

The simulation system for ceramic drying processes

Y.T. Keum[†], J.H. Kim* and K.H. Auh

CPRC, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received May 11, 2001)

Abstract The simulation system for analyzing the ceramic drying process is developed. This system consists of 3 parts: pre-processor, analyzer, and post-processor. The pre-processor creates 3-dimensional ceramics, makes finite-element models, and prepares analyzers input. The analyzer computes temperature, moisture, residual stress, displacement, etc. during the drying process using the information about finite-element model, material property, and boundary condition provided by the pre-processor. In post-processor, the analyzers results are visualized to help designers evaluation of the drying of the ceramic.

세라믹 건조공정 시뮬레이션 시스템

금영탁[†], 김준한*, 오근호

한양대학교 세라믹공정 연구센터, 서울, 133-791

*한양대학교 대학원, 서울, 133-791

(2001년 5월 11일 접수)

요 약 세라믹 제품의 건조공정을 해석 할 수 있는 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 해석 시스템은 전처리 프로세서, 해석 모듈, 후처리 프로세서로 구성되어 있다. 전처리 프로세서에서는 세라믹 제품을 3차원으로 모델링하고 유한요소 메쉬를 생성하며, 해석 모듈의 입력 데이터를 만드는 과정을 수행한다. 해석 모듈에서는 유한요소 메쉬의 절점과 요소에 관한 정보, 물성치, 경계조건을 이용하여 건조공정중의 온도, 습도, 응력, 변형률 등을 해석한다. 그리고 후처리기에서는 설계자가 해석결과를 쉽게 이해할 수 있도록 해석결과 데이터를 가시화 해준다.

1. 서 론

최근 실제 실험은 그 과정이 매우 복잡하고 비용이 지나치게 많이 들게 되므로 이를 대체하기 위한 시뮬레이션 실험이 일반화 되고 있다. 시뮬레이션 실험이란 확장된 개념의 컴퓨터 시뮬레이션으로 실제실험을 통해 얻고자 하는 정보들을 컴퓨터 상에서 다루기 쉽도록 해주며, 보다 정확하고 효율적인 다양한 기능을 실험에 개선할 수 있다[1-3]. 이 시뮬레이션 실험은 대개 모델링, 전처리, 계산, 후처리, 해석 및 평가 순으로 이루어진다. 건조공정 연구 관련 내용을 살펴보면, Comini 등은[4-5] 열 및 물질 전달을 포함한 2차원 문제의 수치해석을 수행하였으며, Thomas 등

은[6] 목재 건조에 유한요소법을 적용하여 열 및 물질 전달 문제를 비선형으로 해석하고 그 결과를 실험치와 비교 하였다. Dhatt 등은[7] 콘크리트의 건조공정을 모델링 하였으며, Gong 등은[8] 콘크리트 건조공정을 유한요소법을 이용하여 열전달 속도 및 습도 제거 속도를 조사하였다. Lewis 등은[9] 벽돌의 냉각, 세라믹 애자와 목재의 건조공정에 유한요소법을 이용하여 열 및 습도 전달에 의한 응력 분포를 해석하였고, Sih 등은[10] 복합재에서의 열 및 습도 전달에 의한 습열응력을 해석하였다. Chung 등은[11] 이방성재료의 습열응력 문제에 관한 적합이론을 제안하여 유한요소법에 적용하였다.

본 연구는 세라믹 제품 건조공정 유한 요소 시뮬레이션 시스템에서 전처리, 해석, 후처리 모듈 프로그램개발에 대해 소개하고자 한다. Fig. 1은 세라믹 제품의 건조공정 유한 요소 시뮬레이션 시스템의 구성도이며, Fig. 2는 실제 해석 모델인 세라믹 애자를 보여준다. 제품이 3차원 축대칭

[†]Corresponding author

Tel: 82-2-2290-0436

Fax: 82-2-2298-6194

E-mail: ytkeum@hanyang.ac.kr

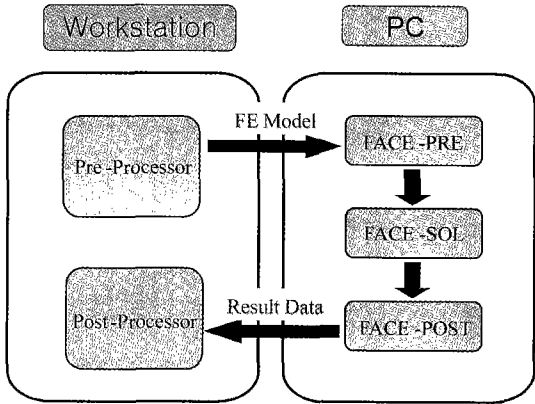


Fig. 1. Work flow of the finite element simulation system for ceramic drying processes.

