

콘크리트 재료의 동적 물성 변화를 모사하기 위한 유변학적(Rheological) 모델 개발 및 평가

황영광* · 임윤묵**

Hwang, Young Kwang*, Lim, Yun Mook**

Rheological Models for Simulations of Concrete Under High-Speed Load

ABSTRACT

In this study, the rheological models were introduced and developed to reflect rate dependent tensile behaviour of concrete. In general, mechanical properties(e.g. strength, elasticity, and fracture energy) of concrete are increased under high loading rates. The strength of concrete shows high rate dependency among its mechanical properties, and the tensile strength has higher rate dependency than the compressional strength. To simulate the rate dependency of concrete, original spring set of RBSN(Rigid-Body-Spring-Network) model was adjusted with viscous and friction units(e.g. dashpot and Coulomb friction component). Three types of models(1) visco-elastic, 2) visco-plastic, and 3) visco-elasto-plastic damage models) are considered, and the constitutive relationships for the models are derived. For validation purpose, direct tension test were simulated, and characteristics of the three different rheological models were compared with experimental stress-strain responses. Simulation result of the developed visco-elasto-plastic damage(VEPD) model demonstrated well describing and fitting with experimental results.

Key words : Rheological model, Rate dependency, Direct tension test, Strain rate

초 록

본 연구에서는 속도 의존성을 나타내는 콘크리트의 인장거동을 모사하기 위하여 유변학적(rheological) 모델을 개발하였고 이를 평가하였다. 일반적으로 외부에서 가해지는 하중 속도가 증가할수록 콘크리트의 물성(강도, 탄성계수, 파괴에너지 등)은 그 크기가 증가한다. 콘크리트의 강도는 다른 물성에 비하여 큰 속도의존성을 나타내고, 압축 하중인 경우보다 인장 하중을 받는 경우 그 속도의존성이 크게 나타난다. 이러한 콘크리트의 속도 의존성을 모사하기 위하여, 기존 RBSN(Rigid-Body-Spring-Network) 모델의 거동을 나타내는 스프링 세트에 대쉬포트(Dashpot)와 같은 점성 요소와 Coulomb 마찰 요소를 조합하였다. 요소의 조합에 따라 세 가지 모델(1)점탄성, 2)점소성, 3)점탄소성 손상(Damage 모델)을 고려하였고, 이에 대한 구성관계식을 유도하였다. 개발된 해석모델은 직접인장 실험의 응력-변형률 관계곡선과 비교 검증되었고, 이중 점탄소성 손상 모델은 실험결과를 잘 모사할 수 있음을 확인하였다.

검색어 : 유변학적 모델, 속도의존성, 직접인장시험, 변형률속도

* 연세대학교 토목환경공학과 석박사통합과정 (Yonsei University · youngkwang@yonsei.ac.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Yonsei University · yunmook@yonsei.ac.kr)

Received March 20, 2015/ revised April 30, 2015/ accepted June 11, 2015

1. 서론

콘크리트는 속도의존성을 가진 재료로서, 외부에서 가해지는 하중 속도에 따라 콘크리트의 강도, 탄성계수, 파괴에너지 등의 물성은 다르게 나타나며, 하중 속도가 증가할수록 물성의 속도의존성은 더 크게 증가한다(Bischoff and Perry, 1991; Malvar and Ross, 1998). 이러한 재료 물성의 속도의존성은 DIF(Dynamic Intensity Factor)라 불리는 곡선으로 표현될 수 있는데, 이는 변형을 속도에 따른 재료의 동적 물성과 정적 물성의 비율을 도시한 곡선이다.

콘크리트의 강도는 다른 물성에 비하여 더 큰 속도 의존성을 나타내며(Bischoff and Perry, 1995; Hentz et al., 2004; Toutlemonde, 1995), 강도에 대한 DIF를 구하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다(Groute et al., 2001; Hughes and Gregory, 1972; Ross et al., 1989). Fig. 1은 실험 결과로 얻은 DIF 곡선(Malvar and Ross, 1998)이다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 콘크리트의 동적 강도 상승비가 변형을 속도에 따라 크게 두 구간으로 나타나며, 낮은 단계에서 중간 단계의 변형률 속도(약 $10^1/s$)까지는 완만히 증가하다가 이후 급격히 증가하는 양상을 나타낸다. 이러한 콘크리트 속도의존성의 정확한 메커니즘은 규명되지 않았지만, 이는 Stefan effect라 불리는 현상으로 설명될 수 있으며, 이 현상을 간략히 기술하면 다음과 같다(Rossi, 1991). 얇은 판 사이에 점성유체가 존재하고 외부의 힘을 가해 두 판을 분리시킬 때, 외부 하중의 속도가 증가할수록 유체가 판을 잡아당기는 점성력은 크게 나타난다. 콘크리트 안에는 수많은 미세공극이 존재하며, 공극 속에는 점성을 가진 자유수(free water)가 존재한다. 때문에, 이러한 콘크리

트에 가해지는 하중 속도에 따라서 콘크리트는 Stefan Effect와 같은 속도의존적인 저항을 나타내어 빠른 하중속도에 대하여 더 큰 저항력을 갖게 된다. 높은 단계의 변형률 속도에서는 콘크리트의 파괴영역(Fracture process zone)에서의 micro-/meso-inertia에 의한 효과가 재료의 파괴를 지배하게 된다(Pedersen et al., 2008; Vegt et al., 2006).

