



초기재령에서 콘크리트 인장균열에 대한 쌍선형 응력-균열 개구 관계의 변화

권승희^{1)*} · 최 강¹⁾ · 이 윤²⁾ · 박홍용¹⁾

¹⁾명지대학교 토목환경공학과 ²⁾이화여자대학교 건축공학과

Variation of Bilinear Stress-Crack Opening Relation for Tensile Cracking of Concrete at Early Ages

Seung-Hee Kwon,^{1)*} Kang Choi,¹⁾ Yun Lee,²⁾ and Hong-Yong Park¹⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

²⁾Dept. of Architectural tural Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

ABSTRACT One of the most vulnerable properties in concrete is tensile cracking, which usually happens at early ages due to hydration heat and shrinkage. In order to accurately predict the early age cracking, it needs to find out how stress-crack opening relation is varying over time. In this study, inverse analyses were performed with the existing experimental data for wedge-splitting tests, and the parameters of the softening curve for the stress-crack opening relation were determined from the best fits of the measured load-CMOD curves. Based on the optimized softening curve, variation of fracture energy over time was first examined, and a model for the stress-crack opening relation at early ages was suggested considering the found feature of the fracture energy. The model was verified by comparisons of the peak loads, CMODs at peak loads, and fracture energies obtained from the experiments and the inverse analysis.

Keywords : stress-crack opening relation, softening curve, cracking, ordinary concrete, wedge splitting test, inverse analysis

1. 서 론

콘크리트의 인장 균열은 수화열 및 건조수축에 의해 초기재령에서 발생하는 경우가 많다. 잘 알려진 바와 같이 초기 균열은 구조물의 사용성 및 내구성을 저하시키는 가장 큰 원인 중 하나로, 시공 전에 균열발생을 미리 예측하고 대책을 마련하는 것이 중요하다. 인장균열은 일반적으로 응력과 균열 개구(crack opening)의 관계를 나타내는 연화곡선(softening curve)으로 모사할 수 있다.¹⁾ 초기재령의 경우 수화반응이 지속되면서 역학적 특성이 시간에 따라 변화하며 연화곡선 또한 변화하게 된다. 정확한 균열 예측을 위해선 인장응력-균열 개구의 관계가 초기재령에서 어떻게 변화하는 지 구명할 필요가 있다.

연화곡선에 대한 모델이 기존에 제안되어 있지만,²⁾ 초기재령에서의 변화를 반영하고 있지는 못하다. 최근 발표된 연구에서³⁾ 재령에 따른 인장파괴특성을 파악하기 위해 세 가지 강도의 콘크리트에 대해 썬기형 쪼갬 실험(wedge splitting test)을 재령별로 수행하고 실험 결과에 대한 역해석(inverse analysis)을 실시하였으나, 역해석

으로 실험 결과를 정확히 모사하는데 한계가 있었고 연화곡선을 구성하는 각 파라미터의 재령에 따른 변화를 명확히 파악하지 못하였다.

이 연구에서는 기존에 수행된 썬기형 쪼갬 실험 결과에 대해 보다 정교한 역해석을 실시하고, 이로부터 재령에 따른 연화곡선의 변화를 파악하고자 한다. 역해석에 사용되는 최적화 방법을 기존의 Newton-Raphson 방법에서 Marquardt-Levenberg⁴⁾ 방법으로 바꾸었고, 동일한 실험변수에 대해 반복 수행된 실험의 결과를 평균하는 방법도 파괴역학을 고려하여 같은 파괴상태를 기준으로 평균하는 방법⁵⁾을 사용하였다. 최적화된 연화곡선으로부터 계산되는 파괴에너지의 재령에 따른 변화를 반영하여 초기재령에서 사용할 수 있는 연화곡선 모델을 제안하였다.

2. 응력-균열 개구 관계에 대한 기존의 모델

인장균열에 대한 응력-균열 개구 관계에 대한 모델로는 CEB-FIP model code 1990²⁾에서 제안하고 있는 것이 일반적으로 널리 사용되고 있다. 이 장에서는 이 모델을 간략히 소개하고자 한다.

응력-균열 개구 관계는 여러 가지 형태의 연화곡선으로 제안되고 있으나,⁶⁾ CEB-FIP model code 1990²⁾에서는 Fig. 1에서와 같은 쌍선형(bilinear)식을 사용하고 있다. 이

*Corresponding author E-mail: kwon08@mju.ac.kr
 Received February 3, 2010, Revised March 19, 2010,
 Accepted April 7, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

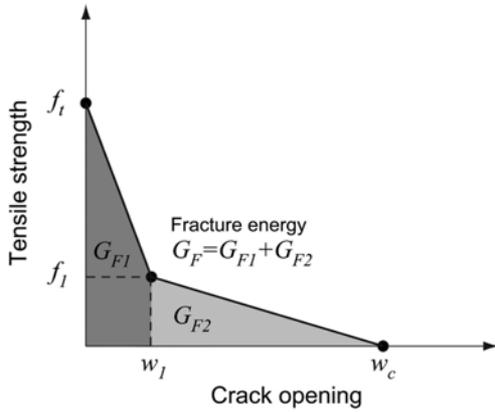


Fig. 1 Bilinear relation between tensile stress and crack opening

연화곡선을 구성하는 각 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

$$f_t = f_{t0} \left(\frac{f_{ck}}{10} \right)^{n_1} \quad (1)$$

$$f_1 = 0.15 f_t \quad (2)$$

$$w_c = \alpha_F \frac{G_F}{f_t} \quad (3)$$

$$w_1 = 2 \frac{G_F}{f_t} - 0.15 w_c \quad (4)$$

위의 식에서, f_t 는 균열 개구가 시작될 때의 응력, n_1 는 0.667, f_{t0} 는 1.4, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준 압축강도, f_1 과 w_1 은 각각 연화곡선의 기울기가 변화하는 점에서의 응력과 균열 개구, w_c 는 연화곡선에서 응력이 0이 될 때의 균열 개구, α_F 는 굽은골재의 최대치수에 따라 결정되는 계수, G_F 는 파괴에너지이다. 파괴에너지는 다음의 식으로 결정된다.

$$G_F = G_{F0} \left(\frac{f_{cu}}{10} \right)^{n_2} \quad (5)$$

여기서, G_{F0} 는 굽은골재의 최대치수에 따른 계수이고, n_2 는 0.700, f_{cu} 는 재령 28일에서 콘크리트의 실제 압축강도를 의미한다. 위의 식들은 설계기준압축강도와 재령 28일에서의 압축강도를 기준으로 계산되며, 재령에 따른 각 파라미터의 변화에 대해서는 구체적으로 제안하고 있지 않다. 그러나 기존의 해석연구들⁷⁻⁹⁾에서는 위의 식에 재령에 따른 압축강도 발현식을 대입하여 재령에 따른 연화곡선의 변화를 고려하고 있다.

