Journal of the Korea Concrete Institute
Vol.16, No.4, pp.511~520, August 2004

수정 특이-파괴진행대이론의 파괴특성에 대한 균열속도의 영향

연정흠[1)*]

[1)] 인하대학교 토목공학과

(2004년 2월 5일 원고접수, 2004년 5월 27일 심사완료)

Effects of Crack Velocity on Fracture Properties of Modified S-FPZ Model

Jung-Heum Yon[1)*]

[1)] Dept. of Civil Engineering, Inha University, Inchon 402-751, Korea

(Received February 5, 2004, Accepted May 27, 2004)

ABSTRACT

The fracture energy evaluated from the previous experimental results can be simulated by using the modified singular fracture process zone (S-FPZ) model. The fracture model has two fracture properties of strain energy release rate for crack extension and crack close stress versus crack width relationship $f_{ccs}(w)$ for fracture process zone (FPZ) development. The $f_{ccs}(w)$ relationship is not sensitive to specimen geometry and crack velocity. The fracture energy rate in the FPZ increases linearly with crack extension until the FPZ is fully developed. The fracture criterion of the strain energy release rate depends on specimen geometry and crack velocity as a function of crack extension. The variation of strain energy release rate with crack extension can explain theoretically the micro-cracking, micro-crack localization and full development of the FPZ in concrete.

Keywords : concrete, crack velocity, fracture criterion, fracture energy, fracture process zone

1. 서 론

콘크리트 동적 파괴에 대한 현재의 연구는 균열성장에 대해 선형탄성파괴역학의 응력확대계수(stress intensity factor) 또는 가상균열이론(fictitious crack model)[1]과 균열띠이론(crack band model)[2]의 최대 균열면응력(crack closure stress, CCS) 등과 같이 일정한 값의 파괴특성 측정으로 제한된다. 그러나 음향방사(acoustic emission)[3-5]와 전자현미경을 사용한 실험결과[6]는 넓게 분포된 미세균열(micro-crack)의 성장과 이들의 국부화(localization) 과정을 보여준다. 미세균열의 초기분포와 미세균열 성장의 국부화는 이산균열(discrete crack) 가정의 균열단(crack tip)에서 서로 다른 파괴기준을 필요로 한다[7].

특이-파괴진행대이론(singular fracture process zone model, S-FPZ model)[8]은 레이저(laser holography)와 무아레(moiré) 간섭사진촬영(interferometry)[9,10]으로 관측된 균열폭의 분포를 설명하기 위해 제안되었다. 빠른 균열성장에서 측정된 포물선 형태의 균열폭은 균열단에 특이성(singularity)이 존재하는 경우에만 가능하다. 이러한 이유로 특이-파괴진행대이론은 응력확대계수 또는 변형에너지 방출률(strain energy release rate)의 파괴기준 그리고 균열단 뒤쪽의 균열면에 균열폭에 따라 어느 정도의 인장응력을 지지할 수 있는 파괴진행대를 가정한다. 수정 특이-파괴진행대이론[7]은 미세균열의 성장과 이들의 국부화를 고려하기 위해 파괴기준을 균열성장길이의 함수가 되도록 특이-파괴진행대이론을 수정 제안한 것이다.

이 논문에서는 삼점휨(three-point bend, TPB) 시험편과 쐐기하중(crack-line wedge-loaded, CLWL) 이중-내민보(double-cantilever beam, DCB) 시험편에 대한 기존의 동적 파괴실험결과[11,12]로부터 균열의 속도가 수정 특이파괴진행대이론의 파괴특성에 미치는 영향을 분석하였다. 변형에너지방출률과 파괴진행대의 균열면응력-균열폭 관계 등 수정 특이-파괴진행대이론의 파괴특성은 실험결과에 요구되는 파괴에너지로부터 결정되었다. 균열속도와 시험편의 기하학적 형상에 대한 영향은 평가된 파괴특성과 에너지소산기구로부터 분석되었다. 콘크리트의 완전한 균열형성에는 어느 정도 시간이 필요하고 동적 하중에 대해 상대적으로 느린 균열속도를 보이므로[13] 이 연구에서 응력파(stress wave)의 영향은 고려되지 않았다.

*Corresponding author
Tel : 032-860-7569 Fax : 032-873-7560
E-mail : jyon@inha.ac.kr

2. 콘크리트 파괴이론의 유한요소해석

콘크리트의 파괴거동은 미세균열의 성장과 미세균열의 연결에 의한 국부화 그리고 거시균열(macro-crack)을 형성하는 과정을 보인다. 이러한 일련의 복잡한 과정을 해석하기 위해서는 유한요소법의 적용이 필수적이며, 수치해석을 통해 설계에 적용될 수 있는 파괴특성의 단순식이 유도되어야 한다. 그러므로 콘크리트 파괴거동에 대한 연구는 콘크리트 균열발생과 성장에 대한 이해와 수치해석을 위한 모델의 개발을 필요로 한다.

유한요소법에 위한 콘크리트 파괴거동의 해석에는 연속체의 개념과 콘크리트 요소의 인장강성이 변형의 증가에 감소하는 균열띠이론[2]의 손상요소(smeared element)가 무근 및 철근콘크리트 요소에 널리 사용되고 있다. 가상균열이론[1]의 이산균열에서는 균열의 예상경로를 따라 절점분리에 의한 경계조건이 변화와 균열면에서 분리된 절점사이에 균열면응력-균열폭 관계를 나타내는 스프링요소로 균열면의 파괴진행을 나타낸다[8].

두 파괴이론 모두 균열의 성장기준에 최대 균열면응력이 적용된다. 그러나 균열단과 같이 유한요소법에서 재료특성 또는 경계조건이 변하는 곳의 응력은 요소의 크기에 따라 변화가 크며, 요소의 크기에 대한 제한이 필요하다. 이로 인해 균열단에서 응력집중이 과소평가되며, 균열단의 앞과 뒤에서 응력의 연속으로 변형이 경직될 수 있다. 이 절에서는 에너지개념[14,15]에 의한 콘크리트 이산균열의 수치해석에 대해 설명하며, 에너지개념이 적용되는 경우에 필요한 콘크리트의 파괴특성을 분석한다.