이러한 콘크리트의 속도의존성은 유변학적(rheological) 모델을 통한 거시적인(macroscopic) 방법으로 모사될 수 있다. 선행 연구에서는 손상을 고려한 점소성 모델이 개발되어 동해석 및 동하중을 받는 콘크리트 균열을 해석하는데 사용되었다(Barpi, 2004; Gatuing and Pijaudier-Cabot, 2002; Kim et al., 2013; Kim, 2011; Kim and Lim, 2011; Kim et al., 2011). 본 연구에서는 기존 개발된 점소성 손상 모델을 점탄성 요소와 결합하여, 콘크리트의 속도의존적인 두 가지 현상(Stefan effect, Inertia effect)을 효과적으로 모사할 수 있는 모델을 평가하였다.

본 논문에서 평가된 재료 모델은 무작위 격자 모델의 일종인 RBSN(Rigid-Body-Spring- Network) 모델을 기반으로 개발되었다. RBSN은 재료를 강체들의 조합으로 나타내고, 강체와 강체 사이에는 스프링 조합이 존재하여 재료의 거동을 나타낸다(Bolander and Saito, 1998). Fig. 2는 2차원에서의 RBSN 요소를 나타내며, 셀과 셀 사이의 경계면에는 크기가 없는 세 방향(수직, 전단, 회전) 스프링이 존재한다. 속도 의존성을 모사하기 위하여 기존 스프링 세트에 점탄성, 점소성 요소를 결합하였고, 스프링의 손상(Damage)이 고려된 세 가지 모델(점탄성 손상(VED), 점소성 손상(VPD), 점탄소성 손상(VEPD))이 고려되었으며(Fig. 3), 각 모델에 대한 구성방식을 유도하고 이에 대한 검증을 수행하였다.

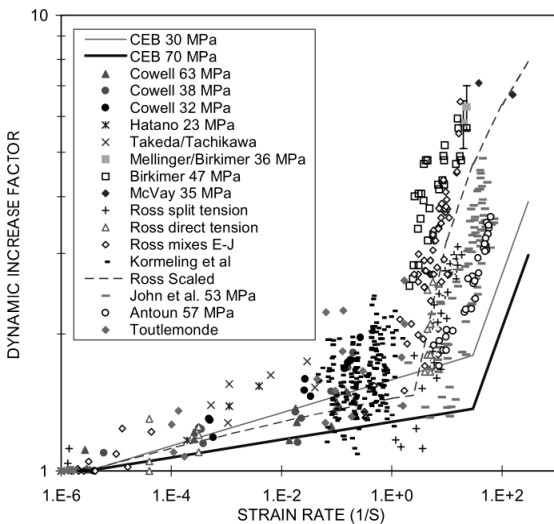


Fig. 1. Comparison of Various Theories and Experimental Data (Malvar and Ross, 1998)

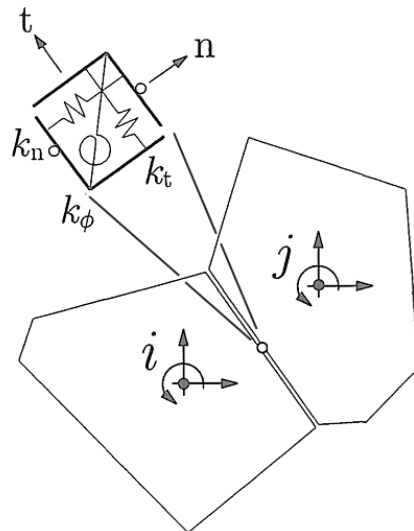


Fig. 2. Spring set of RBSN (Rigid Body Spring Network) Element (Bolander and Berton et al, 2004)

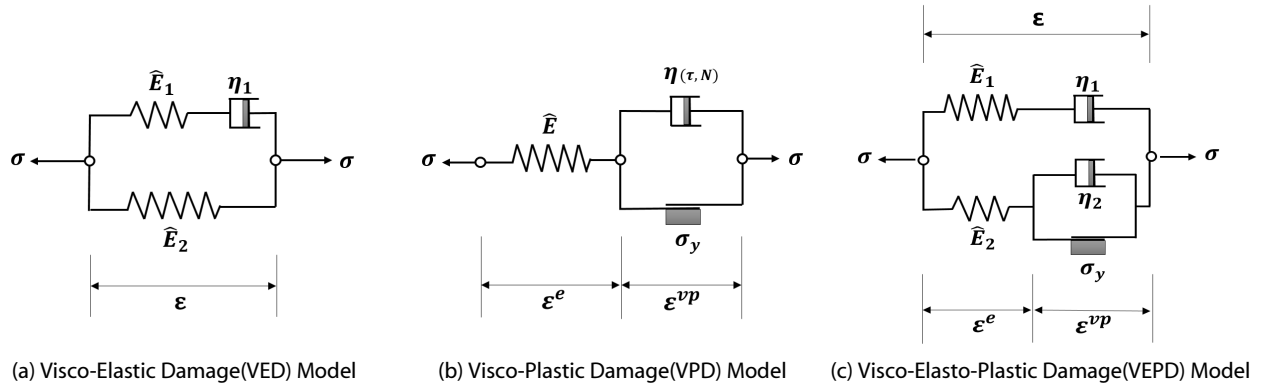


Fig. 3. Rheological Models for Rate Dependency

검증의 과정으로 변형률 속도에 따른 직접인장시험이 모사 되었으며, 해석결과는 모델의 변수 연구(Parameter study)를 통하여 실험결과의 응력 변형률 곡선과 비교 검증되었다. 정해진 변수를 통하여 다양한 변형률 속도에서의 응력 변형률 관계를 구하였고, 이를 통해 변형률 속도에 따른 콘크리트 물성의 변화 추이를 확인하였다.

