'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

다공 원통구조물의 기계적 및 열적 성능해석 프로그램 개발

Development of Mechanical and Thermal Performance Analysis Program on the Cylindrical Structures with Mult-holes

강영환

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

이영신, 최명환, 고재화

충남대학교
대전시 유성구 궁동 220

요 약

재료 조사시험을 위한 캡슐은 여러 개의 구멍을 갖는 원통구조물로 고려할 수 있다. 또한 조사시험을 위하여 연구로 노심에 캡슐을 설치하면, 감마유속에 의한 사용재료들의 발열량이 서로 다르므로 캡슐은 복잡한 기계적, 열적 거동을 갖게 된다. 그러므로 캡슐의 응력과 온도에 대한 정보는 시험편의 온도제어와 캡슐의 건전성 평가를 위하여 필수적이다. 본 연구에서는 상용 유한 요소 프로그램인 ANSYS Code와 VISUAL C++프로그램을 이용한 다공원통 구조물의 기계적, 열적 성능해석 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 매개변수 입력 등의 간단한 과정을 통하여 사용자의 요구 조건에 맞는 캡슐 모델의 설계 및 성능 평가에 유용하게 사용될 수 있다.

Abstract

Instrumented capsule for material irradiation tests can be considered as a cylindrical structure with multi-holes. When the capsule is subjected to the irradiation environment, the mechanical and thermal behaviors of this structure become more complicated due to the different heat generation of materials by gamma flux. Therefore, the information on the temperature and stresses are essential to control the specimen temperature and to evaluate the structural integrity of the capsule, respectively. In this study, the thermal and mechanical analysis program for the cylindrical structure with multi-holes are developed by using both ANSYS code and graphic user interface of VISUAL C++ program. This program is useful to evaluate the capability and design of capsule with requirements of user through the simple process like inputting of various parameters.

1. 서 론

원자력 부품재의 노내 사용중 중성자 조사(neutron irradiation)에 의해 발생되는 재질 열화는 기계적·열적 물성의 저하를 야기시키고, 발전소의 수명을 단축시키는 주요 요인이라는 사실이 판명되었다. 따라서 특정한 재료로 만들어진 장치를 상용 원자로에 적용하기에 앞서 이들 재료의 노내 조사거동을 확인하기 위하여 하나로를 이용한 조사시험이 수행되고 있으며, 재료 조사시험에 이용되는 여러 시설중의 하나인 캡슐은 다양한 조사조건을 충족시키기 때문에 유용한 장비로 사용되고 있다. 이러한 캡슐은 여러 개의 구멍을 갖는 다공 원통구조물로 고려할 수 있고, 원통구조물의 내부에 존재하는 구멍들에 조사 시험용 시편을 삽입하여 재료특성을 연구하는데 사용할 수 있다.

연구로에서 캡슐은 감마 유속(gamma flux)에 의해 가열되기 때문에, 이 때 발생하는 열은 시편의 재료 특성값에 상당히 중요한 영향을 미치게 된다. 그러므로 연구로의 노심에 캡슐을 장입하여 조사시험을 수행하기에 앞서 캡슐 내부의 적절한 시편 배치를 통한 온도 및 응력을 사전에 예측하는 기술이 요구된다.

선진국에서는 이러한 연구과정이 수행되었고, Harayama등은 캡슐 구조와 비슷한 핵연료봉의 열유속 분포에 관한 연구 및 열하중을 받는 다공 원통의 온도분포 평가를 위한 모델을 제시하였고. 실제적인 가정하에서의 온도분포를 해석적으로 표현하였다[1-2].

또한 국내에서는 강영환등이 다공원통구조 개념을 도입하여 캡슐의 시편배치에 따른 열적 및 역학적 특성분석을 하였으며[3], 관련 분야별 연구 결과를 토대로 건정성 평가를 위한 프로그램이 개발되었는데 관상록등은 핵연료 압력관의 결함에 대한 건전성 평가시스템[4], 전성문등은 ANSYS를 이용한 전용해석 프로그램을 개발하여 사용자에게 친숙한 환경에서 효율적으로 사용되고 있다[5].

