

콘크리트의 불안정 균열성장에 관한 연구

A Study on the Unstable Crack Growth of Concrete

고영주* · 배주성**

Ko, Young Zoo · Bae, Ju Seong

Abstract

This experimental research evaluated the length of crack extension with the measured compliances as the mutual comparison factors instead of the method proposed in ASTM E561-80. And this research measured the R-curves with the application to the concept of the strain energy release rate that was formulated from the inelastic energy absorbed during the crack growth.

With the interpretation of R-curves, this research obtained the starting point of the unstable crack growth, and compared the values of critical fracture toughness with each other, and then examined the effects of variations of the maximum size of coarse aggregate and the thickness of specimen on the values of the critical fracture toughness.

요 지

본 연구에서는 ASTM E561-80에서 제안한 방법과는 달리, 반복하중시 측정된 각각의 compliance를 상호비교인자로 활용하여 증가 균열길이를 간접적으로 구하고, 이 값들을 균열성장 동안에 흡수된 비탄성 에너지를 고려한 변형에너지 해방율개념에 적용하여 구한 저항곡선의 해석으로부터 콘크리트의 불안정 균열성장 개시점을 구하였으며, 또한 굵은골재 최대수치와 시편의 두께변화가 임계파괴인성치에 미치는 영향 등을 고찰하였다.

1. 서 론

콘크리트는 어느 정도 인장응력을 받을 때까지는 안정 균열성장을 계속하다가 일정한 응력에 도달하면 갑작스런 파괴가 발생하는 불안정 균열성장 영역을 갖게 된다. 이러한 예기치 못한 갑작스런 파괴는 막대한 경제적 손실과 인명피해를 야기하기

때문에 이러한 피해를 예측하고 방지하기 위해서 콘크리트의 특성을 고려하여 균열성장을 규명하려는 파괴해석 기법들이 꾸준히 연구되어 왔다.

그 대표적인 기법으로는 균열개구변위법(COD), J-적분법, 가상균열모델(FCM) 및 저항곡선해석(R-curve analysis) 등이 있다⁽¹⁻¹⁸⁾.

이러한 비선형 기법들 중 저항곡선해석법에 의해

*정회원 · 한국도로공사 도로연구소

**정회원 · 전북대학교 토목공학과 부교수

서 콘크리트의 균열성장 관련 특성을 파악하기 위해서는 실제 균열길이의 측정이 용이하고 파괴인성 측정방법이 간단해야 한다.

그러나 콘크리트는 재료의 불분명한 성질과 균열 성장의 뒤늦음 때문에 실제 균열성장 길이의 측정이 어렵고, 균열 끝에서의 파괴전행대(fracture process zone)라 불리는 비선형 거동영역이 파괴인성의 측정을 어렵게 한다.

이에 대한 대안으로 본 연구에서는 ASTM E561-80(standard recommended practice for R-curve determination)에서 CLWL-DCD 시편에 제안한 방법과는 달리 SEM(single edge notch) 시편에 반복 하중 작용시 측정된 compliances을 상호 비교인자로 활용하여 증가균열길이를 간접적으로 구하고⁽¹³⁾, 또한 이 값들을 균열성장 동안에 흡수된 비탄성 에너지를 고려한 변형에너지 해방율(strain energy release rate : G) 개념⁽⁷⁾에 적용하여 구한 저항곡선의 해석을 통해서 콘크리트의 균열성장의 특성 및 불안정 균열성장 개시점을 구하였고, 이 개시점에서의 임계파괴인성치 K_{IC} , G_{IC} 를 구하여 이 값들을 J-적분법으로 구한 J_{IC} 와 비교하였으며, 임계하중과 최대파괴하중과의 관계, 굽은골재 크기와 시편의 두께의 변화가 임계파괴인성치 및 균열 성장에 미치는 영향 등을 고찰하였다.

