

원통형캡슐의 구조해석

A Structural Analysis on the Circular Capsule

강영환

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

이영신, 최명환, 최영진

충남대학교

대전광역시 유성구 궁동 220

요약

원통형 캡슐은 다양한 시험조건과 높은 열적 환경하에 놓이게 되기 때문에 조사시험시 구조적 건정성을 확보해야 한다. 본 연구에서는 원통형 캡슐의 구조해석이 유한요소해석 프로그램, ANSYS와 이론적 계산에 의해서 수행되었다. 원통형 캡슐 구조물의 응력, 임계좌굴 하중, 고유진동수와 같은 기계적 특성을 얻기 위하여, 정적해석과 진동해석을 수행하였다. 원통형 캡슐에 대한 외통관과 계장라인들을 밖으로 끌어내는데 필요한 지지관의 두께의 영향이 연구되었고, 또한 구조적 거동에 미치는 원통형 캡슐의 경계조건 및 주재료의 영향이 연구되었다. 유한요소해석 결과들은 가능한 경우 이론적 계산결과와 비교, 검증하였고, 원통형 캡슐의 구조적 안정성은 재료의 항복강도에 기초하여 평가하였다.

Abstract

The circular capsule should be insured with structural integrity under the various test condition and high thermal environment. In this study, the structural analysis of the circular capsule is performed using the finite element analysis program, ANSYS and analytical calculation. To obtain the mechanical characteristics of the circular capsule structure such as stresses, critical buckling loads and natural frequencies et al. the static and modal analysis are conducted. The effects of various wall thicknesses of capsule outer tube and support tube for circular capsule are obtained. Also, the effects of boundary conditions and principal materials of the circular capsule on the structural behavior are investigated. The FE results are compared with the analytical results in case of possible, and the structural safety of the circular capsule are evaluated based on the yield strength of materials.

1. 서론

원통형 캡슐은 핵연료조 조사시험용 캡슐과 재료조사시험용 캡슐에 사용된다. 그러나 핵연료 조사시험용 캡슐로 사용되는 경우는 재료 조사시험용 캡슐로 사용될 때와 경계조건과 다르고, 재료 조사시험용 캡슐로 사용될 때보다 높은 온도에서 조사시험된다. 때문에 조사시험중 구조적 건전성을 확보해야 하고 핵연료캡슐로 사용될 때의 조사시험중 응력, 온도, 열응력, 좌굴하중등 역학적 특성을 규명할 수 있는 해석기술이 필요하다. 본 연구에서는 핵연료 조사시험용 캡슐로 사용될 경우에 대해서 연구하였다.

설계자가 설계 매개변수의 변화에 따른 캡슐구조의 여러 특성을 쉽게 파악하여 원통형 캡슐 설계에 반영할 수 있도록 제한기술을 확보할 필요성이 있다. 이를 위해서 본연구에서는 원통형 캡슐의 재질 및 형상을 설계변수처리를 하여 핵연료 캡슐의 역학적 특성에 대하여 연구하였다.

외통관의 재질, 두께, 경계조건의 변화에 대한 고유진동수, 좌굴하중, 응력해석을 ANSYS를 통해 해석하였다. 또한 이론적 해석이 가능한 경우에는 수계산을 통하여 이론해를 구하고, 유한요소해석 결과와 비교하였다.

2. 본론

2.1 해석모델

Fig. 1과 Fig. 2는 본연구에서 고려한 원통형 캡슐의 개념을 보여주고 있다. 원통형 캡슐은 핵연료캡슐본체와 지지관으로 구성되어 있다. 길이 L 은 약 5m, b 는 3.3m이고, 재질은 핵연료캡슐본체 외통관 및 지지관이 각각 Al6061와 SUS316로 이루어진 두가지 경우에 대해 해석하였다. 본 연구에서 고려한 변수는 외통관 및 지지관의 두께, 재질과 원통형 캡슐 하단부의 경계조건이다. Fig. 1은 고정-자유 경계조건으로 원통형 캡슐의 하단부분을 완전히 고정하는 것이고, Fig. 2는 힌지-자유 경계조건은 하단부분을 힌지지지하는 것이다. Fig. 1과 Fig. 2의 그림에서 하단부분에서 b 높이만큼 위에 위치한 부분은 단순히 로보트야암이 잡아주는 형상이므로 관의 반경방향과 원주방향으로만 고정이고 축방향으로는 자유이다. 하중은 원통형 캡슐의 상단에서 축방향으로 작용한다.

