'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료 피복관의 천공거동에 대한 해석 및 실험평가

Analysis and Experimental Evaluation for the Puncturing Behavior of Nuclear Fuel Clad

서기석, 이형권, 구정회, 박성원, 홍성인*

한국원자력연구소, 충남대학교*
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

사용후핵연료 핵분열성 기체량 및 봉내압 측정장비를 개발하기 위해, 우선 사용후핵연료의 피복관에 대한 천공 거동평가가 필요하게 되었다. 우선 천공력 평가를 LS-DYNA3D **전산코드를 이용하여 소성 및 파단을 고려한 유한요소 해석을 수행하여, 그 결과로 천공속도에 따른 천공력과 소성 변형부분을 얻었다. 천공장치를 이용한 실험을 통하여 천공력과 천공 깊이에 따른 관통여부 및 피복관 직경의 소성변형 평가를 수행하였다. 이 논문에서는 핵연료 피복관의 천공에 대한 전산 해석과 실험을 따라, 천공 장치의 설계자료와 핵연료의 피복관의 천공력, 소성변화량과 관통할 수 있는 깊이 등의 천공 조건을 제시하였다.**

Abstract

To develope the equipment that measure the fission gas and cladding pressure of nuclear spent fuel, the evaluation of puncturing behavior of nuclear fuel clad is required. First, FEM analyses considering the plastic and failure were performed to evaluate the puncturing force using LS-DYNA3D computer code. As the results of these analyses, the puncturing force and plastic deformation were acquired in the case of the various puncture speed. Through the experiment using the puncture equipment, the puncturing force, the penetration due to the puncture depth and the plastic deformation for the diameter of clad tube were evaluated. This paper presents the puncturing conditions such as the design input data of puncture equipment, the puncturing force and plastic deformation of the nuclear fuel clad, the puncture depth satisfying the penetration, by computer analysis results and experimental data.

1. 서 론

사용후핵연료과 관련된 작업은 고준위 방사성 물질이므로, 방사성 차폐벽과 밀폐된 공간이 있는 핫셀에서 수행되어야 한다. 핫셀의 작업환경은 사람이 임의로 접근할 수가 없으므로, 모든 장비의 작동은 원격화 시켜야 하며, 그러므로 핫셀 설치 전에 충분한 실험을 통해 천공 조건을 설정하여야 한다. 사용후핵연료의 기체량 및 압력을 측정하기 위해, 먼저 핵연료를 둘러쌓고 있는 피복관을 천공하여야 하며, 천공장치는 천공뿐만 압력을 측정하기 위해 압력 경계를 유지하여야 한다.

핵연료의 피복관은 Zircaloy-4 재질로 되어있다. 연성이 좋은 금속이므로 피복관을 관통시키기 위한 조건을 수립하는 것이 중요하다. 피복관의 천공력 거동은 관통 조건을 만족시키기 위해 탄성 영역을 넘어 소성영역과 극한강도와 파단에 이르기까지 피복관 재질의 전 기계적 거동이 나타나게 된다. 천공에 대한 이론적인 평가 방식은 기계가공 분야에서 소성에 의한 금속성형 방식인 penetration, blanking 및 piercing 등의 공정개발을 위해 발전되었다. 천공이론 해석은 그림 1과 같이 탄성영역과 파단을 제외한 소성영역에서 주로 판재 혹은 구 등의 천공 거동에 대한 평가만 검토되었으며, 실린더 혹은 쉘에 대한 천공 즉 관통에 대한 평가는 다루고 있지 않고 있다. 따라서 핵연료 피복관의 천공문제는 유한요소 전산해석방식과 실험을 통한 평가 방식을 채택하게 되었다. 소성 파괴에 대한 전산해석방식은 일반적인 구조해석 코드에서는 주로 탄성 파괴를 다루고 있으며, 동적 구조해석 전산코드로써 DYNA-3D 혹은 ABAQUS-Explicit 등은 소성 파단 거동까지 해석이 가능하다.

천공 장치를 설계하기 위해 천공력은 전산 해석적 방법으로 평가하여, 천공 장치의 유압계통 설계 자료로 활용되었고, 실험을 통하여 전산 해석 방식에 대한 검증을 수행하였으며, 핵연료 피복관 천공을 위한 실험 조건을 수립하였다.

