

## 인장하중을 받는 아스팔트 혼합물의 점탄소성 모형의 개발

### Development of ViscoElastoPlastic Continuum Damage (VEPCD) Model for Response Prediction of HMAs under Tensile Loading

Underwood, B. Shane\* · Kim, Y. Richard\*\* · 서영국\*\*\* · 이광호\*\*\*\*

Underwood, B. Shane · Kim, Y. Richard · Seo, Youngguk · Lee, Kwang-Ho

#### Abstract

The objective of this research was to develop a VEPCD (ViscoElastoPlastic Continuum Damage) Model which is used to predict the behavior of asphalt concrete under various loading and temperature conditions. This paper presents the VEPCD model formulated in a tension mode and its validation using four hot mix asphalt (HMA) mixtures: dense-graded HMA, SBS, CR-TB, and Terpolymer. Modelling approaches consist of two components: the ViscoElastic Continuum Damage (VECD) mechanics and the ViscoPlastic (VP) theory. The VECD model was to describe the time-dependent behavior of HMA with growing damage. The irrecoverable (whether time-dependent or independent) strain has been described by the VP model. Based on the strain decomposition principle, these two models are integrated to form the VEPCD model. For validating the VEPCD model, two types of laboratory tests were performed: 1) a constant crosshead strain rate tension test, 2) a fatigue test with randomly selected load levels and frequencies.

Keywords : VEPCD, Damage Model, Dynamic Modulus, Asphalt, Strain Decomposition

#### 요 지

아스팔트 혼합물의 거동을 정확하게 예측하기 위하여 점탄소성 연속체 손상모형(이하 점탄소성 모형)을 개발하였다. 본 논문에서는 인장조건에서 점탄소성 모형의 개발과 4가지 혼합물(일반 밀입도, SBS, CR-TB, Terpolymer)을 이용한 모형의 검증과정을 다루고 있다. 모형 개발을 위해서 실내시험으로 측정된 아스팔트 혼합물의 전체 응답을 점탄성과 점소성 성분으로 구분하여 분석하였다. 점탄성 연속체 손상모형으로는 미세균열이 지배적인 상태에서 아스팔트 혼합물의 시간 의존적 거동을 해석하고, 고온 혹은 저속 하중 조건에서 발생한 영구변형(시간 종속과 비종속 성분을 모두 포함)은 점소성 모형으로 해석하였다. 변형을 분해 원리에 근거하여 각각의 모형을 통합하여 점탄소성 연속체 손상모형(VEPCD)을 개발하였다. 모형의 변수 결정을 위해서 직접인장시험을 수행하고 각각의 혼합물에 대한 선형 점탄성은 동탄성계수와 시간-온도 전이계수 그리고 위상각의 주곡선으로 정의하였다. 개발된 점탄소성 모형의 예측 성능을 평가하기 위하여 두 종류의 실내시험 실시하고 그 결과를 분석하였다 : 1) 단일 변형을 인장 시험, 2) 임의 하중조건을 모사한 피로 시험.

핵심용어 : 점탄소성, 손상모형, 동탄성계수, 아스팔트, 변형을 분해

#### 1. 서 론

연성포장인 아스팔트 콘크리트 포장(이하 아스팔트 포장)은 매우 복잡한 거동을 보이는 아스팔트 혼합물이 단층 혹은 다층으로 구성되어 있고 공용 중에 넓은 범위에 걸쳐 작용하는 차량의 반복 하중과 주기적 온도변화에 노출되어 있다. 아스팔트 포장에서 발생하는 대표적인 포장 손상으로 크게 피로균열과 소성변형이 있다. 각각의 손상은 포장의 형식(두께, 혼합물, 등) 및 주어진 환경에 따라 서로 다른 응력 및 변형을 조건에서 - 독립적으로 혹은 복합적으로 - 발생한다.

다. 최근의 아스팔트 포장의 연구는 이러한 손상 및 공용성 예측 모형의 개발을 위한 다양한 실험적/이론적 수단을 제시하고 있다.

본 논문에서는 인장하중에 의한 점탄소성 연속체 손상(ViscoElastoPlastic Continuum Damage, VEPCD)모형(이하 점탄소성 모형)의 개발과 4가지 아스팔트 혼합물을 이용한 모형의 검증과정을 다루고자 한다. 각 혼합물에 대하여 일축조건(uniaxial)에서 직접인장시험을 수행하고 예측한 전체 응답(변형률)을 변형을 분해 원리(strain decomposition principle)에 따라 점탄성(viscoelastic)과 점소성(viscoplastic)

\*North Carolina State University 박사과정 (E-mail : bsunderw@ncsu.edu)

\*\*North Carolina State University 교수 · 공학박사 (E-mail : kim@ncsu.edu)

\*\*\*정희원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : seoyg89@ex.co.kr)

\*\*\*\*정희원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구개발실장 · 공학박사 (E-mail : LKW@ex.co.kr)

으로 구분하여 각각 해석하였다. 혼합물의 선형 점탄성 물성은 동탄성계수, 전이계수, 그리고 위상각의 주곡선으로 정의하였다.

직접인장하중에 의한 점탄소성 모형은 향후 간접인장모드에서 그 성능을 검증하고, 압축하중(삼축압축조건)에 의한 점탄소성 모형과 함께 유한요소해석 프로그램인 VEPCD-FEP++의 주요 해석 모듈로 사용될 예정이다. 이 과정은 후속 논문에서 자세하게 다루고자 한다.

## 2. 연구의 주요 배경

Kim과 공동연구자는 Schapery의 손상을 고려한 비선형 점탄성론(nonlinear viscoelasticity)으로 변형률 제어(strain-controlled) 조건에서 반복하중을 받는 모래 아스팔트 혼합물의 거동을 예측하였다(1990). 이 이론은 응력 제어(stress-controlled) 조건에서도 다양한 종류의 아스팔트 혼합물의 거동을 비교적 정확하게 설명할 수 있다. 일반적으로 아스팔트 혼합물의 거동예측을 위한 모형개발에는 방대한 분량의 실내외 시험이 필요하였다. 그러나 최근의 연구결과는 아스팔트 혼합물의 손상이 하중의 재하조건(변형률 혹은 응력 제어)과 무관하고 비교적 간단한 시험을 통하여 그 특성을 규명할 수 있음을 보여주고 있다(Daniel et al., 2002). 또한, 재료 내부에 손상이 전혀 없는 조건에서만 적용이 가능하다고 생각했던 시간-온도 중첩이론(time-temperature superposition principle)이 실제로는 재료내부에 거시균열을 포함한 심각한 손상이 발생한 경우에도 적용할 수 있음이 밝혀졌다(Chehab et al., 2002).

본 연구에서 개발하고자 하는 점탄소성 모형은 Schapery (1999)가 제안한 변형률 분해 원리(strain decomposition principle)를 바탕으로 한다. 이 원리로 전체 변형률을 각각의 구성요소(탄성, 점탄성, 소성, 그리고 점소성)로 구분 가능하여, 식 (1)과 같이 탄성, 점탄성 그리고 미세균열에 의한 변형률은  $\epsilon_{ve}$ 로, 소성과 점소성 변형률은  $\epsilon_{vp}$ 로 모아서 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{ve} + \epsilon_{vp} \quad (1)$$

이 외에도 본 연구의 주요 배경으로는 1) 점탄성론(viscoelastic theory), 2) 연속체 손상 역학(continuum damage mechanics) 그리고 3) 변형률-경화 법칙(strain-hardening rule)이 있다. 점탄성론과 연속체 손상 역학의 자세한 개념은 비교적 최근의 연구결과를 통해(Kim and Little, 1990; Lee and Kim, 1998; Daniel, 2001; Chehab, 2002; Chehab et al., 2003; Schapery, 1981, 1990, 1999) 이미 보고가 되었으며, 아스팔트 혼합물에 적용한 변형률-경화 법칙은 Chehab et al., 2003; Schapery, 1999; Uzan, 1996의 연구에서 자세히 다루고 있으므로 본 논문에서는 각 이론에 대한 주요 내용만을 요약, 정리하였다.

### 2.1 선형 점탄성(Linear Viscoelasticity, LVE)

아스팔트 혼합물의 거동은 주요 구성 재료인 아스팔트 바인더의 점탄성으로 인하여 시간과 온도에 영향을 받는다. 탄

성 재료의 경우 현재의 거동이 현재의 하중조건에 의하여 결정되는 반면, 아스팔트 혼합물은 현재의 거동이 현재와 과거의 하중 이력에 모두 영향을 받기 때문에 재료의 구성방정식(constitutive equation)은 아래의 식 (2)나 (3)과 같다.

$$\sigma = \int_0^t E(t-\tau) \frac{d\epsilon}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

$$\epsilon = \int_0^t D(t-\tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau \quad (3)$$

여기서,  $E(t)$ : 리랙세이션 계수(relaxation modulus),  $D(t)$ : 크리프 컴플라이언스(creep compliance)

식 (2)와 식 (3)의 선형 점탄성을 의미하는 단위함수(리랙세이션 계수와 크리프 컴플라이언스)는 실제로 시험장비의 기계적 한계나 문제(예: 진동, 시험장비의 강성) 등으로 인하여 정확한 값을 직접 구하기가 어렵다. 따라서 실내시험으로 손쉽게 측정할 수 있는 동탄성계수를 수학적으로 변환하여 위의 물성들을 간접적으로 그러나 정확하게 결정할 수 있다.

