Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 22, No. 1, pp. 69~76, February, 2010
DOI 10.4334/JKCI.2010.22.1.069

콘크리트의 수축으로 인한 미세균열 발생 평가를 위한 해석적 기법

송영철[1)] · 김도겸[2)] · 문재흠[3)*]

[1)]한국전력공사 전력연구원 녹색성장 연구소 [2)]한국건설기술연구원 구조교량연구실 [3)]한국건자재시험연구원 건설기반기술센터

An Analytical Method for the Evaluation of Micro-cracking in Concrete Shrinkage Induced

Young-Chul Song,[1)] Do-Gyeum Kim,[2)] and Jae-Heum Moon[3)*]

[1)]Korea Electric Power Research Institute, Green Growth Laboratory, Daejeon 305-760, Korea
[2)]Korea Institute of Construction Technology, Structural Engineering and Bridges Research Division, Goyang 411-712, Korea
[3)]Korea Institute of Construction Materials, Construction Material Research Center, Seoul 137-707, Korea

ABSTRACT The majority of research that has been performed on cracking potential of concrete by shrinkage has assumed that concrete acts as a homogeneous material. However, with this approach, it is not able to evaluate the micro-cracking behavior in concrete due to autogenous shrinkage under unrestrained boundary condition (free boundary condition) nor to understand the cracking behavior properly because of the heterogeneous nature of concrete. To better understand the micro-cracking behavior of concrete induced by autogenous shrinkage, series of experiments were performed measuring the length change and acoustic emission energy. As an analytical approach, this research uses an object oriented finite element analysis code (OOF code) to simulate the behavior of the concrete on a meso-scale. The concrete images used in the simulations were directly obtained from mortar samples. From the experiments and simulation results, it was able to better understand the micro-cracking behaviour of concrete due to shrinking of paste phase and internal restraint by aggregates.

Keywords : unrestrained condition, micro-cracking, acoustic emission, finite element analysis, internal restraint

1. 서 론

경화된 콘크리트의 체적은 수화반응, 수분이동 및 온도변화 등에 따라 변화하게 되며 이러한 체적변화는 콘크리트의 균열거동에도 크게 관여하고 있다.[1-2)] 일반적으로 콘크리트의 체적변화 현상은 콘크리트 구성체 중의 하나인 시멘트 페이스트의 화학 및 물리적 변화에 따른 수축 및 팽창에 의하여 발생한다. 이러한 시멘트 페이스트의 체적변화는 콘크리트의 외부 구속조건 또는 콘크리트 내부에 존재하는 골재에 의한 내부구속에 의해 구속응력을 발생하게 하며, 이렇게 발생된 구속응력이 한계값을 넘을 경우 균열이 발생하게 된다.[3-6)] 그러나 이러한 콘크리트의 체적변화에 따른 균열발생 거동과 관련하여 대부분의 연구 및 시뮬레이션 모델들은[7-9)] 콘크리트를 균질한 물질로 가정하여 콘크리트의 겉보기 수축량만을 고려대상으로 하고 있으며, 균열예측 및 평가에 있어서도 육안으로 확인이 가능한 균열에 대하여서만 주로 검토되어지고 있다. 이렇듯 콘크리트를 시멘트 페이스트와 골재 등으로 이루어진 복합체가 아닌 균질물질로 볼 경우에 있어서는 골재에 의한 내부구속 및 내부균열에 대한 평가예측이 어려우며, 특히 콘크리트 내부에서 발생하는 미세균열 발생현상에 대한 예측은 불가능하다는 문제점이 있다. 즉, 콘크리트의 균열거동을 보다 정확히 이해하기 위해서는 콘크리트 구성요소인 시멘트 페이스트, 골재, 연행공기 및 골재와 시멘트 페이스트의 계면부(interfacial transition zone, 이하 ITZ)와 같은 각 구성요소의 영향을 이해할 필요가 있다. 이러한 문제점을 극복하고자 최근 들어 일부 연구자들에 의하여 콘크리트를 골재 및 시멘트 페이스트로 구성된 복합체로 가정하고 이러한 복합체의 균열거동에 대한 연구가 수행되어지고 있다.[3,4,6)] 이에 이 연구에서는 콘크리트의 수축으로 인한 미세균열 발생 현상을 이해하기 위한 기초적인 연구의 일환으로 콘크리트를 시멘트 페이스트와 골재 두 가지 구성요소로만 이루어진 단순화된 복합재료로 가정하였으며, 시멘트 페이스트 수축시 콘크리트 내부 골재의 구속에 의한 미세균열 발생량을 평가하기 위하여 음향방출기법(acoustic emission, 이하 AE)을 사용한 수축실험과 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서

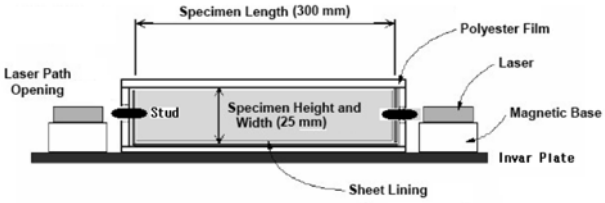
*Corresponding author E-mail : mjh4190@kicm.re.kr
Received July 23, 2009, Revised October 7, 2009,
Accepted October 21, 2009
ⓒ2010 by Korea Concrete Institute

개발한 OOF 유한요소해석 프로그램을 적용한 콘크리트의 중간규모(meso-scale)상의 수축균열 유한요소해석을 수행하였으며 각각의 실험 결과와 해석 결과를 비교검토하였다.