압축강도 발현에 대한 제안식은 다음과 같다.

$$f_{cu}(t) = \exp \left[\beta_{sc} \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right] f_{cu} \quad (6)$$

여기서, t 는 재령을 의미하고, β_{sc} 는 시멘트의 종류에 따른 상수이다. 식 (6)은 우리나라 콘크리트 구조설계기준¹⁰⁾에서도 사용되고 있다. 이 연구에서 다루어지는 실험 결과만으로 완전히 새로운 형태의 모델을 제안하기에는 일반화에 어려움이 있으며, 기존의 모델을 수정 및 보완하는 방식으로 모델을 제안하고자 한다.

3. 역해석(inverse analysis)

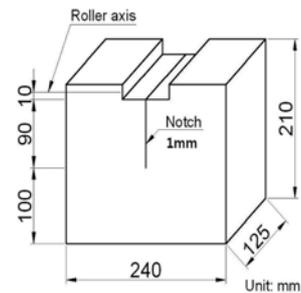
3.1 썬기형 쪼갬 실험

먼저 기존의 연구³⁾에서 수행한 실험에 대하여 간략히 설명하고자 한다. 저강도, 보통강도, 고강도 콘크리트에 대해 재령 1, 3, 7, 14, 28일에 동일한 2개의 실험체로 썬기형 쪼갬 실험이 수행되었다. Table 1은 콘크리트의 배합비이고, Fig. 2는 실험체의 형상 및 실험방법을 나타낸 것이다. 1종 시멘트가 사용되었고, 굽은골재의 최대치수는 19 mm였다. 썬기형 쪼갬 실험과 더불어 동일한 재령에서 압축강도 또한 측정하였다.

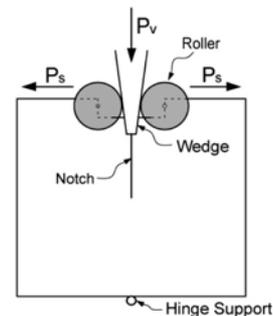
썬기 쪼갬 실험에서 노치(notch) 위의 균열 개구 변위(crack mouth opening displacement)와 외부에서 가해진 하중이 측정되었으며, 균열 개구 변위를 0.002 mm/s의 속도로 증가시키는 방식으로 썬기의 변위를 제어하였다.

Table 1 Mix proportions³⁾

Mix	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)				
		Water	Cement	FA	CA	Superplasticizer
LS	70	185	268	726	1,002	0.402
NS	55	185	342	727	1,030	1.026
HS	30	160	533	712	1,090	5.330



(a) Dimension of specimen



(b) Wedge splitting test setup

Fig. 2 Dimension of specimen and wedge splitting test setup³⁾

3.2 역해석에 사용되는 하중-균열 개구 변위

재형에 따라 두 개의 동일한 실험체로부터 각각 하중-균열 개구 변위가 측정되었으며, 역해석을 수행하기 위해서는 이들 실험 결과를 평균해야 한다. 평균하는 방법에 따라라도 하중-균열 개구 변위 곡선이 달라질 수 있으며, 이 곡선의 작은 변화에도 역해석 결과는 크게 달라질 수 있다.

파괴실험 결과를 평균하는 방법이 기존의 연구에서 제안된 바 있으며,⁵⁾ 이 연구에서는 같은 방법으로 하중-균열 개구 변위의 평균을 구하였다. Fig. 3은 실험 결과를 평균하는 과정을 나타낸 것이다. 먼저, 최초의 데이터로부터 동일한 파괴상태에서의⁵⁾ 하중-균열 개구 변위 값을 동일한 수만큼 추출한다(Fig. 3(b)). 다음으로 데이터의 순서에 따라 하중과 개구변위 값을 각각 평균하여 하나의 하중-균열 개구 변위 곡선을 구한다(Fig. 3(c)). 역해석에 사용되는 실험 측정값의 수가 많을수록 계산에 소요되는 시간이 크게 늘어나게 된다. 따라서 실험 결과를 대표할 수 있는 최소의 측정값을 역해석에 사용하는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 평균된 하중-균열 개구 변위를 최적으로 모사하는 다중선형함수(multi-linear function)를 찾는 방식으로⁵⁾ 역해석에 사용될 20개의 측정값, 처음부터 최고하중까지 7개, 최고하중에서 마지막 측정위치까지 13개의 측정값을 추출하였다(Fig. 3(d)).

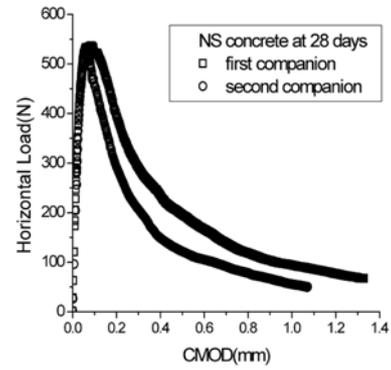
3.3 역해석 알고리즘

Fig. 4는 역해석의 알고리즘을 나타낸 것이다. 연화곡선의 각 파라미터를 조정하면서 반복적으로 유한요소해석을 수행하고 실험 결과를 최적으로 모사하는 연화곡선을 찾게 된다. Fig. 1과 같은 쌍선형 연화곡선을 사용하였고, Fig. 5에서 보듯이 실험체는 대칭성을 고려하여 반쪽만 모델링 하였다. 파라미터에 적용되는 최적화 기법으로는 비선형 회귀분석에 가장 널리 사용되는 Marquardt-Levenberg 방법⁴⁾을 사용하였다. 기존의 연구에서는 Newton-Raphson 방법을 적용하였지만, 계산 시간이 많이 걸리면서도 실험 결과를 최적으로 모사하는 데 어려움이 많았다. 유한요소 프로그램의 알고리즘은 기존의 연구¹¹⁾를 참조하였다.