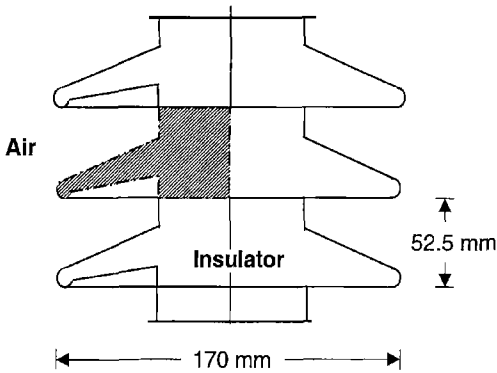


Fig. 2. Schematic view of ceramic electric insulator.

이러 주기적 경계조건을 가지므로 빗금친 부분만 해석을 수행하였다. 본 시스템은 전처리 프로세서에서 제품의 유한 요소 메쉬 모델링을 한 후, 경계조건, 초기온도 및 습도, 요소 및 절점정보, 물성치, 해석시간 등을 포함한 입력 데이터 파일을 전처리 인터페이스 모듈에 입력한후, 개발된 해석 모듈에서 해석을 수행한다. 그리고 해석 수행한 시간에 따른 온도, 습도, 주응력, 변형형상 데이터 결과 파일을 후처리 인터페이스 모듈에서 보여주며, 후처리프로세서에서 가시화 하여줄 결과 파일로 변환 시켜준다. 마지막으로 변환된 결과 파일을 후처리 프로세서에서 가시화 하여 보여 주게 된다.

2. 전처리 프로세서

2.1. 개요

전처리는 CAD 시스템과의 인터페이스를 유지하며 해석

에 필요한 형상 데이터에 대한 정보를 그대로 옮겨 해석모 델을 생성하고 필요한 해석조건을 입력하는 과정이다. 즉, 전처리 인터페이스 모듈에서는 해석 프로그램(Solver)에서 필요로 하는 요소 및 절점정보, 초기조건, 경계조건 및 초 기온도 및 습도, 요소 및 절점정보, 물성치, 해석시간 등을 정의한다. 그리고 전처리 프로세서 HYPERMESH에서는 전처리 인터페이스 모듈에서 입력된 입력 데이터 파일을 바탕으로 제품의 유한 요소 메쉬를 모델링 해준다. HYPERMESH는 복잡한 Geometry에 대한 모델링 과정 을 단순화하여 고속, 고품위의 Mesh Generation 가능하며, 사용자 중심의 GUI를 갖춘 메뉴로 구성되어 있어 사 용이 매우 편리하다.

2.2. 전처리 인터페이스 모듈

개발된 전처리 인터페이스 모듈은 크게 9가지의 메뉴로 되어있다. Fig. 3의 Control Parameter는 요소당 절점수, 절점당 자유도수, 자유유동유체에 노출된 요소면의 수 등을

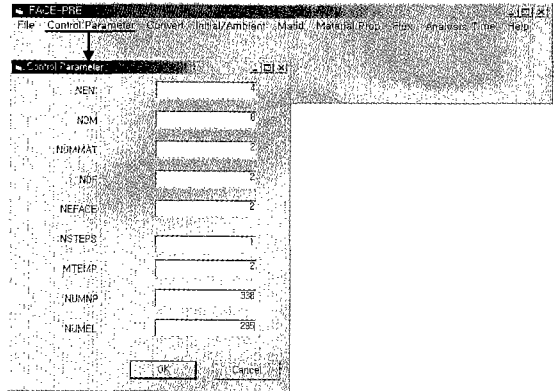


Fig. 3. Control parameter menu in pre-processor interface module.

