

단면의 골재분포를 고려한 콘크리트의 휨균열 진전 거동해석기법

채영석 · 송관권* · 민인기**

우송대학교 건축공학과 · *東北大學資源与土木工程學院 · **우송정보대학 철도토목과
(2013. 7. 10. 접수 / 2013. 10. 15. 채택)

An analysis method Flexural Crack Propagation Behavior of Concrete with Aggregate Distribution of Section

Young-Suk Chae · Kwan-Kwon Song* · In-Ki Min**

Department of Architecture Engineering, Woosong University

*Department of Civil Engineering, North Eastern University

**Department of Railroad Civil Engineering, Woosong Collage

(Received July 10, 2013 / Accepted October 15, 2013)

Abstract : This paper discusses 2D models of beams for simulating the fracture of brittle materials. A simulation of an experiment on a concrete beam subjected to bending, in which two overlapping cracks occur, is used to study the effect of individual beam characteristics and different arrangements of the beams in the overall network mesh. It was found that any regular orientation of the beams influences the resulting crack patterns. Methods to implement a wide range of poisson's ratios are also developed, the use of the mesh to study arbitrary micro-structures is outlined. The crack pattern that are obtained with mesh are in good agreement with the experimental results. Also, numerical simulations of the tests were performed by means of a model, and non-integer dimensions were measured on the predicted mesh damage patterns.

Key Words : network model, simulation, overlapping cracks, crack pattern

1. 서론

콘크리트는 시멘트와 골재들로 이루어진 재료로 재료적인 원인과 구조적인 원인에 의해 균열이 발생하게 되며, 응력의 재분배로 인해 발생하는 국부적인 현상으로 설명할 수 있다. 이러한 균열발생이나 균열이 발생하여 진전하는 것을 해석하기란 쉽지 않기 때문에, 유한요소를 이용하거나, 수학적 모델을 이용하여 수치해석을 하는 방법들도 소개되고 있다.^{1,2)} 균열의 발생은 구조물의 성능에 영향을 미치며 결국 균열의 성장을 통하여 구조물의 붕괴에 까지 이르게 되기 때문에 이를 예측할 수 있는 방법은 중요하다³⁾. 현재 유한요소에 의한 방법은 반복적인 계산을 이용하는 것으로 연속체 역학에 기초를 두고 콘크리트의 파괴과정을 예측하는데 많이 사용되는데 이는 거시단계에서의 모델방법이라 할 수 있다.⁴⁾

또한, 재료적인 모델이라 할 수 있는 미소모델은 콘크리트와 같은 복합재료들의 해석에 많이 사용되는데, 골재, 시멘트 매트릭스, 그리고 이들 사이의 계면으로 나누어서 해석 시 고려될 수 있는데 이산모델로도 설명된다.⁵⁾

본 연구에서 제안된 모델은 이산모델에 기초를 두고 있으며, 체눈구성 시 보의 연결로 구성되고, 균열 발생 시

보의 연결이 제거되는 방법으로 구성된다. 이러한 보와의 네트워크 연결에 의한 해석방법은 물리학에서 처음 소개되었으며, 점차적으로 전기적인 전도체와 삼투압과 같은 시뮬레이션 문제에 적용되어 왔다. 콘크리트의 파괴에 적용된 것은 삼각형 형태의 망으로 연결되는 형태인 격자구조를 이용한 것으로 격자 구조 내에 골재, 시멘트와의 매트릭스, 그리고 부착영역으로 나누어져서 일정한 영역이 망과의 결합효과에 의해 구현하였다.^{6,7)}

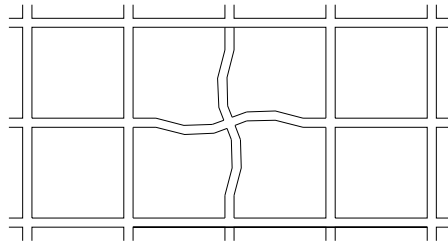
본 연구에서는 이러한 격자망에 의한 콘크리트의 균열 진전을 묘사하기 위하여 노치를 가지는 3점 휨실험을 실시하였으며, 이를 해석적으로 비교하여 균열진전거동을 묘사하고자 하였다.

