압력 용기 유한 요소 해석 프로그램 개발

전윤철†(두산중공업)• 김태완*(두산중공업)

Development of Customizing Program for Finite Element Analysis of Pressure Vessel

YoonCheol Jeon and TaeWoan Kim

Key Words : Pressure Vessel Analysis Program(압력 용기 해석 프로그램), ANSYS, Microsoft Visual Basic, ASME Boiler and Pressure Vessel Code(ASME 보일러와 압력 용기 코드)

Abstract

PVAP (Pressure Vessel Analysis Program V1.0) was developed by adopting the finite element analysis program ANSYS V6.0, and Microsoft Visual Basic V6.0 was also utilized for the interfacing and handling of input and output data during the analysis. PVAP offers the end user the ability to design and analyze vessels in strict accordance with ASME Section VIII, Division 2. More importantly, the user is not required to make any design decisions during the input of the vessel. PVAP consists of three analysis modules for the finite element analysis of the primary components of pressure vessel such as head, shell, nozzle, and skirt. In each module, finite element analysis can be performed automatically only if the end user gives the dimension of the vessel. Furthermore, the calculated results are compared and evaluated in accordance with the criteria given in ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2. In particular, heat transfer analysis and consecutive thermal stress analysis for the junction between skirt and head can be carried out automatically in the skirt-to-head module. Finally, report including the above results is created automatically in Microsoft Word format.

1. 서 론

압력 용기를 설계, 제작할 경우 압력 용기에 작용하는 설계 조건(design condition)과 운전 조건(operating condition)을 유한 요소 해석에 적용하여 해석 결과에 따른 건전성 평가 결과가 요구된다. 응력 해석 결과는 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2 에 제시된 기준에 의해 압력 용기의 건전성 여부를 평가한다.

당사에서는 유사한 형상의 압력 용기를 생산하는 경우가 빈번하며, 이 때마다 일상적인 유한 요소 해석을 수행한다. 이에 따라 압력 용기에 대한 전처리, 해석, 후처리 및 보고서 작성에 이르는 일련의 과정을 자동으로 수행할 수 있는 자동화 프로그램이 절실히 요구되었다. 본 논문에서는 이러한 요구에 따라 개발된 PVAP (Pressure Vessel Analysis Program)의 구성과 ASME B&PV Code 의 건전성 평가 기준 및 PVAP 를 사용한 압력 용기 해석 사례를 소개하고자 한다.

† 두산중공업, 기술연구원

* 두산중공업, 기술연구원

2. PVAP 의 기본 구성

2.1 PVAP 의 구성

PVAP 는 Fig. 1 과 같이 3 개의 해석 모듈로 구성되어 있다. 또한, 각각의 해석 모듈에서는 쉘과 노즐부, 헤드와 노즐부, 그리고 스커트와 헤드부에 대한 유한 요소 해석과 해석 결과를 ASME B&PV Code, Section VIII, Division 2 에 제시된 기준으로 건전성 여부를 평가하는 기능이 포함되어 있다.

