

# 원자력 주기기용 볼트 개폐구조물의 해석과 ANSYS를 이용한 전용 해석 프로그램의 개발

전성문\* · 서의권\* · 심현보\* · 김태완\*\* · 이부윤\*\*

(1997년 4월 28일 접수)

## An Analysis of Bolted Opening Structure and Development of Analysis Expert System Using ANSYS

S. M. Jun, E. K. Suh, H. B. Shim, T. W. Kim and B. Y. Lee

**Key Words :** Bolted Opening Structure(볼트 개폐구조물), Graphical User Interface(그래픽 사용자 인터페이스), Open Programming Architecture(개방형 프로그래밍기법)

### Abstract

Bolted opening structures is widely applied for class 1 machinery of nuclear plant with strict design requirement. As the shape of the bolted opening structure is non-axisymmetric due to the existence of stud bolts although it is almost axi-symmetric, 3D analysis is required to satisfy such kind of design requirements. Because as much as possible trial computations are need to get an optimal design condition in the limited period of basic design, an easy and fast analysis tool is useful in the design stage. In the paper, a transformation technique of non-axisymmetric problem into quasi-axisymmetric has been proposed based on the general purpose commercial code ANSYS. Both the pre-processor which incorporates the technique and prepares data and post-processor which prepares arranged results from the huge output of commercial code have been developed to help the design engineers.

### 1. 서 론

Fig. 1에서 예시한 볼트 개폐구조물(bolted opening structure)은 뚜껑(cover plate)과 플랜지(flange) 사이에 몇 개의 스톨드 볼트(stud bolt)로 초기 접촉압력을 발생시켜 내부의 고온고압의 증기를 밀봉하는 원리로 된 구조물이다. 이때 보다 긴밀한 밀봉을 위하여 이 사이에 개스킷(gasket)을 삽입한다. 원자력발전소의 안전도 1급(class 1) 기기들 가운데 일차 배관(primary piping)을 제외한 모든

기기들이 정기적인 보수점검의 편의를 위하여 이러한 형태의 볼트 개폐구조물 요소를 가지고 있다. 만약 발전소의 가동 중에 뚜껑과 플랜지 사이에 증기의 누출이 발생되면 발전소의 가동이 중단되는 치명적인 결과를 초래할 수 있어 증기의 누출을 막을 수 있는 구조적으로 안전한 볼트 개폐 구조물의 설계가 필수적이다.

이러한 볼트 개폐구조물을 설계를 하기 위하여는 적절한 방법을 사용하여 응력해석을 수행할 필요가 있으며, 기본설계 단계에서는 설계변수를 다양하게 변화시켜 가면서 최적조건을 도출하여야 하기 때문에 정확성과 동시에 실효성이 보장되는 방법을 택하여야 할 필요가 있다. 일반적으로 3차원 해석이

\*회원, 영남대학교 기계공학부

\*\*회원, 한국중공업(주) 기술연구원

축대칭 또는 2차원 해석에 비하여 해의 정확성은 우수한 편이나, 해를 구하기 위한 노력과 계산시간이 과도하게 많이 소요되고 해석을 통하여 얻은 결과가 과도하게 많기 때문에 정작 설계에 반영할 내용에 혼선을 초래할 수가 많다. 그러나 축대칭 또는 2차원 해석의 경우, 해의 정확성은 3차원 해석에 비하여 떨어지는 편이나, 해를 구하기 위한 노력과 계산시간이 절감되는 장점이 있고, 아울러 설계변수의 영향을 쉽게 파악할 수가 있어 기본설계시 최적조건을 도출하는데 큰 도움을 줄 수가 있다. 볼트 개폐구조물은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전체적으로는 축대칭구조의 형상이지만 원주상에 배열된 스테드 볼트에 의해 축대칭성이 파괴되므로 엄밀한 해석을 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 스테드 볼트를 적절하게 모델링하여 축대칭 문제로 전환하게 되면 2차원 축대칭 구조물로 해석할 수 있다. 그러나 이러한 등가 축대칭 모델의 경우, 적절하지 못한 스테드 볼트 모델링은 해의 정확성을 떨어뜨릴 수가 있으므로 신중하게 모델링을 할 필요가 있다.

또한 해석의 관점에서 볼트 개폐구조물은 보수구(manway)와 뚜껑, 뚜껑 또는 개스킷 덮개판(gasket retainer plate)과 개스킷, 보수구와 개스킷, 뚜껑과 개스킷 덮개판 사이에서의 접촉, 스테드 볼트의 초기 체결력, 내부에 밀봉된 고온고압 증기에 의한 열변형 및 기계적 변형이 복합적으로 작용하는 상당히 복잡한 비선형 문제이며, 장기간에 걸친 운전 횟수(cycle)에 의한 피로 문제도 복합적으로 작용하고 있어 설계자가 이러한 구조물을 해석하기 위해서는 상당한 정도의 숙련을 요구하고 있다.

이러한 제반 문제점들을 극복한 볼트 개폐구조물의 해석을 위해서는 전용 프로그램을 개발하는 것이 타당하지만, 전용 프로그램의 개발에 소요되는 시간과 경제적인 면에 비해 해의 신뢰성이 입증되어 있고 사용의 편의성 및 전후처리과정에서 유리한 상용 프로그램을 이용하여 표준해석 모델을 개발하고 이를 위한 전용 전후처리 프로그램을 개발하는 것이 훨씬 효율적이고 경제적이다.

본 연구에서는 기하학적으로 복잡한 3차원 형상을 지니는 원자력 주기기용 볼트 개폐구조물에 대한 2차원 축대칭 유한요소해석(2D Axisymmetric FE Analysis)을 위해 이미 해의 정확성 및 유용성

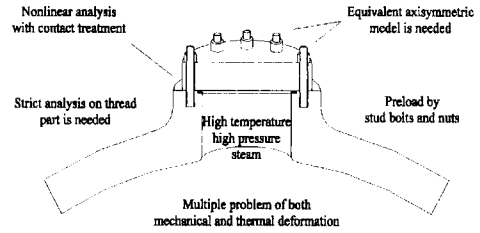


Fig. 1 Mechanical and thermal interaction of bolted opening structure.