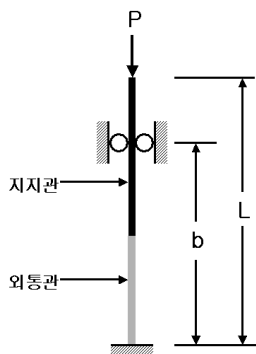


Fig. 1 Fixed-free boundary condition

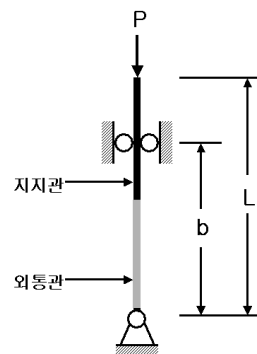


Fig. 2 Hinge-free boundary condition

2.2 핵연료 캡슐의 외통관의 응력해석

외통관의 해석모델은 Fig. 3과 같고, 경계조건은 고정-자유경계조건이며, 하중조건으로는 핵연료캡슐본체위의 제어장비나 지지관의 자중(32kg)과 사람이 누르는 힘(여기서는 사람의 몸무게 68kg)을 실제 하중값으로 적용하였다.

실질적인 하중은 핵연료캡슐본체의 외통관이 받으며, 핵연료캡슐본체가 받는 하중은 내부 구조물에 전달 되지 않는다. 즉 mini-element는 하중을 받지 않기 때문에 핵연료캡슐본체의 외통관에 대해서만 해석을 수행하였다. 이 해석에서는 ANSYS를 사용하고 요소는 SOLID45를 사용하였다.

핵연료캡슐본체의 외통에서 SUS316의 하단덮개와 상단덮개는 모두 20mm의 두께는 갖는 원판이다. 외통관 두께에 대해서 2mm부터 0.5mm씩 증가 시켜 두께가 5mm일 때까지 증가 시켜 두께의 영향을 살펴보았다. 해석에서 사용된 물성값은 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties of capsule

| Material | Young's modulus(GPa) | Density(kg/m^3) | Poisson's ratio |
|----------|----------------------|---------------------|-----------------|
| SUS316 | 197 | 8000 | 0.3 |
| Al6061 | 69 | 2700 | 0.33 |

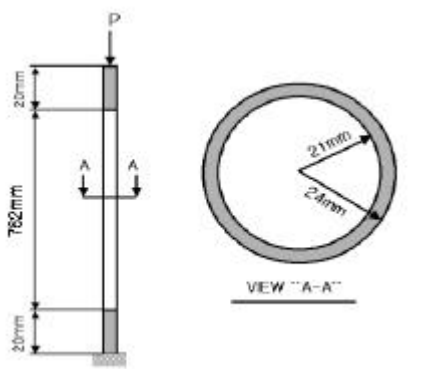


Fig. 3 Analysis model of capsule outer tube

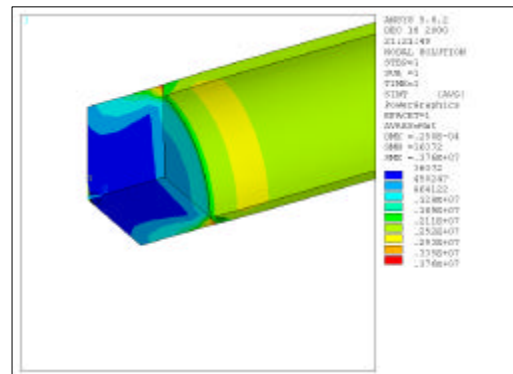


Fig. 4 Stress distribution of capsule

외통관의 두께를 3mm로 하여 해석한 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4는 캡슐본체에서의 하단 덮개에서의 응력분포를 나타내었다. 외통관이 Al6061, SUS316 두 가지 경우 모두 2.36MPa의 응력을 보이고, 최대응력은 외통관과 하단덮개가 만나는 부분에서 일어나며, 최대응력값은 3.78MPa이다. 이와 같이 Al6061과 SUS316인 두가지 경우가 같은 이유는 응력값이 하중과 면적의 관계이기 때문이다. Fig. 5는 두께변화에 따른 외통관부에서의 응력변화를 보여 주고 있다.