2.1 콘크리트 이산균열의 유한요소 해석

콘크리트의 균열이 성장하기 위해서는 콘크리트에 국부적으로 충분한 변형에너지가 축척되어야 하며, 이 에너지가 한계 값보다 크게 되면 균열은 성장한다.
Fig. 1과 같이 일정한 하중 또는 하중점-변위에서 균열길이 a와 추가 균열성장 Δa에 대한 변형에너지 E_s의 차이를 다음과 같이 파괴에너지 $E_f(a)$로 정의한다.

$$E_f(a) = E_s(a) - E_s(a+\Delta a) \qquad (1)$$

위의 식 (1)을 보다 일반적으로 나타내기 위해 단위면적의 균열성장에 필요한 에너지로 정의되는 파괴에너지율(fracture energy rate) $G_f(\Delta a)$를 다음과 같이 정의한다.

$$G_f(a) = G(a) + G_{fpz}(a) = \frac{E_f(a)}{t\Delta a} \qquad (2)$$

여기서, t : 균열의 두께
G : 단위면적의 균열성장에 대한 변형에너지방출률
G_{fpz} : 균열면의 파괴진행에 필요한 파괴에너지율

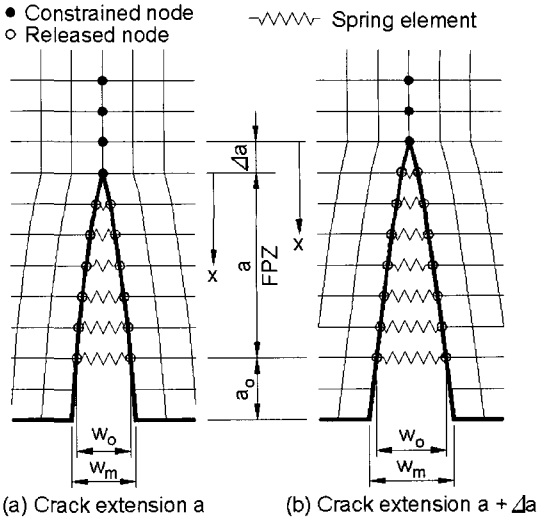


Fig. 1 FEM modeling of a discrete crack

선형탄성파괴역학이 적용될 수 있는 완전 취성재료는 파괴진행대를 형성하지 않기 때문에 $G_{fpz} = 0$이 적용되며, 파괴에너지율은 변형에너지방출률과 같다. 재료에 따른 변형에너지방출률의 최대 값으로 정의되는 임계 변형에너지방출률(critical strain energy release rate) G_c보다 식 (2)의 G가 크면 자체 변형에너지가 균열을 성장시킨다. 취성재료의 경우 임계에너지방출률은 균열길이와 응력상태에 독립인 취성재료의 파괴특성이며, 임계에너지해방률에서 불안정(unstable) 균열성장으로 파손된다. 이 방법은 상대적으로 많은 절점 수와 복잡한 변형률-변위 변환행렬이 사용되는 특이요소(singular element) 또는 사분위일-점 요소(quarter-point element)[16]에 의한 응력확대계수의 계산 없이 에너지의 평균개념으로부터 균열성장 여부를 판단할 수 있다.

콘크리트와 같은 합성재료는 미세균열의 성장과 연결 그리고 거시균열의 형성 등의 일련의 과정에 대해 파괴진행대의 개념이 적용되어야 한다. 이를 위해 균열띠이론과 가상균열이론에서는 균열단에서 응력의 연속으로 인한 $G = 0$과 최대균열면응력에 의한 파괴기준을 적용하고 있다. 그러나 특이-파괴진행대이론에서는 선형탄성파괴재료와 같이 식 (2)의 G가 재료에 따라 일정한 값인 임계 변형에너지방출률 G_c보다 큰 경우를 파괴기준으로 적용한다. 또한 수정 특이-파괴진행대이론에서는 임계변형에너지방출률을 균열성장길이의 함수로 설정한다.

2.2 파괴진행대의 파괴에너지율

가상균열이론에서는 단위면적의 파괴진행대가 완전히 형성되는 데 필요한 에너지를 파괴에너지로 정의한다. 그러나 이 논문에서는 전체 균열단면의 형성에 요구되는 파

괴에너지와 단위면적의 균열단면 형성에 요구되는 파괴에너지를 구별하기 위해서 단위면적의 완전한 파괴진행대 형성에 필요한 에너지를 파괴에너지밀도(fracture energy density)로 정의하였다. 인장응력을 전달할 수 있는 최대 균열폭으로 정의 되는 임계 균열폭 w_c에 대한 파괴에너지율로도 정의될 수 있는 파괴에너지밀도 G_{FPZ}는 Fig. 2의 균열면응력 f_{ccs}와 균열폭 w의 관계 $f_{ccs}(w)$로부터 다음과 같이 계산된다[7].

$$G_{FPZ} = \int_0^{w_c} f_{ccs}(w)\,dw \tag{3}$$

균열발생 이후 균열폭 w_x의 파괴진행에 필요한 파괴에너지율 $G_{fpz}(w_x)$는 Fig. 2의 빗금 친 부분으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$G_{fpz}(w_x) = \int_0^{w_x} f_{ccs}(w)\,dw - \tfrac{1}{2} f_{ccs}(w_x)\,w_x \tag{4}$$

식 (4)에는 하중이 제거될 때 발생되는 영구변형이 포함되지 않았다. 이는 영구변형이 거친 균열면에서 입자의 이동에 의한 쐐기작용으로 판단되며, 하중이 제거될 때는 파괴거동과 다른 에너지소모기구가 적용되어야 하기 때문이다.[7] 식 (4)에 의한 균열면의 파괴진행에 필요한 파괴에너지 $E_{FPZ}(a)$는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E_{fpz}(a) &= \int_0^a G_{fpz}(w_x)\,t\,dx \\ &= \sum_j G_{fpz}(w_j)\,t_j \Delta a_j \end{aligned} \tag{5}$$

위의 식에서 j는 유한요소해석의 분리된 절점을 나타내며, 이 절점에서 w_j와 t_j 및 Δa_j는 각각 균열폭과 두께 그리고 요소의 크기이다. 식 (5)의 값을 해석적인 방법으로 계산하기 위해서 균열폭 w_x는 Fig. 1의 균열단에서 거리 x의 함수로 표현될 수 있어야 한다. 또한 식 (4)의 G_{fpz}는 유한요소법의 스프링요소에서 계산된 파괴에너지 E_{FPZ}로부터 다음과 같이 균열성장길이 a에 대해 정의될 수도 있다.

$$G_{fpz}(a) = \frac{E_{fpz}(a+\Delta a) - E_{fpz}(a)}{t\,\Delta a} \tag{6}$$

2.3 이산균열의 파괴특성

취성재료의 파괴기준인 임계 변형에너지방출률 G_c는 무한대의 응력이 발생되는 특이 균열단에서 단위면적의 추가 균열면의 형성으로 방출되는 변형에너지이다. 완전취성재료에서 G_c의 값은 균열길이 또는 하중과 기하학형태 등의 경계조건에 독립인 유일한 파괴특성이다. 균열단에서 응력의 분포가 연속이면 균열단에서 특이성이 형성되지 않는다. 이 경우 균열성장에 의한 $G_c = 0$와 균열면응력-균열폭 관계의 함수가 재료의 파괴특성으로 주어져야 하며, Fig. 2의 최대균열면응력 f_{ccso}가 파괴기준으로 적용된다. 그러나 유한요소해석에서 이산균열은 경계조건 변화로 나타내며, 경계조건이 변하는 균열단에서 연속적인 응력분포를 나타내는 데 많은 어려움이 있다.

