

콘크리트 CLWL-DCB 시험편의 저항곡선

연정흙^{1)*}

¹⁾인하대학교 토목공학과

(2001년 11월 30일 원고접수, 2002년 2월 20일 심사완료)

Resistance Curves of Concrete CLWL-DCB Specimens

Jung-Heum Yon^{1)*}

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

(Received November 30, 2001, Accepted February 20, 2002)

ABSTRACT

The resistance curves (R-curves) for 381 mm crack extension of CLWL-DCB specimens had been determined. The average velocities of the crack extension measured with strain gages were 0.70 and 55 mm/sec. The measured rotation angle of the notch faces showed the existence of the singularity at least before 171 and 93 mm crack extensions for the 0.70 and 55 mm/sec crack velocities, respectively. The maximum slopes of the R-curves occurred between 25 and 89 mm crack extensions for 0.70 mm/sec crack velocity and between 51 and 127 mm crack extensions for 55 mm/sec crack velocity. During the maximum slopes of the R-curves, the micro-crack localization can be expected, and faster crack velocity may form longer micro-cracking and micro-crack localizing zones. The fracture resistance of 0.70 mm/sec crack velocity reached a roughly constant maximum value of 143 N/m at 152 mm crack extension, while that of 55 mm/sec crack velocity increased continuously to 245 N/m at 254 mm crack extension and then decreased to the value of 0.70 mm/sec crack velocity. The R-curve of 55 mm/sec crack velocity was similar to that of the small size three-point bend test, and it showed that small size specimen or fast crack velocity could cause more brittle behavior.

Keywords: concrete, fracture mechanics, CLWL-DCB specimen, propagating crack, resistance curve

1. 서 론

선형탄성 재료에서 균열의 성장은 발생 순간이 재료의 완전파손을 의미하며, 선형탄성 재료의 파괴기준을 위해 변형에너지해방률(strain energy release rate)의 개념이 도입되었다. 임계(critical) 균열길이까지 안정적인 균열성장이 발생하는 비선형탄성, 탄소성, 준취성(quasi-brittle) 재료에 대해서도 변형에너지해방률과 유사한 파괴저항(fracture resistance)의 에너지 개념이 사용된다. 파괴저항은 균열의 성장에 대해 평형을 유지할 수 있는 상태 또는 안정 균열성장에서 외부일과 탄성에너지의 차이로 정의되는 파괴에너지의 단위면적 균열성장에 대한 에너지로 정의된다¹⁾. 선형탄성 재료에 대해 변형에너지해방률의 파괴저항은 균열길이에 독립인 재료특성인 반면에, 비선형탄성 재료에 대해 파괴저항은 안정(stable) 균열성장에 대해 증가하여 최대 값에 이르게 되고 불안정(unstable) 균열성장

에 대해 감소한다.

콘크리트와 같은 준취성 재료의 파괴특성에 단위면적의 균열성장에 필요한 에너지 또는 저항력(resistance force)의 파괴저항이 적용될 수 있으며^{1,2)}, 연속적인 균열성장에 대한 파괴저항을 저항곡선(resistance curve)³⁾이라 한다. 균열단 주변의 비선형탄성 구역이 상대적으로 작으면 저항곡선은 재료특성으로 간주될 수 있다. 그러나 비선형탄성 재료의 저항곡선은 일반적으로 재료의 파괴특성과 시험편의 형상에 의해 결정되며⁴⁾, 균열단 주변에서 비선형 구역에 의한 균열성장의 구속 등에 의한 안정 균열성장을 고려할 수 있는 수단으로 사용될 수 있다¹⁾.

재하장치와 측정장치의 제한으로 실제 구조물의 크기보다 상당히 작은 시험편이 콘크리트의 파괴실험에 일반적으로 사용되고 있으나, 이 연구에서는 실제 구조물에 적용될 수 있는 크기의 시험편에 대한 효율적인 재하장치의 사용을 위한 균열면 췌기하중(crack-line wedge-loaded, CLWL) 이중 캔틸레버 보(double-cantilever beam, DCB) 시험편의 저항곡선을 측정하기 위한 시험을 실시하였다. 저항곡선의 계산에 필수적인 균열성장길이는 변형률 계이

* Corresponding author

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

Eamil : jyon@inha.ac.kr

를 따라 50.8 mm 간격으로 부착되었다. 이 연구에서 사용된 길이가 10 mm인 변형률 게이지는 절대적인 변형률을 측정하기 위한 것이 아니라 균열의 발생으로 인해 게이지의 위치에서 변형률의 기울기가 급격히 감소할 때의 하중점-변위를 측정하기 위한 것이다.

