag{43}$$

여기서 h = 시료두께

Δt = 신호도달 시간차이 이다.

감쇠 α는 아래 식 (44)와 같이 정의할 수 있다.



signal 1: the initial pulse
signal 2: the transmission into specimen
signal 3: the first reflection at the waveguide/specimen interface(the first signal read on the oscilloscope)
signal 4: the second reflection at the specimen/air interface (nearly full reflection)
signal 5: the reflection at the specimen / waveguide interface
signal 6: the transmission into the waveguide(the second signal read on the oscilloscope)

Fig. 3 Three-material system with the wave transmission and reflections

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \frac{V_2}{V_4} \tag{44}$$

한편

$$V_2 = TC_1\ V_1 \tag{45}$$

$$V_3 = RC\ V_1 \tag{46}$$

$$V_6 = TC_2\ V_4 \tag{47}$$

여기서 V_i = Fig. 3에서 신호 i의 진폭
RC = 지연재/시료 경계면에서의 반사계수
TC_1 = 지연재/시료 경계면에서의 투과계수
TC_2 = 시료/지연재 경계면에서의 투과계수 이다.

식 (45)~(47)을 식 (44)에 대입하여 정리하면, 오실로스코프에서 측정되는 신호 3과 6을 이용하여 감쇠 α를 아래 식 (48)으로부터 구할 수 있다.

$$\alpha = -\frac{1}{2h} \ln\left[\left(\frac{V_6}{V_3}\right)\left(\frac{RC}{TC_1\ TC_2}\right)\right] \tag{48}$$

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 파속도를 Fig. 5는 감쇠를 온도에 관한 함수로 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 파속도는 선형적으로 감소하고 있으며 감쇠는 기하급수적으로 증가하는 현상을 보이고 있다. 아스팔트 재료의 온도 변화에 따른 파속도와 감쇠 측정결과를 문헌에 보고된 예를 찾

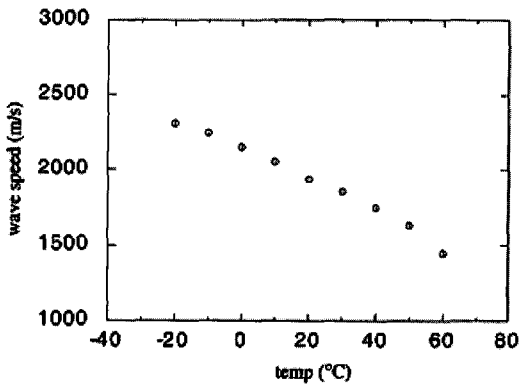


Fig. 4 Wave speed as a function of temperature

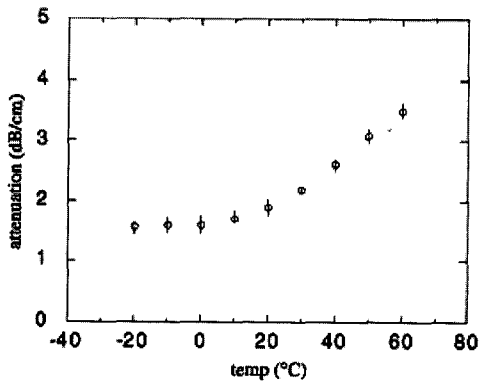


Fig. 5 Attenuation as a function of temperature

지 못하여 점탄성 재료중의 하나인 에폭시와 간접 비교를 하였다. Hahn[21]은 초음파를 이용하여 에폭시의 경화특성을 조사하였는데, 온도가 증가할수록 파속도는 대체로 선형적인 감소를 하며 최대 감쇠에 이르는 시간은 기하급수적으로 짧아진다고 보고하였다. 따라서 아스팔트는 에폭시와 유사한 특성을 지니고 있다 할 수 있다.