### 2.2 대응원리(Correspondence Principle)

Schapery의 연속체 손상 이론은 원래 탄성재료에 적용되었지만 탄성-점탄성 대응원리(elastic-viscoelastic correspondence principle)를 통해 점탄성 재료에도 확대 적용될 수 있다(Schapery, 1984). 이 대응원리의 핵심은 측정된 변형률을 식 (4)의 유사 변형률(pseudo strain)로 변환하여 점탄성 문제를 탄성 문제처럼 단순하게 해결한다는 것이다.

$$\epsilon^R = \frac{1}{E_{R0}} \int_0^t E(t-\tau) \frac{d\epsilon}{d\tau} d\tau \quad (4)$$

여기서,  $E_{R0}$ 은 기준계수(reference modulus)로 임의의 값을 사용할 수 있지만 보통 1로 가정한다. 유사 변형률을 이용하여 식 (2)의 구성방정식을 아래의 식 (5)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\sigma = E_R \epsilon^R \quad (5)$$

위 식 (5)는 탄성재료의 대표적 구성방정식인 후크의 법칙과(Hook's law)과 매우 흡사함을 알 수 있다. 개념적으로 유사 변형률은 재료에 발생된 선형 점탄성 응력이다. 이렇게 응력-유사 변형률을 기반으로 한 구성방정식은 점탄성 재료의 응답에서 시간에 의한 영향을 제거할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 유사 변형률 기반의 구성방정식을 점탄소성 모형의 개발에 적용하였다.

### 2.3 연속체 손상 역학(Continuum Damage Mechanics, CDM)

연속체 손상 역학은 기본적으로 손상된 재료의 강성(stiffness)을 손상이 없는 재료의 낮아진 강성과 같다고 가정한다. 따라서 손상 이론은 손상(damage)과 유효강성(effective stiffness)이라는 두 가지 변수를 기반으로 하고 있다. 단, 미시적 거동은 무시하고 대신에 거시적으로 관찰한 결과를 바탕으로 재료의 거동을 설명한다. 본 연구는 열역학 이론에 근거한 Schapery의 일 포텐셜 이론(work potential theory)으로 아스팔트 혼합물의 손상을 평가하였다. 이 이론은 내부

상태 변수(internal state variable)를 도입하여 재료내부의 미시적 변화를 고려한 손상을 정량화 하고 있다.

손상 이론은 기본적으로 재료의 강성 저하가 손상과 연관되어 있다는 것에서부터 출발한다. 일반적으로 탄성재료의 손상은 응력-변형을 곡선에서 결정된 시컨트계수의 감소와 같다고 본다. 점탄성 재료의 경우 응력-변형을 공간에서의 시컨트계수의 변화는 시간의 영향이 들어가 있다. 따라서 대응원리를 적용하여 응력-유사 변형률을 구하고 여기서 구한 유사 시컨트계수(pseudo secant modulus)의 감소로 손상을 비교적 쉽게 정량화 할 수 있다.

선형 구분법(linear piecewise technique)을 이용하면 식 (4)의 유사 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \left[ \int_0^{t_1} E(t-\tau) \frac{d\varepsilon_1}{d\tau} d\tau + \int_{t_1}^{t_2} E(t-\tau) \frac{d\varepsilon_2}{d\tau} d\tau + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} E(t-\tau) \frac{d\varepsilon_n}{d\tau} d\tau \right] \quad (6)$$

위 식은 측정 데이터의 분량이 많은 경우 해석에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다. 왜냐하면, 특정시간에서의 재료의 거동을 알기 위해서는 그 이전의 시간에서의 거동의 영향을 모두 고려해야 하기 때문이다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 수치해석에서 주로 사용하는 상태 변수법(state variable method)을 도입하여 식 (6)의 적분연산을 간단한 대수연산으로 변환하였다(Simo et al., 1998). 상태 변수법은 식 (7)의 리렉세이션 계수를 표현하는 프로니 시리즈(Prony series)에서 각각의 맥스웰(Maxwell) 요소에 하나의 변수를 대응시키는 것이다.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^m E_i e^{-t/\rho_i} \quad (7)$$

여기서,  $E_i = i$  번째 맥스웰 요소의 강성,  
 $\rho_i =$  리렉세이션 시간

그러면 각각의 변수는 하중을 받고 있는 동안 각각의 요소의 거동과 상태를 추적할 있다. 이를 위해 본 연구에서 사용된 공식은 식 (8)과 같다.

$$\varepsilon^{R(n+1)} = \frac{1}{E_R} \left[ \eta_0^{n+1} + \sum_{i=1}^m \eta_i^{n+1} \right] \quad (8)$$

여기에서  $\eta_0$ 와  $\eta_i$ 는  $n+1$ 번째 시간에서 각각 탄성거동과  $i$  번째 맥스웰 요소의 내부 상태 변수를 의미하여 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$\eta_0^{n+1} = E_\infty (\varepsilon^{n+1} - \varepsilon^n) \quad (9)$$

$$\eta_i^{n+1} = e^{-\Delta t/\rho_i} \eta_i^n + E_i e^{-\Delta t/2\rho_i} (\varepsilon^{n+1} - \varepsilon^n) \quad (10)$$

식 (8)은 식 (6) 비하여 매우 효율적으로 유사 변형률을 계산할 수 있다. 실제로, 동일한 컴퓨팅 환경에서 4000개의 데이터를 해석하여 비교한 결과 식 (6)을 이용하면 대략 100초가 소요되는 반면, 식 (8)을 이용할 경우에는 약 1.5초 만에 결정할 수 있었다.

유사 변형률과 응력은 다음 장의 유사 시컨트계수를 계산하기 위한 식 (12)에 사용되는데, 식 (6)과 (8)은 엄격한 의미에서 소성이나, 점소성 변형률 존재하지 않는 경우에만 적

용이 가능하다. 유사 변형률이 점탄성 및 점소성 변형률을 모두 대표하는 경우, 식 (11)과 같은 겉보기 유효 강성(apparent effective stiffness),  $C_A$ 을 적용한다.

$$C_A = \frac{\sigma}{I_* \left( \int_0^t E(t-\tau) \frac{d(\varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp})}{d\tau} d\tau \right)} \quad (11)$$

### 3. 점탄성 연속체 손상(ViscoElastic Continuum Damage, VECD) 모형

점탄성 연속체 손상모형(이하 점탄성 모형)은 지금까지의 개념들을 결합하여 아스팔트 혼합물의 구성방정식을 결정한다. 앞 절에서 기술한 손상 이론에 따라 혼합물의 강성 변화는 식 (12)의 유사 시컨트계수( $C$ )로 표현할 수 있다. 여기서,  $t$ 는 시편간의 오차를 고려하기 위한 보정계수이다.

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R \times I} \quad (12)$$

손상지수인  $S$ 와 유사 시컨트계수  $C$ 의 관계를 통해 재료의 손상 특성을 결정할 수 있으며, 이 관계는 하중재하 조건과 무관한 재료의 고유특성이다(Daniel 2001). 손상을 고려한 점탄성 재료의 구성방정식은 아래의 식 (13)이나 식 (14)와 같다. 응력이 입력 변수인 경우 식 (13)을 구성방정식으로 사용하고 변형률이 입력변수인 경우 식 (14)를 사용할 수 있다.

$$\sigma = C(S) \varepsilon^R \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ve} = E_R \int_0^{\xi} D(\xi-\tau) \frac{d(\sigma/C(S))}{d\tau} d\tau \quad (14)$$

여기서, 식 (14)의 형태가 식 (3)과 매우 유사하다는 것을 알 수 있으며 앞서 정의된 내부 상태 변수를 이용하여 아래의 식 (15)와 같이 정리할 수 있다.

$$\varepsilon_{ve}^{(n+1)} = E_R \left[ \mu_0^{n+1} + \sum_{i=1}^m D_i \mu_i^{n+1} \right] \quad (15)$$

여기서  $\mu_0$ 와  $\mu_i$ 는 시간  $n+1$ 에서 각각 탄성거동과  $i$  번째 켈빈(Kelvin) 요소의 내부 상태 변수이며, 식 (16)과 (17)와 같다.

$$\mu_0^{n+1} = D_g \left( \frac{\sigma^{n+1}}{C(S)^{n+1}} \right) \quad (16)$$

$$\mu_i^{n+1} = \frac{\sigma^n}{C(S)^n} + e^{-\Delta t/\tau_i} \left( \mu_i^n - \frac{\sigma^n}{C(S)^n} \right)$$

$$- \frac{\left( \frac{\sigma^{n+1}}{C(S)^{n+1}} - \frac{\sigma^n}{C(S)^n} \right)}{\Delta t} * [\Delta t - \tau_i (1 - e^{-\Delta t/\tau_i})] \quad (17)$$

여기서,  $\tau_i =$  지체시간(retardation time)