2. 콘크리트의 파괴실험

2.1 시편의 제작 및 종류

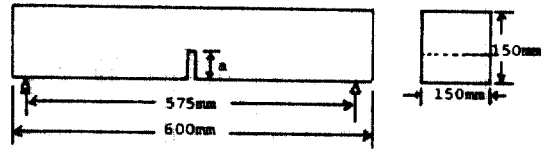
콘크리트의 파괴실험을 수행하기 위해서 그림 1과 같이 두께가 다르고, 굽은 골재 최대치수를 달리한 3종류의 콘크리트 직사각형 보를 예비실험 및 본 실험용으로 총 18개 제작하였으며(표 1), 각 시편의 시방배합은 표 2와 같다.

Compliance 측정과 관련하여 모든 시편은 casting notch로 일정하게 45 mm의 초기균열길이를 주었다.

물드는 강재로 제작하였으며 성형 후 탈형이 용이하도록 광유를 칠하였고, 재료분리가 일어나지 않도록 진동기를 사용하여 동일조건으로 다졌다.

또한 모든 시편은 표면의 편평도가 매우 중요하므로 대략 타설 3시간 후에 캠핑작업을 하였으며, 24시간 후 탈형하여 casting notch 강편을 제거하고 실험시까지 수중양생 하였다.

Type A, B



Type C

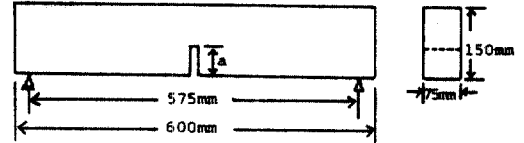


그림 1. The size of specimens.

표 1. Type and number of specimen

| Sort \ Type | A | B | C |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| a/H | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 굽은골재 최대치수(mm) | 25 | 15 | 15 |
| 압축강도(kg/cm ²) | 266.53 | 290.29 | 305.01 |
| 갯수 | 6 | 6 | 6 |

Type A, B; 150×150×600

Type C; 150×75×600

2.2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 3점침실험을 수행하기 위하여 Instron사의 만능시험기(20t)를 사용하였고 측정장치의 구성도는 그림 2와 같다.

시편에 하중이 균일하게 가해지도록 load cell과 가압판 사이에 spherical seat를 설치하였고, COD 측정을 위해서 노치양쪽에 knife edge를 부착한 후 clip gage를 설치하였다.

또한 재하점의 처짐을 정확히 측정하기 위하여 시편에 slide glass를 붙인 후 그 위에 cantilever gage를 정확히 접촉시켰다.

Clip gage와 cantilever gage는 실험전에 micrometer, X-Y recorder 및 amplifier을 이용하여 충분한 calibration 작업을 실시한 후 설치하였다.

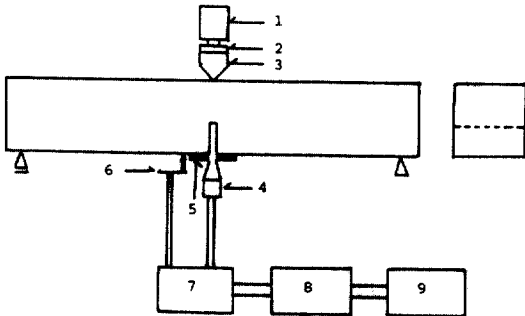
실험은 cross head speed가 0.05 mm/min로 파괴될 때까지 하중을 가하였고, 반복하중의 시행착오를 줄이기 위해 12개의 시편을 예비실험한 후 본 실험용 6개의 시편에 loading-unloading-reloading의

표 2. The mixing table per unit volume
Type A

| 굵은골재 최대치수 (mm) | Slump값 (cm) | 단위수량 (W) (kg) | 단위 시멘트량 (C) (kg) | 물·시멘트비 (%) (W/C) | 굵은·잔 골재비 (G/S) | 잔 골재량 (S) (kg) | 굵은 골재량 (G) (kg) |
|----------------|-------------|---------------|------------------|------------------|----------------|----------------|-----------------|
| 25 | 7 | 178 | 356 | 50 | 1.52 | 741 | 1093 |