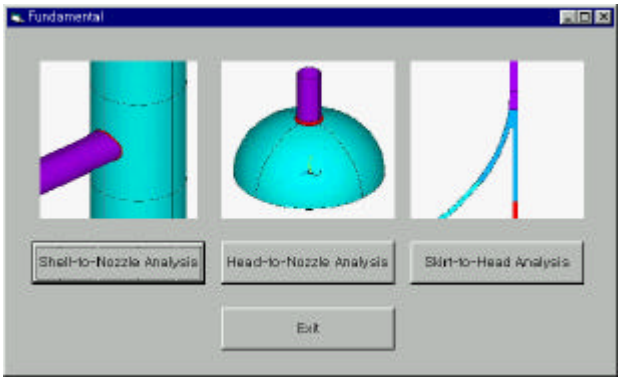

Fig. 1 Fundamental layout of PVAP

2.2 쉘과 노즐부 해석 모듈

쉘과 노즐부 해석 모듈에서는 쉘과 연결된 노즐에 작용하는 노즐 하중(Nozzle Load)과 쉘과 노즐 내부에 작용하는 내압을 가하여 유한 요소 해석을 수행한다. 노즐 하중은 x, y, z 각 방향의 힘과 모멘트로 구성되며, 노즐 하중을 가하기 위해 노즐 끝단의 중심에 절점을 만들고 이를 노즐의 끝단 절점과 보(beam) 요소(BEAM4)를 사용하여 연결한다. Fig. 2는 쉘과 노즐부의 유한 요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. 쉘, 노즐 및 필렛부에 대해서는 SHELL63 요소가 사용되었다. Fig. 3은 쉘과 노즐부 해석 모듈에서의 노즐 하중, 재질 및 요소 밀도를 입력하고 앞서 입력한 형상 치수를 이용해 ANSYS 입력 파일을 만드는 화면이다. 쉘, 노즐 및 필렛부의 재질 물성치는 재질 Database에서 재질명을 선택함으로써 입력할 수 있으며, Database에 존재하지 않는 재질에 대해서는 사용자가 외부 입력을 할 수 있다.

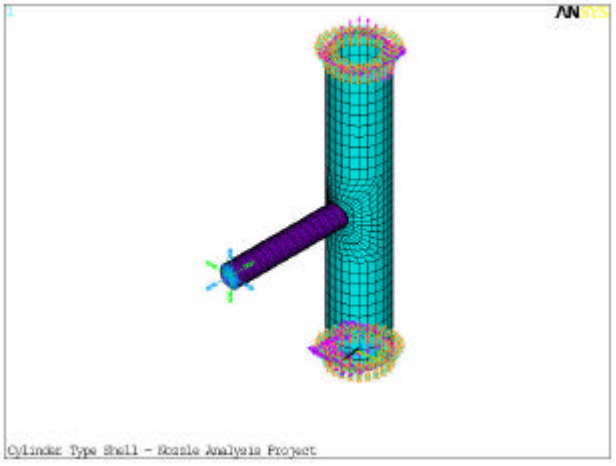

Fig. 2 FE Meshes and Boundary Conditions for Shell-to-Nozzle Analysis

해석이 끝난 후에는 각 재질의 TOP, MIDDLE, BOTTOM 면에서의 응력 값을 ASME B&PV Code, Section VIII, Division 2에 제시된 기준과 비교하여 건전성 여부를 평가한다.

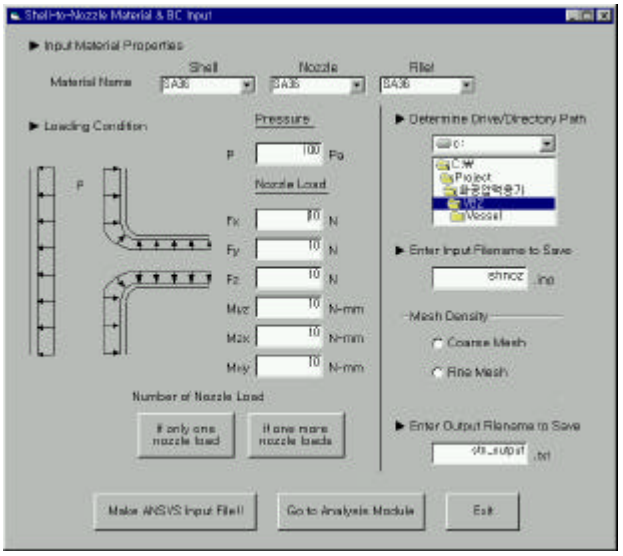

Fig. 3 Input Window for the Mesh Density, Material, Internal Pressure and Nozzle Load during the Shell-to-Nozzle Analysis