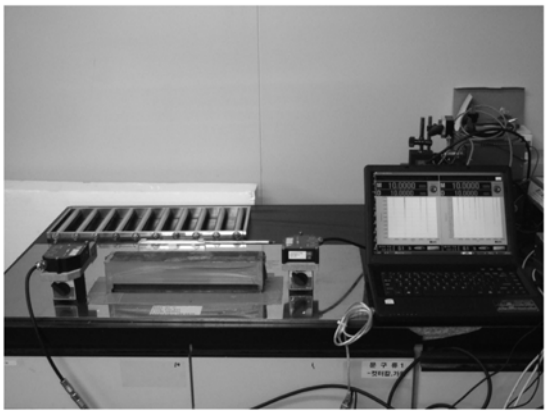
2. 연구 개요

2.1 실험 개요

이 연구에서는 콘크리트의 초기재령에서 자기수축으로 인한 미세균열 발생에 골재가 미치는 영향을 고려하기 위하여 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 시멘트 페이스트 및 모르타르 시험체를 제작하였으며 시멘트 페이스트의 물성변화에 따른 영향 또한 검토하기 위하여 3가지 물/시멘트비(0.3, 0.35, 0.4)를 적용하였다. 이때 모르타르 시험체는 일반 강모래를 사용, 골재부피비 55%를 적용하였다. 모르타르의 초기 자기수축량 측정을 위하여서는 KS F 2588에 제시되어있는 다이얼게이지법 대신 Fig. 1과 같이 비접촉식 레이저 길이 측정 장비를 이용하였으며, 길이변화 측정용 레이저는 M사의 분해능 1 μm인 optoNCDT1700-10을 사용하였다. 시험체는 25×25×300 mm의 각주형으로 Fig. 1(a)와 같이 공시체 몰드 내부의 하단 및 측면부에 두께 0.1 mm의 테프론시트를 배치시켜 시험체가 몰드 내부에서 자유로이 거동할 수 있도록 하였으며 양단부에는 스터드를 설치하여 레이저 측정시 표점으로 사용할 수 있도록 하였다. 또한 각 시험체의 표면부는 제작 직후 수분의 손실이 없도록 랩으로 실링처리를 하였으며, 측정된 결과값은 KS L 2436에 의거하여 구한 초결시간 이후부터 24시간까지의 데이터를 가지고 분석을 수행하였다.



(a) Non-contact laser specimen geometry



(b) Non-contact laser equipment

Fig. 1 Non-contact laser equipment for the measurement of specimen length change

모르타르 시험체의 자기수축 및 골재의 존재로 인한 미세균열 발생을 실험적으로 평가하기 위하여서는 V사의 AMSY4 시스템을 사용하였으며(Fig. 2), AE센서는 압전방식의 광대역형센서를 사용하였다. 이 연구에서는 시험체의 크기가 작은 관계로 각 시험체당 AE센서 한 개를 모르타르 시험체 표면에 초결 이후(w/c = 0.3 : 3시간, w/c = 0.35 : 4시간, w/c = 0.4 : 5시간) 부착하여 미세균열 생성 시 발생하는 소음을 측정하였으며, 측정 시 적용한 하한치(threshold) 값은 잡음 및 수화반응에 의한 공극구조발현에 따른 음향방출값을 제외하기 위하여 Rao 등[10]이 제시한 미세균열 발생 시의 음향방출값인 44 dB을 적용하여 그 이하값은 측정 결과에서 제외하였다. 비접촉식 길이변화 측정 및 미세균열 발생에 대한 AE 측정기법에 대한 보다 상세한 내용은 참고문헌 등에서 확인할 수 있다.[11,12]

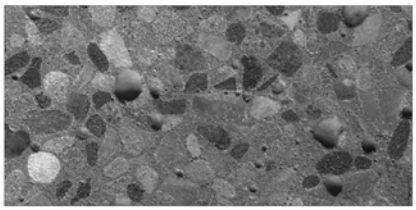
2.2 컴퓨터 시뮬레이션 개요

2.2.1 전처리(pre-processing)

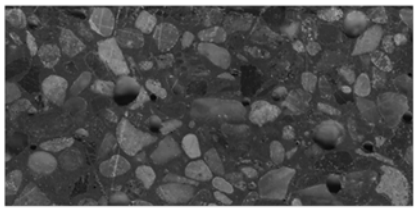
유한요소해석을 수행함에 있어서 이 연구에서는 시멘트 페이스트 상의 자기수축으로 인한 미세균열 발생현상을 시뮬레이션하기 위한 기초적인 단계로 콘크리트를 골재와 시멘트 페이스트로 이루어진 복합체로 단순화하였다. 또한 실제 실험 결과와 유사한 조건을 주기 위하여 실제 시멘트 모르타르 시험체로부터 2차원적 이미지를 취득, 유한요소해석에 적용하는 방식을 취하였으며 그 처리과정은 다음과 같다.