이 검증된 상용 프로그램인 ANSYS 5.2를 이용한 표준해석 모델을 개발하고, 이를 바탕으로 볼트 개폐구조물 해석 전용의 전처리 프로그램(preprocessor)을 개발하여 설계자가 간단한 설계변수의 입력만으로도 쉽게 해석을 수행할 수 있도록 하고, ANSYS 5.2의 해석결과도 간단한 표(table)형식으로 정리해 주는 후처리 프로그램(postprocessor)을 개발하여 해석결과도 쉽게 파악할 수 있도록 하여 실제 설계자로 하여금 주어진 조건을 만족시키면서 경제적으로 최적설계조건을 도출하는데 도움을 줄 수 있도록 하였다.

## 2. ANSYS를 이용한 원자력 주기기용 볼트 개폐구조물의 해석

실제 볼트 개폐구조물은 탑헤드(top head)와 보수구, 뚜껑, 개스킷 덮개판, 개스킷으로 구성되어 있으며, 보수구와 뚜껑이 스테드 볼트와 너트로 체결되어 있고 이 체결력에 의해 내부의 고온고압 증기의 기밀을 유지한다.

볼트 개폐구조물은 고온고압의 증기와 직접 접촉해 있기 때문에 증기의 온도에 의한 구조물의 열변형과 압력에 의한 구조물의 기계적 변형 그리고 스테드 볼트와 너트의 체결에 의한 구조물 내부의 초기변형 해석을 동시에 수행해야 한다. 하지만 각각의 경우를 동시에 해석한다는 것은 계산시간이 과도하게 소요된다는 점때문에, 열변형해석을 위한 구조물 내부의 온도분포변화를 발전소의 가동 중에 발생할 수 있는 증기의 온도변화에 대한 모든 경우에 대해 미리 열해석을 수행할 필요가 있고, 초기 체결력에 의한 초기변형 또한 별도로 해석을 하여 필요한 경우 중첩하여 사용한다.

볼트 개폐구조물의 구조해석은 설계 압력상태에 대한 해석과 작동상태의 온도, 압력변화에 따른 해

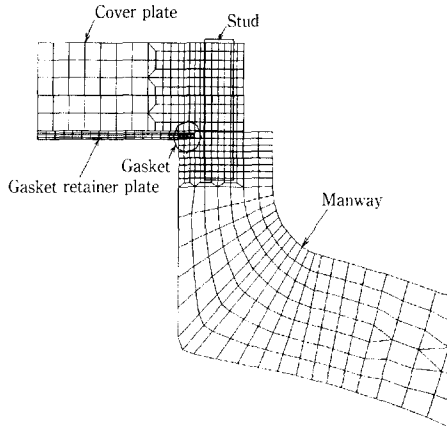


Fig. 2 The finite mesh of bolted opening structure.

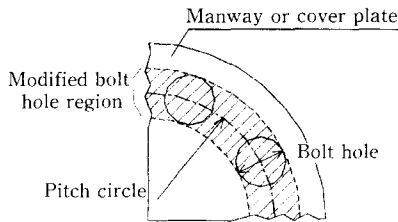


Fig. 3 Modification of stud bolt hole region within manway or cover plate.

석으로 크게 나누어진다.

먼저 초기 체결력과 설계 압력만이 작용되는 설계 압력상태에 대한 해석은 초기 체결력 해석결과에 구조물 내부 벽면에 설계 압력을 부과하여 해석을 수행하였고, 초기 체결력과 열변형, 그리고 증기 압력이 모두 작용하는 실제 작동상태에 대한 해석은 초기 체결력 해석결과에 열해석결과로부터의 온도데이터를 읽고 구조물 내부 벽면에 작동 상태의 증기압력을 부과하여 해석을 수행하였다. 그런데 실제 작동상태에 대한 해석에서는 발전소 가동 중에 발생할 수 있는 증기의 온도와 압력상태에 대한 모든 조건별로 해석을 수행하였다.

### 2.1 2차원 축대칭 해석 모델의 구성

Fig. 2는 볼트 개폐구조물의 해석을 위한 2차원 축대칭 표준 모델의 형상과 사용된 유한요소 메쉬(mesh)의 형상이다. 접촉이 일어나는 부분인 보수구와 뚜껑, 뚜껑과 개스킷 덮개판(gasket retainer plate), 개스킷 덮개판과 개스킷, 보수구와 개스킷 사이에서의 접촉처리는 점 대 면 접촉요소(point

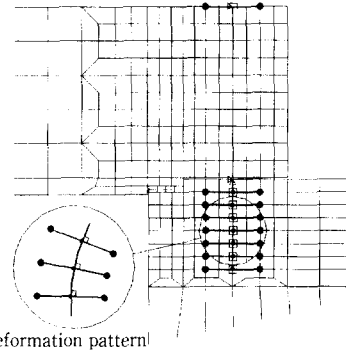


Fig. 4 Coupling of stud bolt and manway.

to surface contact element)를 사용하였다.

### 2.2 축대칭 해석 모델을 위한 가정

원주 상에 불연속적으로 배열되어 있는 스테드 볼트로 인해 전체적인 해석 모델의 축대칭성이 파괴된다. 따라서 보수구와 뚜껑에 배열되어 있는 스테드 볼트 구멍부위를 원주 방향으로 연속적인 모델이 되도록 수정하였다.

