



콘크리트의 연속적인 균열성장에 대한 수정 특이-파괴진행대 이론

연정흙^{1)*}

¹⁾ 인하대학교 토목공학과

(2003년 4월 18일 원고접수, 2003년 7월 25일 심사완료)

Modified S-FPZ Model for a Running Crack in Concrete

Jung-Heum Yon^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received April 18, 2003, Accepted July 25, 2003)

ABSTRACT

In this paper, the modified singular fracture process zone (S-FPZ) model is proposed to consider variation of a fracture criterion for continuous crack propagation in concrete. The fracture properties of the proposed fracture model are strain energy release rate at a micro-crack tip and crack closure stress (CCS) versus crack opening displacement (COD) relationship in the FPZ. The proposed model can simulate the estimated fracture energy of experimental results. The analysis results of the experimental data shows that specimen geometry and loading condition did not affect the CCS-COD relation. But the strain energy release rate is a function of not only specimen geometry but also crack extension. Until 25 mm crack extension, the strain energy release rate is a constant minimum value, and then it increased linearly to the maximum value. The maximum fracture criterion occurred at the peak load for an large size specimen. The fracture criterion remains the maximum value after the peak load. The variation of the fracture criterion is caused by micro-cracking and micro-crack localizing. The fracture criterion of strain energy release rate can simply be the size effect of concrete fracture, and it can be used to quantify the micro-cracking and micro-crack localizing behaviors of concrete.

Keywords : concrete, fracture behavior, modified S-FPZ model, fracture energy rate, fracture criterion

1. 서 론

음향방사(acoustic emission) 실험¹⁾에 의하면 콘크리트의 파괴진행은 하중이 작용되기 이전에 존재하는 미소균열(micro-cracks) 또는 부착균열(bond-cracks)에서 시작되며, 미소균열이 성장하는 구역의 크기는 시험편의 형태 또는 하중 경계조건에 의한 응력집중에 의해 결정된다.¹⁻⁴⁾

하중이 증가함에 따라 미소균열은 다른 미소균열과 서로 연결(bridging)되고, 이로 인한 응력집중의 증가는 미소균열이 성장하는 구간의 폭을 감소시킨다. 이러한 현상을 미소균열의 국부화(localization)라 한다.^{3,5)} 시험편에 작용될 수 있는 최대하중은 미소균열의 국부화 중에 발생된다. 미소균열이 성장하는 구간이 일정한 폭으로 안정화 되면 파괴기준은 균열성장에 대해 일정한 값이 된다. 미소균열의 성장과 이들 미소균열의 연결이 진행되는 구역을 파괴진행대(fracture process zone, FPZ)라 하며, 파괴

진행대에서는 미소균열의 불연속과 균열면의 마찰에 의해 어느 정도의 인장응력이 균열면을 통해 전달될 수 있다. 이 응력을 균열면응력(crack closure stress, CCS)이라 한다.

이러한 콘크리트의 파괴거동을 위해 여러 파괴이론이 제안되었다. 가상균열이론(fictitious crack model, FCM)⁶⁾에서는 최대 균열면응력이 파괴기준으로 가정되며, 균열면응력은 가정된 이산균열(discrete crack)에 대한 균열면 변위(crack opening displacement, COD)에 의해 결정된다. 균열띠이론(crack band model)⁷⁾도 최대 균열면응력을 파괴기준으로 적용하나 균열면 응력은 일정한 균열 폭에서 평균 변형률에 의해 결정되는 차이가 있다. 이중매개변수이론(two-parameter model)⁸⁾은 측정된 초기 균열단 변위(crack tip opening displacement, CTOD)와 최대하중에서 응력확대계수(stress intensity factor, SIF)를 만족하는 유효탄성 균열을 가정한다. 특이-파괴진행대(singular-FPZ, S-FPZ)⁹⁾ 이론은 파괴기준으로 응력확대계수의 파괴기준과 파괴진행대의 CCS-COD 관계를 적용하였다.

미소균열의 성장과 미소균열의 연결에 의한 콘크리트의

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

파괴진행에도 불구하고 위의 파괴이론들은 모두 균열의 성장에 대해 일정한 파괴기준을 적용하고 있다. 균열의 성장길이에 대해 적용되는 일정한 파괴기준은 취성계수 (brittleness number)가 적용된 크기효과 이론(size effect model)¹⁰⁾과 같이 시험편의 기하학적 형태 또는 크기에 따라 변할 수 있다. 이 논문에서 제안된 수정 특이-파괴진행대 이론(modified S-FPZ model)은 미소균열의 성장과 국부화에 따른 파괴기준의 변화를 추정하기 위해서 파괴기준인 에너지해방률(strain energy release rate) 또는 응력확대계수를 균열성장률에 대한 함수로 가정하고 있다.

이 논문에서는 서로 다른 기하학적 형태와 하중조건에 영향을 평가하기 위해 기존의 상대적으로 작은 크기의 삼점휨(three-point bend, TPB) 시험편¹¹⁾과 상대적으로 큰 380 mm 균열성장이 가능한 균열면 쐐기하중(crack-line wedge-loaded, CLWL) 이중-내민보(double-cantilever beam, DCB) 시험편¹²⁾의 실험결과에 수정 특이-파괴진행대 이론을 적용하였고, 실험결과를 만족하는 파괴특성이 평가되었다. 두 실험결과로부터 결정된 파괴특성은 연속적인 균열 성장에 대해 분석되었고, 시험편의 크기 및 경계조건에 독립적인 콘크리트의 균열 성장에 대한 에너지소모기구 및 파괴특성이 연구되었다.

