

## 증기 폭발 하중에 대한 TROI 용기의 안전성 평가

### An Assessment of the Integrity of the TROI Vessel under the Steam Explosion Loads

조종래,  
한국해양대학교,

송진호, 김희동  
한국원자력 연구소

#### 요약

본 연구에서는 한국원자력 연구소에서 수행하고 있는 용융물과 물의 반응 실험인 TROI 실험에 사용되는 격납용기가 가상적인 증기 폭발 하중에 대해 건전성을 유지하는지에 대해 평가를 하였다. AP600 및 KNGR에 적용되었던 방법론을 바탕으로 하여 증기 폭발 압력과 그에 따른 하부헤드 및 지지대의 건전성을 ANSYS 코드를 사용하여 해석하였다. 가상의 최대 증기 폭발 하중인 3ms-123MPa의 동 하중에 대해 해석을 수행한 결과 파손이 일어나지 않음을 알 수 있어, TROI 용기의 안전성이 확보되었다. 한편, 운전하중을 보수적으로 7.38ms-50MPa로 가정할 경우 약 8회 정도의 반복 실험이 가능함을 알 수 있다. 실험 횟수가 8회 이상 넘어가기 전에 본 연구에서 가정된 하중 조건과 실제 측정된 하중 조건을 비교하여, 격납 용기의 건전성을 재 평가할 필요가 있다.

#### Abstract

This paper analyzes the integrity of the containment chamber of the TROI experiment, which is Fuel Coolant Interaction (FCI) experiment using reactor material performed by Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), under a dynamic load induced by a postulated steam explosion. By utilizing the analyses procedures used in the AP600 and KNGR, the integrity of the lower head of the containment chamber under a dynamic load is analyzed by ANSYS computer code. It is demonstrated that the integrity of the TROI vessel is maintained under a maximum dynamic load of 3ms-123Mpa induced by a postulated steam explosion. Also, it is shown that the containment chamber can withstand 8 repeated experiments under a conservative operating load of 7.38ms-50Mpa. It is recommended that an evaluation of the integrity of the chamber is necessary by comparing the measured dynamic load during the experiment with the dynamic load used in this analysis before reaching 8th experiment.

## 1. 서론

한국원자력연구소에서는 원자로 물질인 Corium (UO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Zr의 혼합물) 20kg을 이용하여 용융물과 냉각수 반응 (Fuel Coolant Interaction ) 실험을 수행하고자 한다[1]. 종전의 연구 결과들에 의하면 원자로 물질을 이용하여 실험을 하였을 경우 증기폭발 가능성이 거의 없는 것으로 보고되어 있다[2,3,4,5]. 그러나 작업자의 안전을 고려하기 위하여 가상의 폭발하중을 고려하여 격납용기의 파손여부를 평가하고자 한다.

본 해석의 목적은 TROI ( Test for Real Corium Interaction with water) 용융물 냉각수 반응 실험용 격납용기(containment chamber)의 하부헤드(lower head)가 증기폭발에서 발생하는 폭발하중에 대해 건전성을 유지하는지의 여부에 대한 평가이다. Theofanous등[6]은 웨스팅하우스의 AP600과 같은 원자로 설계에서 증기 폭발 압력과 그에 따른 하부헤드의 건전성을 ABAQUS 코드를 사용하여 수행하였다. 최근에 방광현등[7]은 한국형 차세대원자로 (KNGR)에 대해서 증기폭발 거동을 해석하였으며 하부헤드의 건전성은 ANSYS[8] 코드를 사용하여 수행하였다. 본 보고서는 상기의 두 연구의 방법론을 바탕으로 실험용 격납용기의 하부헤드와 support 및 받침판(buffer)의 건전성을 평가하는 것이다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 유한요소 모델링

격납용기는 축대칭 모델링하였으며 하부헤드에서 멀리 떨어진 상부는 해석에 영향을 주지 못하므로 반경높이까지만 해석범위에 포함하였다. Fig. 1에는 해석 대상인 격납용기에 대한 유한요소망을 나타내고 있다. 절점의 수는 919개이고 요소(PLANE42)의 수는 784개이며, 받침판과 헤드가 만나는 부분은 contact 요소(CONTA171, TARGE169)를 사용하였다.

운전조건(operating condition)의 온도인 160°C(320°F)를 기준으로 구한 물성치[4]는 Table 1과 같다. 응력과 변형률 관계는 Fig. 2와 같이 나타낸다.