Fig. 6은 저장 종탄성율을 Fig. 7은 손실 종탄성율을 보여준다. 저장 및 손실 종탄성율은 식 (10)과 (11)에서 보는 바와 같이 파속도와 감쇠의 영향을 받게 되므로 온도의 함수로 나타낼 수 있다. 일반적으로 유리전이온도 이하의 온도에서는 거의 같은 탄성율 값을 가지다가 온도가 증가함에 따라 서서히 감소하게 된다. 이 때 감소하는 형태는 저분자량 재료보다는 고분자량 재료일수록 경사가 완만한 것으로 알려져 있다. Fig. 6은 온도에 대한 탄성율 관계에 있어서 전형적인 점탄성 영역을 보여주고 있다. 손실 종탄성율은 저장 종탄성율에 비하여 상당히 작은 값이므로 때로는 저장 종탄성율을 동적 탄성율

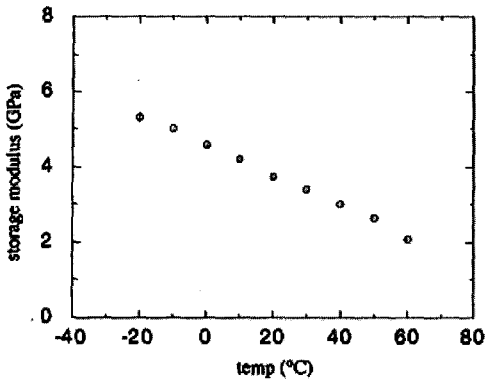


Fig. 6 Storage modulus as a function of temperature

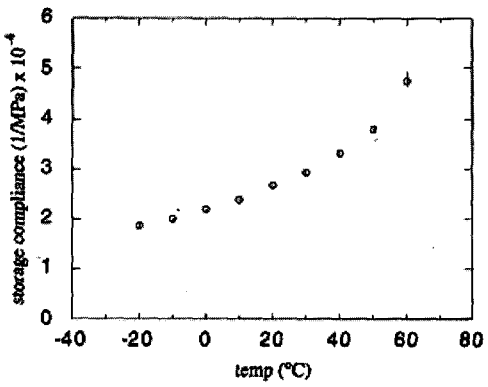


Fig. 9 Storage compliance as a function of temperature

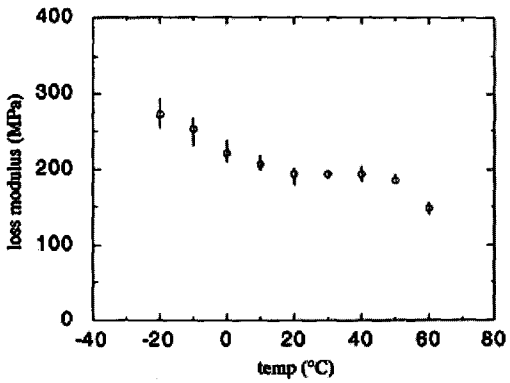


Fig. 7 Loss modulus as a function of temperature

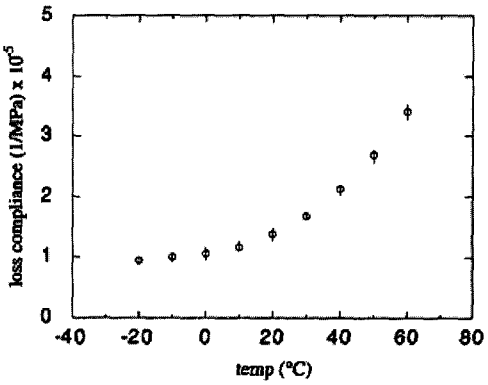


Fig. 10 Loss compliance as a function of temperature

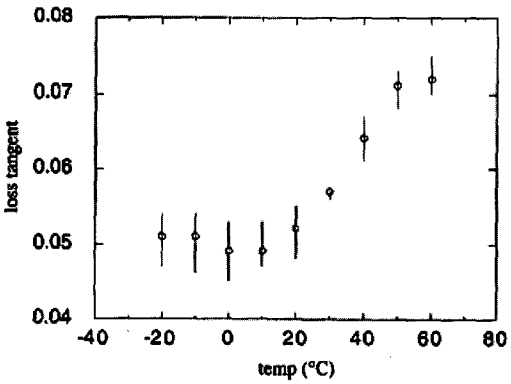


Fig. 8 Loss tangent as a function of temperature

(dynamic modulus)이라고도 한다. Fig. 8은 식 (12)와 같이 정의된 손실 탄젠트(loss tangent)의 변화를 보여주고 있다. 손실 탄젠트는 온도가 증가함에 따라 기하급수적으로 증가하는 현상을 보이고 있는데 손실 종탄성율보다는 저장 종탄성율의 저하속도가 더 크기 때문이다.