모델에 적용된 변수가 해석 결과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 두 가지 변형률 속도(1/s, 10/s)에서 변수 값의 변화가 응력 변형률 곡선에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 유변학적 모델(Rheological Model)

2.1 점탄성 손상(Visco-Elastic Damage; VED) 모델

콘크리트의 동적 물성을 표현하기 위하여, Maxwell unit이 기존 스프링에 병렬로 연결된, Standard Linear Solid(SLS) 모델을 도입하였다(Fig. 3(a)). SLS 모델에서 발생하는 응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (1)$$

여기서 σ_1 은 Maxwell unit에서 발생하는 응력이다. σ_2 는 스프링 unit에 발생하는 응력으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_2 = \hat{E}_2 \varepsilon \quad (2)$$

여기서 \hat{E}_2 는 파괴 과정동안 손상된 스프링의 강성을 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{E}_2 = (1 - \omega) E_2 \quad (3)$$

ω 는 손상계수(Damage Factor)로 $0 \leq \omega \leq 1$ 의 범위를 갖고, 균열이 진전되어 스프링에 발생하는 손상이 증가함에 따라 값이 증가한다.

Eq. (1)에서 Maxwell unit에 발생하는 응력(σ_1)과 변형률(ε)의 관계는 다음과 같이 기술된다.

$$\sigma_1 = \hat{E}_1 \varepsilon_{E_1} = \eta_1 \dot{\varepsilon}_{\eta_1} \quad (4)$$

여기서 ε_{E_1} 과 ε_{η_1} 은 각각 Maxwell unit의 스프링 변형률과 대쉬포트(Dashpot) 변형률을 나타낸다. \hat{E}_1 은 파괴 과정동안 손상된 Maxwell unit의 스프링 강성을 나타내며 Eq. (3)과 같이 표현된다. η_1 은 대쉬포트의 점성계수이며 다음과 같이 기술된다.

$$\eta_1 = (1 - \omega) \eta_0 \quad (5)$$

η_0 는 대쉬포트의 초기 점성계수를 나타낸다. 전체 변형률 ε 은 Maxwell unit에 발생하는 스프링과 대쉬포트 변형률의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{E_1} + \varepsilon_{\eta_1} \quad (6)$$

Eq. (6)을 시간 t 에 대하여 미분하고, Eq. (4)를 이용하면 다음과 같은 Maxwell unit의 구성방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_1}{E_1} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} \quad (7)$$

유도된 식을 해석 알고리즘에 적용하기 위하여 다음과 같이 각 변수를 시간간격에 대하여 이산화 하였다.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon^{t+1} - \varepsilon^t}{dt} \quad (8)$$

$$\dot{\sigma} = \frac{\sigma^{t+1} - \sigma^t}{dt} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{\sigma^{t+1} + \sigma^t}{2} \quad (10)$$

Eqs. (8)~(10)을 Eq. (7)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma_1^{t+1} = \frac{1}{A}(\varepsilon^{t+1} - \varepsilon^t + B\sigma_1^t) \quad (11)$$

여기서 $A = \frac{1}{\hat{E}_1} + \frac{dt}{2\eta_1}$ 이고, $B = \frac{1}{\hat{E}_1} - \frac{dt}{2\eta_1}$ 이다. 이러한 형태의 유도는 DEM(Discrete Element Method) 코드 기반의 Burger's model의 유도과정과 유사하다(Chen, 2011).

해석과정의 초기 단계에서 결정된 초기 변형률 ε^o 은 Maxwell unit의 초기응력 $\sigma_1^o (= E_1 \varepsilon^o)$ 을 구하는데 사용되는데, 이는 초기 시간간격에서는 대쉬포트가 활성화 되지 않아, 전체 변형률 ε^o 이 Maxwell unit의 스프링 변형률과 동일하기 때문이다. 초기 단계에서 구하여진 초기 변형률과 초기 응력($\varepsilon^o, \sigma_1^o$)은 다음 시간간격에서 결정된 변형률 ε^1 과 함께 Eq. (11)을 이용하여 새로운 응력 σ_1^1 을 구하는데 이용된다.

모델의 전체 응력은 Eq. (11), Eq. (2)와 함께 Eq. (1)을 통하여 구할 수 있다.

2.2 점소성 손상(Visco-Plastic Damage; VPD) 모델 (Kim, 2011)

도입된 점소성 손상 모델은 Fig. 3(b)와 같이 나타난다. 스프링에 점소성 장치가 직렬로 연결되어있다. 모델에 포함된 변수인 \hat{E} 과 η 는 2.1의 점탄성 손상 모델에서 도입한 Eq. (3), (5)와 같은 손상계수로 표현된다. 전체 변형률(ε)은 다음과 같이 나타난다.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp} \quad (12)$$

여기서 ε^e 는 탄성 변형률이고, ε^{vp} 는 점소성 변형률이다. 모델에 작용하는 응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \hat{E}\varepsilon^e = \hat{E}(\varepsilon - \varepsilon^{vp}) \quad (13)$$

모델의 점소성 영역(ε^{vp})은 다음과 같은 Perzyna type 식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \left[\frac{\langle f(\sigma) \rangle}{\eta} \right]^N \frac{\partial F(\sigma)}{\partial \sigma} \quad (14)$$

여기서 $\langle f \rangle := (f + |f|)/2$ 는 Macaulay function 이며, $N(\geq 1)$ 은 모델의 변수이다. Eq. (14)는 Eq.(13)과 함께, 다음과 같이 시간간격에 대하여 이산화된 형태로 나타난다.

