

## 콘크리트의 파괴저항에 대한 균열속도의 영향

연정흙<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>인하대학교 토목공학과

(2002년 4월 28일 원고접수, 2002년 12월 16일 심사완료)

## Effects of Crack Velocity on Fracture Resistance of Concrete

Jung-Heum Yon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received April 28, 2002, Accepted December 16, 2002)

### ABSTRACT

Tests of concrete CLWL-DCB specimens had been conducted with displacement-controlled dynamic loading. The crack velocities for 381 mm crack extension were 0.80 mm/sec ~ 215 m/sec. The external work and the kinetic and strain energies were derived from the measured external load and load-point displacement. The fracture resistance of a running crack was calculated from the fitted curves of the fracture energy required for the tests. The standard error of the fracture energy was less than 3.2%. The increasing rate of the fracture resistance for 28 mm initial crack extension or micro-cracking was relatively small, and then the slope of the fracture resistance increased to the maximum value at 90~145 mm crack extension depending on crack velocity. The maximum fracture resistance remained for 185 mm crack extension, and then the faster crack velocity showed the faster decreasing rate of the maximum fracture resistance. The maximum fracture resistance increased proportionally to the logarithm of the crack velocity from 142 N/m to 217 N/m when the crack velocity was faster than 0.273 m/sec. The maximum fracture resistance of the fastest tests was similar to the average fracture energy density of 215 N/m. To measure the fracture resistance of concrete, the stable crack extension should be larger than 90~145 mm depending on crack velocity.

**Keywords :** concrete, CLWL-DCB specimen, fracture behavior, crack velocity, fracture resistance

### 1. 서 론

동적 또는 반복 하중에 의해서 콘크리트에 발생하는 균열의 성장에 대한 파괴저항은 콘크리트 구조물의 파괴 및 피로거동을 이해하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 콘크리트 구조물에 동적으로 작용하는 하중으로는 이동하는 차량, 비행기의 착륙, 폭발, 파도, 바람과 지진 등이 있다. 이러한 하중에 의해 콘크리트에 발생하는 균열은 연속적으로 성장하며, 균열성장속도는 콘크리트의 파괴저항에 영향을 줄 수도 있다<sup>1)</sup>.

안정적이면서도 빠른 균열성장에 대한 콘크리트의 반응을 측정하기 위한 실험에는 매우 큰 강성을 갖는 재하장치와 매우 빠른 속도의 측정장치를 필요로 한다. 특히 실물 크기의 시험편에 대한 실험인 경우에는 시험편의 자중에 의한 영향을 최소화할 수 있는 방법이 고안되어야 한다. 이러한 이유로 기존의 콘크리트 파괴거동에 대한 연구는 실제 구조물의 크기보다 상당히 작은 시험편에 대한 것이 일반적이었다. 동적 파괴에 대한 실험결과는 선형탄성파괴모델(linear elastic fracture model, LEFM)에 기초

한 최대하중에서 응력확대계수(stress intensity factor, SIF)의 측정<sup>2)</sup> 또는 유한요소법에 의한 균열성장의 추정<sup>3)</sup> 등 매우 제한적이다.

그러나 균열성장길이를 측정할 수 있으면 하중과 기하학적 형태가 복잡한 시험편에 대한 실험결과는 에너지 균형(energy balance)을 적용하여 쉽게 해석될 수 있다.<sup>4)</sup> 동적 하중이 작용하는 시험편의 외부일은 운동에너지와 변형에너지 및 파괴에너지의 합과 같아야 한다. 그러므로 균열성장길이에 필요한 파괴에너지는 측정된 평균하중과 하중점-변위로부터 계산된 외부일과 운동에너지 및 변형에너지의 차이 또는 에너지 균형으로부터 추정될 수 있다.

이 연구에서는 실물 크기의 시험편에 대한 재하장치의 효율적인 사용과 안정적인 균열의 성장을 유도하기 위해 균열면-쐐기하중(crack-line wedge-loaded, CLWL) 이중-내민보(double-cantilever beam, DCB) 시험편에 대한 동적 파괴실험이 실시되었다. 각 균열속도에 대해 일련의 실험결과로부터 평균반응이 유도되었다. 정적실험<sup>5,6)</sup>에서 성공적으로 사용된 변형률 게이지(strain gage)에 의한 균열성장길이 및 균열속도가 측정되었으며, 실험결과에 요구되는 파괴저항에 대한 균열속도의 영향이 분석되었다.

\* Corresponding author

Tel : 032-860-7569 Fax : 032-873-7560

E-mail : jyon@inha.ac.kr

## 2. 실험과정

실물 크기의 시험편에 대한 충격하중 정도의 균열속도를 변위제어로 실험하기 위해서는 특별히 고안된 시험편과 하중재하장치가 필요하다. 그림 1은 참고문헌 5에서 정적 실험에 사용되었고, 이 연구에서 동적 하중에 대한 반응이 측정된 CLWL-DCB 시험편이다. 하중장치의 연직하중이 쐐기와 쪼갬-핀(split-pin)을 통해 수평하중으로 전달되며, 수평하중은 쐐기의 경사각도에 따라 연직하중의 8배까지 효율적으로 사용될 수 있다. 또한 이 CLWL-DCB 시험편에서 최대 균열성장길이는 381 mm이며, 두께는 50.8 mm이다. CLWL-DCB 시험편의 균열은 쐐기에 의한 수평하중에 의해 발생되며, Fig. 1과 같이 시험편의 아래면이 롤러로 고정되기 때문에 이 시험편의 균열성장은 자중 등의 연직하중에 의한 영향을 받지 않는다. 시험편의 고정장치와 쐐기하중 전달장치는 참고문헌 5와 같다.