#### 3.1 손상 특성식의 개량

Schapery의 일 포텐셜 이론은 기본적으로 손상을 정량화하기 위하여 내부 상태 변수  $S$ 를 사용하는데 이는 재료의 강

성 저하를 유도하는 미세구조의 변화를 의미한다. 인장조건에서의 아스팔트 혼합물의 거동은 균열의 거동과 밀접한 관련이 있다. 다른 손상이론과 동일하게 아스팔트 혼합물의 점탄성 모형의 유도는 기본적으로 식 (18)과 같은 손상을 정의하는 관계(손상 진전 법칙)로부터 출발한다.

$$\frac{dS}{dt} = \left( -\frac{\partial W_d^R}{\partial R} \right)^\alpha \quad (18)$$

여기서,  $W^R$ 는 일의 함수이다. 위의 식 (18)은 두 가지 방법으로 계산할 수 있다. 첫 번째 방법은 Park et al. (1996)이 제안한 것으로  $\alpha \gg 1$ 로 가정하고 식 (18)을 적분형태로 변화하여 해석하는 것이다. 내부 상태 변수  $S$ 는 새로운 변수인  $\hat{S}$ 를 도입하여 식 (19)와 같이 제안하였다.

$$S = \left[ \hat{S} \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right]^{1/(1+1/\alpha)} \quad (19)$$

여기서,  $\hat{S}$ 은 다음과 같다.

$$\hat{S}_{i+1} = S_i - \frac{1}{2}(\Delta C)_i (\epsilon_i^R)^2 t^{1/\alpha} \quad (20)$$

두 번째 방법은 연쇄 법칙(chain rule)에 근거하여 에 대한 가정 없이 해석하는 방법으로 내부 상태 변수를 식 (21)과 같이 정의하였다. 기존 연구에서는 두 가지 근사방법으로 식 (18)을 해석하였다(Park et al., 1996; Daniel 2001; Chehab et al., 2003).

$$S_{i+1} = S_i + \left[ -\frac{1}{2}(\Delta C)_i (\epsilon_i^R)^2 \right]^{1+\alpha} \Delta t^{1+\alpha} \quad (21)$$

본 연구에서는 보다 정확한  $S$ 를 계산하기 위한 새로운 방법(iterative refinement method)을 제안하였다. 이 방법은 기본적으로 아주 짧은 시간 동안에는 손상의 변화율이 거의 없다고 가정하고 현재 손상이 발생한 최 인근 시점에서 그 변화율을 결정하는 것으로 기존의 외삽법(extrapolation)에 의한 오차를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 우선 최초  $S$ 를 위의 두 근사 방법 중 한 가지로 결정한 후에, 변형률 제어 조건에서 인장시험을 실시하여 얻은 응력-유사 변형률 관계로부터 유사 시컨트계수인  $C$ 를 계산한다. 이렇게 초기  $S$ 와  $C$ 의 관계로부터 손상 특성 곡선(damage characteristic curve)을 구현하는데 이를 식 (22)와 같은 함수로 회기분석할 수 있다.

$$C = e^{aS^b} \quad (22)$$

다시 손상 진전 법칙으로 돌아가서, 시간의 증가량은 매우 작기 때문에 손상의 변화율을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (23)$$

식 (23)을 식 (18)에 대입하여 정리하면,

$$S_{i+1} = S_i + \Delta t \left( -\frac{\partial W_i^R}{\partial S} \right)^\alpha \quad (24)$$

또한, 일축 하중을 받는 조건에서 일의 함수( $W^R$ )는 아래와

같다.

$$W_d^R = \frac{1}{2} C(S) \epsilon^R \quad (25)$$

식 (25)를 식 (24)에 대입하고 정리하면 결국 식 (26)을 얻을 수 있다.

$$S_{i+1} = S_i + t \left( -\frac{1}{2} (\epsilon^R) \frac{(\delta C)_i}{\delta S} \right)^\alpha \quad (26)$$

식 (26)에서, 하중이 재하되기 전에  $S$ 와  $C$ 는 각각 0과 1로 가정한다.  $dS$ 는 미리 정의되어야 하고 그 값은 각 시간 단계에서의 손상의 변화량 보다 작은 값이어야 한다(일반적으로 0.1로 설정). 임의의 시간에서의 손상량( $S$ )과 증가된 이후의 손상량( $S+\delta S$ )을 결정한 후,  $C$ 는 식 (22)로 결정한다.  $dC$ 는 다음 (시간)단계에서의 손상의 변화량을 결정하는데 사용한다. 처음 반복 계산 후, 새로운 값  $S$ 와 원래의  $C$ 에 대하여 도식하고 이에 대한 새로운 함수관계가 찾는다. 이 과정은 연속된 계산과정에서 연산결과의 변화가 아주 작을 때까지 반복한다.

그림 1과 그림 2는 두 가지 근사해법과 본 연구에서 제시한 새로운 방법을 통하여 결정된  $S$ 를 보여주고 있다. 본 연구에서 결정된  $S$ (refined values)가 기존의 근사방법에 의해서 결정된 값들의 중간에 있음을 알 수 있다.

그림 2의 손상곡선은 하중재하 상태와 무관한 재료의 고유 특성이다. 식 (8)과 식 (13)에 나타난 바와 같이, 재료의 근본 특성과 리렉세이션 계수가 주어지면 응력을 예측할 수 있으며, 리렉세이션 계수 대신 크리프 컴플라이

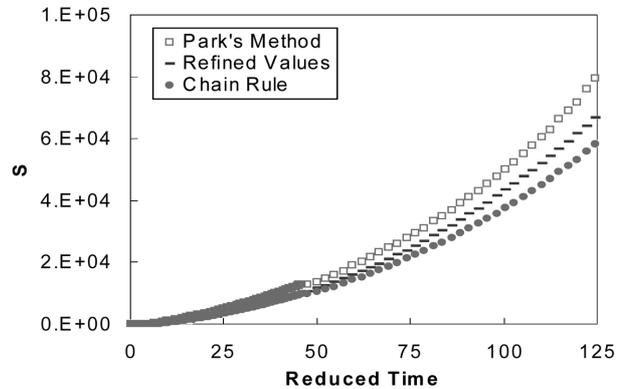


그림 1. 손상평가를 위한 근사해석과 개선된 방법의 비교

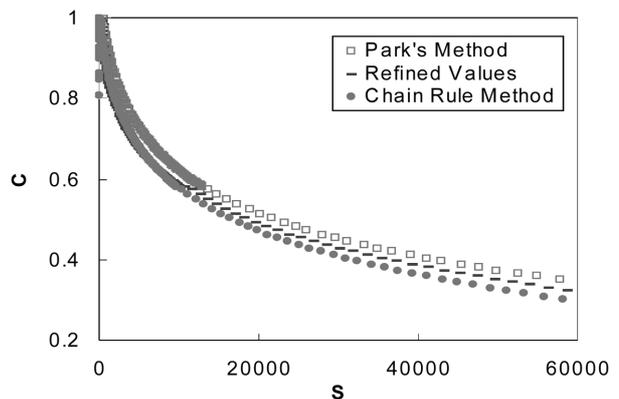


그림 2. 손상 특성 곡선

언스가 주어지면 하중(응력)에 의한 변형률을 예측할 수 있다.

아스팔트 혼합물의 점탄성 손상 특성은 결국 손상 곡선을 비교, 분석하는 것이며 이 손상 곡선은 비교적 간단한 단일 변형률 조건에서의 일축 인장 시험으로 얻을 수 있다. 단, 소성의 영향을 배제하기 위하여 모든 시험은 저온 또는 빠른 속도로 하중이 재하된 경우로 제한해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 모든 시험을 5°C에서 수행하였다. 이 조건에서는 하중을 비교적 느리게 적용할 수 있어, 빠른 변형률 속도에서 발생할 수 있는 동적 영향을 최대한 제한 할 수 있다. 또한 동일한 온도(5°C)에서 최소 3가지 서로 다른 재하속도(strain rate)를 적용하는 것이 바람직하다.

#### 4. 점소성 모형의 개발

인장조건에서의 점탄소성 모형의 개발은 직접인장시험에서 측정된 변형률을 점탄성 변형률과 점소성 변형률로 구분하고, 각각의 모형(점탄성 모형과 점소성 모형)을 개발한 다음 이를 합치는 과정으로 구성되어 있다. 크리프-회복 시험을 실시하면 그림 3과 같이 변형률을 각각의 성분별로 구분하고 시간 종속성을 전체 응답에서 제거하는데 매우 효과적이다. 일반적으로 점소성은 크게 시간에 종속적이거나 시간과 무관한 변형률로 구분한다. 본 연구에서의 점소성 모형의 개발은 Schapery(1999)의 이론을 보완한 Uzan et al.(1985)의 변형률-경화 법칙에 기본을 두고 있다. 식 (27)은 점소성 모형의 기본식으로 점소성 변형률이 변형률-경화 법칙을 따르는 것으로 가정하였다.

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \frac{g(\sigma)}{\eta_{vp}} \quad (27)$$

여기에서,  $\dot{\epsilon}_{vp}$ 는 점소성 변형률의 시간변화율,  $g(\sigma)$ 는 응력의 함수로,  $g(0) = 0$ 이며,  $\eta_{vp}$ 는 재료의 점성을 나타내는 변수이다. 재료의 변화가 지수의 형태라고 가정하면 다음 식 (28)을 얻을 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \frac{g(\sigma)}{A \epsilon_{vp}^p} \quad (28)$$

여기에서  $A$ 와  $p$ 는 재료에 의하여 결정되는 상수이며, 위의 식을 다시 적분형태로 정리하면, 식 (29)와 같다.

