2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

냉중성자원 감속재 용기 및 진공튜브의 구조해석
Structural analysis of the moderator vessel and vacuum tube in CNS

김석훈,주영상,이기홍
한국원자력연구소
대전광역시 유성구덕진동 150

요 약

본 연구의 목적은 하나로에 설치되는 감속재 용기와 진공튜브의 구조해석을 수행하는 것이다. 응력계산이 Service level A 상태에서 감속재 용기와 진공튜브 설계를 검증하기 위하여 행하여 졌다. 해석에서 고려한 하중은 정상운전 중의 압력, 지진과 열팽창이다. 상세해석은 Service level B,C,D의 설계하중이 주어진 후에 수행될 예정이다. 상세해석을 위해서는 감속재 용기의 파손과 cover 개스의 과도압력 등이 사고해석에 의해 고려되어야 한다. 계산된 응력은 ASME SC-1 기기의 설계 및 해석요건을 만족시켰다. 또한 좌굴해석에 의하여 긴 실린더 형태의 진공튜브에 대한 구조 건전성이 확인되었다.

Abstract

The purpose of the study is to carry out the structural analysis of the moderator vessel and vacuum tube to be installed in HANARO. The stress calculation was performed to verify the design of the moderator vessel and vacuum tube under Service level A condition. The loads taken into account in this analysis are pressure during normal operation, seismic events and thermal expansion. The detail analysis will be performed after the design loads of Service level B,C,D is given. For the detail analysis, the loads such as failure of the moderator vessel and overpressure in cover gas should be considered by the accident analysis. The calculated stresses satisfied the ASME SC-1 component design and analysis rules. Also,through the buckling analysis, the structural integrity was verified in the vacuum tube such a long cylinder type.

1. 서 론

냉중성자원(Cold Neutron Source) 설비는 원자로에서 나오는 냉중성자를 대폭 증가하기 위해 원자로 내에서 극저온의 감속재를 설치하여 열중성자를 냉중성자로 바꾸는 장치이다. 영국의 Hawell연구소의 원자로 BEPO에서 1957년 운전을 시작한 이래 냉중성자원 설비는 지난 30여 년 동안 독일, 덴마아크, 프랑스 등에서 운전되어 왔다. 최근에는 고분자나 생체고분자 등의 연구에 대한 요구가 많아져 냉중성자 빔의 수요가 증가하고 있으므로 선진 각국에서 원자로의 개조나 증설을 통하여 냉중성자원 설비의 설치를 계획하고 있다. 1990년에 일본에

서도 JRR-3를 개조하여 냉중성자원 장치를 설치하여 운전 중에 있으며 미국에서는 NIST의 원자로NBSR에 1991년 냉중성자원과 중성자 유도관을 증설하여 냉중성자 빔에 대한 실험을 하고 있다. 냉중성자원 in-pile assembly를 설치하는 방법에 따라 횡형(Horizontal Type) 또는 종형(Vertical Type)으로 분류하는데 냉중성자원 시설이 수평방향의 실험공에 설치될 때는 횡형, 수직방향의 실험공에 설치될 때에는 종형 설치방식이라고 한다. 종형 설치는 횡형 설치에 비해 구조가 간단하고 보수가 용이하지만 실험공 벽이나 실험공의 냉각재 등에 의한 냉중성자의 흡수와 열 제거를 고려하지 않으면 안된다. 종형 설치 시에는 감속재 용기를 설치하는 냉중성자용 수직 실험공과 냉중성자 빔이 나오는 중성자 유도관용 수평 실험공이 원자로 설치 시에 미리 설치되어야 한다. 수조 형식의 원자로에는 대개 종형 설치방식을 채택하는 경우가 많고 감속재 용기로부터 공기의 격리 및 방사선 차폐에 수조 수를 이용하고 있다. 하나로는 원자로가 open-pool형식이고 냉중성자 감속재를 설치하기 위한 수직 실험공이 종형으로 되어 있어서 냉중성자원 감속재 설치형식은 종형으로 설계되었다.

