

## 추진기관 연소관의 결함 영향 분석에 관한 연구

김성은, 문순일, 오광환 (국방과학연구소)  
김정배, 이원기 (삼성항공)

### 요 약

추진기관 연소관 제작시 발생하는 결함등에는 주로 표면결함의 형태의 것이 많은데 연소관 설계시 이러한 결함들의 영향을 고려하는 것이 구조물의 안정성에 있어 중요한 요소가 된다. 따라서 본 논문에서는 연소관에 발생할수 있는 결함들에 대한 파단하중 및 파단압력에 대한 탄성 및 탄소성해석을 통하여 파괴 매개변수인 J적분을 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3차원 비선형해석을 수행하여 5가지의 균열모델을 사용하여 평판, 양단개방 압력용기(open tube) 및 양단막힘 압력용기(closed tube)의 파단하중하에서의 J적분의 영향을 분석 하였다. 평판 결함시편의 J적분으로부터 압력용기의 손상허용설계를 할 수 있는 방안을 조사 하였으며 추진기관 연소관에 적용하여 발생가능한 크기의 결함에 대한 안정성을 조사한결과 충분한 안정성을 확보하고 있음을 알수 있었다.

### 1. 서 론

항공기 구조물 또는 로켓트 추진기관 연소관에 존재하는 결함은 구조물에 치명적인 영향을 줄수 있고 또한 구조물의 파괴를 유발할수 있다. 따라서 연소관의 초기 설계시 이러한 결함에 대한 영향을 고려하는 것이 구조물의 안정성에 있어 중요한 요소가 된다.

본 연구의 추진기관 연소관은 두께 4-6mm의 AISI 4130 고강도강의 얇은 판재를 사용하여 제작되며, 연소관에 생길수 있는 결함의 형태는 주로 표면결함이며 이러한 결함의 발생 원인으로는 1) 판재소재 생산중에 생긴 롤마크(roll mark), 2) 실린더 제작 공정중 찍힘, 3) 각 공정이동중의 취급부주의로 인한 굽힘발생 등이다. 이러한 결함들이 연소관 작동시 복합적인 하중에 의하여 진전되어 구조물의 파괴를 유발할수 있으므로 연소관의 설계시 손상허용개념의 설계가 이루어져야 한다. 선진외국의 경우 이러한 손상허용설계에 관한 다양한 연구가 이루어지고 있으나 탄소성 해석에 의한 평판과 압력용기의 상관관계를 연구한 결과는 아직 풍부하지 않다. 실제로 압력용기의 표면결함에 대한 유한요소해석은 탄성해석보다 균열전단의 소성거동을 고려한 탄소성해석을 하는 것이 더 정확한 거동을 알수 있고 표면균열의 3차원해석이 요구된다.

이러한 결함에 대한 응력확대계수(stress intensity factor, SIF)가 최초로 Irwin[1]에 의하여 반타원 표면결함(semielliptic surface flaw)을 갖는 평판이 축방향 인장하중을 받는 경우에 대한 연구를 시작으로 Newman[2]이 유한요소해석을 이용하여 선형탄성 응력확대계수를 구한 이래 ASTM[3]규정에 제시 되어 있다. 최근 10여년간 J. C. Newman[4], W. Brocks[5]등에 의하여 내압을 받는 실린더의 내면 반타원 표면결함에 대한 J적분이 계산 되었고, 탄성 및 탄소성 유한요소해석에 의하여 결함의 거동에 대한 연구가 이루어졌다.

A. S. Kobayashi[6], J. C. Newman[4]은 실린더의 반타원 표면결함에 대하여 탄성응력확대계수(K)를 이용하여 평판과 실린더의 상관관계를 나타내었다. 그러나 탄소성해석을 통한 평판과 압력용기의 상관관계를 동시에 연구한 결과는 아직 많지 않은 실정이다.

본 연구의 목적은 동일한 표면균열을 갖는 평판의 해석 및 시험으로부터 압력용기의 결함영향을 예측하는 것이다. 이를 위하여 평판시편과 압력용기의 J적분을 비교하여 압력용기의 손상허용설계방안을 제시하고 추진기관 연소관에 대하여 적용하고 그 결과를 분석 하였다.

