

원자력 발전소용 압력용기의 볼트 연결 조립부 구조설계를 위한 3 차원 접촉 응력 해석

이부윤*, 김태완**

Three-Dimensional Contact Stress Analysis for Structural Design of Bolted Joint Assembly of Pressure Vessels in Nuclear Power Plants

Boo Youn Lee* and Tae Woan Kim**

ABSTRACT

Bolted joint assembly for nuclear power plants consists of various components : cover plate, retainer plate, manway flange, gasket and stud bolts/nuts. To guarantee the soundness of the joint, it is important to prevent leakage through the gasket and reduce the stress concentration factor at the thread root. In this paper, Submodeling technique for the finite element method is proposed to accurately compute three dimensional contact stresses which govern the sealing performance and the maximum contact stresses at the threads root. For verification of global solutions used as boundary conditions of submodel solution, the stresses on the cover plate and the manway flange are measured by strain gages when internal pressure is applied to the bolted joint assembly. The numerical results are compared with the experimental results.

Key Words : Bolted Joint Assembly(볼트 연결 조립부), Contact Stress(접촉 응력), Stud Bolt(스터드 볼트), Gasket(가스켓), Thread(나사산)

1. 서론

원자력 발전소의 증기 발생기와 같은 대형 압력 용기에 사용되는 볼트 연결 조립부는 두 개의 플랜지(Flange)가 스터드(Stud) 볼트와 너트로 체결되는 구조로서, Fig. 1 과 같이 덮개 판(Cover plate), 리테이너 판(Retainer plate), 출입부 플랜지(Manway flange), 가스켓(Gasket) 및 스터드 볼트, 너트로 구성되어 있다. 원자력 발전소 가동 시에 볼트 연결 조립부의 내면에는 내부의 유체에 의해 고온 고압의 하중이 작용하며, 조립 시에 스터드 볼트,

너트를 사용하여 체결력(Preload)을 가하여 가스켓과 리테이너 판 사이에 압축 응력이 작용하도록 설계되어야 한다. 따라서 발전소의 가동 시에 가스켓에서의 기밀 유지를 통하여 누설(Leakage)을 방지하고 스터드 볼트와 너트의 나사산(Thread)에서의 응력 집중을 최소화하는 것이 중요한 설계 목표라고 할 수 있다.

볼트 연결 조립부에 관한 그 간의 연구는 주로 두 부류로 구분된다. 첫 번째는 Zahavi⁽¹⁾, Sawa 등⁽²⁾이 연구한 가스켓에서의 누설 방지에 관한 것이고, 두 번째는 대표적으로 Fukuoka⁽³⁾가 연구한

* 계명대학교 자동차공학과

** 한국중공업(주) 기술연구원

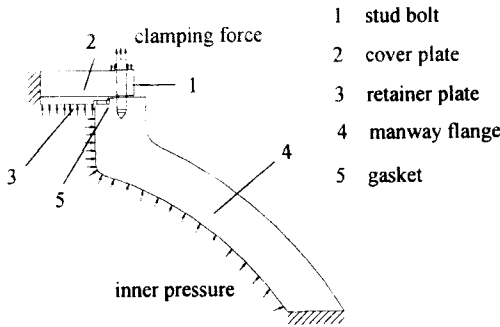


Fig. 1 The components of the bolted joint assembly

유한요소법을 이용한 응력 집중 계수의 평가에 관한 것이다. 근래에 Dubois⁽⁴⁾와 Chaaban 등⁽⁵⁾은 2차원 유한요소법을 이용하여 볼트 연결 조립부 전체를 해석한 연구 결과를 발표하였다. 이와 같이 볼트 연결 조립부의 거동을 파악하기 위해 유한요소법을 이용한 해석은 그간 다소 이루어져 왔으나, 덮개 판, 리테이너 판, 출입부 플랜지, 가스켓, 스테드 볼트와 너트로 조립된 전체 구조의 거동을 3차원 유한요소법을 통해 해석한 연구 결과는 그 해석 과정의 어려움때문에 지금까지 발표된 적이 없다.