특이 균열단 뒤에 파괴진행대가 형성되는 경우에도 균열의 성장에 따른 파괴진행대의 확장은 균열성장에 더 많은 에너지를 필요하게 된다. 균열면에서 균열폭의 증가를 억제하는 균열 단면력의 증가는 파괴진행대가 완전히 형성될 때까지 임계변형에너지방출률을 증가시킬 수 있다. 그러므로 콘크리트 균열의 파괴거동을 유한요소법으로 해석하기 위해서는 일반적으로 다음의 재료특성이 주어져야 한다.

① 임계변형에너지방출률 $G_c(a)$

② 균열면응력-균열폭 관계 $f_{ccs}(w)$

연속적으로 성장하는 빠른 속도의 균열에 대한 콘크리트 파괴실험의 결과로부터 해석적으로 파괴특성을 결정하기 위해서는 각 균열성장 a에 대해 외부일은 하중과 하중점-변위 관계 그리고 운동에너지는 관성력-변위 관계의 적분으로부터 평가된다. 변형에너지는 관성력이 포함되지 않은 외부하중과 측정된 하중점-변위로부터 계산될 수 있다. 에너지균형에서 균열성장 a에 필요한 파괴에너지는 운동에너지가 포함되지 않은 외부일과 변형에너지의 차이로부터 계산된다[12].

실험에서 평가된 균열성장과 파괴에너지를 만족하는 콘크리트의 파괴특성을 해석적으로 평가하기 위해서는 식 (4)-(6)의 계산에 균열폭의 분포가 정의되어야 한다. 정적하중에 대해 연속적으로 성장하는 균열의 수정 특이-파괴진행대 이론[7]에서는 균열성장 a에서 균열폭의 분포 $w(x)$를 다음과 같이 가정하고 있다.

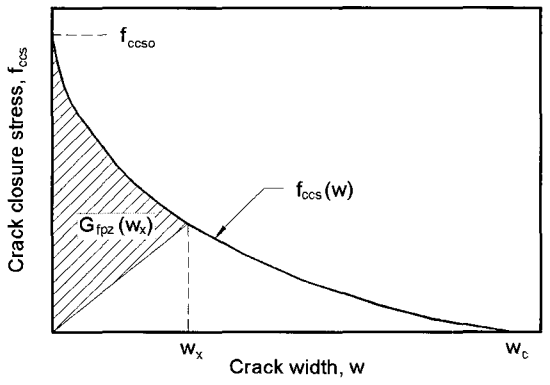


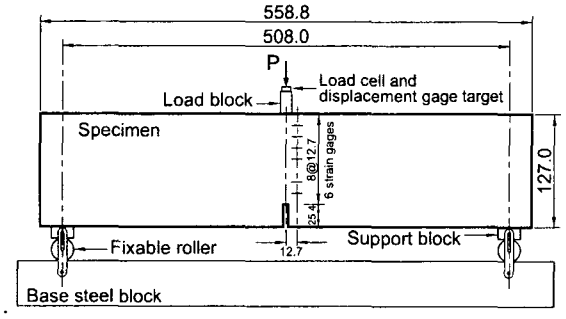
Fig. 2 $f_{ccs}(w)$ and fracture energy rate in FPZ

$$w(x) = w_x = w_o\left(\frac{x}{a}\right)^{\beta} \quad (7)$$

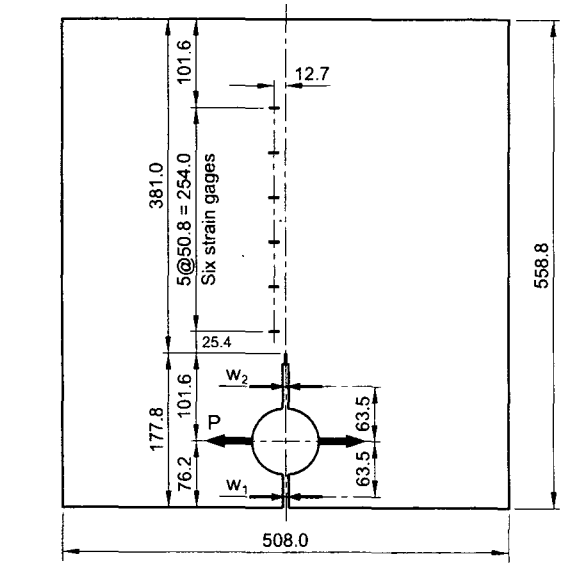
여기서, w_o는 초기 균열단의 위치에서 균열단폭(crack tip width, CTW)으로 실험에서 측정된 균열개구폭(crack mouth width, CMW)으로부터 계산될 수 있으며, β는 균열폭형상계수이다.

3. 동적파괴 실험결과

이 논문에서는 압축강도가 45.9 MPa로 재료특성이 같은 기존 TPB[11] 그리고 CLWL-DCB[12] 시험편의 동적파괴 실험결과에 대한 수정 특이-파괴진행대 이론의 파괴특성을 평가하였다. 이들 시험편의 형상과 하중경계조건은 Fig. 3과 같다. TPB와 CLWL-DCB 시험편의 반응은 각각 최대 102 mm와 381 mm의 균열성장과 서로 다른 하중 경계조건에 대해 측정되었다.