Type B, C

| 굵은골재 최대치수 (mm) | Slump값 (cm) | 단위수량 (W) (kg) | 단위 시멘트량 (C) (kg) | 물·시멘트비 (%) (W/C) | 굵은·잔 골재비 (G/S) | 잔 골재량 (S) (kg) | 굵은 골재량 (G) (kg) |
|----------------|-------------|---------------|------------------|------------------|----------------|----------------|-----------------|
| 15 | 5 | 192 | 384 | 50 | 1.12 | 843 | 902 |



- 1. load cell
- 2. spherical seat
- 3. loading plate
- 4. clip gage
- 5. knife edge
- 6. cantilever gage
- 7. bridge box
- 8. amplifier
- 9. X-Y recorder

그림 2. The schematic diagram of test apparatus.

반복 재하법을 택하였다.

2-pen type의 X-Y recorder로부터 하중 증가에 따른 하중-처짐곡선 및 하중-COD 곡선을 구하였고, 처짐과 COD값들은 하중 증가에 따라 specimen → cantilever, clip gage → bridge box → amplifier → X-Y recorder에 기록된 값들과 실험전에 보정한 값의 관계로부터 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

본 실험으로부터 얻은 시편 A, B 및 C의 하중-

처짐곡선은 각각 그림 3~5와 같다. 이들 각 하중-처짐곡선으로부터 노치깊이를 콘크리트가 갖는 초기균열로 가정하여 그 때의 compliance와 반복하중 시 구한 compliance를 비교하여 균열의 증분을 구하였고, 이들 증분에 대한 compliance와 영구변형의 변화율을 얻어 균열성장 동안에 흡수된 비탄성에너지를 고려한 변형에너지해방율(G_R)을 구하여 균열성장저항(K_R)으로 변환하였다.

이들로부터 구한 각 시편의 균열성장 저항곡선(K_R -curve)과 균열확장곡선(K -curve)은 각각 그림 6~8과 같다.

표 4는 저항곡선으로부터 구한 임계하중(P_c), 증가균열길이(Δa), 최대파괴하중(P_{max}) 및 P_c/P_{max} 값들이고, 표 5는 각 시편의 임계파괴인성치 K_{IC} , G_{IC} 및 J_{IC} 이다.

3.2 콘크리트의 파괴인성치의 계산

M. Wecharatana 등⁽¹³⁾이 제안한 균열이 성장하는 동안에 흡수된 비탄성에너지도 고려한 변형에너지해방율은 다음과 같다.

$$G_R = \frac{P_1 P_2}{2} \left[\frac{dC_R}{dA} + \left(\frac{P_1 + P_2}{P_1 P_2} \right) \cdot \frac{d\delta_p}{dA} \right] \quad (3-1)$$

여기서 $d\delta_p/dA$ 는 균열성장에 의한 영구변형의 변화율이고, P_1 , P_2 는 각각 균열길이가 a_1 , a_2 일 때의 이웃하중이며 C_R 은 reloading compliance이다.

위 식을 n 회 반복하중에 대해서 일반화하면 다음과 같다.