2. Zircaloy Tube의 천공력 전산해석

가. 기하학적 모델링 및 재질특성

천공장치 설계를 위한 전산해석 code는 LS-DYNA3D ver. 940을 적용하였으며, 해석방법은 소성 파괴를 고려하였다. 기하학적 모델링에서 피복관의 외경 및 두께는 실험과 동일하게 적용하였으며 길이는 51 mm이고, 전체 크기 1/2에 대하여 3차원 정육면체 요소가 5253개, 절점 7926개로 모델링하였다. 천공 핀의 기하학적 형상은 40。각도의 예리한 핀의 정점을 갖고 있으므로 이를 모델링할 경우에 피복관의 모델과 상호 관통 조건을 만족시키기 어려우므로, 핀의 정점은 직경 1 mm의 미세 평면이 있다고 가정하였다. 따라서 피복관의 천공 위치의 일부분에서 핀의 정점에 대한 모델링의 크기를 적용하여 0.25 mm의 미세한 크기의 요소로 분할시켰다. 피복관 두께가 0.615 mm이지만 3개 층으로 요소분할을 하였다. 천공 속도는 30 mm/s로 거동하여 초기속도와 해석 구간을 50 ms로 주어졌으며 따라서 천공 깊이를 1.5mm로 가정하였다. 천공속도를 증가 시켜 200 mm/s로 적용시켰으며, 해석구간은 10 ms로 천공 깊이 2 mm까지 수행하였다. 경계조건은 대칭되는 중심 면의 수직방향을 고정시켰으며, 피복관 튜브의 하부에 강성 면을 적용시켰다. 모델링에 대한 형상은 그림 2와 같다.

피복관 튜브의 재질인 Zircaloy-4의 특성치는 CE 엔지니어링의 자료를 활용하여, 밀도 6.55, 탄성계수 103421 MPa 및 항복강도 482 MPa를 적용하였다. 소성가공계수(Plastic Hardening Modulus : H)를 결정하기 위해 공학적 공칭 응력-변형률(nominal stress-strain) 값에서, 아래와 같은 식을 적용하여 진 응력-변형률(true stress-strain)을 계산하였으며 다음 표1과 같이 적용하였다. 그리고 천공되는 소성 파단 해석을 위해 파단 강도와 최대 연신률을 고려하였다.

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom})$$

$$\varepsilon^{pl}{}_{\ln} = \ln(1+\varepsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E}$$

Table 1. Mechanical Properties of Zircaloy-4 Material

Properties of Zircaloy-4	Ultimate Strength σ_f(MPa)	Uniform Elongation (%)	Fracture Strength σ_f(MPa)	Total Elongation (%)
Nominal stress-strain	641	0.0825	-	0.217
True stress-strain	694.1	0.0793	1005.4	0.196

위 식에 따라 진 응력 및 변형률 곡선의 최대 인장강도는 694.1 MPa와 uniform elongation 0.0793을 계산하였고, 소성가공계수의 결정은 uniform elongation에 대한 최대 인장강도와 항복강도의 차이의 비율로써 계산하였다. 파단강도의 계산은 항복강도(Y)와 소성가공계수의 값에서 선형적인 기울기를 갖는다고 가정하여, $\sigma = Y + H\varepsilon$에서 total elongation을 적용하여 계산하였다. 천공 핀은 초경합금재질로 되어있으나, 해석상에서는 강성 재질로 고려하였다.

나. 천공력의 해석적 평가결과

천공에 대한 해석적 평가에서 완전한 관통에 이르는 거동을 평가하기는 어렵다. 해석 결과로 고 피복관에 천공 핀이 도달하여, 소성 및 파단거동이 일어나고, 그림3과 같이 천공 핀과 접촉된 피복관 면의 반대편에서부터 파단이 발생한다. 그러나, 완전한 관통에 이르는 해석은 접촉면에서 피복관의 일부 요소의 대변형으로 가능하지 않았다. 천공 완료 후 핵연료 피복관의 소성영역에 해당하는 변형부분은 천공 핀을 중심으로 반경 약 5 mm 이내에서 그림 4와 같이 발생함을 알 수 있었다. 응력 분포는 그림 5과 같이 천공 핀을 중심으로 피복관 표면과 그 반대 면에서 최대 응력이 발생됨을 알 수 있었다. 전산해석에 의한 결과로 그림 6과 같이 핵연료 피복관을 천공 핀으로 파열시킬 수 있는 maximum load는 1055.16 Newtons로 평가되었다. 천공 핀의 속도에 따라 천공되는 시간과 최대 천공력의 크기는 다르게 나타났다. 천공 속도 30 mm/s 인 경우에 45.991 mm 구간일 때 16.5 mm/s에서 732 MPa로 나타났다. 천공 속도 200 mm/s 인 경우에 9.55 mm 구간일 때 6.5 mm/s에서 1055 MPa로 나타났다. 이와 같은 결과를 토대로 천공 속도에 따른 천공력을 기준으로 천공시험장치의 설계 자료로 활용하였다.