Table 1. Material properties at 160°C(320°F)

	SA240 type304 (head)	SA516 Gr.70 (pad)	SA283 Gr. (buffer)
Young's modulus, E (N/mm <sup>2</sup> )	185610	194580	194580
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3
Mass Density(kg/mm <sup>3</sup> )	7.951e-10	7.951e-10	7.951e-10
Yield stress(N/mm <sup>2</sup> )	152.8	231.2	182.3
Tangent modulus, E <sub>T</sub> =0.04E (N/mm <sup>2</sup> )	7424	7783	7783
Design stress intensity (N/mm <sup>2</sup> )	136.2	154.1	121.4

본 실험에서는 폭발성이 없다고 알려진 원자로 물질을 사용하므로 그 폭발하중에 대해서는 자료가 없다. 따라서 두 가지 폭발하중을 고려하기로 하였다. 첫 번째는 **최대 폭발 하중**인데, 이것은 상사물질 (예를 들면  $Al_2O_3$ )을 이용한 현재까지의 증기 폭발 실험 중에서 가장 폭발성이 큰 경우의 하중을 대표할 수 있는 값이다[1]. 두 번째로는 실험 중 예상되는 **최대 운전 하중**으로 기존에 원자로 물질을 사용한 실험에서의 최대 하중인 20 Mpa를 고려한 하중 조건이다[2,3,5].

Water chamber 바닥에 작용하는 압력은 증기 폭발 시에 발생할 수 있는 최대폭발압력을 기준으로 선정하였다. 최대 폭발하중은 참고 문헌 1에 따라 Fig. 3와 같이 직경 600mm의 바닥 면에 펄스폭(pulse duration)이 3ms인 삼각파의 형태로 최대 123Mpa이 작용하는 경우이다. 최대 운전 하중은 최대 예상 압력인 20 Mpa을 보수적으로 50 Mpa로 가정하고, 파의 폭도 최대폭발하중과 동일한 충격량 (Impulse)를 가지는 것으로 가정하였다.

본 해석에서는 이 두 하중 외에도 다양한 운전 조건에 따른 용기의 변형 및 파손 여부를 평가하기 위하여 동일한 충격량 (Impulse)를 가지는 여러 가지 동하중 조건을 고려하였다. 그림 4에 여러 가지 동하중 조건이 나타나 있다.

## 2.2 파손기준(failure criteria)

해석의 초점은 우선 가상의 최대 동 하중이 발생하였을 경우 TROI 격납 용기가 파손되는가의 여부이다. 이를 평가하기 위하여 파손 기준을 정의할 필요가 있다. 재료가 큰 하중을 받을 때 등가응력(equivalent stress)이 항복응력을 초과하면 국부적으로 항복이 진행되므로 탄소성(elasto-plastic) 해석을 수행해야 한다. Stress intensity는 ASME SEC. III의 code [9] 설계에서 반영하는 값으로 failure의 판단 근거가 되지 못한다.

연성재질(ductile material)의 파손기준은 일반적으로 등가소성변형률(equivalent plastic strain)에 기초를 두고 있다. Olive등[10]은 연강(mild steel)을 포함한 여러 가지 재질로 만든 원통셀에 폭발하중을 가해서 파괴에 이르는 strain이 70-80%임을 관찰하였다. Pao와 Gilat[11]는 A533B강으로 실험을 하여 변형률이 50% 이상에서도 파괴가 일어나지 않음을 확인하였다. Shockey등[12]은 동일 재질에 대해서 파단 변형률이 80%에서 116%범위 인 것을 확인하였다. 또한 strain rate가  $1000\text{ s}^{-1}$ 까지 온도와 strain rate의 영향은 없다는 것을 밝혔다.

그러나 매우 정확한 실험 결과가 부족하기 때문에 파손기준은 많은 여유를 두고 정의할 수밖에 없는 상황이다. 따라서 재료 내부에 기공(void)이 발생하기 시작하는 변형률을 파손이 시작하는 것으로 가정하여, 그 값이 실험에 의해서 등가소성변형률이 11%정도임을 확인하였다. Table 2와 같이 등가소성변형률이 11% 이상일 때 파손 가능성을 확률적으로 나타내었다.

Table2. Quantification of wall failure criteria

Likelihood	Wall fractional thickness with plastic equivalent strain over 11%	Probability
Physically unreasonable	First Fiber	$<10^{-3}$
Outside of spectrum	20%	$10^{-2}$
Edge of spectrum	40%	$10^{-1}$
Certain failure	60%	$10^0$

### 2.3 해석결과 및 검토

최대 폭발 하중 및 최대 운전하중을 포함하는 다양한 하중 조건에 대해 동하중 해석을 수행하였다.

#### 2.3.1 최대 폭발 하중에 대한 용기의 파손 여부

Fig. 5와 6은 최대압력이 123MPa 이고 펄스폭이 3ms 인 하중조건(CASE 1)에서 시간이 3ms일 때의 등가응력, 등가변형률을 각각 나타내고 있다. 등가응력은 항복응력을 초과하기 때문에 국부적으로 항복이 진행되므로 탄소성해석을 수행하였다. Fig. 7은 최대변형률이 작용하는 head부의 절점 A (Fig. 2 참조)에서 시간에 따른 등가변형률의 거동을 나타내고 있다. 압력이 최대인 때는 1.5ms 이지만 최대의 변형률은 2ms에서 발생한다. 이것은 압력 파가 전달되는데 걸리는 시간이 존재하기 때문이다. 등가변형률의 최대값이 head와 support에서 각각 10.1%와 9%로 11% 이하이기 때문에 파손될 가능성은 없다. Fig. 8와 9은 head와 support에서 펄스폭에 따른 최대의 등가변형률을 각각 나타내고 있다. 동일한 폭발 에너지라도 펄스폭이 클수록 변형률값은 급격히 감소한다. Fig. 10은 head의 최대 변형량을 펄스폭에 따라 나타낸 것이다. 3ms-123MPa의 경우 최대 변위가 136mm이다.

