
표준 공정 / 시험 평가용 복합재 압력용기에 관한 연구

황 태경*, 정 현조, 정 상기, 정 발 (국방과학연구소)
강 병윤, 김 종식 (한국화이버)

요 약

본 논문은 국과연에서 수행하고 있는 표준 공정/시험 평가용 복합재 압력용기(STEB)의 파괴압력 향상 프로그램중의 일부로서 설계/해석 및 제작에 관한 내용을 정리하였고, 또한 성능 계수(Performance Factor)를 이용하여 설계/공정 수준을 선진 외국과 비교해 보았다. 본 연구를 통해 여러 필라멘트 와인딩 공정 변수로 인한 이론적인 설계/해석과 실제 제작된 제품간의 차이를 확인할 수 있었으며, 보강 설계를 통해 파괴 압력은 선진외국과 유사한 수준에 이르렀으나 성능 계수면에서는 약 76%정도에 머무르고 있음을 확인하였다.

1. 서 론

섬유강화 프라스틱(FRP)은 타 재질에 비해 비강도와 비강성이 우수하다는 장점으로 1950년대부터 사용되기 시작해서 현재는 군수 및 민수 등 여러분야에 널리 적용되고 있다. 이러한 복합소재는 Glass 부터 시작하여 Kevlar, Carbon 등 우수한 소재가 개발됨으로 인해 본래의 장점이 더욱 증대되어 무거운 경량화가 특별히 요구되는 무기체계에 성공적으로 적용되어왔다. 특히 무거운 감소가 전체 시스템의 성능을 좌우하는 추진기관 분야에서는 복합재의 적용이 선진외국에서 이미 1950년대부터 시작되어 현재는 크기에 무관하게 널리 적용되고 있는 실정이다. 이러한 영향으로 국과연에서도 1980년대부터 복합재를 여러 무기체계에 시험적으로 적용하여 개발하고있는 실정이다. 필라멘트 와인딩 공법으로 제작되는 복합재 압력용기는 여러 공정 변수가 존재하여[1] 이상적인 설계/해석치와 실제 구조물간의 차이를 유발 시키게된다. 그러므로 적층 설계시 이들 공정 변수가 고려되어야하며, 또한 공정 변수의 최적 배열 설계도 제시되어야한다. 이러한 제작 공정 변수를 확인하고, 제작사와 국가간의 수준을 평가하기 위한 수단으로 일반 시편단위 시험의 소형 복합재

압력용기로 비교하는데, 이러한 표준압력 용기 시험으로 ASTM D2585 필라멘트 와인딩(Filament Winding) 압력 용기와 S.T.E.B(Standard Test Evaluation Bottle) 등의 규격이 있다. ASTM 압력용기는 시험 자료가 부족한 반면, STEB은 본래 대형 복합재 연소관의 설계 개념과 제작공정관련 변수를 연구하기위해 크기를 축소하여 연구되어진 필라멘트와인딩 소형 압력용기로서 시험자료가 풍부하고 특히 미국의 복합재 전문업체인 Brunswick, Thiokol, Aerojet등에서 이 용기를 이용한 시험 결과가 다수 발표되어있다. 그러므로 본 연구는 STEB의 설계 개념을 파악/분석한 다음 동일한 설계 개념으로 복합재 압력용기를 설계/해석/제작/시험을 수행하여 필라멘트 와인딩 압력용기의 설계/해석을 확인하고, 성능 계수를 이용하여 설계/제작 공정 수준을 선진외국과 비교해 보았다.

2. STEB의 개요 및 설계분석/적층설계

STEB은 미국에서 시간 및 경제적인면때문에 대형 복합재 연소관에서 미처 확인하지못한 여러 설계 및 공정 변수를 최적화하기위해 1/9 축소 제작한 표준시험평가용 복합재 압력용기로서, 주된 목적은 사용소재의 평가, 적층 설계개념, 공정기법, 스커트 설계, 와인딩 적층순서의 변화,

등의 영향을 확인하여 그 결과를 대형 복합재 연소관에 적용시켜 성능향상을 이루는데있다. 이러한 목적으로 미국에서는 10년전부터 복합재 연소관 성능향상 프로그램 일환으로 STEB을 개발하여 활용해 오고있다[2,3]. 미국의 Brunswick 사에서는 Kevlar49로 STEB를 제작한후, 수지의 변경, 헬리컬(Helical)층과 후프(Hoop)층의 강도 전이를 변경과 압력용기의 가압-Post Cure등으로 성능계수를 23% 향상시켰다[2]. 또한 이곳에서는 5년에걸쳐 165개의 STEB을 제작/시험하여 8개의 개발 프로그램에 적용되었다.이들중 파괴압력 향상 프로그램에서는 복합재 로켓 모터케이스에서 빈번히발생되는 보스(Boss)이탈 파괴와 설계보다 낮은 압력파괴등 바람직하지않은 파괴모드를 조절하기 위해 보스근방에 웨이퍼 (Waifer) 보강과 스텝 백(Steb Back) 기법을 STEB에 적용하여 파괴 압력의 향상을 이루었고, 또한 이 결과를 이용한 설계 개선을 대형 복합재 연소관에 적용하여 향상된 파괴 압력을 나타내었다. 또한 다른 프로그램에서는 고강도(hs) 탄소 섬유를 50개의 STEB에 적용한 결과, 탄소 섬유의 특성상 케블라 섬유에비해 공정 변수에 매우 민감하게 작용하여 케블라 섬유적용시의 경우에 비해 많은 설계 개선을 이루지 못한것으로 발표되었다[3]. Fig.1은 도면화된 STEB의 형상을 보여주고 있다. 본 연구에서 적용한 소재는 현재 국과연에서 이용되고있는 Toray사의 고강도 탄소 섬유인 T800과 에폭시 수지로서 외국의 STEB과 비교하기 위해 Table 1과같이 동일한 설계 개념으로 적층 설계되었다. 넷팅(Netting) 이론으로 초기 적층 설계를 일치시킨후 적층셀 이론[4]과 초기층 파손이론[5]을 사용하여 최종 적층설계를 하였다.