3. Zircaloy Tube의 천공실험평가

가. 실험모델 및 측정장치

실험은 유압에 의해 천공 핀이 상하 거동을 하며, 핵연료 피복관은 중심각 120 。인 V-블록에 수평자세로 놓인다. 천공 핀이 피복관을 상부에서 피복관 표면으로 수직 하강하여 관통시켰다. 피복관 튜브는 외경 10.16 mm이고, 두께는 0.615 mm 에 대하여 실험을 10회 이상 수행하였다.

천공력을 평가하기 위한 측정계통은 force sensor, amplifier, filter 및 A/D board가 장착된 P/C로 그림 7과 같이 구성되어 있다. 그림 8은 측정계통과 유압장치를 설치한 모습이며, 각 측정장비의 기술 사양은 Force sensor 감도가 4.96 mV/Lb로서, DYTRAN 1050V5를 사용하였으며, amplifier는 DYTRAN 4105를 적용하였다. Filter는 Krohn-Hite 3382로 low, high 및 band pass filtering이 가능한 것이다. 첫 번째 실험에서는 일정한 천공 깊이 3 mm에서 측정계통을 확인하기 위해 cut-off frequency를 실험 번호 1번에서 4번까지는 40 Hz로, 5번은 100 Hz로, 6번은 200 Hz로 각각 수행하였다. 유압의 크기를 40 140 bar에 이르기까지 6 회 이상을 수행하여 신호 내의 노이즈가 최소화되고 최대 천공력의 정점이 확실하게 나타날 수 있는 조건으로 cut-off frequency는 200 Hz로 설정하였다. 그리고 두 번째 실험에서는 천공 깊이를 1 mm에서 0.5 mm 씩 증가시켜 최대 3.5 mm까지 변화시켰으며, 각 조건에서 천공력과 그 단면의 직경 크기 등을 측정하였다. 피복관의 관통여부를 판단하기 위해 피복관 바깥쪽의 천공 부위에 빛을 투과시켜, 피복관 내부로 빛의 관통여부를 관찰하였으며, 천공 깊이에 따라 3 차례이상씩 수행하였다. 천공된 직경에 대한 실측은 천공 깊이 1.5 mm와 3.5 mm에서 천공된 형상을 저용융 금속을 이용하여 replica를 만들어 측정하였으며, 그 중간 값들은 개략적으로 추정하였다.

나. 천공 실험결과

첫 번째 실험으로 그림 9와 같이 일정한 천공깊이에서 천공력 시험의 결과 가운데 1000 Hz 에서 노이즈가 많이 나타나 포함시키지 않았다. 이 때 최대 천공력 크기는 600 800 MPa이고, 총 시간은 225 ms까지 비교하여, 200 Hz의 결과가 선형성이 좋고 정점이 잘 나타내고 있으므로, 두 번째 실험의 조건으로 정하였다. 깊이에 따른 두 번째 실험에서는 각 깊이에서 최대 천공력의 크기는 표 2와 같이 깊이에 비례하고 있다. 천공 깊이에 따른 천공직경은 0.73 2.55 mm 크기로 계산되었으며, 이에 대한 실측값이 표 2에 나타난 바와 같이 계산된 천공 직경에 비해 작은 것은 천공 압력을 가할 때 피복관이 직경방향으로 탄성거동을 하고 있기 때문이다. 그러므로 천공깊이 3.5 mm일 때 실제 관통된 직경이 1.35 mm이면, 천공 핀의 중심각도 40도를 고려하여 보면, 실제의 천공 깊이가 1.85 mm가 되므로, 피복관 직경 방향으로 탄성거동의 크기는 1.65 mm가 됨을 알 수 있다.