조사시험에 대한 사용자의 다양한 요구조건을 효과적으로 충족시키기 위해서는 다공 원통 형상을 갖는 캡슐 열매체에 대한 여러 역학적인 특성을 파악하여 설계 및 제작할 필요가 있는데[6], 열매체는 중앙구멍과 원주방향의 구멍을 갖는 유한한 실린더로서 열매체는 시편구멍에 조사시편을 고정하기 위해 사용하고, 중앙구멍은 열매체의 중앙에서 온도분포를 조절하기 위한 수단으로 설계될 수 있다. 또한 다공 캡슐 내부의 열매체와 시편에서 발생하는 온도 및 응력 해석을 위해 해의 정확성 및 유용성이 검증된 상용유한요소 프로그램인 ANSYS[7]를 이용하여 기하학적 형상 변화 및 여러 매개변수에 대한 다공원통구조물의 해석을 수행하였다. 해석 모델 결과를 기반으로 VISUAL C++과의 인터페이스를 구현하여 다공원통구조물의 온도와 응력의 해석 결과를 쉽게 평가하기 위한 프로그램을 개발하였다.

2. 기본 해석 모델

2.1 해석 모델 및 방법

Fig. 1 에 나타낸 것과 같이, 다공 캡슐의 기본 모델은 열매체, 시편, 외통으로 구성되어 있다. 캡슐 외통의 전체 길이는 870 mm, 두께가 2 mm, 외반경이 60 mm 인 원통 쉘이며, 모두 5단으로 분할되어 각각 독립적으로 온도 조절이 가능하도록 히터와 열전대가 설치되어 있다. 모델은 3차원 모델과 2차원 모델의 해석 결과의 차이가 작으므로 2차원 해석 모델을 사용하였다. 열매체는 여러 개의 시편을 삽입할 수 있는 구멍을 갖는 원통으로 되어 있고, 길이는 120 mm이다. 갭은 열매체와 시편 그리고 외통 사이의 시편 온도를 효과적으로 조절하기 위한 것으로 외통과 열매체 사이, 열매체와 시편 사이의 2군데에 0.1mm 0.5 mm 정도의 갭을 두는데, 이 갭에는 극저온 초전도성 물질인 헬륨 가스로 채워지고 헬륨의 압력에 의한 압력으로 온도를 조절하게 된다. 이렇게 제작된 다공 캡슐은 하나로 노심에 설치되어 위로는 보호관과 연결되고 연구로 노심의 강제 대류 영역에 설치되어 조사시험을 수행하게 되며, 이 때의 냉각수의 온도는 45℃ 내외이고, 외통 표면에서의 열전달 계수는 3.03 x 10^4 W/m^2 이다. Fig. 2 는 다공 캡슐에 다양한 시편 형상의 배치를 구현한 2차원 유한요소모델의 한 예로서 대칭성을 갖는 모델에 대해 매개변수를 바꾸어도 절점은 변하지 않도록 만들었다. 그리고 시편과 열매체 사이와 열매체와 외통 사이의 헬륨이 채워진 공간은 기체의 열전도도가 고체의 열전도보다 상대적으로 낮아 시편의 온도분포에 상당한 영향을 미치므로 이 공간에 대해서는 다른 영역에 비해 더 조밀하게 요소분할을 하여 해석결과의 오차를 줄였다.

본 프로그램에서는 기하학적 모델의 외통의 내·외 반경과 열매체의 외반경은 결정된 크기이므로 고정변수로 간주하였으나, 시편을 삽입하는 중앙구멍과 시편 구멍의 반경, 중앙구멍과 원주방향 시편구멍간의 거리, 시편구멍의 개수 등은 설계자의 요구조건을 만족할 수 있도록 매개변수로 고려하였다. Table 1에 사용된 재료의 온도에 따른 기계적 및 열적 물성값을 나타내었는데 이러한 재료의 물성들은 온도에 따라 변하는 특성을 가지고 있으므로 비선형 해석법으로 접근하였다.

2.2 하중 및 경계조건

하나로 노심 내에서 시편, 열매체, 외통은 감마유속(gamma flux)에 의해 열원(heat source)으로 작용하게 된다. 각 재료의 열발생 밀도는 감마유속의 분포 차이에 의해 캡슐의 축방향 위치와 시간에 따라 다르기 때문에 정확한 계산값을 산출하기가 어렵다. 그래서 각 재료에서 발생하는 열발생 밀도를 가정하여 모델에 적용하였다. 가정한 열발생 밀도의 데이터는 Table 2와 같다. 다공 캡슐의 온도 해석을 위한 하중 조건에는 열매체(A1050), 시편(SUS304) 그리고 외통(SUS304)의 열발생 밀도와 캡슐 외통의 표면온도가 적용된다.