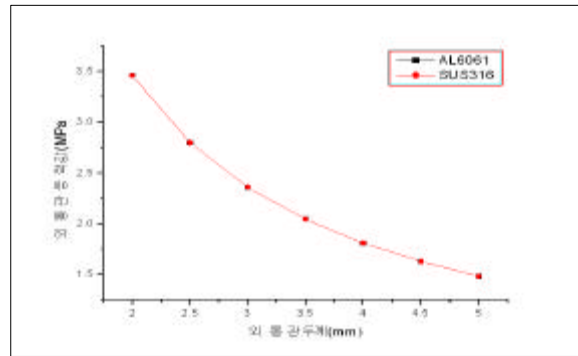


Fig. 5 Effects of the various material and thickness of outer tube on the stress

이것을 단순식에 의한 이론해와 비교하기 위해 다음 식을 이용하였다[1]. 이때 두께를 3mm로 하여 다음식을 풀면

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

여기서, A는 원통관의 단면적, P는 작용하중이다.

식 (1)을 통해 구한 응력값은 2.36MPa이다.

Table 2에서 보인것과 같이 정확하게 해석해와 이론해가 일치하는 것을 볼 수 있다.

Table. 2 Comparison of outer tube stress by FEM and analytical solution

| Thickness(mm) | FEM(MPa) | Analytical solution (MPa) |
|---------------|----------|---------------------------|
| 2.0 | 3.46 | 3.46 |
| 2.5 | 2.79 | 2.79 |
| 3.0 | 2.36 | 2.36 |
| 3.5 | 2.04 | 2.04 |
| 4.0 | 1.81 | 1.81 |
| 4.5 | 1.63 | 1.63 |
| 5.0 | 1.48 | 1.48 |

2.3 외통관의 내·외벽의 온도차에 의한 열응력

재료조사용캡슐의 경우 조사시험시 외통관의 내·외벽 온도차에 의해서 열응력이 발생하며, 이들 온도차는 약 40°C이다[2]. 따라서 본 연구에서는 두께 변화에 따른 열응력을 고찰하기 위해서, 캡슐의 외통관 내벽을 100°C, 외벽을 40°C로 가정하여 해석하였다.

해석에 사용된 물성치는 각 재질이 200°C 이상의 온도까지 올라가지 않기 때문에 Al6061과 SUS316의 물성치를 사용하고 이를 Table 3과 같다. 열해석에 사용한 요소는 PLANE 77을 사용하였다.

Table. 3 Material properties of capsule

| Material | Young's modulus (GPa) | Density (kg/m ³) | Poisson's ratio | Thermal expansion coefficient (/°C) | Thermal conductivity (W/m · °C) |
|----------|-----------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Al6061 | 60 | 2700 | 0.33 | 2.45×10^{-5} | 215 |
| SUS316 | 192 | 8000 | 0.30 | 1.56×10^{-5} | 14 |

외통관 두께가 3mm인 열응력해석에서 대류를 고려하지 않고 열전도만으로 해석한 각 재질에 대한 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

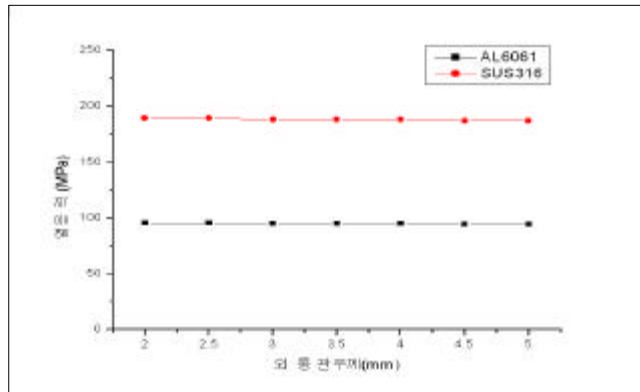


Fig. 6 Effects of the various material and thickness of outer tube on the Thermal stress

FEM해석결과 최대열응력은 Al6061에서는 95MPa, SUS316에서는 188MPa이다. Fig. 6에서 보인 것과 같이 열응력은 두께의 변화보다 재질의 변화에 민감하다. Fig. 6에서 보인 것과 같이 대류를 고려하지 않은 상황에서도 재질이 SUS316일 때 건전성이 확보되는 것을 알 수 있다.

2.4. 원통형 캡슐의 좌굴해석

본체와 지지관을 포함한 원통형 캡슐은 직경(48mm)에 비해 길이(5000mm)가 긴 기하형상을 갖고 있기 때문에, 외력에 대해서 불안정해 질 수 있고, 좌굴안전성을 고찰할 필요성이 있다.