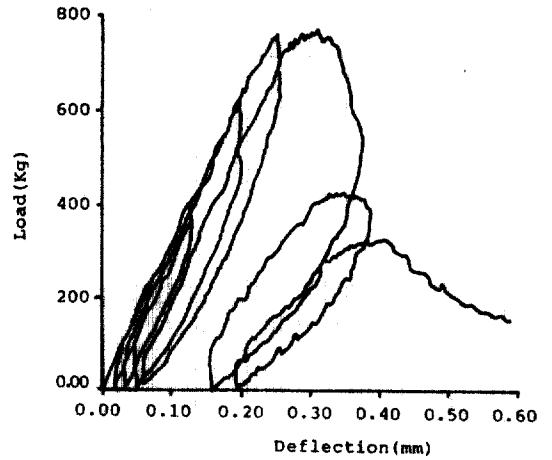
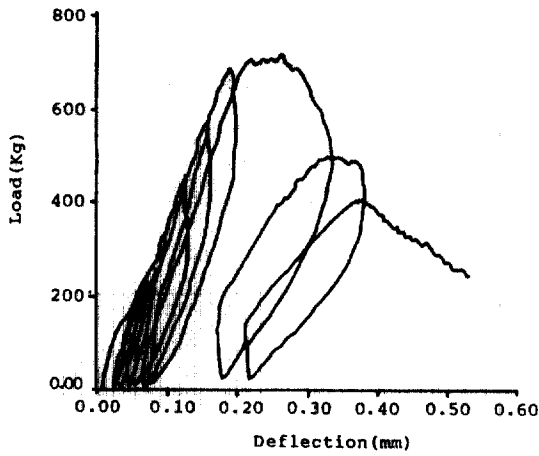


그림 3. The load-deflection curves of concrete A.

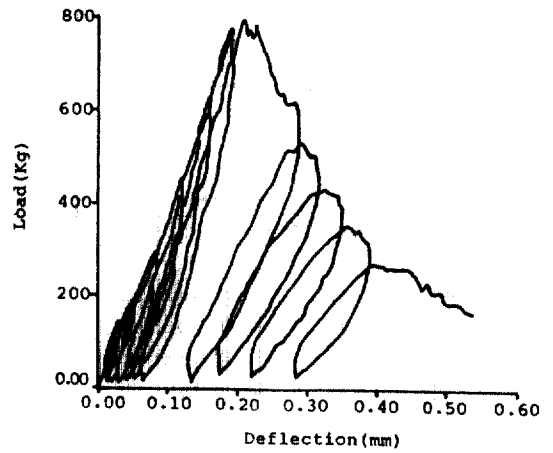
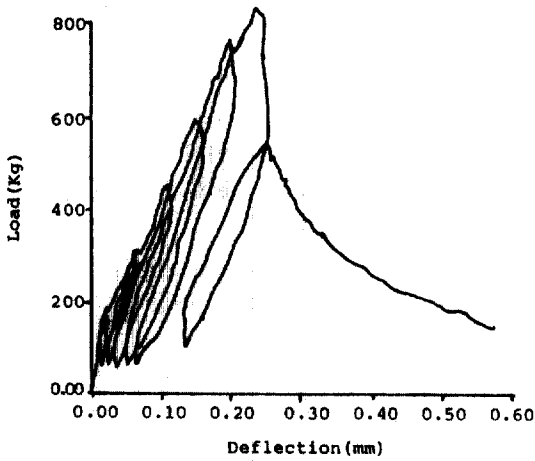


그림 5. The load-deflection curves of concrete C.

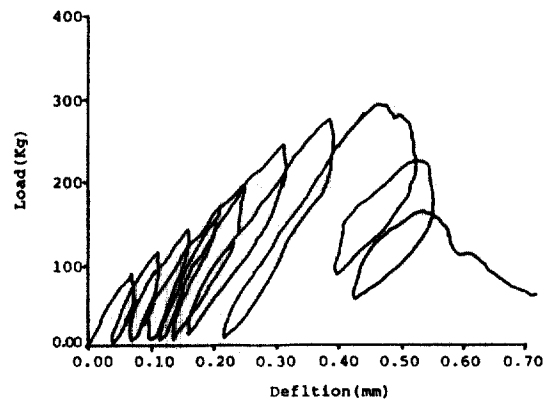
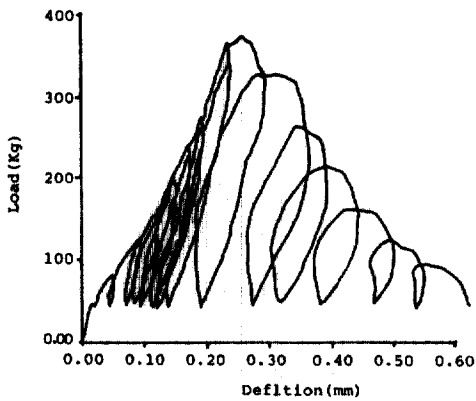


그림 4. The load-deflection curves of concrete B.