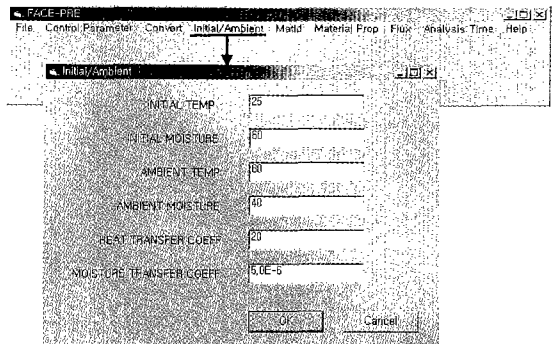


Fig. 4. Initial/Ambient menu in pre-processor interface module.

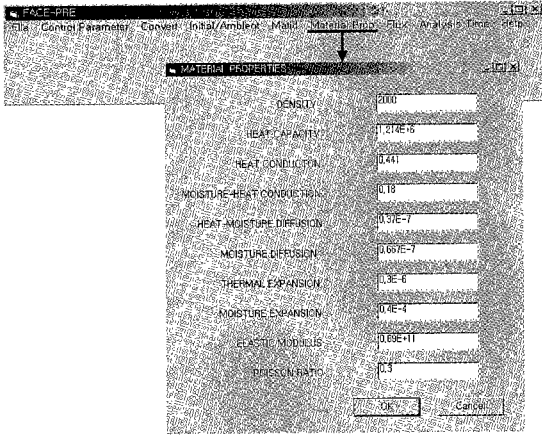


Fig. 5. Material property menu in pre-processor interface module.

나타내는 조절변수 메뉴이다. Fig. 4의 Initial/ Ambient는 재료의 초기온도 및 초기습도, 외부유체의 온도 및 습도, 대류 열전달계수, 대류 습도전달계수를 나타내며, Matid 메뉴는 재료의 물성치에 관련된 매개변수들을 입력하는 부분이다. Fig. 5는 Material Properties 메뉴로서 열용량, 열전도도, 습도확산계수 등 재료의 열 물성치를 입력하는 부분이다. Flux 메뉴는 대류 경계조건을 고려할 때 쓰이는 것으로 경계면을 갖는 요소와 그 요소에서 경계에 노출된 면을 표시하여 입력 데이터 파일을 구성하고, Analysis Time 메뉴는 해석시간에 관련된 변수들을 지정하는 부분이다. CONVERT 메뉴는 입력받은 데이터들과 요소, 절점들을 조합시켜 해석 프로그램에서 사용하는 입력데이터 파일을 생성하는 메뉴이다. 그리고 CONVERT 메뉴는 생성될 입력데이터를 지정한다.

2.3. HYPERMESH

Workstation 기반의 전처리 프로세서인 HYPERMESH는 고성능 유한요소 전처리 프로세서로 사용자에게 2차원

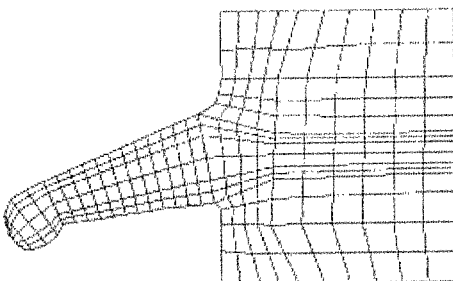


Fig. 6. Finite element model of ceramic electric insulator.

및 3차원 유한요소모델의 생성시간 단축 및 경비절감으로 생산성의 혁신적 증가를 이룩할 수 있는 유한요소 전처리 프로세서로 Workstation 기반으로 사용하고 있으며, 제품의 메쉬 모델링을 가시화 하여 나타내 준다. Fig. 6은 전처리 프로세서로 세라믹 제품을 유한 요소 메쉬 모델링 하여 나타낸 그림으로 290개의 절점과 248개의 요소로 구성되어 있다.

3. 해석모델

3.1. 개요

해석 모델에서는 건조 공정에서의 세라믹 제품의 온도 분포, 습도 분포, 그리고 시간이 지남에 따라 나타나는 응력 분포 및 변형형상 등을 해석 할 수 있으며, Fortran으로 해석 모델을 프로그래밍 하였다. 프로그램은 유한요소 메쉬의 절점과 요소에 관한 정보, 물성치, 경계조건, 해석시간을 받아들여 온도-습도장 부 프로그램 /MAINDI/에서 열 및 습도 전달을 해석한다. 온도-습도장은 경계조건을 시간과 위치에 따라 달리 부여할 수 있다. 온도 및 습도 분포는 주 응력 분포 및 변형해석을 위하여 응력장의 입력데이터로 사