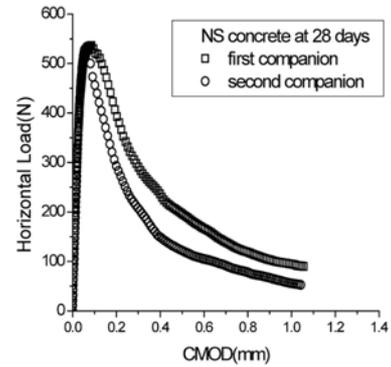
4. 결과 분석 및 모델 제안

4.1 실험 및 역해석 결과

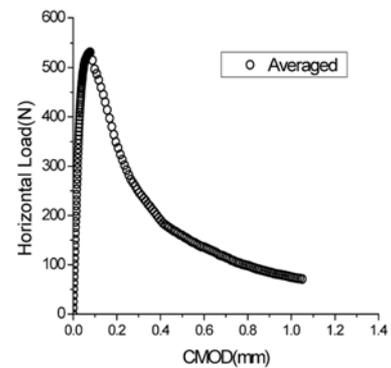
Fig. 6은 역해석 결과와 실험 결과를 비교한 것으로 역해석 결과가 실험 결과를 정확히 모사하고 있음을 알 수 있다. Table 2는 재령별로 측정된 압축강도와 탄성계수 그리고 역해석으로 찾아낸 쌍선형 연화곡선의 네 가지 파라미터, f_t , f_1 , w_1 , w_c 를 정리한 것이다. 역해석에서 고려한 탄성계수는 실제 측정된 탄성계수의 1.5배 정도 큰



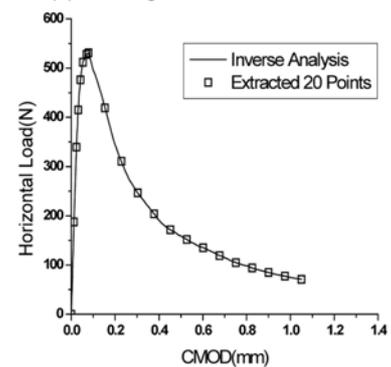
(a) Raw data of two companion specimens



(b) two data sets for the same fracture state



(c) Average of two data sets



(d) 20 points extracted from the averaged

Fig. 3 Data processing for companion specimens

값을 사용하였는데,³⁾ 이는 압축응력 상태에서 활선탄성계수를 측정하는 경우에 비해 실험체에 가해지는 응력의 크기가 매우 작고 크리프에 의한 변형을 증가도 거의 없기 때문이다.

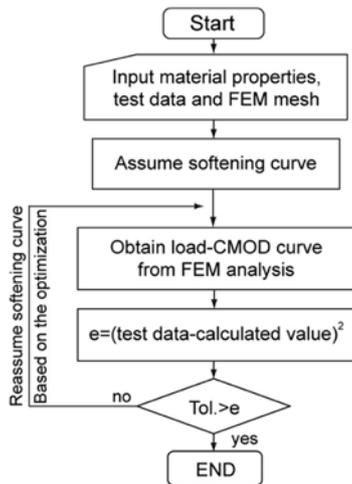


Fig. 4 Algorithm of inverse analysis

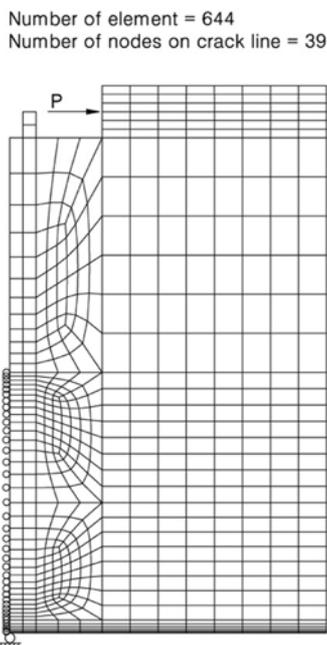


Fig. 5 Finite element mesh for wedge splitting specimen

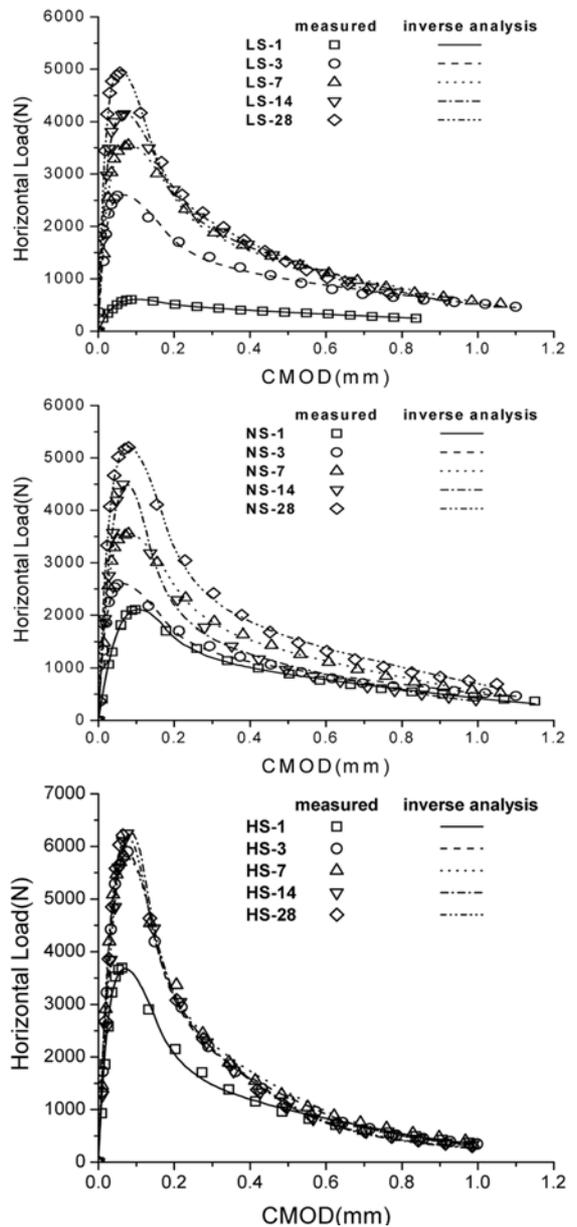


Fig. 6 Comparison between measured Load-CMOD and Load-CMOD obtained from the best fits

Table 2 Measured compressive strength and elastic modulus, and parameters of the optimized softening curves