### 2. 시편 및 시험

#### 2.1 인장강도 시험

AISI 4130 판재시편에 대한 인장시험을 통하여 구하여진 물성치가 Table 1에 나타나 있다. 이러한 물성치는 본 연구에서의 5가지 균열모델에 대한 해석의 기초 자료가 되며, 소성거동을 보이는 AISI4130 고강도강의 응력-변형률선도가 Fig. 1에 나타나 있다.

#### 2.2 표면균열 평판 시험

본 연구에서 시험한 표면균열 평판 시편은 Table 2와 같은 공정에 의하여 제작된후 방전가공에 의한 홈가공을 하였고 시편의 예비균열 삽입을 위하여 ASTM E399의 피로균열 생성조건에 따라 피로균열을 생성시켰으며 인장시험시 하중-균열개구변위를 구하기 위하여 표면균열시편 양단에 Fig. 2와 같이 COD게이지 장착을 위한 브라켓을 부착하였다. 이러한 표면균열시편의 시험으로부터 파단응력을 구하여 표면균열 해석시 파단하중(파단압력)으로 사용하였다. 추진기관 연소관 소재인 AISI4130 고강도강의 파괴인성(fracture toughness,  $J_c$ )값을 측정하기 위하여 판재에 대한 표면

균열을 생성하여 균열크기별 파괴시까지의 하중을 측정하여 구하였다. 표면균열은 연성재료에 대한 파괴하중을 예측할수 있는 규정의 확립이 되어 있지 못하다. 따라서 본 논문에서는 파괴매개변수의 짧은 판재에 대한 적용성에 대하여 연구 하였다. 방전가공후의 일반적 인 표면균열 전파 형태가 Fig. 3에 나타나 있으며, 표면 균열의 형상 및 크기가 Fig. 4에 나타나 있다. 본 연구에서는 균열의 형상비(균열깊이/균열 반길이, a/c)를 1.0 이상으로 하였으므로 이동현미경에 의하여 관측된 피로 균열생성이 균열 표면부에서 생기는 즉시 피로 시험을 중단하였다. 피로 사이클은 10Hz로 하였고, 피로균열하중 도달시까지의 대략 30000사이클에 가깝도록 하중을 조정하였으며 하중비(최소 최대)는 0.1로 하였다. 용접 및 비용접시편을 사용하였으며 이들 시편의 파괴특성을 조사하기 위하여 MTS유압시험기에 1.0mm/min의 인장 속도로 인장하중을 가하여 시험하였으며, 파단시편의 피로균열이 진전한 형상이 Fig. 5에 나타나 있다.

### 3. 표면균열 해석

본 연구에서 사용한 해석모델은 5가지로서 Table 3과 같다. 여러 가지 균열크기비(균열 깊이/균열 반길이, a/c) 및 균열형상계수( $a \cdot QM_e^2$ )를 갖는 평판, 양단개방 압력용기(open tube) 및 양단막힘 압력용기(closed tube)의 파단 하중(fracture load, FRL) 및 파단압력(fracture pressure, FRP)에 대한 탄성 및 탄소성해석을 수행하였다.

사용한 해석 프로그램은 CRAY슈퍼컴퓨터에 설치되어 있는 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였으며 유한요소 모델링(pre & post)은 워크스테이션에 설치 되어있는 PATRAN을 사용하였다.

본 연구에서의 유한요소 모델에서 균열선단을 따라 20-30개의 절점을 지정하여 각 절점에서 J적분을 계산 하였고 균열선단을 둘러싸는 요소환(element ring)을 3 개로 설정하였고 이러한 요소환이 J적분을 계산하는 적분경로가 된다. 또한 Table 4의 해석결과 예(example)로부터 2번째 및 3번째의 경로에서의 J적분값이 거의 변화가 없는 것으로 보아 적분경로 독립성이 잘 만족되고 있음을 알수 있다.

#### 3.1 균열 모델

균열모델의 유한요소메쉬 구성에서 평판의 경우 하중의 대칭성으로 인하여 1/4만 선택하여 모델링하였고 튜브의 경우 1/8만 선택하여 모델링하였다. 평판의 균열 형상, 유한요소메쉬모델 및 경계조건이 Fig. 6에 나타나 있고, 튜브의 균열형상, 유한요소메쉬모델 및 경계조건이 Fig. 7에 나타나 있다. 유한요소 메쉬 모델링에서 평판 및 튜브 공히 20절점 보통요소(20nodes isoparametric regular element)를 사용하였고 균열선단의 요소 역시 20절점 보통요소를 사용하였다.