연구용 원자로인 하나로에 설치하게 되는 냉중성자원 장치는 노내 압력용기, 수소계통, 헬륨계통, 진공계통 및 냉중성자 유도관과 기타 부대시설로 구성되어 있다. 노내 압력용기는 내부에 감속재 용기 및 반사체구역에 위치한 수직공에 삽입되는 진공튜브로 구성되며 그 형상은 그림 1과 같다. 감속재 용기는 수직 설치공의 형상에 맞아야 하며 열중성자를 냉중성자로 충분히 감속할 수 있는 치수가 필요하다. 용기의 두께가 두꺼우면 중성자의 흡수가 많아져 냉중성자속이 줄어들게 되므로 강도에 맞는 최소의 두께를 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 해석대상으로 노내 압력용기에 대하여 구조해석을 수행하였다. 해석에서 고려한 하중은 정상운전 중의 압력, 지진과 열팽창이다[1]. 상세해석은 Service level B,C,D의 설계하중이 주어진 후에 수행될 예정이다. 상세해석을 위해서는 감속재 용기의 파손과 cover 개스의 과도압력 등이 사고해석에 의해 고려되어야 한다.

2. 용기의 제원

감속재 용기의 두께는 중성자의 흡수 및 핵 발열량을 적게 하기 위하여 얇게 하고 형상은 기계적인 강도를 높이기 위하여 구나 회전 타원형 또는 원통형으로 설계된다. 하나로에 설치될 감속재용기는 원통형이며 상부와 하부덮개는 반 타원으로 구성되고 상 하부가 용접으로 결합된다. 용기가 빔튜브 내에 설치된 진공튜브의 내부에 설치되기 때문에 진공튜브의 크기에 맞추어 용기의 크기가 설계된다. 설계된 감속재 용기의 형상은 그림2와 같다. 또한 감속재 용기는 그림3과 같이 Inner Cylinder와 Outer Cylinder로 구성되어 있으며 Inner Cylinder는 안내 깃에 의해 내부에서 지지된다. 진공튜브의 하단은 하나로의 원자로 수조 수면 위에서 약 10m 아래의 물속에 위치한다. 진공튜브는 감속재 용기를 둘러싸고 있으며 진공튜브의 기능은 수소누설 등의 사고로 부터 감속재 용기를 보호하는 것이다. 진공튜브는 과도한 중성자 가열에 의해 발생되는 열을 피하기 위해 최소두께로 설계될 필요가 있다. 중성자 가열에 의하여 진공튜브에서 발생되는 열은 진공튜브 외부의 물의 순환에 의해 제거된다.

감속재 용기의 내부로는 수소가 흐르고 내부압력은 1.5atm로 유지된다. 용기의 두께는 2mm로 균일하며 외경이 134mm이며 높이가 216mm이다. 감속재 용기의 치수를 표1에 표시하였다. 진공튜브는 하단부에서 외부에 채워진 물의 깊이에 의한 2atm의 수두압력이 외부에 작용한다. 감속재 용기를 둘러싸는 진공튜브의 하단부는 반구형 캡으로 설계되었으며 상단은 원자로 용기 위로 길게 뻗어져 3.2m의 길이를 갖는다. 진공튜브

의 형상은 그림4에 나타내었으며 상부 끝단은 밀봉되어 내부를 진공상태로 유지한다. 진공튜브의 두께는 5mm이고 외경은 159mm로써 치수가 표2에 표시되었다[2].