Mix	Age (days)	Notation of specimen	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Parameters of softening curve				Fracture energy $G_F \times 10^{-2}$ (N/mm)
					f_t (MPa)	f_1 (MPa)	w_1 (mm)	w_c (mm)	
LS	1	LS-1	3.92	7.65	0.28	0.14	0.031	0.254	2.20
	3	LS-3	10.3	19.5	1.11	0.35	0.038	0.266	6.75
	7	LS-7	13.7	21.7	1.57	0.46	0.041	0.228	8.46
	14	LS-14	15.6	23.0	1.84	0.53	0.035	0.197	8.48
	28	LS-28	18.5	26.8	2.23	0.65	0.028	0.163	8.45
NS	1	NS-1	5.49	12.9	1.08	0.32	0.032	0.245	5.61
	3	NS-3	16.5	22.9	1.11	0.35	0.038	0.266	6.75
	7	NS-7	22.4	26.2	1.56	0.45	0.042	0.229	8.47
	14	NS-14	26.6	26.9	2.34	0.43	0.025	0.196	7.08
	28	NS-28	33.2	28.8	2.41	0.55	0.037	0.237	10.9
HS	1	HS-1	16.6	24.3	1.72	0.39	0.032	0.196	6.51
	3	HS-3	26.2	31.3	2.94	0.58	0.028	0.146	8.34
	7	HS-7	37.3	32.5	2.82	0.64	0.029	0.143	8.69
	14	HS-14	52.1	33.8	3.56	0.65	0.022	0.120	7.89
	28	HS-28	58.0	35.8	3.22	0.67	0.025	0.123	8.03

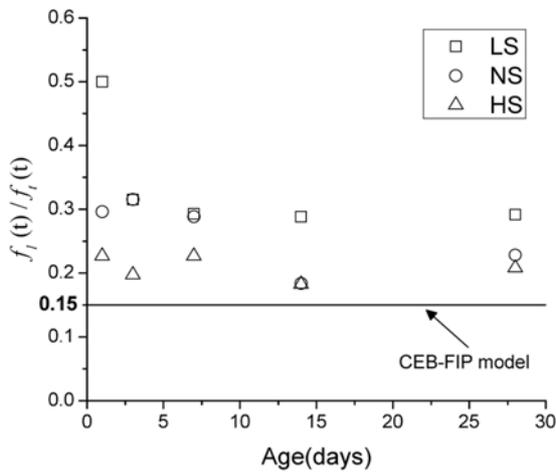


Fig. 7 Variation of f_1/f_i over time

Fig. 7은 Table 2의 f_1 을 f_i 로 나눈 값을 재령에 따라 나타낸 것이다. 식 (2)에서 보듯이 CEB-FIP 1990 model code²⁾에서는 f_1 을 f_i 의 0.15배로 제안하고 있지만, 실제 f_1 의 f_i 에 대한 비율은 0.15보다 모두 큰 것으로 나타났고 시간에 따라서도 일정하지 않았다.

인장균열에 대한 파괴에너지는 Fig. 1에서 보듯이 연화곡선의 면적과 같다.¹⁾ Table 2에 연화곡선으로부터 계산된 파괴에너지를 같이 나타내었다.

실험에 사용된 콘크리트의 굵은골재 최대치수는 19 mm 였으며, CEB-FIP model code 1990에 따르면 식 (3)의 α_F 는 6.63으로 계산된다. Table 2의 G_F 와 f_i 로부터 식 (3)과 (4)의 w_c 와 w_1 을 계산할 수 있다. Fig. 8은 w_c 와 w_1 에 대한 역해석 결과와 식 (3)과 (4)로부터 계산된 결과를 비교한 것으로, 기존의 모델로부터 계산된 결과가 실제의 값과 큰 차이를 보이고 있다.

Figs. 7과 8에서 기존의 모델이 재령에 따른 연화곡선의 실제 변화를 정확히 예측하는데 한계가 있음을 알 수 있다.

4.2 파괴에너지에 대한 분석

Fig. 1에서 전체 파괴에너지 G_F 는 연화곡선의 첫 번째 직선 아래의 면적 G_{F1} 과 두 번째 직선에 해당하는 면적 G_{F2} 를 더한 것이다. G_{F1} 과 G_{F2} 가 전체 파괴에너지에서 차지하는 비율이 시간에 따라 어떻게 변화하는지 파악해 보고자 하였다. Fig. 9는 G_{F1} 과 G_{F2} 의 G_F 에 대한 비율을 세 가지 콘크리트에 대해 평균하여 재령에 따라 나타낸 것이다. G_{F1} 의 비율은 초기에 크게 증가하고 재령이 증가함에 따라 특정 값에 수렴하는 양상을 나타내고 있다. 반대로 G_{F2} 의 비율은 시간에 따라 감소하는 경향을 보였다.

콘크리트의 인장 균열은 파괴진행영역(fracture process zone)을 형성하며,¹⁾ 연화곡선은 파괴진행영역 형성과정과 관계가 있다. 인장응력이 인장강도에 도달하기 직전부터 미세균열이 형성되기 시작하고 인장강도를 지나면서 일부 미세균열들이 서로 연결되기 시작한다. 균열 변

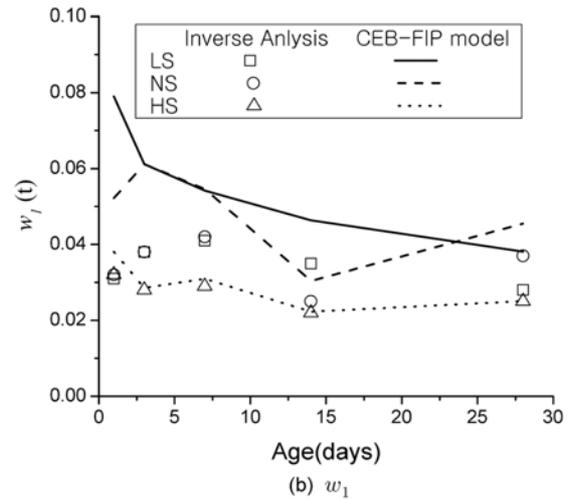
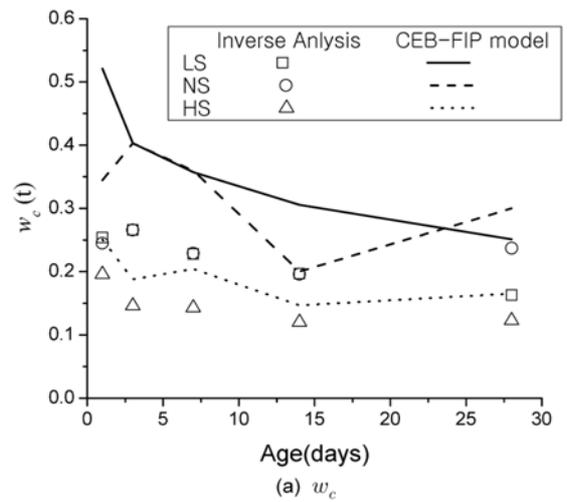


Fig. 8 Variations of w_c and w_1 over time

형은 미세균열이 연결되는 부위에 집중되고, 이 부분이 주 균열로 발전하게 된다. 주 균열이 형성된 후에도 주 균열 사이에 위치한 굵은골재의 가교(bridging) 작용으로 균열면 사이에 응력이 전달된다. 미세균열의 생성으로부터 주 균열이 형성되기까지는 연화곡선의 첫 번째 직선에 해당되며, 연화곡선의 두 번째 직선은 골재의 가교 효과에 의한 응력 전달을 나타내는 것으로 볼 수 있다.¹²⁾ Fig. 10은 연화곡선과 파괴진행영역의 관계를 계략적으로 나타낸 것이다.