경계조건으로 해석모델의 x축과 (360/m)。 축에서 대칭 경계조건과 다공 캡슐 외통의 외표면에서 온도 경계조건으로 50℃ 값을 기본값으로 정의하였다. 또한 헬륨 가스가 채워져 있는 갭에서는 대류와 복사가 무시될 수 있을 정도로 작으므로 전도만을 고려하였다.

2.3 설계 매개변수

열하중 하에서의 다공 캡슐 구조물의 특성을 고찰하기 위하여 시험편의 크기, 시험편의 개수, 열매체와 시험편 사이의 갭크기와 같은 다양한 다공 매개변수가 ANSYS Code[7] 해석에서 고려되었고, 그에 따른 온도분포 및 응력분포 등에 대해 고찰되었다[9].

다공 캡슐의 최대 온도는 중앙 구멍 또는 시편에 삽입된 시편에서 발생하고, 열매체와 시험편 사이의 헬륨 갭을 경계로 온도의 급격한 차이가 발생한다. 시험편의 크기와 개수가 증가할수록 최대온도는 증가하며, 열발생 밀도가 가장 낮은 단에서는 150-200℃이고, 가장 높은 단에서는 250-400℃의 범위에서 변한다.

축방향으로 다른 열발생 밀도를 갖는 다공 캡슐에서 열매체와 시편 사이의 헬륨 갭의 크기는 갭의 크기가 증가함에 따라 온도는 선형적으로 증가하는데, 이것은 증가된 갭의 크기가 열매체와 시편 사이의 열전달을 방해하는 작용을 하기 때문이다. 이 헬륨가스가 들어가는 갭의 크기에 따라 열전도 및 온도분포에 상당한 영향을 미치므로 갭은 온도계산에서 고려해야 할 중요한 인자가 된다.

3. CAPSYS 프로그램 개발

3.1 ANSYS 와 VISUAL C++과의 Interface

캡슐의 다양한 요구조건을 충족시키기 위한 설계 및 제작을 위한 효율적인 방법의 하나로써 ANSYS 코드와 Visual C++의 인터페이스를 통하여 개발되었다.

VISUAL C++언어의 그래픽 유저 인터페이스(Graphic User Interface)를 이용하여 다양한 설계 매개 변수(시편의 형상 및 치수, 홀의 위치, 홀의 개수, 시편의 장입 유무)등의 기본적인 데이터를 입력받아 ANSYS 해석을 위한 로그 파일을 만들고, ANSYS Code를 이용하여 해석 과정이 수행되면 해석 결과에서 필요한 데이터만을 추출하여 보여준다.

Fig. 1에 프로그램의 전체적인 실행 계략도를 나타내었다. 개발된 프로그램은 크게 세 부분으로 나뉘는데, 모델 생성을 위한 설계 매개 변수를 입력하는 전처리과정(Pre Processor), ANSYS와의 인터페이스를 통한 해석과정(Solve Processor) 그리고 응력과 온도 분포 및 조사시험편의 해석결과 확인을 위한 후처리 과정(Post Processor) 으로 구성된다.

프로그램의 명칭은 CAPSYS(Capsule Analysis Program System)이며, Fig. 2에 CAPSYS의 초기 화면을 나타내었다.

3.2 전처리 과정 (Pre Processor)

전처리 과정은 캡슐의 전반적인 모델 생성을 위하여 캡슐 내부의 시편의 형상, 개수, 위치, 치수, 재질의 물성값 등을 입력 받고 최종적으로 ANSYS의 해석을 위한 로그 파일을 생성한다. 설계 매개변수에 대한 기본적인 데이터는 프로그램에 내장되어 있으며, 사용자의 편의성을 높이기 위해 VISUAL C++ 언어의 그래픽 유저 인터페이스를 사용하여 사용자가 원하는 값으로 쉽게 변경할 수 있도록 하였다.

Fig. 3 은 시편의 배치를 결정하는 창을 나타내는데 BMP형식의 그림화일을 프로그램에 삽입하여 8개의 시편 배치 모델 중 하나를 선택하게 된다. 캡슐내의 시편의 배치를 나타내

는 것으로 흰색은 시편이 삽입되지 않은 것을 나타내는데 사용자가 원하는 시편 배치 형상을 선택하게 되면 선택된 모델에 대한 그림으로 바뀌어 다시 화면에 제시하므로 쉽게 선택된 모델을 알 수 있다.