본 연구에서는 원자력 발전소용 압력용기의 구조설계 단계에서 요구되는 유한요소해석의 일환으로 볼트 연결 조립부의 밀봉 성능을 나타내는 접촉 응력과 나사산에서의 최대 응력을 계산하기 위한 시도로서, 조립부를 구성하는 전체 부품을 고려한 3차원 유한요소 해석을 수행하고자 한다. 유한요소법에 의한 접촉 문제의 해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ABSQUS⁽⁶⁾를 사용하며, 계산의 정확성을 검증하기 위해 내압 하에서 덮개 판과 출입부 플랜지의 응력을 측정하여 해석 결과를 비교하고자 한다.

2.3 차원 접촉 해석 모델

원자력 발전소의 증기 발생기에 사용되는 전형적인 볼트 연결 조립부가 Fig. 2에 표시되어 있으며, 균일 간격의 스테드 볼트 20개가 사용되는 주기적 대칭 형상을 갖는다. Fig. 2에 표시된 바와 같이 볼트 사이의 대칭면을 기준으로 하여 9°

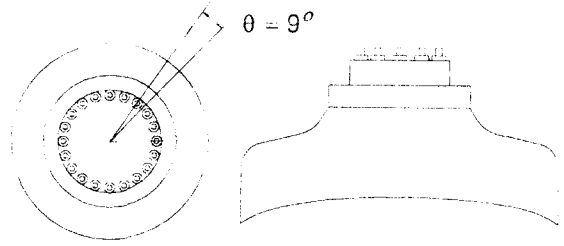


Fig. 2 Configuration of the bolted joint assembly

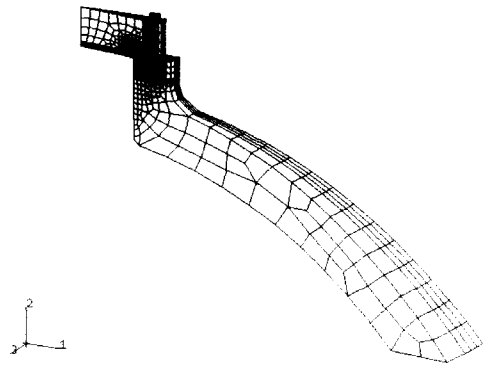
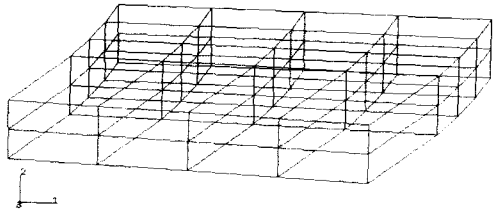


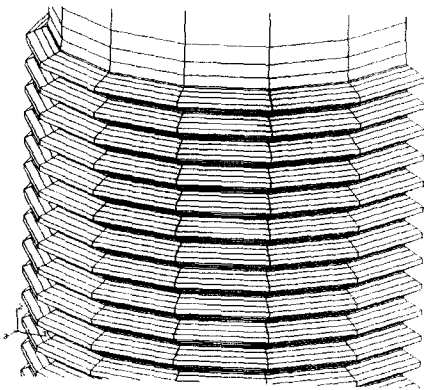
Fig. 3 Finite element mesh configuration of the global model

의 부채꼴 모양의 조각을 유한요소로 모델링한 형상이 Fig. 3에 나타나 있다.

본 연구에서는 조립부 전체 구조의 3차원 접촉 응력을 효율적으로 계산하기 위해서 부 모델링 (Submodeling) 기법을 사용하였다. 부 모델링 기법의 과정은 다음과 같은 일련의 두 가지 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 조립부 전체에 대해서 Fig. 3과 같은 비교적 거친 전체 모델(Global model)을 사용하여 해석한다. Fig. 4는 전체 모델에서 가스켓과 스테드 나사 부위의 상세한 요소 형상을 보여 준다. Fig. 3의 전체 모델에서는 8절점 선형 6면체 요소와 4절점 선형 4면체 요소를 사용하였으며 총 자유도 수는 36612이고, 이 모델을 사용하여 전체 모델 해(Global model solution)가 얻어진다. 일단 전체 해가 계산되면 이 해는 관심 부위의 부 모델 해(Submodel solution)를 구하기 위한 경계 조건으로 사용된다.