Fig. 9와 10은 각각 식 (15)와 (16)으로부터 구한 저장 및 손실 종컴플라이언스를 보여주고 있다. 온도가 증가함에 따라 컴플라이언스 둘 다 비슷하게 증가하는 현상을 나타내고 있으나 저장 종탄성율이 손실 종탄성율보다 큰 값이기 때문에 저장 종컴플라이언스가 손실 종컴플라이언스보다는 큰 값을 나타내고 있다. 탄성체의 경우 컴플라이언스는 탄성율과 역관계인 것과 같이, 아스팔트는 온도가 증가함에 따라서 탄성율은 감소하지만 컴플라이언스는 증가하게 된다.

일반적으로 응력완화는 Maxwell 모델에 의해서, 크리프는 Voigt-Kelvin 모델에 의해서 잘 예측되고 있다. 이 두 모델은 오직 한 개의 완화시간을 이용한다는 결점은 있으나, 점탄성 거동을 예측하는데 폭넓게 쓰이고 있다. Fig. 11은 Maxwell 모델을 이용하여 구한 식 (31)으

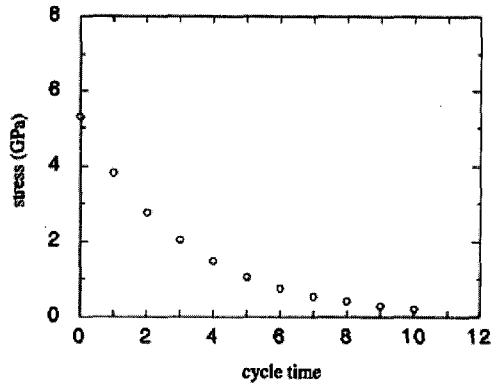


Fig. 11 Stress relaxation at -20℃

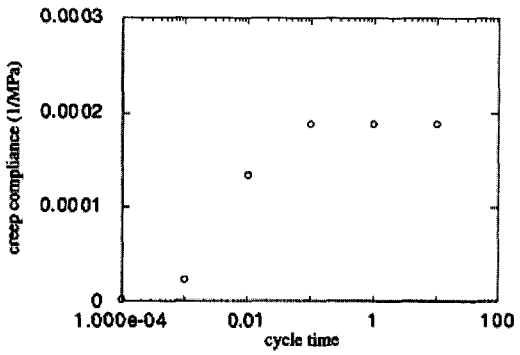


Fig. 12 Creep response at -20℃

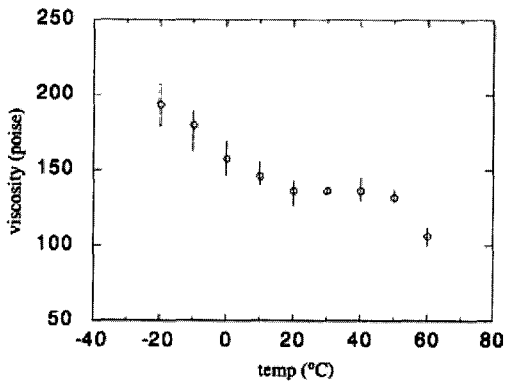


Fig. 13 Viscosity as a function of temperature

로 표현된, -20℃에서 10 cycle time 까지의 응력완화 거동을 예측하고 있다. 응력완화시간 λ는 주파수에 반비례하므로 주파수 2.25 MHz에서는 μsec 단위가 된다. 따라서 짧은 시간 안에 응력완화가 이루어짐을 알 수 있다. Fig. 12는 Voigt-Kelvin 모델을 이용하여 구한 식 (42)로 표현된, -20℃에서 10 cycle time 까지의 크리프 거동을 나타내고 있다. 응력완화 거동에서와 마찬가지로 응력완화시간 λ가 짧기 때문에 1 cycle time 이내에 크리프 거동은 최고치에 도달하게 된다. Fig. (13)은 점도의 변화를 보여주고 있는데 식 (41)에서 보는 바와 같이 손실 종탄성율에 비례하기 때문에 손실 종탄성율과 비슷한 변화 분포를 보이고 있다.