Fig. 5는 선택된 시편 배치에 대한 치수를 입력 받는 창을 나타내는 것으로, 실제 ACAD 도면을 그림화일로 변형시킨 후 프로그램에 적용하였다. 시편의 형상은 원형시편, 사각시편 또는 원형시편과 사각시편이 혼합된 시편의 형상 중에서 선택하여 각 시편의 치수를 입력할 수 있다. 캡슐 내의 시편 형상에 따라 입력되는 매개 변수가 다르기 때문에 각각의 경우에 대한 버튼(원형, 사각형, 원형+사각형)을 구성하여 선택된 형상의 조건에 따라 필요한 매개변수값만을 입력 받도록 하였다. 또한 시편의 치수는 부적절한 값(즉 너무 크거나 작은 값)이 입력되면 부적절한 모델을 형성하게 되므로 각각의 입력 매개 변수에 한계값을 설정하여 한계 범위 이외의 값에 대해서는 경고 메시지를 출력하도록 하였다. 궁극적으로는 적절한 기하학적 모델을 생성할 수 있다.

Fig. 6은 시편이 삽입되는 단(Step)의 위치 선택 및 물성치(Heat Generation Density, H.G.D. : 열발생밀도)등을 결정하는 창을 나타낸다. 사용자가 해석을 원하는 단을 선택하면 각 부분의 재료에 대한 선택된 단에 해당하는 내장된 열발생 밀도값으로 화면에 제시하게 되며 필요시에는 사용자가 원하는 열발생밀도값으로 입력하여 바로 변경할 수 있다.

사용자가 설계하기를 원하는 캡슐에 대한 매개 변수들을 입력하여 모델 생성을 위한 기초자료가 완성되면 해석 과정에서 ANSYS 코드에 사용되는 입력용 로그 파일을 생성한다.

해석과정은 CAPSYS 프로그램 화면에서 ANSYS 로그 파일을 읽어들여 ANSYS의 배치작업을 실행하고 해석에 대한 결과 파일(Data)을 생성하게 된다. 이 때 ANSYS의 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 사용하여 결과 파일에서 원하는 데이터만을 추출하여 사용할 수 있도록 하였다.

3.3 후처리 과정 (Post Processor)

ANSYS 프로그램의 해석 과정을 통해 얻은 결과 데이터에서 필요한 데이터만을 추출하여 Fig. 8 과 같이 온도와 응력의 그래프로 결과를 확인할 수 있으며, 각 위치에 대한 온도 및 응력 데이터를 후처리 과정의 윈도우 창에서 확인할 수 있다. 기본적으로 온도와 응력 분포를 같은 창에 제시하였으며, 각각 온도와 응력의 최소·최대값을 나타내었으며 사용자의 편의성을 위하여 각각 온도 분포 곡선이나 응력 분포 곡선 중의 하나만을 선택적으로 볼 수 있도록 하였다. 그래프와 결과값을 동시에 보여주기 때문에 사용자는 캡슐 구조물의 원하는 부분의 값을 확인하면서 온도 및 응력의 분포를 쉽게 알 수 있다.

캡슐의 제작에서 시편에 대한 올바른 해석 및 평가가 중요시되므로 시험편에 대한 온도 및 응력분포만을 확인할 수 있도록 후처리 과정에 도입하였는데, Fig. 10 은 시험편에 대한 온도 및 응력 분포를 나타낸다.

3.4 ANSYS의 온도 해석 타당성 검증

조사시편의 온도해석에 대한 ANSYS 코드의 타당성 검증을 위해, ANSYS해석 결과를 하나로에서 수행된 97M-01K 캡슐의 조사실험 데이터와 열분석 코드인 Heating 7.2f의 해석결과와 비교하였다[8]. 하나로에서 측정된 실험값을 기준으로 1단에서는 5% 이내, 3 단에서는 7% 이내의 온도오차를 보였는데, 이러한 차이는 조사시험중 온도측정의 정확도와 모델의 하중 및 경계조건의 오차를 고려할 때 잘 일치한다고 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 캡슐 구조물의 효율적인 해석 및 평가를 위해 상용유한 요소프로그램인 ANSYS를 이용하여 기본해석 모델을 개발하였고, 이 모델을 VISUAL C++ 언어의 그래픽 유저 인터페이스(GUI)를 이용하여 사용자에게 친숙한 환경을 제공하는 다양한 형상의 시편을 갖는 캡슐의 기계적 및 열적 해석 프로그램을 개발하였다.