Fig. 3에서와 같이 볼트 개폐구조물은 스테드 볼트 구멍때문에 축대칭성이 파괴된다. 이를 등가 축대칭 모델로 전환하기 위하여는 스테드볼트 구멍의 영향을 고려해야 할 필요가 있다. 여기에서는 스테드 볼트의 영향을 탄성계수의 변화로 고려하였으며, 수정된 스테드 볼트 구멍영역에서의 재료의 탄성계수 값( $E_{mm}$ )은 스테드 볼트 구멍에 의한 면적 감소의 영향을 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

$$E_{mm} = E_M \left[ 1 - \frac{N \cdot A_H}{A_{MM}} \right]$$

$$A_H = \left( \frac{\pi}{4} \right) \cdot D_H^2$$

$$A_{MM} = \pi \cdot D_{BC} \cdot D_H$$

$E_{mm}$  : 수정된 스테드 볼트 구멍영역의 탄성계수

$E_M$  : 원래의 보수구나 뚜껑의 탄성계수

$N$  : 스테드 볼트의 개수

$A_H$  : 전체 스테드 볼트 구멍의 면적

$A_{MM}$  : 수정된 스테드 볼트 구멍영역의 면적

$D_H$  : 스테드 볼트 구멍직경

$D_{BC}$  : 스테드 볼트 구멍중심이 이루는 원의 직경

또 스테드 볼트는 축대칭 빔 요소(beam element)로 모델링하였고 보수구와 뚜껑의 변형에 따른 회전각과 스테드 볼트의 굽힘각을 일치시키는 구속

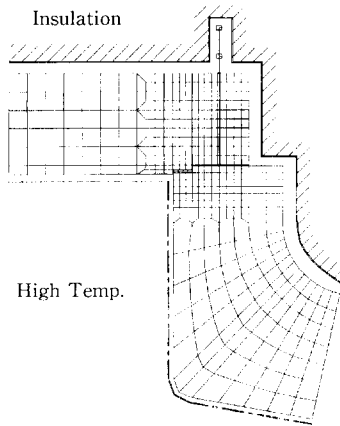


Fig. 5 Thermal boundary condition.

방정식을 사용함으로써 스티드 볼트의 굽힘영향도 아울러 고려하였다. 즉, Fig. 4와 같이 사각형으로 표시된 스티드 볼트의 절점에서의 회전각을 원으로 표시된 주위의 보수구의 절점간의 상대변위로 발생되는 회전각과 동일하게 하는 구속방정식을 첨가시킨다.

### 2.3 해석 모델의 하중조건

Fig. 5는 표준 모델에 작용하는 열해석을 위한 경계조건을 나타내었다.

표준해석 모델에서 내부 증기의 온도에 의한 구조물의 열변형을 해석하기 위해서 구조물 내부의 온도분포를 알아야 하고 이를 위해 열해석을 수행하였다. 구조물의 외부는 단열되었다고 가정하고 구조물의 내부 벽에 접하고 있는 증기의 온도변화에 따른 구조물 내부의 온도분포를 해석하였다. 또한 온도해석의 결과를 그대로 응력해석에 사용하기 위해서는 동일한 유한요소를 사용하는 것이 편리하다. 응력해석에서 점 대 면 접촉요소를 사용하여 접촉처리를 하고 있기 때문에 인접하고 있는 면에서의 절점의 위치가 같아야 할 필요가 없다. 따라서 온도의 연속성이 보장되지 못할 수 있으나, 절점의 위치와 온도와의 구속조건식을 부여하여 온도가 연속적으로 변할 수 있도록 처리하였다.

Fig. 6은 표준 모델에 작용하는 구조 해석에서의 하중 조건이다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 초기 체결력에 대한 하중을 스티드 볼트 상단과 뚜껑의 상면에 힘으로 작용시켰고 내부에 작용되는 증기의 압력을 보수구와 뚜껑의 내벽에 압력 경계조건으로 부여하였다.

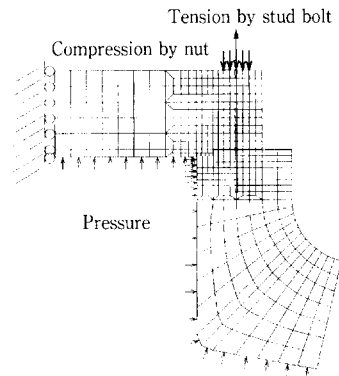


Fig. 6 Structural load boundary condition.

이 때 구조물 내부의 온도분포는 열해석의 결과로부터 얻어서 열변형까지 해석하였다. 우선 초기 체결력에 대해 먼저 해석한 다음, 구조물의 설계 압력에 대한 해석, 그리고 발전소의 운전상태 중에 발생할 수 있는 내부 증기의 온도와 압력변화에 대한 모든 경우에 대한 해석을 순차적으로 수행하여 차후 별도로 이루어질 피로해석을 위한 데이터도 아울러 준비해 준다.

### 2.4 해석결과

Fig. 7은 스티드 볼트에 의한 초기 체결력의 영향을 해석한 결과로서 응력이 스티드 볼트와 보수구가 체결된 부근에 집중해서 나타남을 알 수 있다. Fig. 8은 설계압력에 대한 해석결과를 나타내었고 Fig. 9는 작동상태에 대한 여러 조건의 해석 중 임의의 한 조건에 대한 해석결과를 나타내었다. Fig. 10은 Fig. 9의 하중조건에 사용된 구조물 내부의 온도분포에 대한 열해석결과로 접촉면에서 온도가 연속적으로 변화하고 있음을 보여주고 있어 접촉면에서의 온도의 연속성을 부여하는 구속조건식이 적절하게 적용되었음을 알 수 있다.

## 3. 전용 ANSYS 전후처리 프로그램 개발

볼트 개폐구조물의 표준해석 모델을 위한 ANSYS 전후처리 프로그램은 그래픽 사용자 인터페이스(Graphical user Interface) 환경하에서 기본적인 데이터를 입력받아 ANSYS를 이용한 해석에서 필요한 로그 파일을 생성시켜 주고, ANSYS에서의 해석이 완료된 다음 ANSYS의 결과 파일에서 필요한 부분만을 읽어서 이를 원하는 형태의 보고서