(a) TPB specimen [11]



(b) CLWL-DCB specimen [12]

Thickness = 50.8 mm Unit: mm

Fig. 3 Configurations of test specimens[11]

이들 실험의 하중과 하중점-변위 이력은 Fig. 4와 같으며, Fig. 3의 변형률 게이지에 의해 평가된 균열성장길이는 하중점-변위에 대해 Fig. 5와 같다. 완전파손까지 평균 균열속도는 TPB 시험편에 대해 0.00016~65.8 m/s 와 CLWL-DCB 시험편에서 0.0008~215 m/s이었다. Fig. 6은 Fig. 4의 하중점-변위에 대한 외부하중과 삼점휨 시험편의 균열개구폭으로 외부일과 운동에너지 및 변형에너지의 계산에 적용되었으며, 식 (7)의 균열폭 분포에 적용하기 위해 측정된 균열개구폭 CMW를 보여준다.

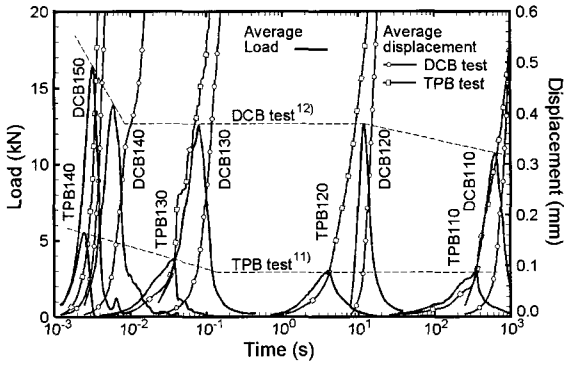


Fig. 4 Average measured and load-point displacement histories

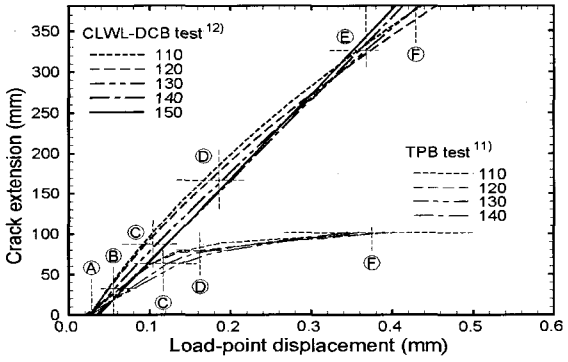


Fig. 5 Average measured crack extensions

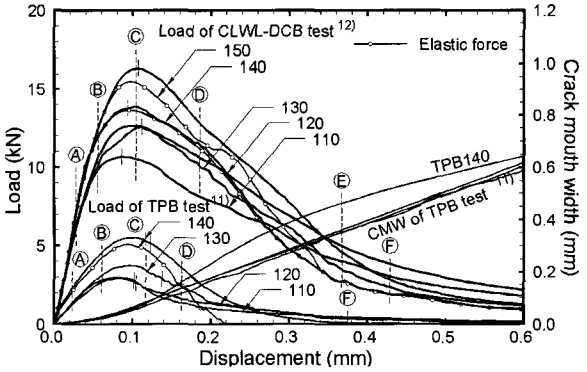


Fig. 6 Average measured load and crack mouth width (CMW)

Table 1 Average experimental results of TPB and CLWL-DCB tests[11,12]

Test #		Period (s)	Peak load (kN)	Work (N · m)	G_F (N/m)
TPB	TPB110	1,952	2.961	0.579	112
	TPB120	20.06	2.994	0.607	117
	TPB130	0.164	3.786	0.691	134
			3.683*	0.691*	134*
	TPB140	0.00345	5.462	0.797	154
			5.053*	0.646*	125*
CLWL-DCB	DCB110	1,302	10.66	4.027	208
	DCB120	35.74	12.66	5.370	277
	DCB130	0.441	12.51	4.138	214
	DCB140	0.0432	13.97	4.112	212
			13.53*	4.058*	210*
	DCB150	0.00518	16.28	4.631	239
			15.49*	4.424*	229*

*: Responses not including inertial force

Table 1은 각 시험편에 대한 실험결과의 요약이다. 표에서 기간(period)은 시험편의 완전한 파손에 소요된 시간이다. G_F는 Fig. 6의 관성력이 포함되지 않은 외부일을 균열면적으로 나눈 평균 파괴에너지율이다. G_F는 같은 시험편에서 균열속도의 차이에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보이나, 두 시험편 간에는 큰 차이를 보였다.

Figs. 7, 8은 Fig. 6의 실험결과에 요구되는 파괴에너지이며, 식 (1)과 (2)에 의해 참고문헌 11과 12에서 평가된 값이다. Fig. 7에는 상대적으로 작은 균열성장에서 두 시험편의 균열성장에 필요한 파괴에너지를 비교하기 위해 CLWL-DCB 시험편에 요구되는 파괴에너지를 함께 나타내었다. 단계 ©까지 CLWL-DCB 시험편에서 큰 파괴에너지를 보이나 이후 TPB 시험편에서 급속히 증가하였다.

4. 수정 특이-파괴진행대 이론의 파괴특성

이 논문에서 시험편의 형상과 하중경계조건 그리고 균열속도에 따른 Figs. 7, 8의 파괴에너지를 만족하는 파괴특성 $G(a)$와 $f_{ccs}(w)$는 식 (2)에 의해 계산된 파괴에너지가 실험에서 평가된 각 균열성장에서 파괴에너지와 표준오차가 최소화 되도록 결정된다[7]. 기본적으로 이 연구의 파괴에너지 계산에는 정적 연속균열성장에 대한 참고문헌 7과 같은 다음의 방법이 사용되었다. 정적 연속균열성장의 해석에서 식 (7)의 초기균열단폭 w_o와 균열폭형상계수 β는 각각 다음과 같으며,

$$\frac{w_o}{w_m} = \frac{1}{1+\beta(a_o/a)} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{a\Delta w}{\Delta a_w w_m - a_o \Delta w} \quad (9)$$