$$\begin{aligned} \sigma_{n+1}^L &= \sigma_n + \hat{E}\Delta\varepsilon_n - \frac{[\sigma_{n+1}^R - \sigma_{cr}]^N}{\tau\hat{E}^{N-1}}\Delta t \\ &= \sigma_{n+1}^{trial} - \frac{[\sigma_{n+1}^R - \sigma_{cr}]^N}{\hat{E}^{N-1}} \frac{\Delta t}{\tau} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\tau (= (\eta/\hat{E})^N)$ 는 유효이완시간(effective relaxation time)을 나타내고, σ_{cr} 은 임계 응력(critical stress)로서 파괴 기준(fracture criteria)로부터 결정되는 값이다. σ_{n+1}^{trial} 은 시험 응력으로서 시간 간격 n 에서 결정된 \hat{E} 로부터 구해진다. 주어진 Eq. (15)에는 좌항과 우항에 σ_{n+1} 항이 있는데, 이 식을 수치해석적으로 풀기 위하여 Golden section search 알고리즘을 사용하였다. 해석과정에서 σ_{cr} 과 σ_{n+1}^{trial} 사이의 최적의 σ_{n+1} 값을 구할 수 있으며, 해석은 최소의 오차 $|\sigma_{n+1}^L - \sigma_{n+1}^R|$ 를 얻을 때까지 반복된다. 구한 σ_{n+1} 값과 해당 시간간격에서 계산된 \hat{E} 는 Eq. (13)과 함께 점소성 변형률을 구하는데 사용된다.

$$\varepsilon_{n+1}^{vp} = \varepsilon_{n+1} - \frac{\sigma_{n+1}}{\hat{E}} \quad (16)$$

2.3 점탄소성 손상(Visco-Elasto-Plastic Damage; VEPD) 모델

본 연구에서 제안된 점탄소성 손상모델은 Fig. 3(c)와 같이 나타난다. 점탄성을 나타내는 Maxwell unit이 점소성 모델과 병렬로 결합되어 있으며, 모델에 작용하는 응력은 다음과 같다.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (17)$$

여기서 σ_1 은 Maxwell unit의 응력을 나타내고 Eq. (11)로부터 유도된다. σ_2 는 점소성 unit의 응력을 나타내고, Eq. (15)로부터 유도된다.

3. 모델 검증

3.1 실험결과와의 비교

본 논문에서는 직접인장시험에 대한 실험 결과(Cadoni et al., 2013)를 토대로 개발된 모델의 해석결과를 비교 검증하였다. 실험에서는 한 변이 60mm인 정육면체 콘크리트 시편($f_t = 3.6\text{MPa}$, $E = 41,600\text{MPa}$, $\rho = 2,420\text{kg/m}^3$)을 사용하였고, 실험 결과로서 세 가지 변형률 속도($10^6/s$ (quasi-static), $1/s$, $10/s$)에 대한 응력 변형률 관계를 도사하였다(Fig. 4). 실험을 통한 응력 변형률 곡선을 통하여 변형률 속도가 증가할수록 그래프의 첨두(peak)값, 초기 기울기, 그래프가 차지하는 면적이 증가함을 확인할 수 있으며, 각각 인장 강도, 탄성계수, 파괴 에너지의 증가를 나타낸다.

해석에 사용된 매쉬 형상은 Fig. 5와 같으며, 여기서 L과 h는 각각 60mm이며, 시편의 두께 역시 60mm이다. 시편의 좌측면은

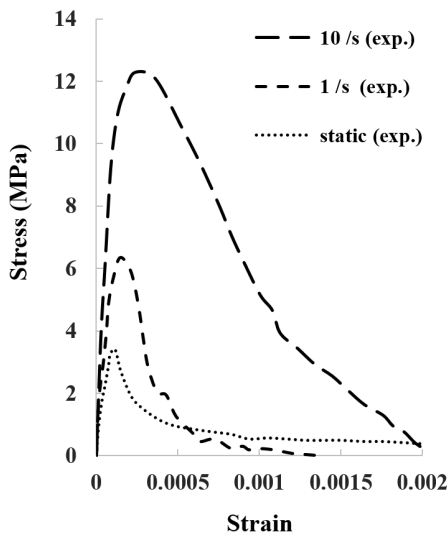


Fig. 4. Experimental Stress-Strain Curves(Cadoni et al., 2013)

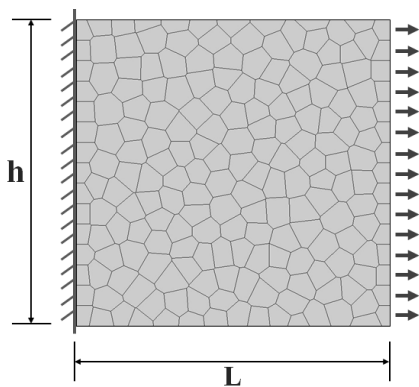


Fig. 5. Mesh Configuration and Boundary Conditions of Specimen for Simulation

고정단이며, 우측면에는 인장방향의 변위가 하중으로 가해진다. 이때 가해지는 변위는 매 시간간격에서 일정량의 증분만큼 증가하여 일정한 변형률 속도를 나타내는데, 이를 통해 주어진 변형률 속도($1/s$, $10/s$)에 따른 응력 변형률의 실험결과를 모의할 수 있었다. 콘크리트의 인장연화거동은 Fig. 6와 같은 이중선형(bilinear) 연화 거동을 가정하였고, 요소의 강성 감소는 이러한 연화 곡선을 따라 발생한다.

실험을 통한 응력 변형률 곡선과 비교하기 위하여, 해석을 통한 응력과 변형률을 다음과 같이 구하였다. 해석 과정동안 좌측 고정단과 우측 하중 재하지점의 모든 노드에 발생하는 힘의 총합을 각각 구하고, 시편의 단면적으로 나누어 좌측과 우측의 응력을 구하였다. 이후 좌측과 우측에서 계산된 응력의 평균을 구하여 시편의 응력을 구하였다. 변형률은 우측면의 모든 노드에서 발생하는 변위의 평균을 구하고 이를 시편의 전체 길이로 나누어 구하였다.