이 연구에 사용된 콘크리트는 참고문헌 5의 정적 파괴 거동의 연구에 사용된 시험편과 같은 배치에서 제작되었다. 이 배치에 사용된 재료의 배합비는 단위 중량으로 시멘트:잔골재:굵은골재:물의 비가 1:2:3:0.63이며, 굵은골재의 최대 크기는 6.4 mm이다. 이 배합비에 의한 시험편의 단위중량은 23.6 kN/m<sup>3</sup> (2.4 tonf/m<sup>3</sup>)이다. 실험 당일의 콘크리트 재령에서 원주형 공시체의 평균 압축강도와 쪼

갠인장강도는 각각 45.9 MPa (468 kgf/cm<sup>2</sup>)와 3.93 MPa (40 kgf/cm<sup>2</sup>)이었다. 하중전달장치를 위한 쐐기구멍이 포함된 165.1 mm 길이와 6.4 mm 폭의 초기균열(casting notch)은 콘크리트가 타설될 때 제작되었으며, 균열이 발생하는 위치의 유도와 건조수축에 의한 잔류응력의 최소화를 위해 이 균열단에는 12.7 mm 길이와 3 mm 폭의 추가 균열(saw-cut notch)이 실험 하루 전에 콘크리트 톱을 사용하여 제작되었다.

변위제어로 충격실험을 실시하기 위해서 재하장치는 매우 빠른 반응속도에 의한 유압기의 제어가 필요하다. 이 실험에 사용된 재하장치는 변위제어에 의한 동적 실험을 위해서 특별히 제작되었다. 성능이 245 kN (25 tonf)인 고정장치의 가로보(cross-head)에 설치된 유압식 하중재의 성능은 48.9 kN (5.0 tonf)이며, 시험편이 없는 상태에서 최대 2.5 m/sec의 속도까지 제어될 수 있다. 서보-제어기(servo-controller)의 피드백(feedback) 신호로는 하중재 내부의 변위계(LVDT) 신호가 사용되었다.

이 실험의 매우 빠른 동적 반응을 측정하기 위해서 독립된 4개의 측정장치가 사용되었다. 4개의 채널이 연결될 수 있는 각 측정장치의 측정률은 1.0 MHz이며, 4개의 측정장치는 재하장치의 기능발생기(function generator)의 신호에 의해 동시에 측정이 시작되도록 설계되었다.

쐐기하중 전달장치의 내부에 설치된 두개의 하중계는 24 kN (2.5 tonf)의 성능과 12.7 mm의 직경으로, 작은 크기와 0.14 N (14 gf)의 무게로 자중에 의한 관성력을 최소화 하도록 제작되었다. 또한 이 하중계는 자체 충전장치에 의해 빠른 동적 실험에 대해서도 안정적인 전압을 유지할 수 있다. 초기균열을 따라 하중점 앞과 뒤로 63.5 mm 떨어진 위치에 두 개의 자장변위계(capacitance displacement gage)가 설치되었다. 이 변위계는 센서와 타깃 사이에 형성되는 자장에너지의 정도에 따라 거리를 측정하며, 빠르고 정밀한 측정성능으로 얇은 판의 두께측정 또는 기계부품의 정밀가공과 대량 제작에 사용된다. 자장변위계는 변위방향과 수직으로 발생하는 변위 또는 진동에 영향을 받지 않기 때문에 동적 실험에 효과적이다.

Fig. 1에 있는 6개의 변형률 게이지는 연속적으로 성장하는 균열의 길이를 측정하기 위해 사용되었다. 길이가 10 mm인 변형률 게이지는 위험단면에서 12.7 mm 편심된 위치에 균열의 예상경로를 따라 50.8 mm 간격으로 부착되었으며, 골재의 분포나 게이지와 균열면 사이의 거리에 따라 측정된 변형률이 다를 수 있기 때문에 변형률 게이지는 균열이 게이지의 위치를 통과하는 시간 또는 하중점-변위를 측정하기 위해서만 사용되었다. 변형률의 빠르고 정확한 측정을 위해 변형률 게이지의 신호는 동적 변형률 증폭장치에 의해 조절되었다.