3. 구조해석

3.1 감속재 용기

(1) 해석모델

감속재 용기의 응력분포가 ANSYS code에 의하여 유한요소해석 되었다. 해석모델은 2차원 축대칭 모델로 그림5에 표시되었으며 그림6은 180^{o} 회전한 상태의 형상이다. 용기의 재질은 AL6061-T6이 사용되었고 감속재 용기에 사용된 극저온 상태의 AL6061-T6 물성치는 표3에 정리하였다. 작용하중으로 설계압력은 1.95atm로 감속재 용기의 정상운전 압력의 1.3배를 사용하였다. 지진하중은 표4와 같이 등가 정하중으로 고려하였고 SSE event를 적용하였다. ground ZPA에 대하여 수평방향으로는 1.0과 수직방향으로는 1.33의 확대계수를 적용하였다. 사용된 요소는 8절점 plane82이며 사용된 노드의 수는 3513개이고 요소수는 924개이다. 경계조건은 감속재 용기의 상단은 x,y방향으로 구속되었고 대칭축에 대하여 x방향 대칭조건으로 구속하였다[3].

(2) 해석결과

감속재 용기의 응력분포 및 구조건전성을 검토하기 위하여 2차원 축대칭 모델을 사용하여 구조해석을 수행하였다. 그림7은 감속재 용기에 발생한 응력강도의 분포이다. 최대응력 강도는 용기의 몸체와 상하부 헤드의 접합부에서 발생하였다. 이러한 값은 불연속으로 인해 국부적으로 큰 응력이 발생한 것으로 접합부 형상의 상세설계가 필요하다. 그림8에서 최대응력 강도를 나타내는 용기내면과 외면의 절점 번호는 142와 1323이고 두께방향으로 단면에 대한 응력성분을 선형화하여 막응력과 굽힘응력의 분포를 구하였다. ASME 코드에 의하면 AL6061-T6에 대한 S_m값은 93MPa이다. 응력 강도를 비교하기 위해 용기몸체와 상부헤드의 불연속부 단면에서 두께방향으로 계산된 국부막응력 값은 1차응력으로 분류되고 이 값은 16.7 MPa로 139.5MPa의 $1.5S_m$값 보다 훨씬 작은 값을 나타낸다. 이러한 값은 감속재 용기의 내부에 작용하는 압력에 의해서 유발된 응력으로 용기는 압력하중에 대하여 큰 설계 여유도를 갖고있다. 최대응력 강도 값이 발생한 절점142에서의 굽힘응력은 2차응력으로 분류되고 21.4MPa의 응력강도 값을 나타내었다.

감속재 용기의 열응력은 온도분포를 가정하여 예측하였다. ORNL에서 설계된 HEIR CNS의 감속재 용기 평균 온도분포는 20K이며 약 40K의 최대값을 갖는다. 이러한 온도차를 하나로의 감속재 용기에서 가정할 때 열팽창에 의한 열응력의 값은 약 20MPa로 예측된다. 2차응력에 대한 허용응력강도 한계값은 $1.5S_m$으로 최대응력이 발생하는 불연속부에 대하여 굽힘응력과 열응력을 합한 값이 41.4MPa로 $1.5S_m$과 비교하여 작기 때문에 구조적으로 건전함을 알 수 있다. 감속재 용기의 온도분포에 의한 열응력 해석은 열전달계수 및 감마열 분포를 고려한 상세해석을 통하여 계산할 예정이다. 그림 9

는 응력강도 분포의 3차원 형상이며 표6에 감속재 용기의 응력해석 결과를 정리하였다 [4].

3.2 진공튜브

(1) 해석모델

진공튜브의 재질은 Zircaloy-4가 사용되었고 물성치는 표5에 정리하였으며 지진하중은 감속재 용기와 같이 적용하였다[5]. 진공튜브의 유한요소해석은 ANSYS 코드에 의해 수행되었고 그림10과 같이 2차원 축대칭 모델을 사용하였으며 그림11은 3차원 형상을 표시하였다. 진공튜브의 구조 건전성를 평가하기 위하여 응력해석을 수행하여 ASME 코드의 설계요건에 따라 평가하였고 선형 탄성좌굴해석을 수행하여 긴 원통형 구조물의 좌굴 안정성을 평가하였다.