#### 3.2 평판 해석

Table 3의 모델 1의 평판에 대한 탄성 및 탄소성 해

석결과를 평판해석의 대표적인 결과(typical results)로서 Fig. 8, 9에 나타내었다.

모델 1은 균열크기비 1.04, 균열형상계수 0.65로 균열 반길이가 균열깊이가 거의 같은경우이다. 이때의 파단 하중에 대한 탄성 및 탄소성해석결과를 Fig. 8에 보이고 있는데 연소판의 작동하중(AISI4130고강도강의 인장 강도의 67%=86.7kgf/mm<sup>2</sup>)까지는 탄성 및 탄소성해석 결과의 차이가 거의 없고 작동하중에서 파단하중범위에서는 탄소성해석결과가 탄성해석결과보다 더 크게 나타나는 것을 알수 있다. 이러한 결과로부터 작동하중을 기준으로한 손상허용설계에서는 기존의 탄성이론을 적용할수 있음을 알수 있으며 작동하중에서 파단하중까지의 범위에서는 탄소성해석을 하여야 균열선단의 정확한 거동을 알수 있다는 결론을 얻을수 있다.

Fig. 9에는 파단하중에 대한 탄소성해석에 의한 J적분 값을 나타내었는데 균열중심( $\phi=90^\circ$ )에서 균열표면( $\phi=0^\circ$ )으로 갈수록 J적분값이 증가하는 경향을 보이고 있으며 균열파괴에 대한 지배영역이 균열표면부근에서 형성되고 있으며 균열 진전이 균열표면에서 시작될것이라는 예측을 할 수 있다.

#### 3.3 압력용기 해석

모델 1의 open tube 및 closed tube의 파단압력에 대한 탄소성 해석결과를 압력용기 해석의 대표적인 결과로서 Fig. 10에 나타내었다.

균열중심( $\phi=90^\circ$ )에서 균열표면( $\phi=0^\circ$ )으로 갈수록 open tube 및 closed tube 모두 증가하는 경향을 나타내고 있으며 균열의 파괴에 대한 지배영역이 균열표면 부근에서 형성되고 있다. 또한 균열선단의 전 영역에 걸쳐서 open tube의 J적분이 closed tube의 J적분보다 크다는 것을 알수 있다. 이러한 이유는 open tube에 내압만 작용하는 것과 달리 closed tube에는 내압뿐만아니라 내압에 의한 축방향 인장하중이 동시에 작용되므로 축방향 인장하중에 의한 영향 때문으로 판단된다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 11-15에 Table 3의 5가지 모델의 평판, open tube 및 closed tube의 파단하중(파단압력)에 대한 탄소성 해석결과를 나타내었다.

#### 4.1 탄소성 영향

3.2절의 모델 1의 평판해석결과로부터 작동하중(AISI4130 고강도강의 인장강도의 67% = 86.7 kgf/mm<sup>2</sup>)까지는 탄소성의 영향이 거의 없으나, 작동하중부터 파단하중범위에서는 탄소성의 영향이 나타나고 있다. 이러한 경향은 모델 2-5의 평판에서도 약간의 차이는 있지만 작동하중부터 파단하중범위에서 탄소성 영향이 나타나고 있었으며, 모델 1-5의 open tube 및 closed tube에서도 작동압력부터 파단압력범위에서 탄소성의 영향이 나타나고 있었다. 따라서 탄소성해석을 하여야 균열선단의 거동을 정확히 알수 있다.