2. 수정 특이-파괴진행대 이론과 파괴에너지

기존의 콘크리트 파괴거동에 대한 이론은 균열의 성장길이에 관계없이 일정한 최대 인장응력 또는 임계 응력확대계수 등의 파괴기준이 적용된다. 그러나 일정한 파괴기준의 적용은 시험편의 기하학적 형상과 크기 및 하중조건에 따라 서로 다른 결과를 보여주고 있다. 이 논문의 수정 특이-파괴진행대 이론은 미소균열 영역의 국부화에 따른 응력집중의 증가를 고려하기 위해 제안되었다. 기존의 특이-파괴진행대 이론이 균열면에서 균열면 응력-변위 관계와 균열의 성장에 대해 일정한 에너지해방률의 파괴기준을 적용하는 반면에, 수정 특이-파괴진행대 이론은 균열 성장에 따른 파괴기준의 변화를 고려한다.

수정 특이-파괴진행대 이론에 의한 이산균열의 에너지소모기구는 새로운 파괴진행대의 생성을 위한 균열성장길이 Δa 의 함수인 에너지해방률 $G_I(\Delta a)$ 과 파괴진행대의 파괴진행 정도에 따른 균열면 변위 w_x 의 함수인 파괴에너지 $G_{FPZ}(w_x)$ 이다. 콘크리트 파괴진행대의 생성과 진행에 필요한 파괴에너지 E_F 는 균열성장길이 Δa_i 에 대한 $G_I(\Delta a)$ 과 $G_{FPZ}(w_x)$ 의 적분으로 다음과 같다.

$$E_F(\Delta a_i) = \int_0^{\Delta a_i} [G_I(x) + G_{FPZ}(w_x)] t dx \quad (1)$$

여기서 t 는 시험편의 두께이다. 균열성장길이 Δa_{i-1}

과 Δa_i 동안에 단위면적의 파괴진행대의 생성과 진행에 필요한 파괴에너지율로 정의되는 파괴저항 G_f 는 다음과 같이 계산된다.

$$G_f(\Delta a_i) = \frac{E_F(\Delta a_i) - E_F(\Delta a_{i-1})}{(\Delta a_i - \Delta a_{i-1})t} \quad (2)$$

파괴진행대의 균열면 응력-변위 관계로부터 파괴진행의 정도에 대한 파괴에너지율을 추정하기 위해서는 균열성장길이의 임의 위치에서 균열면 변위가 가정되어야 한다. Fig. 1(a)와 같이 균열성장길이가 Δa 인 경우 균열단에서 거리가 x 인 위치의 균열면 변위 w 는 변위형태계수 β 와 초기 균열단 $x = \Delta a$ 에서 균열면 변위 w_o 로부터 다음과 같이 가정되었다.

$$w(x) = w_x = w_o \left(\frac{x}{\Delta a} \right)^\beta \quad (3)$$

균열면 응력이 발생되지 않는 초기균열 a_o 의 균열면에서 균열면 변위가 선형으로 가정되면, 초기 균열단 변위 w_o 는 실험으로 측정될 수 있는 균열개구변위(crack mouth opening displacement, CMOD) w_m 과 식 (3)의 초기 균열단에서 기울기로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\frac{dw(\Delta a)}{dx} = \beta \frac{w_o}{\Delta a} = \frac{w_m - w_o}{a_o} \quad (4)$$

$$\frac{w_o}{w_m} = \frac{1}{1 + \beta(a_o/\Delta a)} \quad (5)$$

서로 Δa_w 떨어진 초기 균열면의 두 위치에서 균열면 변위의 차이 $\Delta w = w_1 - w_2$ 가 측정된 경우에는 균열면에서 평균 기울기 $\Delta w/\Delta a_w$ 로부터 다음과 같이 변위형태계수 β 가 결정될 수 있다.

$$\beta = \frac{\Delta a}{\Delta a_w w_m - a_o \Delta w} \quad (6)$$

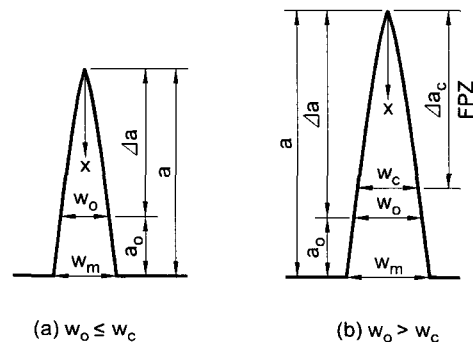


Fig. 1 Notations for crack opening shape

Fig. 1(b)와 같이 파괴진행대가 완전히 형성되어 w_o 가 균열면 응력이 0보다 큰 경우의 최대 균열면 변위 또는 임계 균열면변위 w_c 보다 크면, 파괴진행대의 크기 Δa_c 는 다음의 식에 의해서 계산되어야 한다.

$$w(x) = w_x = w_c \left(\frac{x}{\Delta a_c} \right)^\beta \quad (7)$$

$$\begin{aligned} w_m - w_c &= (a - \Delta a_c) \frac{dw(\Delta a_c)}{dx} \\ &= \beta w_c \frac{a_o + \Delta a - \Delta a_c}{\Delta a_c} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta a_c}{a} = \frac{\beta}{w_m/w_c - (1 - \beta)} \quad (9)$$

균열면 응력-변위 관계가 $f_{ccs}(w)$ 인 경우에 파괴진행대에서 균열면변위 w_x 의 파괴진행에 대해 소모된 파괴에너지를 $G_{FPZ}(w_x)$ 는 다음과 같다.

$$G_{FPZ}(w_x) = \int_0^{w_x} f_{ccs}(w) dw - \frac{1}{2} f_{ccs}(w_x) w_x \quad (10)$$

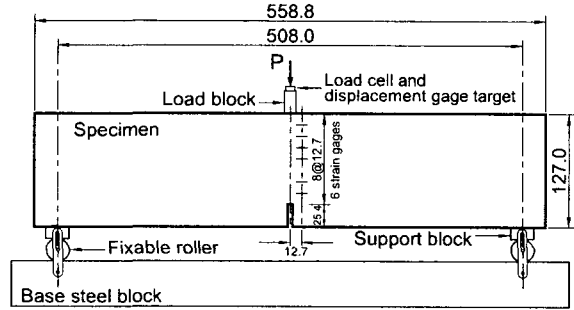
여기서 $\frac{1}{2} f_{ccs}(w_x) w_x$ 의 항은 하중이 제거될 때 파괴진행대에서 복원되는 탄성에너지이다. $w_x = w_c$ 이면 파괴에너지율은 최대 값 $G_{FPZ} = G_{FPZ}(w_c)$ 또는 단위면적의 완전한 파괴진행대 형성에 필요한 파괴에너지율로 정의되는 한계파괴에너지율(fracture energy density)이 된다.