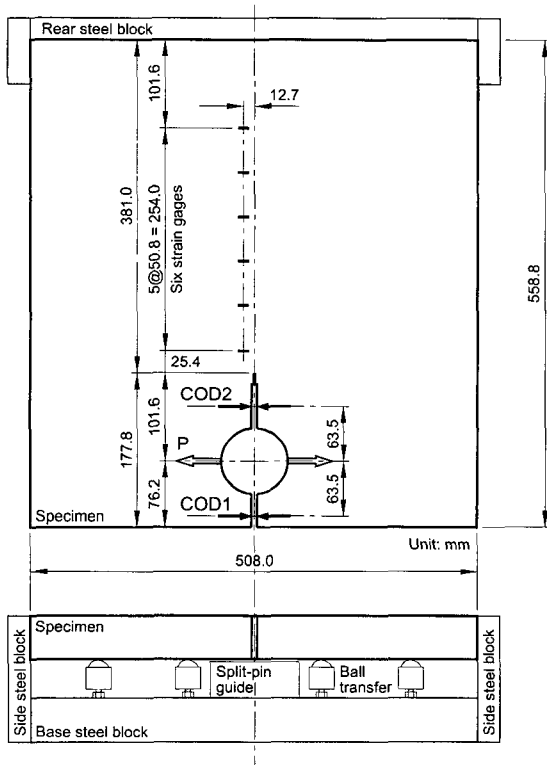


Fig. 2 Fixtures and geometry of CLWL-DCB specimen<sup>5)</sup>

### 3. 실험결과

CLWL-DCB 시험편의 동적 파괴반응을 측정하기 위해 각각의 실험속도에 세 시험편씩 총 15개의 CLWL-DCB 시험편에 대한 실험이 실시되었다. Table 1은 참고문헌 5의 정적 실험을 포함한 실험의 결과를 보여주며, 측정된 하중이력과 평균하중 및 하중점-변위 이력은 Fig. 2와 같다. DCB110과 DCB120 실험 사이에서 증가하던 최대하중은 DCB120과 DCB130 실험에서 일정한 값을 유지하였으며, DCB140 실험 이후 최대하중은 다시 증가하였다. 평균하중과 하중점-변위의 관계를 보여주는 Fig. 3에서 단계 ㉠ 이전 하중의 초기 기울기는 실험속도에 큰 영향을 받지 않았으나, 단계 ㉠ 이후에는 실험속도에 따른 하중의 증가를 보여준다. 최대하중이 발생한 단계 ㉡ 이후에는 빠른 실험에서 큰 하중의 감소를 보여주고 있어, 빠른 실험이 상대적으로 취성이 큰 것을 보여준다. 특히 단계 ㉢ 이후에는 정적 실험의 하중이 동적 실험보다 컸다.

Table 1에서 실험기간은 하중이 영이 될 때까지의 시간이며, 외부일은 이 때의 값으로 Fig. 3의 하중과 하중점-변위 곡선의 면적이다. Table 1에서 단위면적의 균열형성에 필요한 평균 에너지로 정의되는 평균 파괴에너지율(fracture energy density)  $G_F$ 는 다음의 식에 의해 계산된 값이다.

$$G_F = \frac{[\text{외부일}]}{[\text{균열단면의 면적}]} \quad (1)$$

DCB120 그룹의 세 번째 실험인 DCB123의 경우 이 그룹의 다른 실험결과와 큰 편차를 보이고 있다. 이는 DCB120 실험의 하중속도가 자유진동의 주기와 관련이 있는 것으로 추측되나, 연속적으로 성장하는 균열에 대한 주기해석은 이 연구에 포함되지 않았다.

Fig. 4는 가장 빠른 실험인 Table 1의 DCB150 그룹의 세 번째 실험인 DCB153의 측정된 변형률이다. 이 연구에서 균열단의 위치는 변형률이 최대일 때 변형률 게이지 위치로부터 결정되었다. 단계 ㉠과 ㉡는 각각 균열의 성

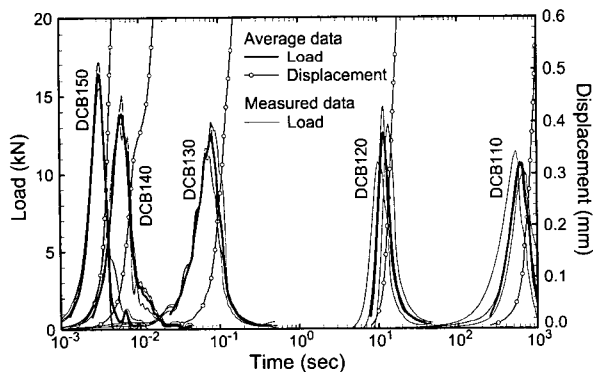


Fig. 3 Measured load and average response histories

Table 3 Results of CLWL-DCB tests

Test #	Period (sec)	Peak load (KN)	Work (N·m)	$G_F$ (N/m)	
DCB110 <sup>†</sup>	1	1,359	10.61	208	
	2	1,314	10.03	223	
	3	1,232	11.35	194	
	Ave.	1,302	10.66	4,027	208
DCB120 <sup>†</sup>	1	33.89	10.70	290	
	2	39.44	13.07	330	
	3	33.89	14.20	212	
	Ave.	35.74	12.66	5,370	277
DCB130	1	0.430	13.14	4.140	214
	2	0.440	11.14	3.564	184
	3	0.450	13.26	4.710	243
	Ave.	0.441	12.51	4.138	214
DCB140	1	0.0437	14.97	4.060	210
	2	0.0422	13.29	4.505	233
	3	0.0427	13.65	3.771	195
	Ave	0.0432	13.97	4.112	212
DCB150	1	0.00604	15.40	5.498	284
	2	0.00486	17.05	4.212	218
	3	0.00464	16.40	4.183	216
	Ave.	0.00518	16.28	4.631	239
			15.49 <sup>†</sup>	4.424 <sup>†</sup>	229 <sup>†</sup>

<sup>†</sup> Reference 5

<sup>‡</sup> Values without inertial force

장이 시작될 때와 균열단이 시험편의 끝단을 통과할 때의 하중점-변위에 의해 결정되었다. 단계 ㉠에서 첫 번째 변형률 게이지의 값이 급격히 증가하였으며, ㉡에서는 모든 변형률 게이지의 값이 안정된 일정한 값을 보였다. 모든 CLWL-DCB 실험에서 변형률 게이지로 측정된 균열성장길이는 Fig. 5의 기호와 같다. 하중점-변위는 균열성장길이에 대해 포물선 형태이며, Fig. 5에서 곡선은 포물선에 대해 최소사승법에 의한 평균 균열성장길이이다. 그러나