ANSYS 프로그램에 익숙하지 않은 사용자들에게도 캡슐 구조물에 대해 기본적인 개념을 이해하고 있다면 내장된 데이터 또는 요구하는 매개 변수 데이터의 입력만으로 ANSYS 해석을 통한 온도 및 응력에 대한 결과와 조사시험편의 온도 및 응력 분포를 확인·평가할 수 있다.

이러한 프로그램의 개발은 ANSYS와 같은 상용 프로그램의 숙달에 필요한 시간을 덜어주며, 사용자의 입장에서는 모델 설계를 위한 매개 변수를 입력하거나 수정하는 단계만으로 원하는 모델에 대한 해석 및 평가를 할 수 있을 뿐만 아니라, 캡슐의 최적설계를 위한 과정으로서도 매우 효율적이다.

그러므로 향후 캡슐 설계를 위한 온도 및 응력 예측이나 캡슐 성능 평가에 유용할 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업 중의 조사시험용 캡슐개발 및 활용과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Yasuo Harayama and Masahiko Kyoya, 1986, “Analysis of Effect of Eccentric Holes in Pellets on Temperature and Heat Distribution in Fuel Rod”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 151 159.

[2] Yasuo Harayama, Taiji Hoshiya, Hiroyuki Someya, Motoji Niimi and Toshiki Kobayash, 1993, “Estimation for Temperature Distribution in a Heat-Generating Cylinder with Multiple Holes”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 30, No. 4, pp. 291 301.

[3] 강영환 외, 1999, “다공 원통구조 개념을 도입한 캡슐 설계개선 연구”, 한국원자력학회 ‘99춘계학술발표회논문집(CDROM)

[4] 관상록 외, 1999, “핵연료 압력관의 건정성 평가시스템 개발”, 한국원자력학회 ‘99 춘계학술대회논문집(CDROM)

[5] 주기남 외, 원자로 재료 조사시험용 하나로 계장캡슐(98M-02K)의 설계·제작“, 한국원자력학회 ‘99 춘계학술발표회논문집(CDROM)

[6] 전성문 외, 1998, “원자력 주기기용 볼트 개폐구조물의 해석과 ANSYS를 이용한 전용 해석 프로그램의 개발”, 대한기계학회논문집, A권, 제22권, 제4호, pp.731 742

[7] Desalvo, G.J. and Gorman, R.W., ANSYS Engineering Analysis System User's Manual, Swanson analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania, 1992.
[8] 강영환 외, 1999, "ANSYS 코드를 이용한 다공 캡슐의 온도분포 해석", 한국원자력학회, '99추계학술발표회논문집(CDROM)
[9] 강영환 외, 1999, "열하중을 받는 다공 캡슐의 열 및 구조해석", 한국원자력학회 '99춘계학술발표회논문집(CDROM)

Table 1 Mechanical and thermal properties of the materials with various temperatures

Material Property \ Temp.(°C)		50	100	200	300
Young's Modulus (E) GPa	A1050	68.96	65.51	55.16	34.48
	SUS304	200	194	186	179
Thermal Expansion Coeff. (α) $1\times10^{-6}/°C$	A1050	23.4	23.8	24.5	25.5
	SUS304	15.0	16.0	17.0	19.0
Thermal Conductivity (κ) W/m·°C	A1050	203	206.33	215.26	230.39
	SUS304	16.0	16.0	17.0	17.0
	He	0.143	0.1747	0.2049	0.2336
Mass Density (ρ) kg/m^3	A1050	2710			
	SUS304	7850			
Poisson's Ratio (υ)	A1050	0.33			
	SUS304	0.30			

Table 2 Heat generation density along axial direction

Axial Coordinate(cm)	SUS304(W/cm^3)	A1050(W/cm^3)
11.25	39.40	20.60
24.75	37.00	21.70
38.25	33.30	20.00
51.75	27.00	15.40
65.25	19.00	9.10