진공튜브의 모델링을 위해 2차원 8절점 요소인 PLANE 82가 사용되었고 2549개의 요소수와 9864개의 절점수가 사용되었다. 경계조건은 진공튜브의 하단은 x,y방향으로 구속되었고 중간부와 상부 끝 부분을 x방향으로 구속하였다. 좌굴해석에서 사용된 요소는 4절점 3차원 요소인 Shell 63로 경계조건은 상하부 끝단을 구속하였고 하단부로부터 약 1.4m 떨어진 부위는 CNS 조사공과 접촉이 예상되므로 한 개의 노드를 x방향으로 구속하였다.

(2) 해석결과

진공튜브의 응력분포를 해석하기 위해 2차원 축대칭 모델을 사용하여 ASME코드의 Design by analysis 설계요건에 따라 구조 건전성을 평가 하였다. 최대 응력강도는 그림12와 그림13에서 보듯이 진공용기 하부 캡과 하단 지지부가 접합되는 불연속 부에서 발생하였다. 이점에 해당되는 진공튜브 내외부의 절점번호는 4287과 166이다. 이러한 절점을 연결하는 선형화된 응력성분을 구하면 최대 국부 막응력의 값은 절점 166에서 4.72 MPa로써 zircaloy-4의 S_m 값인 100MPa 비하여 훨씬 작으며 $1.5S_m$의 응력강도한계를 만족시킴을 알 수 있다. 또한 이점에서의 굽힘응력강도는 9.24 MPa로써 2차응력으로 분류된다. 진공튜브의 열응력 값은 감속재 용기와 마찬가지로 적을것으로 예측되며 진공튜브의 열전달 해석에 의하여 계산될 예정이다. 정상 운전압력을 기준으로 계산된 구조물의 응력분포는 ASME코드의 응력강도 한계값과 비교하였을 때 많은 설계 여유도가 있음을 확인하였다. 표 7은 진공튜브의 응력해석 결과이며 그림14는 진공튜브의 응력강도 분포에 대한 3차원 형상을 나타낸다.

또한 진공튜브는 긴구조의 형태이므로 좌굴해석이 중요한 요건이다. 선형 탄성해석을 수행하며 진공튜브의 구조적 건전성을 유지하기 위한 임계 좌굴압력 P_{cr}을 구하여 좌굴 안정성을 평가하였다. 선형 탄성해석은 비선형 및 초기결함의 영향을 고려할 수 없기 때문에 계산된 좌굴하중이 실제 좌굴하중보다 크게 계산되므로 실제 설계적용은 어렵지만 좌굴모드를 예측하기는 비교적 정확하다. 그림15는 좌굴해석 결과이다. 최대 변위는 하단부에서 발생하며 수평방향으로 0.078m의 최대 수평변위가 발생한다. 계산된 임계 좌굴압력은 2.87 MPa로써 작용압력인 0.26 MPa에 비하여 훨씬 높은 값이며

10.9의 buckling load factor를 갖고 있다. 따라서 진공튜브에 대한 좌굴 안정성은 확보된다[6].

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Containment strength report, KAERI/PNPI, HCNS-CD5506403.000AR, 1997
2. 김석훈외 1인,"Preliminary structural analysis of moderator vessel and vaccum tube for the HANARO", LMRMEDD/CNS-01/2004, 2004.
3. High flux isotope reactor cold neutron source reference design concept, ORNL/TM-13498, May 1998.
4. Tai-Cheng Guung, Wen Fa Tsai, Weng-Sheng Koo and Jong Sheng Chen,"MCNP simulation of TRR-II cold neutron source design", Physica B 311, pp158-163, 2002.
5. Erwin Gutsmie and Anton Scheuer," Use of zircaloy 4 material for the pressure vessel of hot and cold neutron sources and beam tubes for research reactors, Physica B 311, pp 182-190, 2002.
6. Y. Ogata, Y. Kiyanagi, N. Kosugi, H. Iwasa, M. Furusaka and N. Watanabe,"Intensity enhancement of cold neutron from a coupled liquid-hydrogen moderator for pulsed cold neutron sources", Nuclear Instruments and Methods in Physics research A 432, pp415-421, 1999.