#### 4.2 곡률영향

Fig. 11-15와 같이 모델 1-5의 평판 및 open tube의 경우 균열의 파괴에 대한 지배영역에서 open tube의 J적분값이 평판의 J적분값보다 크게 나타났다. 이러한 원인은 open tube의 곡률효과(curvature effect)때문인 것으로 판단된다. 평판 및 closed tube의 경우는 모델 1-4에서 균열의 파괴에 대한 지배영역에서 평판의 J적분값이 closed tube의 J적분값보다 크게 나타났는데 이러한 원인은 closed tube의 내압에 의해 작용되는 축방향 인장하중에 의한 J적분의 감소영향 때문인 것으로 판단된다. 그러나 모델 5의 경우는 균열의 파괴에 대한 지배영역에서 평판의 J적분값보다 closed tube의 J적분값이 약간 크게 나타났는데 이러한 원인은 곡률의 영향이 축방향 영향보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.3 하중조건에의 영향

Fig. 11-15의 모델 1-5의 open tube 및 closed tube의 파단압력에 대한 탄소성해석으로부터 open tube의 J적분값이 균열중심( $\theta=90^\circ$ )에서 2.5-40%정도 균열표면( $\theta=0^\circ$ )에서는 17-100%정도 closed tube의 J적분값보다 크게 나타났다. 이러한 원인은 open tube에 내압만 작용되는 것과 달리 closed tube에는 내압 뿐만 아니라 내압에 의한 축방향 인장하중이 동시에 작용되기 때문에 축방향 인장하중에 의한 J적분의 감소로 open tube의 J적분값이 closed tube의 J적분값보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

#### 4.4 응용방안 제시

압력용기의 손상허용설계를 위하여 압력용기 자체의 시편의 해석 및 시험으로부터 설계자료를 구하여야 하는데 압력용기 자체 시편의 해석 및 시험은 기술적, 경제적 문제점이 대두되므로 동일한 형상 및 크기의 균열을 갖는 평판시편의 해석 및 시험으로부터 압력용기의 균열에 대한 설계자료를 구하여 사용하는 것이 손상허용설계 방법이 된다. 앞에서 언급한 5가지의 균열형상 모델에서 평판 및 open tube의 경우는 평판의 해석결과를 그대로 사용할 수 있지만 평판 및 closed tube의 경우는 평판의 해석결과를 그대로 사용할 수 없다. 따라서 closed tube의 내압을 상승시켜서 J적분을 계산하여 평판의 J적분과 비슷한 수치를 보일때의 압력(응력)과 평판의 응력을 비교하면 더 안전한 정도를 알 수 있다. 결국 closed tube의 내압을 약 12%정도 상승시키면 평판과 거의 비슷한 J적분값을 갖게 되며 이 값이 평판 기준으로 설계할때 보수적인 값이 된다.

#### 5. 적용에

실제 운용되고 있는 추진기관 연소관의 결함에 대하여 인장강도에 대한 탄소성해석을 수행한 결과가 Fig. 16-17에 나타나 있다.

연소관의 결함 설정은 제작시 발생하는 크기로서 깊이가 0.4mm(1단 연소관) 및 0.3mm(2단 연소관)이고,

깊이는 80.0mm의 scratch로 하였다. 이러한 결함을 갖는 추진기관 연소관의 두께와 동일한 평판의 탄소성 해석을 인장강도까지 수행하였다. 그 결과가 Fig. 16 및 17에 나타나 있으며 1단의 경우 1.83kgf/mm, 2단의 경우 1.33kgf/mm 이었다.

Fig. 16 및 17에서 인장강도 값에서의 평판의 J적분값과 앞에서 언급한 5가지의 균열모델에서의 평판의 해석결과를 비교하여 안정성을 판단한다.

이를 위하여 Fig. 18을 이용하여 1단의 경우 균열형상계수가 0.305까지, 2단의 경우 0.227까지 외삽법으로 결함의 재료특성값을 구한 결과 1.7 및 1.2kgf/mm의 값을 나타내었다. Fig. 16 및 Fig. 17에서와 같은 해석결과 값이 설정된 결함에 대한 Fig. 8에서와 같은 선도를 이용하여 재료의 특성치인 1.7 및 1.2kgf/mm 값이 되는 인장하중을 구하였다. 그 결과 129.61, 124.5kgf/mm<sup>2</sup>으로서 인장강도의 99.7% 및 95.7%의 수준이며, 설정한 결함크기에서 충분한 안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

#### 6. 결론

이상의 해석 및 시험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 평판, open tube 및 closed tube의 파단하중 탄성 및 탄소성해석 결과 작동하중까지는 탄소성의 영향이 거의 없었으며 작동하중부터 파단하중범위에서는 탄소성의 영향이 나타났다.
- 2) 균열의 파괴에 대한 지배영역에서 open tube의 곡률 효과가 나타났다.
- 3) closed tube의 축방향 인장하중에 의한 영향으로 인하여 open tube의 J적분보다 작게 나타났다.
- 4) 추진기관 연소관의 허용결함 설계시, 연소관을 직접 사용하지 않고 평판의 균열시편 시험 및 해석에 의하여 설계가능함을 알 수 있었다.