#### 2.3.2 최대 운전 하중에 대한 용기의 변형률 및 반복 실험 가능성 평가

Fig. 11는 최대 운전하중이 2회 사이클로 작용할 때 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 하중의 상태는 7.38ms-50MPa 이며 첫 사이클이 끝나 후 최대 변형률은 5.5% 이고 이어지는 사이클에서 최대값은 6.1%로 최대변형률이 11%증가하고 있다. 따라서 이러한 경향으로 변형률이 증가한다고 가정하면 8회 정도의 실험이 가능하다. 따라서 최대 운전하중을 보수적으로 7.38ms-50MPa로 가정하여 해석을 수행한 결과 약 8회 정도의 실험이 가능함을 알 수 있었다. 따라서 실험 중에 동하중 조건을 지속적으로 관찰하여 최대 운전하중 조건을 넘는지 여부를 평가하고, 최대 운전하중에 가까이 갈 경우에는 용기의 구조해석을 다시 수행하여 작업자의 안전을 재고하면 될 것이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 TROI 실험에 사용되는 격납용기가 가상적인 증기 폭발 하중에 대해 건전성을 유지하는지에 대해 평가를 하였다. 가상의 최대 증기 폭발 하중인 3ms-123MPa의 동 하중에 대해 해석을 수행한 결과 파손이 일어나지 않음을 알 수 있어, TROI 용기의 안전성이 확보되었다. 한편, 최대 운전하중을 보수적으로 7.38ms-50MPa로 가정하여 해석을 수행한 결과 약 8회 정도의 반복 실험이 가능함을 알 수 있다. 실험 횟수가 8회 이상 넘어갈 경우에는 본 해석에서 사용한 과도하게 보수적인 동하중 조건을 검토하여 지속적인 실험의 타당성을 평가하여야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적인 지원을 받았습니다.

### References.

- [1] 송진호, 박익규, 황문규, 홍성완, 김종환, 김희동, 한국원자력학회 † 99추계학술대회 논문집, 1999.
- [2] H. S. Park, R. Chapman, M. L. Corradini, Vapor explosions in a one-dimensional large scale geometry with simulant melts, NUREG/CR-6623, 1999.
- [3] T. P. Speis and S. Basu, Fuel-coolant interaction phenomena in reactor safety: Current understanding and future research needs, Proceedings of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, JAERI-Tokai, Japan, 1997.
- [4] D. H. Cho and D. R. Armstrong, W. H. Gunther, Experiments on interactions between Zirconium-containing melt and water, NUREG/CR-5372, 1998.
- [5] I. Huhtiniemi, D. Magallon, H. Hohmann, Results of KROTOS FCI tests: Alumina vs. Corium Melts, Proceedings of final program of CSNI specialist meeting on fuel coolant interactions, JAERI-Tokai, Japan, 1997.
- [6] T.G. Theofanous, W.W. Yuen, S. Angelini, J.J. Sienicki, K. Freeman, X. Chen and T. Salmassi, "Lower head integrity under steam explosion loads", Proceedings of the OECD/CSNI Specialists Meeting on Guel-Coolant Interactions, Vol. II, 63-118, Tokai-Mura, Japan, May 19-21, 1997.
- [7] Kwang-Hyun Bang, Jong-Rae Cho and Soo-Yong Park, An assessment of reactor vessel integrity under in-vessel vapor explosion loads, 한국원자력학회지, 2000년 8월호 출판예정.
- [8] ANSYS Users Manual, Swanson Analysis System Inc., 1985.
- [9] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1-Appendices.
- [10] F. Olive, A. Nicaud, J. Marilleau and R. Loichot, "Rupture behavior of metals in explosive expansion", Institute of Physics Conference Series, No. 47, 242-251, The Institute of Physics, 1979.
- [11] Y.H. Pao and A. Gilat, "High strain rate deformation and failure of A533B steel at various temperature", Acta Metall. Mater., Vol. 40, 1271-1280, 1990.
- [12] D.A. Shockey, L. Seaman, K.C. Dao and D.R. Curran, "Kinetics of void development in fracturing A533B tensile bars", J. Pressure Vessel Technology 102, 14-21, 1980.