2.3 헤드와 노즐부 해석 모듈

헤드와 노즐부 해석 모듈에서는 헤드와 연결된 노즐부에서의 노즐 하중과 헤드와 노즐 내부에 내압을 가하여 유한 요소 해석을 수행한다. 노즐 하중을 가하기 위해 헤드와 연결된 노즐 끝단의 중심에 절점을 만들고 노즐의 끝단 절점과 보(beam) 요소(BEAM4)를 사용하여 연결한다. Fig. 4는 헤드와 노즐부의 유한 요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. 헤드, 노즐 및 필렛부에 대해 SHELL63요소가 사용되었다. Fig. 5는 헤드와 노즐부 모듈에서의 노즐 하중, 재질 및 요소 밀도를 입력하고 앞서 입력한 형상 치수를 이용해 ANSYS 입력 파일을 만드는 화면이다. 재질 선택과 건전성 평가는 쉘과 노즐부 해석 모듈에서와 같은 방법으로 수행한다.

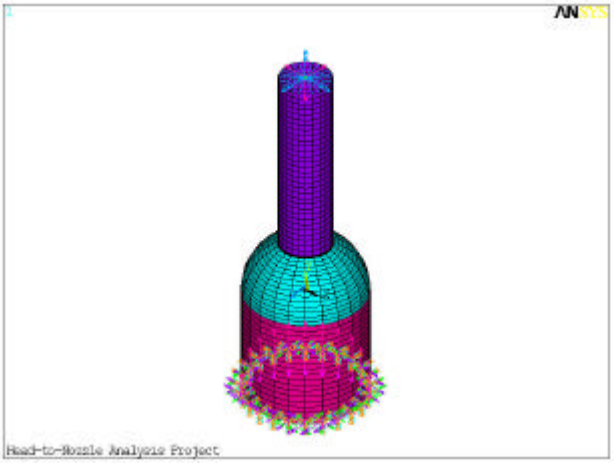

Fig. 4 FE meshes and boundary conditions for Head-to-Nozzle analysis

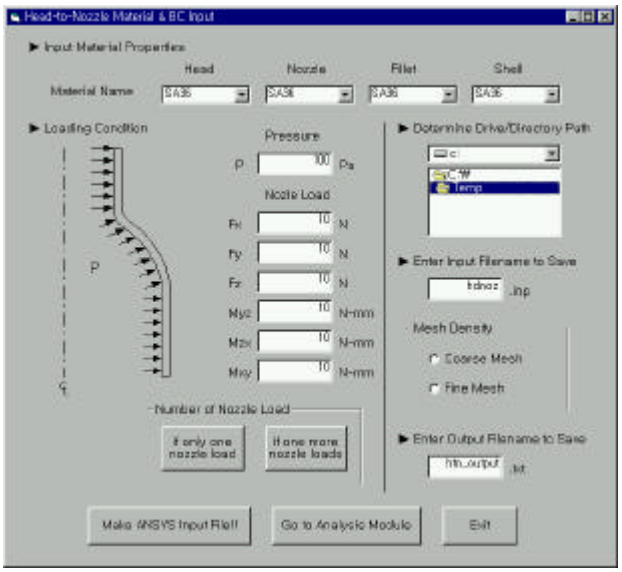

Fig. 5 Input Window for the Mesh Density, Material, Internal Pressure and Nozzle Load during the Head-to-Nozzle Analysis

2.4 스커트와 헤드부 해석 모듈

스커트와 헤드부의 해석을 위해서는 우선 스커트 형식을 선택하게 되는데, PVAP에서는 당사에서 가장 많이 생산하고 있는 2가지 형식 중에서 선택할 수 있다.

