

# 염색체 침투법을 이용한 썬기쪼갬시험체의 파괴특성

## Fracture Measurements on WST test using Dye Penetration Method

어 석 홍\* 박 영 규\*\* 황 규 한\*\* 최 덕 진\*\* 홍 기 호\*\*  
Eo, Seok Hong Park, Young Kyu Hwang, Kyu Han Choi, Duck Jin Hong, Kee Ho

---

### ABSTRACT

In this study, wedge splitting tensile test(WST) using dye penetration method was carried out to investigate cracking criterion and fracture characteristics of concrete. For the this purpose, three levels of compressive strength of 180, 300 and 600 kgf/cm<sup>2</sup> and five testing age of 1, 3, 7, 14 and 28 days were selected as test variables. The specimen was loaded in a controlled manner and then dye was inserted at the load of 40%, 70% of the presumed peak load and at the load of 90% just after peak load. The fracture process zone was measured at each load step of a specimen.

Test results were compared with analytic results by linear elastic fracture mechanics(LEFM) and numerical results through fictitious crack model(FCM) and finite element method(FEM).

---

### 1. 서 론

알려진 바와 같이 콘크리트는 압축력에 강한 반면 상대적으로 인장력에는 취약한 특성을 가지고 있다. 이런 취약한 인장력을 보완하기 위하여 철근이나 강섬유 등의 보강재료와 함께 사용되고 있다. 더불어 취약한 인장특성으로 인하여 균열이라는 내구성 및 사용성 저하요소를 수반하게 된다. 균열이 발생하고 성장함에 따라 콘크리트 구조체는 저항력이 감소되고 사용연한이 줄어드는 등 많은 문제점을 초래하게 된다. 최근 이런 균열을 방지하기보다는 균열을 보수하고 그 발생원인을 찾고자 하는 노력이 증가하고 있다. 이에 균열발생을 최소화하고 효과적인 균열제어를 위해서는 어느 정도 균열 발생 기준에 대한 정립이 필요하다.

재료적인 특성에서 콘크리트는 유사취성 재료로 분류할 수 있다. 콘크리트와 같은 유사취성 재료의 파괴거동을 살펴보면 파괴시 최대응력 발생점 부근에서 보통 파괴진행대(Fracture process zone, FPZ)라고 불리는 비탄성 영역이 존재하며 이 파괴진행대의 영향으로 파괴거동을 적절히 묘사하기 어렵다. 이 파괴진행대의 크기를 구하기 위하여 레이저법(Laser holographic interferometry method), 초음파법(Acoustic emission method) 및 염색체 침투법(Dye penetration method)이 이용되고 있다.<sup>1)</sup>

---

\* 정희원, 창원대학교 토목공학과 부교수

\*\* 정희원, 창원대학교 토목공학과 석사과정

본 연구에서는 염색체 침투법을 썬기조깅시험체에 적용하여 콘크리트의 재령과 강도수준 그리고 하중단계에 따른 파괴진행대의 크기를 구하고 그 결과를 선형탄성 파괴역학의 유효탄성균열모델에 의한 이론 결과와 비교·검토하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 유효탄성균열모델(Effective elastic crack model)

유효탄성균열모델은 변형연화현상을 보이는 재료의 복잡한 파괴거동을 예측하기 위하여 가공의 균열선단을 가정함으로써 선형탄성파괴역학(LEFM)을 적용하여 파괴거동을 밝힐 수 있는 모델이다. 본 연구에서는 이 모델을 이용하여 유효탄성 균열길이( $a_e$ )와 임계 응력확대계수( $K_{Ic}$ )를 구하였다. Jenq와 Shsh<sup>2)</sup>의 2-파라미터 모델에 의하면 최대하중 상태에서의 탄성변형을 유발하는 유효탄성균열길이를 구하기 위하여 반드시 제하과정(Unloading Process)을 거쳐야 한다. 실험상에서 제하시점의 선택과 이에 따른 제하 기울기의 측정은 매우 난해하므로 제하과정을 거치지 않고 유효탄성균열길이를 추정하기 위하여 LEFM으로부터 유도된 균열개구형상(Crack Opening Profile)을 사용하였다. 임계 응력확대계수는 ASTM이 제시하고 있는 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \times \left[ 0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.60\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (1)$$

여기서, P는 조깅하중, B는 시험체의 두께, W는 롤러의 중심으로부터 하면까지의 거리 그리고 a는 초기균열의 길이로 식 (1)은 형상함수를 포함하고 있어 썬기조깅시험체에만 사용된다.