실제 모르타르의 단면 이미지를 얻기 위하여 시험체를 절단한 후 표면부에 대하여 연마처리를 하였다. (Fig. 3(a)) 이렇게 표면연마된 시험체에 페놀프탈레인 지시약을 분무, 중성부위인 골재와 알칼리성인 시멘트 페이스트 부위를 보다 명확히 구분한 후(Fig. 3(b)) 스캐너를 이용하여 컴퓨터 이미지파일을 생성하였다. 이때 이 연구에서 사용한 이미지파일 포맷은 TIFF 형식으로서 각 이미지

Fig. 2 Acoustic emission equipment for the measurement of acoustic events by micro-cracking

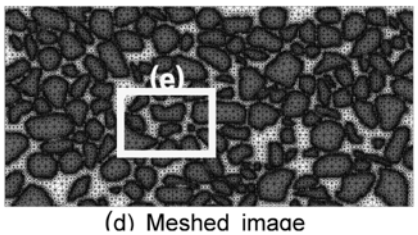


(a) Saw-cut surface

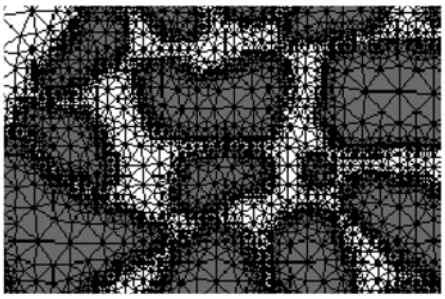


(b) Polished surface treated with phenolphthalein

(c) Re-colored surface after using a histogram to convert it to a two phase image



(d) Meshed image



(e) Zoomed image

Fig. 3 Pre-processing procedures (size of original image: 25.4 × 2.7 mm)

픽셀이 초기의 색 정보를 저장하도록 하였으며, 적용된 스캐너 해상도는 600 dpi이었다. 이렇게 생성된 이미지파일은 이미지처리 소프트웨어를 사용, 색상도를 고려하여 골재부위 및 시멘트 페이스트 부위의 색상을 단일화시킨 이미지로 변환시켰다(Fig. 3(c)). 즉 Fig. 3(c)에서 회색 영역은 골재 부위를, 흰색 영역은 시멘트 페이스트 부위를 나타내는 방식을 취하였으며, 각각의 동일한 색을 가지는 영역은 동일한 물성을 가진다고 가정하였다. 이렇게 생성된 이미지는 PPM(portable pixmap image file format) 파일형식으로 저장되었으며, 유한요소해석을 위한 유한요소 망 작업은 미국 NIST에서 개발한 PPM2OOF 프로그램[13]으로 수행하였다(Fig. 3(d)). 이때 골재와 시멘트 페이스트 계면부 유한요소 망의 세분화 작업은 원래의 골재형상을 충분히 반영할 수 있을 때까지 반복수행 하였으며, 사전연구 검토 결과로부터 1.5 Gb 메모리용량의 컴퓨터로 유한요소해석을 수행할 시 총 요소의 수가 200,000개 이하가 되도록 고려하면서 수행하였다.

이 유한요소해석에 적용된 요소타입은 3점 삼각형요소이며, 골재 요소와 시멘트 페이스트 요소간의 관계는 완전부착조건을 적용하였다.

2.2.2 유한요소해석(finite element analysis)

2.2.1에서 구하여진 유한요소 망을 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 두 가지 경계조건을 적용하여 수행하였다. 즉 동일한 망에 대하여 좌우 양단 구속조건 및 불구속조건을 부여하였으며 이때 양단 구속조건은 일반적으로 교량상판이나 포장의 조건하에서 발생하는 균열 양상을, 불구속조건은 완전불구속 상태하의 콘크리트 내부에서 자기수축으로 인한 균열 발생 현상을 이해하기 위하여 수행하였다.

유한요소해석은 물질의 온도변화에 따른 온도응력해석 방식을 이용, 시멘트 페이스트 부위에 부피 감소 효과를 주는 방식으로 수행하였으며[6] 이때 골재 부위는 자체적인 부피변화가 발생하지 않는 재료로 설정하였다.

콘크리트의 각 구성요소(시멘트 페이스트 및 골재)는 취성재료이나 콘크리트는 의사취성(quasi-brittle) 거동을 보이며, 이는 콘크리트가 균열거동시 복합체로서의 미세균열 발생 및 여러 가지 인자로 기인한 것이다. 이 연구에서는 내부균열 발생 및 내부응력 거동을 모사하기 위하여 NIST에서 개발한 비상업용 무료 유한요소해석 프로그램인 OOF code[13]를 사용하였으며, 이때 적용한 요소는 OOF 프로그램에서 제공하는 'Damisotropic' 함수가 반영된 것으로서 각 요소가 최대응력치(인장강도)에 도달했을 때 해당 요소의 탄성계수치가 선형적으로 0의 값에 도달하는 방식을 적용하였다. 시뮬레이션은 시멘트 페이스트 부위의 수축량을 순차적으로 증가시키면서 적합방정식 및 평형방정식이 만족할 경우 다음 단계로 넘어가는 방식을 취하였다.

시뮬레이션에 적용된 각 구성요소의 기본물성은 Table 1과 같이 세 가지 종류의 시멘트 페이스트 물성치와 한 가지 종류의 골재 물성치를 적용하였으며, 이 연구에서는 시멘트 페이스트의 시간에 따른 물성변화는 고려하지 않았다.