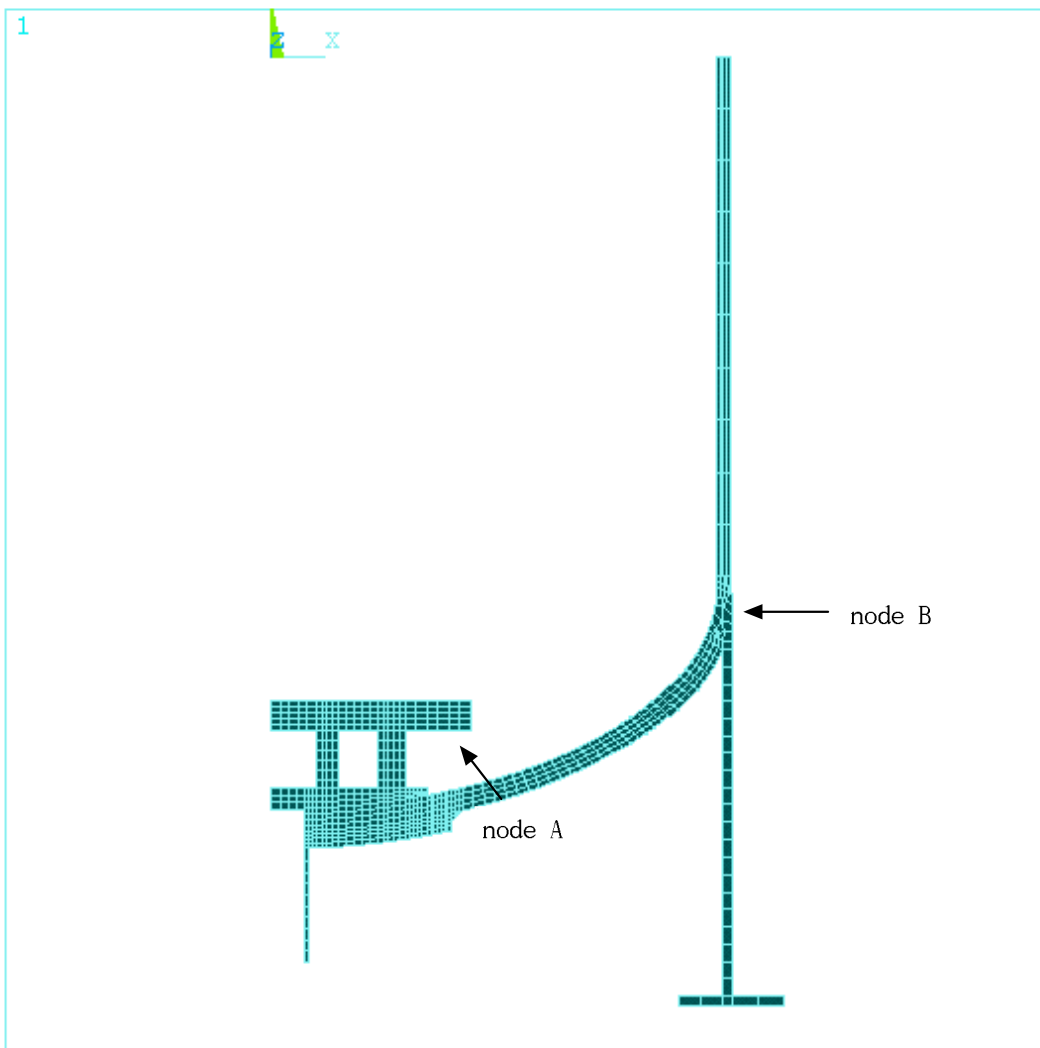


Figure 1. Finite element mesh

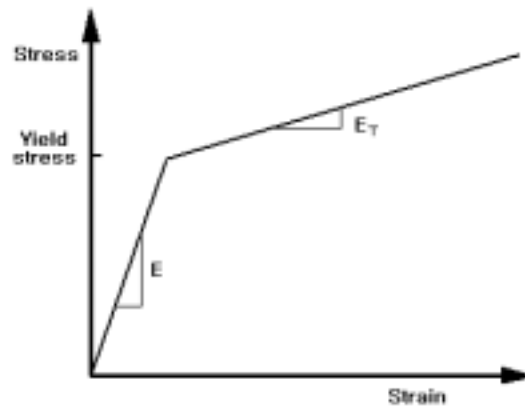


Figure 2. Water chamber base pressure applied on 600mm diameter(CASE I)