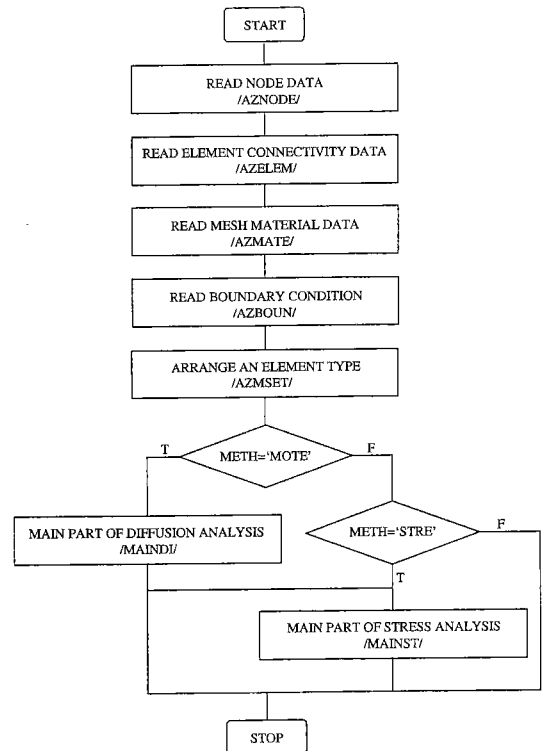


Fig. 7. Flow chart of the analyzer.

용된다. 이 결과로부터 응력장 부 프로그램 /MAINST/에서 응력을 해석한다. 응력장은 온도 구배 및 습도 구배에 의한 습열응력과 변형형상을 해석하는 유한요소 해석모듈이다. 본 해석 모듈에서는 온도 및 습도 분포를 해석한 후에 온도 및 습도 프로파일을 받아서 습열응력과 변형형상 해석을 수행한다. Fig. 7은 개발된 해석모듈의 프로그램의 흐름도를 나타낸다. 그리고 해석 모듈에서 각 부 프로그램에 대한 해석 기능에 대한 설명을 나타내었다.

/AZNODE/: 메쉬를 생성한 대상물의 유한요소 절점 데이터를 입력받는다.

/AZELEM/: 대상물의 유한요소 요소 데이터를 입력받는다.

/AZBOUN/: 여러가지 경계조건을 입력 받는다. 경계조건을 시간과 위치에 따라 달리 부여할 수 있고, 상변화 과정 중의 잠열의 효과도 고려할 수 있다. 그리고 주응력 분포 및 변형해석을 위한 입력데이터로 사용되어 진다.

/AZMSET/: 대상물의 요소 형태(삼각형요소, 사각형요소)를 결정한다.

/MAINDI/: 열 및 습도 전달을 해석한다.

/MAINST/: 응력을 해석한다. 온도 구배 및 습도 구배에 의한 습열응력과 변형형상을 해석하는 유한요소 해석모듈로써 응력장 해석을 위한 재료의 거동은 열 습도 탄성 거동으로 간주하고 해석한다.

3.2. 온도-습도장

열 및 습도 전달을 고려한 지배 방정식은 아래와 같은 Luikov의 복합 확산 방정식을 이용하였다[12-13].

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K^M \cdot \nabla W + K^T \cdot \nabla T) + I_q \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla \cdot (A^M \cdot \nabla W + A^T \cdot \nabla T + A^s \cdot Wg) \quad (2)$$

여기서, T는 온도, W는 습도, C는 단위 체적 열용량, j_q 는 열 플럭스 벡터, j_m 는 습도 플럭스 벡터, I_q 는 열원, K^T 는 열전도 계수 텐서, K^M 은 습도-열전도 계수 텐서, A^M 은 습도 확산 텐서, A^T 는 열-습도 확산 계수 텐서, A^s 는 강제 플럭스 계수 텐서를 나타낸다. 또한 경계 조건은 아래와 같다.

$$T = T_a \quad \text{on } S_1 \quad (3)$$

$$k_q \nabla T n + j_q + \alpha_q (T - T_a) + (1 - \epsilon) \alpha_m \lambda (w - w_a) = 0 \quad \text{on } S_2 \quad (4)$$

$$W = W_a \quad \text{on } S_3 \quad (5)$$

$$k_m \nabla W n + j_m + k_m \delta \nabla T n + \alpha_m (w - w_a) = 0 \quad \text{on } S_4 \quad (6)$$