한편 이 유한요소해석에 사용된 이미지는 #16~#8 체 구간에 존재하는 골재(1.19~2.36 mm)를 사용하여 제작된 모르타르 시험체로부터 얻어진 것이며, 골재부피비는 55%였다.

2.2.3 후처리(post-processing)

유한요소해석 결과의 분석은 해석 결과 데이터로부터 응력분포, 변형률 분포 및 에너지밀도 분포 등을 구하여

Table 1 Material properties of paste and aggregates

	P-1	P-2	P-3	Agg.
Elastic modulus (GPa)	20	10	5	50
Poisson's ratio	0.18	0.18	0.18	0.20
Tensile strength (MPa)	5	2.5	1.25	20
Compressive strength (MPa)	20	10	5	200

해석을 수행하는 방식으로 진행하였으며, 시뮬레이션 수행시 균열이 발생된 부위에 대한 검토도 병행하였다. 시뮬레이션 결과에 대한 예를 Fig. 4에 나타내었다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 실험 결과 분석

Fig. 5 (a)는 w/c = 0.30인 시멘트 페이스트 및 모르타르 시험체의 재령 7시간 이후의 자기수축 변형률을 측정한 결과를 보여주고 있으며, 재령 24시간의 시점에서 시멘트 페이스트만의 자기수축 변형률이 모르타르의 약 3배정도임을 확인할 수 있었다. 한편 시멘트 페이스의 수축률 및 골재부피비로 콘크리트 또는 모르타르의 수축률을 예측할 수 있는 Pickette's model[14] (Eq. (1))을 검증하였으며, 좋은 상관성을 가짐이 확인되었다.

$$\varepsilon_{composite} = \varepsilon_{paste} \times (1 - V_{agg})^n \tag{1}$$

식 (1)의 n은 탄성계수와 상관성이 있는 계수로서 0~2의 값을 가지는 것으로 알려져 왔으며, 이 연구에서는 초기재령에서 시멘트 페이스트의 탄성계수가 급격히 변화하는 점을 감안, Moon 등[6]이 개발한 식 (2)에 의하여

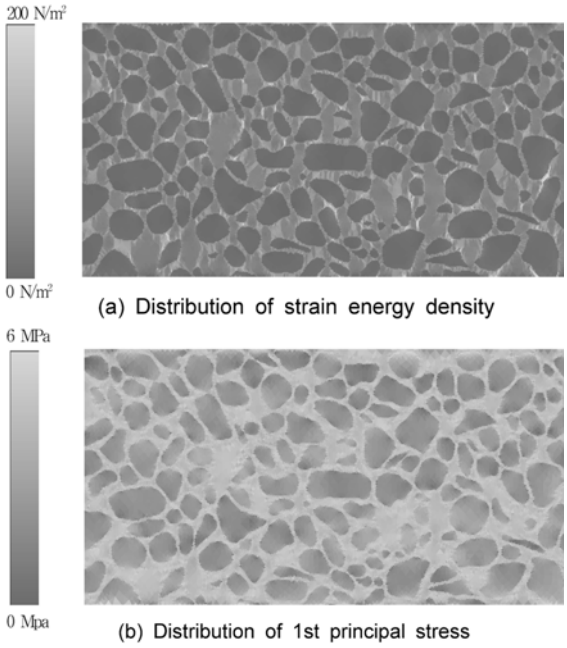
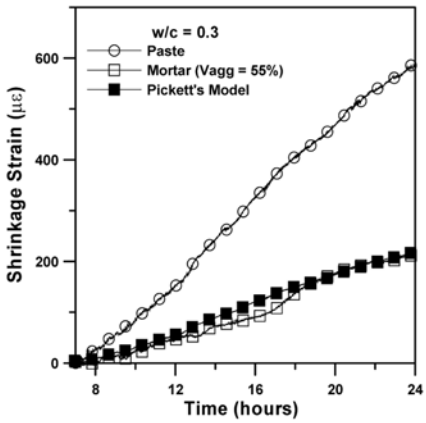
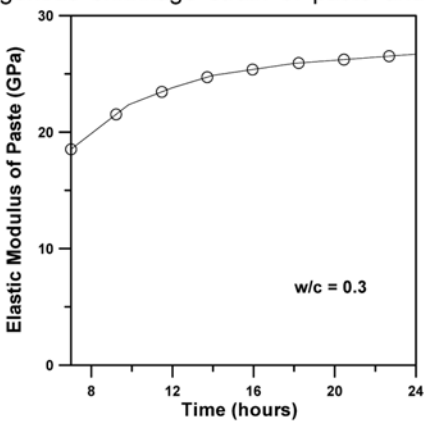


Fig. 4 Examples of OOF simulation (paste-1, BC: free boundary condition, ε_{paste}= 300 με)



(a) Autogenous shrinkage strain of paste and mortar



(b) Dynamic elastic modulus of paste

Fig. 5 Autogenous shrinkage of a paste specimen and a mortar specimen, and the dynamic elastic modulus of paste (w/c = 0.3)

구한 값을 사용하였다.