3. 실험결과

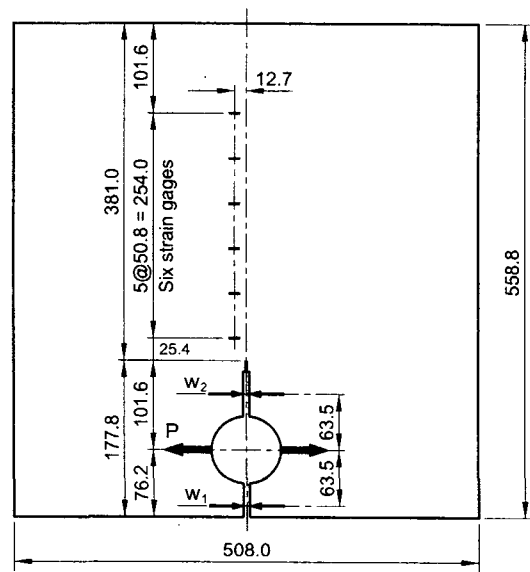
이 논문에서 제안된 수정 특이-파괴진행대 이론에 의한 콘크리트의 파괴특성을 결정하고, 시험편의 기하학적 특성과 하중조건에 따른 파괴거동을 밝히기 위해서 기존의 TPB 시험편과 CLWL-DCB 시험편에 대한 정적 파괴시험의 결과가 분석되었다. 두 시험편의 기하학적 형상과 하중 경계조건은 Fig. 2와 같다. TPB 시험편의 초기 균열 길이는 6.4mm와 25.4mm이며, 최대 균열성장길이는 각각 120mm와 101mm이다. CLWL-DCB 시험편의 균열성장은 초기 균열면에 작용된 수평방향의 썸어하중에 의해 발생되며, 최대 균열성장길이는 381mm이다. 같은 배치의 콘크리트로 타설된 두 시험편의 평균 압축강도와 썸어인장강도는 각각 45.9MPa와 3.93MPa이다. 두 실험의 방법 및 과정의 자세한 내용은 참고문헌 11과 12에 수록되어 있다.

각각 세 시험편에 대한 CLWL-DCB 실험과 TPB 실험의 결과에 대한 요약은 Table 1과 같다. Fig 3은 Table 1의 각 실험에서 측정된 하중-하중점변위 관계이며, 하중 P_i 와 하중점 변위 δ_i 에서 각 실험의 외부일은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} W_i &= \int_0^{\delta_i} P d\delta \\ &\approx \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i (P_{j+1} + P_j) (\delta_{j+1} - \delta_j) \end{aligned} \quad (11)$$



(a) TPB specimen ¹¹⁾



(b) CLWL-DCB specimen ¹²⁾

Thickness = 50.8 mm

Unit: mm

Fig. 2 Configurations of TPB and CLWL-DCB specimens

Table 1 Results of experimental tests ^{11,12)}

Notch size	Test #	Duration (sec)	Peak load (kN)	Work (N · m)	G_F (N/m)
6.4 mm	TPB001	2,070	3,817	0.840	137
	TPB002	1,260	3,277	0.551	90
	TPB003	1,410	3,237	0.625	102
	Ave.	1,580	3,444	0.672	110
25.4 mm	TPB101	2,040	3,040	0.524	102
	TPB102	1,980	2,976	0.622	121
	TPB103	1,840	2,867	0.590	114
	Ave.	1,953	2,961	0.579	112
117.8 mm	DCB101	1,360	10.61	4.025	208.0
	DCB102	1,310	10.03	4.307	222.6
	DCB103	1,230	11.35	3.748	193.6
	Ave.	1,300	10.66	4.027	208.1