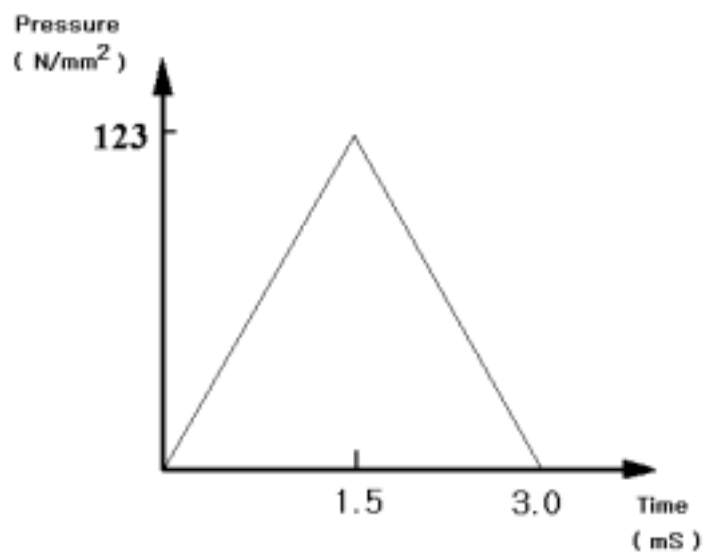


Figure 3. Water chamber base pressure applied on 600mm diameter(CASE I)