Table 2. Maximum Force and Various Size by Puncture Depth

Puncture Depth(mm)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Puncture Force(Newton)	534	582	727	771	823	867
Calculated Hole Dia.(mm)	0.73	1.09	1.46	1.82	2.18	2.55
Measured Hole Dia.(mm)	-	0.5	0.7	0.9	1.1	1.35

Table 3. Tube Diameter Change by Puncture Depth

Puncture Depth(mm)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Tube Dia. in Punch Axis(mm)	10.16	10.16	10	9.81	9.73	9.55
Tube Dia. in Perpendicular Axis(mm)	10.16	10.16	10.2	10.23	10.25	10.25
Penetration	No	No	No	Yes	Yes	Yes

피복관의 진원도의 변화를 알기 위해, 표3과 같이 천공 축과 그의 수직한 축에 대한 피복관의 직경을 측정한 결과이다. 변형 전의 직경은 10.16 mm이므로, 천공 깊이 1과 1.5 mm에서는 변화가 없었다. 천공 깊이 2.0 3.5 mm 구간에서는 피복관의 직경이 소성변형을 일으켜, 피복관 튜브의 진원도가 상실되었으며, 천공 깊이 3 mm일 때, 반경방향으로 최대 0.305 mm의 오차를 보

이고 있다. 그러므로 만약 천공 깊이 2.5   3.5 mm로 가정한다면, 피복관의 직경에 대하여 천공축과 수직방향에서의 영구 변형 증가량 0.69 %   0.89 %의 변화량을, 천공하는 축 방향에서의 영구 변형 감소량 0.34%   6%을 고려하여 압력경계를 유지시킬 피복관의 패킹 구조를 설계되어야 한다. 만약 피복관의 직경변화량과 같이 0.89%의 증가량을 패킹구조의 여유 값으로 고려하지 않는다면, 천공 후 핵연료 피복관이 빠지지 않는 경우가 발생할 것이다.

천공 깊이에 따른 천공력과 관통 여부는 실험적으로 평가되었으며, 최소 천공력은 완전한 관통이 발생하는 천공 깊이 2.5 mm 일 때 771 MPa로 측정되었다. 그리고 천공 깊이 1   1.5 mm까지는 천공 핀이 피복관에 약간의 손상만을 가하고 관통되지 않았으며, 진원도 측정에서도 원래의 피복관 직경 크기로 탄성 회복되었다. 그리고, 관통 여부는 실제로 천공깊이가 2.5 mm 이상일 때 발생하였으며, 이 결과가 본 실험에서는 중요한 시험결과이다.

4. 결론

핵연료 피복관의 천공력 평가에서 첫 번째 중요한 관점 사항은 관통시킬 수 있는 천공력의 크기이다. 그리고, 두 번째 중요사항은 천공 후 피복관의 직경 방향에서 소성 변형 여부이다. 피복관을 관통시킬 천공력에 대한 천공 깊이 1.5 mm 일 때 천공전산 해석의 결과에 따르면 732 MPa, 실험을 통한 결과는 582 MPa로 작게 나타났으며, 이는 천공 핀의 정점 모델링의 부정확성과 피복관의 재질 특성 값이 부정확하게 적용하여 해석 평가가 실험 결과에 비해 크게 나타나고 있으나 해석결과의 보수성을 유지하고 있다. 천공 깊이 2 mm에서는 관통되지 않았으나, 피복관은 소성 변형이 발생하였고, 천공깊이 2.5 mm부터 관통이 발생하였고, 피복관도 소성변형을 일으켰다.

따라서 첫째, 핵연료 피복관의 천공시 정확한 거동을 예측하기 위해서는 파단에 이르는 Zircaloy 재질의 기계적 특성에 관한 연구가 더 진행되어야 한다. 둘째, Zircaloy재질로 된 핵연료 피복관의 천공을 위한 조건은 천공 핀의 중심각이 40도일 때, 관통을 위한 천공 깊이가 2.5 mm이상이며, 최소 771 MPa이상의 힘이 필요하다. 셋째, 천공시 피복관 직경 방향의 소성변화량을 고려하여, 천공 부위의 압력경계를 유지하기 위해서는 패킹 구조물의 내부 직경은 피복관 직경의 0.89 %의 증가량을 고려하여 설계되어야 한다.