시험편 굽은골재의 최대 크기는 6.4 mm이며, 콘크리트의 배합비는 중량으로 시멘트 : 잔골재 : 굽은 골재 : 물의 비가 1 : 2 : 3 : 0.63이다. 실험재령에서 원주형 공시체에 대한 평균 압축강도 및 조깅인장강도는 각각 45.9 MPa(468 kgf/cm²)과 3.93MPa(40 kgf/cm²)로 참고문헌 5의 재료특성과 같다. 시험편의 크기는 폭×길이×두께가 508.0×558.8×50.8 mm로 Fig. 1과 같으며, 381 mm의 균열성장상에 대한 반응을 측정할 수 있다. 균열이 발생하는 위치를 유도하고 건조수축에 의한 잔류응력을 최소화하기 위해 콘크리트 타설에 의해 제작된 6.4 mm 폭과 165.1 mm 길이의 균열단(cast notch tip)에 3 mm 폭과 12.7 mm 길이의 추가 균열(saw-cut notch)이 실험 하루 전에 콘크리트 덩을 사용하여 제작되었다.

3. 실험결과

실험이 시작되기 전에 시험편에 수 차례 재하된 100 N(10.2 kgf)의 하중에 의해 하중전달장치가 안정화되었으며, 50초 또는 1,300초 동안 일정한 균열성장속도가 되도록 변위가 제어되었다. Fig. 3은 50초와 1,300초 동안 실시된 실험의 하중과 두 변위계의 평균값으로 계산된 하중점-변위 관계이다. 이 하중 P 와 하중점-변위 δ 의 관계에 대해 임의의 변위 δ_i 에서 다음의 식으로 계산된 외부일 W_i 는 하중점-변위에 대해 Fig. 4와 같다.

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

평균하중의 계산에 각 실험에서 측정된 하중의 산술평균이 사용되면 각 실험의 최대 하중에 대한 하중점-변위가 일정하지 않아 평균 하중의 최대 값이 여러 변위에서 발생할 수 있기 때문에, Fig. 3의 하중점-변위 δ_i 에 대한 평균하중 P_i^{ave} 는 외부일 W_i 의 평균값 W_i^{ave} 로부터 다음과 같이 계산되었다.

$$P_i^{ave} = \frac{dW_i^{ave}}{d\delta_i} \approx \frac{W_i^{ave} - W_{i-1}^{ave}}{\delta_i - \delta_{i-1}} \quad (2)$$

위의 식으로 계산된 평균하중은 평균 외부일을 만족하는 하중이다⁹⁾.