Fig. 9의 결과는 재령이 증가함에 따라 미세균열에서 주 균열이 형성될 때 까지 필요한 에너지의 전체 파괴 에너지에서 차지하는 비율은 증가하고 골재의 가교 작용에 의한 파괴에너지의 비율은 감소한다는 것을 보여준다. 수화작용이 진행되면서 시멘트 매트릭스(cement matrix)의 강성은 증가하는 반면 상대적으로 연성은 감소하게 된다.¹³⁾ 이러한 시멘트 매트릭스의 변화가 파괴진행영역의 형성에도 영향을 미쳐 Fig. 9의 특성을 나타내는 것으로 볼 수 있으며, 재령에 따른 연화곡선변화 모델에 이러한 특성을 고려하는 것이 바람직할 것이다.

Fig. 9의 결과에 대하여 다음의 함수를 사용하여 회귀 분석을 수행하였다. 시간에 따라 증가하다가 특정한 값

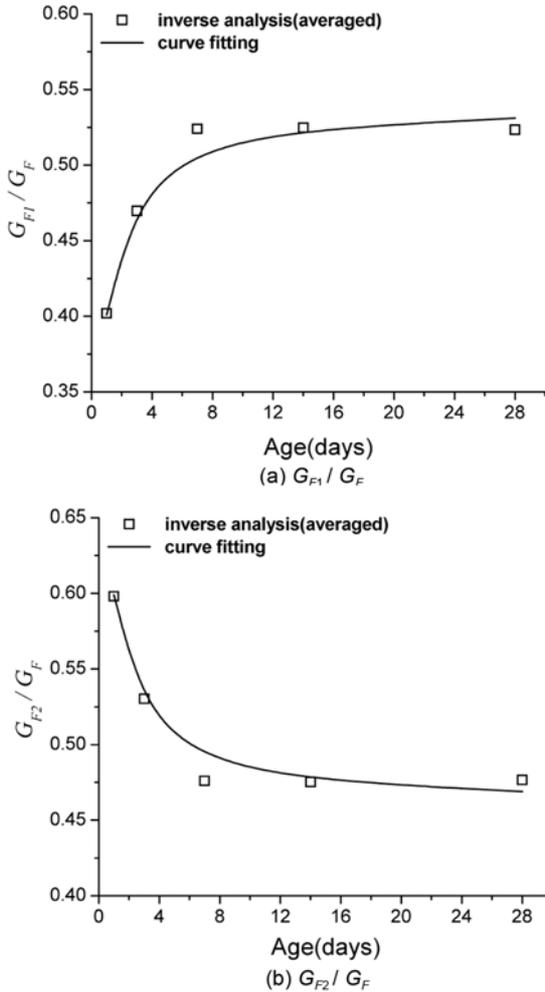


Fig. 9 Variations of and over time

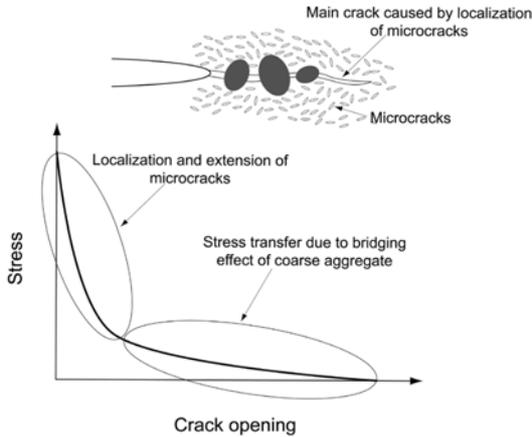


Fig. 10 Correlation of softening curve and development of fracture process zone

으로 수렴하는 형태의 함수를 선택하였다.

$$r_{G1}(t) = \frac{G_{F1}(t)}{G_F(t)} = \gamma + \frac{\eta t}{\delta + t} \quad (7)$$

여기서 r_{G1} 은 G_{F1} 의 G_F 에 대한 비율, t 는 재령을 의미하고, γ, η, δ 는 회귀분석으로 결정되는 파라미터이다.

G_{F2} 의 G_F 에 대한 비율을 r_{G2} 라고 했을 때, r_{G2} 와 r_{G1} 을 더한 값은 항상 1이 되므로 다음의 식으로 r_{G2} 를 구할 수 있다.

$$r_{G2}(t) = \frac{G_{F2}(t)}{G_F(t)} = 1 - r_{G1}(t) \quad (8)$$

식 (7)을 이용한 회귀분석 결과 γ, η, δ 는 각각 0.167, 0.372, 0.589로 나타났다. 회귀분석 결과로부터 구한 r_{G1} 과 r_{G2} 를 Fig. 9에 같이 나타내었다.

4.3 재령에 따라 변화하는 응력-균열 개구 관계 모델

재령에 따라 변화하는 G_{F1} 과 G_{F2} 는 식 (7)과 (8)에서 구한 $r_{G1}(t)$ 와 $r_{G2}(t)$ 를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{F1}(t) = r_{G1}(t)G_F(t) = \frac{1}{2}w_1(t)[f_i(t) + f_1(t)] \quad (9)$$

$$G_{F2}(t) = r_{G2}(t)G_F(t) = \frac{1}{2}f_1(t)[w_c(t) - w_1(t)] \quad (10)$$

위의 식에서 $G_F(t), f_i(t), w_c(t)$ 가 결정되면, $f_1(t)$ 와 $w_1(t)$ 는 식 (9)와 (10)을 연립하여 계산할 수 있다.