2. 격자 모델의 구성

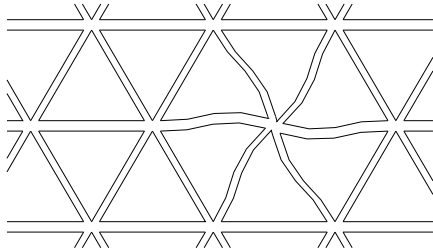
제안된 요소모델은 보요소의 유기적인 결합으로 3개의 자유도를 가지고 선형 탄성구성 방정식으로 휨모멘트와 축력의 조합으로 응력 값이 계산되며, 보요소의 강도를 초과할 때 파괴가 일어나게 된다. 이러한 과정을 반복하여 균열이 발생하게 되면 보요소가 해석과정에서 요소망의 제거로 균열진전과정이 묘사하게 된다. 또한, 해석결과

*Corresponding Author: In ki Min, Tel : +82-42-629-6379, E-mail : ikmin@wsi.ac.kr
Department of Rail Construction, Woosong Informaion University, 171, Dongdeajeon-ro, Dong-gu, Deajeon 300-715, Korea

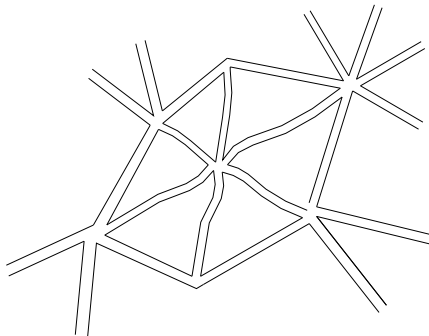
의 계산을 줄이기 위하여 예상되는 균열발생 부분의 면적만 격자망 요소로 모델링하고 나머지 영역은 연속체 모델로 구성할 수 있다.⁸⁾ 본 연구에서 제안된 모델에 대해 후처리 과정을 높이고자 유한요소 해석 전용 프로그램인 DIANA의 부프로그램(sub-routine)으로 연동시켜 결과 값을 산출하였다. 격자망에 의한 모델 구성의 종류는 다음 Fig. 1과 같이 3가지로 나타낼 수 있다. 정방형 모델과 삼각형 모델 그리고 무작위로 구성되는 모델로 나타낼 수 있는데 본 연구에서는 정방형 모델을 2차원으로 구성하고자 하였다. Fig. 2는 콘크리트 내 잔골재, 굵은 골재와 시멘트와의 부착에 대한 부분을 모델에서 구성되는 원리를 보여주고 있다. 콘크리트 내부를 투영하여 겹쳐지는 부분의 영역을 골재와 시멘트와의 분포비를 조절하여 구성되며, 탄성계수(Young's Modulus)와 보요소의 강도를 입력변수로 하여 격자망의 강성이 유지된다. 제안된 시뮬레이션 기법에 콘크리트를 적용함에 있어 일정한 영역으로 골재(A), 매트릭스(M), 골재와 매트릭스 사이의 중간영역(B)로 나누어 나타내었다.



(a) regular square mesh

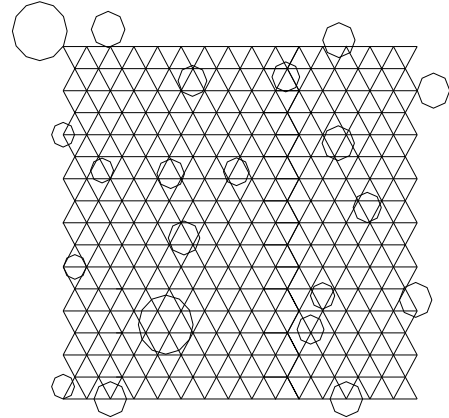


(b) regular triangular mesh

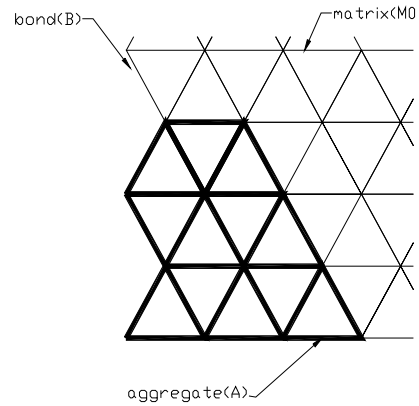


(c) random mesh

Fig.1. Network elements type.



(a) aggregate structure projected on top of a net



(b) assigning properties to the beam in the three phases of the material

Fig.2. A constitution principle of proposed model.

3. 시뮬레이션 모델 파라미터 결정

본 연구에서 제안된 모델은 요소망의 탄성거동과 관련된 변수들과 파괴문제와 관련된 변수로 나누어진다. 이에 변수들에 대한 입력과 특징을 나타내면 다음과 같다.