(a) Gasket



(b) Stud threads

Fig. 4 Enlarged view of the global model

부 모델링 기법의 두 번째 단계는 국부적인 관심 영역에서의 상세한 해를 얻기 위한 단계로서, 가스켓과 스터드 나사부위를 대상으로 하여 전체 모델에 비해 훨씬 미세하게 요소 분할된 부 모델을 만든다. 이 부 모델의 경계 조건은 전 단계의 전체 모델 해로부터 자동으로 지정된다. 본 연구에서는 두 종류의 부 모델을 사용하여 그 결과를 비교하였으며, Table 1 에는 전체 모델인 Mesh 1 과 두 가지 부 모델인 Mesh 2 와 Mesh 3 에 대하여 관심 부위인 가스켓과 스터드 볼트 부위의 요소와 절점 수를 비교하여 나타내었다.

Fig.5 와 6 은 각각 부 모델 Mesh 3 에서 사용된 가스켓과 스터드 나사산의 요소 형상을 나타내며, 사용된 8 절점 선형 6 면체 요소의 수는 각각 880 과 13320 이다.

이상에서 기술된 유한요소 모델을 사용하여 해를 구하기 위해 볼트 연결 조립부의 기하학적

Table 1 Comparison of mesh size of a global model and submodels.

	Global model		Submodel			
	Mesh 1		Mesh 2		Mesh 3	
	No. of elements	No. of nodes	No. of elements	No. of nodes	No. of elements	No. of nodes
Gasket	32	75	320	486	880	1188
Stud bolt	1193	3345	8640	10011	13320	15280

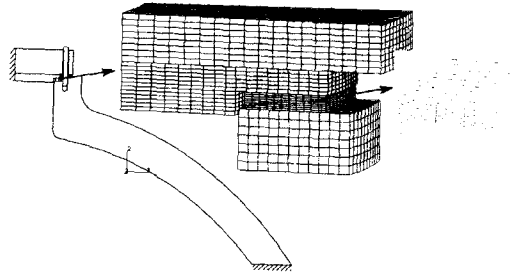


Fig. 5 Mesh configuration of the submodel including the gasket

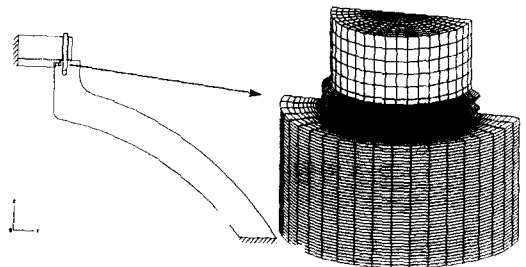


Fig. 6 Mesh configuration of the submodel including the stud threads

치수, 물성치, 내압 등으로는 원자력 발전소의 증기 발생기에서 사용되는 표준적인 수치 자료를 사용하였다.

3. 경계 조건과 접촉 조건

해석을 위해 사용한 경계 조건과 접촉 조건은 Fig. 7 과 같다. 여기서 축대칭 선 상에 위치하는 덮개 판과 리테이너 판의 중심 선에는 축대칭 경계 조건인 $u_r = 0$ 이 적용된다. 출입부 플랜지의 바닥 면에는 $u_z = 0$ 을 지정하였다. 부채꼴 모양의 대칭면인 $\theta = 0^\circ$ 와 $\theta = 90^\circ$ 의 두 면에도 대칭 경계 조건인 $u_\theta = 0$ 이 적용된다.

각 부품 사이에 접촉이 발생할 가능성이 있는 모든 부위에 접촉 조건을 부과하였다. 접촉 가능 부위는 덮개 판과 리테이너 판 사이, 리테이너 판과 가스켓 사이, 가스켓과 출입부 플랜지 사이, 스테드 볼트와 출입부 플랜지의 나사산 부위 등이다. 접촉 표면의 분리 가능성이 있는 리테이너 판과 가스켓 사이, 가스켓과 출입부 플랜지 사이의 접촉 면적을 제외하고는 모두 점착 조건 (Sticking condition) 을 사용하였다.