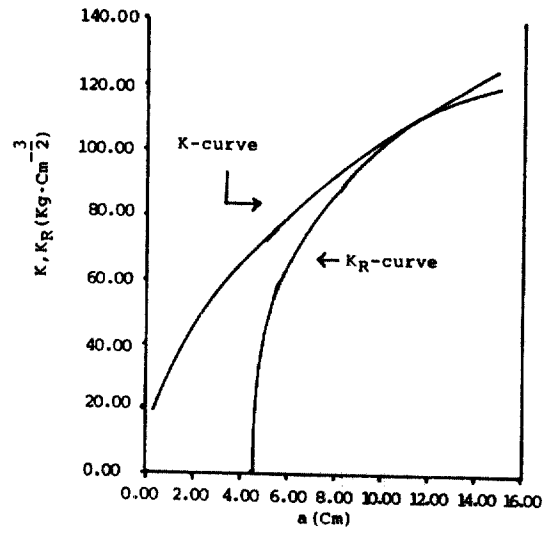
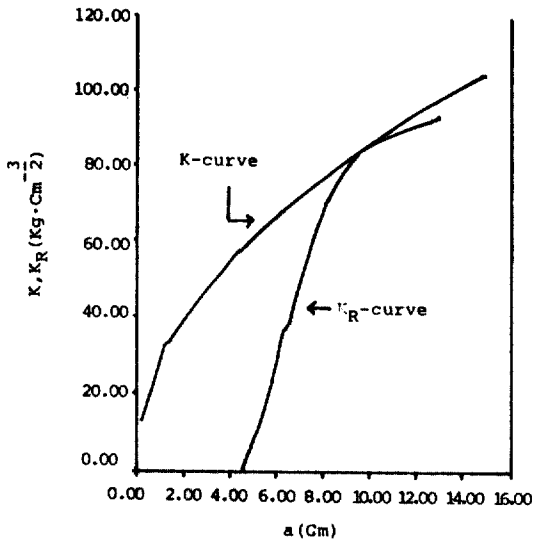


그림 6. K-K_R curves of concrete A.

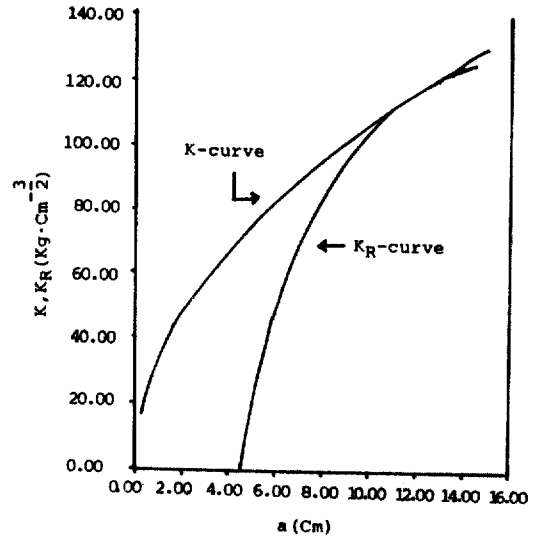
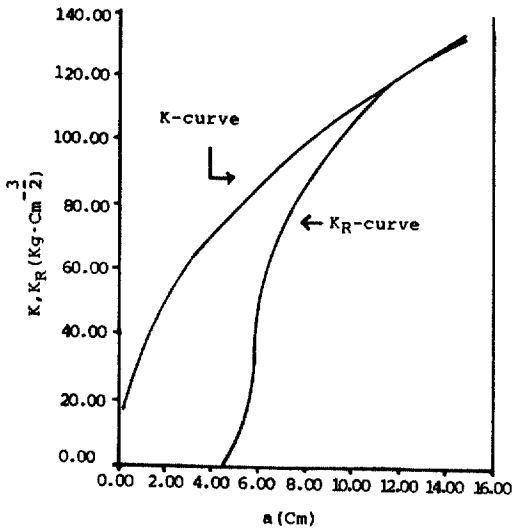


그림 7. K-K_R curves of concrete B.