저장 종탄성율을 저장 횡탄성율(storage shear modulus)로 변환하기 위하여 다음 식 (49)와 같은 강성(stiffness), 영 탄성율(Young's modulus)과 전단 탄성율(shear modulus) 의 관계식[22]를 이용한다.

$$E = [\ (1-3\upsilon^2-2\upsilon^3)\ /\ (1-\upsilon^2)\ ]C \qquad (49)$$
$$G = E\ /\ [\ 2(1+\upsilon)\ ]$$

여기서 C = 강성
G = 전단 탄성율
υ = 포아송비 이다.

저온에서의 아스팔트는 탄성체와 같은 물성을 보유하며, 손실 종탄성율은 저장 종탄성율에 비하여 손실 횡탄성율은 저장 횡탄성율에 비하여 상당히 작은 값이므로 식 (49)에서 C를 저장 종탄성율, G를 저장 횡탄성율로 변화시켜 해석 하여도 큰 오차는 없을 것이다. 온도 -20℃에서 일반적으로 알려져 있는 아스팔트의 포아송비를 0.3501라고 가정하면 이 온도에서의 대략적인 저장 종탄성율 측정값 5.2 GPa은 영 탄성율로는 3.2 GPa, 저장 횡탄성율로는 1.2 GPa이 된다. 한편 Torsion Crystal[2], 진동법[10, 16], Rheometer[17] 등을 이용하여 측정한 결과에 의하면 저온 및 고주파에서 모든 아스팔트는 비슷한 물성을 갖는데 이 때 저장 횡탄성율은 1.0 GPa에 근접한다. 따라서 초음파를 이용하여 측정한 값은 동적-기계적 방법[10, 16]에 의하여 측정한 값과 대동소이 하다고 할 수 있다.

크리프 혹은 응력완화와 같이 일정온도에서 긴 시간 동안에 물체의 거동이 어떻게 변화하는 가를 아는 것은 중요하다. 실제로는 긴 시간 동안의 거동을 측정하지 않고, 각기 다른 온도에서 짧은 시간 동안에의 측정값을 시간 크기에 따라 수평 이동함으로써 기준온도에서의 master curve를 그리게 되는데 이러한 기법을 점탄성 이론에서 시간-온도 중첩원리라 한다. 이동인자(shift factor)는 어떤 온도에서 탄성율의 특정 값에 도달하는데 걸리는 실제시간과 기준온도에서의 master curve상에서 앞과 같은

탄성율에 도달하는데 걸리는 시간과의 비(ratio)로서 정의된다. Williams, Landel 과 Ferry[4]는 고분자 재료라면 그 종류에 관계없이 이동인자와 온도사이에는 공통식이 성립하게 된다는 것을 보여주었는데 이를 WLF equation 이라고 하며 아래와 같다.

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (50)$$

여기서 a_T = 이동인자

C_1, C_2 = 고분자 재료별 고유상수

T_0 = 기준온도

이 연구에서 측정한 결과를 식 (49)를 이용하여 변환한 저장 횡탄성율(1.2 GPa)은 저주파수(보통 20 kHz 미만)에서 얻은 측정값을 중첩원리와 이동인자를 이용하여 구한 저장 횡탄성율(1.0 GPa)의 값[10, 16]에 거의 접근함을 보여준다. 따라서 이번 연구결과는 점탄성학 이론의 중첩원리, 이동인자와 WLF equation의 타당성을 증명해 주고 있으며, 또한 초음파를 이용하여 점탄성 재료의 물성 측정이 가능함을 보여주고 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 점탄성 재료인 아스팔트 세멘트의 점탄성 특성을 초음파를 이용하여 측정하였다. 주파수 2.25 MHz에서 -20℃부터 60℃까지의 온도변화에 따른 파속도와 감쇠를 이용하여 저장 종탄성율과 손실 종탄성율의 변화를 알아보았다. 이로부터 손실 탄젠트, 저장 종컴플라이언스와 손실 종컴플라이언스를 구하였고, Maxwell과 Voigt-Kelvin 점탄성 모델로부터 응력완화 및 크리프 거동과 점도의 변화를 예측하였다. 또한 점탄성학 이론의 중첩원리와 이동인자의 타당성을 입증할 수 있었다.