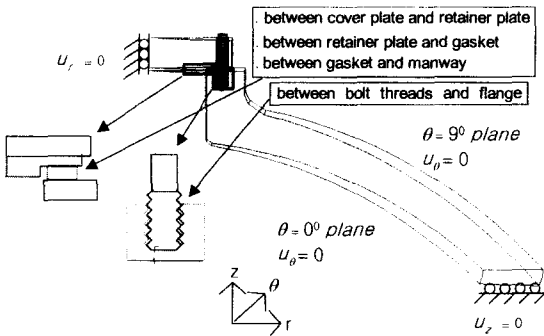


Fig. 7 The boundary conditions and contact conditions

4. 전체 모델의 해석 결과

본 연구의 모든 유한요소 해석은 소 변위 (Small displacement) 해석이며, 단지 접촉 조건의 경계 비선형성때문에 비선형 해석을 수행하였다.

본 절에서는 Fig. 3, 4 의 전체 모델의 해석 결과를 제시한다.

Fig. 8 은 가스켓에서의 접촉 응력인 최대 수직 응력의 분포를 나타내고 있으며, 원주 방향인 θ 축 방향을 따라 거의 일정한 양상을 보인다. 계산된 수직 접촉 응력은 가스켓의 외측 단에서 $\sigma_z = 474MPa$ 로 최대이며, 반경 방향을 따라 외면에서 내면으로 가면서 감소하여 내측 단에서 $\sigma_z = 270MPa$ 로 최소가 된다. 만일 이 수직 접촉 응력이 0 에 가깝게 된다면 가스켓에서의 기밀이 유지되지 않는, 즉 누설의 발생이 예측되는 것이므로 설계 시 정확한 접촉 응력의 계산이 매우 중요하다.

Fig. 9 는 스테드 볼트의 각 나사산에서의 최대 수직 접촉 응력을 나타낸다. Fig. 9 의 수평 축의 나사산 번호 1 은 나사산 중에서 최 상부를 9 는 최 상부로부터 9 번째 나사산을 각각 나타낸다. 계산된 수직 접촉 응력은 스테드 볼트 최상부에 위치한 1 번 나사산에서 $\sigma_z = 480MPa$ 로 최대이며, 볼트 길이를 따라 상부에서 하부로 가면서 감소하여 최하부에서 최소가 된다. 이와 같이 나사산에서 발생하는 응력 집중을 완화하는 것도 효율적인 볼트 연결 조립부 설계의 주요 관심사이므로

Contour	Value (MPa)	Contour	Value (MPa)
1	474	5	352
2	453	6	324
3	427	7	297
4	380	8	270

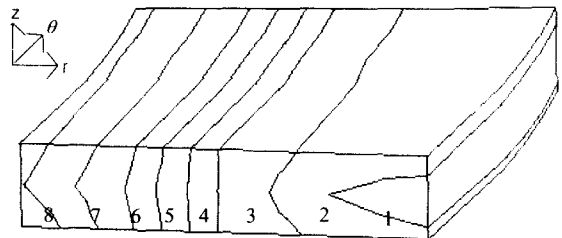


Fig. 8 The normal stress distribution of the gasket

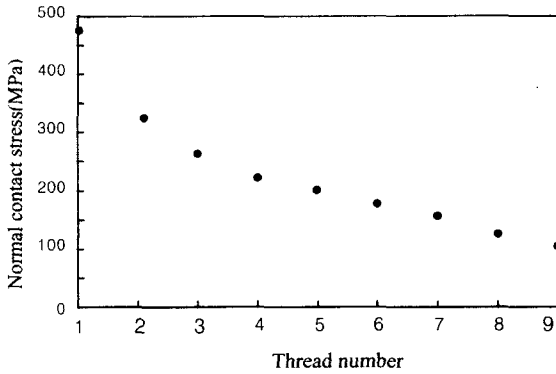


Fig. 9 The maximum normal contact stress for the stud bolt

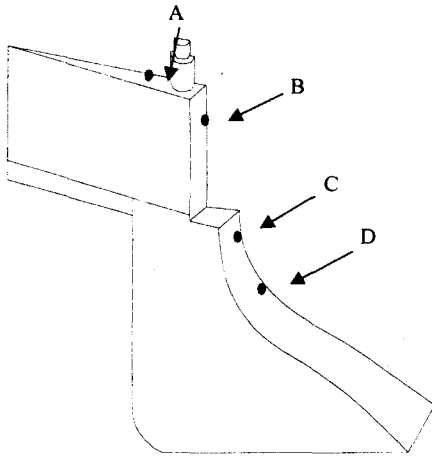


Fig. 10 Location of measurement of stresses during the hydrostatic test

본 연구에서 제시하는 정확한 접촉 응력의 계산이 매우 중요하다.