#### 참고 문헌

1. Irwin, G.R. . 1962 "Crack-Extension Force of a Part-Through Crack in a Plate", Trans. of ASME J. of Applied Mechanics, Vol.29, No.4, pp.651-654.
2. Newman, J.C. Jr. 1979, "Analysis of Surface Cracks in Finite Plates Under Tension or Bending Loads", NASA-TP 1578.
3. ASTM, 1983, "Fracture Testing with Surface Crack Tension Specimens", ASTM E740-80, pp.709-716.
4. J. C. Newman, 1980 "Stress-Intensity Factors for Internal Surface Cracks in Cylindrical Pressure Vessels", Tans. of ASME, Vol.102, pp.342-346.
5. W. Brocks, 1988 "Elastic-Plastic J Analysis for Inner Surface Flaw in a Pressure Vessel", Experimental Mechanics, pp.205-209.
6. A. S. Kobayashi, 1977, "Inner and Outer Cracks internally Pressurized Cylinders", Journal of Pressure Vessel Technology, pp.83-89.

Table 1 Material Properties of AISI4130 Steel

| Materials       | Yield Strength $\sigma_y$ | Young's Modulus E | Plasticity Modulus $E_p$ | Plasticity Strain $\epsilon_p$ | Poisson's Ratio $\nu$ |
|-----------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| AISI 4130 Steel | 130.37                    | 21350.0           | 214.0                    | 0.990                          | 0.3                   |

Table 2 Manufacturing Process of the Surface Crack Specimens

| Materials       | Abbreviation | Manufacturing Process                                  | Orientation             |
|-----------------|--------------|--|-------------------------|
| AISI 4130 Steel | NW           | Hot Rolled Plate → Heat Treatment(Q/T) → M/C           | Longitudinal from Plate |
|                 | W            | Hot Rolled Plate → Welding → Heat Treatment(Q/T) → M/C |                         |

NW : Non - Weld  
 W : Weld  
 Q/T : Quenching Tempering  
 M/C : Machining

Table 3 Characteristics of Model 1-5.

|         |             | t (mm) | a (mm) | c (mm) | a/t  | $a/QML_c$ | Fracture Load Pressure (kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|---------|-------------|--------|--------|--------|------|-----------|---|
| Model 1 | Plate       | 3.0    | 1.39   | 1.45   | 1.04 | 0.65      | 128.267(FRL)                                  |
|         | Open Tube   | "      | "      | "      | "    | "         | 1.626(FRP)                                    |
|         | Closed Tube | "      | "      | "      | "    | "         | 1.626(FRP)+64.1 (Axial Tension)               |
| Model 2 | Plate       | 3.0    | 1.99   | 3.086  | 0.64 | 1.80      | 117.207(FRL)                                  |
|         | Open Tube   | "      | "      | "      | "    | "         | 1.4813(FRP)                                   |
|         | Closed Tube | "      | "      | "      | "    | "         | 1.4813(FRP)+58.6 (Axial Tension)              |
| Model 3 | Plate       | 3.0    | 1.841  | 5.062  | 0.36 | 2.95      | 111.955(FRL)                                  |
|         | Open Tube   | "      | "      | "      | "    | "         | 1.4006(FRP)                                   |
|         | Closed Tube | "      | "      | "      | "    | "         | 1.4006(FRP)+55.98 (Axial Tension)             |
| Model 4 | Plate       | 3.0    | 1.917  | 3.086  | 0.35 | 3.22      | 105.709(FRL)                                  |
|         | Open Tube   | "      | "      | "      | "    | "         | 1.372(FRP)                                    |
|         | Closed Tube | "      | "      | "      | "    | "         | 1.372(FRP)+52.85 (Axial Tension)              |
| Model 5 | Plate       | 3.0    | 2.632  | 8.0    | 0.33 | 5.97      | 74.619(FRL)                                   |
|         | Open Tube   | "      | "      | "      | "    | "         | 0.949(FRP)                                    |
|         | Closed Tube | "      | "      | "      | "    | "         | 0.949(FRP)+37.31 (Axial Tension)              |