Note: G_F = the average fracture energy density

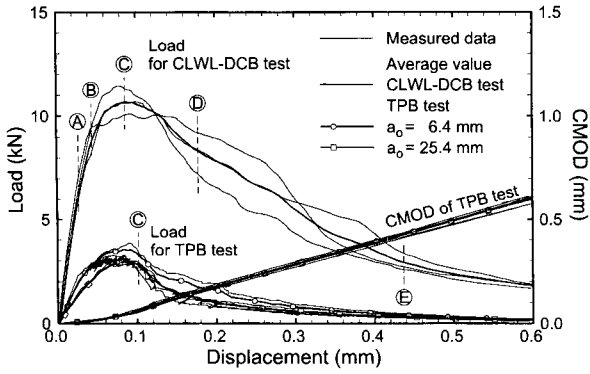


Fig. 3 Measured load versus load-point displacement relations^{11,12)}

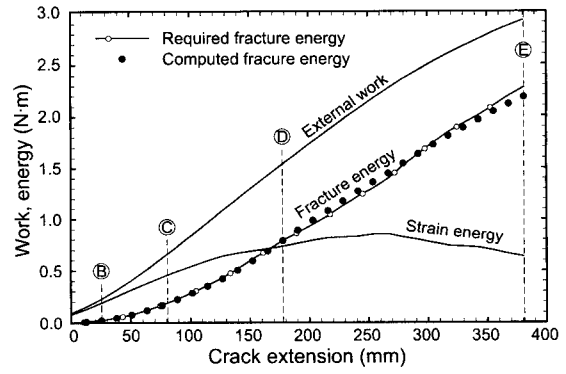


Fig. 5 Energy partitions of CLWL-DCB tests

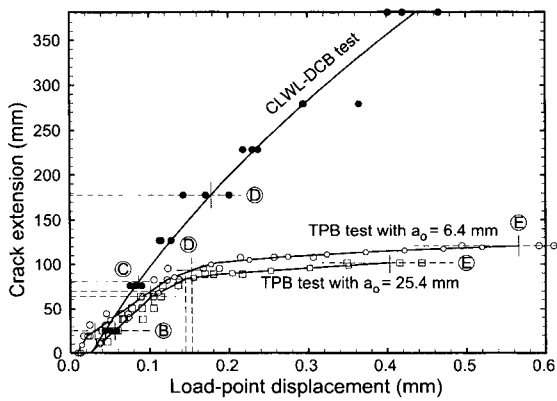


Fig. 4 Measured and average crack extensions^{11,12)}

Fig. 3의 평균하중은 외부일의 평균값 W_i^{ave} 의 하중점 변위에 대한 변화율로부터 다음과 같이 계산되었다.

$$P_i^{ave} = \frac{dW_i^{ave}}{d\delta_i} \approx \frac{W_i^{ave} - W_{i-1}^{ave}}{\delta_i - \delta_{i-1}} \quad (12)$$

그러므로 Fig 3의 평균하중은 측정된 외부일의 평균값을 만족하는 하중이다. Table 1에서 외부일은 시험편이 완전히 파손된 때의 식 (11)에 의한 값이며, 평균 파괴에너지를 G_F 는 다음과 같이 계산되었다.

$$G_F = \frac{[\text{외부일}]}{[\text{균열면의 면적}]} \quad (13)$$

Fig. 3에서 TPB 시험편에 대한 균열개구변위(CMOD)는 초기 균열길이 6.4mm와 25.4mm에 대해 거의 같은 값이었다. Fig. 4는 각 시험편에 대해 Fig. 2의 변형을 개이저를 사용하여 측정된 균열성장길이이다. TPB 실험의 측정된 균열성장은 단계 C 이후에 급격한 감소를 보이나 CLWL-DCB 실험의 경우에는 하중점 변위에 대해 포물선의 균열성장을 보였다.

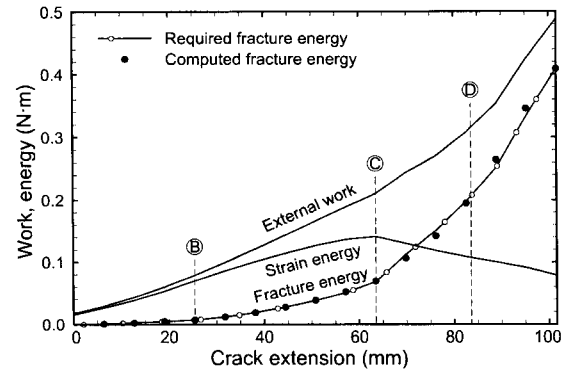


Fig. 6 Energy partitions of TPB tests ($a_0 = 25.4$ mm)

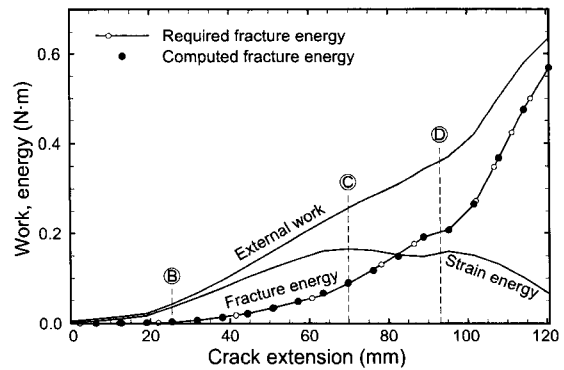


Fig. 7 Energy partitions of TPB tests ($a_0 = 6.4$ mm)

Figs. 5~7은 각 실험의 평균 하중-하중점변위 관계로부터 계산된 에너지 분할(energy partitions)이며, 하중이 제거될 때 발생할 수 있는 영구변형이 고려되지 않은 최대 파괴에너지의 가정에 의해 계산된 값이다.¹³⁾ 하중제거에 발생하는 영구변형이 무시되는 경우에 회복 가능한 탄성에너지 $E_{Si}^{ave} = \frac{1}{2}P_i^{ave}\delta_i$ 가 되고, 파괴에너지 E_{Fi} 는 에너지균형으로부터 다음과 같이 추정될 수 있다.

Table 2 Applied fracture properties

Property	TPB test a_o		CLWL-DCB test
	6.4 mm	25.4 mm	
f_{ccso} MPa	1.83	1.81	1.85
w_c mm	0.108	0.099	0.115
G_{FPZ} N/m	98.8	89.8	106.5
G_{Imin} N/m	0.771	1.93	10.61
G_{Imax} N/m	23.64	9.11	44.24

Note: f_{ccso} = maximum crack closure stress

$$E_{Fi}^{ave} = W_i - \frac{1}{2} P_i^{ave} \delta_i \quad (14)$$

이 경우 파괴에너지는 가능한 최소의 값이다. 이 가정은 콘크리트의 소성변형이 아직 명확히 입증되지 않았고, 하중이 제거될 때 발생하는 콘크리트의 영구변형이 거친 균열면의 마찰에 의해 발생하는 경우에는 하중제거에 대한 균열면의 압축응력과 균열단의 인장응력이 고려된 새로운 역학기구가 형성되어야 한다. 이 연구에 적용된 실험에는 하중제거가 없었기 때문에 영구변형이 무시되었다.