3.1 탄성거동과 관련된 매개변수

모델에서 탄성거동과 관련된 부분은 재료의 탄성계수와 포아송 비(ν), 그리고 기하학적 특성인 보요소의 높이(h)와 두께(t)와 탄성계수(E_{beam})의 변화에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서 사용된 체논의 형태는 정방형의 형태로서 다음 식 (1)과 같은 관계식을 이용하였다.

$$\nu = \frac{1 - \frac{12l}{Al^2}}{3 + \frac{12l}{Al^2}} = \frac{1 - \left(\frac{h}{l}\right)^2}{3 + \left(\frac{h}{l}\right)^2} \quad (1)$$

여기서, ν 는 포아송비, l 은 보의 길이, $l = 1/12 \cdot t \cdot h^3$,

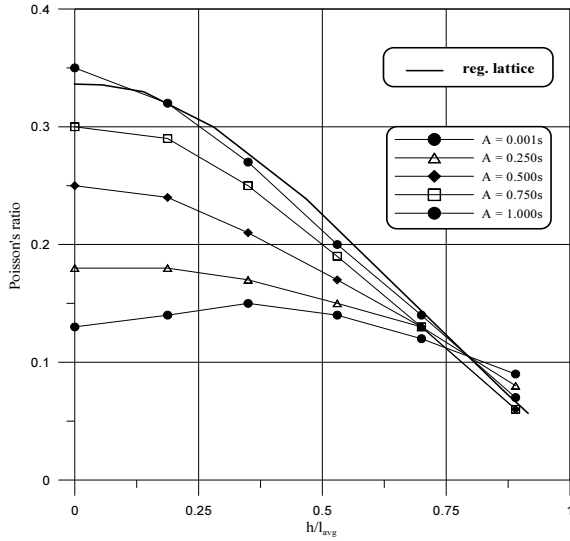


Fig.3. Relation between ν and h/l_{avg} for a regular triangular lattice.

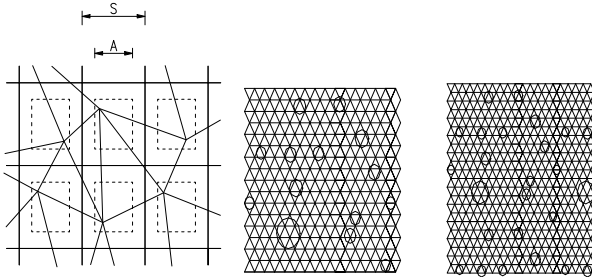


Fig.4. Generation of a lattice and randomness of $A=0.2s$, $A=0.5s$.

A는 횡단면적($h \cdot t$)이다.

위 식(1)은 다음 Fig.3에 나타난 결과 값에 근거를 하며, 콘크리트의 체적과 골재 체적에 대한 비(P_k)에 따라 변화한다. 또한, Fig.3의 결과는 절점 50×50 의 2차원 단면을 대상으로 모델링하여 보요소의 길이변화(h/l)에 따른 포아송 비의 변화를 나타내고 있다. 여기서 A와 s는 Fig.4와 같이 모델의 보요소 구성이 콘크리트 단면 내 골재분포에 중첩될 때 간격비에 대한 변수이며, 이 값이 증가함에 따라 h/l_{avg} 의 값은 0.75값을 기준으로 수렴하는 것으로 나타났다.

3.2 파괴거동과 관련된 매개변수

파괴거동의 경우, 하중이 증가하는 각 단계에서 체논으로부터 보요소가 제거되는 것으로 균열발생이 묘사된다. 이것은 재료의 탄성 거동과 관련된 것으로 식(2)와 같은 파괴법칙에 근거하여 유효응력을 계산할 수 있다.

$$f_{eff} = \beta \cdot \left(\frac{F}{A} + \alpha \frac{|M_i, M_j|_{max}}{W} \right) < f_t \quad (2)$$