표 3. The experimental results by R-curve analysis

| Type | a_0 (cm) | Δa (cm) | P_{max} (kg) | P_0 (kg) | $P_0/P_{max} \times 100$ (%) |
|------|---------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------------------------|
| A-1 | 4.5 | 5.5 | 708 | 550 | 78 |
| A-2 | 4.5 | 6.5 | 760 | 655 | 86 |
| B-1 | 4.5 | 7.5 | 832 | 700 | 84 |
| B-2 | 4.5 | 6.5 | 800 | 680 | 85 |
| C-1 | 4.5 | 5.75 | 374 | 296 | 79 |
| C-2 | 4.5 | 5.50 | 296 | 260 | 88 |

표 4. The K_{IC} , G_{IC} , J_{IC} values of specimen

| Type | $K_{IC}(kg \cdot cm^{-3/2})$ | $G_{IC}(kg/cm)$ | $J_{IC}(kg/cm)$ |
|------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| A-1 | 85.71 | 0.030 | 0.085-0.098 |
| A-2 | 107.05 | 0.047 | |
| B-1 | 119.49 | 0.056 | 0.095-0.106 |
| B-2 | 111.14 | 0.048 | |
| C-1 | 118.08 | 0.053 | |
| C-2 | 125.01 | 0.060 | |

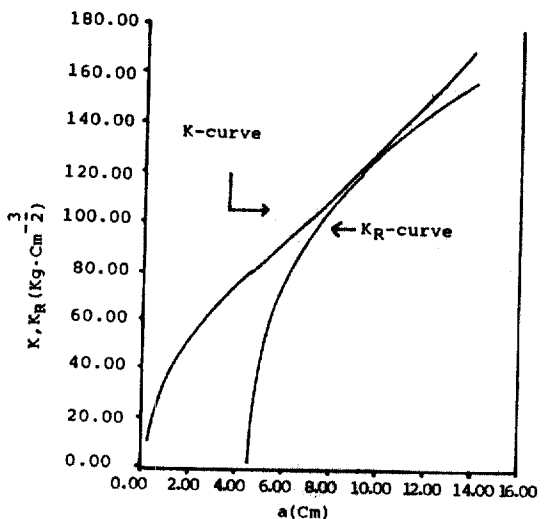
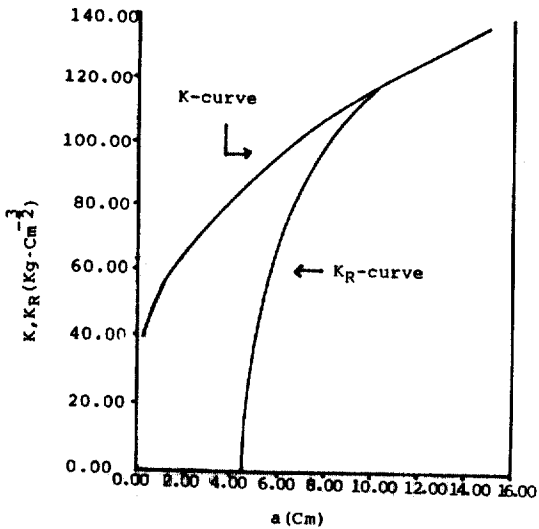


그림 8. K-K_R curves of concrete C.