압력 용기 내부의 운전 조건 온도와 외기 온도차에 의한 열응력을 고려하기 위해 열전달 해석과 열응력 해석을 수행한다. 열전달 해석을 위해서는 내부와 외부에서의 온도와 대류 열전달 계수를 사용자가 입력할 수 있다. 또한, 헤드와 스커트에는 내부의 열손실을 줄이기 위해 단열 처리를 하는데, 헤드와 스커트의 연결 부위 전면을 단열 처리할 경우 연결 부위에서 온도차에 따른 열응력과 내압에 따른 기계적인 응력이 한 위치에 중첩되어 작용하게 되므로 ASME B&PV Code의 기준을 초과하는 경우가 있다. 따라서, 열응력과 기계적인 응력이 한 위치에서 중첩되는 것을 피하기 위해 헤드와 스커트의 연결 부위에 Hot Box라는 작은 공간을 만들어 둔다. Hot Box 공간에는 유체의 유동이 거의 없기 때문에 복사 열전달만이 발생한다고 가정하여 복사 열전달을 위해 LINK31 요소를 사용하며, Hot Box 공간 전체의 온도가 일정하다고 가정하여 열 질량 (thermal mass) 요소인 MASS71 요소를 사용한다.

Fig. 6은 스커트 형식 1에 대한 스커트와 헤드부 모듈에서의 재질, 요소 밀도 및 열 물성치 등을 입력하고, 앞서 입력한 형상 치수를 이용해 ANSYS 입력 파일을 작성하는 화면이다. 유한 요소의 크기는 coarse와 fine 중에서 선택할 수 있으며, Hot Box의 고려 여부도 선택이 가능하다.

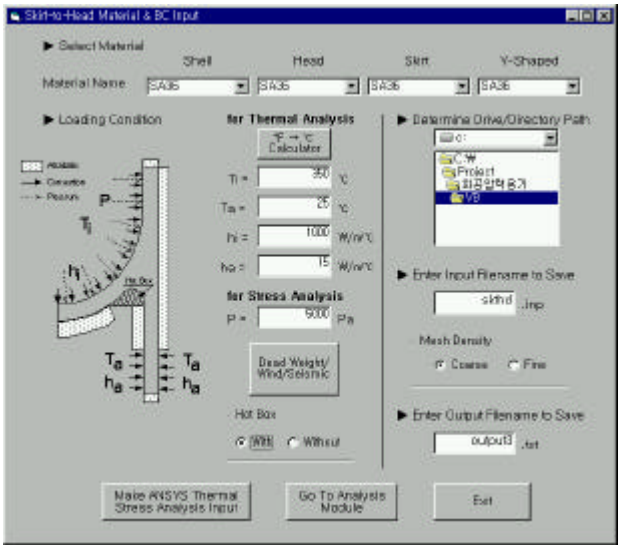

Fig. 6 Input Window for the Mesh Density, Material, Internal Pressure and Thermal Properties during the Skirt-to-Head Analysis

Fig. 7은 스커트 형식 1에 대한 스커트와 헤드부의 열전달 해석을 위한 유한 요소 격자와 경계조건을 나타낸다. 헤드, 쉘 및 스커트에 대해서는 PLANE55 요소(축대칭 조건)를 적용하였다.

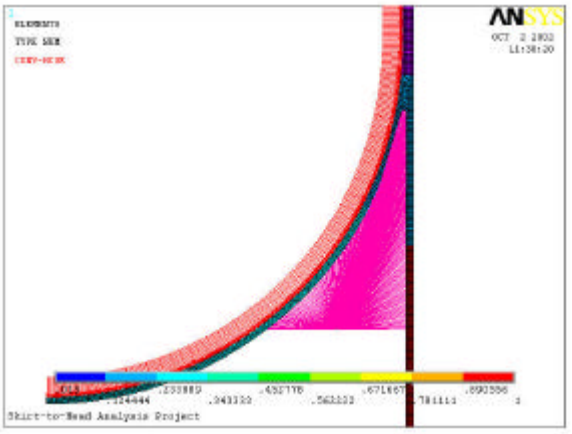

Fig. 7 FE meshes and boundary conditions for the heat transfer analysis of Skirt-to-Head

한편, 스커트와 헤드부에서의 열응력 해석을 위해 열전달 해석에서 계산한 온도 분포 결과와 압력 용기에 작용하는 내압을 적용한다. 스커트가 지면과 닿는 부분에 대해서는 모든 자유도를 구속하였다.