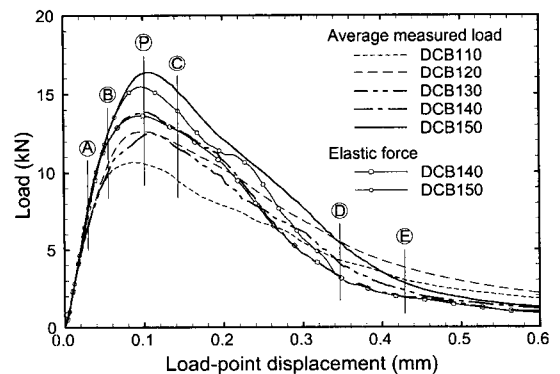


Fig. 4 Average measured load and load-point displacement relations

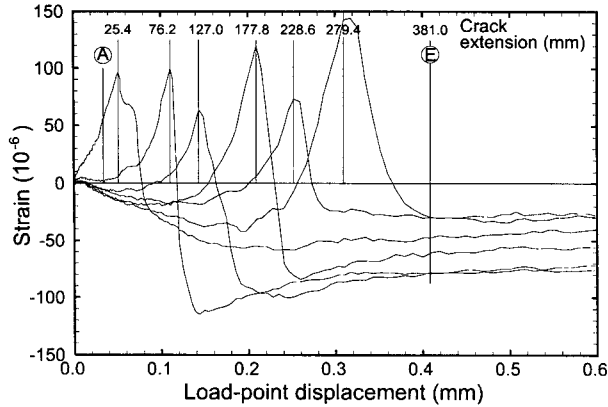


Fig. 5 Typical example of measured strain for DCB153 test

DCB140과 DCB150 실험의 균열성장길이는 하중점-변위에 대해 거의 선형관계이었다. 실험속도가 빠를수록 하중점-변위에 대해 작은 균열성장길이를 보였으나, 단계 ① 이후에는 빠른 실험이 큰 균열성장길이를 보였다.

#### 4. 에너지 분할

파괴에너지는 측정된 실험자료로부터 직접 계산될 수는 없으나 에너지 균형으로부터 근사적으로 유도될 수 있다. 하중점-변위  $u_{p0}$ 에서 각 실험의 외부일  $W$ 는 다음과 같이 측정된 하중  $P$ 와 하중점-변위  $u_p$  관계의 적분으로 계산된다.

$$W(u_{p0}) = \int_0^{u_{p0}} P(u_p) du_p \quad (2)$$

각 그룹의 산술평균으로 계산된 평균 외부일  $W_{ave}$ 에 대해 Figs. 2와 3의 평균 외부하중  $P_{ave}$ 은  $u_p$ 에 대한  $W_{ave}$ 의 미분으로 다음과 같이 계산되었다.

$$P_{ave} = \frac{dW_{ave}}{du_p} \quad (3)$$

식 (3)으로 계산된 평균 하중은 측정된 외부하중의 산술평균이 아니라 측정된 평균 외부일을 만족하는 하중이다.

운동에너지는 Rayleigh 방법<sup>7)</sup>을 적용하여 유도되었다. Rayleigh 방법에서는 임의시간  $t$ 에서 측정된 하중점-변위  $u_p(t)$ 와 위치  $x$ 에 대한 변위형태함수  $\phi(x)$ 로 다음과 같이 변위  $u(x, t)$ 를 나타낸다.

$$u(x, t) = u_p(t)\phi(x) \quad (4)$$

길이가  $L$ 이고 단위길이당 질량이  $\bar{m}$ 인 시험편에 대해 운동에너지  $E_k$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_k(u_{p0}) &= \int_0^{u_{p0}} \int_0^L \bar{m} \ddot{u}(x, t) dx du_p \\ &= \frac{1}{2} \bar{m} L \Phi \dot{u}_p^2 \end{aligned} \quad (5)$$

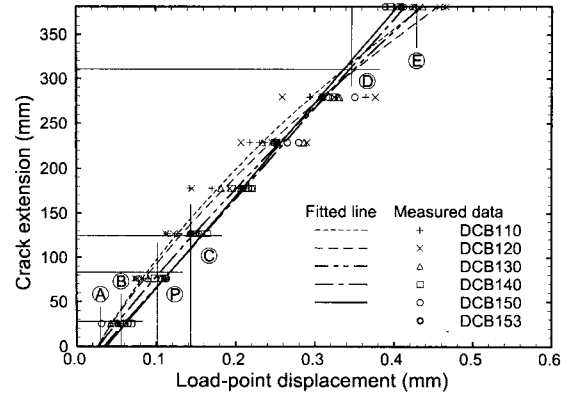


Fig. 6 Measured and average crack extensions

여기서  $\ddot{u}(x, t)$ 는 임의위치  $x$ 와 시간  $t$ 에서 가속도이며,  $\dot{u}_p$ 는 고려하는 시간에서 하중점의 속도,  $\Phi$ 는 상대 좌표  $a = x/L$ 에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi = \int_0^1 \phi^2(a) da \quad (6)$$

내민보가 두 개 있는 CLWL-DCB 시험편에 대해 각 내민보의 길이는 균열길이  $a$ 가 되며, 외부하중은 균열단에서 거리  $a_p$ 에 작용한다. 각 내민보에는  $\bar{a} = a/a_p$ 에 대한 선형 변위형태함수  $\phi(x) = \bar{a}a$ 에 대해 다음의  $\Phi$ 가 적용되었다.

$$\Phi = \frac{1}{3} \bar{a}^2 \quad (7)$$

탄성력  $F_s$ 는 외부하중에서 관성력이 제외된 하중으로 운동에너지가 포함되지 않은 외부일의 변화에 대한 다음의 식으로부터 계산된 값이다.

$$F_s = \frac{d(W - E_k)}{du_p} \quad (8)$$

위의 식에 의한 탄성력은 관성력과 외부하중의 차이에 의한 계산결과와 같다. Fig. 2에서 실험속도가 빠른 DCB140과 DCB150 실험에 대한 탄성력은 식 (8)에 의해 계산된 결과이며, Table 1의 관성력이 포함되지 않은 경우에 대한 평균 반응에도 적용되었다.

변형에너지  $E_s$ 는 식 (8)의 탄성력과 하중점-변위로부터 영구변형이 무시되면 다음과 같이 계산될 수 있다.<sup>4)</sup>

$$E_s = \frac{1}{2} F_s u_p \quad (9)$$

균열의 성장에 소모된 파괴에너지  $E_f$ 는 에너지 균형으로부터 다음의 식을 만족하여야 한다.<sup>6)</sup>

$$E_f = W_{ave} - E_k - E_s \quad (10)$$

위의 식으로 계산된 변형에너지는 영구변형이 고려되지 않았기 때문에 가능한 최대 값이며, 파괴에너지는 가능한 최소 크기이다.