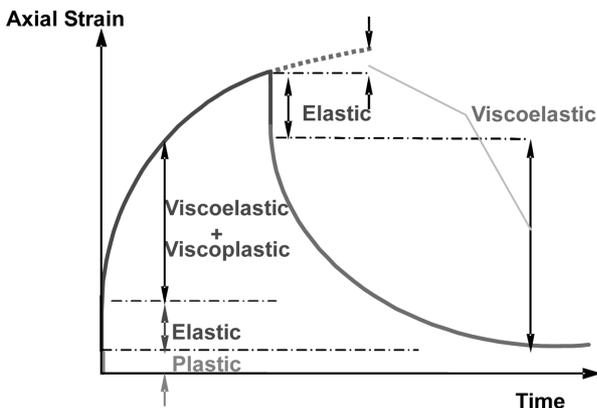


그림 3. 크리프-회복 시험을 통한 변형률 분해 과정

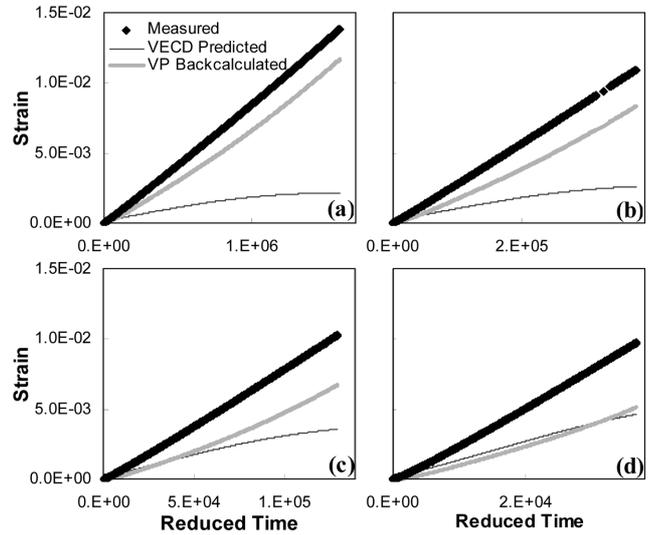


그림 4. 역산으로 결정한 점소성 변형률(온도: 40도): (a) 0.0003  $\dot{\epsilon}$ , (b) 0.001  $\dot{\epsilon}$ , (c) 0.003  $\dot{\epsilon}$ , (d) 0.01  $\dot{\epsilon}$

$$\epsilon_{vp}^{p+1} = \frac{p+1}{A} \int_0^t g(\sigma) dt \quad (29)$$

식 (29)의 양변을  $1/(p+1)$  제곱하고  $g(\sigma) = B\sigma^q$ 로 가정하여 정리하면,

$$\epsilon_{vp} = \left( \frac{p+1}{Y} \right)^{\frac{1}{p+1}} \left( \int_0^t \sigma^q dt \right)^{\frac{1}{p+1}} \quad (30)$$

점소성 모형을 개발하기 위해서는 우선 고온에서 직접인장 시험을 실시하고 점탄성 모형으로 점탄성 변형률을 예측한다. 그런 다음에 전체 변형률에서 점탄성 성분을 제거하고 남은 점소성 성분에 대하여 위 식 (30)으로 회기분석을 실시하면 점소성 모형의 계수인  $p$ ,  $q$ ,  $Y$ 값을 결정할 수 있다.

그림 4는 40°C에서 4개의 서로 다른 변형률제어 조건에서의 직접인장시험의 결과이다. 하중 재하속도에 따라 점탄성과 점소성의 구성비가 달라지는 것을 알 수 있다. 그림 4d에서는 점탄성 변형률과 점소성 변형률의 구성비는 매우 유

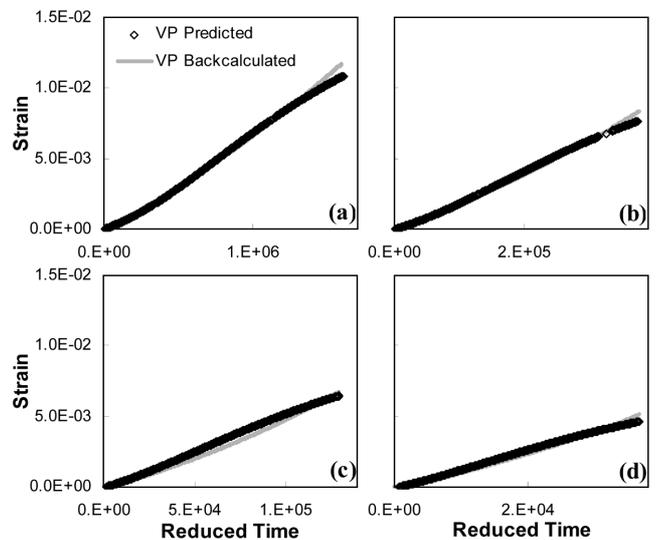


그림 5. 역산으로 결정한 점소성 변형률과 모형으로 예측한 변형률의 비교(온도: 40도): (a) 0.0003  $\dot{\epsilon}$ , (b) 0.001  $\dot{\epsilon}$ , (c) 0.003  $\dot{\epsilon}$ , (d) 0.01  $\dot{\epsilon}$

사하나, 동일한 시험온도라 하더라도 재하속도가 느려지면 점소성 성분이 전체 변형률의 대부분을 차지함을 알 수 있다(그림 4a). 그림 5는 동일한 하중 및 온도 조건에서 측정된 전체 변형률에서 예측한 점탄성 변형률을 제거하고 난 후의 점소성 변형률과 식 (30)을 이용한 점소성 모형의 예측결과를 비교하고 있다.

### 5. 점탄소성 연속체 손상모형

각각 개발한 점탄성과 점소성 변형률 예측 모형을 합하여 주어진 응력 조건에서 아스팔트 혼합물의 전체 변형률을 예측하는 점탄소성 연속체 손상모형(이하 점탄소성 모형)은 다음의 식 (31)과 같다.

$$\epsilon_T = E_R \int_0^{\xi} D(\xi - \xi') \frac{d(C(S))}{d\xi'} d\xi' + \left(\frac{p+1}{Y}\right)^{\frac{1}{p+1}} \left(\int_0^{\xi} \sigma^q d\xi'\right)^{\frac{1}{p+1}} \quad (31)$$

식 (31)은 일축조건에 대하여 개발된 점탄소성 모형을 나타내며, 감쇠시간(reduced time,  $\xi'$ )의 함수이다. 식 (31)의 유도는 근본적으로 아스팔트 혼합물의 시간-온도 중첩이론(time-temperature superposition principle)이 재료 내부 손상이 상당히 진행되어 있는 상태에서도 적용 될 수 있다는 기존의 연구결과로 가능하게 된 것이다. 감쇠시간 및 손상을 고려한 시간-온도 중첩이론은 6.5절에 자세하게 기술하였다.

### 6. 점탄소성 모형의 검증

#### 6.1 재료, 시편제작 및 실험준비

본 연구에서는 미 연방 도로국 포장시험기속기(ALF)에서 공용성 평가를 위해 적용한 4가지 다른 혼합물(1종의 일반 아스팔트 바인더, 3종의 개질제 아스팔트 바인더)을 이용하여 점탄소성 모형의 예측 성능을 검증하였다. 혼합물의 골재 구성은 모두 동일하며 18.0%의 #68 골재, 36.4%의 #78 골재, 17.1%의 #10 골재, 27.5%의 모래, 그리고 1.0%의 석회석으로 이루어진 조립도 12.5 mm 혼합물이 사용되었다. 모든 아스팔트 바인더의 함량은 전체 중량대비 5.3%로 고정되었다. 각 혼합물에 적용한 아스팔트 바인더와 수퍼페이브 공용성 지수는 표 1과 같다.

시험에 사용한 모든 시편은 직경 150 mm의 수퍼페이브 선회 다짐기를 이용하여, 높이 178 mm로 다짐하고 시편을 추출하여 절삭기를 이용하여 높이 150 mm와 직경 75 mm의 시편으로 제작하였다. 모든 시편의 공극률은 3.5%에서 4.5%의 범위 안에 있고, 노화를 방지하기 단단히 밀봉하여 보관하였다. 또한 모든 시편은 2주 이상 보관하지 않도록

표 1. 점탄소성 모형의 검증에 사용된 재료

아스팔트 바인더	혼합물	공용성 등급
일반 바인더(Unmodified)	일반 밀입도 혼합물	70-22
Crumb Rubber Term. Blend	CR-TB	76-28
Styrene-Butadiene-Styrene	SBS	70-28
Ethylene Terpolymer	Terpolymer	70-28

하였다. 시험을 실시하기 전에 각 시편의 상·하단부에 강재로 된 원형 재하판을 부착하였으며 시험 중에 편심하중이 걸리지 않도록 각 재하판의 중심과 시편의 중심이 일치하도록 하였다.