열응력 해석을 위해 헤드, 쉘 및 스커트에 대해서는 PLANE42 요소(축대칭 조건)로 바꾸어 적용하였으며, Hot Box를 고려하기 위한 LINK31과 MASS71 요소는 제거하였다. 또한, 자중, 풍 하중, 지진 하중을 해석에 고려하기 위해 별도의 계산 과정을 통해 각 하중에 의한 응력을 계산한다.

스커트와 헤드부의 열응력 해석을 수행한 후 응력을 평가할 위치에 대해 각 응력 성분을 구하고,

각 성분에 대해 자중, 풍 하중 및 지진 하중에 의한 응력을 중첩하여 응력을 구한 뒤 ASME B&PV Code 의 기준과 건전성 여부를 평가한다. Fig. 8은 열응력 해석 결과를 ASME B&PV Code 의 기준과 비교하여 건전성 여부를 평가하는 화면이다.

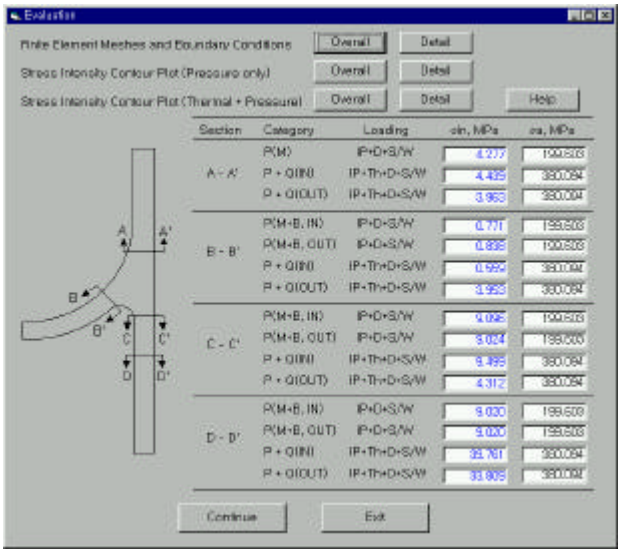

Fig. 8 Evaluation of Calculated Stress in the Skirt-to-Head

3. PVAP 의 적용 사례

3.1 쉘과 노즐부 해석 모듈

Fig. 9는 PVAP 의 쉘과 노즐부 해석 모듈에 적용한 쉘과 노즐의 치수, 필렛의 곡률 반경 등의 형상 치수를 입력하는 화면이다.

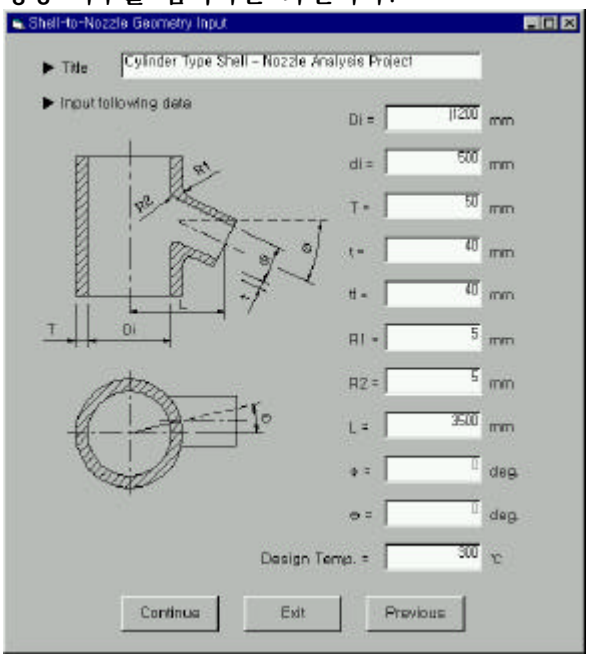

Fig. 9 Geometric quantities input window for Shell-to-Nozzle

Fig. 10은 각각 쉘과 노즐부에서의 TOP 면에서의 응력 분포를 나타낸다. 이 때 압력 용기 내부에 작용하는 내압은 100Pa 이며, 경계 조건은 Fig. 2와 동일하다.