Fig. 3과 4에 의한 실험결과의 요약은 Table 1과 같으며, 단위면적의 균열형성에 필요한 평균 에너지로 정의되

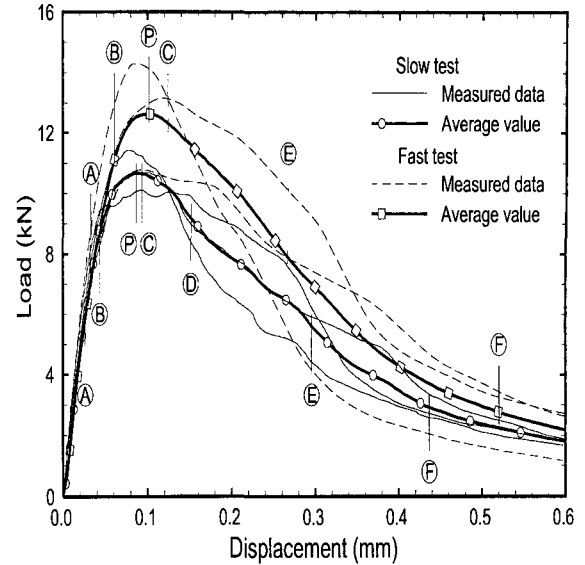


Fig. 3 Measured and average load versus displacement relations

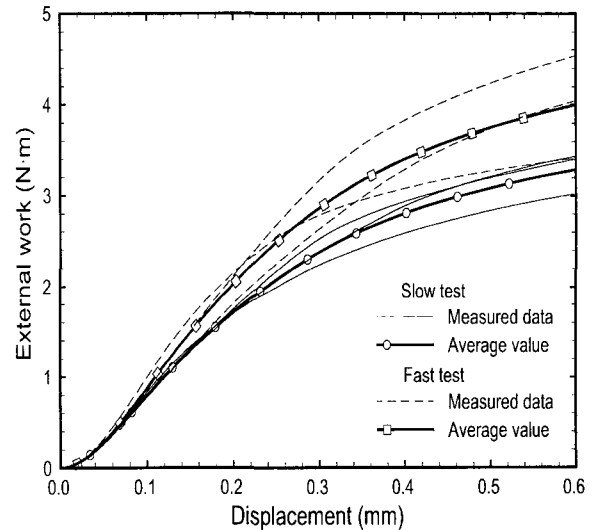


Fig. 4 Measured and average external works

Table 1 Results of CLWL-DCB tests

DCB test	Test #	Duration (sec.)	Peak load (KN)	Work (N.m)	G_F^{ave} (N/m)
Slow	SDCB1	1,359	10.61	4.025	208.0
	SDCB2	1,314	10.03	4.307	222.6
	SDCB3	1,232	11.35	3.748	193.6
	Ave.	1,301	10.66	4.027	208.1
Fast	FDCB1	44.87	10.70	6.190	319.8
	FDCB2	47.90	13.06	6.992	361.3
	FDCB3	47.02	14.20	4.447	229.8
	Ave.	46.60	12.66	5.877	303.6

는 평균 파괴에너지를 G_F^{ave} 는 다음의 식에 의해 계산된 값이다.

$$G_F^{ave} = \frac{[\text{평균 외부일}]}{[\text{균열단면의 면적}]} \quad (3)$$

50초 실험에 대한 최대하중은 1,500초 실험보다 19% 증가하였으며, 외부일과 파괴에너지를 46% 증가하였다. 이는 재하속도에 큰 영향이 없었던 127 mm 높이의 작은 삼점휨실험⁹⁾과 다른 결과를 보여준다. Fig. 3에 표시된 단계 ④ 이전의 기울기에 대한 비균열성장 선형탄성 유한요소해석의 탄성계수는 26 GPa(0.27×10^6 kgf/cm²)로 삼점휨실험의 결과와 같으며, 콘크리트구조 설계기준⁷⁾에 의한 값의 약 90%이다. Fig. 3의 단계 ④에서 하중의 기울기는 서서히 감소하기 시작하여 단계 ⑤에 이르면 하중의 기울기는 급격히 감소하게 되고, 단계 ⑥의 최대하중에 이르게 된다. 단계 ⑥ 이후 하중은 다시 급격히 감소하나, 단계 ⑦에 이르면 하중의 기울기는 서서히 증가하였다.

미소균열단의 위치를 측정하기 위해 변형률 게이지가 사용되었으며, Fig. 5는 Table 1의 SDCBI 실험에서 측정된 변형률이다. 각 게이지 변형률의 기울기가 급격히 변하는 하중점-변위에 대한 균열길이를 게이지의 위치로 가정하여 하중점-변위에 대한 균열길이가 측정되었다. 단계 ④의 균열의 성장이 시작될 때의 하중점-변위는 Fig. 3의 하중과 하중점-변위의 관계에 의해 결정되었고, 미소균열단이 시험편을 완전히 관통하는 단계 ⑥의 하중점-변위는 모든 변형률 게이지에 짧은 주기의 진동이 발생된 후 기울기 감소가 안정화되는 시점으로 가정되었다. Fig. 6은 이와 같은 방법으로 측정된 각 실험의 균열성장길이이다.

하나의 실험자료가 사용될 경우에 Fig. 5의 결과와 같이 균열의 성장에 대한 일정한 경향을 설정하기 힘들다, 여러 실험결과에 대한 평균 균열성장은 Fig. 6과 같이 미소균열단의 성장에 대해 일정한 경향을 보여준다. 50초 실험에 대한 균열성장은 1,300초 실험보다 약간 늦게 시작되었으나, 최대하중에서 균열성장길이는 약간 크며, 단계 ④의 약 150 mm 균열성장 후에는 하중점-변위에 대해 상대적으로 작은 균열성장을 보였다. Fig. 6에서 COD(crack opening displacement)에 의해 계산된 균열길이는 Fig. 1의 두 변위계에서 측정된 w_1 과 w_2 에 의한 회전각도가 전체 균열면에서 일정한 것으로 가정하여 다음과 같이 계산된 균열성장길이 Δa_w 이다.

$$\Delta a_w = \frac{\Delta a_{1-2}}{w_1 - w_2} w_p - a_o \quad (4)$$

여기서, Δa_{1-2} 는 두 변위계 사이의 거리 127 mm이며, w_p 는 하중점-변위, a_o 는 하중점에 대한 초기균열길이

101.6 mm이다.

50초와 1,300초 실험에 대해 각각 93 mm와 171 mm의 균열성장 이전과 같이 측정된 균열성장길이가 식 (4)에 의해 계산된 균열성장길이보다 작으면 균열면 변위의 모양은 불룩하게 되어, 특이성(singularity)이 존재하는 경우에만 가능하다^{8,9)}. 50초 실험은 대략 최대하중의 단계 ⑥ 그리고 1,300초 실험은 단계 ④ 이전의 균열성장에 대해 측정된 균열성장길이가 식 (4)보다 작기 때문에 최소한 이 경우의 해석에 콘크리트의 특이성이 고려되어야 한다. 정밀한 균열모양을 측정할 레이저 간섭실험(laser holographic interferometry)¹⁰⁾과 모아레 간섭실험(moiré interferometry)¹¹⁾에 의한 결과도 특이성의 존재를 보여주고 있다.