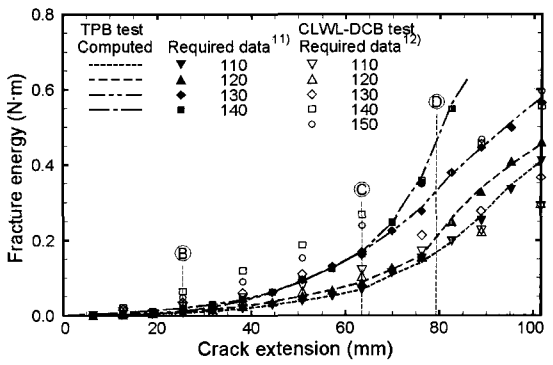


Fig. 7 Required and computed fracture energies of TPB tests

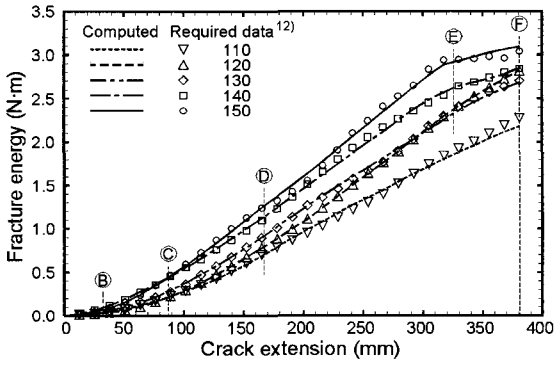


Fig. 8 Required and computed fracture energies of CLWL-DCB tests

여기서, w_m은 균열성장길이 a에서 측정된 균열개구폭이며, a_o는 초기 균열길이, Δw는 간격이 Δa_w인 Fig. 3의 w_1과 w_2에서 측정된 초기균열폭의 차이이다.

식 (8)과 (9)의 계수가 적용된 식 (7)로부터 균열의 임의 위치에서 균열폭을 계산할 수 있으며, 균열성장 a에서 파괴에너지 E_f는 식 (4)의 G_{fpz}에 대해 다음과 같다.

$$E_f(a) = \int_0^a [G(x) + G_{fpz}(w_x)]\, t\, dx \quad (10)$$

Figs. 7, 8에서 곡선은 식 (10)에 의해 계산된 각 시험편의 파괴에너지이며, 식 (10)에는 Figs. 9~11과 Table 2의 파괴특성이 적용되었다. Fig. 10의 임계 변형에너지방출률 그리고 Fig. 11과 Table 2에 요약된 균열면응력-균열폭 관계는 Figs. 7, 8의 실험결과로부터 평가된 파괴에너지에 대해 각 균열성장에서 식 (10)으로 계산된 파괴에너지의 표준오차가 최소가 되도록 결정되었다. 최적화 과정에서 Fig. 9의 TPB 시험편에 대한 균열폭형상계수와 초기균열단폭 또한 결정되었다. CLWL-DCB 시험편의 균열폭형상계수는 측정된 균열개구폭으로부터 식 (9)에 의해 평가된 값이다. 이 논문의 해석에 의한 표준오차는 시험편에 따라 Table 2와 같이 1~3% 이었다.

Fig. 9는 식 (8)과 (9)로 계산된 초기균열단폭과 균열폭 형상계수이다. 초기균열성장에서 TPB 시험편의 형상계수는 약 0.5이며, TPB110과 TPB140은 약 1.2까지 증가한 반면에, TPB120과 TPB130은 CLWL-DCB 시험편과 유사한 1.0이었다. 강체운동에 예상되는 TPB140을 제외한 모든 시험편에서 단계 Ⓒ 이후 형상계수 β는 1.0이었다. 단계 Ⓒ에서 TPB 시험편의 초기균열단폭은 실물 크기의 CLWL-DCB 시험편보다 빠르게 증가하였다. CLWL-DCB 시험편의 초기균열성장에서 약 0.5의 형상계수는 단계 Ⓒ의 1.0까서 증가하며, 이후 단계 Ⓓ까지 이 값을 유지하였다. 1.0보다 작은 균열폭형상계수는 Fig. 1과 같이 레이저와 무아레 간섭사진촬영[9,10]의 무딘(blunt) 균열형태와 같으며, 이산균열의 균열단에서 특이성을 필요로 한다.

Fig. 10은 이 연구에서 파괴기준으로 적용된 임계변형에너지방출률을 보여준다. Table 2의 G_{min}으로 일정한 값은 단계 Ⓑ에서 선형으로 증가하기 시작하여 단계 Ⓒ 이후 G_{max}으로 일정한 값을 유지하였다. 빠른 균열성장에 대한 CLWL-DCB 실험에서 임계 변형에너지방출률은 단계 Ⓔ에서 다시 감소되었다. 이 논문의 그림에 표시된 단계 Ⓑ와 Ⓒ 및 Ⓔ는 변형에너지방출률의 변화가 발생되는 하중점-변위 또는 균열성장길이를 나타내며, 균열성장이 시작되는 단계 Ⓐ와 함께 Table 3에 정리되어 있다.
단계 Ⓑ 이전 일정한 변형에너지방출률은 넓게 분포된 연결되지 않은 미세균열의 성장에 필요한 에너지를 의미하며, 단계 Ⓑ와 Ⓒ 사이에서 변형에너지방출률의 증가는 참고문헌 6에서 관측된 미세균열성장의 국부화과정으로 판단된다. TPB 시험편의 단계 Ⓒ는 최대하중 이후 최대 변형에너지에서 발생되나, CLWL-DCB 시험편의 단계 Ⓒ는 Fig. 6의 최대하중에서 발생되었다. 단계 Ⓑ와 Ⓒ 사이에서 빠른 균열성장의 TPB 시험편에서 변형에너지방출률의 증가율은 CLWL-DCB 시험편과 유사하였으나, 최대 값은 최대 변형에너지에서 상대적으로 작은 균열성장길이에 의해 제한된다.

Fig. 10은 임계변형에너지방출률의 최소 및 최대 값이 시험편의 형상에 의존적이며, 특히 최대 값은 균열속도에 의해서도 큰 영향을 받는 것을 보여준다. Fig. 11과 Table 3에서는 가장 단순한 형태의 선형 균열면응력-균열폭 관계가 적용되었다. 이는 보다 일반적인 다중선형 관계를 사용하는 경우에도 정적 균열성장에 대한 해석[7]과 같이 파괴에너지에 대한 표준오차의 감소를 보이지 않았기 때문이다. 시험편의 형태와 하중 경계조건 그리고 균열속도에 대해 균열면응력-균열폭 관계는 거의 같은 값이었다.