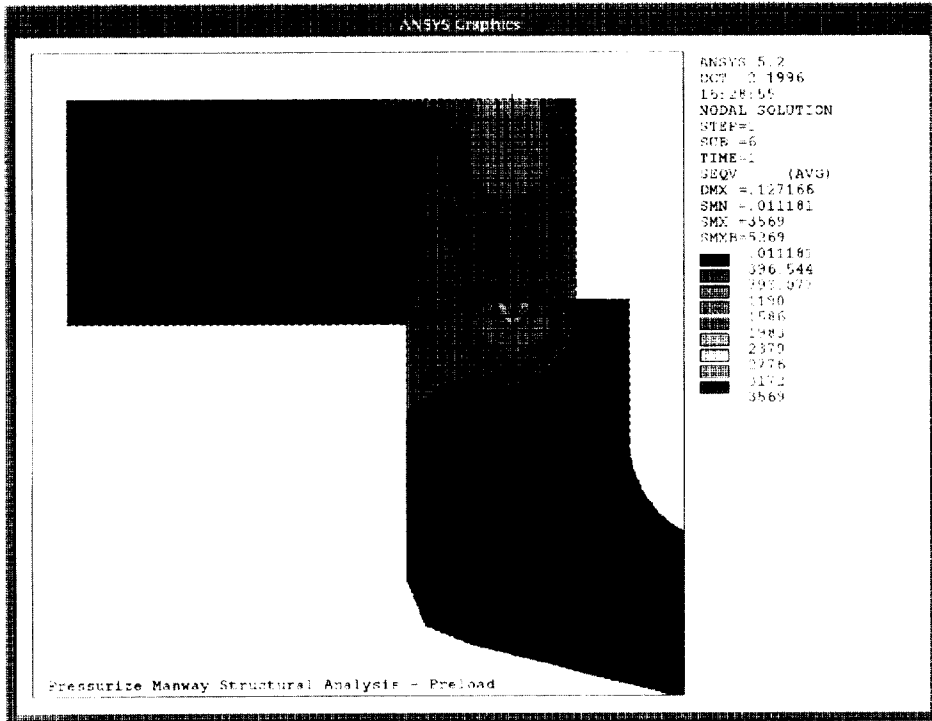


Fig. 7 Result of preload analysis.

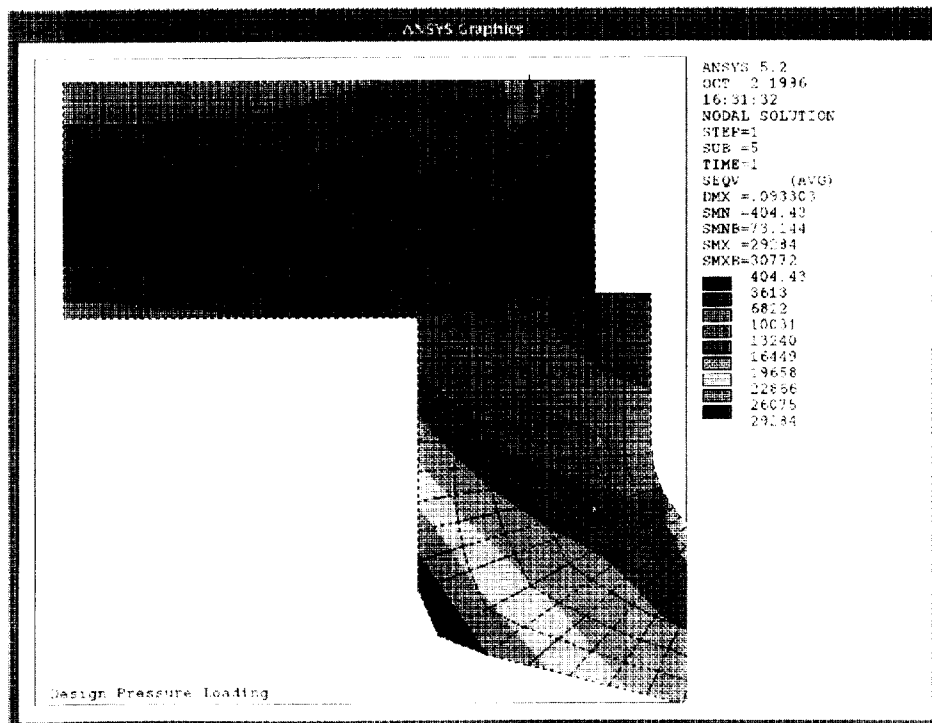


Fig. 8 Result of structural analysis for design pressure state.

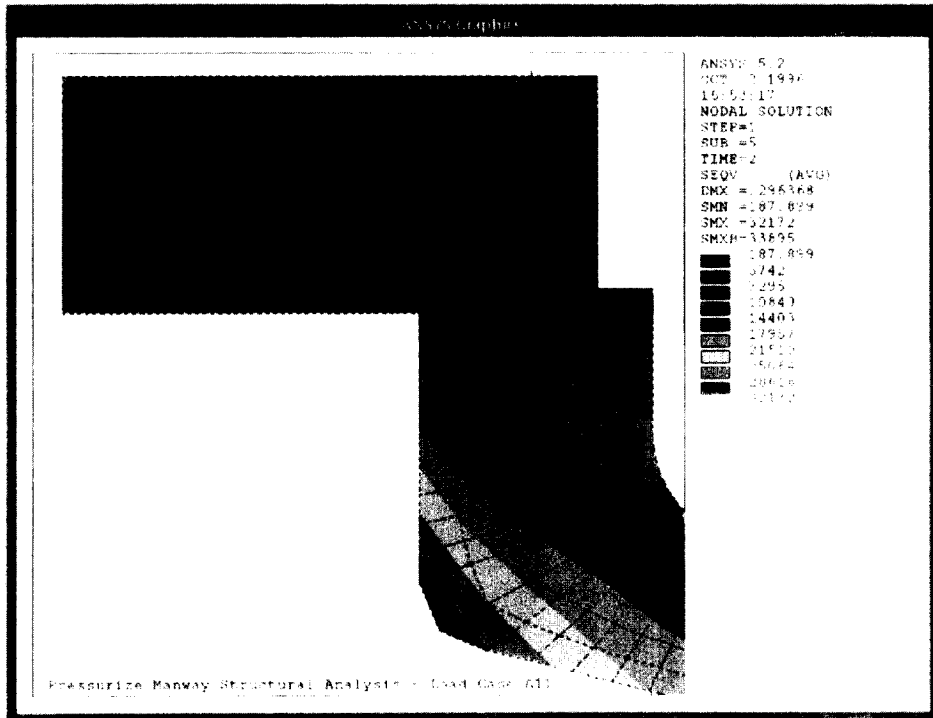


Fig. 9 Result of transient load case analysis.