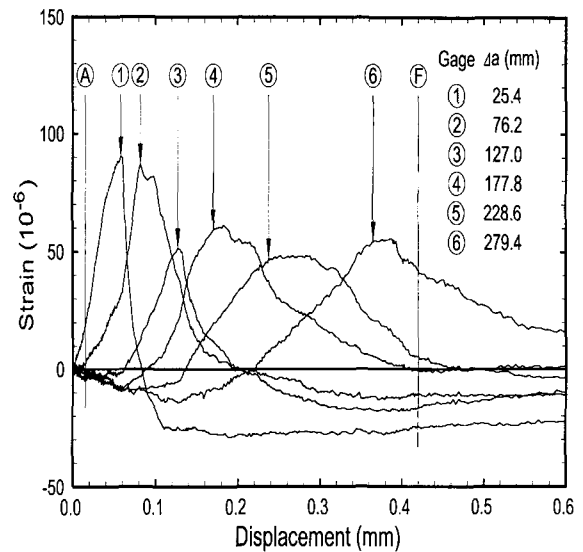


Fig. 5 Displacement and crack extension histories

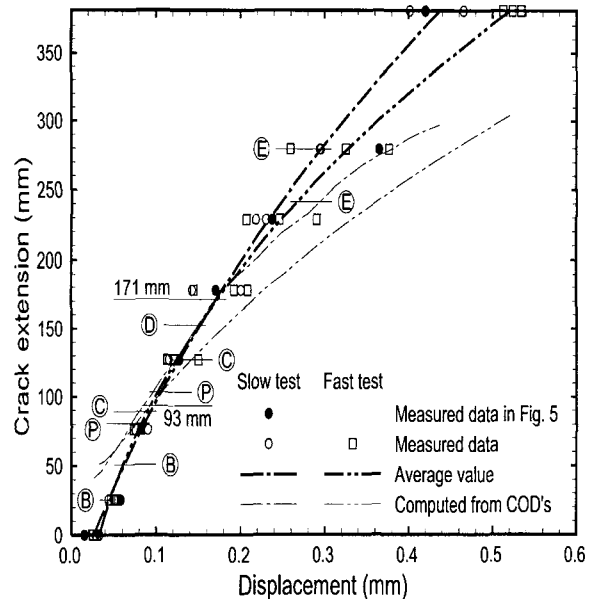


Fig. 6 Typical example of measured strains

Fig. 7은 측정된 하중점-변위와 균열성장길이에 대한 이력(history)을 보여준다. CLWL-DCB 실험에서는 작은 삼점휨실험⁹⁾의 하중점-변위 이력에서 발견되는 불안정 균열성장이 발생되지 않았다. 삼점휨 시험편의 경우 균열단 앞의 압축영역의 크기에 의해 안정상태를 유지할 수 있는 반면에 DCB 시험편의 평형은 압축영역의 크기에 영향을 받지 않기 때문에 판단된다. 균열의 성장이 시작되기 전의 변위속도는 상대적으로 느리게 그리고 최대하중 이후 변위속도를 인위적으로 증가시켜서 일정한 균열속도를 유지하도록 하였다. 50초와 1,300초의 실험에 대해 실제 균열성장 기간은 각각 7.0초와 547초이었으며, 평균 균열속도는 각각 55 mm/sec와 0.70 mm/sec이었다.

4. 저항곡선

실험결과로부터 시험편의 파괴저항을 계산하기 위해서 필요한 균열성장길이에 대한 파괴에너지는 외부일과 탄성 에너지의 차이로부터 계산된다. 일반적으로 균열의 성장 이후에 하중이 제거되면 시험편에는 영구변형이 남는다. 이 영구변형이 소성변형에 의한 것이라면 하중이 제거되기 전의 상태에서 이미 영구변형에 의한 에너지소모가 발생되었기 때문에 소성변형에 의해 소모된 에너지가 탄성 에너지의 계산에 포함되지 않아야 한다. 그러나 콘크리트에 소성변형의 발생이 입증된 적이 없으며, 하중이 제거될 때에 발생하는 영구변형이 균열면에서 입자의 이동(particle movement)과 거친 균열면의 마찰에 의한 경우에는 균열면에 썩기를 박은 것과 같은 효과로 영구변형이 발생될 수 있다. 이 경우 균열단의 앞에는 인장 잔류응력이 그리고 균열면에는 압축 잔류응력이 발생되며, 이에 의한 탄성 에너지가 하중의 제거 후에도 시험편에 남게 되는 새로운 역학기구(mechanism)가 형성된다.