여기서 f_{eff} 는 유효응력으로 균열발생 시 발생하는 응

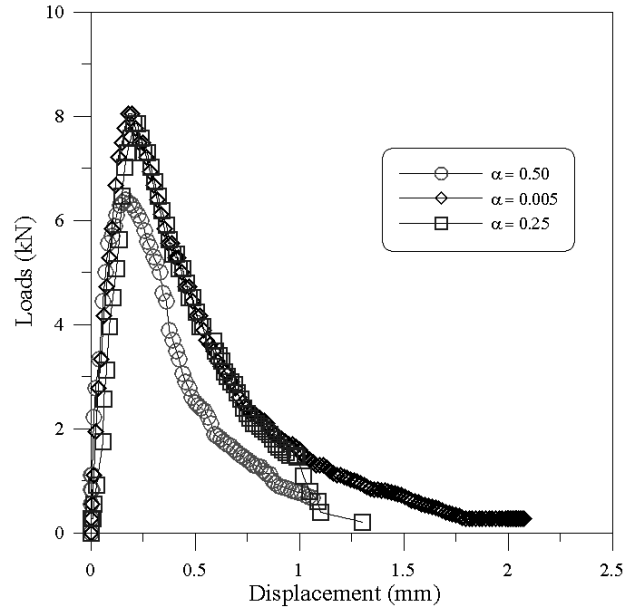
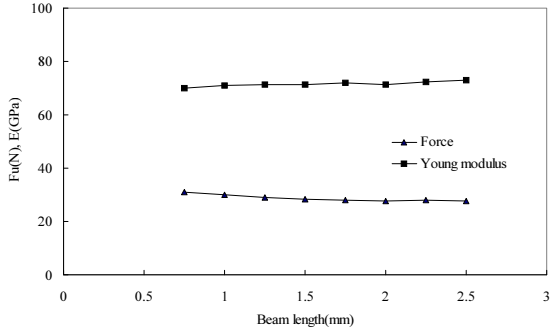


Fig.5. Load deformation curves for three simulations with different values for α .

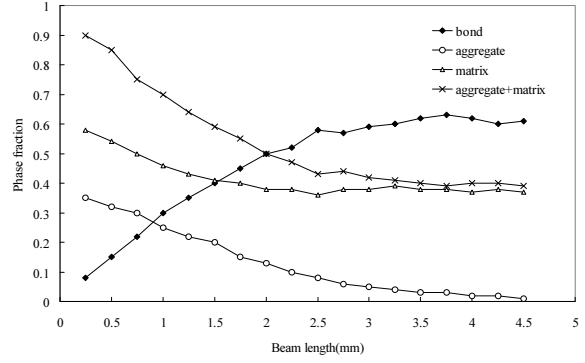
력값이고, α 는 파괴거동과 관련된 계수로 파괴 시 곡선의 피크형태를 결정하는데 영향을 미치고, β 는 인장연화거동과 연관된 것으로 인장강도 실험에서 얻은 최대응력값에 따라 결정되는 인자이다. 또한, F는 체논 보 요소에 대한 축력, A는 단면적, M_i, M_j 는 보 요소에 대한 양단 모멘트, W는 보의 단면2차모멘트, f_t 는 콘크리트의 인장강도이다. 계산된 유효응력 값이 콘크리트의 인장강도를 초과할 때 취성파괴가 격자 망 내의 보요소가 제거되는 것으로 균열발생을 묘사하게 되는데, 이것은 $U_e = f_t^2 / 2E$ 인 저장에너지가 격자 망의 연결이 해방되는 것을 의미한다. 콘크리트는 골재, 매트릭스, 부착으로 나눌 수 있고, 균열발생은 이들의 인장강도와 연관이 있으므로 이에 대한 상호관계가 중요하다. 즉, 골재의 강도가 시멘트 매트릭스의 강도보다 높기 때문에 해석 시 이에 대한 상호관계의 관계 비를 고려하였다. 또한, α 는 파괴모드를 결정할 수 있는 계수로서 값이 변화함에 따라 하중 변위 곡선의 모양에 영향을 미치게 된다. Fig.5에 값의 변화에 따른 하중변위 곡선을 나타내었다. 그 결과, α 값이 커짐에 따라 변위 값이 줄어드는 것으로 나타났으며, 변위 값이 급격히 줄어드는 변형연화 현상을 나타내지 못하는 것을 알 수 있다.

3.3 골재 분포 및 특성

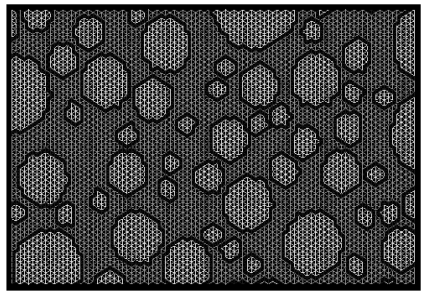
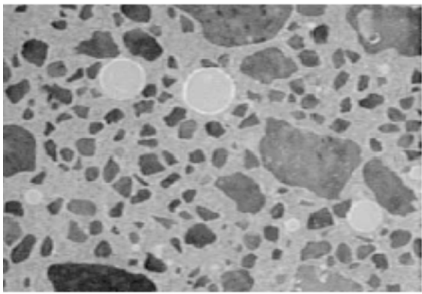
본 연구에서 제안된 격자 망 요소는 기존의 균열모델과 달리 콘크리트 단면 내의 골재, 시멘트, 부착의 영향을 실질적으로 고려하기 위해 단면 내의 골재 분포를 묘사할 수 있도록 하였으며, 이에 대한 매개변수를 도입하였다. Fig.6은 격자망 내의 보요소의 길이변화에 따른 탄성계수(E), 축력변화(F_u)를 나타내는 것으로 보 요소의 길이가