Table 4 Typical Results of J-Integral Evaluation

| J <sub>i</sub> | contour 1 | contour 2 | contour 3 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|
| J1             | 3.616     | 4.223     | 4.314     |
| J2             | 3.609     | 4.208     | 4.295     |
| J3             | 3.613     | 4.208     | 4.293     |
| J4             | 3.641     | 4.303     | 4.394     |
| J5             | 3.691     | 4.438     | 4.540     |
| J6             | 3.743     | 4.503     | 4.595     |
| J7             | 3.803     | 4.577     | 4.656     |
| J8             | 3.868     | 4.644     | 4.704     |
| J9             | 3.931     | 4.686     | 4.721     |
| J10            | 3.961     | 4.674     | 4.691     |
| J11            | 3.959     | 4.564     | 4.555     |
| J12            | 3.599     | 3.954     | 3.817     |
| J13            | 2.310     | 2.442     | 2.281     |

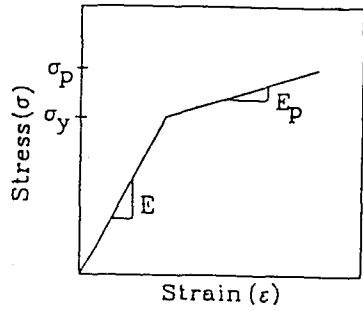


Fig. 1 Stress-Strain Curve for AISI4130 Steel

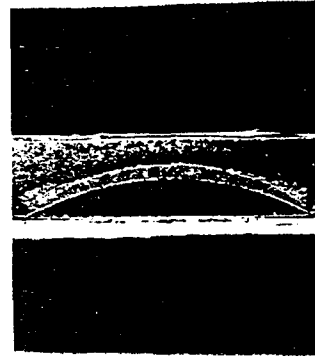


Fig. 5 Crack Shape of Specimen



Fig. 2 Configuration of Bracket for COD Gage

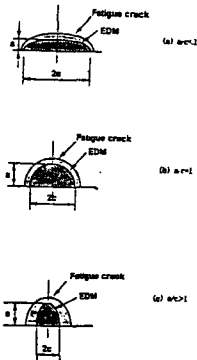


Fig. 3 Fatigued Crack Shape According to EDM Notches