원통형 캡슐 하단부를 고정 혹은 힌지지지의 두 가지 경계조건에 대하여, 캡슐상단부에 단위하중을 가하여 좌굴되는 임계좌굴하중과 좌굴모드를 구하고, 캡슐의 좌굴안전성을 평가하였다. 또한 재질을 Al6061, SUS316일 때에 대해서도 각각의 해석을 수행하였다. 구조응력 해석과 마찬가지로 두께를 2~5mm까지 증가시켜 각각의 좌굴하중을 구하였다.

유한요소해석에 앞서 이론식을 이용하여 임계좌굴하중을 구하였으며, 각각의 경계조건에 따른 이론해는 다음식에 의해 구해질 수 있다[3].

$$P_{cr} = \eta \frac{EI}{L^2} \quad (2)$$

Table 4 Comparison of buckling load by FEM and analytical solution under fix-free boundary condition

| Outer tube thickness (mm) | Al6061 | | SUS316 | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | FEM(kN) | 이론해(kN) | FEM(kN) | 이론해(kN) |
| 2.0 | 1.87 | 1.89 | 5.33 | 5.39 |
| 2.5 | 2.26 | 2.28 | 6.46 | 6.52 |
| 3.0 | 2.63 | 2.66 | 7.51 | 7.58 |
| 3.5 | 2.97 | 3.00 | 8.49 | 8.57 |
| 4.0 | 3.29 | 3.32 | 9.39 | 9.49 |
| 4.5 | 3.58 | 3.62 | 10.24 | 10.34 |
| 5.0 | 3.86 | 3.90 | 11.02 | 11.13 |

2.4.2. 힌지-자유경계조건

원통형 캡슐 하단부가 힌지지지된 경우의 모델에 대한 개념도는 Fig. 2에 보였으며, 해석의 조건은 지지조건만 다를뿐 고정-자유조건과 동일하다. 외통관의 두께가 3mm로 했을 때 좌굴모드형상을 Fig. 9에 나타내었다.

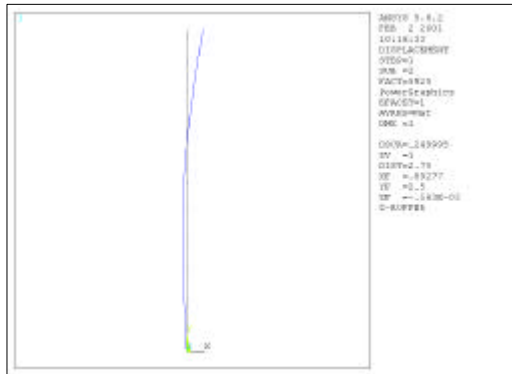


Fig. 9 1st mode shape of SUS316 under hinge-free boundary condition

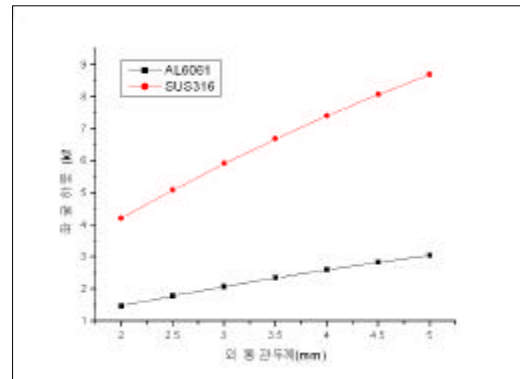


Fig. 10 Comparison of buckling load under hinge-free boundary condition

FEM해석결과 외통관 두께가 3mm일 때 임계좌굴하중은 Al6061일 때 2.07kN, SUS316일 때 5.92kN이다. Fig. 10은 두 재료에 대한 두께의 증가에 따른 좌굴하중을 나타낸 것으로, 고정-자유지지조건과 비슷한 경향을 보이고 있다.