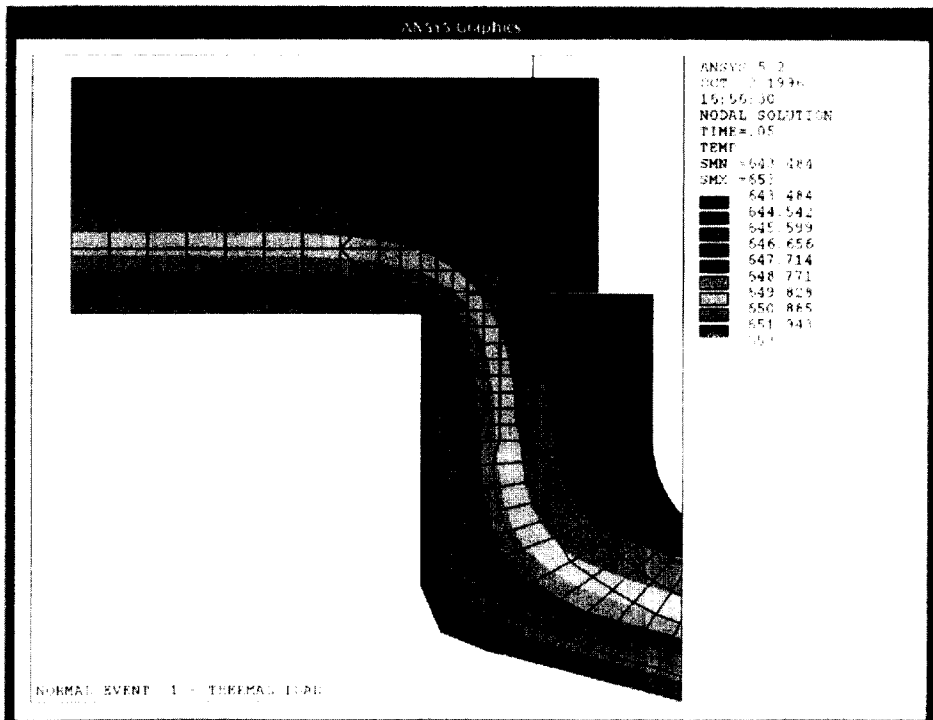


Fig. 10 Result of thermal event analysis.

양식의 파일로 생성시켜 주는 역할을 한다.

Fig. 11에 ANSYS 전후처리 프로그램의 구성도를 나타내었다.

ANSYS 전후처리 프로그램은 사용자의 편의를

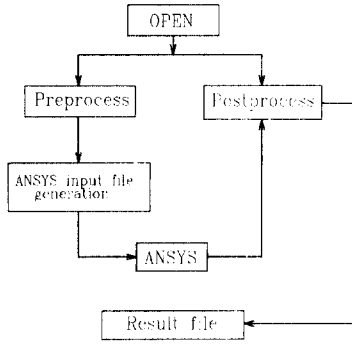


Fig. 11 Structure of ANSYS pre & postprocessor program.

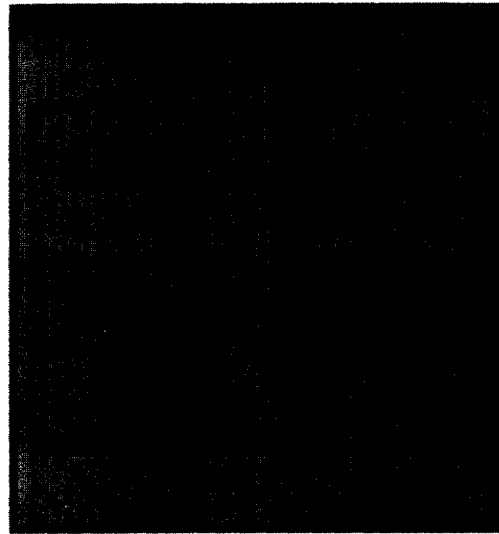


Fig. 12 Basic window of GUI program.



Fig. 13 Basic window of GUI preprocessor.