MTS사의 만능시험기로 하중을 재하하고, 각 시험의 특성에 따라 두 단계(8.9 kN, 25 kN)의 하중센서를 번갈아 사용하였다. 축방향 변위(axial deformation)는 시편의 중앙부에 등 간격으로 설치한 4개의 수직 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)로 측정하고 원주방향(radial) 변위는 시편의 중앙평면에 일정한 간격으로 설치한 4개의 스프링 반응 방식의 LVDT를 이용하여 측정하였다. 하중 센서에서 감지한 하중과 크로스헤드의 변위를 포함한 모든 측정값의 수집과 분석은 National Instrumentation (NI)사의 LabView를 이용하였다.

본 연구에서 시행된 시험은 다음과 같이 크게 손상을 유발하지 않는 시험과 손상을 유발하는 시험으로 구분할 수 있다.

- 손상을 유발하지 않는 시험 : 복소수계수 시험(complex modulus test, AASHTO TP-62),
- 손상을 유발하는 시험,
  - 단일 변형률 시험(constant crosshead rate test),
  - 단일 변형률 피로 시험(constant crosshead cyclic test),
  - 임의 하중 이력에 의한 피로 시험(random load cyclic test).

단일 변형률 시험은 5°C 및 40°C에서 수행되었으며, 점탄소성 모형의 검증을 위한 단일 변형률 피로 시험과 임의 하중 이력에 의한 피로시험은 모두 25°C에서 수행되었다. 구

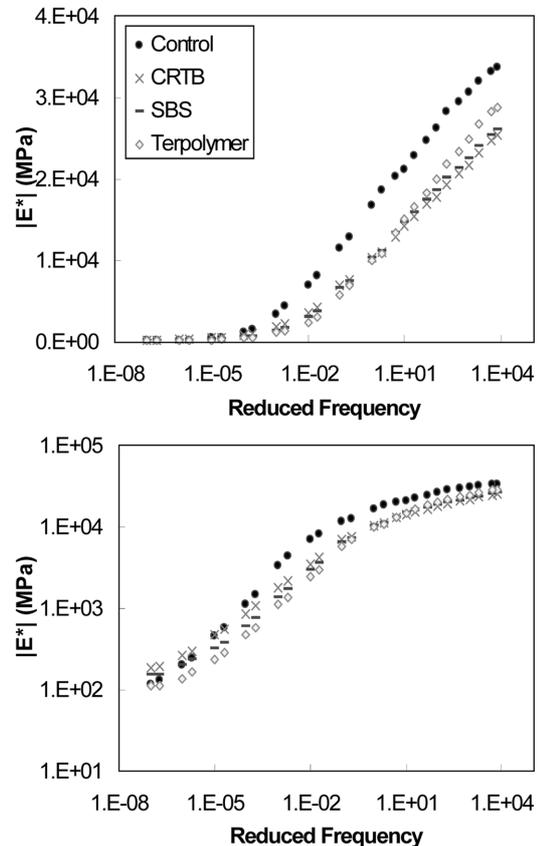


그림 6. 동탄성계수 주곡선: (위) 반대수 공간, (아래) 대수공간

체적인 시험조건은 다른 문헌(Kim et al., 2004)에 자세하게 기술되어 있다.

### 6.2 혼합물의 선형 점탄성 특성(LVE Characterization)

그림 6은 본 연구에 사용된 4가지 혼합물의 동탄성계수의 주곡선을 대수공간 또는 반대수 공간에서 표현한 결과이다. 수직축의 감쇠주파수(reduced frequency)는 시간-온도 전이계수와 하중 주파수를 곱한 값이다. 높은 감쇠주파수(저온)에서 일반 아스팔트 혼합물이 다른 혼합물에 비하여 큰 강성을 나타내며, SBS와 CR-TB혼합물은 서로 비슷한 정도의 강성을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 SBS와 CR-TB의 주곡선은 일반 혼합물과 Terpolymer에 비하여 변이구간에서 상대적으로 경사가 작은 것을 알 수 있는데, 주곡선의 경사( $n$ )는 재료의 시간 종속성을 나타내는 지표이다. 중간 변이구간에서 주곡선의 급한 경사는 재료의 거동이 시간에 민감함을 의미하며, 완만한 경사는 시간 종속성이 낮음을 나타낸다. 결과적으로 낮은 감쇠주파수(고온)에서, CR-TB와 SBS혼합물이 가장 큰 강성을 보였으며, 높은 감쇠주파수(저온)에서는 그 반대의 결과가 나왔다.

표 2에는 각 주곡선의 최저 및 최고 점근선이 각각 수직축과 만나는 값인  $E_0$ 와  $E_{inf}$  그리고 대수공간에서의 주곡선의 최대 기울기( $n$ )가 정리되어 있다.  $E_0$ 와  $E_{inf}$ 는 각각 재료의 탄성계수와 최대 강성을 의미한다.

그림 7은 각 혼합물의 위상각의 주곡선을 보여주고 있다. 점탄성론에 의하면 위상각이 작으면 탄성이 재료 거동의 주요 성분임을 의미한다. 본 연구에 사용된 개질재는 탄성 중합체로 아스팔트 혼합물의 탄성을 증가시키는 목적으로 사용된다. 그러나 예상한 바와는 달리, 일부조건에서만 그 증가효과가 나타남을 알 수 있다. 특히 높은 감쇠주파수에서는 일반 아스팔트 바인더(PG70-22)를 이용한 아스팔트 혼합물이 더 큰 탄성을 보이는 것으로 나타났다.

개질재 혼합물이 보이는 고온에서의 높은 탄성은 개질용 첨가제에 의한 분자간의 결합력(crosslinking) 증가가 주요

원인이다. 고온(낮은 감쇠주파수)에서는 결합력 증가를 위한 분자 재배열에 시간적 여유가 있어 탄성이 일반 혼합물에 비하여 높지만, 저온 혹은 빠른 재하속도에서는 분자가 방향을 결정하기까지 시간이 충분하지 않아서 결합력이 상당히 감소한다(Ferry, 1961). 그림 7에서 보면 3개의 개질재 혼합물이 높은 감쇠주파수(저온)에서는 서로 유사한 위상각을 보이지만, 감쇠주파수가 낮아짐에 따라 개질재 혼합물 사이에도 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 저온(높은 감쇠주파수)에서 일반 혼합물의 탄성이 개질재 혼합물보다도 상대적으로 높은 이유는 개질 바인더의 품질이 일반 바인더 보다 낮은 것을 사용했기 때문이다.

다음은, 각 혼합물의 점탄성 손상을 이해하기 위하여 각각의 혼합물에 대한 손상 곡선을 비교하였다. 4가지 혼합물의 손상 곡선은 그림 8과 같다. 이 곡선에서 CR-TB와 일반 아스팔트 혼합물이 가장 바람직한 손상 특성을 나타내는 것을 알 수 있으며, 그 다음으로 SBS와 Terpolymer 혼합물인 것으로 나타났다. 그러나 이 손상 곡선만으로는 어떤 혼합물이 최적이라고 단정할 수 없는데, 아스팔트 혼합물의 피로균열에 대한 저항 성능을 평가할 때에는 변형에 대한 저항성과 손상에 대한 저항성을 모두 고려해야 하기 때문이다. 따라서, 그림 8에 나타난 순위는 혼합물의 손상에 대한 저항하는 능력만을 나타내며, 실제 하중 조건에서는 점소성과 같은 별도의 특성이 혼합물의 특성을 크게 결정짓기 때문에 공용성에 대한 순위는 바뀔 수 있다.

### 6.3 점소성 특성화(VP Characterization)

점탄소성 모형 개발의 기본 조건인 변형률 분해 원리에 입각하여 우선 각 혼합물의 점소성에 미치는 재하속도(strain rate)와 온도의 영향을 살펴보고자 한다. 그림 9는 단일 변형률 시험에서 각 혼합물의 점소성이 재료의 거동에 미치는 영향으로 시험온도인 5°C에서 점소성이 차지하는 비율을 나타내고 있다. 각 곡선의 데이터는 일정한 재하속도와 온도에서 수행된 하나의 시험 결과로부터 얻어진 것이다. 일반적으로 감쇠변형률 속도(reduced strain rate)가 증가하면 점소성이 감소하는 것을 알 수 있다. 이미 알고 있는 바와 같이 아스팔트 콘크리트 혼합물의 거동은 온도와 재하속도에 민감하고, 감쇠변형률 속도는 물리적 변형률 속도와 온도의 함수이므로, 변형률 속도가 충분히 느릴 경우에는 저온에서도 아스팔트 혼합물이 점소성 거동 보일 수 있음을 알 수 있다.