표1 감속재 용기의 치수

Content	Dimension(mm)
Moderator vessel outer diameter	134
Moderator vessel length	216
Moderator vessel thickness	2

표2 진공튜브의 치수

Content	Dimension(mm)
Vaccum tube outer diameter	159
Vaccum tube length	3214
Vaccum tube thickness	5

표 3 감속재 용기에 사용된 AL6061-T6 의 물성치

Content	*Value*
Young's modulus	77.7 GPa
Poisson ratio	0.33
Coefficient of thermal expansion	14.1×10^{-6} /°K

표 4 진공튜브에 사용된 Zircaloy-4 의 물성치

Content	*Value*
Young's modulus Poisson ratio	100 GPa 0.32
Coefficient of thermal expansion	5.89×10^{-6} /°K

표5 상당 지진하중

Load / Event	Ground ZPA(g)	Equivalent Static Inertial Load(g)	
		Horizontal	Vertical
OBE	0.1	0.1	0.0667
SSE	0.2	0.2	0.133

표6 감속재 용기의 응력해석 결과

Stress Categorization	Linearized stress intensity	Calculated stress intensity	Allowable limits($1.5S_m$)	Remarks
Primary stress	Local membrane	16.7 MPa	139.5 MPa	* The bending stresses due to the discontinuity are included in the secondary stress.
Secondary stress	Bending + Thermal stress	41.4 MPa	139.5 MPa	

Design stress intensity(S_m): 93 MPa

표7 진공튜브의 응력해석 결과

Stress Categorization	Linearized stress intensity	Calculated stress intensity	Allowable limits($1.5S_m$)	Remarks
Primary stress	Local membrane	4.72 MPa	150 MPa	* The bending stresses due to the discontinuity are included in the secondary stress.
Secondary stress	Bending + Thermal stress	39 MPa	150 MPa	