(a) calculated ultimate strength and global Young's modulus for $2 \leq d \leq 8\text{mm}$, $P_k = 0.75$



(a) Phase fractions of bond, matrix and aggregate beams as a function of beam length



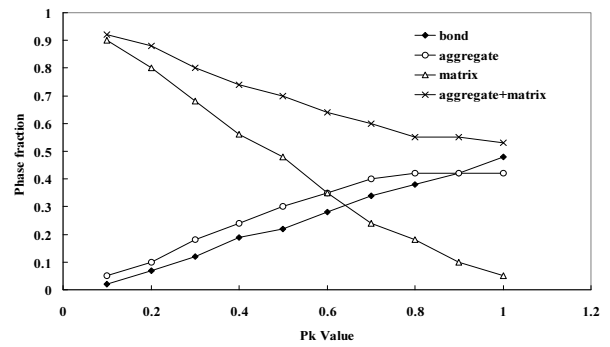
(b) a compared mortar particle and modelling of $P_k = 0.75$ value

Fig.6. Aggregate distribution properties.

변화함에 따라 결과 값의 변화는 일정한 것으로 나타나보 요소의 길이변화에 따른 영향은 미비한 것을 알 수 있다. 또한, 골재 체적관련 계수(P_k)로 임의 값 0.75에 대한 요소 모델링을 나타낸 것이다. Fig.7은 콘크리트 단면 내에 매트릭스, 부착, 골재의 영역에 따른 보요소의 길이변화와 P_k 값 변화에 따른 영역 요소의 변화를 나타낸 것으로 두 그래프의 값이 증가함에 따라 요소 내 영역의 값이 일정하게 되는 접근성을 보이고 있다.

3.4 보 요소의 강성

골재와 매트릭스 사이의 부착영역 강성은 골재와 매트릭스의 강성보다는 작은 값을 나타낸다. 따라서, 매트릭스와 골재의 강성에 따라 부착영역의 강성은 변화하게 된다. 본 연구에서는 Fig.8에 부착강도 값의 변화에 따라 하중-변위 관계를 나타내었다. 0.25 ~ 2.0 까지 0.5씩 증가함에 따라 최대하중은 일정한 부착강도에 도달하면 최대하



(b) Fraction of bond, matrix and aggregate phases with varying P_k

Fig.7. Effect of analysis variables in concrete section.

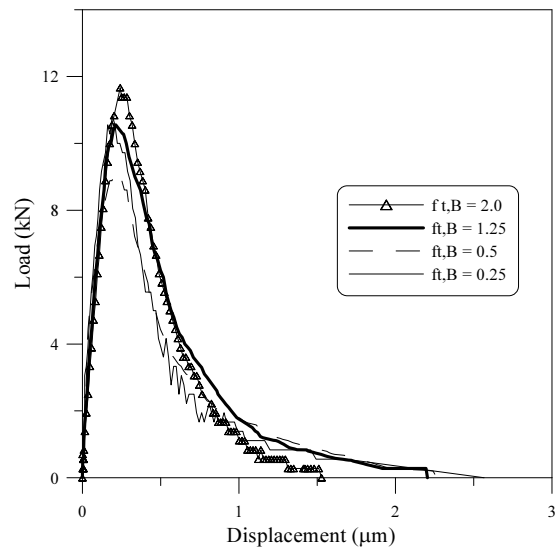
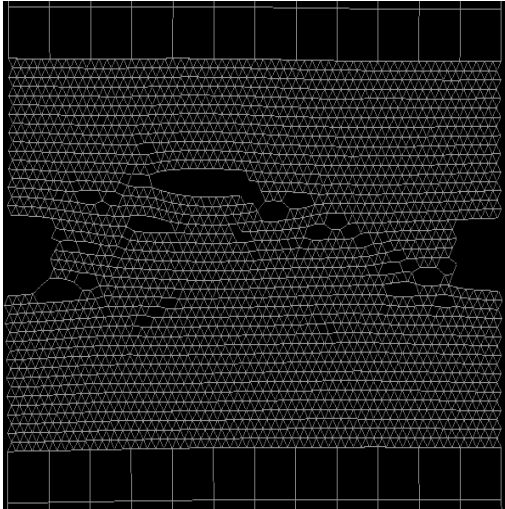
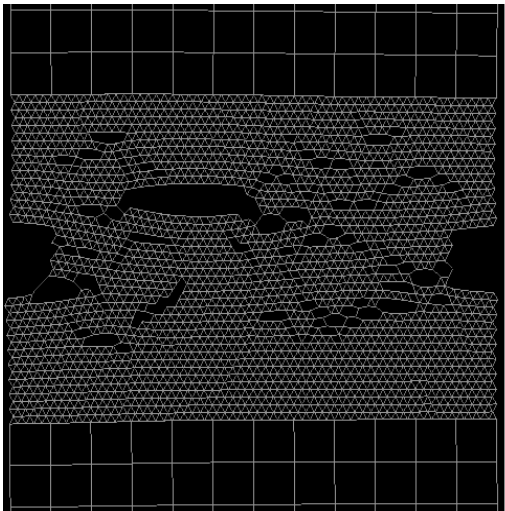