참고문헌

[1] Van Der Poel, "A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data," J. Appl. Chem, pp. 221-236, (1954)

[2] J. G. Brodnyan, F. H. Gaskine, W. Philippoff, and E. Thelen. "The Rheology of Asphalt. III. Dynamic Mechanical Properties of Asphalt," Transactions of the Society of Rheology, Vol. 4, pp. 279-296, (1960)

[3] J. D. Ferry, E. R. Fitzerald, L. D. Grandine, Jr., and M. L. Williams, "Temperature Dependence of Dynamic Properties of Elastomers; Relaxation Distributions," Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 44, No. 4, pp. 703-706, (1952)

[4] M. L. Williams, R. F. Landel, and J. D. Ferry, "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids," J. of American Chemical Society, Vol. 77, pp. 3701-6, (1955)

[5] G. R. Dobson, "An Apparatus for measuring the Dynamic Elastic Properties of Bitumens," J. of Scientific Instruments, Vol. 44, pp. 375-8, (1967)

[6] G. R. Dobson, "The Dynamic Mechanical Properties of Bitumens," Proc. AAPT, Vol. 38, pp. 123-35, (1969)

[7] S. H. Kuhn and P. J. Rigden, "Measurement of Visco-Elastic Properties of Bitumens under Dynamic Loading," Highway Research Board, 38th, pp. 431-58, (1959)

[8] E. N. Thrower, "Technique for measuring the Elastic Properties of Bitumens, Tars, and Soils under Dynamic Loading," J. of Scientific Instruments, Vol. 38, pp. 69-73, (1961)

[9] R. Jongepier and B. Kuilman, "Characteristics of the Rheology of Bitumens," Proc. AAPT, Vol. 38, pp. 98-119, (1969)

[10] E. J. Dickinson and H. P. Witt, "The Visco-elastic Behavior of Confined Thin Films of Bitumen in Tension Compression," Transaction of the Society of Rheology, Vol. 13, pp. 485-511, (1969)

[11] R. Jongepier and B. Kuilman, "The Dynamic Shear Modulus of Bitumens as a function of Frequency and Temperature," Rheologica Acta, Vol. 9, pp. 102-11, (1970)

[12] E. J. Dickinson and H. P. Witt, "The Dynamic Shear Modulus of Paving Asphalt as a Function of Frequency," Transactions of the Society of Rheology, Vol. 18, pp. 591-606, (1974)

[13] C. Verga, G. Battiato, and C. La Bella, "Asphalt Cements Improvement: The Influence of a Carboxylated SBR Elastomer Investigated by Means of Viscoelastic Parameters," Proc. AAPT,

Vol. 44, pp. 366-84, (1975)

[14] A. I. Isayev, V. A. Zolotarev, and G. V. Vinogradov, "Viscoelastic Properties of Bitumens in Continuous and Cyclic Deformation," Rheologica Acta, Vol. 14, pp. 135-44, (1975)

[15] E. L. Dukatz, Jr. "A Characterization of Asphalt by Composition and Mechanical Properties," Ph.D. Thesis, Penn State Univ., (1984)

[16] S. Maccarrone, "Rheological Properties of Weathered Asphalts Extracted from Sprayed Seals Nearing Distress Condition," Proc. AAPT, Vol. 56, pp. 654-687, (1987)

[17] J. L. Goodrich, "Asphalt and Polymer Modified Asphalt Properties Related to the Performance of Asphalt Concrete Mixes." Proc. AAPT, Vol. 57, pp. 116-160, (1988)

[18] W. P. Winfree, "Ultrasonic Characterization of Changes in Viscoelastic Properties of Epoxy during Cure," Ultrasonics Symposium, pp. 866-869, (1983)

[19] W. P. Winfree and F. R. Parker, "Measurement of Degree of Cure in Epoxies with Ultrasonic Velocity," Review of Progress in QNDE, Vol. 5B, pp. 1055-1061.

[20] F. R. Parker and W. P. Winfree, "Acoustic Characterization of Composite Cure," Review of Progress in QNDE, Vol. 5B, pp. 1063-1067.

[21] H. T. Hahn, "Application of Ultrasonic Technique to Cure Characterization of Epoxies," Nondestructive Methods for Material Property Determination, edited by C. O. Ruud and R. E. Green, Jr., pp. 315-326, (1984)

[22] S. W. Tsai, Composite Design, 3rd edition, Think Composites Publishers, Dayton, USA, (1987)