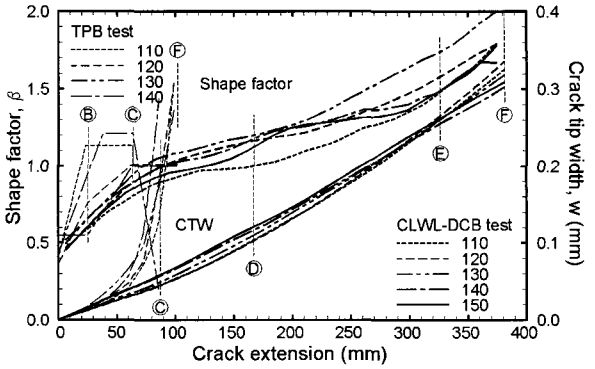


Fig. 9 Estimated shape factors and crack tip widths

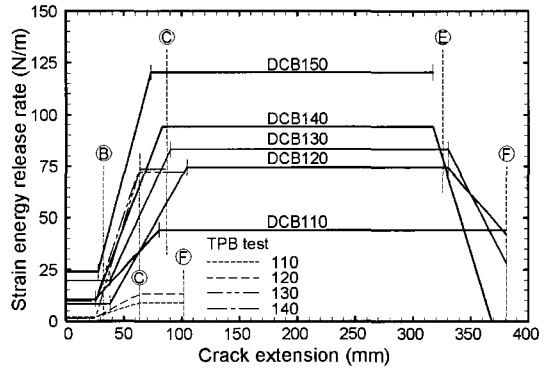


Fig. 10 Applied strain energy release rates

Table 2 Average measured crack velocities and applied fracture properties

Property	TPB test				CLWL-DCB test				
	110	120	130	140	110	120	130	140	150
$\dot{a}_{ave}$ (m/s)(1)	0.00016	0.0134	1.92	65.8	0.0008	0.0589	4.95	56.3	215
f_{ccso} (MPa)	1.81	1.86	1.84	1.90	1.85	1.85	1.88	1.92	1.90
w_c (mm)	0.0991	0.1067	0.0965	0.1245	0.115	0.143	0.114	0.115	0.109
G_{FPZ} (N/m)	89.8	99.3	88.8	118.0	106.5	133.3	107.2	110.0	103.1
G_{min} (N/m)	1.93	1.82	1.58	9.81	10.65	8.48	19.65	9.56	24.10
G_{max} (N/m)	9.11	13.31	72.33	73.73	44.24	74.60	83.36	94.22	120.49
Standard error (%)(2)	3.00	2.17	2.52	1.02	2.93	2.18	2.01	1.98	2.59

(1) : Average crack velocity during crack extension
(2) : Standard error of the computed fracture energies to the required fracture energies for tests

Table 3 Crack extension and load-point displacement at each step (unit : mm)

Step		TPB test group					CLWL-DCB test group						Expected behavior
		110	120	130	140	Ave.	110	120	130	140	150	Ave.	
Ⓐ	a	0.0					0.0						Micro-cracking
	u_p	0.024	0.020	0.021	0.028	0.023	0.027	0.026	0.027	0.037	0.034	0.028	
Ⓑ	a	25.4					25.4	38.1	38.1	-	27.9	32.4	Micro-crack localizing
	u_p	0.056	0.054	0.068	0.066	0.061	0.044	0.054	0.062	-	0.062	0.056	
Ⓒ	a	63.5					80.7	104.4	90.1	58.4†	73.4	87.2	Maximum fracture criterion
	u_p	0.102	0.104	0.138	0.123	0.117	0.086	0.111	0.112	0.094†	0.107	0.104	
Ⓓ	a	83.6	80.3	76.2	77.0	79.3	177.8	212.9†	171.6	164.7	151.6	166.4	Full development of FPZ
	u_p	0.145	0.168	0.177	0.161	0.163	0.178	0.226†	0.194	0.196	0.185	0.188	
Ⓔ	a	-					-	330.2	330.2	292.1†	317.5	326.0	Decreasing fracture criterion
	u_p	-	-	-	-	-	-	0.379	0.372	0.319†	0.351	0.368	
Ⓕ	a	101.6					381.0						Maximum crack extension
	u_p	0.403	0.391	0.360	0.345	0.375	0.437	0.455	0.434	0.405	0.414	0.429	

† The values not included for average

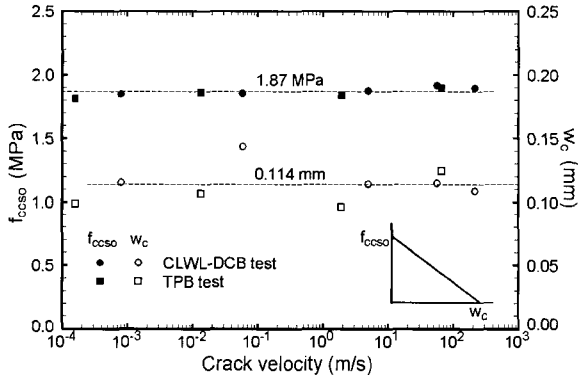


Fig. 11 Applied crack closure stresses and crack width relationships

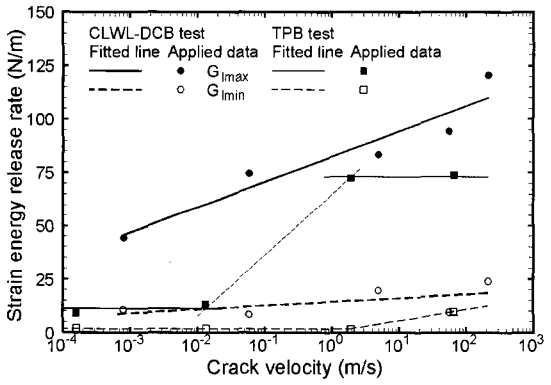


Fig. 12 Crack velocity effect on limits values of strain energy release rates

전체 실험에 대한 평균 최대균열면응력 1.87 MPa과 임계균열폭 0.114 mm이었으며, 이 평균값에 대한 최대 편차는 균열면응력과 균열폭에서 각각 25 kPa과 6.6 μm이었다. Fig. 12는 균열속도에 대한 Fig. 10의 변형에너지방출률의 제한 값을 보여준다.

G_{min}의 경우 TPB140 시험편이 포함되지 않은 TPB 시험편의 평균값은 1.78 N/m으로 CLWL-DCB 시험편 평균 14.5 N/m보다 상당히 작으며, 이는 하중경계조건에 의한 초기균열단에서 응력집중의 차이에서 발생되는 것으로 판단된다. 빠른 균열속도의 TPB140 실험에서 G_{min}은 9.81 N/m이며, 균열속도보다 상대적으로 빠른 하중점-속도에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 12의 CLWL-DCB 시험편에서 G_{min}에 대한 균열속도의 영향은 크지 않으나, G_{max}은 다음과 같이 균열속도의 함수로 표현될 수 있다.

$$G_{max} = 11.85 \log(\dot{a}) + 82.32 \qquad (11)$$

여기서, G_{max}과 $\dot{a}$의 단위는 각각 N/m와 m/s이다. 정적 TPB 실험에서 11.2 N/m의 G_{max}은 동적 TPB 실험에서 73.0 N/m로 급격히 증가되었다. 그러나 이 값은 CLWL-DCB 실험보다 작았다.