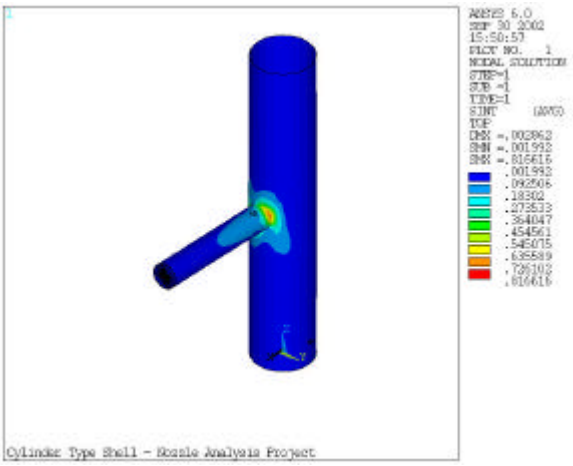

Fig. 10 Stress Intensity Distribution of Shell-to-Nozzle: Top Section

Fig. 11 은 응력 해석 결과를 ASME Code 의 기준과 비교한 건전성 평가 결과이다. 해석된 응력 값이 ASME Code 의 평가 기준을 만족시킬 경우 파란색으로 표시되며, 평가 기준을 초과할 경우 붉은색으로 표시된다. Fig. 11 의 경우 해석 결과는 ASME Code 의 기준을 만족시킨다.

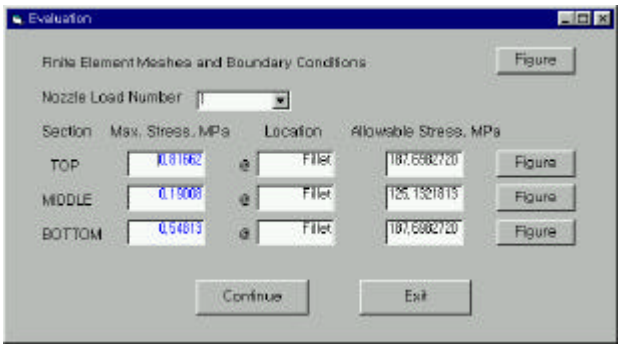

Fig. 11 Evaluation of Calculated Stress in the Shell-to-Nozzle Module

3.2 헤드와 노즐부 해석 모듈

Fig. 12 는 PVAP 의 헤드와 노즐부 해석 모듈에 적용한 헤드와 노즐의 치수, 필렛의 곡률 반경 등의 형상 치수를 입력하는 화면이다.

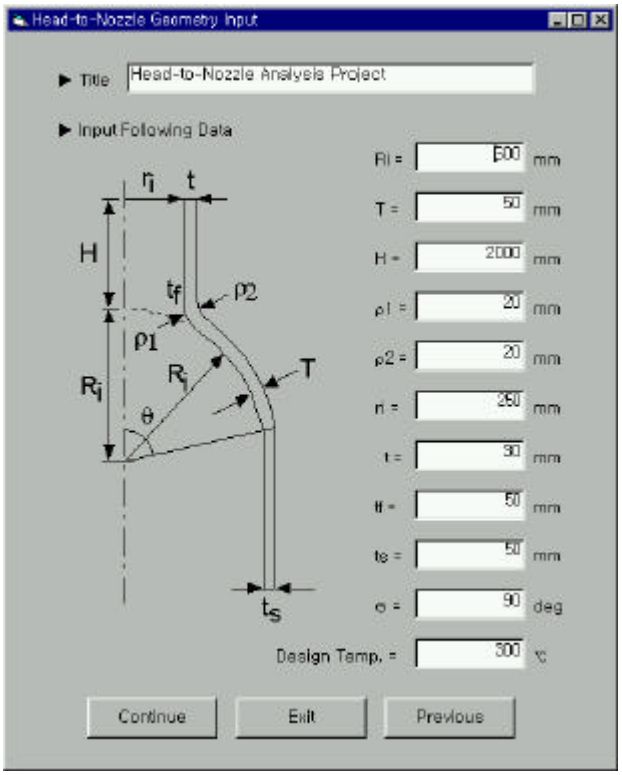

Fig. 12 Geometric quantities input window for Head-to-Nozzle

Fig. 13은 각각 헤드와 노즐부의 TOP 면에서의 응력 분포를 나타낸다. 이 때 압력 용기 내부에 작용하는 내압은 100Pa 이며, 경계 조건은 Fig. 4와 동일하다.