이 연구의 실험에서는 하중제거가 없었고, 하중이 제거될 때 발생하는 잔류응력에 의한 탄성에너지와 소성변형이 가정되는 경우의 에너지소모가 같은 것으로 가정하여 하중점-변위 δ_i 와 이에 대한 평균 하중 P_i^{ave} 의 탄성 에너지 $E_{si}^{ave} = \frac{1}{2}P_i^{ave}\delta_i$ 에 대해 평균 파괴에너지 E_{fi}^{ave} 는 다음과 같이 계산되었다.

$$E_{fi}^{ave} = W_i^{ave} - E_{si}^{ave} \quad (5)$$

Fig. 8은 Fig. 3과 6의 실험결과로부터 계산된 균열성장길이에 대한 외부일과 탄성에너지 그리고 식 (5)로 계산된 파괴에너지이다. 약 150 mm의 균열성장에 대한 단계 ①까지 0.70 mm/sec 균열속도에 대한 실험의 결과가 55 mm/sec 균열속도에 대한 실험보다 약간 큰 파괴에너지를 필요로 한다. Fig. 6의 단계 ①에서 두 실험기간에 대해

하중점-변위와 균열성장길이는 같으나, 55 mm/sec의 빠른 균열성장속도에서 더 큰 탄성에너지가 저장되는 것을 보여준다. 단계 ① 이후 0.70 mm/sec 균열속도에서 파괴에너지를 균열성장길이에 비례하여 서서히 증가하였으나, 55 mm/sec 균열속도에서는 큰 기울기로 증가하였다.

단위면적의 균열형성에 필요한 에너지로 정의되는 파괴 저항 또는 파괴에너지율(fracture energy rate) G_f^{ave} 는 Fig. 8의 균열성장길이에 대한 파괴에너지의 단위면적의 균열성장에 대한 기울기로부터 다음과 같이 계산되었다.

$$G_f^{ave} = \frac{dE_f^{ave}}{t da} \approx \frac{E_{fi}^{ave} - E_{fi-1}^{ave}}{t(\Delta a_i - \Delta a_{i-1})} \quad (6)$$

여기서, t 는 시험편의 두께이다. Fig. 9는 식 (6)으로 계산된 파괴저항을 균열성장에 대해 연속적으로 나타낸 저항곡선이다. 단계 ②와 ③에서 기울기의 변화를 보이고 있