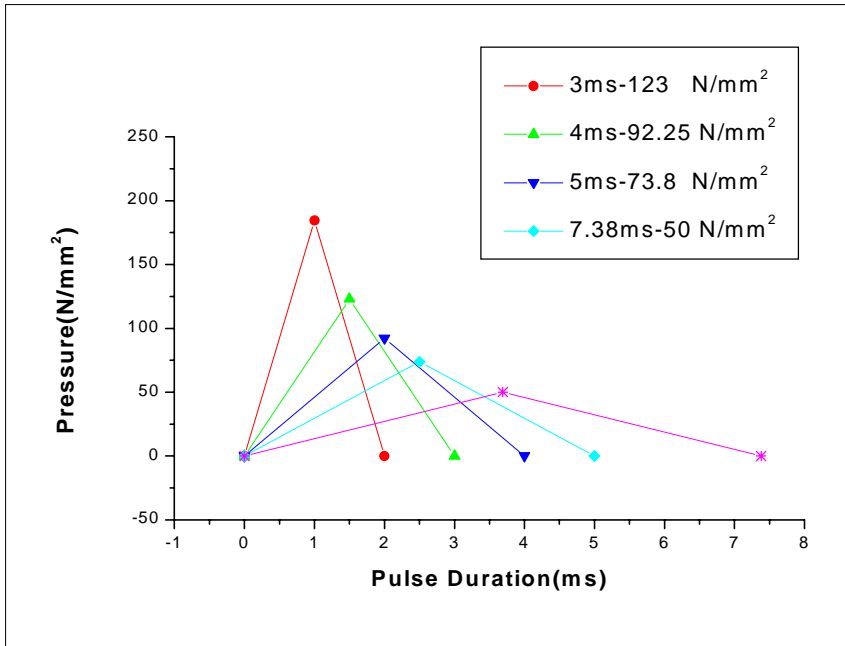


Figure 4. Various conditions of pressure applied on 600mm diameter



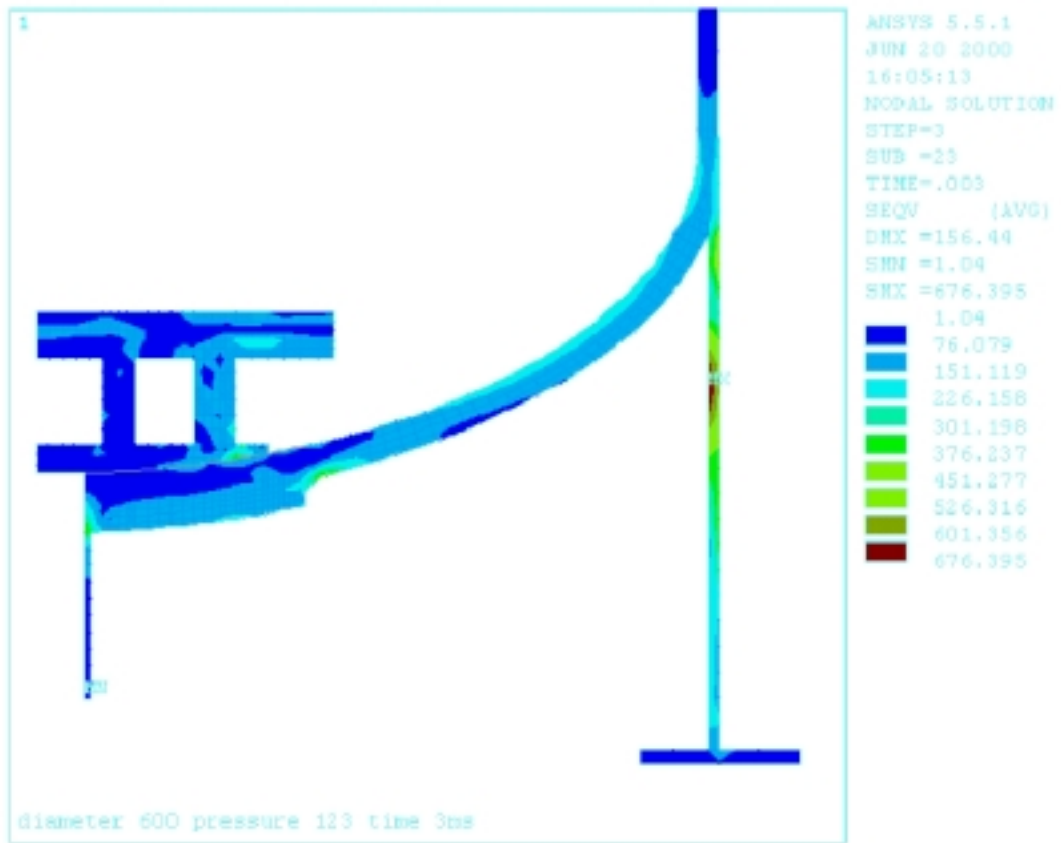


Figure 5. Distribution of equivalent stress at 3msec under CASE I

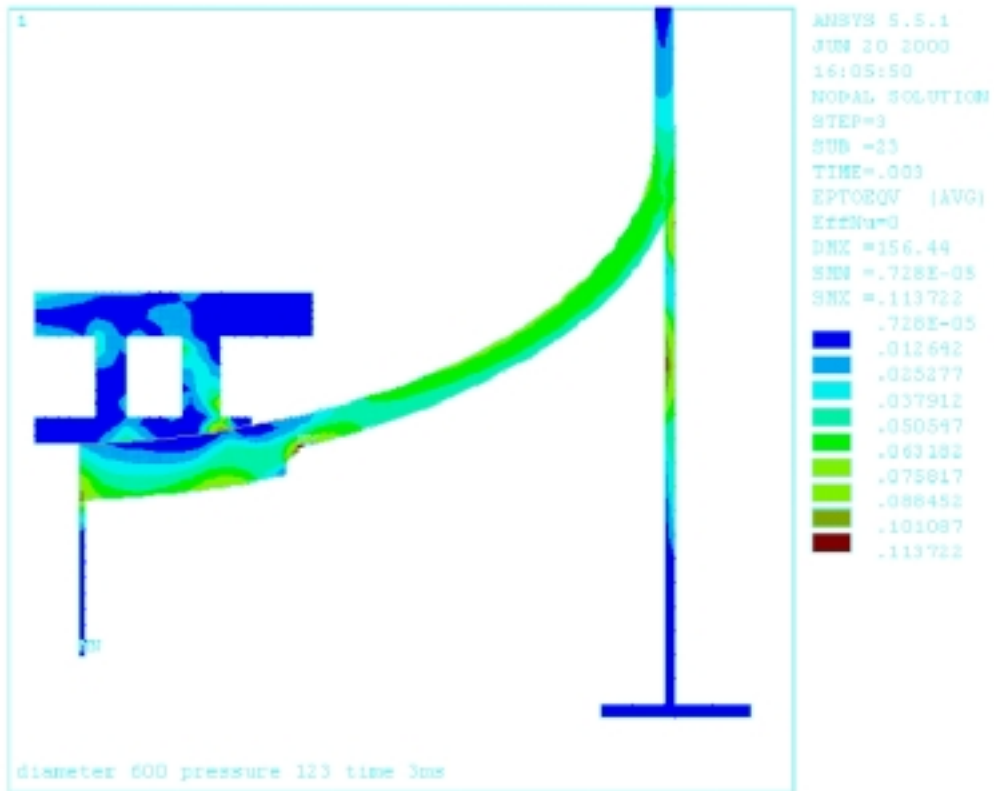


Figure 6. Distribution of equivalent strain at 3msec under CASE I