파괴저항은 단위면적 균열성장에 필요한 파괴에너지율의 식 (2)로 정의되며, CLWL-DCB와 TPB 시험편에 대

한 Figs. 13, 14의 파괴저항은 Fig. 11의 균열면응력-균열폭 관계로부터 식 (4)로 계산된 $G_{fpz}(a)$에 Fig. 10의 $G(a)$를 더하여 계산되었다. CLWL-DCB 시험편의 G_{fpz}는 단계 Ⓓ까지 대략 선형으로 증가하였으며, 이후 식 (3)에서 정의된 파괴에너지밀도 G_{FPZ}의 값을 유지하였다. CLWL-DCB 시험편의 단계 Ⓓ는 초기 균열단폭이 임계 균열폭이 되어 완전한 파괴진행대를 형성할 때이며, 각 시험편의 단계 Ⓓ에서 하중점-변위와 균열성장길이는 Table 3과 같다. 단계 Ⓓ에서 완전히 형성된 파괴진행대의 평균 크기는 166 mm이다. Table 3의 단계 Ⓓ에서 다른 시험편보다 큰 DCB120 시험편의 임계 균열폭로 인해 Fig. 13의 단계 Ⓓ 이후 상대적으로 큰 G_{FPZ}가 계산되었다.

Fig. 14의 TPB 시험편에 대한 파괴저항은 단계 Ⓒ까지 안정적으로 증가하나, 단계 Ⓒ 이후 G_{fpz}의 기울기는 G_{FPZ}까지 급격히 증가하였다. 이는 외부일의 공급보다 변형에너지의 방출이 크기 때문이며, 이로부터 불안정 균열성장을 예상할 수 있다[7]. 이러한 현상은 정적 실험에서 단계 Ⓒ 이후 하중점-변위의 불안정한 증가에서도 관측되었다. 단계 Ⓒ 이후 강체운동을 보이는 TPB140을 제외한 시험편의 G_{max}은 불안정 균열성장에 의해 제한되는 것으로 판단된다. TPB 시험편의 G_{fpz}는 약 70 mm의 균열성장에서 G_{FPZ}에 이르며, 약 80 mm의 균열성장에서 최대값에 도달한다. G_{FPZ}보다 큰 G_{fpz}는 파괴에너지가 균열성장보다는 균열면에서 파괴진행에 의해 발생되는 경우에만 가능하다.

Fig. 5의 감소하는 균열성장율과 Fig. 9의 초기균열단폭의 급격한 증가 또한 이를 설명하고 있다. 완전한 파괴진행대가 형성되는 단계 Ⓓ에서 TPB 시험편의 크기는 Fig. 5와 Table 3과 같이 CLWL-DCB 시험편의 약 반 정도에 불과하며, 상대적으로 작은 파괴진행대의 크기 또한 TPB 시험편에서 균열성장의 구속을 입증한다. TPB 시험편에서 균열성장의 구속은 시험편의 기하학적 특성으로 균열단 앞의 좁고 큰 압축역영으로 발생된다.

이 논문에서는 균열단에서 특이성의 정도를 나타내기 위해 파괴에너지율에 대한 임계 변형에너지방출률 G_c/G_f로 정의되는 특이율(singularity rate)의 개념을 사용하였다. 이 논문에서 평가된 CLWL-DCB와 TPB 시험편에 대한 특이율은 Fig. 15와 같다. 느린 균열성장의 TPB 시험편에서 평균 특이율은 0.24이며, 빠른 균열성장의 시험편은 0.54이었다. CLWL-DCB 시험편은 파괴진행대가 완전히 형성되는 단계 Ⓓ 이후 DCB110에서 0.33 그리고 DCB150에서 0.57로 비교적 일정한 값을 보였다.

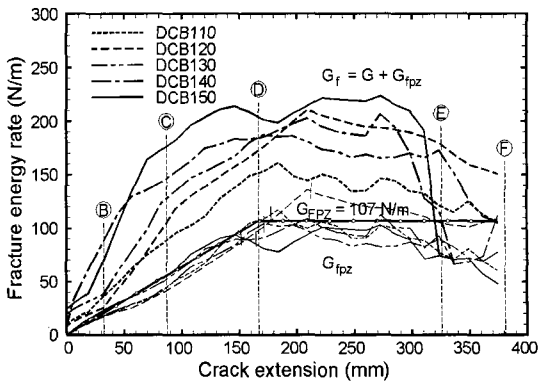


Fig. 13 Computed resistance curves of CLWL-DCB specimens

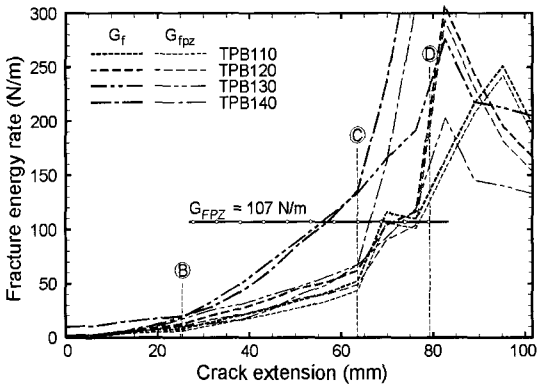


Fig. 14 Computed resistance curves of TPB specimens

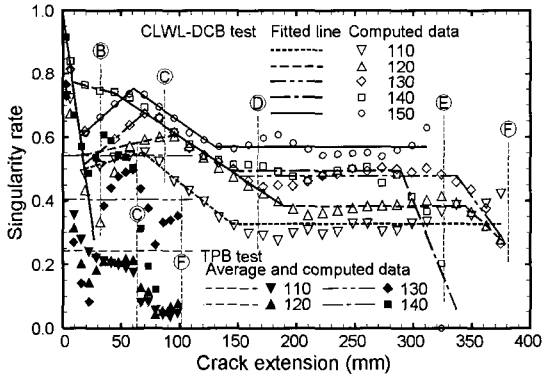


Fig. 15 Singularity rates for crack extension

이는 특이 균열단의 성장에 필요한 에너지가 전체 파괴에너지의 최소 1/4에서 최대 1/2 이상으로 콘크리트의 파괴거동에 균열단의 특이성이 고려되어야 하는 것을 보여준다. 또한 파괴진행대가 완전히 형성된 경우의 취성도(brittleness)에 특이율이 적용될 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

이 논문에서는 균열성장길이 381 mm에 대한 균열속도 0.80 mm/s~215 m/s의 CLWL-DCB 시험편 그리고 균열성장길이 102 mm와 0.16 mm/s~65.8 m/s의 균열속도에 대한 TPB 시험편의 실험으로 평가된 파괴에너지가 수정 특이-파괴진행대 이론의 파괴특성에 대해 분석되었다. 분석결과 수정 특이-파괴진행대 이론의 파괴특성에 대한 균열속도와 시험편의 형태에 대한 영향은 다음과 같았다.