### 2.2 가상균열모델(Fictitious crack model)에 의한 수치해석

가상균열모델은 Hillerborg<sup>3)</sup> 등에 의해 처음 제안되었으며 이 모델을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 본 연구는 파괴진행영역을 제외한 전 구조가 탄성영역이라는 가정에서 출발한다. 또한 균열선단의 비선형 영역을 하나의 가상균열로 구체화하여 파괴진행영역의 비선형성을 2직선 변형연화 관계식에 따라 결정되는 응력경계조건으로 취급하여 문제를 단순화하였다. 미세균열현상 또는 안정균열 성장과 같은 파괴진행영역의 비선형 문제를 해석하기 위해 Gopalaratnam<sup>4)</sup> 등이 제안한 중첩의 원리에 기본을 두었다. 중첩의 원리를 적용한 균열해석은 외부하중과 파괴진행영역의 균열면을 따라 작용하는 단위하중에 대하여 각각 독립적인 탄성해를 구하고 이를 구조물의 평형, 적합조건 그리고 파괴진행영역의 결합응력-균열변위 관계를 만족하도록 일련의 방정식계를 구성한다. 본 연구에서는 시험체의 대칭성을 고려하여 우반부에 대해 유한요소 해석을 수행하였다.

### 2.3 염색체 침투법(Dye penetration method)

염색체 침투법은 파괴시 균열이 발생한 면에 염색체를 침투하여 염색된 면으로 균열길이를 측정하는 방법으로 Go 와 Swartz<sup>5)</sup>에 의해 처음 개발되었으며 보의 삼점휨 시험 및 썬기조깅시험에 이용되었다. 기존의 시험방법은 하나의 시편에 한번의 염색체를 침투하던 것에 비해 실험의 타당성과 경제성을 고려하여 본 실험에서는 색으로 구분할 수 있는 하나 이상의 여러 가지 염색체를 침투하여 균열길이를 측정하고자 시도하였다. 염색체는 점도에 따라 측정된 균열길이의 차이를 보일 것으로 예상되며 염색액의 점도를 고려하기 위해서 아래의 4가지 조건을 만족하여야 한다.

- i) 균열이란 가시적으로 보이는 균열로 정의한다.
- ii) 염색체는 균열면으로 빠른 침투를 하여야 하고 또한 빨리 건조하여야 한다.

iii) 염색체는 파괴면을 충분히 염색할 수 있어야 한다.

iv) 손상되지 않은 콘크리트면에 묻었을 때 내부로 스며들지 않아야 한다.

이상의 조건을 만족하는 염색액으로 표준점도  $2.9 \pm 0.3 \rho_0$ 인 국내 P사 제품의 잉크를 사용하였다. 각 하중단계별 파괴진행대의 가시적인 구분을 명확하게 하기 위하여서는 사용하는 염색체의 색채 및 투입순서가 중요하며 이는 충분한 예비실험을 통하여 결정하였다.

### 3. 실험

#### 3.1 사용재료 및 배합설계

본 실험의 사용재료로 시멘트는 국내산 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하고 골재로서 잔골재는 비중 2.59의 경남 칠서 낙동강에서 채취한 강모래를, 굵은골재로는 최대치수 19mm, 비중 2.67의 부순돌을 사용하였다. 고강도 콘크리트의 경우는 작업성이 불량하므로 작업성을 확보하기 위해 KS F 2560의 규격을 만족하는 고성능 감수제를 사용하였다. 배합설계는 표 1에 주어져 있다.