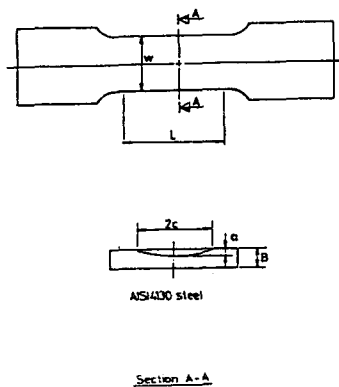


Fig. 4 Configuration of Surface Crack Tension Specimen

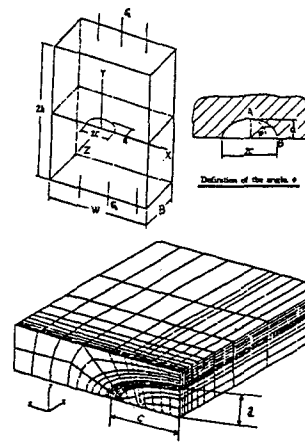


Fig. 6 Finite Element Mesh Model of Plate

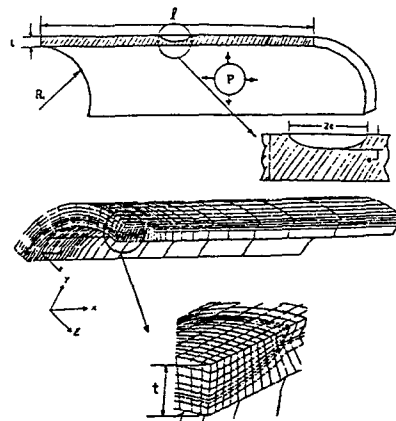


Fig. 7 Finite Element Mesh Model of Tube

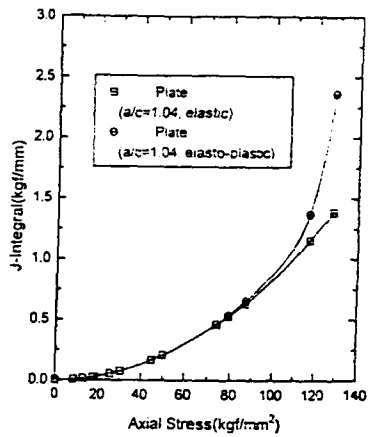


Fig. 8 J-Integral vs. Axial Stress on Plate in Model 1

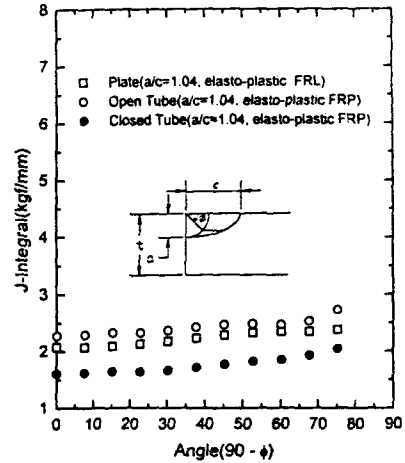


Fig. 11 J-Integral on Plate, Open Tube and Closed Tube by Elasto-Plastic Analysis with Fracture Load(FRL) and Fracture Pressure(FRP) in Model 1

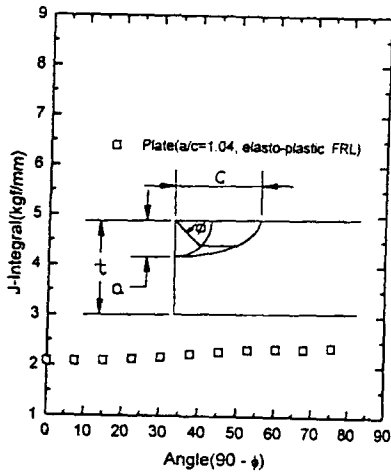


Fig. 9 J-Integral on Plate by Elasto-Plastic Analysis with Fracture Load(FRL) in Model 1

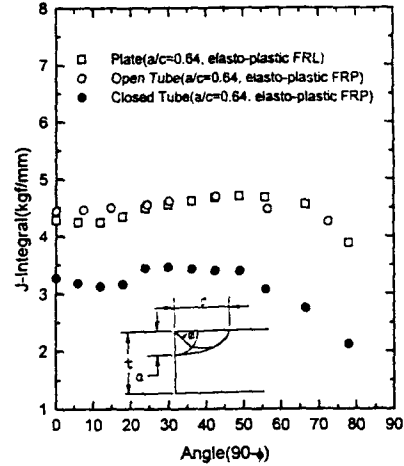


Fig. 12 J-Integral on Plate, Open Tube and Closed Tube by Elasto-Plastic Analysis with Fracture Load(FRL) and Fracture Pressure(FRP) in Model 2

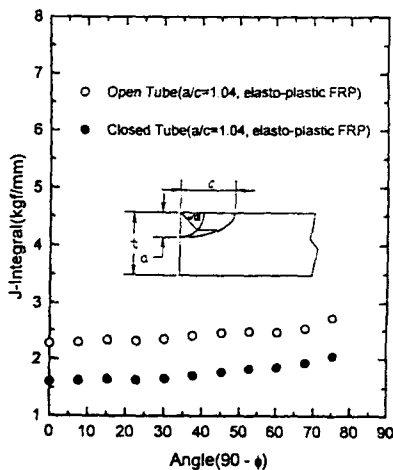


Fig. 10 J-Integral on Open Tube and Closed Tube by Elasto-Plastic Analysis with Fracture Pressure(FRP) in Model 1

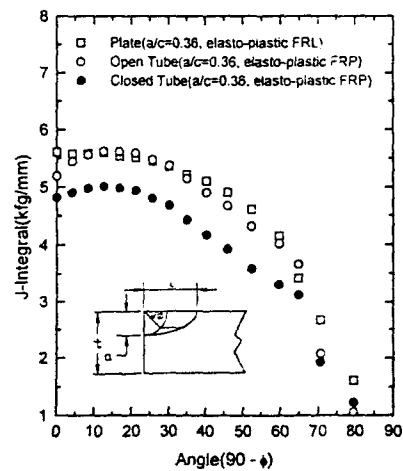


Fig. 13 J-Integral on Plate, Open Tube and Closed Tube by Elasto-Plastic Analysis with Fracture Load(FRL) and Fracture Pressure(FRP) in Model 3