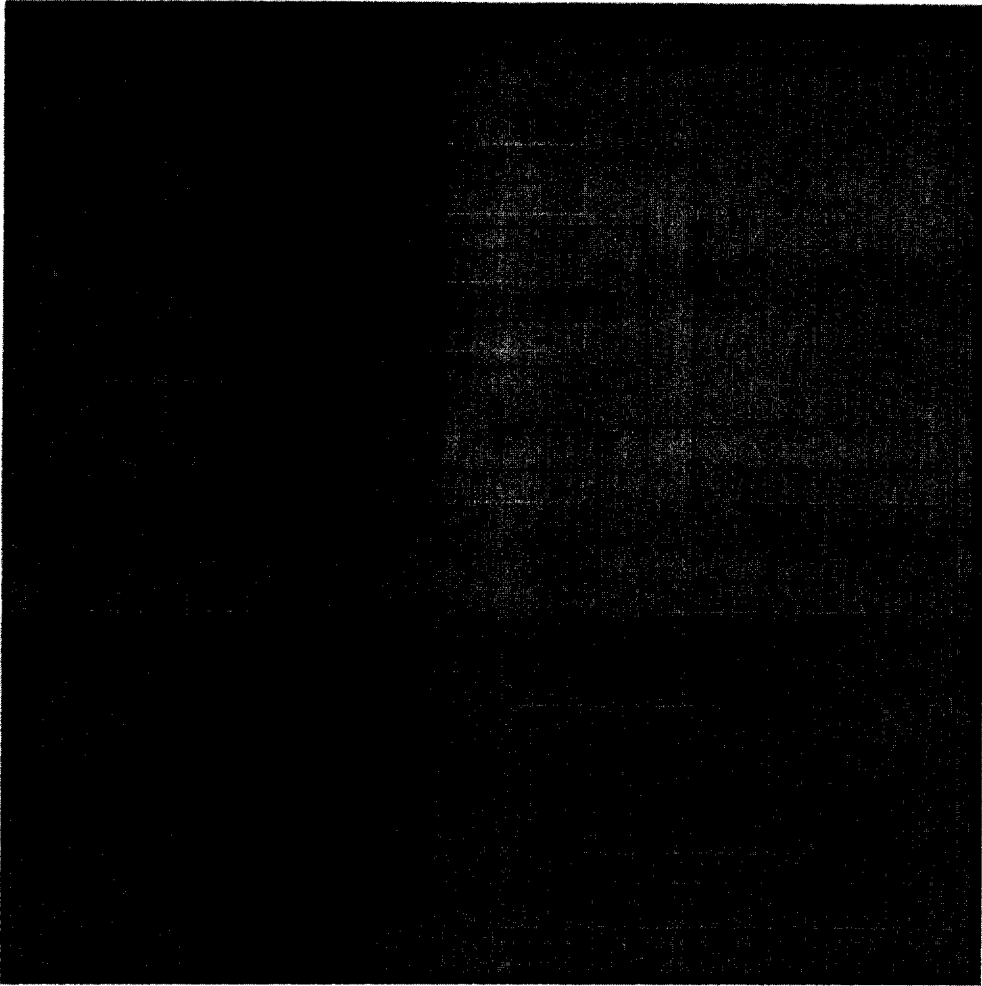


Fig. 14 Manway geometry data input window.

향상시키기 위해서 그래픽 사용자 인터페이스를 사용하여 해석에 관련된 데이터를 입력하게 하였다. 그래픽 모듈을 위한 응용 프로그램은 유닉스(UNIX) 환경 하에서 표준 C와 X Window, OSF/MOTIF를 이용하여 개발하였으며, 데이터 베이스 체계와 마우스 버튼의 클릭을 통한 접근방식을 채택하여 사용자가 프로그램을 쉽게 사용할 수 있도록 하였다. 또한 실행에 필요한 명령어를 외부적으로 제어하여 의도하는 작업을 별도의 프로그램에 의해 자동적으로 실행하는 방식인 개방형 프로그래밍기법(open programming architecture)을 이용하여 ANSYS 입력용 로그 파일생성 및 해석결과 파일 생성 프로그램과의 인터페이스를 유지하도록 개발하였다.

Fig. 12는 ANSYS 전후처리 프로그램의 기본 창으로 각각 PRE, POST, EXIT의 3개의 버튼이 있어 필요한 버튼을 클릭(click)하면 각각 전처리 프로그램, 후처리 프로그램 등을 실행할 수 있다.

### 3.1 전처리 프로그램

전처리 프로그램은 궁극적으로 형상의 치수 데이터와 물성치, 구조물에 작용되는 하중데이터를 입력받아서 ANSYS 입력용 로그 파일을 생성시켜주는 프로그램이다.

Fig. 13은 전처리 프로그램의 기본 창으로 크게 가하학적 치수 입력부분, 물성치 입력부분, 하중조건 입력부분의 3가지로 구분된다.

먼저 각각의 해석에 필요한 치수, 물성치, 하중



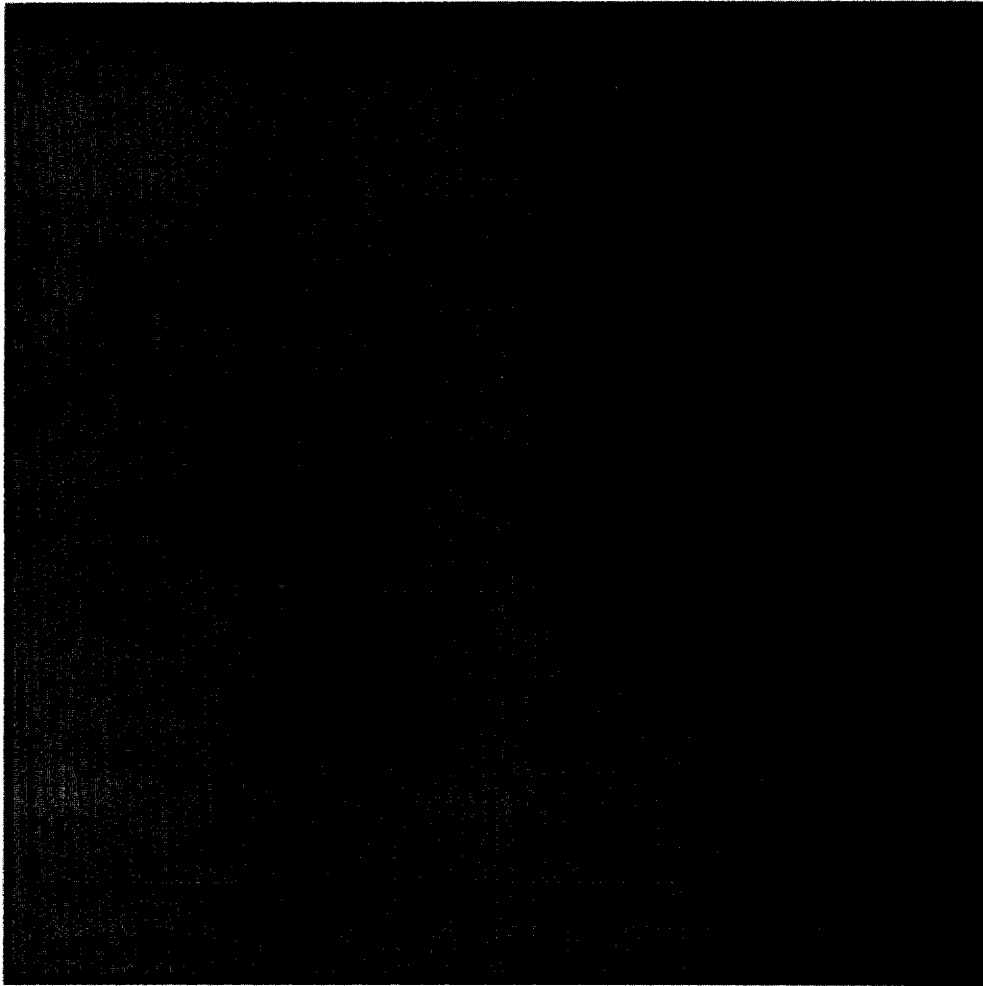


Fig. 15 Coverplate geometry data input window.

조건에 관한 데이터를 그래픽 사용자 인터페이스 환경 하에서 파일로 저장을 한 다음, 전처리 프로그램의 기본 창에서 각각의 데이터 파일들의 경로를 지정해 주고 실행버튼을 선택하면 ANSYS 입력용 로그 파일을 자동으로 생성해 준다.