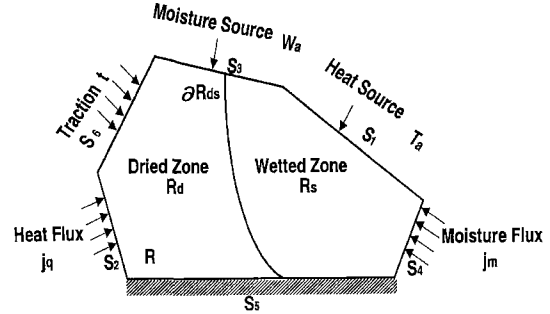


Fig. 8. Schematic diagram of the heat and moisture transfer problem.

여기서, T_a 은 경계 S_1 에서 설정된 온도, j_q 는 경계 S_2 를 통한 열 플럭스, W_a 는 경계 S_3 에서의 습도, j_m 는 경계 S_4 에서의 습도 플럭스, n 은 경계면에서의 외향 법선 벡터를 나타낸다. 이 그림을 Fig. 8에 나타내었다. 그리고 요소 내에서의 상변화 현상을 효과적으로 처리하기 위하여 Steven이 제안한 불연속 요소를 적용하였고, 수학적 모델링의 신뢰도를 높이기 위하여 재료 물성치는 온도에 따라 변화하는 것으로 간주하였으며, 온도가 급격하게 변화하는 영역에서는 적응체분법(adaptive mesh method)을 도입하였다 [14].

3.3. 응력장

응력장에서의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \quad (7)$$

여기서, σ 는 응력텐서, f 는 체적력을 각각 나타낸다.

또한 경계조건은 다음과 같다.

$$u = u_s \quad \text{on } S_5 \quad (8)$$

$$\sigma \cdot n = t_6 \quad \text{on } S_6 \quad (9)$$

응력장 구성방정식은 열과 습도에 의한 효과를 초기 응력값으로 처리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[15-16].

$$\sigma = \sigma_0 + E \cdot (e - \alpha \Delta T - \beta \Delta W) = E \cdot e + \sigma'_0 \quad (10)$$

여기서, e 는 총변형률, E는 탄성계수, α 는 열팽창계수, β 는 습도팽창계수, σ'_0 는 초기응력을 각각 나타낸다. 이들은 온도와 습도에 의존하는 것으로 가정한다. 그리고 요소내에서의 변위와 변형률을 다음과 같이 가정한다.

$$u = [N_u]\{u\} \quad (11)$$

$$e = [B_u]\{u\} \quad (12)$$

여기서, $[N_u]$ 은 형상함수, $[B_u]$ 는 형상함수의 미분, $\{u\}$ 는

변위의 절점 값 벡터를 나타낸다.

3.4. 해석 데이터

전처리 프로세서에서 생성한 유한요소 메시와 인터페이스 모듈에서 경계조건, 초기온도 및 습도, 요소 및 절점정보, 물성치, 해석시간 등을 입력한 후 해석 모듈에서 해석한 전조공정의 해석 데이터들은 일정 시간이 지난 후에 대한 온도 분포, 습도 분포, 주응력 분포, 변형률 분포를 나타낸다.

4. 후처리 프로세서

4.1. 개요

후처리는 해석 결과를 도식적이거나 가지적으로 디스플레이하여 주는 과정으로 결과에 대한 타당성 여부를 신속히 검토할 수 있다. 또한 Workstation 기반의 HY-VIEW로 모델링 및 전처리 과정에서 완성되어 있는 모델상에 해석한 결과를 표현하거나 모델의 단면 등 부분모델에 해석결과를 가지적으로 표현할 수 있다. 그리고 후처리 인터페이스 모듈은 해석결과 데이터를 후처리기의 폼에 맞게 변환하여 저장한다.