표 2. 각 혼합물의 선형 점탄성의 주요 지표

변수	일반 밀입도	CR-TB	SBS	Terpolymer
n	0.47	0.34	0.38	0.41
$E_0$ (MPa)	38729	32183	30218	34884
$E_{inf}$ (MPa)	41	79	97	68

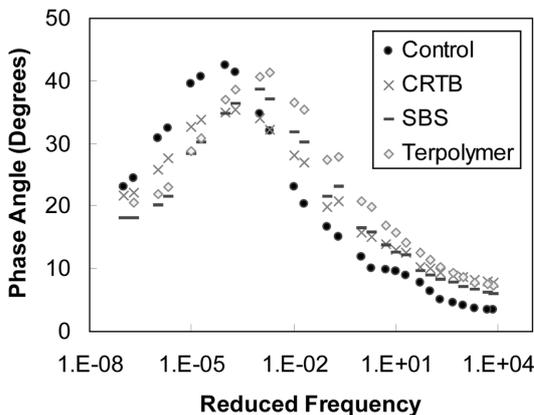


그림 7. 위상각의 주곡선

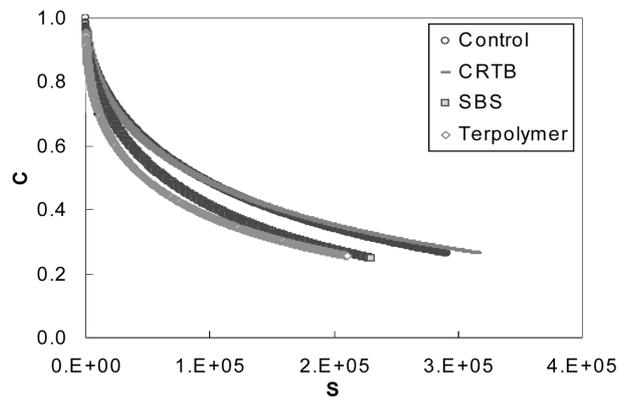


그림 8. 검증에 사용된 혼합물의 손상 특성 곡선

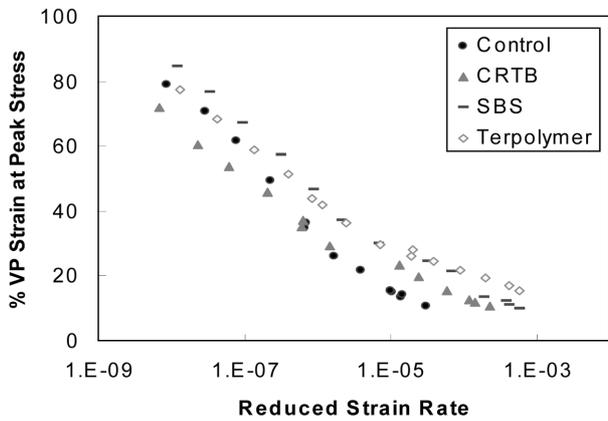


그림 9. 점소성 변형률의 영향

감쇠 변형률 속도가 느린 경우 CR-TB 혼합물이 다른 혼합물에 비하여 상대적으로 점소성 거동이 이 작게 나타났다. 전반적으로 일반 혼합물이 Terpolymer와 SBS에 비하여 점소성이 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 일반 혼합물의 기울기가 상대적으로 급하기 때문에 시험조건이 본 연구에서 적용한 범위를 벗어나면 다른 개질 혼합물 보다 큰 점소성 거동을 보일 수 있음을 추정할 수 있다.

#### 6.4 손상을 고려한 시간-온도 중첩이론

손상을 고려한 시간-온도 중첩이론은 점탄소성 모형 개발에서 매우 역할을 한다. 지금까지 시간-온도 중첩 이론은 다양한 온도 또는 시간/주파수 조건에서 점탄성 재료의 거동을 예측하는데 사용되었다. 그러나 재료에 손상이 없는 경우에만 이 이론이 적용될 수 있는 것으로 알고 있었다. 그러나, Chehab와 공동연구자(Chehab et al., 2003)는 인장조건에서 시간-온도 중첩이론이 선형 점탄성 영역(즉, 손상이 없는 조건)뿐만 아니라 재료 내부에 손상이 크게 발생한 경우에도 적용될 수 있음을 보였다. 아울러, 특정 온도와 하중조건에서의 재료의 거동을 전혀 다른 온도에서도 동일한 감쇠이력을 갖는 하중조건을 적용하면 예측이 가능함을 밝혔다. 이러한 발견으로 모형개발에 필요한 많은 시간과 비용을 절감할 수 있게 되었다. 이 이론은 점탄소성 모형의 개발에서 식 (32)와 같이 물리적 시간을 감쇠시간으로 바꾸어서 적용할 수 있다. 단, 온도가 시간에 따라 바뀌지 않을 경우에는 감쇠시간은 식 (33)으로 구할 수 있다.

$$\xi = \int_0^t \frac{dt}{a_T} \quad (32)$$

$$\xi = \frac{t}{a_T} \quad (33)$$

여기서,  $a_T$  = 시간-온도 전이계수(time-temperature shift factor)

Chehab et al.(2002)의 연구에서는 한 가지 혼합물에 대한 인장조건에서의 시험만 실시하였으며, 개질 혼합물에 대한 검증을 수행하지는 않았다. 본 연구에서 여러 가지 혼합물의 특성화 및 검증을 위하여 다음과 같은 시험을 수행하였다. 먼저, 다양한 온도 및 하중 재하 속도에서 각각 단일 변형률 시험을 실시하고 특정 변형률에 대응하는 각 시험자료의

응력과 물리적 시간을 결정한다. 각각의 물리적 시간은 복소수계수 시험으로 결정된 시간-온도 전이계수를 이용하여 감쇠시간으로 바꾼다. 그래서 측정된 데이터가 응력-감쇠시간 공간에서 하나의 연속적인 곡선(주곡선)으로 표현되면 재료의 손상이 존재하는 경우에도 시간-온도 중첩이론이 유효하다는 것을 의미한다.

시험을 이용한 이론의 검증은 가능하면 다양한 조건(변형률 수준)에서 수행하는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 각각의 혼합물에 대하여 6개의 서로 다른 변형률 수준(0.0001, 0.0005, 0.001, 0.0022, 0.004, 그리고 0.005)을 선택하였다.

그림 10은 일반 혼합물에 대하여 실제 측정된 응력-변형률 곡선과 6개의 변형률 수준을 나타내고 있다. 다른 개질재 혼합물에 대해서도 동일한 변형률 수준을 적용하였다. 그림 11은 각각의 변형률 수준에서 응력-시간 곡선이며 각 데이터는 하나의 시험결과로부터 얻었다. 응력-시간 공간에서는 서로 다른 온도에 따라 측정된 데이터가 서로 겹치지 않음을 알 수 있다. 하지만 각각의 변형률 수준에서 시간-온도 중첩

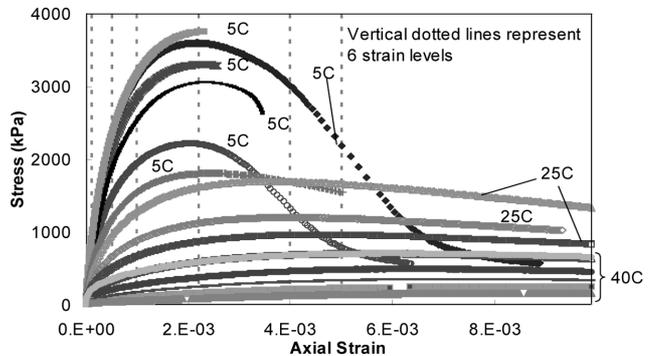


그림 10. 시간-온도 중첩이론 적용을 위한 6개의 변형률 수준과 응력-변형률 곡선(일반 혼합물)

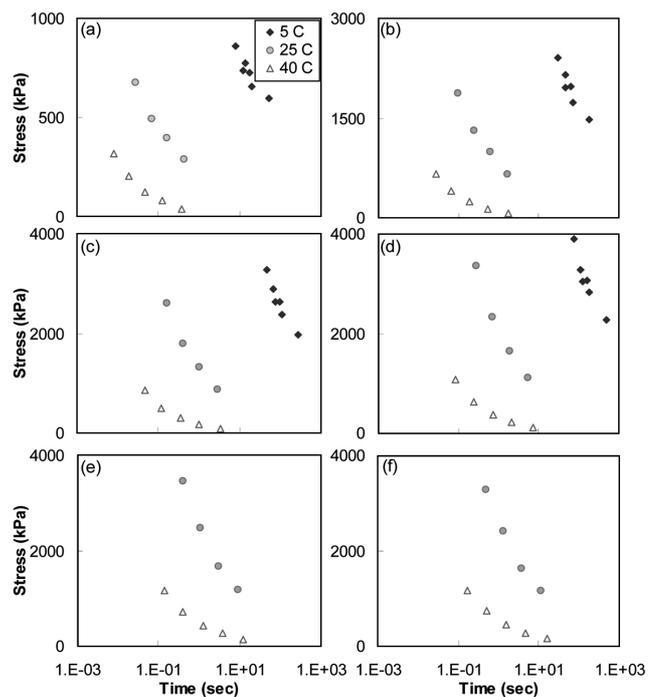


그림 11. 6개의 변형률 수준에서 응력-시간 곡선(일반 혼합물) : (a) 0.0001, (b) 0.0005, (c) 0.001, (d) 0.0022, (e) 0.004, (f) 0.005