Fig. 2의 하중점-변위 이력에 대한 하중점-속도는 Fig. 6과 같다. 하중점-속도는 하중점-변위 이력의 기울기로부터

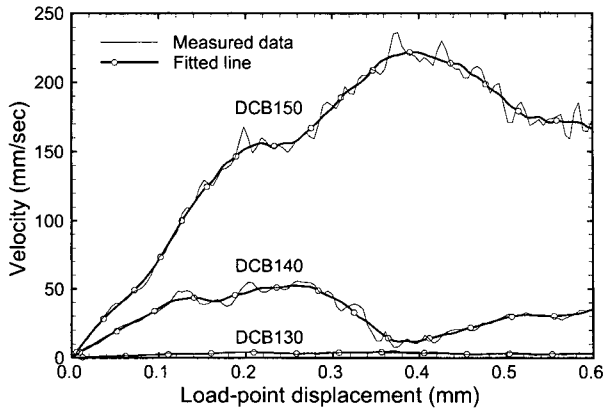


Fig. 7 Average measured load-point velocities

터 계산되기 때문에 변위계의 정밀도에 따라 급격한 변화를 보일 수 있으며, 하중재하장치의 진동에도 영향을 받는다. 이로 인한 하중점-속도의 잡음을 최소화하기 위해 운동에너지의 계산에는 Fig. 6의 평균 하중점-속도가 적용되었다. 가장 큰 운동에너지를 보이는 DCB150 실험에 대한 에너지분할(energy partition)은 Fig. 7과 같다. 단위길 이당 질량  $\bar{m} = 31.0 \text{ kg/m}$ 에 대해 단계 ④에서 식 (5)에 의한 운동에너지는 식 (2)에 의한 외부일의 8.4%이었다. 단계 ④ 이후 일정한 값을 유지하는 파괴에너지는 균열단이 시험편을 완전히 관통하기 전에 강체운동 또는 불안정 균열성장이 있었음을 보여준다.

균열성장길이에 대해서 식 (2)와 (9)에 의해서 계산된 CLWL-DCB 실험의 외부일과 변형에너지는 Fig. 8과 같다. 일반적으로 외부일과 변형에너지는 실험의 속도가 빠를수록 증가하는 경향을 보이나, DCB120 실험의 변형에너지와 외부일은 각각 190 mm와 220 mm 균열성장 이후에 DCB130 실험보다 큰 값을 보였다. 최대 변형에너지는 150~250 mm의 균열성장에서 발생되었다.

Fig. 9의 기호로 나타낸 실험결과에 요구되는 파괴에너지는 식 (10)에 의해서 12.7 mm의 균열성장마다 계산되었다. 약 100 mm의 초기 균열성장에 대해서 DCB110과

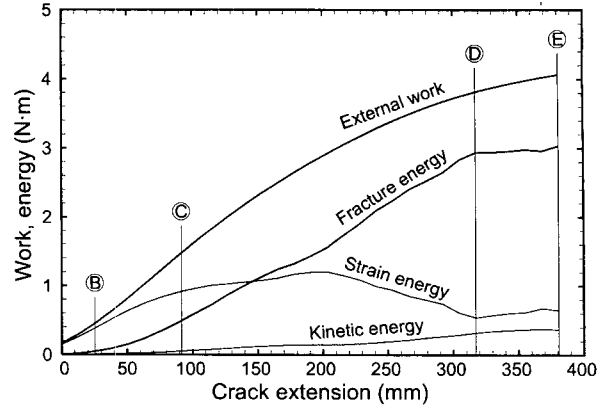


Fig. 8 Energy partitions of DCB150 tests

DCB120 실험의 정적 파괴에너지는 거의 같은 값을 보이나, 이후의 균열성장에 대해서 파괴에너지는 실험속도에 의해 큰 영향을 받았다. 이는 참고문헌 6에서 최대 균열성장길이가 102 mm인 삼점휨 시험편의 정적 실험에 대한 실험속도의 영향이 무시될 수 있는 것이 균열성장길이의 제한에 의한 것임을 보여준다.

Fig. 9의 곡선은 균열성장이 시작되는 단계 ④부터 각 단계 사이에 요구되는 파괴에너지의 최소자승법에 의해 결정된 직선 또는 포물선으로 Table 2와 같다. 각 그룹의 단계 ②와 ③ 및 ④는 실험에 요구되는 파괴에너지에 대한 표준오차(standard error)를 최소화하기 위해 파괴에너지의 기울기에 큰 변화를 보이는 균열성장길이에서 결정되었으며, 각 단계에서 균열성장길이와 하중점-변위는 Table 3과 같다. 파괴에너지에 대해 제안된 회귀식의 표준오차는 DCB110에서 최대 3.2%이었다. DCB150 실험의 경우에 Fig. 9와 같이 단계 ④에서 파괴에너지의 증가 없이 균열이 성장되는 불안정 균열성장을 보였다. 각 단계에서 균열성장길이는 시험속도에 따라 약 50 mm의 차이를 보이나 파괴에너지는 Fig. 9와 같이 단계 ④에서 DCB110과 DCB150 실험을 제외하고 비교적 일정한 값이었다. Fig. 9에서 단계 ④는 DCB150 실험의 파괴에너지가