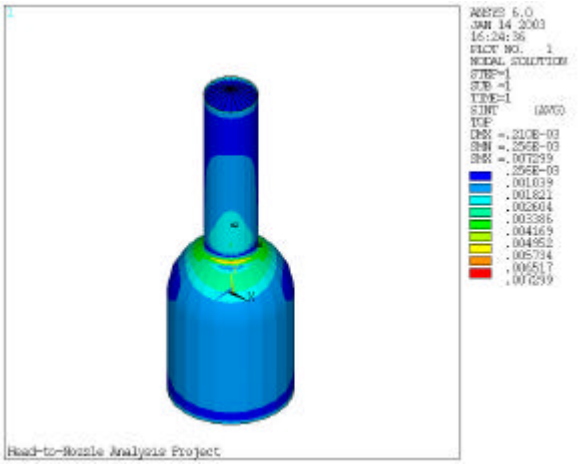

Fig. 13 Stress Intensity Distribution of Head-to-Nozzle: Top Section

Fig. 14는 응력 해석 결과를 ASME Code 의 기준과 비교한 건전성 평가 결과이다.

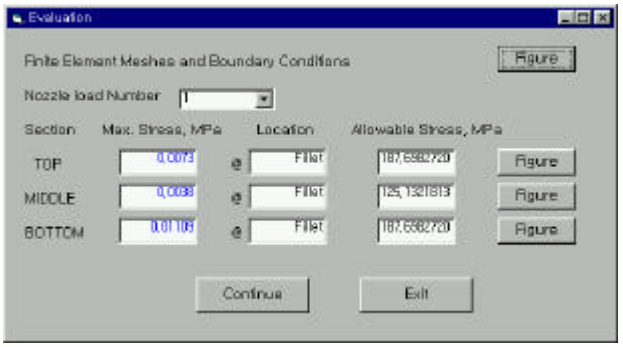

Fig. 14 Evaluation of Calculated Stress in the Head-to-Nozzle Module

3.3 스커트와 헤드부 해석 모듈

Fig. 15는 Fig. 6의 Skirt Type 1에 대한 헤드, 쉘, 그리고 스커트에 대한 부재의 치수를 입력하는 화면이며, Fig. 6에 나타난 바와 같이 열전달 해석에 필요한 경계 조건을 적용하고, Hot Box를 고려한 열전달 해석에서 얻은 온도 분포는 Fig. 16과 같다.

Fig. 17은 열전달 해석으로부터 얻은 온도 분포 결과를 열응력 해석의 초기 조건으로 적용하고, 압력 용기 내부에 작용하는 내압 5 kPa를 적용한 경우 스커트와 헤드부에서 발생하는 응력 분포를 나타낸다. Fig. 18에서 보는 바와 같이 Hot Box를 고려할 경우 최대 응력은 Head와 Skirt의 연결 부위에서 보다는 스커트쪽 아래 부분에서 발생한다.

스커트와 헤드부의 응력 해석 결과에 대한 ASME Code의 기준과의 비교는 Fig. 8과 같다.