Design stress intensity(S_m): 100 MPa

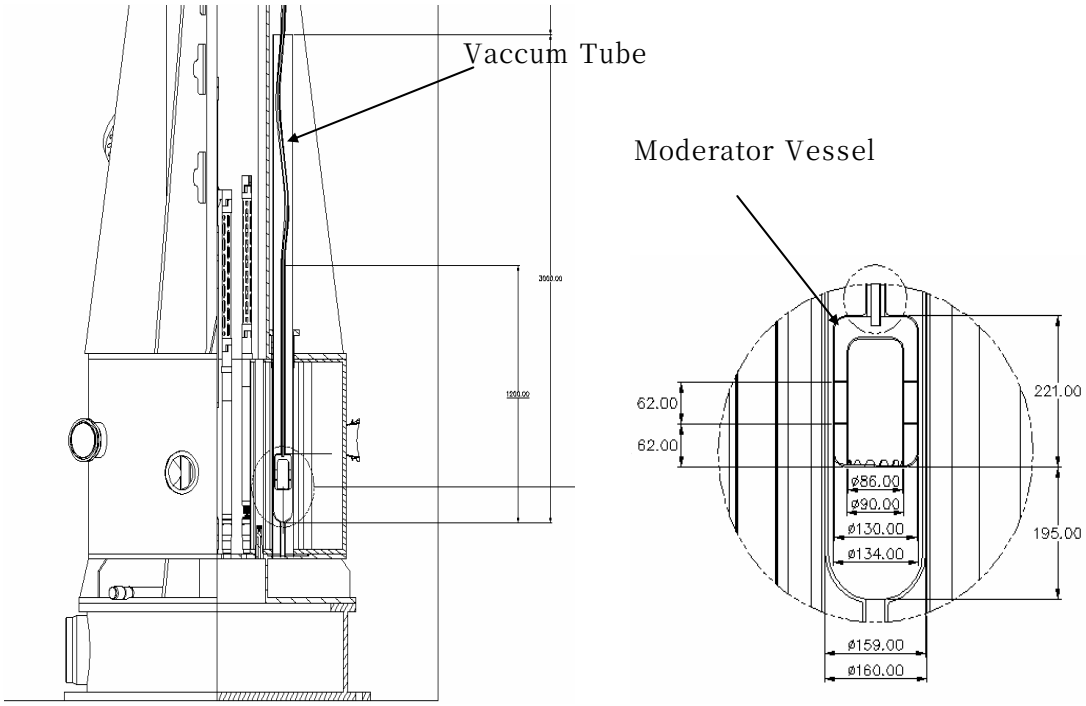

그림1 하나로에 설치된 Moderator Vessel과 Vaccum Tube

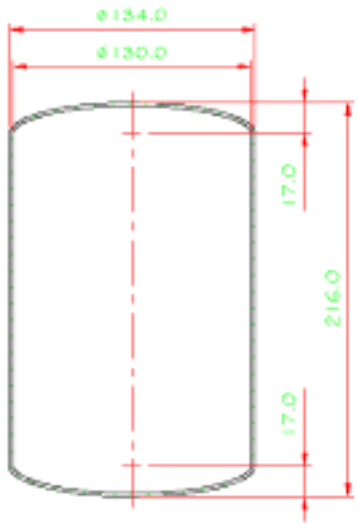

그림2 Moderator vessel outer cylinder 의 2차원 형상

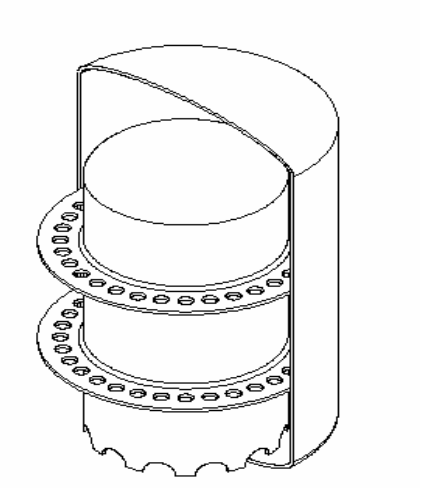

그림3 Moderator vessel outer cylinder 와 inner cylinder의 3차원 형상

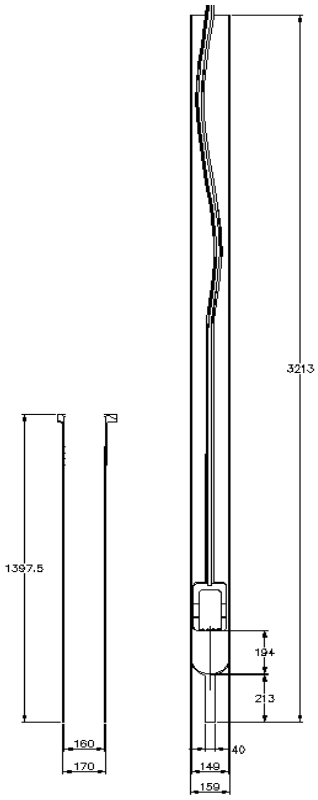

그림 4 Vaccum Tube 의 2 차원 형상

그림 5 2 차원 해석모델

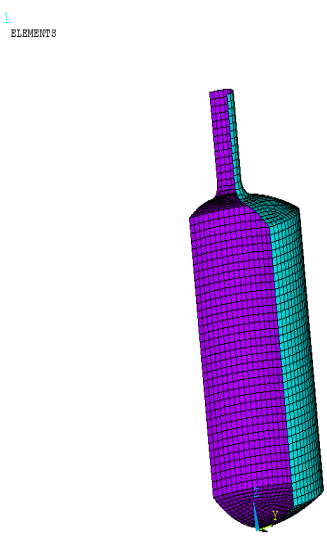

그림6 축 대칭 회전모델(180º)