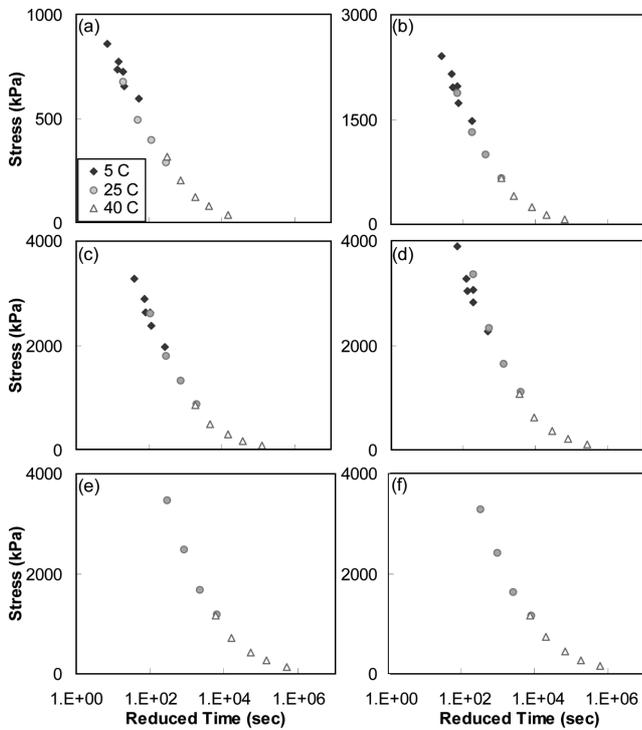


그림 12. 6개의 변형률 수준에서 응력 주곡선(일반 밀입도, 기준온도: 25°C): (a) 0.0001, (b) 0.0005, (c) 0.001, (d) 0.0022, (e) 0.004, (f) 0.005

이론에서 얻어진 전이계수를 이용하여 시간을 감쇠시간으로 변환하면, 그림 12와 같이 모든 변형률에서 연속적인 단일 응력-감쇠시간 곡선을 얻을 수 있다. 즉 손상이 있는 재료에서도 시간-온도 중첩이론이 유효하다는 결과이다.

### 6.5 점탄소성 모형의 검증

본 논문에서 개발된 점탄소성 모형의 검증은 1) 간소화된 방법과 2) 정밀한 방법 두 가지로 나누어 수행하였다. 두 경우 모두 기본적으로 실내시험으로 측정된 응력-시간 곡선을 점탄소성 모형에 입력하여 변형률을 예측하고 이를 측정된 변형률과 비교하였다.

간소화된 모형 검증 방법은 5°, 25°, 40°C에서 측정된 단일 변형률 시험 결과를 본 연구에서 개발한 모형으로 예측하는 것이다. 특히, 25°C에서의 측정결과는 모형개발에 전혀 사용되지 않았으므로, 모형의 예측 성능을 객관적으로 평가할 수 있다고 판단하였다. 그림 13과 같이 일반 혼합물의 경우 모든 시험조건에서 변형률을 정확하게 예측하는 것으로 나타났으며, 본 논문에는 제시하지 않으나, 개질 아스팔트 혼합물에 대해서도 유사한 결과를 보였다.

정밀한 모형검증을 위하여 그림 14와 같이 하중 주파수와 진폭, 하중재하 수가 임의로 결정된 피로시험을 25°C에서 수행하고 측정값과 모형이 예측한 값을 비교하였다. 모든 측정 자료는 시편에 변형률의 지역화 현상(strain localization)이 발생하기 전 단계만을 검증에 사용하였다. 변형률의 지역화 현상은 물리적으로 시험재료 내부의 미세균열이 거시균열로 진행하여 재료의 거동을 지배하기 시작하는 것을 의미하며, 이 단계에서는 측정된 변형률이 시편의 변형률을 대표한다고 말하기 어렵기 때문이다(Chehab et al., 2002). 단일 변형률 시험에서 변형률의 지역화 현상은 일반적으로 최고

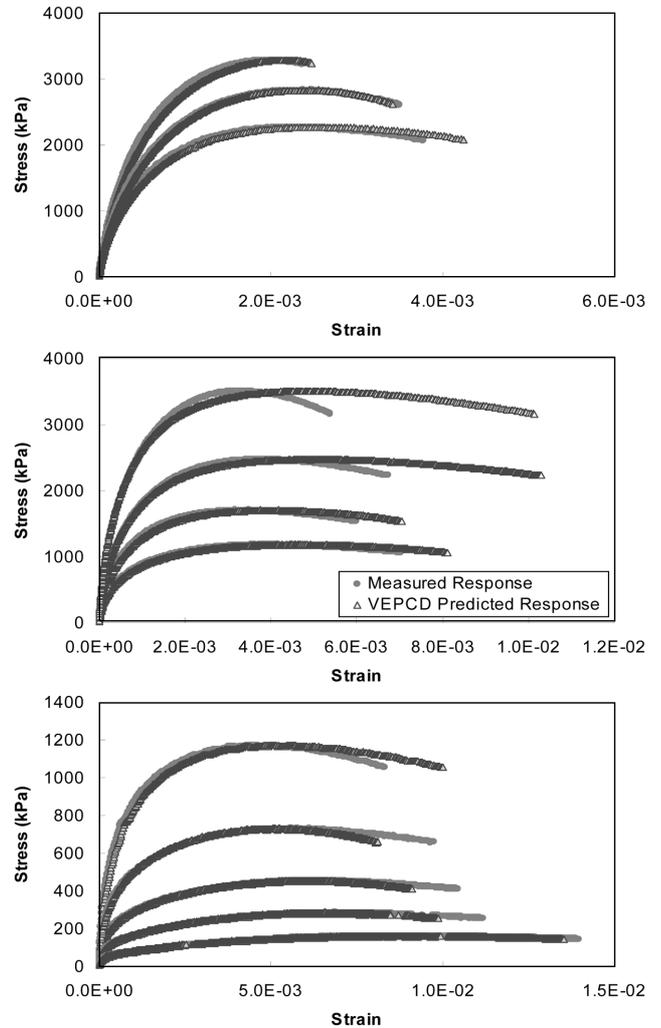


그림 13. 단일 변형률 시험 결과와 VEPCD 모형의 예측(일반 혼합물): (상) 5°C, (중) 25°C, (하) 40°C

응력(강도)의 약 90% 수준에서 발생하는 것으로 조사되었다. 한편, 모든 피로시험에서는 시편 중앙에 서로 다른 계측 길이(100 mm와 75 mm)를 갖는 LVDT를 설치하고 시험 중에 측정된 변형률이 서로 차이가 나는 때를 변형률의 지역화 현상의 시점으로 정의하였다.

그림 14의 하중이력은 검증에 사용된 모든 혼합물에 대하여 동일하게 적용하였다. 그림 15는 일반 혼합물에 시험결과로 점탄소성 모형의 예측성능이 매우 우수함을 보여주고 있다. 본 논문에서 제시하지는 않았지만 나머지 개질 혼합물에 대해서도 유사한 결과를 얻었다. 각 혼합물에 대한 피로 수명을 비교하여 본 결과, CR-TB를 제외한 모든 개질 혼합물이 일반 혼합물 보다 피로에 대한 저항성이 낮은 것으로 나타났다. 이는 개질 혼합물의 공용성이 일반 아스팔트보다 더 낮다고 알려진 바와 다른 결과로 이에 대한 보다 정확한 검증을 위하여 두 가지 시험이 추가로 수행되었다. 우선 첫 번째로 피로 시험(controlled-crosshead cyclic test)을 실시하였다. 이 시험은 시편에 응력제어와 변형률제어의 혼합된 응력상태를 유발하여 실제 공용시의 포장이 받는 조건과 유사한 조건을 구현할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 장비문제로 인하여, 서로 다른 강성을 갖는 시편에 대해 정확하게 동일한 하중조건을 적용하기 어렵다는 단점도 있다. 각 혼합물에 대한 시험결과는 표 3과 같으며, 파괴기준에 상관없이

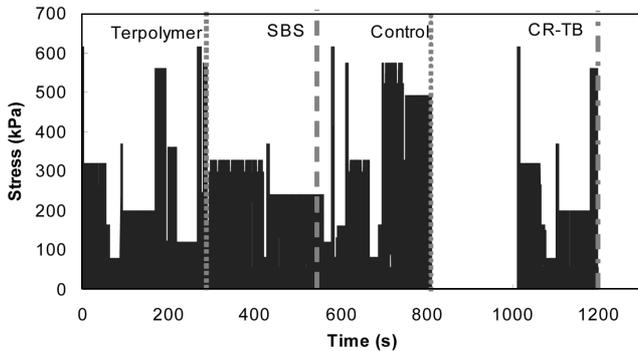


그림 14. 점탄소성 모형 검증을 위한 피로시험과 각 혼합물의 파괴시점

SBS나 Terpolymer와 같은 개질 혼합물의 공용성이 일반 혼합물에 비하여 매우 우수한 것으로 나타났다. 특히, 개질 혼합물의 초기 변형률이 매우 큰 점을 감안하면 실제 공용 성능의 차이는 매우 크다고 할 수 있다.

두 번째 추가시험은 단일 수준의 하중제어 피로 시험(controlled-load cyclic test)으로 750kPa의 응력을 4Hz의 속도로 재하 하여 시편이 완전히 파괴될 때까지 실시하였다. 시험온도는 19°C이고 시험결과는 표 4와 같다.