4. 파괴특성

수정 특이-파괴진행대 이론을 위해서는 파괴진행대의 생성에 대한 에너지해방률 G_I 와 파괴진행대의 파괴진행에 대한 한계파괴에너지율 G_{FPZ} 의 파괴특성이 결정되어야 한다. 그러나 실험결과로부터 두 파괴특성이 직접 결정될 수는 없기 때문에 이 논문에서는 실험결과에 요구되는 식 (14)의 파괴에너지에 대한 식 (1)의 표준오차가 최소가 되도록 결정되었다. 각 균열성장길이 Δa_i 에서 적용된 파괴특성에 대한 파괴에너지 $E_F(\Delta a_i)$ 의 실험에 요구되는 파괴에너지 E_{Fi}^{ave} 에 대한 표준오차(standard error, SE)는 다음과 같이 계산되었다.

$$SE(\%) = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{E_{Fi}^{ave} - E_F(\Delta a_i)}{E_{Fi}} \right]^2} \quad (15)$$

파괴에너지에 대한 표준오차를 최소화할 수 있는 파괴특성은 다음의 과정으로 결정되었다.

- ① 파괴진행대의 성장을 위한 에너지해방률 $G_I(\Delta a_i)$ 를 가정한다.
- ② 균열면 응력-변형관계 $f_{ccs}(w)$ 를 가정한다.
- ③ 각 균열성장기에 대한 파괴진행대의 파괴진행에 의해 소모된 파괴에너지율 $G_{fpz}(\Delta a_i)$ 를 계산한다.
- ④ 식 (1)의 파괴에너지를 계산한다.
- ⑤ 식 (15)의 표준오차를 계산한다.
- ⑥ 표준오차가 충분히 작으면 파괴특성의 결정과정을 끝낸다.

⑦ 균열성장길이에 대한 에너지해방률의 공식을 최소화방법으로 유도하고, 단계 ②부터 다시 반복한다.

CLWL-DCB 시험편에 대한 실험에서는 균열면에서 변위가 측정되기 때문에 변위형태계수 β 가 식 (6)으로부터 바로 결정될 수 있으나, TPB 실험의 경우에는 에너지해방률과 같은 방법으로 변위형태계수가 결정되어야 한다.

Figs. 8 ~ 10은 위의 과정에 의해서 최종적으로 결정된 각 실험의 평균반응에 대한 파괴특성이며, Figs. 5 ~ 7의 계산된 파괴에너지는 이 파괴특성을 적용하여 식 (1)로 계산된 값으로 표준오차는 3%보다 크기 않았다. Fig. 8에서 CLWL-DCB 실험의 변위형태계수는 식 (6)에 의해 계산된 반면에 TPB 실험의 변위형태계수는 파괴특성의 결정과정에서 에너지해방률의 결정방법과 같이 결정되었다. 초기 균열단 변위(CTOD)는 CLWL-DCB 실험과 TPB 실험 모두에서 식(5)에 결정된 변위형태계수를 적용하여 계산된 값이다. CLWL-DCB 시험편의 변위형태계수는 TPB 시험편보다 상당히 작고 완만하게 증가하나, TPB 시험편의 경우에는 초기 균열길이 a_o 에 의해서도 크게 영향을 받는 것을 보여준다. 변위형태계수가 1.0보다 작은 경우에는 균열단에서 특이성(singularity)이 존재하는 경우에만 가능하다. TPB 시험편의 경우 약 50mm의 균열성장 이후에 급격한 균열단 변위의 증가를 보여주고 있다.

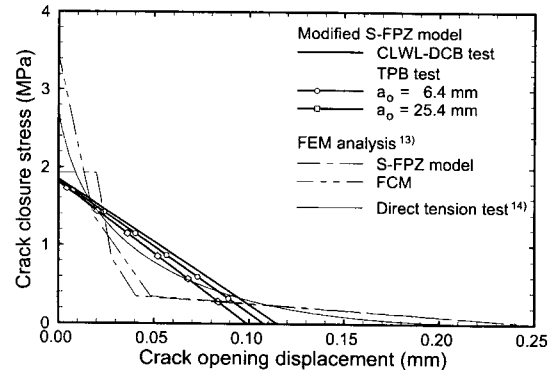


Fig. 8 Applied CCS-COD relations for FPZ

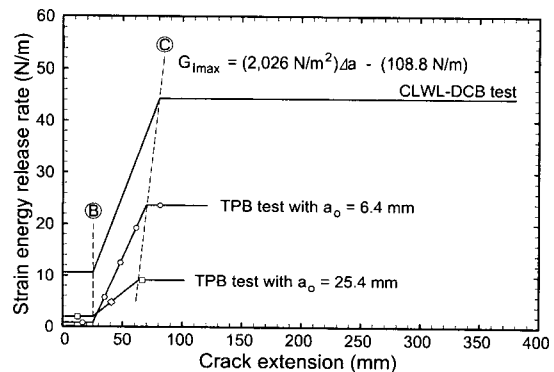


Fig. 9 Applied strain energy release rates

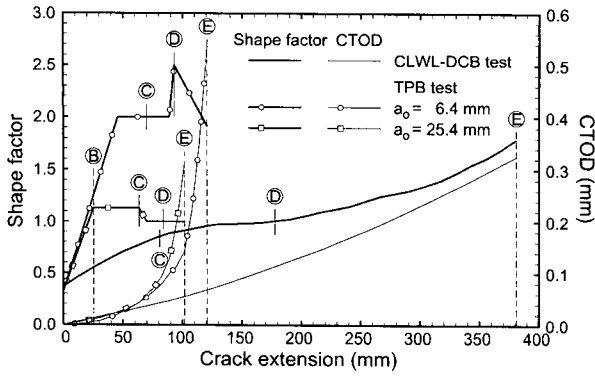


Fig. 10 Determined shape factors and CTODs

Fig. 9는 이 연구의 파괴진행대의 성장을 위한 파괴기준인 에너지해방률의 변화이며, 구체적인 값은 Table 2와 같다. 일정한 값을 유지하는 초기 에너지해방률 G_{Imin} 은 25.4mm의 균열성장대 대한 단계 B에서 증가하기 시작하여 단계 C까지 균열의 성장에 대해 선형으로 증가하며, 단계 C 이후에는 일정한 값 G_{Imax} 을 유지하였다.