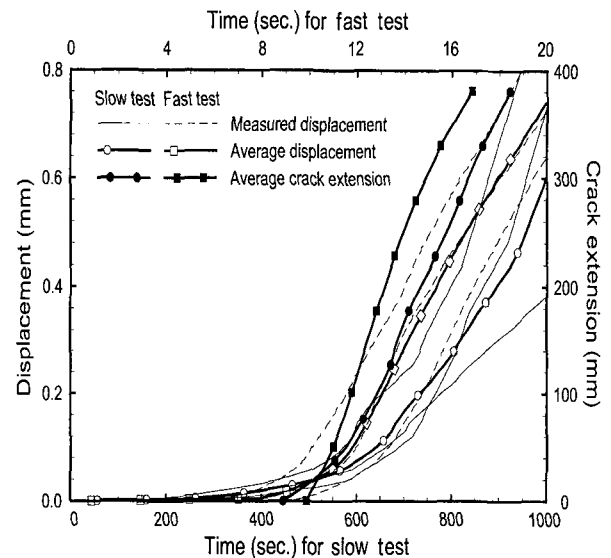


Fig. 7 Measured and average crack extensions

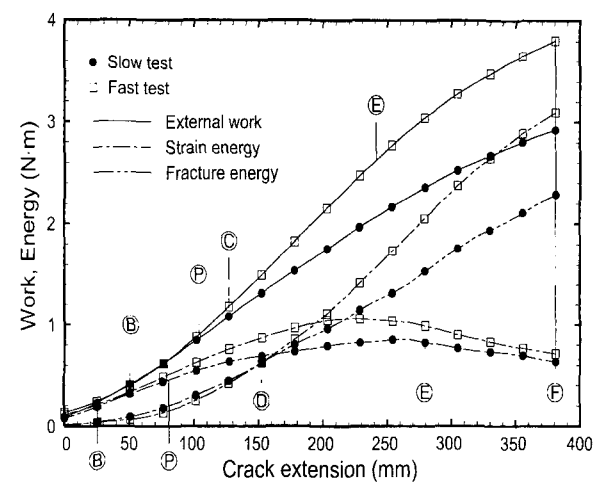


Fig. 8 Energy partitions for crack extension

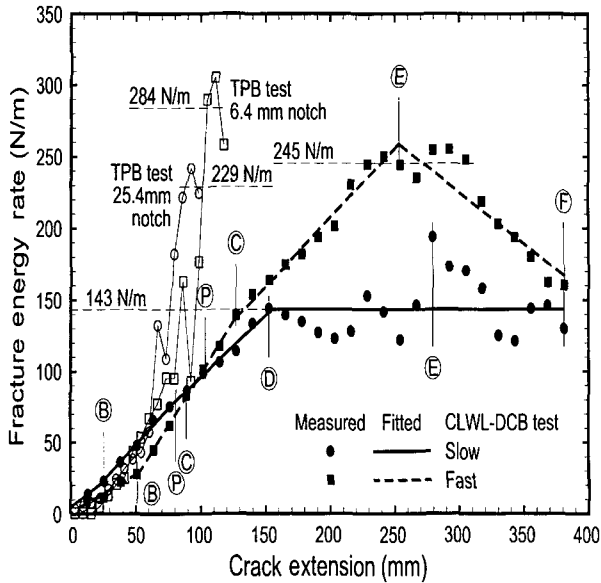


Fig. 10 Average and fitted resistance curves

있다. 0.70 mm 균열속도에서 단계 (B)와 (C)의 균열성장길이 63.5 mm는 전자현미경에 의한 직접 관찰결과¹²⁾의 미소 균열의 국부화(micro-crack localizing)에 대한 균열성장 범위 30~80 mm에 있으며, Fig. 3에서 단계 (B)와 (C)의 하중은 음향방출(acoustic emission)실험¹³⁾에서 미소균열 국부화가 발생하는 최대하중의 80%인 범위 내에 있다. 그러므로 단계 (B) 이전의 미소균열의 성장(micro-cracking)이 미소균열의 국부화로 전환되는 과정에서 저항곡선의 기울기가 변한 것으로 보이며, 최대하중 이후 단계 (C)에서 주균열이 형성된 것으로 판단된다.

최대하중의 단계 (P) 또는 약 100 mm의 균열성장 이전 0.70 mm/sec 균열속도에 대한 파괴저항은 55 mm/sec 균열속도에 대한 값보다 크며, 보다 넓은 미소균열성장 구역에 의한 것으로 판단된다. 0.70 mm/sec 균열속도에서는 25.4 mm의 균열성장 후에 미소균열 국부화가 발생된 반면에, 55 mm/sec 균열속도에서는 50.8 mm의 균열성장 후에 발생되어, 균열의 속도가 빠를수록 미소균열 구역이 좁고 긴 것으로 예측될 수 있다.

0.70 mm/sec 균열속도의 경우 단계 (C) 이후에도 파괴 저항은 계속 증가하며, 단계 (D)에서 대략 143 N/m의 일정한 값을 보인 반면에, 55 mm/sec 균열속도에서는 단계 (C) 이후에도 단계 (E)의 최대 파괴저항 245 N/m까지 증가한 후 감소하였다. 0.70 mm/sec와 55 mm/sec 균열속도에 대해 파괴저항은 Table 1의 평균 파괴에너지율의 각각 약 70%와 80%이다. 55 mm/sec의 빠른 균열성장속도는 Fig. 6의 0.70 mm/sec 균열속도와 균열성장길이가 같은 단계 (D) 이후의 상대적으로 큰 하중점 변위와 이로 인한 Fig. 8의 큰 탄성에너지 때문으로 판단된다. 두 균열속도 모두

에서 단계 (E)의 최대 파괴저항은 최대 탄성에너지 직후에 발생되었으며, 추가의 균열성장에서 0.70 mm/sec 균열속도의 평균 파괴저항 143 N/m에 수렴하는 경향을 보였다. 50초 실험의 단계 (E) 이후 파괴저항의 연속적인 감소는 변위가 제어되지 않은 경우 단계 (E)에서 불안정 균열성장이 발생할 가능성이 있다.

참고문헌 5의 서로 다른 초기균열길이에 대한 삼점휨 시험편의 저항곡선은 초기 파괴저항과 최대 파괴저항의 크기에 0.70 mm/sec 균열속도보다는 55 mm/sec 균열속도의 결과와 유사한 값을 보인다. 시험편의 크기가 작으면 빠른 속도의 균열성장과 같이 미소균열성장 구역이 좁게 형성되며, 미소균열의 압축영역에 접근에 의한 균열성장의 구속으로 큰 파괴저항의 취성거동을 보일 수 있다. 50초 실험의 최대 파괴저항은 균열이 없는 것으로 가정된 최대 골재크기의 초기균열에 대한 TPB 실험보다는 14% 작으나 25.4 mm 초기균열에 대한 값보다는 7% 크며, 0.70 mm/sec 균열속도의 최대 파괴저항은 TPB 실험에서 불안정 균열성장 후 균열성장이 구속된 때의 값과 같았다.