이 연구에서 파괴에너지($G_F(t)$), 인장강도($f_i(t)$), 최대 균열 개구($w_c(t)$)의 시간에 따른 변화에 대한 일반적인 모델을 제안하기에는 사용된 실험 결과가 매우 부족하다. 그러나 균열에 대한 응력-균열 개구 관계의 재령에 따른 변화를 적절히 고려할 수 있는 기존의 모델이 없기 때문에 다소 제한적일 수 있음에도 이 연구의 실험 결과만으로 초기재령에서의 응력-균열 개구 관계에 대한 모델을 제안하고자 한다. 시공 전 콘크리트 재료에 대한 실험을 통해 파괴에너지, 인장강도, 최대 균열 개구 등의 역학적 특성을 정확히 파악하기 어려운 경우, 균열 예측을 위한 해석을 수행할 필요가 있다면 이 논문에서 제안하고 있는 모델을 사용하는 것이 대안이 될 수 있을 것이다. 또 앞으로 실험연구들이 추가로 수행된다면 이 연구의 방법론을 적용하여 현재의 모델을 수정·보완해 나갈 수 있을 것으로 기대한다.

Table 3은 이 연구에서 사용한 세 가지 콘크리트에 대하여 식 (1), (3), (5), (6)의 파라미터를 회귀분석을 통해 구한 결과이다. CEB-FIP 1990 모델에서 제안하고 있는 값과는 다소 차이를 나타내고 있다. 먼저 식 (6)의 압축강도 발현에 대하여 측정된 압축강도를 최적으로 모사하는 β_{sc} 를 구하였으며, 측정값과 회귀분석 결과는 Fig. 11(a)와 같다. 다음으로 식 (6)의 회귀분석 결과와 역해석으로 구한 인장강도를 이용하여 식 (1)의 두 파라미터 f_{t0} 과 n_1 을 결정하였다. 세 가지 콘크리트에 대하여 동일한 값으로 회귀분석을 수행한 결과 실제의 인장강도를 정확히 모사할 수 없어, 콘크리트별로 다른 값을 구하였다. 식 (6)

Table 3 Parameters determined from curve fit

Mix	f_{cu} (MPa)	Eq. (1)		Eq. (3)	Eq. (5)		Eq. (6)
		f_{c0} (MPa)	n_1	α_F	G_{Fo} (N/mm)	n_2	β_{sc}
LS	18.5	1.05	1.24	3.90	0.061	0.714	0.353
NS	33.2	1.09	0.636	5.03	0.062	0.354	
HS	58.0	1.66	0.423	5.05	0.068	0.117	

의 결과를 식 (5)에 대입하여 Table 2의 파괴에너지에 대한 회귀분석을 하였으며, 콘크리트에 따른 G_{Fo} 와 n_2 의 값을 결정하였다. 마지막으로 식 (5)와 (1)의 결과를 다시 식 (3)에 대입하여 α_F 의 값을 결정하였다. 인장강도, 파괴에너지, 최대 개구 변위에 대한 역해석 결과와 회귀분석 결과는 각각 Fig. 11(b), (c), (d)에 나타내었다.

Table 3에서 식 (1), (3), (5)의 각 파라미터들은 28일 압축강도(f_{cu})에 따라 증가 또는 감소의 경향을 명확히 보이고 있다. 그러나 이를 28일 압축강도의 함수로 표현하기 위해선 이론적 배경을 바탕을 한 수식의 유도보다 많은 실험 결과가 뒷받침되어야 할 것이다. 단지 파라미터의 값들을 정확히 모사할 수 있는 수식을 제안할 수도 있지만 큰 의미가 없을 것으로 보이며, 실험되

지 않은 강도의 콘크리트에 대하여 각 파라미터 값을 결정할 필요가 있는 경우는 현재의 회귀분석 결과를 참조하여 결정하거나 직선 보간하는 방법을 적용할 수도 있을 것이다. 또한 굵은골재의 최대 치수가 다른 경우 α_F 와 G_{Fo} 에 대하여 기존의 모델이 제안하는 골재 크기에 따른 변화 비율을 적용하여 보정하는 방법을 적용할 수 있을 것이다.

특정한 강도의 콘크리트에 대해 압축강도, 파괴에너지, 인장강도, 최대 균열 개구의 시간에 따른 변화를 식 (1), (3), (5), (6)의 파라미터를 결정하여 계산한 후 식 (9)와 (10)의 연립방정식을 풀어 $f_t(t)$ 와 $w_c(t)$ 를 구할 수 있다. 이 연구에서는 세 가지 강도의 콘크리트에 대한 Table 3의 회귀분석 결과와 식 (7), (8), (9), (10)을 초기재령에서의 응력-균열 개구 관계에 대한 모델로 제안한다.

제안된 모델을 검증해 보기 위해 하중-균열 개구 변위 곡선의 최대 하중, 최대 하중에서의 균열 개구 변위, 파괴에너지에 대한 실험 측정값, 역해석 결과, 모델로부터 계산된 결과를 비교해 보았다. Fig. 12는 최대 하중을 비교한 것이다. 역해석 결과와 실험 결과는 정확히 일치하고 있음을 알 수 있다. 제안된 모델로부터 계산된 최대