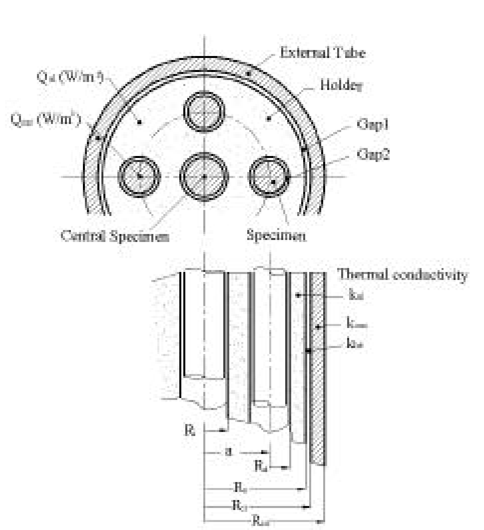

Fig. 1 Geometrical shape of the capsule with multi-holes

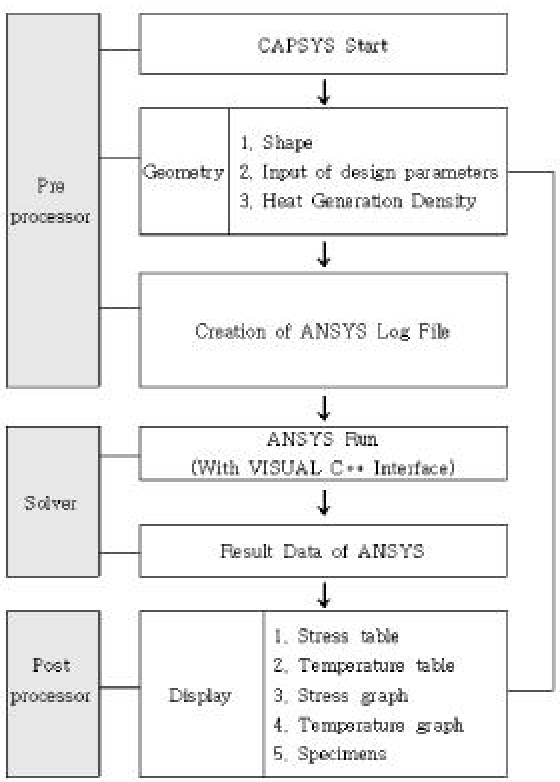

Fig. 2 Flow chart for develpoed analysis program CAPSYS

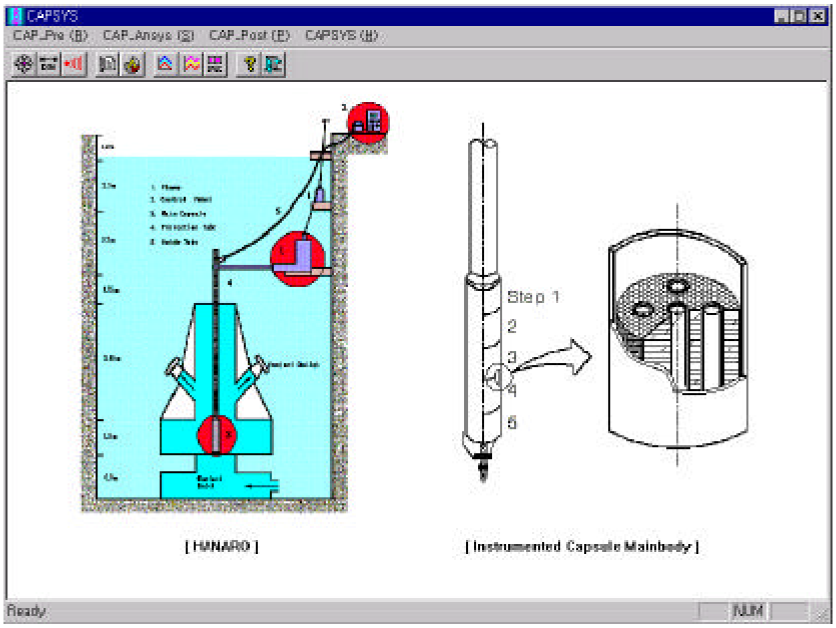