Table 5 Comparison of buckling load by FEM and analytical solution

| Outer tube thickness (mm) | Al6061 | | SUS316 | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | FEM(kN) | 이론해(kN) | FEM(kN) | 이론해(kN) |
| 2.0 | 1.47 | 1.56 | 4.21 | 4.46 |
| 2.5 | 1.78 | 1.89 | 5.10 | 5.40 |
| 3.0 | 2.07 | 2.20 | 5.92 | 6.28 |
| 3.5 | 2.34 | 2.49 | 6.70 | 7.10 |
| 4.0 | 2.60 | 2.75 | 7.41 | 7.86 |
| 4.5 | 2.83 | 3.00 | 8.08 | 8.57 |
| 5.0 | 3.04 | 3.23 | 8.69 | 9.22 |

Table 5는 두 재료에 대한 외통관 두께의 변화에 따른 FEM해석결과와 이론해를 비교를 나타내었다. 고정-자유 조건과 마찬가지로 SUS316이 AI6061보다 더 높은 임계좌굴하중을 보이며, 이론해와 FEM결과는 잘 일치하였다.

이상의 두가지 경계조건에 따른 임계좌굴하중을 비교해보면 고정-자유조건이 힌지-자유조건보다 약 1.2배 정도 높은 좌굴하중을 갖고 있어 좌굴안전성에 있어서 유리하다. 또한 AI6061보다 SUS316이 건전성 확보에 있어서 유리함을 Fig. 8과 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

2.5. 진동해석

일반적으로 구조물의 진동 특성은 고유진동수, 댐핑 및 고유 진동 모드로 정의되며 이러한 특성들은 구조물에 대한 경계조건에 따라 변화한다. 원통형 캡슐의 진동특성 고찰은 캡슐 내부의 시편의 질량을 고려하지 않고, 외통관과 지지관을 한 개의 원통관으로 단순화하여 ANSYS를 이용한 해석을 수행하였다. 또한 원통형 캡슐의 하단을 완전고정 또는 힌지고정의 두가지 경우에 대하여 해석하였다.

2.5.1 고정-자유경계조건

해석모델과 요소는 원통형 캡슐의 좌굴해석에서 사용한 해석모델 및 요소를 동일하게 적용하였다. 고정-자유 조건을 갖는 두께가 3mm인 경우 SUS316 재질의 원통형 캡슐에 대한 기본진동수는 7.95Hz이고, Fig. 11은 모드형상을 보이고 있다. 진동해석을 통한 모드형상은 좌굴모드형상과 동일한 결과를 보이는데 이는 좌굴해석과 진동해석이 모두 고유치문제이기 때문이다. Fig.12는 외통관의 두께변화에 따른 고유진동수의 변화를 보이고 있다. 두께가 증가함에 따라 고유진동수는 강성의 증가보다는 질량의 증가가 더 커 감소하게 되고, AI6061과 SUS316 재질의 캡슐에 대한 고유진동수는 거의 같은 값을 보였다.

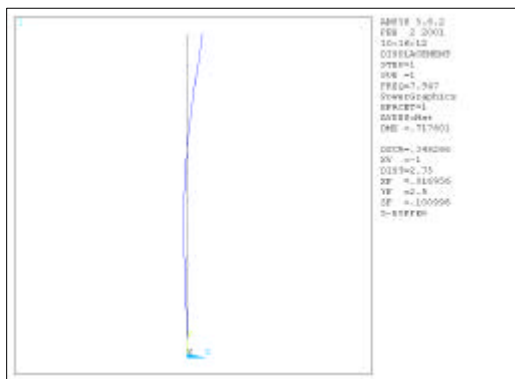


Fig. 11 1st mode shape of SUS316 under fixed-free boundary condition

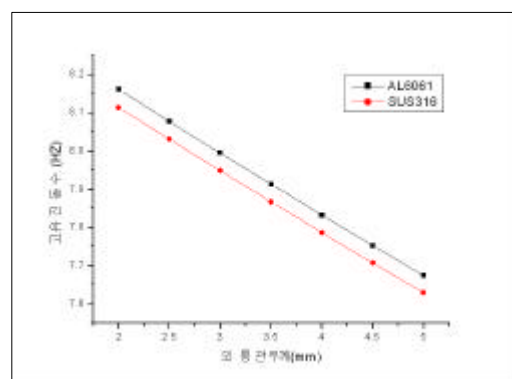


Fig 12 Comparison of frequency under fixed-free boundary condition

외통관 및 지지관의 두께가 2~5mm에서의 기본진동수는 AI6061의 재질일 때 8.16~

7.67Hz, SUS316의 재질일 때는 8.11~7.63Hz이다.