(1) 변형에너지방출률이 파괴특성으로 사용되는 경우 선형의 균열면응력-균열폭 관계는 시험편의 형태와 균열속도에 영향을 받지 않는다. 이 연구의 해석에 적용된 시험편의 경우 최대 균열면응력 1.87 MPa과 임계균열폭 0.114 mm로 파괴에너지밀도는 107 N/m이었다. CLWL-DCB 시험편의 경우 파괴진행대의 파괴에너지율은 파괴진행대가 완전히 형성될 때까지 균열성장에 대해 선형으로 증가하며, 이후에는 대략적으로 파괴에너지밀도의 일정한 값을 유지하였다.

(2) 파괴기준인 변형에너지방출률은 시험편의 형상뿐만 아니라 균열속도에도 영향을 받았다. 약 30 mm 균열성장까지 G_{min}으로 일정하던 변형에너지방출률은 이후 균열성장에 대해 선형으로 G_{max}까지 증가하였다. CLWL-DCB 시험편의 경우 완전한 파괴진행대의 형성에서 G_{max}이 되었으며, 균열속도의 함수로 제안되었다. 그러나 상대적으로 작은 크기의 TPB 시험편에서 G_{max}은 불안정 균열성장과 이의 구속에 의해 CLWL-DCB 시험편의 값보다 상당히 작았다.

(3) 균열성장 초기에 일정한 값을 유지하는 변형에너지방출률 G_{min}은 넓게 분포된 미세균열의 성장에 의한 것으로 판단되며, G_{min}에서 G_{max}까지 증가는 미세균열 성장의 국부화에 의한 것으로 보인다.

(4) CLWL-DCB 시험편에서 파괴진행대의 평균 크기는 166 mm이며, 의 특이율 G_c/G_f는 완전한 파괴진행대 형성 이후 정적실험에서 0.33과 215 m/s의 균열속도에서 0.57로 평가되었다.

참고문헌

1. Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.-E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements," *Cement and Concrete Research*, Vol.6, No.6, 1976, pp.773~782.
2. Bazant, Z. P. and Oh, B. H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete," *Materials and Structures*, RILEM, Vol.16, No.1, 1983, pp.155~177.
3. Landis, E. and Shah, S. P., "Recovery of Microcrack Parameter in Mortar Using Quantitative Acoustic Emission," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.12, No.4, 1993, pp.213~232.
4. Li, Z., "Microcrack Characterization in Concrete under Uniaxial Tension," *Magazine of Concrete Research*, Vol.48, No.176, 1996, pp.219~228.
5. Li, F. and Li, Z., "Acoustic Emission Monitoring of Fracture of Fiber Reinforced Concrete in Tension," *ACI Materials Journal*, ACI, 2000, Vol.97, No.6, pp.629~636.
6. Krstulovic-Opara, N., "Fracture Process Zone Presence and Behavior in Mortar Specimens," *ACI Materials Journal*, ACI, Vol.90, No.6, 1993, pp.618~626.
7. 연정흠, "콘크리트의 연속적인 균열성장에 대한 수정 특이-파괴진행대이론," 한국콘크리트학회지, 15권, 6호, 2003, pp.802~810.
8. Yon, J.-H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "Numerical Simulation of Mode I Dynamic Fracture of Concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.117, No.7, 1991, pp.1596~1610.
9. Miller, R. A., Castro-Montero, A., and Shah, S. P., "Cohesive Crack Models for Cement Mortar Examined Using Finite Element Analysis and Laser Holographic Measurement," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.74, No.4, 1991, pp.629~636.
10. Du, J, Yon, J.-H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "Fracture Process Zone for Concrete for Dynamic loading," *ACI Materials Journal*, ACI, Vol. 89, No.3, 1992, pp.252~258.
11. 연정흠, "콘크리트 삼점휨 시험편의 동적 파괴거동," *한국콘크리트학회지*, 14권, 5호, 2002, pp.689~697.
12. 연정흠, "콘크리트 파괴저항에 대한 균열속도의 영향," 한국콘크리트학회지, 15권, 1호, 2003, pp.52~59.
13. Mindess, S. and Bentur, A., "A Preliminary Study of the Fracture of Concrete Beam under Impact Loading, Using High Speed Photography," *Cement and Concrete Research*, Vol.15, No.5, 1985, pp.474~484.
14. Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C., "*Fracture Mechanics of Concrete*," John Wiley & Sons Inc., New York, 1995, 552pp.

15. Yon, J. H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "Comparisons of concrete fracture models," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.123, No.3, 1997, pp.196~203.

16. Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. E. and Witt, R. J. (2002), *Concepts and applications of finite elements analysis*, 4th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 2002, 719pp.

요 약

이 연구에서는 기존의 콘크리트 실험에서 평가된 파괴에너지를 수정 특이-파괴진행대 이론에 대해 해석하였다. 수정 특이-파괴진행대 이론은 균열성장에 대한 에너지해방률과 균열면의 파괴진행에 대한 균열면응력-균열폭 관계의 두 파괴특성을 필요로 한다. 해석결과 균열면응력-균열폭 관계는 시험편의 형상과 균열속도에 민감하지 않았다. 파괴진행대에서 파괴에너지율은 파괴진행대가 완전히 형성될 때까지 균열성장길이에 선형으로 증가하였으며, 이후에는 파괴에너지밀도로 일정한 값을 유지하였다. 변형에너지방출률은 시험편의 형상과 균열속도에 큰 변화를 보였으며, 균열속도에 대해서는 선형의 대수함수로 표현될 수 있다. 균열성장에 대한 변형에너지방출률의 변화는 다른 실험의 미세균열의 성장과 국부화 그리고 완전 파괴진행대의 형성에 대한 이론적인 근거를 보여준다.

핵심용어 : 콘크리트, 균열속도, 파괴기준, 파괴에너지, 파괴진행대