표 1 콘크리트의 배합

Mix	W/C (%)	S/a (%)	Unit Content(kgf/m <sup>3</sup> )				Admixture
			Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	
LSC	60	40	185	308	727	1125	-
MSC	47	42	185	396	690	990	0.3
HSC	30	42	160	528	677	963	1.0

#### 3.2 시험체의 제작

본 실험에서는 썬치조각실험을 수행하기 위해 육면체 시험체를 선택하였으며 그림 1과 같다. 물리가 부착된 하중장치를 고정시키고 클립게이지를 부착하기 위해 윗면에 홈을 만들었다. 초기균열(notch)을 만들기 위해서는 시험체가 경화한 후 다이아몬드 톱으로 커서 만들거나 시험체 제작 시 강철판이나 아크릴 판을 시험체 내부에 삽입하고 후에 그것을 제거함으로써 만들 수 있다. 본 실험에서는 1mm 두께의 강철판을 넣고 타설 후 24시간만에 강철판을 제거함으로써 초기균열을 만들었다. 그후 시험체는 실험시까지 습윤양생을 실시하였다.

#### 3.3 실험방법 및 계획

본 실험에서는 1986년 Linsbauer<sup>6)</sup>에 의해 제안되었으며 비교적 안정적인 파괴역학 시험 방법으로 알려진 썬치조각실험(Wedge Splitting Tensile Test, WST)방법으로 실험을 수행하였다. 실험방법은 그림 2와 같이 7cm의 초기균열이 있는 시험체를 지지대 위에 올린 다음 물리가 부착된 하중장치를 시험체 위에 올리고 두 개의 큰 강성을 가진 썬치를 양쪽의 물리 사이에 위치시킨다. 썬치가 물리 사이를 움직이면서 발생하는 수직하중( $P_v$ )을 물리에 의해 시험체에 썬치하중( $P_s$ )으로 작용하도록 하는 방법으로 실험을 수행하였으며 이 수직하중은 식  $P_s = \frac{P_v}{2 \tan \alpha}$ 에 의해 썬치하중으로 환산된다.

하중재하는 변위제어가 가능한 국내 S사의 유압식 서보 액츄에이터(Hydraulic Servo Actuator)를 이용하였으며 환산한 썬치하중과 클립게이지로 측정된 균열개구변위로부터  $P_s$ -CMOD 곡선을 구하였다. 염색체의 투입은 예상최고하중의 40%, 70% 및 최고하중을 지나 하중이 10% 감소한 세 하중단계에서 각각 실시하였으며 이 때의 FPZ의 크기를 측정하였다. 썬치조각실험을 수행하기 직전에 KS F 2405 및 KS F 2423에 따라 압축강도 및 인장강도 시험을 별도로 실시하였다.