Fig. 3 Main window of the CAPSYS Program

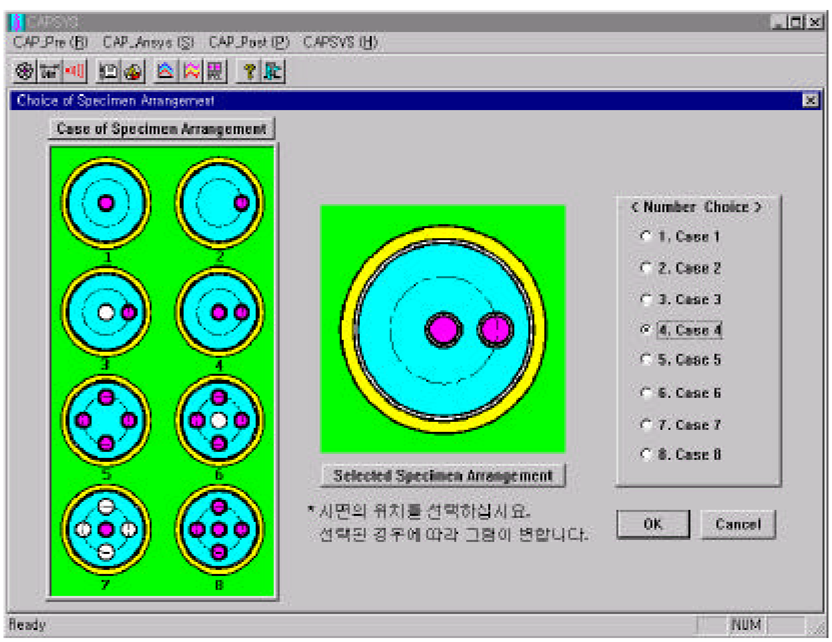

Fig. 4 Window for specimen arrangement

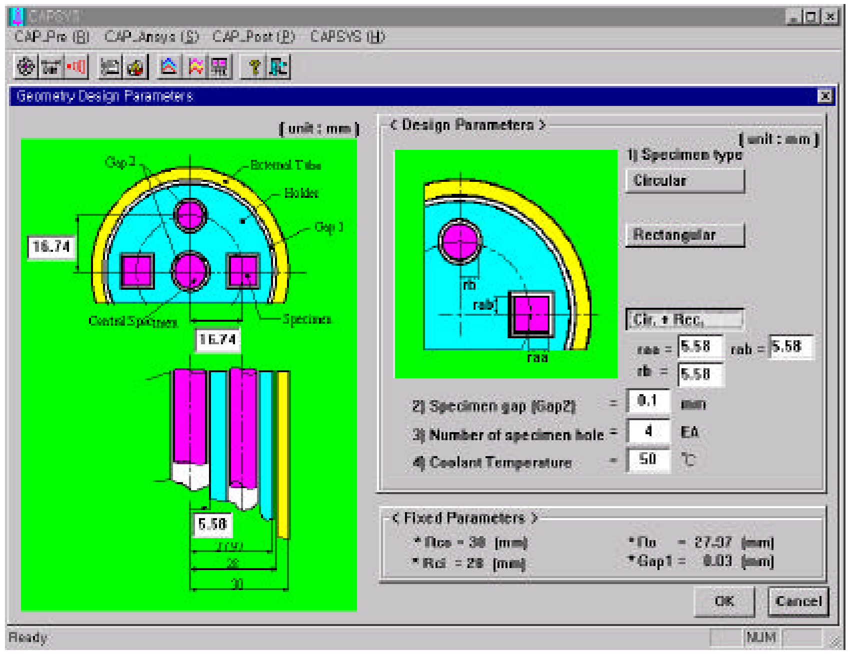

Fig. 5 Input window design parameters

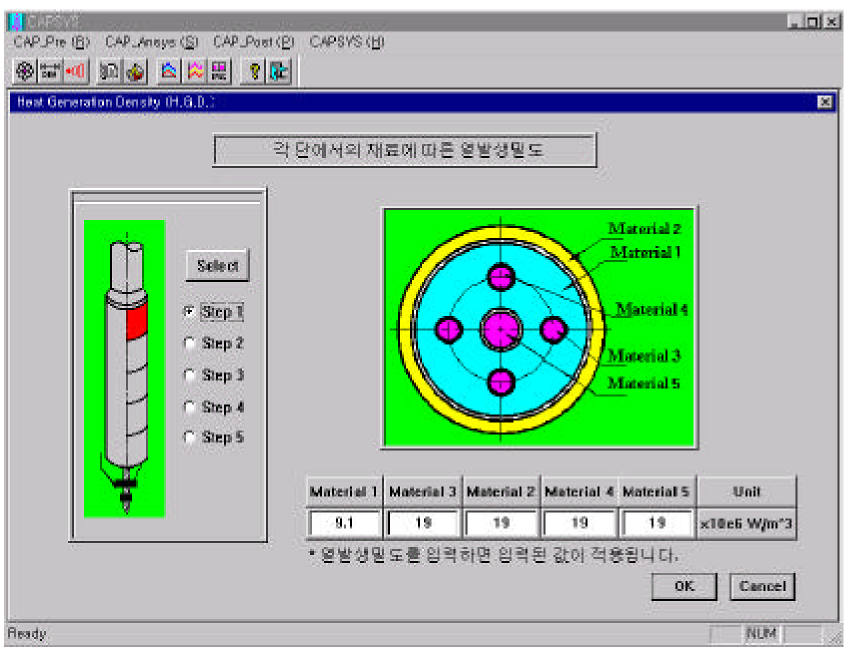