Fig. 9에서 단계 C는 Fig. 3과 같이 CLWL-DCB 시험편에 대해 최대하중 그리고 TPB 시험편에 대해 최대하중 이후 하중의 급격한 감소 직전의 균열성장길이에 해당된다. 각 실험의 최대 에너지해방률은 단계 C에서 다음과 같이 파괴진행대의 크기 Δa 에 비례하였다.

$$G_{Imax} = (2,03 \text{ N/m}^2)\Delta a - (109 \text{ N/m}) \quad (16)$$

단계 B까지의 작고 일정한 에너지해방률 G_{Imin} 은 초기 균열단 주변의 넓은 영역에서 서로 독립된 미소균열의 성장에 의한 것으로 판단되며, 단계 B와 C 사이의 에너지해방률의 증가는 미소균열의 연결과 미소균열이 발생되는 영역 감소의 국부화에 의한 응력집중의 증가로 설명될 수 있다. 음향방사 실험¹⁻⁴⁾과 광학현미경에 의한 관찰⁵⁾결과도 같은 파괴진행의 과정을 보여주고 있다.

Fig. 10은 이 연구의 수정 특이-파괴진행대 이론에 적용된 균열면 응력-변위 관계이며, Table 2는 이에 대한 구체적인 값이다. 이 연구의 균열면 응력-변위 관계는 균열성장대 대해 일정한 에너지해방률 또는 최대 균열면 응력의 일정한 파괴기준이 적용된 기존의 특이-파괴진행대 이론과 가상균열이론에 필요한 균열면 응력-변위 관계¹³⁾와 비교되었다. 에너지해방률 8.74 N/m의 일정한 파괴기준이 적용된 특이-파괴진행대 이론의 최대 균열면 응력은 1.93 MPa이며, 최대하중까지 일정한 균열면 응력을 보이고 급격히 감소한다. 가상균열이론에서는 에너지해방률 $G_I = 0$ 이 적용으로 모든 균열성장길이에 파괴기준으로 적용된 최대 균열면 응력은 3.48 MPa로 측정된 파괴에너지를 만족하기 위해서 상당히 큰 값이 필요하게 되나, 균

열면 변위의 증가에 대해 급격히 감소하며, 약 0.03 mm의 균열면 변위 이후에는 특이-파괴진행대 이론과 거의 같은 값을 보여준다. 직접인장실험¹⁴⁾에 의해 결정된 균열면 응력-변위 관계 또한 가상균열이론과 유사한 결과를 보여준다. Fig. 9와 같이 균열의 성장 또는 파괴진행대의 크기에 따른 파괴기준의 변화가 고려되는 경우에 수정 특이-파괴진행대 이론의 최대 균열면 응력은 1.83 MPa로 특이-파괴진행대 이론보다 약간 작으며, Table 2의 한계 균열면 변위 $w_c \approx 0.11 \text{ mm}$ 까지 선형으로 감소하였다. 수정 특이-파괴진행대 이론의 경우 보다 복잡한 형태의 균열면 응력-변위 관계가 적용되는 경우에도 실험결과에 필요한 파괴에너지에 대한 표준오차를 줄일 수 없기 때문에 가장 간단한 형태인 선형 균열면 응력-변위 관계가 적용되었으며, 최종적으로 결정된 Fig. 10과 Table 2의 균열면 응력-변위 관계는 CLWL-DCB 시험편과 TPB 시험편의 큰 기하학적 형상이나 하중조건의 차이에도 불구하고 큰 영향이 없이 거의 일정하였다.

5. 수정 특이-파괴진행대 이론의 파괴거동

Figs. 9와 10의 파괴특성이 적용되는 경우에 수정 특이-파괴진행대 이론에 의한 파괴에너지는 Figs. 5 ~ 7의 각 균열성장대 대해 3% 이내의 표준오차로 실험결과와 파괴에너지를 만족할 수 있다. 단위면적의 파괴진행대의 성장과 파괴진행에 필요한 에너지로 정의되는 다음의 파괴저항 또는 파괴에너지율 G_f 는 Fig. 11과 같다.

$$G_f = G_I + G_{fpz} \quad (17)$$

여기서 G_I 는 균열성장 Δa_i 에 대해 Fig. 9의 함수이며, G_{fpz} 는 다음과 같이 계산되었다.

$$G_{fpz}(\Delta a_i) = \frac{E_{FPZ}(\Delta a_i) - E_{FPZ}(\Delta a_{i-1})}{t(\Delta a_i - \Delta a_{i-1})} \quad (18)$$

위의 식에서 Δa_i 의 파괴진행대에서 파괴진행에 의해 소모된 에너지 E_{FPZ} 는 식 (1)의 두 번째 항에 대한 값으로 다음과 같다.

$$E_{FPZ}(\Delta a_i) = \int_0^{\Delta a_i} G_{FPZ}(w_x) t dx \quad (19)$$

에너지해방률이 최대 값에 도달되는 Fig. 9에서 단계 C의 약 65 mm의 균열성장까지 TPB 시험편의 파괴저항은 Fig. 11에서 초기 균열길이에 관계없이 거의 같은 값이었다. 그러나 단계 C 이후 TPB 시험편의 파괴저항은 급격히 증가하였다. Fig. 4의 하중점 변위에 대한 균열성장률의 감소(균열성장의 구속)와 Fig. 8의 초기 균열단 변

위의 급격한 증가는 단계 ㉓ 이후 파괴진행대의 생성보다는 파괴진행에 의해 많은 에너지가 소모되었음을 보여준다. CLWL-DCB 시험편의 경우 Fig. 9의 상대적으로 큰 에너지해방률에 의해 초기 균열성장에서 TPB 시험편보다 큰 파괴저항을 보이나, 균열성장에 대한 파괴저항의 증가율은 단계 ㉓까지 TPB 시험편보다 서서히 선형에 가깝게 증가하였다. 단계 ㉓ 이후에는 약간 감소하는 경향을 보이나, 상대적으로 일정한 파괴진행대의 한계파괴에너지를 보였다. Fig. 11의 CLWL-DCB 시험편과 TPB 시험편의 서로 다른 파괴저항은 시험편의 기하학적 형상에 따른 불안정 균열성장과 이의 구속 그리고 파괴진행대의 생성과 파괴진행의 에너지 소모율의 차이에 의해 발생되었다.