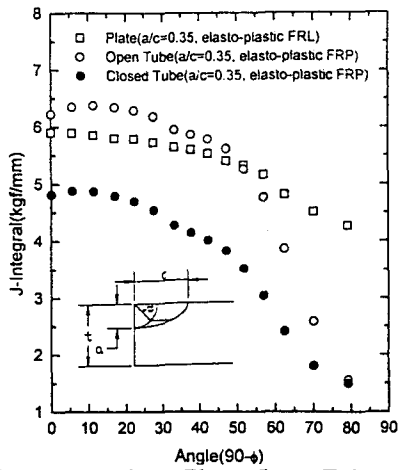


Fig. 14 J-Integral on Plate, Open Tube and Closed Tube by Elasto-Plastic Analysis with Fracture Load(FRL) and Fracture Pressure(FRP) in Model 4

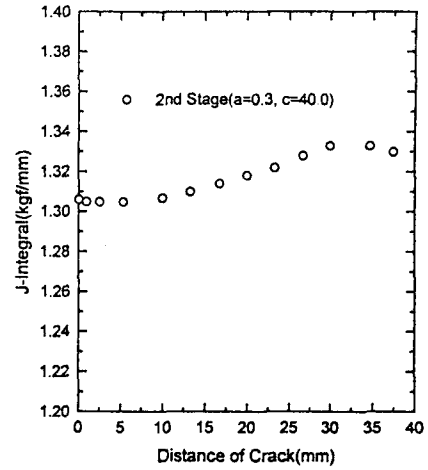


Fig. 17 J-Integral on Scratches in Rocket Motor 2nd Stage

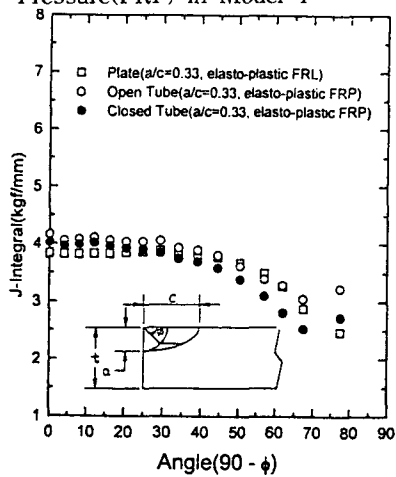


Fig. 15 J-Integral on Plate, Open Tube and Closed Tube by Elasto-Plastic Analysis with Fracture Load(FRL) and Fracture Pressure(FRP) in Model 5

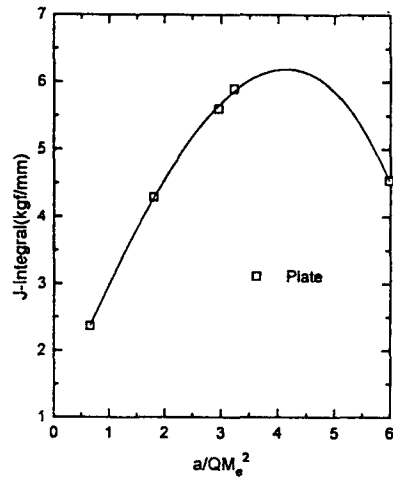


Fig. 18 J-Integral vs. Varied Crack Shape of Plate in Model 1-5

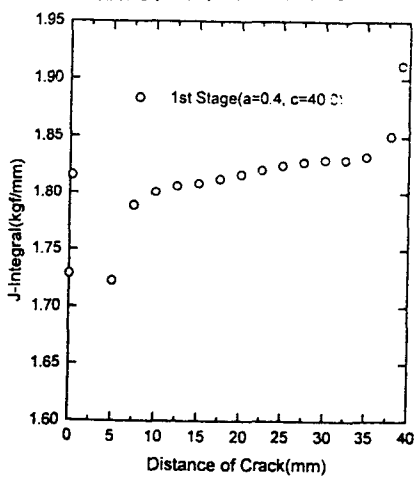


Fig. 16 J-Integral on Scratches in Rocket Motor 1st Stage