전체 모델 해의 수치적 정확성을 검토하기 위해 실험 결과와 비교하였다. 원자력 발전소 증기 발생기의 경우에 제작 후 수압 시험(Hydrostatic test)을 통하여 내부에 수압을 가하여 제품의 건전성을 확인하는 절차를 거치게 된다. 본 연구에서는 수압시험 시에 볼트 연결 조립부의 관심 부위에 스트레인게이지를 부착하여 응력을 측정하였다. Fig. 10은 응력 측정 위치인 4 점 A, B, C, D를 보여주고 있다. 각 위치에서의 최대 주응력의 측정

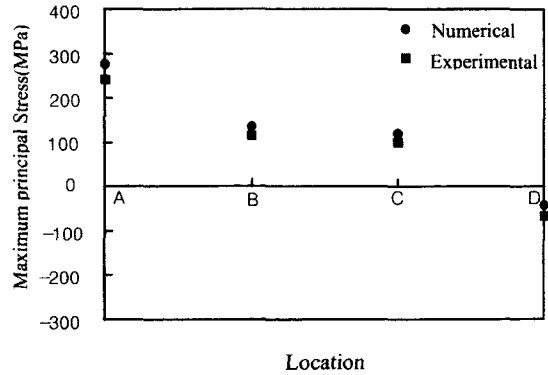


Fig. 11 Comparison of the numerical results and the experimental results for the maximum principal stress

결과와 유한요소 해석 결과가 Fig. 11에 표시되어 있으며, 측정 결과와 해석 결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 부 모델의 해석 결과

앞 절에서 기술한 바와 같이 전체 모델의 해석 결과는 비교적 잘 얻어졌으나 가스켓과 스테드 볼트 부위의 응력이 설계에 미치는 중요성을 고려하여 보다 정확한 해석 결과가 요구된다. 본 절에서는 전체 모델의 해석 결과에서 얻어진 변위를 경계 조건으로 하여 가스켓과 스테드 볼트 나사산에서의 미세 요소를 사용하여 계산한 부 모델의 해석 결과를 기술한다. ABAQUS⁶에서 부 모델 해석을 위한 경계 조건은 전 단계의 전체 모델 해로부터 자동으로 지정된다.

부 모델 해의 수렴성을 확인하기 위해 Table 1에 표시된 두 가지 종류의 부 모델을 사용하여 가스켓과 스테드 볼트에서의 수직 접촉 응력을 계산하였다. 전체 모델과 두 개의 부 모델을 사용하여 계산된 가스켓의 상부 표면에서의 수직 접촉 응력을 Fig. 12에, 하부 표면에서의 수직 접촉 응력을 Fig. 13에 각각 도시하였다. 여기서 수평 축은 무차원화된 길이로서, 가스켓의 내측 단에서는 0이고 외측 단에서는 1로 표시된다. 부 모델들에서 계산된 수직 접촉 응력을 보면 전체 모델에서 계산된 결과와 비슷한 양상을 보인다. 즉, 수직 접촉 응력은 가스켓의 외측 단에서는 최대이며,

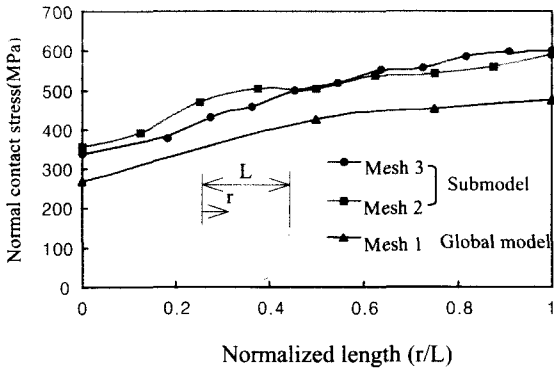


Fig. 12 Comparison of the submodel solution and global solution for top face of the gasket

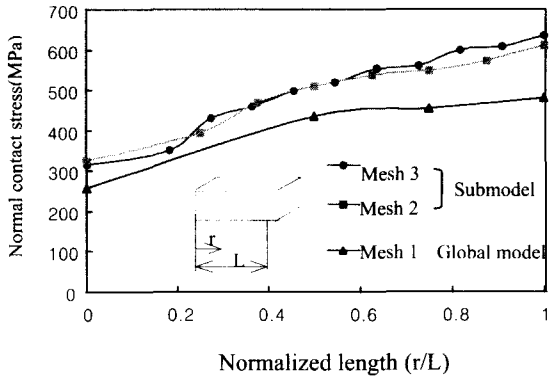


Fig. 13 Comparison of the submodel solution and global solution for bottom face of the gasket

반경 방향을 따라 외면에서 내면으로 가면서 감소하여 내측 단에서 최소가 된다.