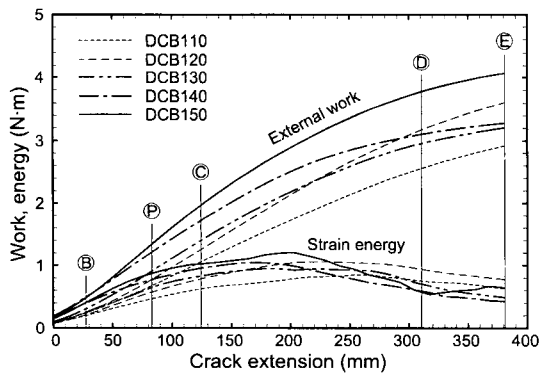


Fig. 9 Average external works and strain energies

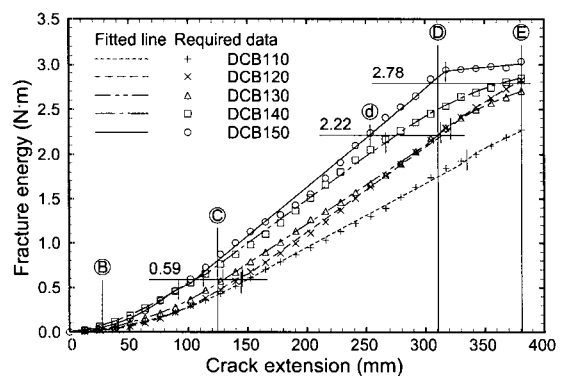


Fig. 10 Average required and fitted fracture energies

Table 4 Equations of least square fitted curves for required fracture energies and fracture energy rates

Test #	Step	$E_f = A\Delta a^2 + B\Delta a + C$				$G_f = A\Delta a + B$		Crack velocity m/sec	
		A N/m	B N	C N · m	Standard error (%)	A N/m <sup>2</sup>	B N/m		
DCB110	A - C	23.436	0.446	-0.0017	3.20	923	9	0.0006	0.0008
	C - D	0.000	7.215	-0.4920		0	142	0.0010	
	D - E	-14.093	16.663	-2.0376		-555	328	0.0009	
DCB120	A - B	7.880	0.555	0.0000	1.66	310	11	0.0291	0.0589
	B - C	36.381	-0.995	0.0210		1,432	-20	0.0623	
	C - D	0.000	9.585	-0.7961		0	189	0.0720	
	D - E	-23.569	24.744	-3.1895		-928	487	0.0558	
DCB130	A - B	16.364	0.965	0.0000	1.25	644	19	1.90	4.95
	B - C	35.824	-0.357	0.0346		1,410	-7	4.15	
	C - D	0.000	8.882	-0.5445		0	175	6.55	
	D - E	-35.512	31.119	-4.0018		-1,398	613	6.05	
DCB140	A - B	68.009	0.821	0.0055	1.55	2,678	16	38.4	56.3
	B - C	32.386	2.532	-0.0188		1,275	50	77.2	
	C - D	0.000	9.812	-0.4751		0	193	100	
	D - E	-31.464	26.602	-2.7259		-1,239	524	23.4	
DCB150	A - B	30.750	1.087	0.0000	3.14	1,211	21	71.8	215
	B - C	63.148	-0.560	0.0201		2,486	-11	119	
	C - D	0.000	11.003	-0.5714		0	217	307	
	D - E	0.000	1.271	2.5264		0	25	450	

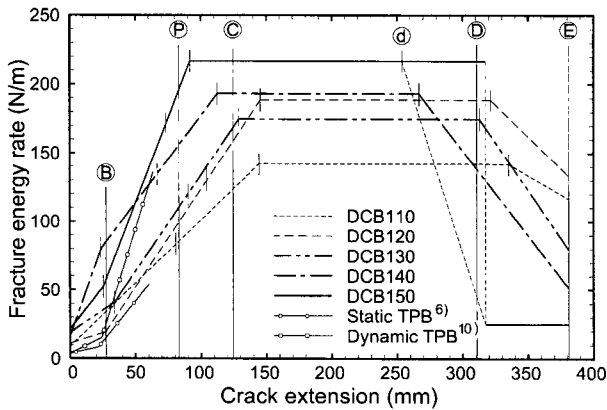


Fig. 11 Average resistance curves for crack extension

다른 실험의 평균값 2.22 N·m와 같은 경우에 대해 설정되었다. Table 2의 균열속도는 Fig. 5의 균열성장길이

에 대해 각 단계에서 계산된 평균값이며, 마지막 열의 균열속도는 균열의 성장이 진행되는 동안의 단계 (A)와 (E) 사이에서 평균속도이다. 최대 균열속도는 일반적으로 단계 (C)와 (D) 사이에서 발생되나 DCB150 실험의 경우에는 불안정 균열성장을 보이는 단계 (D)와 (E) 사이에서 발생되었다. 균열이 성장하는 동안 평균 균열속도는 0.80 mm/sec ~ 215 m/sec이었다.

### 5. 파괴저항

재료의 파괴저항(fracture resistance)을 나타내는 파괴에너지율(fracture energy rate)  $G_f$ 는 단위면적의 균열성장에 필요한 파괴에너지로 시험편의 두께  $t$ 에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$G_f = \frac{dE_f}{t da} \quad (11)$$

Table 5 Crack extension and load-Point displacement at each step (unit : mm)

Step	DCB110		DCB120		DCB130		DCB140		DCB150		Average		Expected behavior
	$\Delta a$	$u_o$	$\Delta a$	$u_o$	$\Delta a$	$u_o$	$\Delta a$	$u_o$	$\Delta a$	$u_o$	$\Delta a$	$u_o$	
A	0.0	0.027	0.0	0.026	0.0	0.027	0.0	0.037	0.0	0.034	0.0	0.030	Micro-cracking
B	-	-	27.2	0.046	34.0	0.058	24.0	0.060	25.4	0.060	27.7	0.056	Micro-crack localizing
P	80.7	0.086	104.4	0.102	90.1	0.112	66.7	0.102	73.4	0.107	83.1	0.102	Peak load
C	144.4	0.144	145.4	0.152	128.9	0.150	112.4	0.146	91.6	0.126	124.5	0.143	Constant fracture resistant
D	335.2	0.370	321.6	0.367	313.1	0.352	266.8	0.295	317.5	0.351	310.8	0.347	Decreasing fracture resistant
E	381.0	0.437	381.0	0.455	381.0	0.434	381.0	0.405	381.0	0.414	381.0	0.429	Maximum crack extension

Fig. 9의 균열성장길이에 대한 파괴에너지의 미분 값은 Table 2의 파괴에너지를  $G_f$ 와 같으며, Fig. 10은 이 연구에 적용된 CLWL-DCB 시험편의 저항곡선이다.