$$n = n_\infty \times \frac{1}{1 + C_1 \dfrac{E_{paste}}{E_{Agg}}} \tag{2}$$

여기서 n_∞ : 1.405, C_1 : 0.25

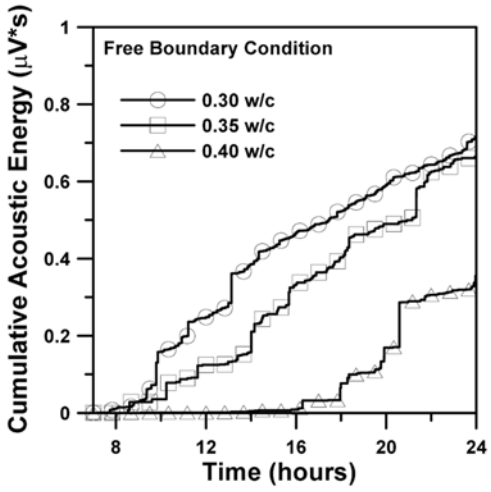
한편 식 (2)를 계산하기 위하여 필요한 골재의 탄성계수는 모래의 대표적인 성분인 규산석영(siliceous quartz)의 평균값 50 GPa을 적용하였으며,[15] 시멘트 페이스트의 탄성계수는 시간에 따라 변화하기 때문에 UPV(ultrasonic pulse velocity) 장치를 사용하여 Fig. 5(b)와 같이 시간대별로 동탄성계수를 측정하여 결정하였다. 일반적으로 동탄성계수는 정탄성계수보다 약 20~40% 정도 큰 값을 가지기 때문에[16] 이 연구에서는 측정된 동탄성계수값에 0.8을 곱한 값을 정탄성계수로 가정하여 계산에 사용하였다.

Fig. 5 (a)에서 보이는 바와 같이 식 (1)에서 예측한 모르타르의 수축변형률에 비해 모르타르의 수축변형률 실험결과치가 약간 낮은 값을 보임을 알 수 있었다. 그 이유는 Pickette's model은 콘크리트 또는 모르타르를 탄성체로 가정하고 있기 때문에, 수축발생으로 인한 내부 미

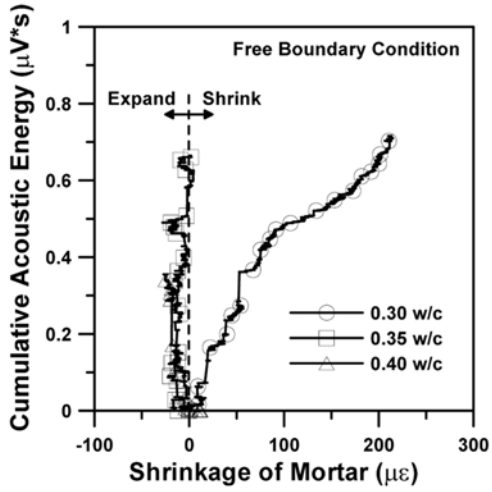
세균열 발생 및 소성 거동 부분은 고려하고 있지 않기 때문이라고 볼 수 있으며 이러한 영향은 골재의 부피, 시멘트 페이스트의 물성의 변화 및 미세균열의 발생량에 따라 변화할 것으로 판단된다.

이러한 모르타르의 자기수축으로 인한 초기재령에 있어서의 미세균열 발생을 실험적으로 평가하기 위하여 AE 측정을 수행하였다. Puri의 연구[17]에 따르면, AE 측정 데이터의 분석에 있어서 개개의 음향 방출 건수는 발생된 균열의 수를, AE 에너지의 합은 파괴에너지와 선형적인 관계를 가짐으로서 균열의 발생 정도를 나타낸다고 볼 수 있다. 이에 이 연구에서는 각 물시멘트비 별 모르타르 시험체의 불구속조건 하에서의 자기수축으로 인한 미세균열 발생을 평가하고자 누적 음향 에너지를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 (a)와 같이 불구속 모르타르 시험체에 있어서 시간 경과에 따라 지속적으로 미세균열이 발생하고 있음을 확인할 수 있었으며, w/c가 낮을수록 그 정도가 더 커짐을 알 수 있었다.

Fig. 6(b)는 누적 음향 에너지와 각 모르타르 시험체의 길이변화율을 비교한 결과로서 w/c = 0.30의 경우에는 수축이 지속적으로 증가하였으나, w/c = 0.35 및 0.40의 경우에 있어서는 수축은 거의 일어나지 않았다.



(a) Cumulative acoustic energy vs. time



(b) Cumulative acoustic enetgy vs. shrinkage strain of mortar

Fig. 6 Cumulative acoustic energies of mortar specimens

이와 같은 결과를 볼 때, Fig. 6(a), (b)를 통하여 모르타르 또는 콘크리트와 같은 복합체의 경우 불구속조건에서 겉보기 부피변화, 즉 이 연구에서는 모르타르의 자기수축 변형률이 작거나 발생하지 않는 경우일지라도 복합체 내부에서는 지속적인 미세균열이 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 반대의 관점에서 설명한다면, 모르타르에 존재하는 시멘트 페이스트의 수축에 의해 발생된 미세균열이 시멘트 페이스트의 수축량을 일정부분 보상함으로서 모르타르 시험체의 외부에서 관측된 자기수축 변형률이 작거나 발생하지 않은 것처럼 보일 수 있다는 것으로 설명되어질 수 있다.