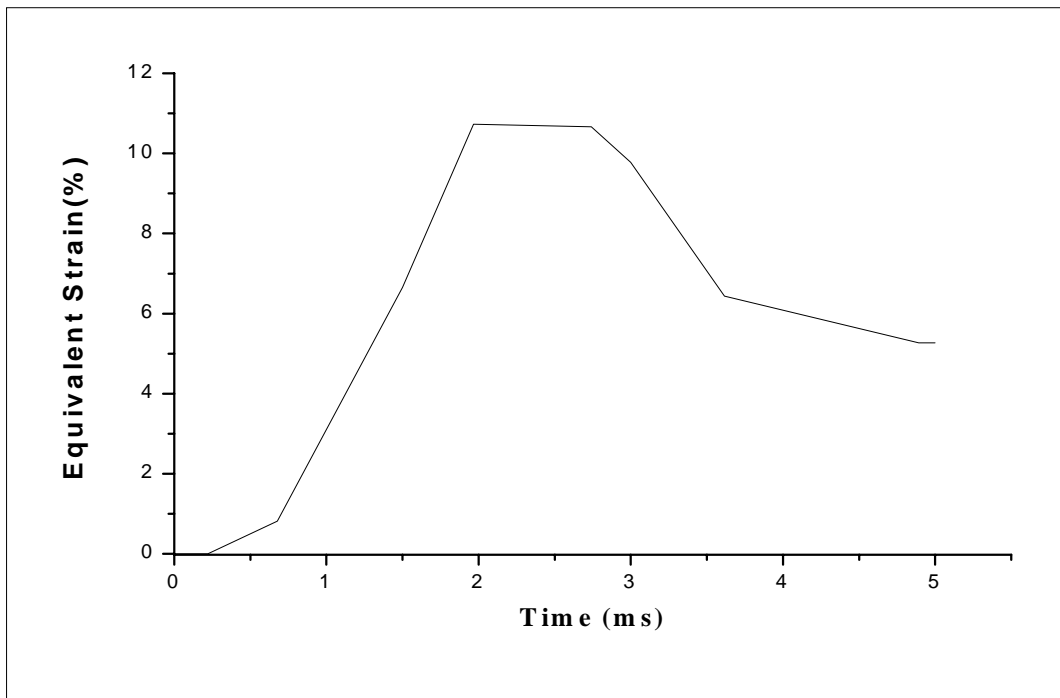


Figure 7. Time history of equivalent strain at node A under CASE I

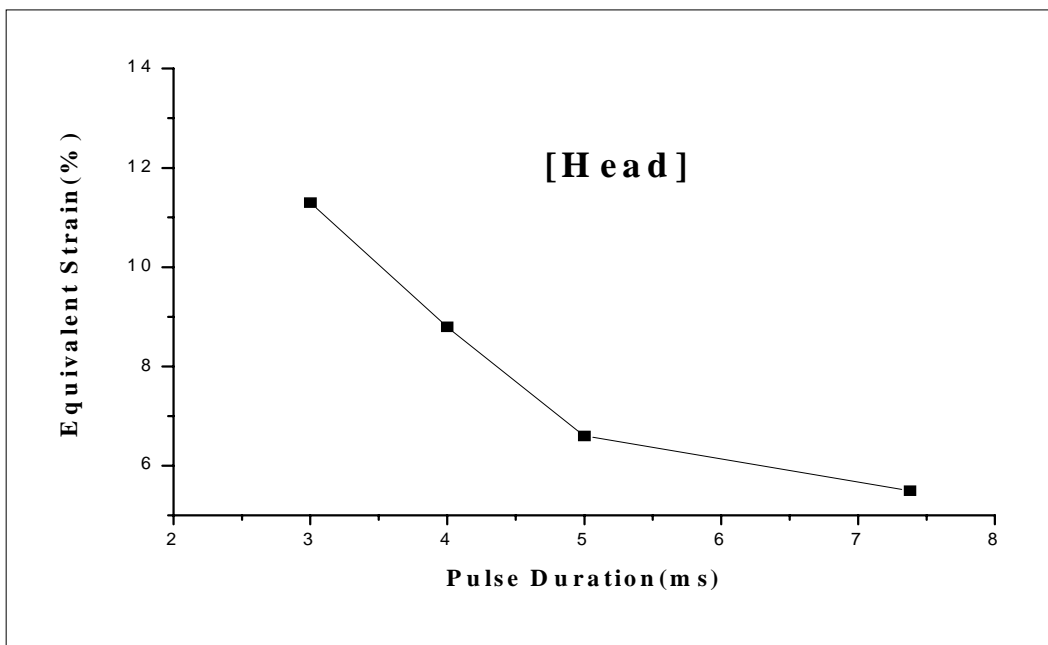


Figure 8. Equivalent strain/pulse duration relationships at node A in head

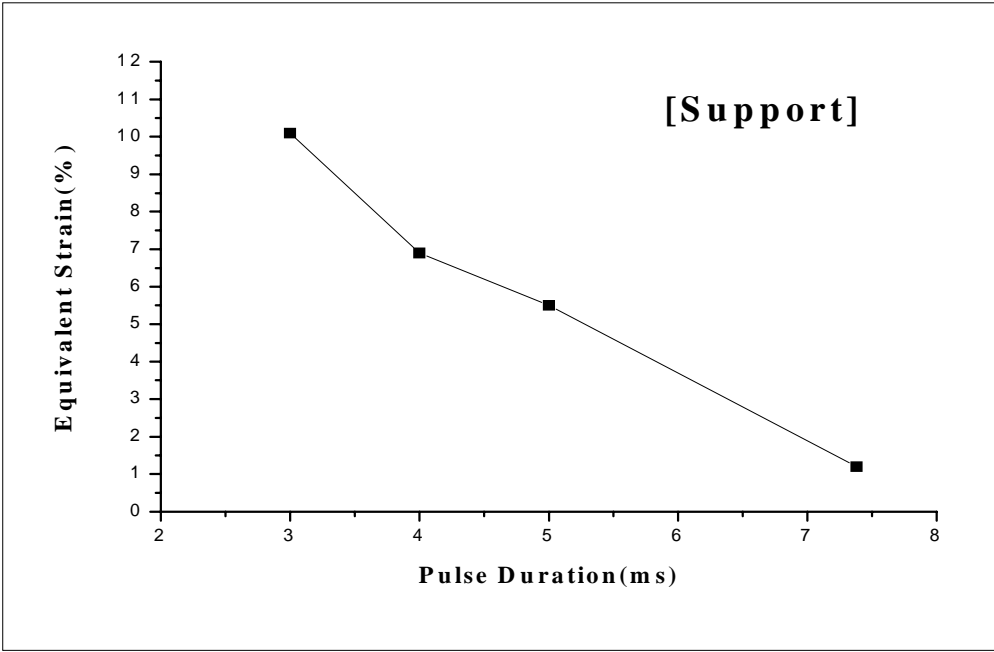