삼점휨 시험편에서 안정적인 균열성장을 보이는 약 60 mm의 균열성장길이까지 DCB 시험편의 결과와 큰 차이가 없으나, 이후의 파괴저항은 불안정 균열성장과 균열성장의 구속으로 균열성장에 대해 크게 증가하였다. 이는 균열성장길이에 대한 파괴저항이 안정 균열성장 동안에 대한 값만 적용되어야 하는 것을 보여준다. 또한 60 mm의 균열성장까지 DCB 시험편의 실험결과인 하중과 하중점-변위 관계, 균열성장길이, 에너지 분할 등은 삼점휨 시험편과 같이 균열속도의 영향을 보이지 않고 있어, 안정 균열성장길이가 짧은 경우에 균열속도의 영향을 파악하기 어려운 것으로 판단된다.

Table 2는 Fig. 3과 6 그리고 Fig. 9에서 결정된 파괴 거동에 대한 각 단계의 요약이다.

Table 1 Load-point displacement and crack extension at each step (unit: mm)

Step	Slow test		Fast test		Expected behavior
	w_p	Δa	w_p	Δa	
A	0.0265	0.0	0.0329	0.0	Micro-cracking
B	0.0437	25.4	0.0608	50.8	Micro-crack localizing
P	0.0864	80.7	0.1016	103.3	Ppeak load
C	0.0933	88.9	0.1240	127.0	Forming main crack
D	0.1518	152.4	-	-	Constant resistance
E	0.2957	279.4	0.2865	254.0	Maximum resistance
F	0.4368	381.0	0.5203	381.0	Tie behavior

w_p : Load-point displacement

5. 결 론

제하장치의 효율적인 사용과 실제 구조물에서 발생될 수 있는 크기의 콘크리트 균열에 대한 저항곡선을 측정하기 위해서 CLWL-DCB 시험편이 변위제어로 실험되었다. 변형률 게이지를 사용하여 측정된 균열성장속도는 50초와 1300초 동안 실시된 각 세 실험의 평균에 대해 각각 55 mm/sec와 0.70 mm/sec이었다. 실험에서 측정된 하중점-변위와 평균 외부일을 만족하는 평균하중으로부터 영구변형이 무시된 탄성에너지와 파괴에너지가 계산되었고, 381mm의 균열성장에 대한 저항곡선이 유도되었다. CLWL-DCB 시험편의 연속적으로 성장하는 균열에 대한 실험과 분석결과는 다음과 같다.

1) 55 mm/sec 균열속도에서 최대하중은 0.70 mm/sec 균열속도에 대한 값보다 19% 증가하였으며, 외부일과 평균 파괴에너지율은 46% 증가하였다.

2) 최대 균열성장길이가 381 mm인 CLWL-DCB 시험편의 실험에서는 최대 균열성장길이가 95 mm인 TPB 실험의 불안정 균열성장과 균열성장의 구속이 발견되지 않았다.

3) 초기균열면 회전각도는 0.70 mm/sec와 55 mm/sec의 균열속도에 대해 각각 최소한 171 mm와 93 mm의 균열성장 이전에 특이성이 존재하는 것을 보여준다.

4) 시험편의 탄성에너지는 0.70 mm/sec와 55 mm/sec의 균열속도에 대해 각각 균열성장길이 267 mm와 229 mm에서 최대 값이었다. 55 mm/sec 균열속도의 탄성에너지는 0.70 mm/sec 균열속도보다 최대 30% 큰 값이었으며, 이로 인해 균열속도가 빠른 경우에 취성이 증가하는 것으로 보인다.

5) 저항곡선의 기울기의 변화가 뚜렷한 0.70 mm/sec의 균열속도의 실험에서 25.4 mm와 88.9 mm 그리고 55 mm/sec의 균열속도의 실험에 대해 50.8 mm와 127 mm의 균열성장길이 사이에서 미소균열 국부화가 발생하는 것으로 판단되며, 미소균열의 국부화 동안에 저항곡선은 상대적으로 큰 기울기로 증가하였다. 빠른 균열속도에서 미소균열성장 구역은 보다 길게 형성되며, 미소균열의 국부화 동안에도 큰 균열성장을 보였다. 최대하중은 이 미소균열 국부화 중에 발생되며, 최대하중에서 측정된 반응으로 파괴특성을 나타내기는 어려울 것으로 판단된다.