Figs. 14~16과 같이 치수데이터 입력 창은 비트맵(Bitmap) 파일을 사용하여 실제 도면과 동일한 그림 위에서 치수를 입력할 수 있게 하였고, 치수, 불성치 및 하중조건에 관한 모든 데이터 입력창에서는 파일의 생성 및 기존 파일의 수정이 가능하게 되어 있다.

### 3.2 후처리 프로그램

후처리 프로그램에서는 표준 모델의 해석 후 생

성된 ANSYS의 결과 파일에서 필요한 부분만을 읽어서 이를 원하는 형태의 보고서 양식의 파일로 변환시켜 주는 역할을 한다.

Fig. 19는 후처리 프로그램의 실행 창으로, 실행 창의 그림에 표시된 단면(section)부는 설계의 안전성여부를 판단하게 되는 중요단면 부위로 후처리 프로그램에서는 이 단면에서의 해석결과를 정리해 주어 설계자의 판단을 도와주도록 한다.

### 3.3 해석결과의 검증

Fig. 20은 해석결과 중 설계 압력상태에서 중요한 부분이라고 생각되는 E, F, G 단면에서의 응력의 강도를 일례로 나타낸 것이다. 그래프에서 보는 바와 같이 기존의 계산결과<sup>(13)</sup>와 표준 모델을 사용하

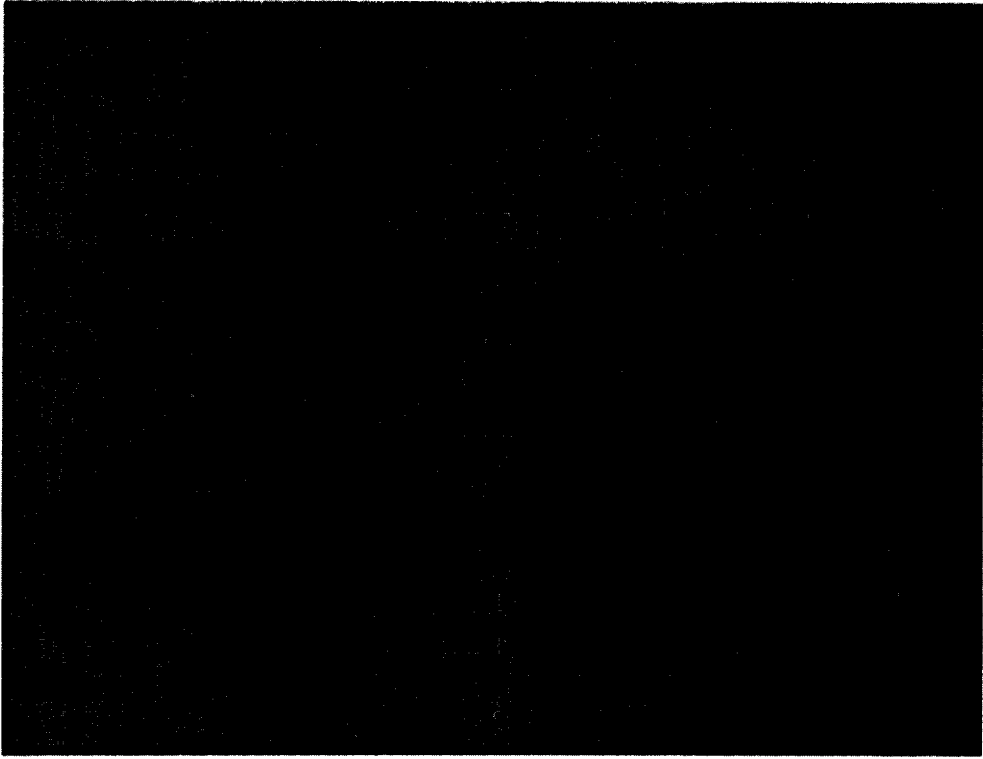


Fig. 16 Studbolt and nut geometry data input window.



Fig. 17 Material property data input window.

이 해석한 결과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. E 단면에서의 응력강도 값이 기존의 계산결과와 차이가 나는 이유는 본 연구에서는 면 대 짐 짐촉 방법을 사용하였고 기존의 연구에서는 짐 대 짐 짐촉 방법을 사용함에 따라 짐촉처리방법의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기하학적으로 3차원 형상을 지니면서, 짐촉에 의한 초기응력의 작용, 고온 고압의 증기에 노출되기 때문에 기계적 및 열응력이 동시