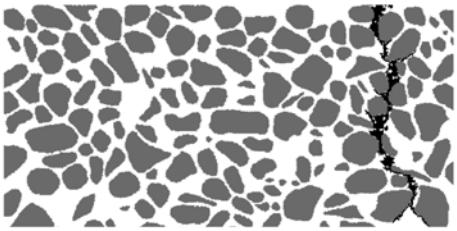
3.2 시뮬레이션 결과 분석

2.2절에서 구하여진 유한요소 망 및 Table 1의 물성치를 적용하여 유한요소해석 시뮬레이션을 수행하였으며, 동일 재료물성을 가지고 수평방향 구속조건과 불구속조건 하에서의 균열 발생 특성을 검토하였다. Fig. 7의 (a)~(c)는 좌우 양단구속조건 하에서의 유한요소해석 결과로서 국부적인 관통균열이 발생하였다. 또한 시멘트 페이스트의 강도 및 물성이 상대적으로 높은 순서대로 높은 시멘트 페이스트 수축변형률에서 급격한 관통균열이 발생함을 확인하였다(P-1: 140 $\mu\varepsilon$, P-2: 125 $\mu\varepsilon$, P-3: 120 $\mu\varepsilon$). 불구속조건의 경우에는 구속조건에서 관통균열이 발생된 시멘트 페이스트 부위의 수축량보다 약간 높은 값에서 미세균열이 골재계면부에서 발생하기 시작하였으며(P-1: 150 $\mu\varepsilon$, P-2: 140 $\mu\varepsilon$, P-3: 140 $\mu\varepsilon$), 유한요소 망 전체에 걸쳐 널리 분포되어 발생하였다. 이 연구에서는 불구속조건의 경우 시멘트 페이스트 부위의 수축량이 300 $\mu\varepsilon$에 도달하면 시뮬레이션을 종료하였다(Fig. 7(d), (e), (f)).

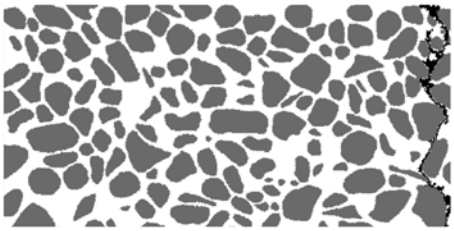
한편 각 시뮬레이션 결과로부터 변형률 에너지밀도를 그 부피로 곱해준 값인 정상저장에너지(normalized stored energy)와 시멘트 페이스트 수축변형률의 관계를 Fig. 8(a)에 나타내었다. 이때 미세균열에 따른 에너지 발산양을 확인하기 위하여 동일 시뮬레이션 조건에서 요소의 타입을 'Damisotropic'이 아닌 'Elastic' 타입으로 바꾼 유한요소해석을 추가로 수행하여 두 해석의 정상저장에너지 차이를 균열로 인한 에너지 방출량으로 계산하였다. Fig. 8(a)에서 보이는 바와 같이 불구속조건에 있어서는 완만하고 지속적인 미세균열 발생 및 에너지 방출 거동이 발생함을 확인할 수 있었으며 미세균열 발생에 따른 에너지 방출량과 시멘트 페이스트의 수축변형률 관계는 Fig. 8(b)와 같았다

또한 유한요소해석 결과로부터 모르타르의 변형률값을 구하였으며, 그 관계는 Fig. 8(c) 및 (d)에 나타낸 바와 같이 모르타르 복합체 내부에 미세균열이 발생함에 따라 시멘트 페이스트의 수축변형률이 증가함에도 불구하고 모르타르의 수축변형률은 감소하는 추세를 보임을 확인

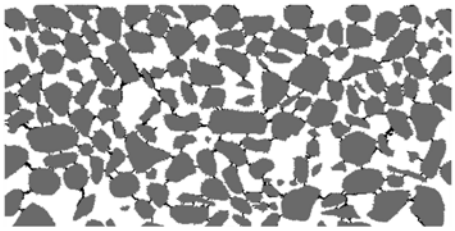
(a) Cracked image (P-1, ε_{paste}=140με, restrained)



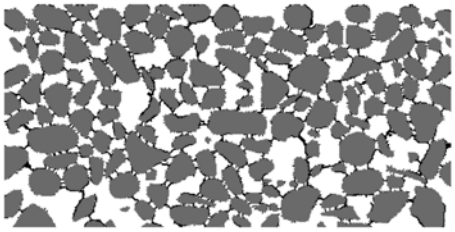
(b) Cracked image (P-2, ε_{paste}=125με, restrained)



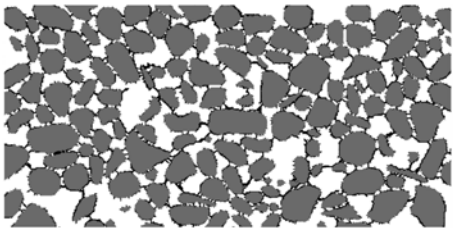
(c) Cracked image (P-3, ε_{paste}=120με, restrained)



(d) Cracked image (P-1, ε_{paste}=300με, free)



(e) Cracked image (P-2, ε_{paste}=300με, free)