Fig. 6 Input window for material properties

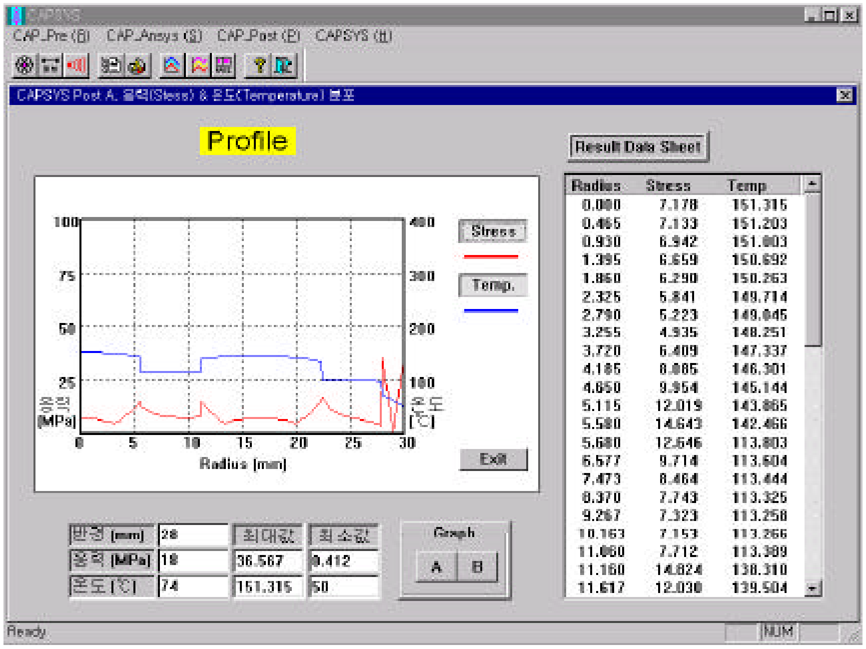

Fig. 7 Profile window for post processsor
(Temperatures and thermal stresses)

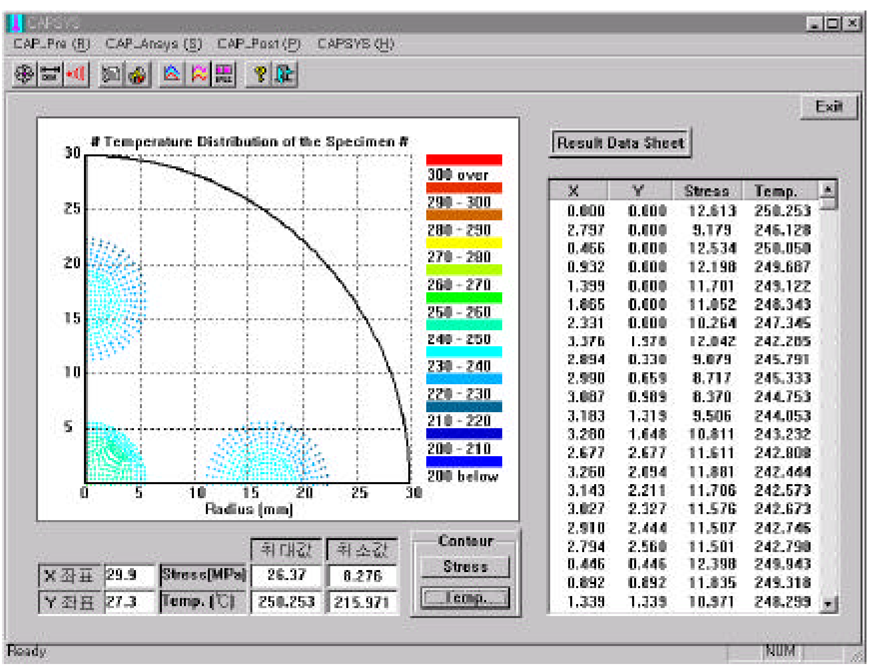

Fig. 8 Profile window for speciemen parts of capsule