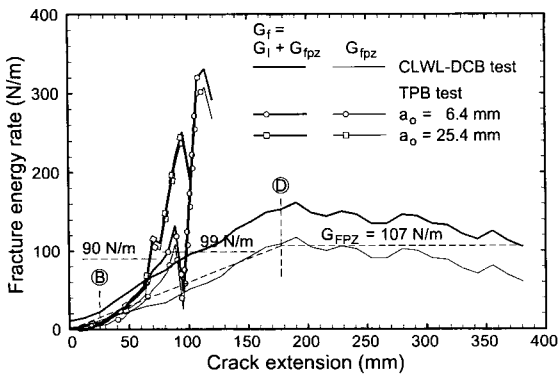


Fig. 11 Computed resistance curves

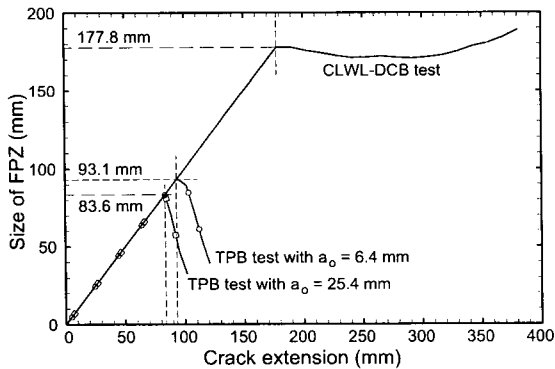


Fig. 12 Computed sizes of FPZ and crack extensions at Step ㉓

Fig. 12는 균열성장에 대한 파괴진행대의 크기를 보여주며, 단계 ㉓는 초기 균열단에서 변위가 한계 균열면 변위에 이르는 완전한 파괴진행대가 형성되는 경우이다. TPB 시험편의 경우에는 단계 ㉓에서 완전한 파괴진행대가 형성된 이후에 파괴진행대 크기의 급격한 감소를 보여준다. 이는 균열의 성장보다 균열면 변위의 증가율이 상대적으로 크고, 이로 인해 파괴진행대에서 파괴진행에 의한 에너지 소모가 많이 발생되었다. 그러나 CLWL-DCB 시험편에서는 단계 ㉓ 이후에 파괴진행대의 크기는 비교적 일정하였다. Fig. 12로부터 시험편의 크기가 상대적으로 작으면 단계 ㉓에서 균열의 불안정 성장과 단계 ㉓에서 이의 구속이 발생한다. Table 3은 이 논문에 사용된 각 단계에서 평균 균열성장길이와 평균 하중점-변위이다.

단계 ㉓에서 균열성장이 시작되었으며, 단계 ㉓-㉔ 구간에서 미소균열성장과 단계 ㉔-㉕에서 미소균열의 국부화가 발생된 것으로 판단되고, 단계 ㉓에서 파괴진행대가 완전히 형성되었다.

Fig. 13은 전체 파괴에너지율에 대한 균열성장에 필요한 에너지해방률의 비율로 정의되는 특이율(singularity rate, SR)로 다음과 같이 계산되었다.

$$SR = \frac{G_I}{G_f} = \frac{G_I}{G_I + G_{fpz}} \quad (20)$$

TPB 시험편의 특이율은 균열성장에 대해 연속적으로

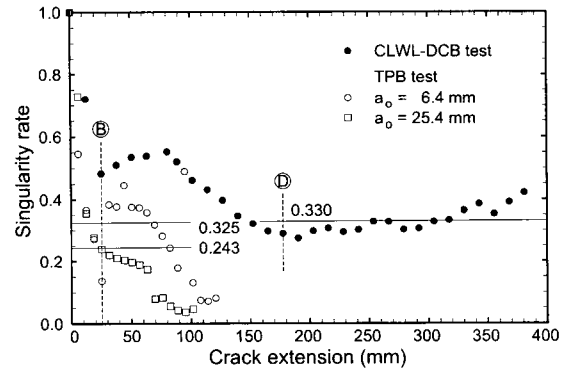


Fig. 13 Singularity rates for crack extensions

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

Step	TPB test				CLWL-DCB test		Expected behavior
	$a_0=6.4$ mm		$a_0=25.4$ mm		Δa	u_p	
	Δa	u_p	Δa	u_p	Δa	u_p	
㉓	0.0	0.0085	0.0	0.024	0.0	0.027	Micro-cracking
㉔	25.4	0.031	25.4	0.056	25.4	0.044	Micro-crack localizing
㉕	69.9	0.101	63.5	0.102	80.7	0.086	Maximum fracture criterion
㉖	93.1	0.153	83.6	0.145	177.8	0.178	Full development of FPZ
㉗	120.7	0.566	101.6	0.403	381.0	0.437	Maximum crack extension

감소하는 경향을 보였으며, 초기 균열이 클수록 감소율은 증가하였다. 특히 단계 ㉔ 이후에는 약 0.1의 작은 값을 보였다. 그러나 CLWL-DCB 시험편의 경우는 파괴진행대의 크기가 증가할수록 완만한 기울기로 감소하였다. 완전한 파괴진행대가 형성된 단계 ㉕ 이후에 특이율은 0.33의 일정한 값을 유지하였다.

6. 결 론

이 논문에서는 콘크리트의 연속적인 균열성장에 따른 파괴기준의 변화를 나타낼 수 있는 수정 특이-파괴진행대 이론이 제안되었다. 수정 특이-파괴진행대 이론에는 균열성장길이의 함수인 미소균열단에서 에너지해방률 또는 응력확대계수의 파괴기준과 미소균열단의 뒤에 형성된 파괴진행대의 균열면 응력-변위 관계의 두 파괴특성이 적용되었다. 제안된 콘크리트의 파괴이론은 연속적으로 성장하는 균열에 대한 기존 실험결과로부터 평가된 파괴에너지를 표준오차 3%의 범위에서 만족할 수 있었다.