4.2. 후처리 인터페이스 모듈

개발된 후처리 인터페이스 모듈 메뉴는 크게 File, Output Data, Convert, Help 네 개의 구성요소로 이루어져 있다. 후처리 인터페이스 모듈의 File 메뉴는 해석결과 데이터의 확인과 닫기 기능을 가지고 있다. Output Data는 Convert의 전 단계로써 후처리에 필요한 부분을 선택하고 확인하기 위하여 Temperature, Moisture, Principal Stress, Displacement 등 네 가지 세부 메뉴를 가지고 있다. 이를 Fig. 9에 나타내었다. Temperature는 원하는 해석시간에서의 온도분포를 보여주는 기능을 하고, Moisture는 습

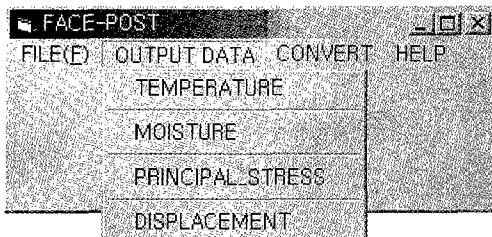


Fig. 9. Output data sub-menu in post-processor interface module.

도분포를 보여주는 기능을 하며, Principal Stress는 주응력 분포를, Displacement는 물체의 변형된 크기를 보여준다. CONVERT 메뉴는 해석결과 데이터에서 후처리에 필요한 부분을 선택하여 후처리에 필요한 새로운 파일을 만들어 저장한다[17]. 그리고 Help는 본 프로그램의 소속 및 도움말을 나타내는 메뉴이다.

4.3. HY-VIEW

Workstation 기반의 HY-VIEW는 유한요소, 유한차분 등을 이용한 후처리 프로세서 소프트웨어로서 온도, 습도, 응력, 변형률상등 해석 데이터 결과를 가지화 하여 보여주며, 모델형상, 뛰어난 컴퓨터그래픽을 지원한다. 이 프로그램의 특징은 GUI 환경이 잘 되어있으며, 메뉴의 추가, 삭제가 용이하다.

HY-VIEW, 메인 메뉴의 구성은 6가지로 구성되어 있으며 세부 메뉴에 대한 설명은 다음과 같다.

- ① GLOBAL-COMMANDS: 주요한 역할은 화면에 나타난 대상물의 좌표표시, 대상물의 이름, 물체의 색 및 배경색 등을 제어하고 구현한다. 그리고 대상물의 회전, 이동 등을 할 수 있게 한다.
- ② DEFINE-GEOMETRY: 이 메뉴는 절점, 선, 면 등의 요소를 가진 기초적인 기하 모델을 생성한다.
- ③ GENERATION-MESH: 주어진 기하학적 모델의 유한요소 절점들 좌표를 생성해주고, 요소들을 연결시켜 준다.
- ④ OPTIMIZE-MESH: 생성된 메시 모델의 효율적인

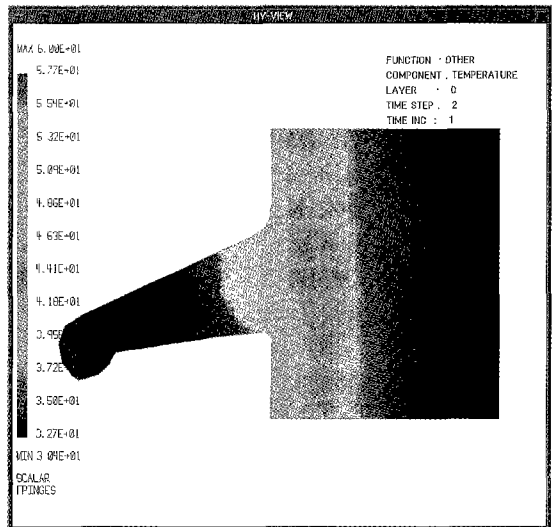


Fig. 10. Example of post-processing: temperature distribution.

해석을 위한 최적화 과정의 메쉬 번호를 재설정 해준다.

⑤ PREPARE-ANALYSIS: 유한요소 모델의 기하학적 특성, 하중, 재료의 특성등의 데이터 추가, 변경, 삭제할 수 있는 메뉴이다.

⑥ POST-RESULTS: 유한요소 해석결과를 가시화 해주는 메뉴로서 3차원 형상의 대칭, 변환, 확대/축소 등도 가능하다.

다음으로 HY-VIEW 후처리 프로세서에서 세라믹 적용 제품의 온도분포 결과, 습도분포 결과, 습열응력 분포 결과를 가시화한 그림을 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에 각각 나타내었다.