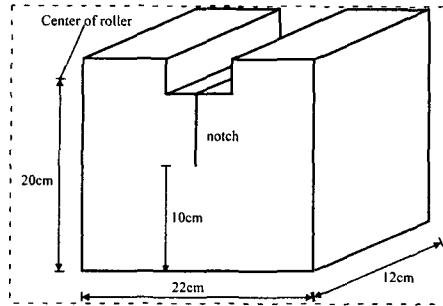


그림 1 시험체 형상

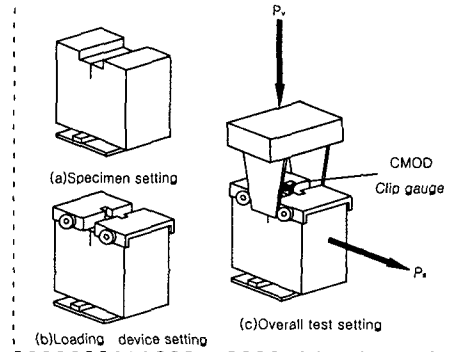
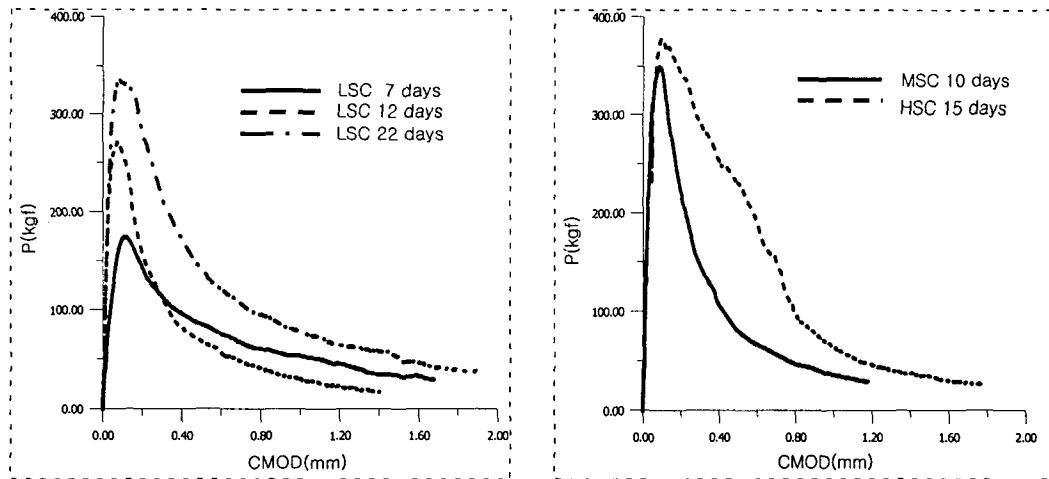


그림 2 실험 방법

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 하중-균열개구변위 곡선( $P_s$ -CMOD curve)

표 2에 각각의 강도수준 및 재령에 따른 콘크리트의 물성치 및 썩기조깅시험을 통한 최대수직하중 및 최대조깅하중을 나타내었다. 그림 3에 실험에 의해 구해진  $P_s$ -CMOD 곡선을 나타내었다. 그림 3에서 보듯 강도가 클수록 재령이 길수록 파괴점에 도달한 후 하중이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 또한 저강도 콘크리트의 경우 재령이 짧을수록 곡선이 완만한 것에 기인하여 강도발현이 다른 강도에 비해 늦음을 알 수 있다.



(a) LSC 콘크리트

(b) MSC 및 HSC 콘크리트

그림 3 실험에 의한  $P_s$ -CMOD 곡선

표 2 콘크리트의 물성치

Specimen Type	Age (days)	Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus (10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	P <sub>v(max)</sub> (kgf)	P <sub>s(max)</sub> (kgf)
LSC	7	123	12.6	1.47	93	174
	12	166	16.8	1.71	144	269
	22	207	22.4	1.91	178	332
MSC	10	191	22.4	1.84	186	347
HSC	15	379	39.7	2.59	201	375

4.2 파괴진행대

표기의 간편함을 위하여 염색체를 투여한 시기에 따라 최고하중의 40%를 step1, 최고하중의 70%를 step2 그리고 최고하중을 지나 하중이 10% 감소한 하중을 step3라 한다. 염색체 침투법을 이용한 파괴진행대의 크기는 염색된 면적의 크기를 구하여 시편의 두께로 나눈 값을 사용한다. 형상은 그림 4와 같으며 평균균열길이는 표 3에 나타내었다. 그림 5 및 표 4는 유효탄성균열모델을 적용한 유효탄성균열길이 step 3의 평균균열길이와 비교하였다. 더불어 표 4에 임계 응력확대계수도 구하였다.

표 3 파괴진행대의 평균길이

구 분	LSC			MSC	HSC
	7Days	12Days	22Days	10Days	15Days
Step 1	5.60mm	4.72mm	2.16mm	3.16mm	4.16mm
Step 2	7.88mm	19.68mm	12.72mm	7.72mm	5.04mm
Step 3	34.32mm	21.76mm	14.88mm	13.08mm	14.04mm