Fig.8. Stress–deformation curves for four simulations with different bond strengths.

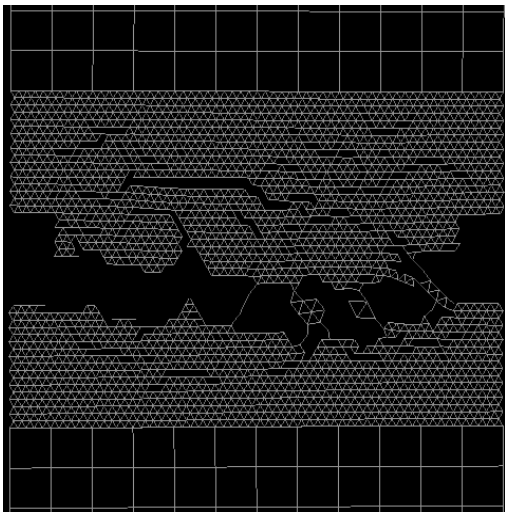
중은 비슷한 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 해석결과 최종 파괴양상을 Fig.9에 나타내었는데, 강도 값이 증가함에 따라 파괴양상은 취성으로 골재의 영향이 고려된 직선균열로 나타났다. 또한, 부착강도가 0.25인 경우, 골재 분포영향을 고려하지 못하는 것을 알 수 있다.



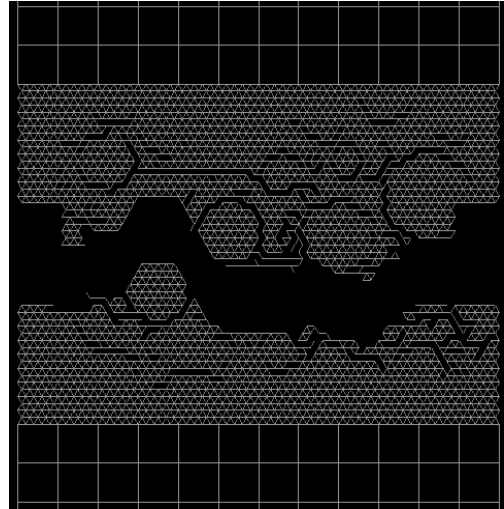
(a) deformed mesh for $f_{t,B} = 0.25\text{MPa}$



(b) deformed mesh for $f_{t,B} = 0.5\text{MPa}$



(c) deformed mesh for $f_{t,B} = 1.25\text{MPa}$



(d) deformed mesh for $f_{t,B} = 2.0\text{MPa}$

Fig.9. Cracked and deformed meshes for four simulations with different bond strength.

4. 격자 망 요소에 대한 적용

제안된 모델을 적용하기 위하여 무근 콘크리트 보를 제작하였으며, 노치(notch)를 형성시켜 파괴실험을 실시하였고, 하중-변위 관계를 해석결과와 비교하였다. 해석에 사용된 입력변수는 3장에서 살펴본 결과를 중심으로 반복 계산을 하였으며, Table 1에 입력변수를 종합하여 나타내었다. 여기서, b 는 해석대상 시험체의 두께, f_{tA} , f_{tM} , f_{tB} 는 각각 해석모델링 시 골재영역, 시멘트영역, 부착영역에서의 강도를 의미하며, E_A , E_M , E_B 도 각 영역에서의 탄성계수를 의미한다. 또한, Fig. 10은 3점 휨 실험한 방법을 나타내었으며, Fig.11은 최대 모멘트 구간에서 균열발생을 예상함에 따라 해석시간(run-time)을 줄이기 위하여 격자망을 최대 모멘트 구간에만 적용하여 해석을 실시한 모델링을 나타내었다.