핵연료 피복관에 대한 천공력 평가를 고속 동적 파단과 여러 형태의 천공 핀에 대한 연구가 진행된다면 여러 용도로 활용이 가능할 것으로 예상된다. 먼저 발전소의 원자로에서 운전 중에 미세한 이물질이 고속으로 충돌하였을 때 핵연료 피복관의 기계적 파손 여부를 판단하는 기준을 평가할 수 있으며, 신연료의 운반 및 취급 중에 피복관 손상을 일으키지 않도록 기술기준을 수립하는 목적으로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. W. Johnson and P. B. Mellor Engineering Plasticity. John Willey & Sons. (1983)
   The Mathematical Theory of Plasticity, R.Hill, 1983, p209-p221
2. H.M. Wen, N. Jones, Low-Velocity Perforation of Punch-Impact-Loaded Metal Plates, Journal of Pressure Vessel Technology, May 1996, Vol. 118
3. I.S. Golovnin, Yu.K. Bibilashvili, A.V. Medvedev, S.M. Bogatyr. Computer Code for Strain Stress Behaviour and Collapse of Power Reactor Fuel Clads, All Union Scientific Research Institute of Inorganic Material, Moscow, Union of Soviet Socialist Republics

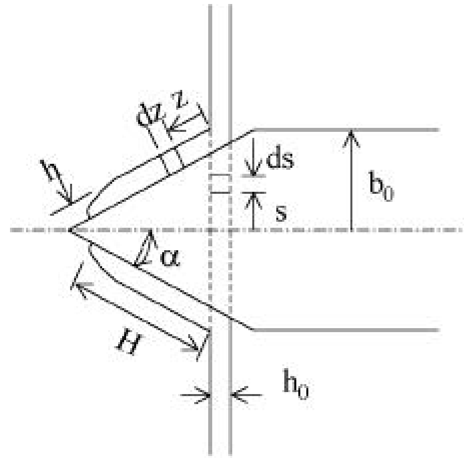