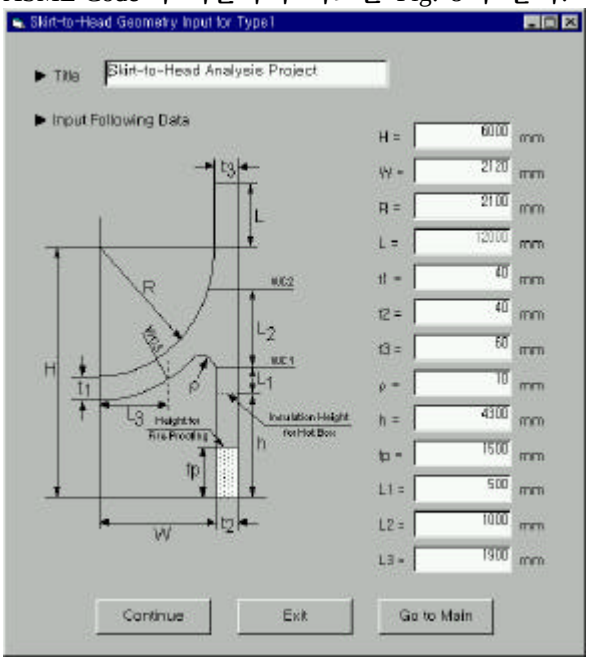

Fig. 15 Geometric quantities input window for Skirt-to-Head

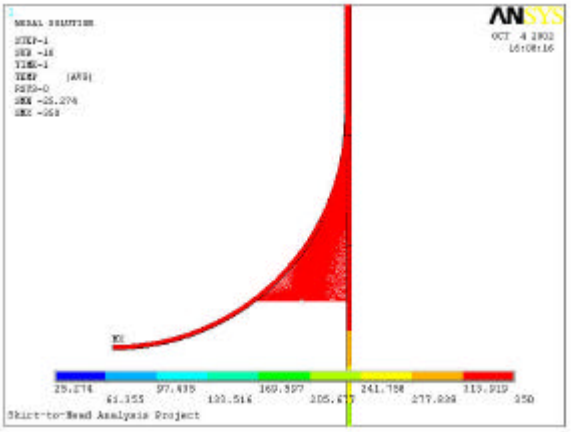

Fig. 16 Temperature Distribution of Skirt-to-Head by considering Hot Box

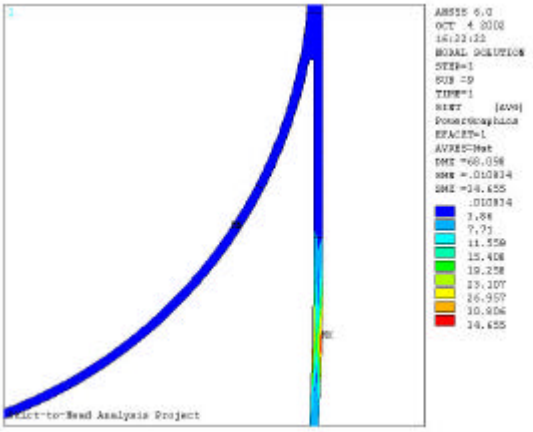

Fig. 17 Stress Intensity Distribution of Skirt-to- Head

4. 결 론

본 논문에서는 당사가 개발한 압력 용기에 대한 해석 자동화 프로그램인 PVAP (Pressure Vessel Analysis Program V1.0)의 해석 사례를 소개하였다. 해석 자동화 프로그램은 Microsoft Visual Basic V6.0으로 제작되었으며, 해석 프로그램으로 ANSYS V6.0 을 사용하였다. 해석으로부터 얻은 응력 값은 ASME B&PV Code, Section VIII, Division 2의 설계 기준에 따라 건전성 여부를 평가한다.

당사가 개발한 해석 자동화 프로그램 PVAP는 그동안 수작업으로 진행해왔던 압력 용기에 대한 응력 해석 및 건전성 평가 업무의 소요 시간을 획기적으로 단축하였으며, 건전성 평가에 불합격한 압력 용기의 설계 변경에 대해서도 능동적으로 대처할 수 있다.

참고문헌

(1) ANSYS V6.0 Online Manual, 2001.
(2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, ASME, New York, 2001.
(3) MSDN Library Visual Studio V6.0, 1998.
(4) *Fundamentals of Heat Transfer*, F.P. Incropera and D.P. De Witt, Wiley & Sons Inc., 1981.