Table 1. Input parameters for simulations

Beam elements	$l = 5/3 \text{ mm}$	$h = 0.68 \text{ } l$	$b = \text{specimen thickness}$
strengths	$f_{tA} = 10\text{MPa}$	$f_{tM} = 10\text{MPa}$	$f_{tB} = 10\text{MPa}$
stiffness	$E_A = 70\text{GPa}$	$E_M = 25\text{GPa}$	$E_B = 25\text{GPa}$
$\alpha = 0.005$	$\beta = 2.0$		

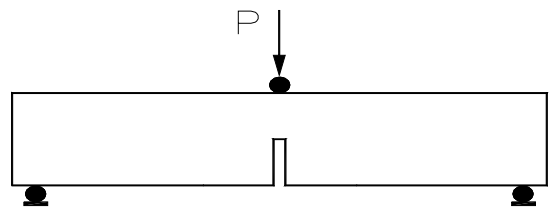


Fig.9. Three-point bending test specimen.

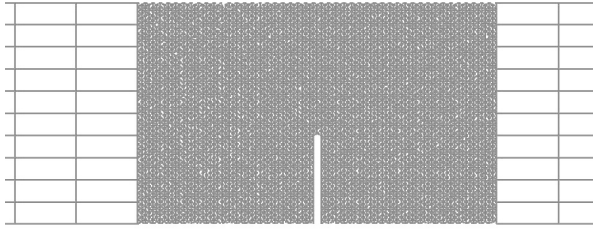


Fig.10. Three-point bending specimen and grid analysis modelling.

Table 2. Overview of types compared in a bending test

Mesh type	Abbreviation
Triangular mesh with particle structure (Number of node and element 672, 1283)	TYPE A
Triangular mesh with particle structure (Number of node and element 2542, 4966)	TYPE B
Triangular mesh with particle structure (Number of node and element 10004, 19772)	TYPE C

또한, 해석의 신뢰도를 높이기 위하여 격자 망 내의 보 요소의 체눈간격을 A-C로 3가지로 나누어 실험결과와 비교하였으며, Table 2에 요소에 대한 내용을 정리하여 나타내었다.

해석결과, Fig.11(a) ~ (c)에 나타냈듯이, 노치(notch) 선단부분에 균열이 발생하는 것을 확인하였으며, Type 별로 균열이 골재의 영향을 받아 발생하는 것을 알 수 있었다. 본 해석은 입력된 매개변수 값으로 형성된 격자 망이 콘크리트 부재의 단면에 중첩되어 일정한 영역을 골재와 부착, 매트릭스의 형태로 구성되는 해석방법으로 균열발생이 굵은 골재가 아닌 부착과 매트릭스 영역에 존재하는 것으로 생각된다. 그리고, Fig.12(a) ~ (b)에는 실험결과 값과 해석결과를 비교하였는데, 해석에서는 골재 체적비인 (P_k) 값을 변수로, 체눈 type를 변수로 나타난 결과이다. 그 결과, 골재 체적비 0.75~0.8의 범위가 실험결과와 비슷한 거동을 하는 것을 알 수 있었으며, Type의 경우, B의 경우가 비교적 정확한 거동을 하는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 체눈의 간격을 조밀하게 할 경우, 높은 결과가 나타나는 것은 일반적인 사항이지만, 본 해석의 경우, 2시간 이상의 해석 시간이 소요되어 단점으로 지적될 수 있기에 체눈의 간격은 $l : h = 1 : 1.5$ 의 비율이 적당하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 2차원 격자 망에 의한 보요소를 콘크리트 단면에 중첩효과를 유도, 콘크리트 단면 내 발생하는 균열

발생을 골재 체적비를 고려하여 묘사하였다. 이에 대한 결과를 실험과 비교하여 정리하면 다음과 같다.