Fig. 10에서 파괴에너지율은 단계 ⑩까지 선형으로 서서히 증가하였으며, 초기 파괴에너지율의 증가가 상당히 큰 DCB140 실험을 제외하고 단계 ⑩에서 최대하중의 단계 ⑫를 지나 단계 ⑬까지 기울기는 크게 증가하였다. 단계 ⑬ 이후에는 단계 ⑭까지 약 185 mm의 균열성장 동안 일정한 값을 유지하였으며, 단계 ⑮에서 파괴에너지율은 시험편의 단부에 접근함에 따라 감소를 보였다. 단계 ⑮ 이후 파괴에너지율의 감소는 실험속도가 증가할수록 큰 것을 보여준다. 특히 DCB150 실험의 경우 단계 ⑮에서 급격한 파괴에너지율의 감소를 보였다.

단계 ⑩ 이전의 균열성장길이에 대해 상대적으로 적은 증가율은 실험에서 입증된 넓은 폭으로 분포된 서로 연결되지 않은 미소균열들의 성장(micro-cracking)<sup>8,9)</sup>에 의한 것이며, 단계 ⑩와 ⑬ 사이에서 파괴에너지율의 기울기 증가는 미소균열의 국부화(micro-crack localizing)<sup>9)</sup>에 의한 파괴진행대의 증가 때문으로 판단된다. 상대적으로 작은 크기의 삼점휨실험에 대한 참고문헌 6의 파괴저항은 균열성장 초기의 작은 값에도 불구하고 단계 ⑩ 이후의 증가율은 이 연구의 결과와 유사하였다. 그러나 안정 균열성장 동안의 최대 파괴저항은 이 연구의 결과보다 상당히 작은 값이다. 이는 균열성장길이가 작은 경우에는 최대 변형에너지에 의한 불안정 균열의 발생으로 최대 파괴저항이 제한된 것으로 판단된다.

Fig. 10의 단계 ⑬와 ⑮ 사이에서 최대 파괴에너지율 또는 파괴저항은 균열속도에 대해 Fig. 11과 같다. 균열속도가 4.25 mm/sec보다 큰 경우에 균열의 속도가 증가할수록 최대 파괴에너지율은 증가하며, 특히 균열의 속도가 0.273 m/sec보다 큰 경우에 큰 증가율을 보였다. Fig. 11에서 CLWL-DCB 실험의 균열속도에 대한 최대 파괴에너지율의 최소자승법에 의한 회귀식은 다음과 같았다.

$$G_{fmax} = 24.5 \log \dot{a} + 156 \quad \text{또는} \\ = 3.25 (\log \dot{a})^2 + 15.4 \log \dot{a} + 160 \quad (12)$$

여기서 최대 파괴에너지율  $G_{fmax}$ 은 142 N/m보다 작지 않고, 균열속도  $\dot{a}$ 와  $G_{fmax}$ 의 단위는 각각 m/sec와 N/m이다. 식 (12)의 회귀식의 계산에는 상대적으로 큰 파괴저항을 보이는 DCB120의 결과가 포함되지 않았다. 검은 원으로 표시된 Table 1의 평균 파괴에너지율  $G_F$ 는 관성력이 포함되지 않은 경우 DCB120 실험을 제외하고 균열속도에 관계없이 215 N/m의 일정한 값이며, 균열속도가 증가할수록 최대 파괴에너지율은 이 값에 수렴하였다. 102 mm의 균열성장에 대한 참고문헌 6과 10의 삼점휨실험은 최대 변형에너지에서 불안정 균열성장을 보이며, 균

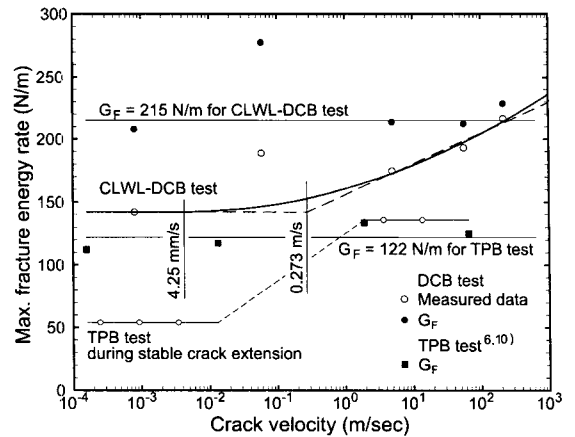


Fig. 12 Maximum fracture energy rates for crack velocity

열단이 휨 시험편의 압축영역에 접근함에 따라 균열성장의 구속을 보여주고 있다. 삼점휨실험의 최대 파괴저항은 균열의 속도가 증가할수록 CLWL-DCB 실험결과에 접근하였으나, CLWL-DCB 실험의 최대 파괴저항보다는 작은 값이었다.

Fig. 12는 일정한 최대 파괴저항을 보이는 단계 ⑬와 ⑮에서 균열속도에 대한 균열성장길이다. 단계 ⑬에서 균열성장길이는 균열속도 1.11 m/sec까지 변화가 없으나, 보다 빠른 균열속도에 대해 단계 ⑬의 균열성장길이는 감소하였다. 단계 ⑮에 대한 균열성장길이는 균열속도에 대해 감소하는 경향을 보였다. 콘크리트의 균열성장에 대한 파괴저항을 측정하기 위해서는 균열속도에 따라 최소한 90~145 mm의 안정 균열성장이 발생되어야 한다.