Fig. 14는 전체 모델과 부 모델들을 사용하여 계산된 스테드 볼트의 각 나사에서 수직 접촉 응력을 나타낸다. 수평 축은 스테드 볼트 최 상부에서 하부까지의 나사산 번호를 나타낸다. 최대 수직 접촉 응력은 최상부의 1번 나사산에서 발생하는 것을 알 수 있다. 부 모델들의 해석 결과 더 미세한 요소 분할을 사용한 Mesh 3의 경우가 Mesh 2에 비해 매우 안정된 수렴 특성을 나타내었다. 또한, 부 모델 해의 수직 접촉 응력은 전체 모델 해보다 상당히 크게 나타났으며, 부 모델을 사용하게 되면 이와 같은 볼트 연결 조립부 설

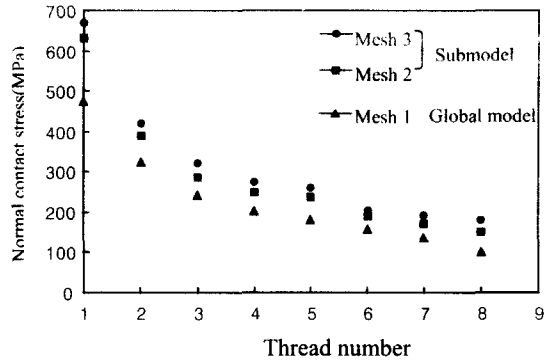


Fig. 14 Comparison of the submodel solution and global solution for the stud bolt

계의 중요 관심사인 최대 접촉 응력을 더 정확하게 계산할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

원자력발전소용 대형 압력 용기에 사용되는 볼트 연결 조립부의 구조 설계 단계에서 요구되는 유한요소해석을 위하여 덮개 관, 리테이너 관, 출입부 플랜지, 가스켓, 스테드 볼트와 너트로 조립된 전체 구조물의 3차원 접촉 응력을 해석하고, 가스켓과 스테드 볼트 나사산 부위의 정확한 해석을 위해 부 모델을 사용한 해석 방법을 제시하였다. 본 연구를 통하여 이와 같은 볼트 연결 조립부의 설계 관심 부위인 가스켓과 스테드 볼트 나사산에서의 정확한 접촉 응력 해석을 위해 부 모델 기법이 효율적인 도구가 될 수 있음을 보였다.

또한, 원자력 발전소의 증기 발생기에 사용되는 전형적인 볼트 연결 조립부의 해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 가스켓 상부와 하부 표면에서의 수직 접촉 응력은 외측 단에서 최대이며, 내측으로 들어가면서 점점 작아지는 경향을 보인다.
2. 스테드 볼트에 있어서는 플랜지와 접하는 최상부 나사산에서 가장 큰 응력 집중을 나타내며 하부로 내려가면서 점차 감소하는 경향을 보인다.

참고문헌

1. Chaaban, A. and Jutras, M., "Static Analysis of Buttres Threads Using the Finite Element Method," J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 114, pp. 209-212, 1992.
2. Dubois, D. J. M., "Fatigue Analysis of Closure Systems," ASME ICPVT, Vol. 1, pp. 83-89, 1996.
3. Fukuoka, T., "Finite Element Simulation of Tightening Process of Bolted Joint With a Tensioner," J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 114, pp. 433-438, 1992.
4. Sawa, T., Higurashi, N. and Akagawa, H., "A Stress Analysis of Pipe Flange Connections," J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 113, pp. 497-503, 1991.
5. Zahavi, E., "A Finite Element Analysis of Flange Connection," J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 115, pp. 327-330, 1993.
6. ABAQUS User's Manual, Hibbitt, Karlson & Sorenson Inc., 1998.