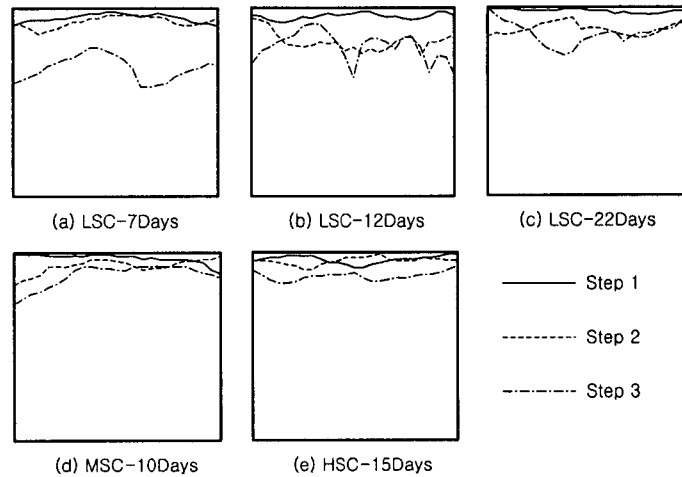


그림 4 파괴진행대의 형상

표 4 균열길이 및  $K_{Ic}$

Type	Age (days)	균열길이(mm)		$K_{Ic}$ (kgf/cm <sup>3/2</sup> )
		실험	이론	
LSC	7	34.32	34.11	20.715
	12	21.76	33.49	32.024
	22	14.88	32.16	39.525
MSC	10	13.08	29.72	41.310
HSC	15	14.04	25.48	44.644

### 5. 결론 및 향후과제

본 연구를 통하여 얻은 결론을 다음과 같다.

1. 염색체 침투법을 썬기조깅시험체에 적용하여 각 하중단계에서 균열형상 및 평균균열길이를 구할 수 있었다. 그 결과 콘크리트의 강도가 클수록, 재령이 길수록 발생한 균열이 작다는 것을 알았다. 더불어 기존의 하나의 시편에 하나의 염색체를 투여하던 방식에서 실험의 적합성 및 경제성의 시점에서 하나의 시편에 여러 가지의 염색체를 투여하려 하였으나 시험 중 염색체를 투여하고 투여된 염색체가 마르는 동안 하중이 급격히 떨어지는 이유로 정확한 실험을 수행하지 못하였다.
2. 유효탄성 균열모델에 의해 임계 유효탄성균열길이를 구하기 위하여 균열개구 변위함수를 사용하였고 이는 실험에 의해 구해진 평균균열길이보다 큰 값을 나타내었다.
3. ASTM이 제시하는 식으로부터 임계 응력확대계수를 구하였고 이는 강도가 클수록, 재령이 길수록 증가함을 알 수 있었다.
4. 이상의 결과 보다 많은 실험이 요구되고 합리적인 실험의 결과와 이론식의 결과를 비교하기 위해서는 수치해석적인 연구가 추가적으로 요구된다.

### 참 고 문 헌

1. Shah, S. P., Swartz, E. S. and Ouyang, C., *Fracture mechanics of concrete*. John Wiley & Sons, 1995. pp. 97-107.
2. Jenq, Y. S. and Shah, S. P., "A two parameter fracture model for concrete", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.111, No.4, 1985, pp. 1227-1241.
3. 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. 1, 1976, pp. 773-782.
4. Gopalaranam, Y. S. and Ye, B.S., "Numerical characterization of nonlinear fracture process in concrete", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 40, No. 6, 1991, pp. 991-1006.
5. Swartz, E. S. and Go, C. G., "Validity of compliance calibration to cracked concrete beams in bending", *Experimental Mechanics*, Vol. 24, No.2, 1984, pp. 129-134.
6. Bruhwiler, E. and Wittmann, F. H., "The wedge splitting test, A method of performing stable fracture mechanics test", *Recent Publications*, ed. by Wittmann, F. H., 1988, pp. 147-162.
7. 어석홍, 김진근, 김희성, "고강도 콘크리트보의 파괴특성과 크기효과에 관한 수치해석적 연구", 대한토목학회논문집, 17권, 1-3호, 1997, pp. 361-371.
8. Eo, S. H., Hawkins, N. M. and Kwak, G. S., "Fracture characteristics and size effect in normal and high-strength concrete beam", Proc. of FRAMCOS2, Zurich, Switzerland, July 25-28, 1995, pp. 685-692.