2.5.2. 힌지-자유경계조건

원통형 캡슐의 힌지-자유경계조건인 좌굴해석에서 사용한 해석모델 및 요소를 Fig. 2와 같다. 힌지-자유 조건을 갖는 두께가 3mm인 경우 SUS316 재질의 원통형 캡슐에 대한 기본진동수는 6.83Hz이고, Fig. 13은 모드형상을 보이고 있다. 진동해석을 통한 모드형상은 좌굴 모드형상과 동일한 결과를 보인다. 재질과 두께의 변화에 따른 고유진동수 변화를 Fig. 14에 나타내었다. 고유진동수의 관점에서 두께증가의 효과는 Al6061과 SUS316은 거의 비슷함을 보이고 있다.

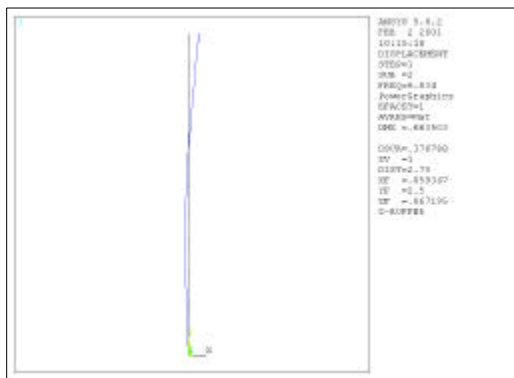


Fig. 13 1st mode shape of SUS316 under hinge-free boundary condition

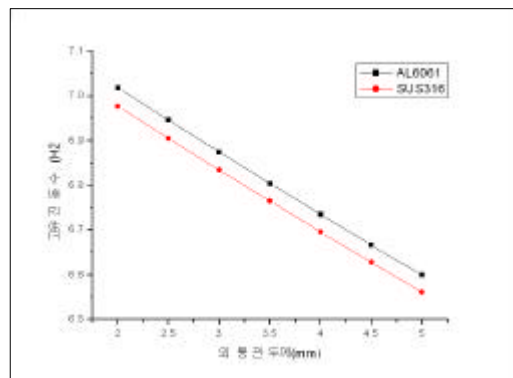


Fig. 14 Comparison of Frequency under hinge-free boundary condition

힌지-자유 조건의 경우 기본진동수는 두께변화에 따라 Al6061의 재질일 때 7.02~6.60Hz, SUS316의 재질일 때 6.98~6.56Hz의 범위에 있어 두께의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 고정-자유경계조건과 비교하면 약 1.0Hz 낮은 값을 갖는다. 이것은 고정-자유경계조건이 힌지-자유경계조건보다 구속력이 크기 때문이다.

힌지-자유경계조건일 때 핵연료캡슐의 1차 모드형상은 고정-자유 경계조건의 모드형상과 동일하다.

3. 결론

본 연구에서 원통형 캡슐의 구조물에 대해 응력, 열응력, 좌굴하중, 진동해석을 수행하였고, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 또한 여러 가지 설계변수를 채택하여 보다 최적화할 수 있게 변수의 영향에 대하여 평가를 하였다.

- 1) 외통관 및 보호관의 두께의 증가보다는 재질의 변화가 특히 열응력에 대해서 민감한 영향을 주었고 원통형 캡슐에 대한 응력에 대해서는 영향을 미치지 않았다.
- 2) 외통관 및 두께의 증가는 열응력에 대해서는 거의 영향을 주지 않았다. 열응력에서 Al6061을 선택할 경우 고려한 모든 두께에서 항복응력값을 넘었다.
- 3) 원통형 캡슐의 경계조건의 영향으로 고정-자유의 경우와 힌지-자유의 경우보다 임계좌굴하중이 약 1.2배 높게 나타났다.
- 4) 고유진동 특성은 두께와 재료의 영향보다는 경계조건의 영향을 많이 받으며, SUS316

인 경우 한지-자유경계조건에서 기본진동수가 6.83Hz이고, 고정-자유경계조건에서 7.95Hz이다.

참고문헌

1. 한병기, 원종진, 이영신, 이희각, “고체역학”, 희중당, 1997.
2. 강영환 외, “재료 조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-985/98, 1998.
3. Walter D, Pilkey, “Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices”, John Wiley & Son, Inc, 1994.
4. 배기광 외, “DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석 보고서”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1157/98, 1998.
5. 이영신 외, “충격안정성을 고려한 계장 Capsule 구조물의 구조해석 및 설계최적화”, 충남대학교, KAERI/CM-048/95, 1995.
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Appendix A, 1995
7. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Subsection NB, 1995