6) 0.70 mm/sec 균열속도에 대해 152.4 mm의 균열성장 이후에 파괴저항은 143 N/m의 비교적 일정한 값을 유지하였으며, TPB 실험에서 불안정 균열성장이 구속될 때의 파괴저항과 같은 값이었다. 55 mm/sec 균열속도는 254 mm의 균열성장에서 최대 파괴저항 245 N/m까지 증가한 후 파괴저항의 감소되어 불안정 균열성장이 발생될 수 있음을 보여주며, 245 N/m의 파괴저항은 TPB 실험에서 초

기균열길이 6.4 mm와 25.4 mm에 대한 최대 파괴저항의 범위에 있다. 0.70 mm/sec와 55 mm/sec 균열속도에 대해 파괴저항은 평균 파괴에너지율의 각각 약 70%와 80%이었다.

7) 삼점휨 시험편의 경우 균열성장길이에 대한 파괴저항은 안정 균열성장 동안에 대한 값만 적용되어야 하며, 안정 균열성장길이가 짧은 경우에 균열속도의 영향을 파악하기 어려운 것으로 판단된다. 또한 삼점휨 실험과 55 mm/sec 균열속도의 유사한 저항곡선은 시험편의 크기가 작거나 균열의 속도가 빠른 경우에 취성거동을 할 수 있는 것을 보여준다.

참고문헌

1. 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. 1595~1610.
2. Homeny, J. and Vaughn, W. L., "R-Curve Behavior in a Silicon Carbide Whisker/Alumina Matrix Composite," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 73, No. 7, 1990, pp.2060~2062.
3. Krafft, J. M., Sullivan, A. M., and Boyle, R. W., "Effect of Dimensions of Fast Fracture Instability of Notched Sheets," *Proceedings of Cranfield Crack Propagation Symposium*, Vol. 1, 1961, pp.8~28.
4. Ouyang, C. and Shah, S. P., "Geometry Dependent R-Curve for Quasi-Brittle Materials," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 74, No. 11, 1991, pp.2831~2836.
5. 연정흠, "콘크리트 삼점휨 시험편의 성장하는 균열에 대한 저항곡선," *한국콘크리트학회 논문집*, 제13권, 6호, 2001, pp.568~574.
6. Yon, J. H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "Fracture Process Zone in Dynamically Loaded Crack-Line Wedge-Loaded, Double-Cantilever Beam Concrete Specimens," *ACI Materials Journal*, , Vol. 88, No. 5, 1991, pp.470~479.
7. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조 설계기준·해석, 기문당, 2000, p.413.
8. 연정흠, "콘크리트 파괴이론의 비교연구," *대한토목학회 논문집*, 제15권, 3호, 1995, pp.583~593.
9. Yon, J. H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, S. H., "Comparisons of Concrete Fracture Models," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997, pp.196~203.

10. 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, 1991, pp.130~138.
11. Du, J., Yon, J. H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "Fracture Process Zone for Concrete for Dynamic Loading," *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 3, 1992, pp.252~258.
12. Krstulovic-Opara, N., "Fracture Process Zone Presence and Behavior in Mortar Specimens," *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 6, 1993, pp.618~626.
13. Li, Z., "Microcrack Characterization in Concrete under Uniaxial Tension," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 176, 1996, pp.219~228.

요 약

CLWL-DCB 시험편에 대한 변위제어 파괴실험으로 381 mm의 균열성장에 대한 저항곡선이 유도되었다. 변형률 게이지를 사용하여 측정된 평균 균열성장속도는 0.70 mm/sec와 55 mm/sec이었다. 초기균열에서 측정된 회전각도는 0.70 mm/sec와 55 mm/sec의 균열속도에 대해 각각 최소한 171 mm와 93 mm의 균열성장 이전에 특이성이 존재하는 것을 보여주었다. 저항곡선의 최대 기울기는 0.70 mm/sec 균열속도에 대해 25.4 mm와 88.9 mm 그리고 55 mm/sec 균열속도에 대해 50.8 mm와 127 mm의 균열성장길이 사이에서 발생되며, 미소균열 국부화에 의한 것으로 판단된다. 빠른 균열속도에서 미소균열성장 구역은 보다 길게 형성되며, 미소균열의 국부화 동안에도 큰 균열성장을 보였다. 0.70 mm/sec 균열속도의 파괴저항은 152.4 mm의 균열성장 이후에 평균 파괴에너지율의 약 70 %인 143 N/m의 비교적 일정한 값을 유지하였다. 55 mm/sec 균열속도는 254 mm 균열성장에서 최대 파괴저항 245 N/m까지 증가한 후 파괴저항의 감소되어 불안정 균열성장이 발생할 수 있음을 보여준다. 55 mm/sec 균열속도의 저항곡선은 TPB 실험과 유사하여, 시험편의 크기가 작거나 균열의 속도가 빠른 경우에 취성거동을 할 수 있는 것을 보여준다.

핵심용어 : 콘크리트, 파괴역학, CLWL-DCB 시험편, 균열성장, 저항곡선