해석결과는 모델에 들어간 변수 값을 변환시키는 과정을 통하여 실험결과에 근사시켰으며, 각 모델별로 변형률 속도 $1/s$ 을 기준으로 변수를 실험결과에 맞게 조절하였다. 이후 변수 값을 변화시키지 않고 다른 변형률 속도에서의 응력 변형률 관계를 모의하였다. 각 모델에 사용된 변수는 다음과 같다.

점탄성 손상(VED) 모델에 들어간 변수는 $E_1 = E$, $E_2 = E$, $\eta_1 = 2.8\text{MPas}$ 이다. 여기서 E_1 은 점탄성 모델이 증가시킬 수 있는 최대 강성과 관련이 있으며, E_2 는 스프링 요소의 강성으로 콘크리트의 탄성계수 E 와 같다. 해석에서는 E_1 과 E_2 를 변화시키지 않아, 실질적으로 η_1 만이 변수로 사용되었다.

점소성 손상(VPD) 모델에 들어간 변수는 $E = E$, $\tau = 2.1 \times 10^{-8}$, $N = 1.8$ 이다. 여기서 E 는 콘크리트의 탄성계수를 나타낸다. 해석에서는 τ 와 N , 두 변수가 조절되었다.

점탄소성 손상(VEPD) 모델에 들어간 변수는 $E_1 = E$, $E_2 = E$, $\eta_1 = 2.9\text{MPas}$, $\eta_2 = 0.042\text{MPas}$ 로서, 두 가지 변수(η_1 과 η_2)가 조절되었다. 점소성 손상 모델에서 고려되었던, τ 와 N 두 가지 변수 중 N 을 1로 고정시키고 $\tau = (\eta_2/\hat{E})^N$ 관계식을 통하여 η_2 로 변수를 하나 줄여 모델을 단순화 시켰다.

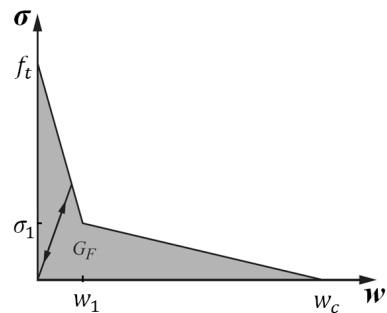


Fig. 6. Bilinear Stress-Crack Opening Relation(Kim, 2011)