Figure 9. Equivalent strain/pulse duration relationships at node B in support

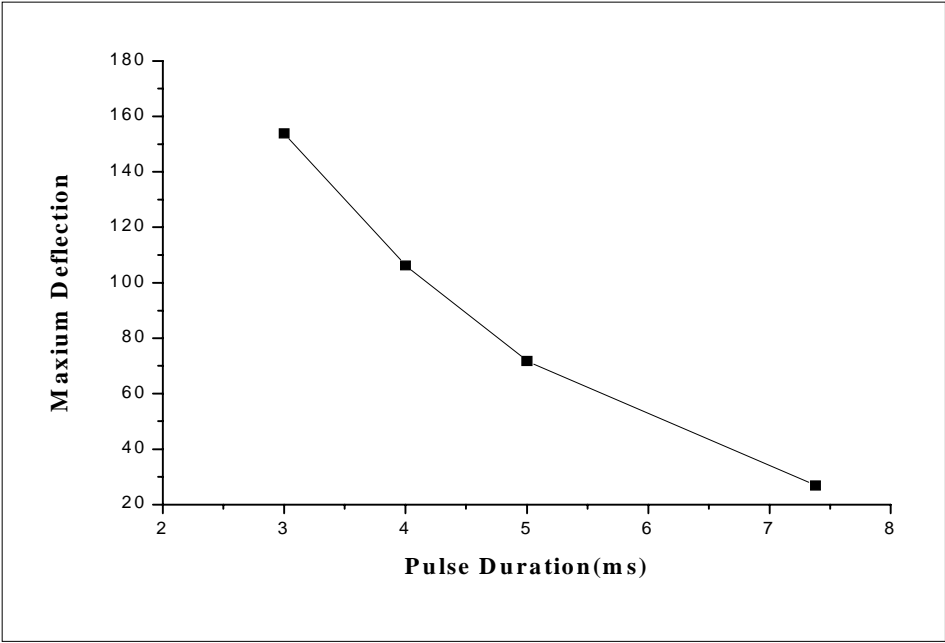


Figure 10. Maximum displacement/pulse duration relationships in head

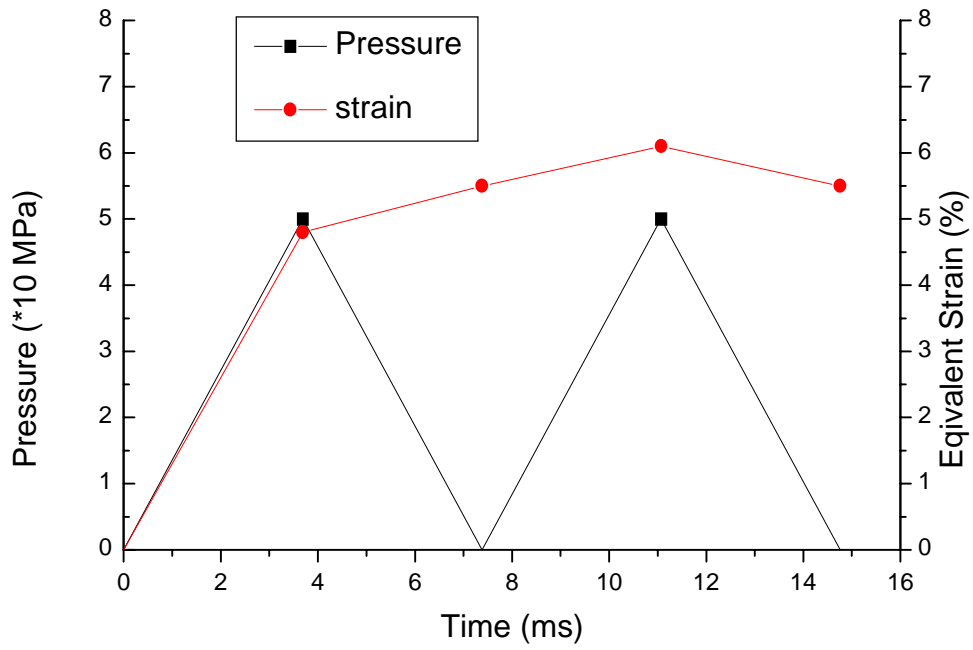


Figure 11. Equivalent strain with two cycle of pressure in head