Figure 1. Punch of Shell

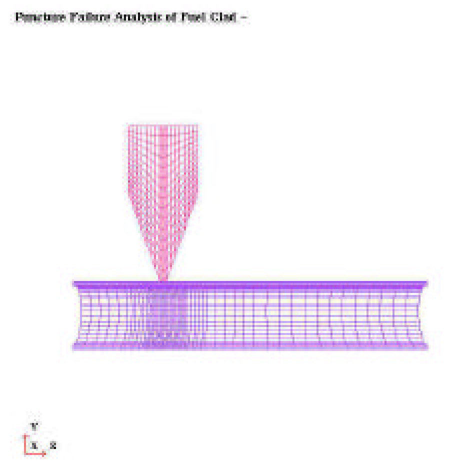


Figure 2. Geometrical Modeling of Puncture Pin and Fuel Cladding Tube

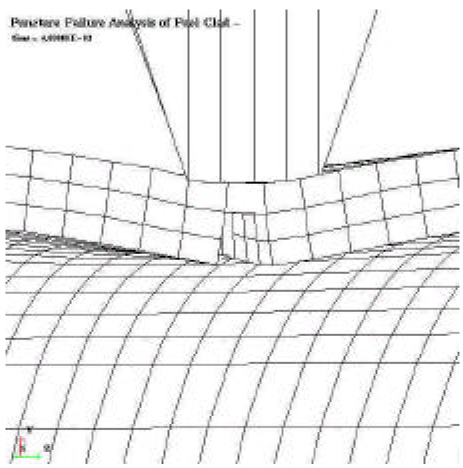


Figure 3. Deformation Shape Detail at Failure Moment

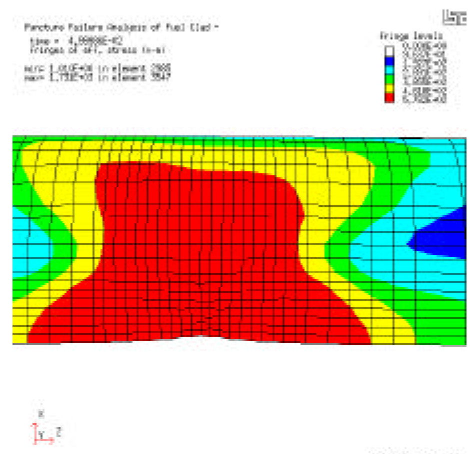


Figure 4. Stress Contour in Punch Axis

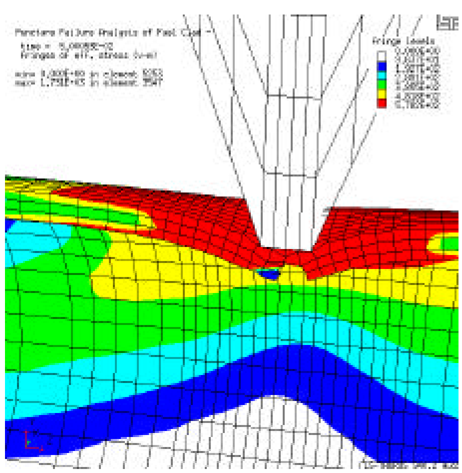


FIgure 5. Stress Contour at Failure Moment

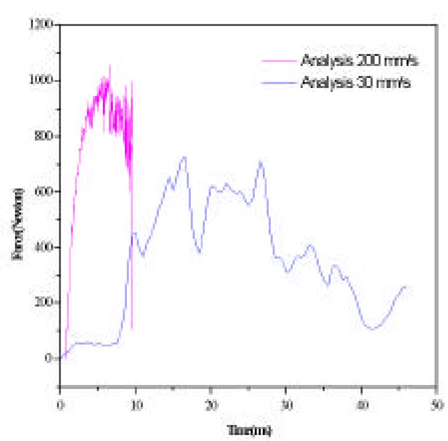
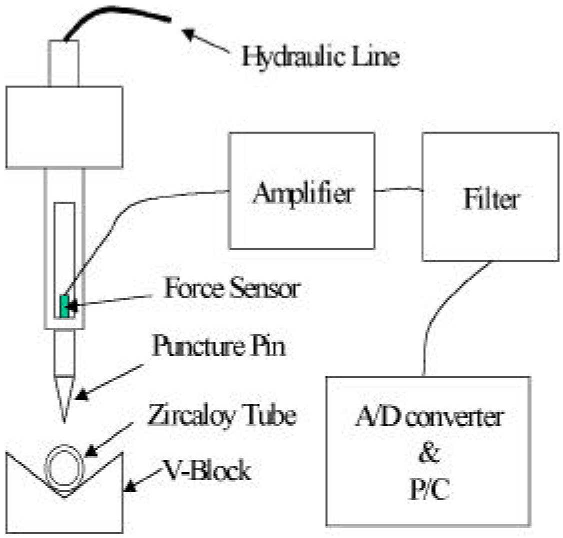


Figure 6. Time History of Puncture Force



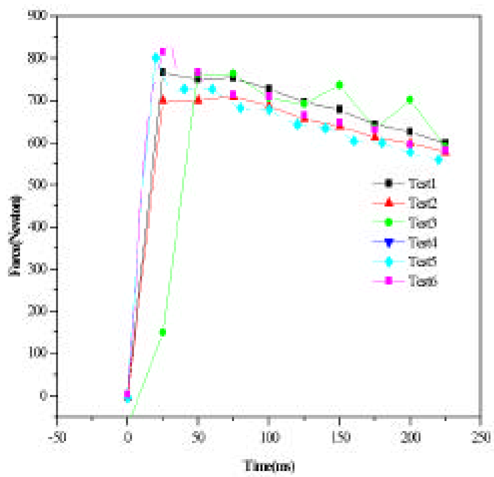
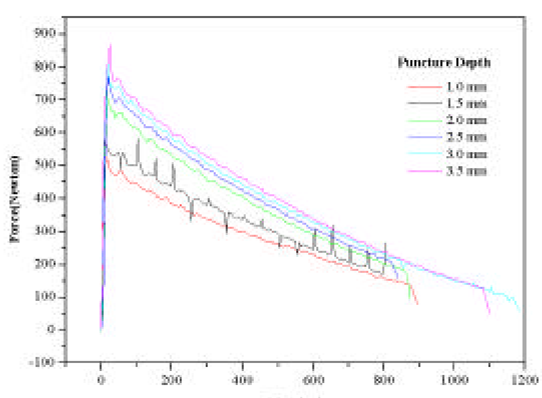


Figure 9. Puncture Force-Time by Test

Figure 10. Fuel Clad Specimen and Punch Hole



/

Figure 11. Force Time History by Puncture Depth

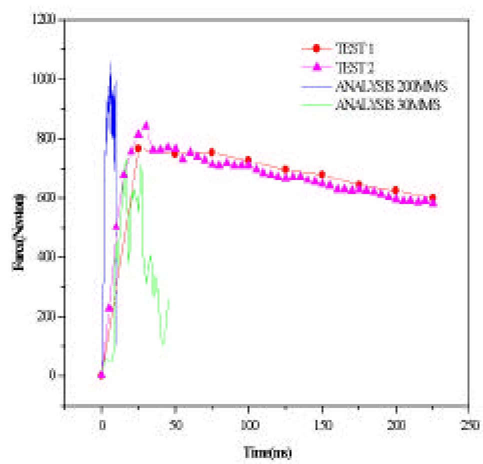


Figure 12. Comparison between Test and Analysis