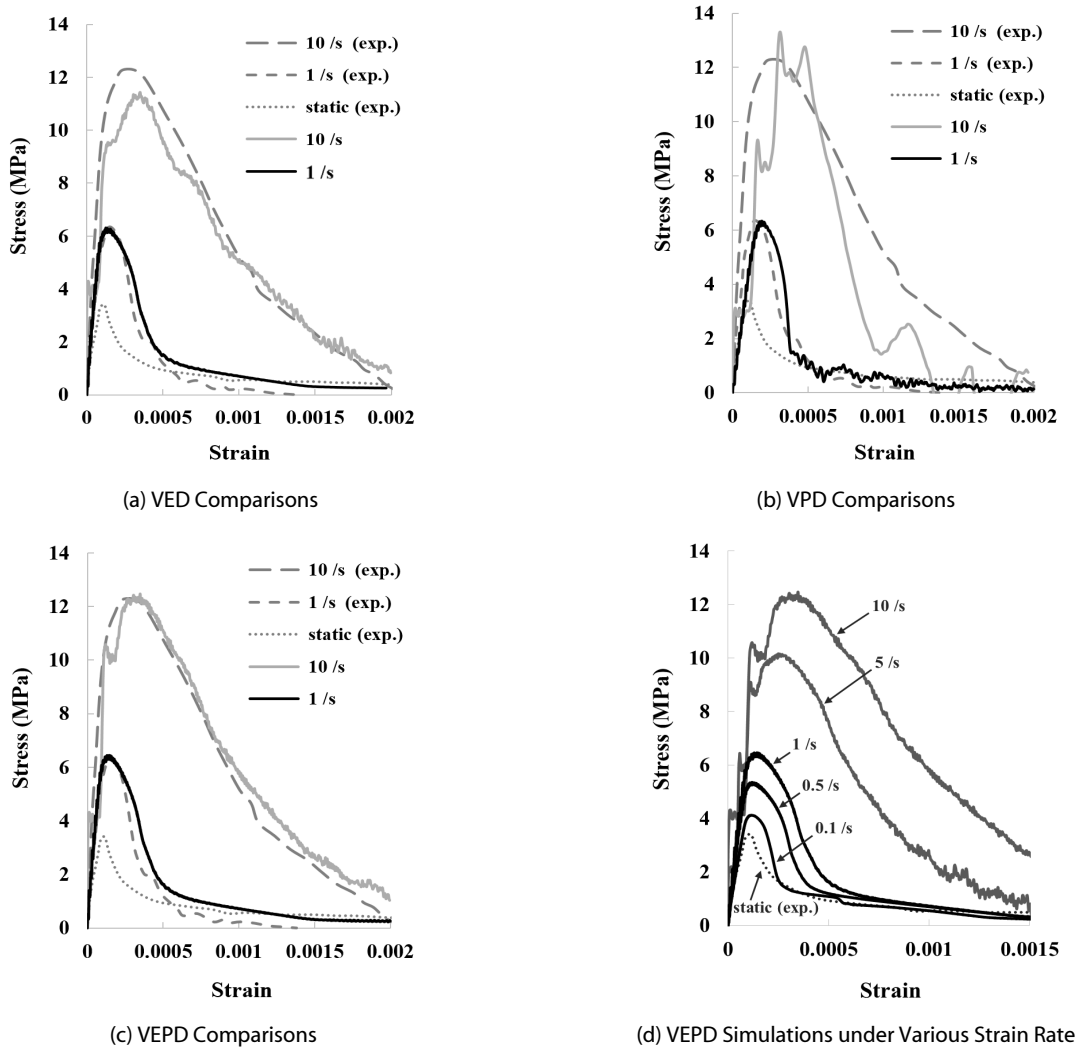


Fig. 7. Simulated Stress-Strain Curves with Experiment

해석 결과는 실험에서 진행한 변형률 속도(1/s, 10/s)에서의 응력 변형률 관계와 비교되었으며, 결과는 Fig. 7(a)-(c)에 나타내었다. 그림 전반에서 확인할 수 있는 바와 같이, 그래프의 탄성 구간에서의 응력의 값이 상승하고 출렁이는 현상이 반복됨을 확인할 수 있는데, 이는 해석에서 정의한 경계조건을 따라 발생하는 입사파와 반사파의 영향으로 나타나는 현상이다. 해석과정동안 우측면의 노드에서 발생하는 응력을 측정하고, 이 응력의 탄성영역에서 상승하고 출렁이는 한 구간동안의 시간을 측정하면 2.84×10^{-5} s로, 해석에 사용된 콘크리트의 이론적 파의 전달속도 $c_v (= \sqrt{E/\rho})$ 가 시편의 길이 L을 왕복하는 시간 2.85×10^{-5} s과 거의 일치함을 확인하였다. 실험은 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)를 이용하여 응력 변형률을 측정된 것으로, 시편의 양쪽에 금속으로 구성된 사각 단면의 bar가 연결되어 있어 한쪽 bar를

통하여 전달된 인장 파(Tensile wave)가 시편을 통과하여 다음 편 bar로 전달되는 경계조건을 가지고 있다(Cadoni et al., 2013). 때문에, 본 해석의 시편만 대상으로 하여 양쪽의 경계조건을 설정한 것과는 그 경계조건이 달라 해석결과와 같은 탄성구간에서의 주기적 떨림 현상이 나타나지 않았다. 또한 실험에서 사용한 측정 시간간격은 최대 10^{-6} s로서, 해석에서 이용한 시간간격 4.0×10^{-7} s보다 2.5배만큼 크다. 때문에, 해석에서 주어진 시간 안에 더 많은 데이터들이 들어와 상기 떨림 현상이 더 큰 빈도로 나타났음을 추측할 수 있다.

한편, 해석 결과 그래프(Fig. 7(d))를 통해 변형률 속도가 빨라질 수록 응력 변형률 그래프에서 응력이 한번 출렁이는 간격이 더 크게 나타남을 확인할 수 있는데, 이는 응력이 한번 출렁이는 시간간격은 앞서 기술한 파가 시편의 길이를 왕복하는 시간으로 동일하지

만, 동일한 시간간격에서 발생하는 변형이 높은 변형률 속도에서 더 크게 발생하기 때문이다.

Fig. 7(a)-(c)의 해석 결과는 각각의 모델이 모두 변형률 속도에 따른 콘크리트의 물성 변화를 반영하고 있음을 보여준다. 점탄성 손상(VED) 모델의 경우(Fig. 7(a)) 변형률 속도가 1/s인 경우 실험결과와 응력 변형률 관계가 거의 유사함을 확인할 수 있지만, 10/s인 경우, 인장 강도가 실험값에 비하여 더 낮게 나타남을 확인하였다. Fig. 7(b)는 점소성 손상(VPD) 모델의 응력 변형률 관계를 나타낸다. 변형률 속도가 1/s인 경우 강도의 변화는 잘 나타내지만, 탄성계수의 변화(초기 기울기의 상승)는 나타내지 못하여 정적하중 상태의 초기 기울기와 동일함을 확인할 수 있다. 변형률 속도가 10/s인 경우 점탄성 손상 모델에 비하여 탄성구간에서의 떨림 현상이 크게 나타났고 그 전체적인 경향은 실험결과와 비교했을 때, 탄성계수의 변화(초기 기울기의 상승)를 나타내지 않는 것을 확인하였다. 이는 개발된 점소성 손상모델이 정적 인장강

도를 넘는 응력이 발생할 때 활성화되는 특성 때문이다. Fig 7(c)는 점탄소성 손상(VEPD) 모델의 결과를 나타내며, 두 가지 변형률 속도(1/s, 10/s)에서 실험을 통한 응력 변형률 관계를 잘 모사함을 확인하였다.

Fig. 7(d)는 점탄소성 손상 모델을 이용한 다양한 변형률 속도 (0.1/s, 0.5/s, 1/s, 5/s, 10/s)에서의 응력 변형률 관계를 보여준다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이, 변형률 속도가 증가할수록 콘크리트의 물성(인장강도, 탄성계수, 파괴에너지)이 증가하고, 변형률 속도가 감소할수록 실험을 통한 정적 하중 하에서의 응력 변형률 관계로 해석 결과가 수렴해 나감을 확인하였다.

3.2 변수 연구(Parameter Study)

개발된 점탄소성 손상(VEPD) 모델에 적용된 두 변수(η_1, η_2)가 해석 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해, 두 가지 변형률 속도(1/s, 10/s)에서 각각 η_1, η_2 의 값을 변화시켜가면서 해석 결과를