## 6. 결 론

동적 하중이 작용하는 콘크리트 CLWL-DCB 시험편에 대해 파괴실험이 실시되었다. 381 mm의 균열성장 동안 변

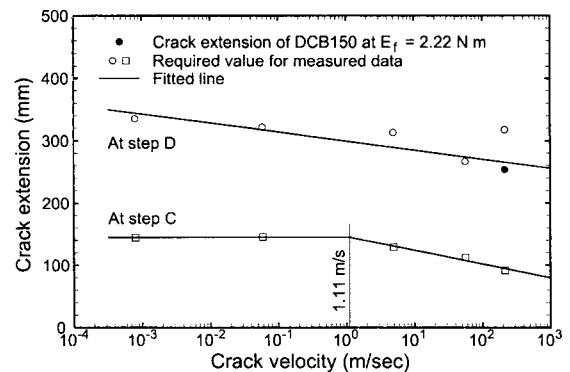


Fig. 13 Crack extensions during maximum fracture energy rate

형률 게이지에 의해 측정된 균열속도는 0.80 mm/sec~215 m/sec이었다. 측정된 하중과 하중점-변위로부터 외부일 및 운동에너지와 변형에너지가 유도되었고, 에너지 균형에 필요한 파괴에너지가 각 균열속도의 균열성장에 대해 계산되었다. 표준오차 3.2%의 범위에서 실험결과에 요구되는 파괴에너지의 회귀식으로부터 연속적으로 성장하는 균열의 파괴저항이 계산되었다.

실험에서 측정된 자료와 파괴저항의 분석결과는 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 균열의 속도가 빠를수록 파괴저항은 증가하였다. 균열속도에 관계없이 약 28 mm의 초기 균열 성장에 대해 파괴저항의 상대적으로 작은 증가율은 미소균열의 성장에 의한 것으로 판단된다. 이후의 파괴저항의 기울기는 미소균열의 국부화에 의해 급격히 증가하여 90~145 mm의 균열성장에서 최대 파괴저항이 되었다. 최대 파괴저항은 평균 185 mm의 균열성장 동안 지속되었다.
- 2) 최대 파괴저항은 균열속도가 0.273 m/sec보다 빠른 경우에 균열속도의 대수 값에 비례하여 142 N/m에서 217 N/m까지 증가하고, 균열속도가 빠를수록 평균 파괴에너지율과 유사한 값을 보였다.
- 3) 콘크리트의 균열성장에 대한 파괴저항을 측정하기 위해서는 90~145 mm의 안정 균열성장이 발생되어야 한다. 최대 파괴저항은 최대하중 이후 균열속도에 따라 20~60 mm의 균열성장 후에 발생되었다.

## 참고 문헌

1. Yon, J.-H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S. "Strain-Rate Sensitivity of Concrete Mechanical Properties," *Materials Journal*, ACI, Vol.89, No.2, 1992, pp. 146~153.
2. Mindess, S., and Shah, S. P. editors, *Cement-Based Composites: Strain Rate Effects on Fracture*, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, 1985, pp.270.
3. 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, 1991, pp.1595~1610.
4. 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.
5. 연정흠, "콘크리트 CLWL-DCB 시험편의 저항곡선," 한국콘크리트학회 논문집, 14권, 3호, 2002, pp. 357~364.
6. 연정흠, "콘크리트 삼점휨 시험편의 성장하는 균열에 대한 저항곡선," 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 6호, 2001, pp.568~574.
7. Clough, R. W., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1975, pp.634.
8. Li, Z. "Microcrack Characterization in Concrete under Uniaxial Tension," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 176, 1996, pp.219~228.
9. Krstulovic-Opara, N. "Fracture Process Zone Presence and Behavior in Mortar Specimens," *Materials Journal*, ACI, Vol.90, 1993, 618~626.
10. 연정흠, "콘크리트 삼점휨 시험편의 동적 파괴거동," 한국콘크리트학회 논문집, 14권, 5호, 2002, pp. 689~697.

## 요 약

동적 하중이 작용하는 콘크리트 CLWL-DCB 시험편에 대해 변위제어 파괴실험이 실시되었다. 381 mm의 균열성장 동안 측정된 균열속도는 0.80 mm/sec ~ 215 m/sec이었다. 측정된 하중과 하중점-변위로부터 외부일 및 운동에너지와 변형에너지가 유도되었고, 에너지 균형에 필요한 파괴에너지가 각 균열속도의 균열성장에 대해 계산되었다. 실험의 결과에 요구되는 파괴에너지의 회귀식으로부터 연속적으로 성장하는 균열의 파괴저항이 계산되었다. 실험에 요구되는 파괴에너지에 대한 최대 표준오차는 3.2% 이하였다. 균열속도에 관계없이 약 28 mm의 초기 균열성장 또는 미소균열의 성장에 대한 파괴저항의 증가율은 상대적으로 작았으며, 이후의 균열성장 또는 미소균열의 국부화에 대해 파괴저항의 기울기는 급격히 증가하여 균열속도에 따라 90~145 mm의 균열성장에서 최대 파괴저항이 되었다. 평균 185 mm의 균열성장 동안 최대 파괴저항을 유지한 후 파괴저항은 균열속도가 빠를수록 급속히 감소하였다. 최대 파괴저항은 균열속도가 0.273 m/sec보다 빠른 경우에 균열속도의 대수 값에 비례하여 142 N/m에서 217 N/m까지 증가하며, 균열속도가 빠를수록 관성력이 포함되지 않은 평균 파괴에너지율 215 N/m와 유사한 값을 보였다. 콘크리트의 균열성장에 대한 파괴저항을 측정하기 위해서는 균열속도에 따라 최소한 90~145 mm의 안정 균열성장이 필요하다.

**핵심용어** : 콘크리트, CLWL-DCB 실험, 동적 파괴거동, 균열속도, 파괴저항