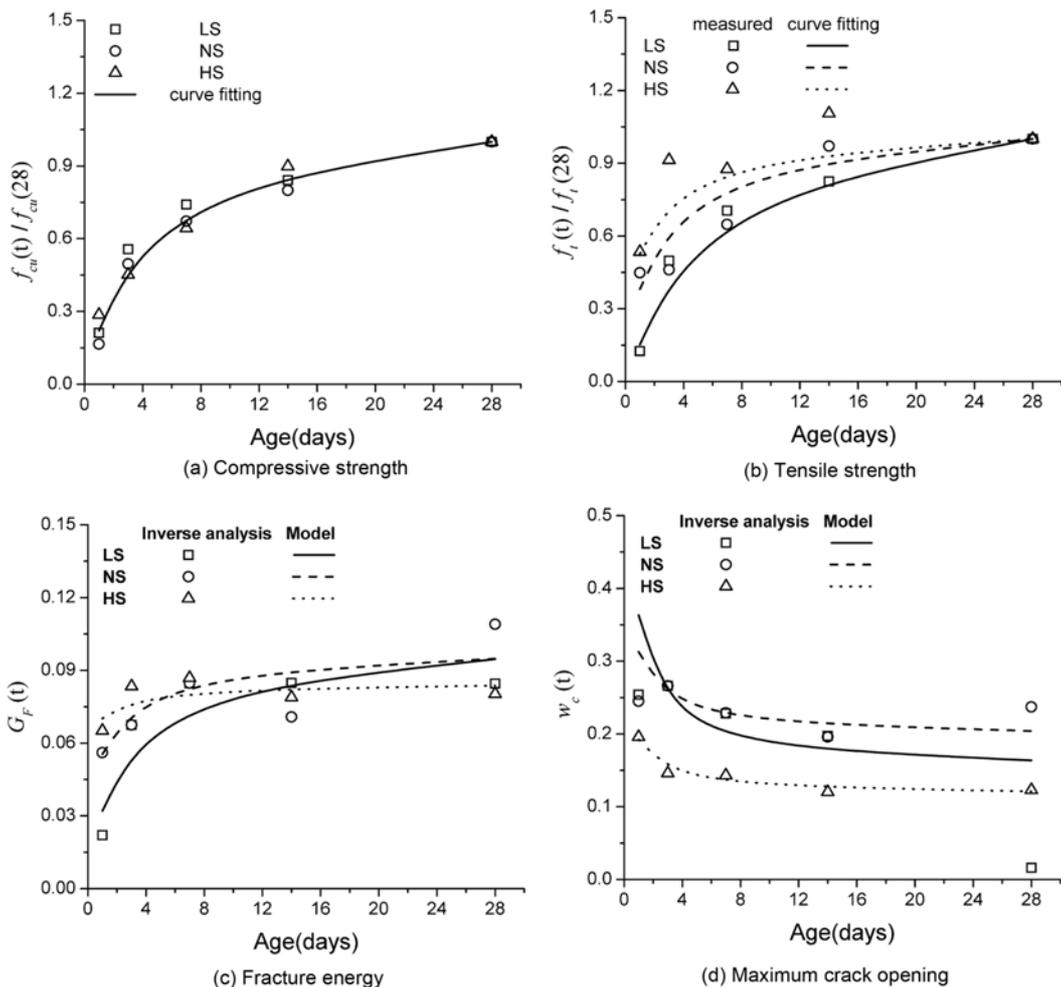
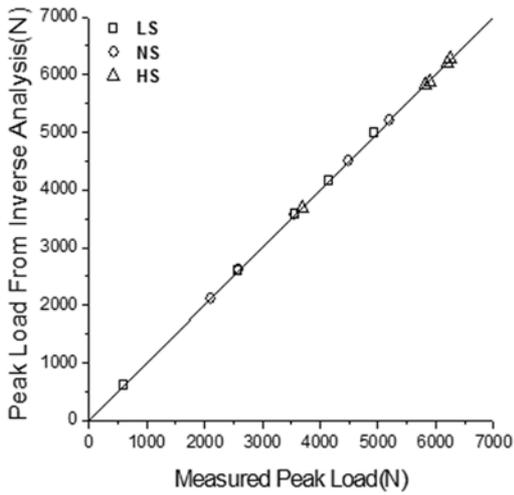
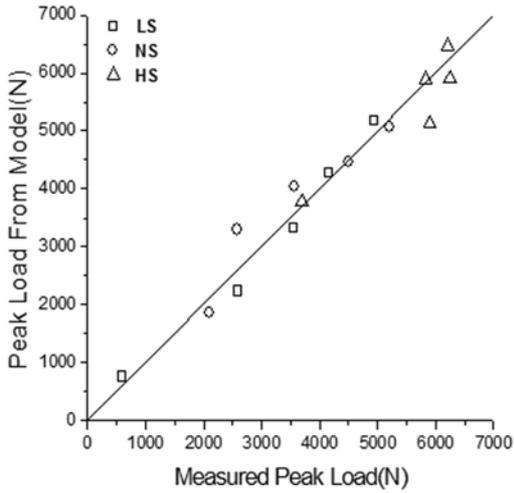


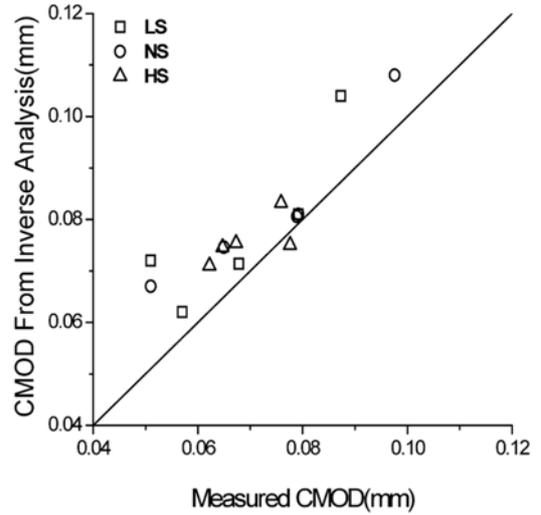
Fig. 11 Curve fit results for variation of compressive strength, tensile strength, fracture energy, and maximum crack opening over time



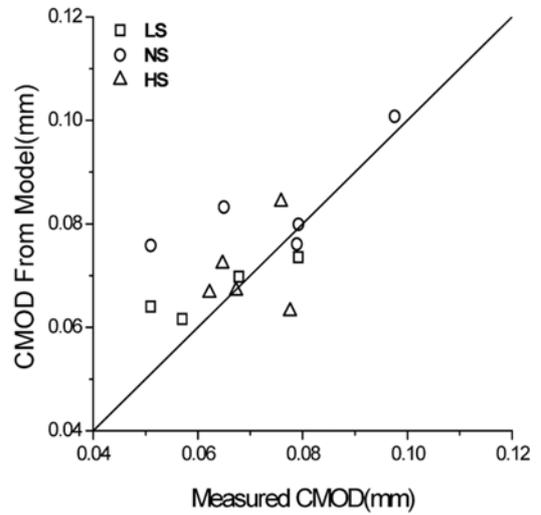
(a) Peak loads from experiments and inverse analyses



(b) Peak loads from experiments and the suggested model



(a) CMODs at peak loads from experiments and inverse analyses



(b) CMODs at peak loads from experiments and the suggested model

Fig. 12 Comparison for peak loads

하중과 측정값은 다소의 차이를 나타내지만 비교적 정확히 실제의 하중을 예측하고 있다.

Fig. 13은 최대 하중에서의 균열 개구 변위를 비교한 것이다. 역해석 결과와 모델로부터 계산된 값의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 14는 역해석과 모델로부터 구한 파괴에너지를 비교한 것이다. 파괴에너지는 하중-균열 개구 변위의 전체 면적과 관련되는 값으로 모델로부터 구한 파괴에너지가 역해석 결과의 파괴에너지와 비슷하다는 것은 하중-균열 개구 변위 곡선 전체를 정확히 예측할 수 있음을 의미한다.