임의 하중이력을 갖는 피로시험, 크로스헤드 제어 시험 그리고 하중제어 피로 시험의 결과가 서로 다름을 알 수 있다. 실제 포장에 적용된 혼합물은 응력제어도 변위(변형률)제어도 아닌 복합적인 형태의 하중이력을 받는다. 이러한 복합적인 하중형태(mode of loading)는 포장의 두께, 각 혼합물의 강성 또는 하부구조의 지지력과 같은 요소에 영향을 받는다. 또한, 그림 14와 표 4에서와 같이 혼합물의 공용성은 하중 형태의 단순한 함수도 아니고, 하중의 크기 그리고 재하순서에도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

위에서 언급한 모든 시험조건을 하나의 실내시험으로 모두 고려할 수는 없다(Tangella et al., 1990). 따라서, 실내시험으로는 재료의 기본 물성을 정확하게 평가하는 데에만 활용하고, 이를 기반으로 구성된 방정식(혹은 모형)을 이용하여

표 3. 피로시험(crosshead-controlled cyclic test) 결과

혼합물	일반	CR-TB	SBS	Terpolymer
초기 강성(MPa)	8800	4600	4750	4200
초기 변형률	2.67E-04	3.33E-04	3.00E-04	4.28E-04
피로수명, $N_f$				
50% 강성 감소	11800	4000	17627	123680
위상각 감소	16300	26800	>125000	>140000
시편의 파괴	18000	60000	>125000	>140000
공용성 순위	4	3	2	1

표 4. 하중 제어 피로 시험(load-controlled cyclic test) 결과

혼합물	일반	CR-TB	SBS	Terpolymer
초기 강성 (MPa)	8800	4600	4750	4200
초기 변형률	8.52E-05	1.63E-04	1.58E-04	1.79E-04
피로수명, $N_f$	4770	2364	672	740
순위	1	2	4	3

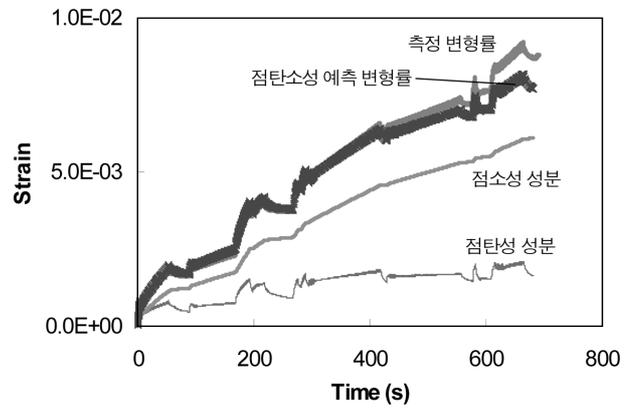


그림 15. 임의 하중에 의한 피로시험 결과와 점탄소성 예측 변형률(일반 밀입도 혼합물)

다양한 조건에서의 각 재료의 공용성을 평가하여야 한다고 판단된다.

## 7. 결 론

인장 조건에서의 아스팔트 혼합물의 거동을 정확하게 예측하기 위하여 점탄소성 연속체 손상(ViscoElastoPlastic Continuum Damage, VEPCD)모형을 개발하였다. 아스팔트 혼합물의 변형률을 점탄성과 점소성으로 구분하여 해석하고 이를 바탕으로 각각의 응답 모형을 개발하였다. 점탄성 연속체 손상(VECD)모형으로는 미세균열이 진전되는 아스팔트 혼합물의 시간 의존적 거동을 해석하였으며, 고온이나 저속에서의 아스팔트 혼합물의 영구 변형은 점소성(VP) 모형으로 예측하였다.

변형률 분해 원리에 근거하여 이 두 모형을 결합하여 점탄소성 연속체 손상모형(VEPCD)을 제시하였다. 점탄소성 모형의 검증을 위하여 4가지 혼합물(일반 혼합물, SBS, CR-TB, Terpolymer)에 대하여 1) 3개의 서로 다른 온도에서 단일 변형률 시험과 2) 25°C에서 임의 하중조건을 모사한 피로 시험을 실시하였다. 특히 실제 포장이 받는 임의의 교통하중을 모사한 시험에서도 아스팔트 혼합물의 변형률 거동을 정확하게 예측할 수 있었다. 그러나, CR-TB를 제외한 모든 개질 혼합물이 일반 밀입도 혼합물 보다 피로에 대한 저항성이 낮은 것으로 나타났다. 이는 개질 혼합물의 공용성이 일반 아스팔트보다 더 낮다고 알려진 것과 상반되는 결과로 이에 대한 보다 정확한 검증을 위하여 두 가지 시험이 추가로 수행되었다.

첫 번째 추가시험인 크로스헤드 제어 피로시험 결과 파괴 기준에 상관없이 SBS나 Terpolymer와 같은 개질 혼합물의 피로 저항성이 일반 혼합물에 비하여 매우 우수한 것으로 나타났다. 두 번째 추가 시험에서는 일반 밀입도 혼합물의 피로 저항성이 가장 좋은 것으로 나타났다. 이렇듯, 아스팔트 혼합물의 공용성은 하중형태의 단순한 함수도 아니고, 하중의 크기 그리고 재하순서에 복합적으로 영향을 받는다. 그러나, 실내시험에서 위의 조건을 모두 고려할 수는 없다. 따라서, 실내시험으로는 재료의 기본 물성을 정확하게 평가하는 데에만 활용하고, 이를 기반으로 구성된 방정식(혹은 모형)을 이용하여 다양한 조건에서의 각 재료의 공용성을 평가

하여야 한다고 판단된다.

직접인장하중에 의한 점탄소성 모형은 향후 간접인장모드에서 그 성능을 검증하고, 압축하중(삼축압축조건)에 의한 점탄소성 모형과 함께 유한요소해석 프로그램인 VEPCD-FEP++의 주요 해석 모듈로 포함될 예정이다.

## 감사의 글

본 논문은 한국도로공사 도로교통기술원의 과제인 “시험도로 아스팔트 포장의 점탄소성 연속체 모형의 개발 연구”의 주요 성과임을 밝힙니다.

## 참고문헌

- Chehab, G., Kim, Y.R., Schapery, R.A., Witczack, M., and Bonaquist, R. (2002) Time-temperature superposition principle for asphalt concrete mixtures with growing damage in tension state. *AsphaltPavingTechnology*, AAPT, Vol. 71, pp. 559-593.
- Chehab, G. (2002) *Characterization of Asphalt Concrete in Tension Using a Viscoelastoplastic Model*. Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Chehab, G., Kim, Y.R., Schapery, R.A., Witczack, M., Bonaquist, R. (2003) Characterization of asphalt concrete in uniaxial tension using a viscoelastoplastic model. *Asphalt Paving Technology*, AAPT, Vol. 72, pp. 315-355.
- Daniel, J.S. (2001) *Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic, Continuum Damage Model and its Implementation to WesTrack Mixtures*. Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Daniel, J.S. and Kim, Y.R. (2002) Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic continuum damage model. *AsphaltPavingTechnology*, AAPT, Vol. 71, pp. 619-650.
- Deacon, J.A., Tayebali, A.A., Rowe, G.M., and Monismith, C.L. (1995) *Validation of SHRP A-003A Flexural Beam Fatigue Test*. In Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to Their Performance, ASTM STP 1265. pp. 21-36.
- Ferry, J.D. (1961) *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Kim, Y.R. and Little, D.N. (1990) One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete. *ASCE Journal of Engineering-Mechanics*, Vol. 116, No. 4, pp. 751-772.
- Kim, Y.R. and Chehab, G. (2004) *Development of a Viscoelastoplastic Continuum Damage Model for Asphalt-Aggregate Mixtures: Final Report As Part of Tasks F and G in the NCHRP 9-19 Project*, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Lee, H.J. and Kim, Y.R. (1998) A uniaxial viscoelastic constitutive model for asphalt concrete under cyclic loading. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 1, pp. 32-40.
- Park, S.W., Kim, Y.R., and Schapery, R.A. (1996) A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. *Mechanics of Materials*, Vol. 24, No. 4, pp. 241-255.
- Rao Tangella, S.C., Craus, J., Deacon, J.A. and Monismith, C.L. (1990) *Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures*. Report TM-UCB-A-003A-89-3. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C.
- Schapery, R.A. (1981) On Viscoelastic deformation and failure behavior of composite materials with distributed flaws. *Advances in Aerospace Structures and Materials*, AD-01, ASME, New York, pp. 5-20.
- Schapery, R.A. (1984) Correspondence principles and a generalized j-integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. *Int. Journal of Fracture*, Vol. 25, pp. 195-223.
- Schapery, R.A. (1990) A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 38, pp. 215-253.
- Schapery, R.A. (1990) Simplification in the viscoelastic behavior of composites with growing damage. *Proceedings of the IUTAM Symposium in Inelastic Deformation of Composite Materials*, G.J. Dvorak (ed.), Springer-Verlag, Berlin, Vol. 1, pp. 193-214.
- Schapery, R.A. (1999) Nonlinear viscoelastic and viscoplastic constitutive equations with growing damage. *Int. Journal of Fracture*, Vol. 97, pp. 33-66.
- Simo, J.C. and Hughes, T.J.R. (1998) *Computational Inelasticity*. Springer-Verlag, New York.
- Uzan, J. (1996) Asphalt concrete characterization for pavement performance prediction. *AsphaltPavingTechnology*, AAPT, Vol. 65, pp. 573-607.

(접수일: 2007.11.13/심사일: 2007.12.14/심사완료일: 2007.12.14)