$$G_{Rn} = \frac{P_{n-1}P_n}{2} \left[\frac{dC_{Rn-1}}{dA} + \left(\frac{P_{n-1} + P_n}{P_{n-1}P_n} \right) \cdot \frac{d\delta_{pn-1}}{dA} \right] \quad (3-2)$$

윗 식으로부터 구한 G_R값은 K_R과 평면응력상태에서 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$K_R = (G_R \cdot E)^{1/2} \quad (3-3)$$

여기서 E는 콘크리트의 탄성계수로 E=4700(f'_c)^{1/2}을 사용하였으며, K_R은 균열성장에 대한 저항력을 나타낸다.

K_R-curve는 각 하중-치짐곡선으로부터 최초의 노치깊이를 콘크리트가 갖는 초기균열(a₀)로 가정하여 그 때의 compliance와 반복하중시 구한 각 compliance를 상호비교인자로 활용하여 증가균열길이(Δa)를 계산한 후 이들에 대응하는 K_R값을 도식화한 값으로 이 곡선은 균열확장에 대한 저항곡선이다.

또한 K-curve는 Z. P. Bazant 등⁽¹⁵⁾이 제안한 아래 식에서 a₀를 변화시켜 가면서 구한 K값과 증가균열길이와의 관계를 도식화한 균열확장 곡선이다.

$$K = (\pi a_0)^{1/2} \cdot \frac{PL}{bh^2} \cdot f(\alpha) \quad (3-4)$$

여기서, f(α) = 1.635 - 2.603α + 12.30α² - 21.27α³ + 21.86α⁴

α = a₀/H, H는 시편의 깊이, L은 경간이고 b는 폭이다.

K_{IC}는 K_R-curve와 K-curve가 만나는 점, 즉 불안정 균열성장 개시점에서의 임계파괴인성치로 각각 그림 5~7로부터 구한 값이고, 이에 대응하는 G_{IC}는 평면응력상태에서 다음 관계식으로부터 구하였다.

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (3-5)$$

J_{IC}는 문헌(18)에서 본 연구와 동일한 시편에 반복하중 대신 정하중이 작용했을 때 구한 임계파괴인성치로 비교를 위해서 인용한 값이다.

3.2 고찰

표 4로부터 각 시편의 불안정 균열성장 개시점의 평균치는 각각 60, 70 mm 및 56.3 mm이고, 전체 평균은 대략 62 mm였다. 이 결과로부터 굵은골재 최대치수가 크고, 시편의 두께가 작은 경우에 불안정 균열성장 길이가 작았다. 이러한 결과를 문헌(12)의 결과와 비교하면 굵은골재 최대치수의 변화에는 상반되고, 체적상수인 두께에 대해서는 같은 경향을 보였다.

표 4에서 P/P_{max}의 값은 굵은골재 최대치수가 작고, 시편의 두께가 큰 경우 컸으며 전체 평균치는 대략 83%였다.

또한 P_c 와 P_{max} 관계로부터 최대파괴하중 P_{max} 를 예측할 수 있으나 보다 많은 실험을 통해 그 신뢰성을 확보해야 한다고 생각된다.

표 5에서 임계 변형에너지해방율(G_{IC})은 J-적분치(J_{IC})보다 작게 나타났는데 이러한 경향은 비선형 탄성재료에서 J_{IC} 가 G_{IC} 보다 크다는 문헌(17)의 결과와 일치한다.

또한 K_{IC} 와 G_{IC} 는 시편의 두께보다 굵은골재 최대치수 변화에 더 큰 영향을 받았다.

4. 결 론

본 연구는 콘크리트의 불안정 균열성장률에 관한 특성을 고찰하기 위해서 SEN 시편에 반복하중을 작용시켜 3점 휨 시험을 수행하였으며 이로부터 구한 저항곡선을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ASTM E561-80에서 규정한 균열저항곡선 해석과 달리 본 연구에서 수행한 균열저항곡선 해석은 SEM 시편에 적용가능함을 알 수 있었다.