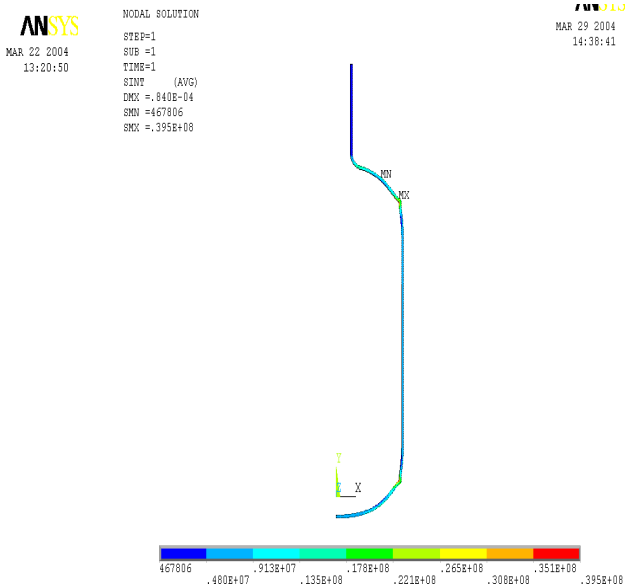

그림7 감속재 용기의 응력강도 분포

그림8 최대 응력강도 분포위치

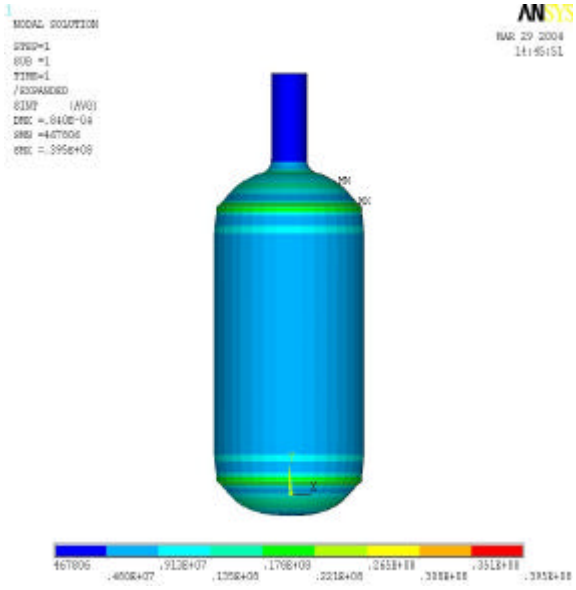

그림9 응력강도 분포의 3차원 형상

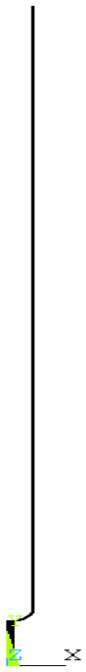

그림10 진공튜브의 2차원 해석모델

그림11 진공튜브의 3차원 형상