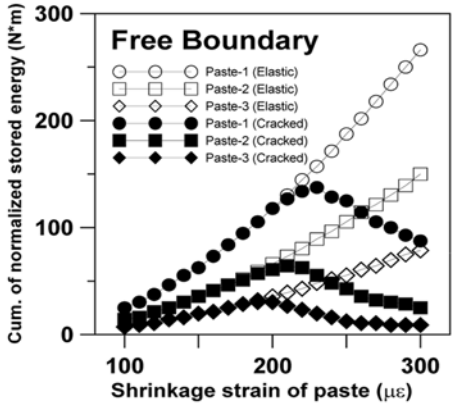


(d) Cracked image (P-3, ε_{paste}=300με, free)

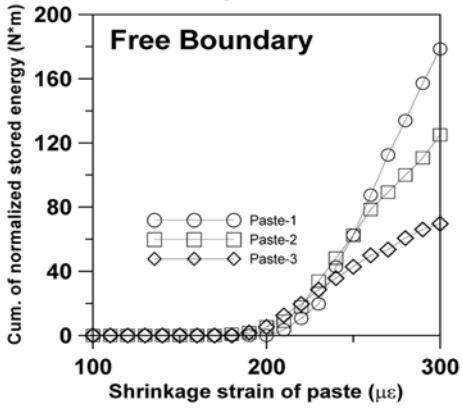
Fig. 7 Simulation results

할 수 있었다. 이러한 결과는 3.1에서 밝힌바와 같이 시멘트 페이스트 부위의 수축에 따른 미세균열의 발생으로 모르타르 외부에서 이 전체적인 수축량은 상쇄됨을 증명한다고 볼 수 있다.

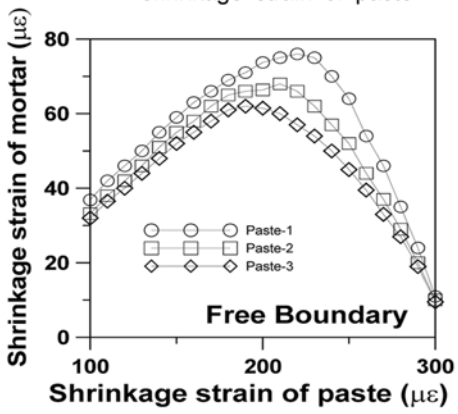
비록 이 연구에서 보인 유한요소해석 결과가 실험 결



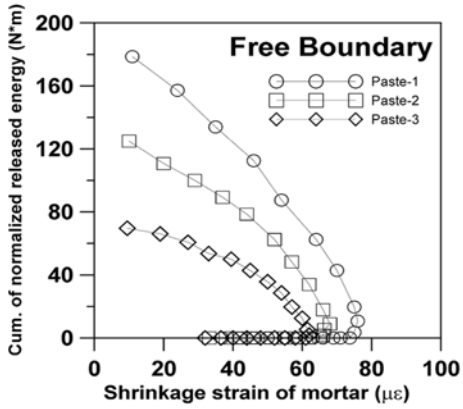
(a) Cumulative normalized stored energy vs. shrinkage strain of paste