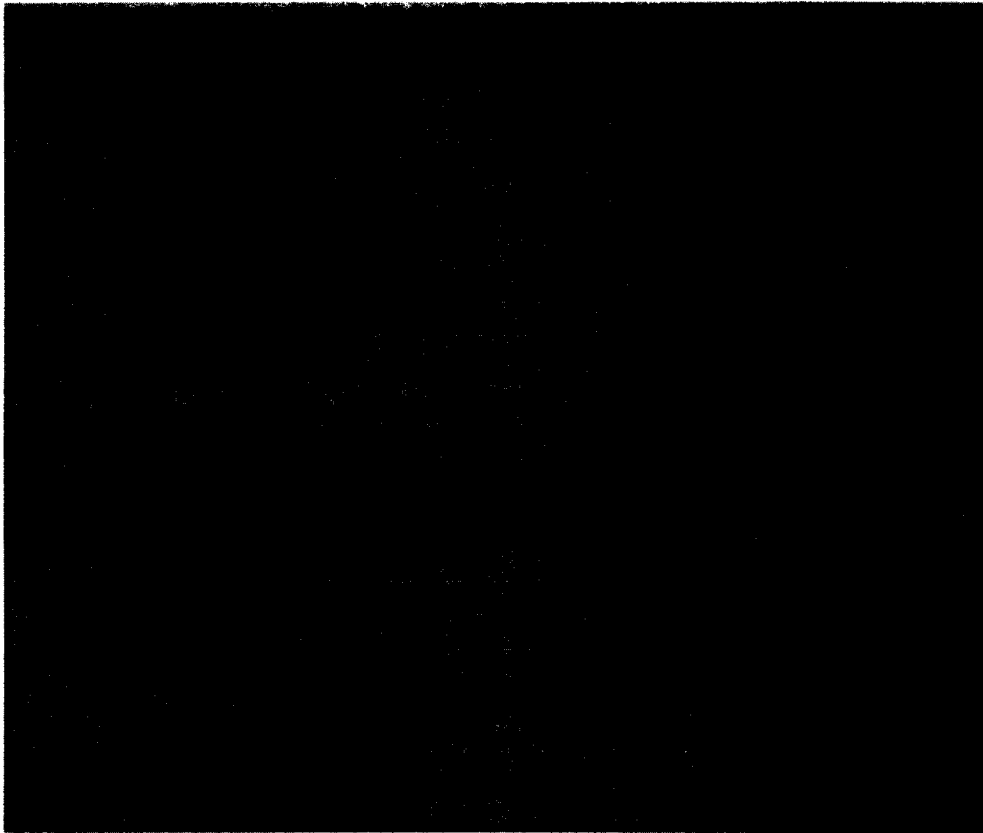


Fig. 18 System loading data input window.

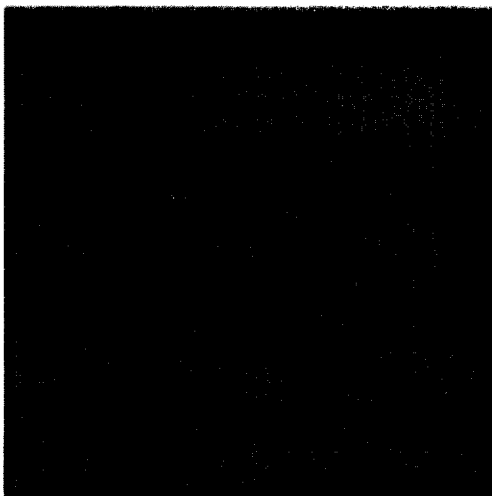


Fig. 19 Postprocessor window.

에 작용하고 있는, 또한 고도의 신뢰성을 요구하는 원자력 주기기용 볼트 개체구조물의 설계를 위한

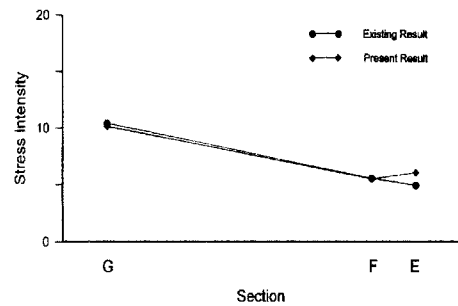


Fig. 20 The comparison of design pressure analysis result.

능가 최대칭 유한요소해석 모델을 개발하였고, 이 해석 모델을 바탕으로 한 전후 처리프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 해의 신뢰성과 사용자 편의성이 입증된 ANSYS 5.2를 이용하여 표준해석 모델을 개발하였고, 이 모델을 기준하여 전처리 프로그램을 개발함으로써 시간이 과도하게 소요되면서도 사

용의 편의성, 정확성, 확장성 등에 어려운 점이 있는 전용해석 프로그램의 개발대신 상용 프로그램의 기능을 최대한으로 이용하면서, 사용자의 편의성을 최대한으로 살리고자 하였다.

전처리 프로그램은 그래픽 사용자 인터페이스 환경을 이용하였기 때문에 설계단계에서 화면상에서 지시하는 대로 설계자가 간단한 몇 개의 설계데이터만을 입력하거나, 기존 데이터를 수정 입력함으로써 쉽게 표준해석 모델을 생성시킬 수 있으며, 후처리 프로그램으로 해석 모델의 주요 관심 결과만을 정리하여 볼 수 있어 매우 효율적이다.

이러한 전용 전후처리 프로그램의 개발은 설계자가 상용프로그램을 숙달하는데 소요되는 시간과 노력을 줄여줄 수 있을 뿐만 아니라, 데이터 준비의 미숙 및 복잡한 비선형 접촉처리 등에서 수반될 수 있는 모델링 오류의 가능성을 줄여줄 수도 있어, 설계자가 설계고유의 업무에 충실하게 할 수 있어 더욱 최적화된 설계를 해 줄수 있는 장점이 있다. 따라서 본 방법은 설계실에서 자주 봉착하게 되는 전형적인 형태를 가진 복잡한 비선형 문제의 해석에 가장 적합하게 활용될 수 있으며, 경우에 따라서는 CAE 도입 초기단계의 중소기업체 등에서 CAE의 도입을 쉽게 해 줄 수 있는 방법으로도 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- (1) ANSYS Inc., 1995, *Introduction to ANSYS Revision 5.2*
- (2) ANSYS Inc., 1995, *Structural Nonlinearities User's Guide for Revision 5.1 Volume I.*
- (3) ANSYS Inc., 1995, *Structural Nonlinearities User's Guide for Revision 5.1 Volume II.*
- (4) ANSYS Inc., 1992, *Upgrading to ANSYS 5.0*
- (5) ANSYS Inc., 1992, *ANSYS User's Manual Revision 5.0 Volume I Procedures.*
- (6) ANSYS Inc., 1992, *ANSYS User's Manual Revision 5.0 Volume II Commands.*
- (7) ANSYS Inc., 1992, *ANSYS User's Manual Revision 5.0 Volume III Elements.*
- (8) Heller, D. and Ferguson, P. M., 1994, *Motif Programming Manual for OSF/Motif Release 1.2*, O'Reilly & Associates Inc.
- (9) Ferguson, P. M., 1994, *Motif Reference Manual for OSF/Motif Release 1.2*, O'Reilly & Associates Inc.
- (10) Pressure Vessels with 1989 Addenda, 1989, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Section VIII, 1989 Edition.
- (11) ANSI B1.1, 1982, *Unified Inch Screw Threads (UN and UNR Tread Form).*
- (12) Cobb, B. J., 1963, *Preloading of Bolts*, *Product Engineering*, August 19.
- (13) Kim, J. S., 1995, *Structural and Fatigue Analysis of Pressurizer Manway and Cover Plate*, UC-221ZS-207 Rev. 1, Korea Heavy Ind. & Constr. Co. LTD.