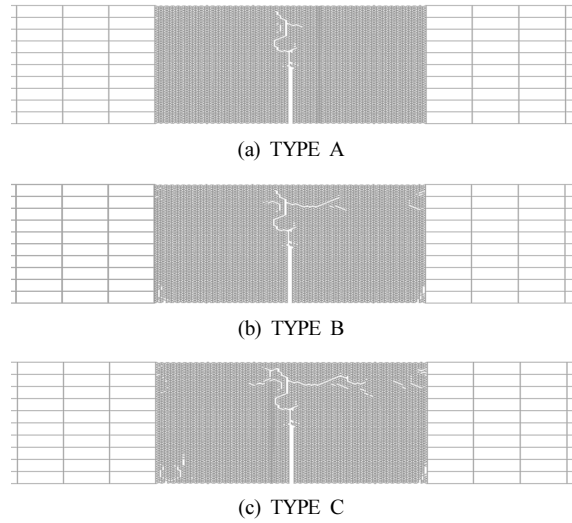
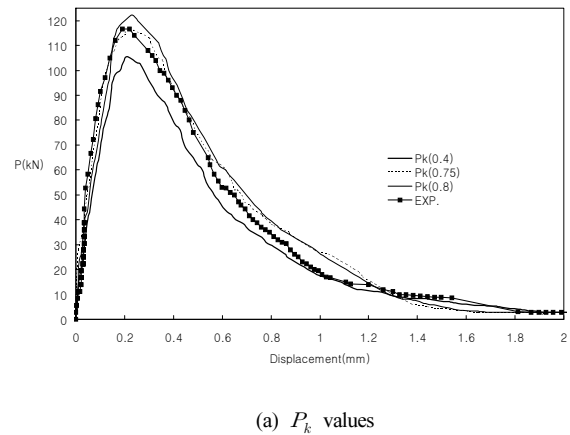
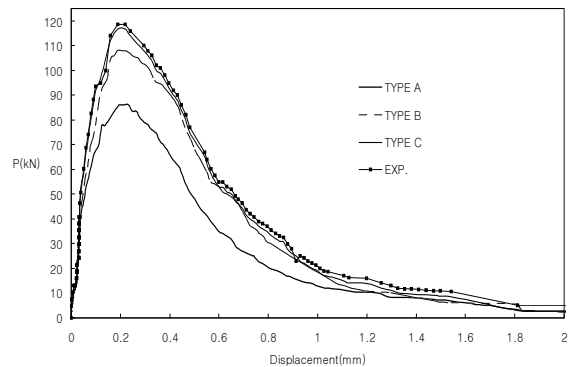


Fig.11. Simulation of a bending test on a specimen using different element number.



(a) P_k values



(b) Elements types

Fig.12. Compare P- δ of analyzed mesh types and Pk values to experiment specimen.

1) 균열의 발생을 묘사하는데 필요한 골재 체적비(P_k)는 실질적으로 0.75~0.8 사이로 나타났으며, 실험결과와도 비교적 정확한 값을 갖는 것으로 나타났다.

2) 망 내 보요소의 체눈 간격비는 $l:h = 1:1.5$ 의 비율이 해석시간과 균열발생 묘사에 적당할 것으로 판단되며, 체눈의 간격은 절점과 요소의 비가 1:1.9(Type B)의 경우가 높게 나타났으나 이는 해석자의 판단에 따라 달라질 수 있는 기준이므로 해석시간을 고려하여 판단하여야 할 것으로 생각된다.

3) 부재의 파괴 모드와 관련된 계수인 $\alpha=0.005$ 로 나타났으며, 이는 휨 파괴에 지배적인 값으로 사용되어도 무방하리라 생각된다.

4) 제안된 모델은 격자 모델로써 콘크리트 균열 발생 및 진전거동 예측에 적용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 3차원으로 확장시켜 균열의 발달을 실질적으로 검토할 수 있는 방법이 필요할 것으로 생각된다.

References

- 1) ZP. Bazant, "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal", ASCE Journal of Engineeringg. Mechanics, Vol. 110, pp.518~535, 1984.
- 2) ZP. Bazant and PA. Pfriffer, "Determination of Fracture Energy Properties form Size Effect and Brittleness Number", ACI Material Journal, Vol. 111, pp. 463~480, 1985.
- 3) H. J. Herrmann, "Patterns and Scaling in Fracture, in Fracture Processes in Concrete", Rock and Ceramics, Chapman & Hall/E & FN Spon, London, pp. 195~211, 1991.
- 4) A. Carpinteri, "Fractal Nature of Material Microstructure and Size Effects on Apparent Mechanical Properties", Journal of Mechanical Material, Vol. 18, pp. 89~101, 2004.
- 5) J. C. Walraven, "Aggregate Interlock: A Theoretical and Experimental Analysis", Ph.D Thesis, Delft University of Technology, pp. 30~35, 1980.
- 6) BL. Karihaloo, "Fracture Mechanics and Structural Concrete", UK: Addison Wesley Longman, pp. 151~165, 1985.
- 7) E. Schlangen, "Experimental and Numerical Analysis of Fracture Processes in Concrete", Ph.D Thesis, Delft University of Technology, pp. 40~43, 2001.
- 8) A.H.J.M. Vervuurt, "Interface Fracture in Concrete". Ph.D Thesis, Delft University of Technology, pp. 20~23, 2002.