(b) Cumulative normalized released energy vs. shrinkage strain of paste



(c) Shrinkage strain of mortar vs. shrinkage strain of paste



(d) Cumulative normalized released energy vs. shrinkage strain of mortar

Fig. 8 Simulation results: free boundary condition

과와 유사한 경향을 보이기는 하였지만 많은 차이점을 보이고 있으며, 보다 현실적인 시뮬레이션 결과를 도출하기 위하여서는 추가적인 보완 및 적용이 필요하다. 즉 시멘트 페이스트 부위의 시간의존적 물성변화 및 점탄성(visco-elastic) 거동이 반영되어져야 하며, ITZ의 적절한 반영, 실험적으로 구하여지는 AE 에너지와 시뮬레이션에서 구하여진 에너지 방출값과의 관계함수 정립 등이 필요하다고 할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 콘크리트의 자기수축으로 인한 미세균열 발생 및 균열 발생 현상을 이해 및 평가하기 위한 방안으로 실험적으로는 AE 장비를 활용하여 미세균열 발생을 평가하였으며, 유한요소해석을 수행하여 그 경향을 이해하고자 하였다. 이 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 시멘트 페이스트의 수축량 및 골재부피비로 콘크리트 또는 모르타르 복합체의 수축량을 예측할 수 있는 Pickette's model을 실험적으로 검증하였으며, 좋은 상관성을 가짐이 확인되었다.
2) 불구속조건 하의 모르타르 시험체에서 미세균열에 의해 발생된 누적 음향에너지를 분석한 결과, 지속적으로 미세균열이 발생함을 확인할 수 있었으며, 물시멘트비가 낮을수록 그 정도가 더 커짐을 알 수 있었다.
3) 모르타르 또는 콘크리트와 같은 복합체의 경우 불구속 경계조건에서 겉보기 부피변화가 없는 경우일지라도 복합체 내부에서는 지속적인 미세균열이 발생할 수 있음을 확인하였다.
4) 실제 모르타르 복합체의 이차원 이미지를 가지고 NIST에서 개발한 OOF 유한요소해석을 수행하는 방식을 도입, 보다 현실적인 해석 결과를 도출하고자 하였으며 육안으로는 추적 및 평가가 어려운 콘크리트 내부 미세균열 발생 현상을 이해하는데 활용될 수 있으리라 사료된다.
5) 이 연구에서 적용한 시뮬레이션은 초기적 적용 단계로서 여러 가지 추가적인 연구 및 개선이 필요하며, 우선적으로 ITZ의 영향, 시멘트 페이스트의 시간의존성 및 점탄성(visco-elastic) 거동, 연행공기의 영향 등을 적절히 반영함으로서 보다 현실적인 결과 도출이 가능해지리라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 “원자력기술개발사업(원자력안전분야)의 원전 콘크리트 구조물 건전성 평가 및 감시기술 개발” 과제의 재정적 지원을 받아 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ACI 209R-92, “Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effect in Concrete Structures,” *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, 1997, pp. 12~22.
2. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., and Panarese, W. C., *Design and Control of Concrete Mixtures*, 14th ed., Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2002, pp. 27~32.
3. Grzybowski, M. and Shah, S. P., “Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 2, 1990, pp. 138~148.
4. Bisschop, J. and van Mier, J. G. M., “Shrinkage Microcracking in Cement-based Materials with Low Water-cement Ratio,” *RILEM International Conference on Early Age Cracking in Cementitious Systems*, EAC’01, ed. K., Kovler, and A. Bentur, 2001, pp. 79~88.
5. Kim, B. and Weiss, W. J., “Using Acoustic Emission to Quantify Damage in Restrained Fiber Reinforced Cement Mortars,” *Cement and Concrete Research,* Vol. 33, No. 2, 2003, pp. 207~214.
6. Moon, J. H., Rajabipour, F., Pease, B., and Weiss, J., “Autogenous Shrinkage, Residual Stress, and Cracking in Cementitious Composites: The Influence of Internal and External Restraint,” 4*th International Seminar on Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology*, Maryland, USA, 2005, pp. 1~20.
7. Bernard, O. and Bruhwiler, E., “Influence of Autogenous Shrinkage on Early Age Behavior of Structural Elements Consisting of Concretes of Different Ages,” *Materials and Structures*, Vol. 35, No. 235, 2002, pp. 550~556.
8. Foster, S. W., “HIPERPAV-Guidance to Avoid Early-age Cracking in Concrete Pavements,” *ACI Special Publication*, Vol. 192, 2000, pp. 1109~1122.
9. Weiss, W. J., Yang, W., and Shah, S. P., “Shrinkage Cracking of Restrained Concrete Slabs,” *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 124, No. 7, 1998, pp. 765~774.
10. Rao, G. M. N., Murthy, C. R. L., and Raju, N. M., “Characterization of Micro and Macro Cracks in Rocks by Acoustic Emission,” *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*, ASTM STP 1353, S. J. Vahaviolos, Ed., ASTM. PA, 1999, pp. 142~155.
11. Chariton, T., Kim, B., and Weiss, W. J., “Using Passive Acoustic Energy to Quantify Cracking in Volumetrically Restrained Cementitious Systems,” *15th ASCE EMD Conference*, NewYork, 2002 (http://www.civil.columbia.edu/em2002/).
12. Pease, B. J., Hossain, A. B., and Weiss, W. J., “Quantifying Volume Change, Stress Development, and Cracking Due to Self-Desiccation,” *ACI SP-220, Autogenous Deformation of Concrete*, 2004, pp. 23~39.
13. Carter, W. C., Langer, S. A., and Fuller, E. R., *The OOF Manual* Version 1.0.8.6, National Institute of Standards and Technology, 2000, pp. 1~127.
14. Pickett, G., “Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage,” *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 56, 1956, pp. 581~590.
15. West, T. R., *Geology Applied to Engineering*, Prentice Hall,

Inc, New Jersey, 1995, pp. 81~102.
16. 김진근, 김훈, 노재호, “공명주기식 동탄성계수를 이용한 초기재령 콘크리트의 역학적 성질 예측,” 콘크리트학회 논문집, 7권, 5호, 1995, pp. 164~171.
17. Puri, Sunil, “*Assessing the Development of Localized Damage in Concrete under Compressive Loading Using Acoustic Emission*,” MSCE Thesis, Purdue University, West Lafayette, 2003.

요 약 콘크리트의 수축으로 인한 균열가능성 평가에 있어서 대부분의 경우 콘크리트를 균질한 물질로 가정하는 방식으로 접근하고 있다. 그러나 이러한 방식으로 접근할 경우 불구속조건 하의 콘크리트에서 자기수축으로 인한 미세균열(micro-cracking) 현상을 평가하는 것이 불가능함과 동시에 콘크리트 내부의 균열 발생 현상을 이해하는데 한계가 있다. 이에 이 연구에서는 시멘트 모르타르 시험체를 가지고 실험적으로는 음향방출(acoustic emission) 장비를 사용하여 내부 균열 발생량을 측정 및 평가하였으며, 이론적인 접근방식의 일환으로 실제 모르타르 시험체로부터 구하여진 이차원 이미지를 사용하여 NIST에서 개발한 OOF code로 유한요소해석을 수행하였다. 실험 및 해석 결과, 모르타르의 내부에서 시멘트 페이스트상의 수축 및 골재의 내부구속으로 인하여 발생하는 미세균열 발생 현상을 보다 현실적으로 이해할 수 있었다.

핵심용어 : 불구속조건, 미세균열, 음향방출, 유한요소해석, 내부구속