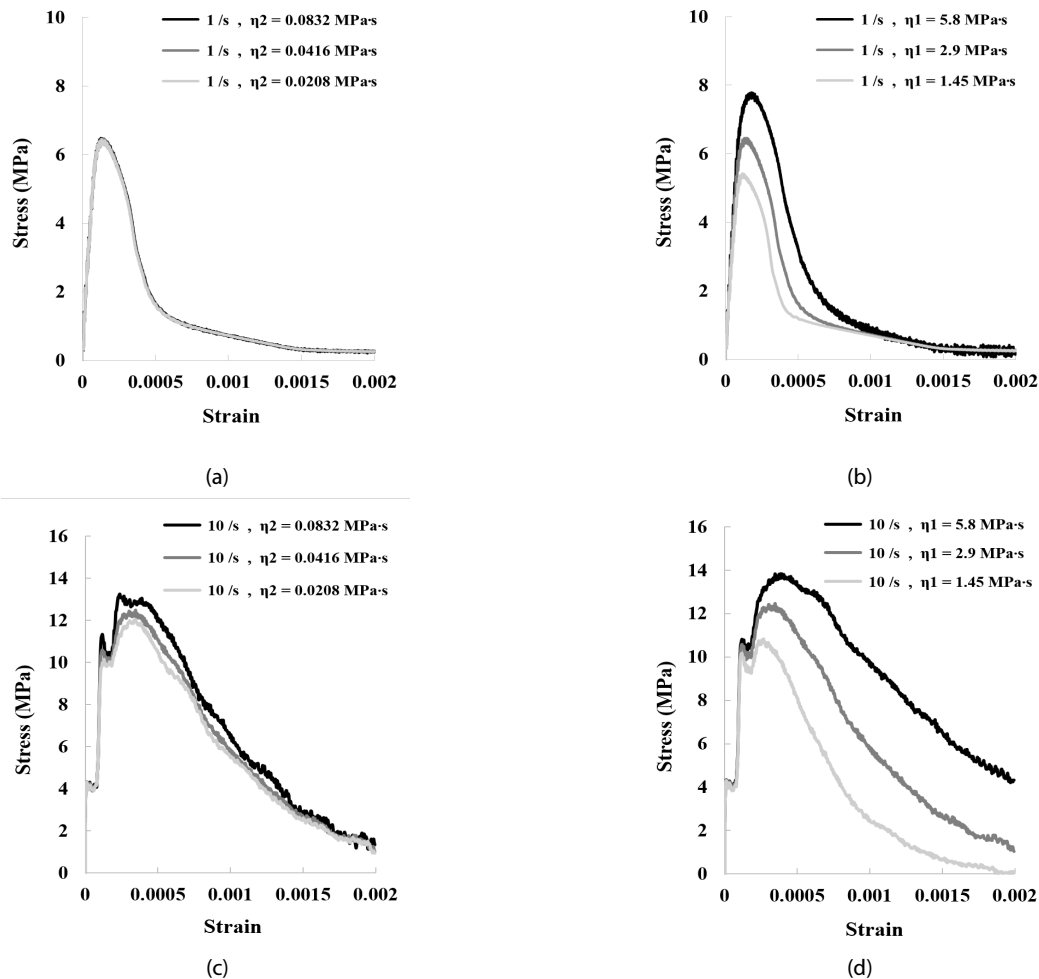


Fig. 8. Parameter Study on VEPD Model

비교하였다(Fig. 8(a)~(d)).

Fig. 8(a), (b)는 변형률 속도 1/s에서 두 변수의 영향을 살펴본 것으로, Fig. 8(a)는 η_1 을 해석에서 정해놓은 값(2.9MPa·s)으로 고정시켜 놓고, η_2 를 0.0208, 0.0416, 0.0832MPa·s로 두 배씩 변화시켜가면서 응력 변형률 관계를 도시한 것이다. Fig. 8(b)는 η_2 를 해석에서 정한 0.042MPa·s으로 고정시켜 놓고, η_1 를 1.45, 2.9, 5.8MPa·s 로 두 배씩 변화시켜가면서 응력 변형률 관계를 도시한 것이다. Fig. 8(c), (d)는 변형률 속도 10/s인 경우에 대하여 같은 방법으로 도시한 그래프이다. 결과를 통해서, 낮은 변형률 속도(1/s)에 비하여 높은 변형률 속도(10/s)인 경우 두 변수(η_1 , η_2)가 해석 결과(인장 강도 및 연화구간)에 미치는 영향이 상대적으로 큼을 확인하였고, η_1 이 η_2 에 비하여 해석결과에 미치는 영향이 더 큼을 확인하였다. 이를 통해 속도 의존성을 나타내는 대쉬포트의 점성계수인 두 변수(η_1 , η_2)가 큰 변형률 속도에 더 민감하게 반응하는 것과, 개발된 모델의 점탄성영역의 변수(η_1)가 점소성 영역의 변수(η_2)에 비하여 강도 상승 및 연화구간에 더 큰 영향을 미침을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 동하중을 받는 콘크리트의 동적 물성 변화를 모사하기 위하여, 기존 RBSN 모델의 거동을 나타내는 스프링 세트에 속도의존적 거동을 모사할 수 있는 유변학적(Rheological) 요소를 도입하였다. 개발된 모델은 점탄성 손상(VED), 점소성 손상(VPD), 점탄소성 손상(VEPD)의 세 가지 모델로서, 각 모델의 구성관계를 유도하고 이를 선행 실험결과와 비교 및 평가하였다. 다음은 본 연구의 결론이다.