2. 본 연구에서는 콘크리트의 불안정 균열성장 개시점은 대략 62 mm였으며, 굵은골재 최대치수가 크고 시편의 두께가 작은 경우 더 작았다.

3. 굵은골재 최대치수와 시편의 두께가 큰 경우 K_{IC} 와 G_{IC} 는 작았으며, 시편의 두께보다 굵은골재 최대치수의 변화에 더 큰 영향을 받았다.

4. 최대파괴하중에 대한 임계하중의 비는 대략 83%였다.

참 고 문 헌

1. M. Wecharatana and S.P. Shah, "Resistance to Crack Growth in Portland Cement Composites", Fracture in Concrete, Edited By W.F. Chan and E.C. Ting, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 88-105, 1980.
2. R.M.L. Foote, B. Cotterell and Y.M. Mai, "Crack Growth Resistance Curve For 4 Cement Composites", Advances in Cement-Matrix Composites, Proceedings, Materials Research Research Society, Symposium, Botton, pp. 135-144, 1980.
3. S.P. Shah, and Wecharatana, et, "Predictions of Nonlinear Fracture Process Zone in Concrete",

- Journal of Engineering Mechanics Div, ASCE, Vol. 109, No. 5, pp. 1231-1246, October, 1983.
4. D.B. Barker and A.S. Kobayashi, etc, "Concrete Fracture in CLWL Specimen", Journal of Engineering Mechanics Div, ASCE, Vol. 111, No. 5, pp. 623-638, May, 1985.
5. Z.P. Bazant and J.K. Kim, etc, "Nonlinear Fracture Properties From Size Effect Test", Report No. 84-5/4283, The Technical Institute Northwestern University, May, 1984.
6. P. Zenek and F. Bazant, "Approximate Linear Analysis of Concrete Fracture By R-curves", Journal of Structural Engineering, Vol. 110, No. 6, June, 1984.
7. S.P. Shah and Wecharatana, "Slow Crack Growth in Cement Composites", Journal of Structural Div, ASCE, Vol. 108, No. ST6, June, 1982.
8. Kyu Zong Cho, etc, "Fracture Process Zone of Concrete Cracks", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 110, No. 8, August, 1984.
9. ASTM E561-80, "Standard Recommended Practice for R-curve Determination", ASTM Annual Book of Standard, 1980.
10. C.G. Go and S.E. Swartz, "Validity of Compliance Calibration to Cracked Concrete Beams in Bending", Experimental Mechanics, pp. 129-134, June, 1984.
11. P.E. Petersson, "Crack Growth and Development of Fracture Zone in Plane Concrete and Similar Materials", TVBM-1006 Div, of Material Science, University of Lund, Sweden, 1981.
12. M. Wecharatana, "Fracture Resistance in Cementitious Composites", Ph.D. Dissertation, Department of Mterials Engineering, University of Illinois at Chioago Circle, March, 1982.
13. M. Wecharatana and S.P. Shah, "Nonlinear Fracture Mechanics Parameters", Fracture Mechanics of Concrete, Edited by F.H. Wittmann, 1983.
14. G. Sanz and B. Marandet, "Determination of Fracture Toughness under Plane Stress Conditions By the R-curve Method", Edited by L.H. Larsson, Applied Science Publishers, 1979.
15. D.E. Mc cabe and R.H. Heyer, "Crack Growth Resistance in Plane Stress Fracture Testing", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 4, pp. 393-412, 1972.
16. J.G. Song, "A Study on the Prediction of Fracture Process Zone of Conorete", Chonnam National University, 1988.

17. A. Carpinteri, "Static and Energetic Fracture Parameters for Rocks and Concretes".
18. 이준구, "비선형 파괴인자에 의한 콘크리트의 파

괴거동에 관한 연구", 전북대학교 대학원 석사학
위논문, 1991. 2.

(接受: 1991. 2. 4.)