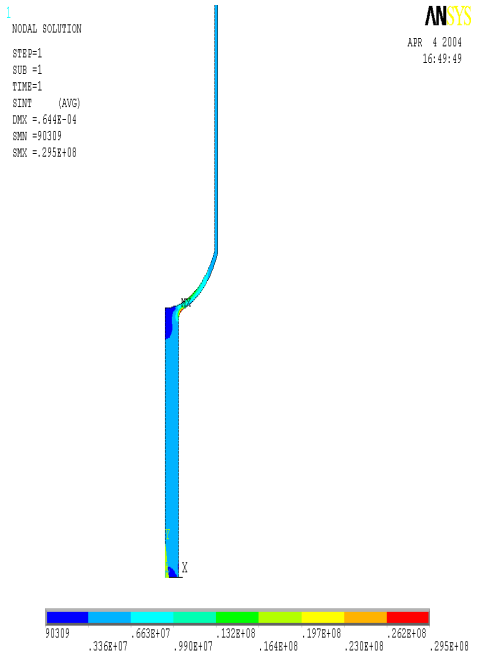

그림12 진공튜브의 응력강도 분포

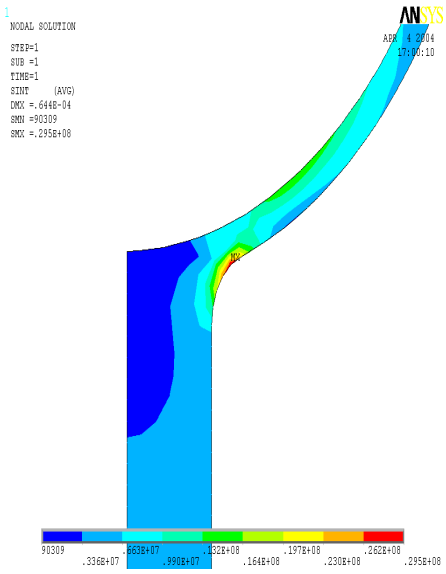

그림13 진공튜브의 최대응력강도 분포부분

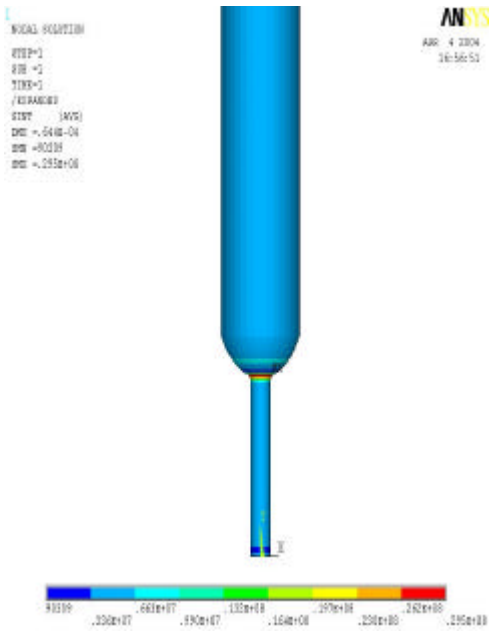

그림14 진공튜브 응력강도 분포의 3차원 형상

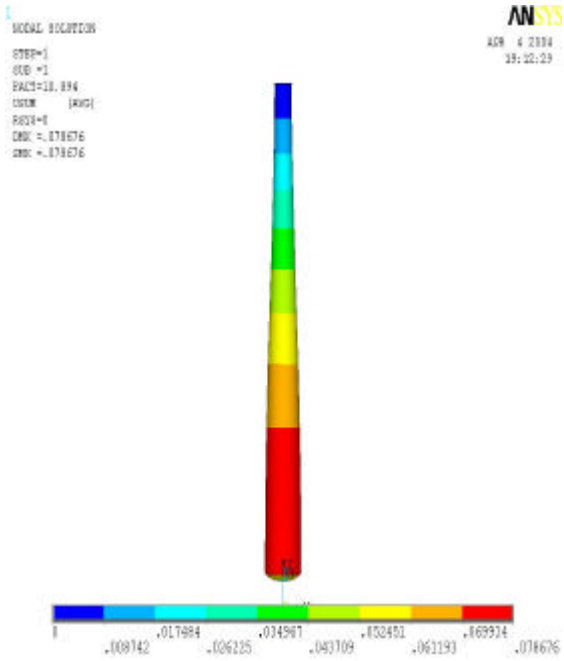

그림15 좌굴해석 결과(Mode 1)