기존의 실험결과를 제안된 파괴이론으로 분석한 결과가 파괴특성과 시험편의 파괴거동은 다음과 같았다.

- 1) 파괴진행대에서 균열면 응력은 균열면 변위에 선형으로 감소하며, 시험편의 크기와 하중조건을 포함한 기하학적 형태에 큰 영향이 없었다.
- 2) 에너지해방률의 파괴기준은 초기 25mm의 균열성장에 대해 G_{Imin} 의 일정한 값을 유지하였다. 이후의 균열성장에 대해 파괴기준은 균열성장길이에 선형으로 증가하였으며, CLWL-DCB 시험편의 경우 최대하중과 TPB 시험편의 경우 최대 탄성에너지에서 최대 값 G_{Imax} 을 보였다. 추가의 균열성장에 대해서는 완전 파손까지 G_{Imax} 의 일정한 값을 보였다.
- 3) 초기 균열성장에서 일정한 최소 에너지해방률은 서로 연결되지 않은 미소균열들의 성장에 의한 것으로 판단되며, 이후 최대 에너지해방률까지 파괴기준의 증가는 미소균열의 국부화에 의한 것으로 판단된다. 이는 균열 성장에 대한 에너지해방률의 사용이 미소균열의 성장과 국부화의 정량화에 적용될 수 있음을 의미한다.
- 4) 시험편의 기하학적 형태와 하중 경계조건은 파괴기준에만 영향을 주며, 이는 콘크리트 시험편의 크기효과를 단순화할 수 있다.
- 5) 충분한 크기의 시험편이 사용되면 완전한 파괴진행대가 형성된 이후에 파괴저항은 파괴진행대에서 한계 파괴에너지율의 일정한 값을 유지하며, 파괴진행대의 성장에 필요한 에너지는 전체 파괴에너지의 약 1/3이었다. 상대적으로 작은 시험편이 사용되면 불안정 균열성장과 균열성장의 구속으로 파괴특성의 결정이 어렵다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음. (INHA 30166-01)

참고문헌

1. 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.
2. Li, Z., Kulkarni, S. M., and Shah, S. P., "New test method for obtaining softening response of unnotched concrete specimen under uniaxial tension." *Experimental Mechanics*, Vol.33, No.3, 1993, pp.181~188.
3. Li, Z., "Microcrack characterization in concrete under uniaxial tension." *Magazine of Concrete Research*, Vol.48, No.176, 1996, pp.219~228.
4. Li, F. and Li, Z., "Acoustic emission monitoring of fracture of fiber reinforced Concrete in tension." *Material Journal*, ACI, Vol.97, No.6, 2000, pp.629~636.
5. Krstulovic Opara, N., "Fracture process zone presence and behavior in mortar specimens." *Material Journal*, ACI, Vol.90, No.6, 1993, pp.618~626.
6. 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.
7. Bazant, Z. P. and Oh, B. H. "Crack band theory for fracture of concrete. Materials and Structures," *RILEM*, Vol.16, 1983, pp.155~177.
8. Jenq, Y. S. and Shah, S. P., "A two parameter fracture model for concrete." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 111, No. 4, 1985, pp.1227~1241.
9. Yon, J. H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "S-FPZ model for concrete SEN specimen," *Fracture mechanics of concrete structure*, Elsevier Applied Science, London, England, 1992, pp.208~213.
10. Bazant, Z. P. and Kazemi, M. T., "Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete." *International Journal of Fracture*, Vol.44, 1990, pp.111~131.

11. 연정흠, "콘크리트 삼점휨 시험편의 성장하는 균열에 대한 저항곡선," 콘크리트학회논문집, 13권, 6호, 2001, pp.568~574.
12. 연정흠, "콘크리트 CLWL-DCB 시험편의 저항곡선," 콘크리트학회논문집, 14권, 3호, 2002, pp.357~364.
13. 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.
14. Navalurkar, R. K., Hsu, C. T. T., Kim, S. K., and Wecharatana, M., "True Fracture Energy of Concrete," *Materials Journal, ACI*, Vol.96, No.2, 1999, pp.213~225.

요 약

이 논문에서는 균열성장에 따른 파괴기준의 변화를 고려할 수 있는 수정 특이-파괴진행대 이론이 제안되었다. 제안된 파괴이론의 파괴특성은 균열의 성장기준이 되는 미소균열단에서 에너지해방률과 미소균열단 뒤에 형성되는 파괴진행대에서 균열면 응력-변위 관계이다. 제안된 파괴이론에 의한 파괴에너지는 기존의 콘크리트 파괴실험 결과로부터 평가된 파괴에너지를 충분히 만족할 수 있었다. 실험자료의 분석결과를 파괴진행대에서 균열면 응력-변위 관계는 시험편의 기하학적 특성에 큰 영향을 받지 않으나, 에너지해방률의 파괴기준은 시험편의 기하학적 특성과 하중조건뿐만 아니라 균열성장길이에 영향을 받는 것을 보여준다. 25 mm의 균열성장까지 일정한 값을 유지하던 에너지해방률은 균열성장에 대해 선형으로 최대 값까지 증가하였다. 충분한 크기의 시험편에서 최대 에너지해방률은 최대하중에서 발생되었으며, 최대하중 이후의 균열성장에 대해 이 값을 유지하였다. 균열성장에 따른 파괴기준의 변화는 미소균열의 성장과 국부화에 의한 것으로 판단된다. 에너지해방률에 의한 파괴기준의 평가는 콘크리트 파괴거동의 크기효과를 단순화하며, 미소균열의 성장과 국부화에 대한 정량화에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 콘크리트, 파괴거동, 수정 특이-파괴진행대 이론, 파괴에너지율, 파괴기준