- (1) 개발된 점탄성 손상(VED) 모델은 변형률 속도에 따른 물성(인장강도, 탄성계수, 파괴에너지)변화를 나타낸다. 하지만, 실험을 통한 인장강도의 변화 추이는 잘 모사하지 못함을 확인하였다.
- (2) 점소성 손상(VPD) 모델은 변형률 속도에 따른 물성(인장강도, 파괴에너지) 변화를 나타낸다. 빠른 변형률 속도(10/s)에서 응력 변형률 관계의 변화 추이를 살펴보았을 때, 점탄성 손상 모델에 비하여 실험을 통한 인장강도 변화 추이를 더 잘 나타내는 것으로 보이나, 정적 인장강도 이후에 활성화되는 모델의 특성으로 인해 탄성계수 변화는 나타내지 못함을 확인하였다.
- (3) 점탄소성 손상(VEPD) 모델은 점탄성 손상 모델과 점소성 손상 모델을 결합한 것으로서, 변형률 속도에 따른 물성(인장강도, 탄성계수, 파괴에너지) 변화를 나타낸다. 또한 실험을 통한 인장강도의 변화 추이를 잘 모사하며, 탄성계수 및 파괴에너지 변화도 잘 모사할 수 있는 것으로 판단된다. 점탄성 손상 모델에

가해지는 변형률 속도가 느려질수록, 실험을 통한 정적 하중 상태의 응력 변형률 관계로 수렴함을 확인하였고, 모델의 두 변수(η_1 , η_2)가 빠른 하중 속도에서 해석 결과에 더 큰 영향을 미치고, η_2 에 비하여 η_1 이 해석 결과에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

- (4) 해석 결과로부터 나타난 응력-변형률 관계의 탄성구간에서 Bump 현상(응력의 상승과 출렁임이 반복되는 현상)이 발생함을 확인할 수 있는데, 이는 해석 모델의 경계조건에 따른 입사파와 반사파의 영향에 의하여 발생하는 현상이다. 응력파가 상승하여 한번 출렁이는데 걸리는 시간은 파가 콘크리트의 매질을 왕복하는 시간과 동일함을 확인하였고, 이러한 파가 탄성 영역에서 주기적으로 나타나는 것을 확인하였다.

이러한 모의 결과는 실험 결과와 전체적인 경향이 유사하나 다소의 차이를 나타내는데 이는 두 가지 원인(실험과 다른 경계조건, 해석과 실험 간의 측정시간 간격 차이)에서 나타난다고 할 수 있다.

본 연구결과를 통해, 점탄소성 손상(VEPD) 모델이 직접인장을 받는 콘크리트의 속도의존성을 잘 모사할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는, 개발된 점탄소성 손상 모델에 적용된 두 개의 변수를 적절히 조절하여 보다 다양한 콘크리트 재료의 속도의존성에 대한 실험 결과를 모사하고자 한다. 또한 실험을 통한 재료의 속도의존적인 파괴형상을 개발된 모델을 통하여 비교 검증해보고자 한다.

감사의글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2014R1A2A2A01004421).

References

Barpi, F. (2004). "Impact behaviour of concrete: A Computational Approach." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, No. 15, pp. 2197-2213.

Bischoff, P. H. and Perry, S. H. (1991). "Compressive behaviour of concrete at high strain rates." *Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 425-450.

Bischoff, P. H. and Perry, S. H. (1995). "Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 121, No. 6, pp. 685-693.

Bolander, J. E. and Berton, S. (2004). "Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays." *Cement and*

- Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 861-871.
- Bolander, J. E. and Saito, S. (1998). "Fracture analyses using spring networks with random geometry." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, pp. 569-591.
- Cadoni, E., Solomos, G. and Albertini, C. (2013). "Concrete behavior in direct tension tests at high strain rates." *Magazine of Concrete Research*, ICE, Vol. 65, No. 11, pp. 660-672.
- Chen, J. (2011). *Discrete Element Method (DEM) analysis for Hot-Mix Asphalt (HMA) mixture compaction*, Ph.D. Dissertation, University of Tennessee, Knoxville, T.N., USA.
- Gatuingt, F. and Pijaudier-Cabot, G. (2002). "Coupled damage and plasticity modelling in transient dynamic analysis of concrete." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 26, pp. 1-24.
- Grote, D. L., Park, S. W. and Zhou, M. (2001). "Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental Characterization." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, No. 9, pp. 869-886.
- Hentz, S., Donzé, F. V. and Daudeville, L. (2004). "Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates." *Computers and Structures*, Vol. 82, pp. 2509-2524.
- Hughes, B. P. and Gregory, R. (1972). "Concrete subjected to high rates of loading in compression." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 24, No. 78, pp. 25-36.
- Kim, K. (2011). *Development of irregular lattice models for simulating rate dependent failure in concrete materials and structures*, Ph.D. Dissertation, Yonsei University.
- Kim, K., Bolander, J. E. and Lim, Y. M. (2011). "Rigid-body-spring network with visco-plastic damage model for simulating rate dependent fracture of RC structures." *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 82, pp. 259-265.
- Kim, K., Bolander, J. E. and Lim, Y. M. (2013). "Failure simulation of RC structures under highly dynamic conditions using random lattice models." *Computers and Structures*, Vol. 125, pp. 127-136.
- Kim, K. and Lim, Y. M. (2011). "Simulation of rate dependent fracture in concrete using an irregular lattice model." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, No. 9, pp. 949-955.
- Malvar, L. J. and Ross, C. A. (1998). "Review of strain rate effects for concrete in tension." *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6, pp. 735-739.
- Pedersen, R. R., Simone, A. and Sluys, L. J. (2008). "An analysis of dynamic fracture in concrete with a continuum visco-elastic visco-plastic damage model." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 13, pp. 3782-3805.
- Ross, C. A., Thompson, P. Y. and Tedesco, J. W. (1989). "Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression." *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 5, pp. 475-481.
- Rossi, P. (1991). "A physical phenomenon which can explain the mechanical behaviour of concrete under high strain rates." *Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 422-424.
- Toutlemonde, F. and Rossi, P. (1994). "Major parameters governing concrete dynamic behaviour and dynamic failure of concrete structures." *Euro-DYMAT94*, Oxford, pp. 29-30.
- Vegt, I., Weerheijm, J., Pedersen, R. R. and Sluys, L. J. (2006). "Modelling of impact behaviour of concrete - an experimental approach." *Computational Modelling of Concrete Structures - EURO-C 2006*, Mayrhofen, Tyrol, Austria, pp. 451-458.