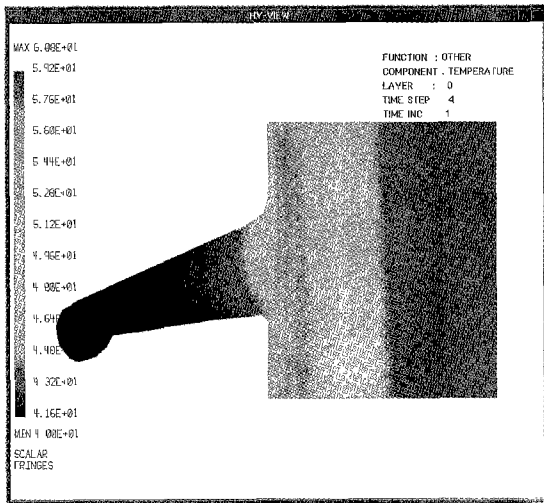


Fig. 11. Example of post-processing: moisture distribution.

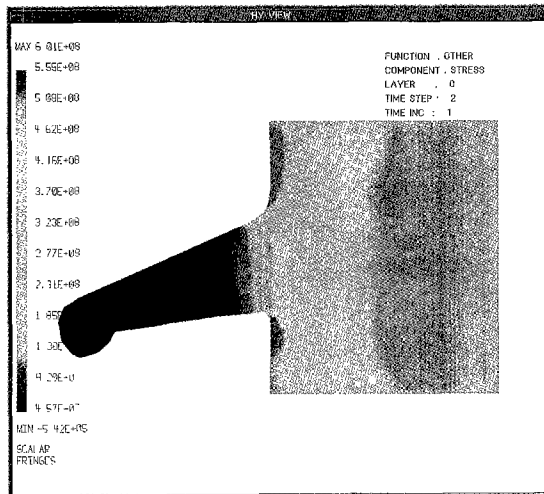


Fig. 12. Example of post-processing: stress distribution.

5. 결 론

본 연구에서는 세라믹 건조 공정을 위한 해석 시뮬레이션 시스템을 구축하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 세라믹 제품의 건조특성을 정량적으로 평가할 수 있게 되었다.
- 2) 시뮬레이션 시스템을 구축하여 보다 효율적이고, 빠른 건조공정해석이 가능하도록 하였다.
- 3) GUI 환경의 전·후 처리 프로세서 개발하여 사용자의 편리성을 증대시켰다.
- 4) 세라믹 건조 공정 시뮬레이션 시스템의 개발로 다양한 세라믹 공정 시뮬레이션 시스템으로의 적용이 가능하게 되었다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 세라믹공정연구센터를 통한 한국과학기술단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Lee, Principles of CAD/CAM/CAE Systems, Reading, Mass.: Addison-Wesley (1999).
- [2] S.J. Kim, Journal of KSME 38(6) (1998) 1998.
- [3] B.M. Kwag, Journal of KSME 38(6) (1998) 33.
- [4] G. Comini and R.W. Lewis, Int. J. Heat Mass Transfer 19 (1976) 1387.
- [5] R.W. Lewis, M. Strada and G. Comini, Int. J. Num. Meth. Engng. 11 (1977) 1175.
- [6] H.R. Thomas, R.W. Lewis and K. Morgan, Wood Fibre 11 (1980) 237.
- [7] G. Dhatt, M. Jacquemier and C. Kadje, Drying '86, 1 (1986) 94.
- [8] Z.X. Gong and A.S. Mujumdar, J. Am. Ceram. Soc. 79(6) (1969) 1649.
- [9] R.W. Lewis, M. Strada and G. Comini, Int. J. Num. Meth. Engng. 11 (1977) 1175.
- [10] G.C. Sih, A. Ogawa and S.C. Chou, J. Thermal Stresses 4 (1981) 193.
- [11] T.J. Chung and T.L. Prater, J. Thermal Stresses 3 (1980) 435.
- [12] A.V. Luikov, Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies (Pergamon, Oxford, 1975).
- [13] A.V. Luikov, Heat and Mass Transfer, Mir Publishers, Moscow (1980).
- [14] G.P. Steven, Internally Discontinuous Element for Moving Interface Problems, Int. J. Num. Meth. Engng. 18, 569.

- [15] H.Y. Park, Heat Transfer, Bumhan Seojeok (1992). [17] J. Connell, (Beginning) Visual Basic 6 Database Programming, Jeongbo Muhwasa (1999).
- [16] Y. Kim, Heat Transfer A Practical Approach, Kyobo Mungo (1999).