Figs. 12, 13, 14로부터 제안된 모델이 최대 하중 상태와 하중-균열 개구 변위의 전체적인 거동을 정확히 묘사할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 제안된 모델에 압축강도, 파괴에너지, 인장강도, 최대 균열 개구에 대한 실험, 역해석, 회귀분석 결과를 이용하였지만, 이 연구에서 파악된 파괴에너지의 재령에 따른 변화 특성을 실제 균열 거동을 해석하는 데 적용할 수 있다는 것을 검증하였다.

Fig. 13 Comparison for CMODs at peak loads

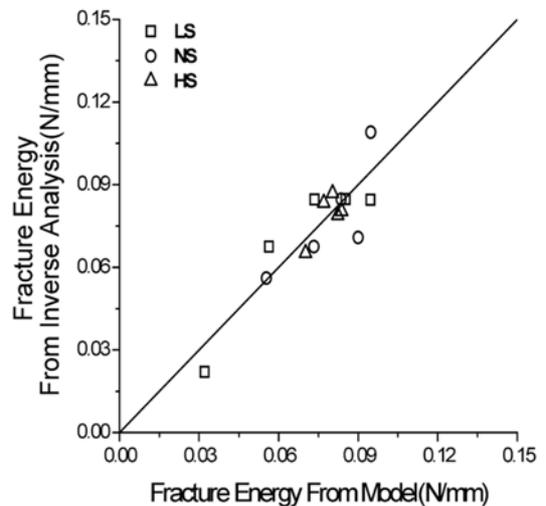


Fig. 14 Comparison for fracture energies

5. 결 론

기존에 수행되었던 썬기형 쪼갬 실험 결과에 대한 역 해석을 수행하여, 쌍선형 연화곡선으로 가정된 인장응력-균열 개구 관계를 구하였다. 역해석 결과로부터 계산되는 파괴에너지에 대한 분석에서, 연화곡선의 첫 번째 직선에 해당되는 파괴에너지의 전체 파괴에너지에 대한 비율은 시간에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 콘크리트의 경화가 진행됨에 따라 미세균열로부터 주 균열이 형성되는 데 필요한 에너지의 전체 파괴에너지에 대한 비율이 시간에 따라 증가한다는 것을 의미한다. 또한 골재의 가교효과로 인한 에너지의 비율은 시간에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 파괴에너지에 대한 분석 결과를 반영하여 초기재령에서의 응력-균열 개구 관계에 대한 모델을 제안하였고, 최대 하중, 최대 하중에서의 균열 개구 변위, 파괴에너지에 대하여 실험 측정값, 역해석 결과, 모델로부터 계산된 결과들을 비교해 보았다. 실험 결과가 충분하지 않아 모델을 일반화 하는데 한계가 있었지만, 제안된 모델이 실제의 균열 거동을 정확히 예측할 수 있다는 것이 검증되었다. 앞으로 추가적인 실험 연구들이 진행된다면, 현재의 모델을 수정·보완하여 모델의 적용 범위를 확대할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 교육과학기술부 기초과학연구사업에서 콘크리트 균열제어연구단에 지원된 연구비에 의해 수행된 연구이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P. and Planas, J., *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC Press, New York, 1998, pp. 157~190.
2. Comité Euro-International du Béton, *CEB-FIP Model Code*

- 1990, Thomas Telford, 1993, pp. 31~51.
3. Kim, J. K., Lee, Y., and Yi, S. T., "Fracture Characteristics of Concrete at Early Ages," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 3, 2004, pp. 507~519.
4. Brown, K. M., *Derivative-Free Analogues of The Levenberg, Marquardt and Gauss Algorithms for Nonlinear Least Square Approximations*, No. 320-2994, IBM, Philadelphia, 1970.
5. Zhao, Z., Kwon, S. H., and Shah, S. P., "Effect of Specimen Size on Fracture Energy and Softening Curve of Concrete: Part I. Experiments and Fracture Energy," *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 8-9, 2008, pp. 1049~1060.
6. Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C. S., *Fracture Mechanics of Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995, pp. 123~126.
7. Kwon, S. H. and Shah, S. P., "Prediction of Early-Age Cracking of Fiber-Reinforced Concrete due to Restrained Shrinkage," *ACI Materials Journal*, Vol. 105, No. 4, 2008, pp. 381~389.
8. Kwon, S. H., Ferron, R. P., Akkaya, Y. and Shah, S. P., "Cracking of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete due to Restrained Shrinkage," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 1, No. 1, 2007, pp. 3~9.
9. Bazant, Z. P., Kim, J. K., and Jeon, S. E., "Cohesive Fracturing and Stresses Caused by Hydration Heat in Massive Concrete Wall," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 1, 2003, pp. 21~30.
10. 국토해양부, 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007, pp. 43~44.
11. Gopalaratnam, V. S. and Ye, B. S., "Numerical Characterization of the Nonlinear Fracture Process in Concrete," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 40, No. 6, 1991, pp. 991~1006.
12. Nomura, N., Mihashi, H., and Izumi, M., "Correlation of Fracture Process Zone and Tension Softening Behavior in Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, 1991, pp. 545~550.
13. 오태근, 이성태, 김진근, "콘크리트의 강도와 재령을 고려한 응력-변형률 관계식의 개발," 콘크리트학회 논문집, 13권, 5호, 2001, pp. 447~456.

요 약 인장 균열은 콘크리트의 가장 취약한 특성으로 수화열 및 건조수축 등으로 인해 초기재령에서 발생하는 경우가 많다. 초기의 균열을 정확히 예측하기 위해서는 응력-균열 개구 관계가 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 파악해야 한다. 이 연구에서는 기존에 수행되었던 썬기형 쪼갬 실험결과에 대한 역해석을 수행하였으며, 측정된 하중-균열 개구 변위를 최적으로 모사하는 응력-균열 개구 관계에 대한 쌍선형 연화곡선을 구하였다. 파괴에너지의 시간에 따른 변화에 관한 분석이 이루어졌으며, 분석 결과를 바탕으로 초기재령에서의 응력-균열 개구 관계에 대한 모델을 제안하였다. 최대 하중, 최대 하중에서의 균열 개구 변위, 파괴에너지에 대하여 실험 측정값, 역해석 결과, 모델로부터 계산된 결과들을 비교해 보았으며, 이를 통해 제안된 모델을 검증하였다.

핵심용어 : 응력-균열 개구 관계, 연화곡선, 균열, 콘크리트, 썬기형 쪼갬 실험