3. 압력용기 제작

본 압력용기는 Table 3과 같은 소재를 사용하여 필라멘트 와인딩 공법으로 제작하였는데, 전체적인 공정 흐름은 다음과 같다. 맨드릴은 모래와 물유리로 10:1 무게비로 섞어서 Steel 금형에 넣고 잘다진 다음 오븐(Oven)에서 160° C의 온도로 약 5시간

경화시킨다. 경화후 Fig.2의 모래형위에 B-Stage EPDM 고무를 2-층 적층한후 Vacuum Bagging하면서 155°C에서 약 3시간동안 오토클레이브(Auto-Clave)에서 경화시켰다. 그리고 EPDM과 필라멘트 와인딩 적층간의 접착력을 좋게 하기 위하여 고무 외면에 프라이머를 도포한 후 헬리컬 와인딩을 수행한다. STEB인 경우 전,후방 Opening 크기의 차이로 인해 와인딩 각도가 약 10° 정도 발생되어 돔의 접선부에서 섬유의 미끄러짐이 발생되었다.

와인딩후 오븐에서 회전시키면서 경화시켰는데, 이때의 경화 주기는 80°C(1hr) → 120°C(1hr) → 160°C(1hr)이며 승온속도는 1°C/min으로 하였다. 그리고 파괴압력 향상목적으로 1개의 STEB에는 T300으로 직조된 평직물을 폭이 약 100(mm)되게 절단하여 압력용기의 접선부에 2층의 삽입하였다. 압력용기의 성형후 온수를 이용하여 모래 맨드릴을 녹여낸후 오븐에서 수분을 완전 건조 시킨다.

4. 구조 응력 해석

STEB의 내압에의한 세부 거동해석을 위해 유한요소 응력을 수행하였다. 복합재 압력 용기의 돔(Dome)부는 Fig.3-5에서 보듯이 자오선을 따라 섬유의 와인딩 각도와 두께가 변화되는 복잡한 양상을 보이고, 또한 이러한 물성과 기하학적 변화는 와인딩되는 적층수의 함수값으로 존재하여 유한요소 해석모델링에 많은 어려움을 준다. 자오선을 따른 와인딩 적층 각도와 두께 변화는 다음식으로 표현된다.

$$\sin \theta_i = R_o/R_i \quad (1)$$

$$h_i = \frac{h_c R_c \cos \theta_c}{R_i \cos \theta_i} \quad (2)$$

R_c, R_o, R_i : The radius of cylinder, boss opening and arbitrary point at dome

θ_c, θ_i : The winding angle of cylinder and arbitrary point at dome

h_i, h_c : 1-ply thickness of cylinder and arbitrary point at dome

그리고 돔 부위는 헬리컬 적층으로만 구성되어

수지의 재료 특성이 지배적으로 나타나는 관계로 내압에 의한 복합재 덤부위 거동은 기하학적 비선형뿐 아니라 수지 균열로 인한 재료 비 선형 특성을 나타내게 된다[6-8]. 이러한 재료 비 선형 특성을 고려하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램(NISAI)에 파손 이론(최대 변형도 이론, Tsai-wu 이론)과 (3)식의 Modified Rule of Mixture 이론을 도입하여 재료 비선형 해석을 수행하였다.

$$E_f = \frac{E_x^0}{V_f}, \quad v_f = \frac{v_{xy}^0 - v_m \cdot V_m}{V_f}$$

$$E_m^0 = \frac{E_y^0 \cdot v_m \cdot E_f}{E_f - E_y^0 \cdot v_f}, \quad V_s^* = \frac{G_f \cdot G_m - G_{xy}^0 \cdot G_m}{G_f \cdot G_{xy}^0 - G_f \cdot G_m} \quad (3)$$

$$E_m = D_f \cdot E_m^0, \quad E_y = \frac{E_f \cdot E_m}{V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m}$$

$$v_{xy} = V_f \cdot v_f + V_m \cdot v_m, \quad G_{xy} = \frac{1 + V_s^*}{\frac{1}{G_f} + \frac{V_s^*}{G_m}}$$

D_f : Material degradation factor,
 x, y : Fiber and transverse direction
 f, m : Fiber and matrix
 V : Volume fraction

Fig.6은 STEB의 응력해석 흐름도를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 각 하중단계별로 모든 요소의 파손여부를 판단하여 수지 파손인 경우 수지 관련 물성을 저하시킨다음 재 해석을 수행하게 된다. 해석 결과를 시험치와 비교하기 위한 시험치는 Fig.11에서 보듯이 덤 부위에 Strain Gage를 자오선과 원주 방향으로 부착한 후 수압 시험을 Fig.12와같이 주기적으로 수행하면서 변형도를 측정하였다. Fig.7은 STEB의 유한요소 해석 모델링인데 편의상 45° 모델링 하였고, 요소의 특성상 보스 경계부의 모델링은 높은 강성을 갖는 마감(Closure)로 처리하였는데, 이 경우 보스 경계부에서는 부정확한 해석 결과를 나타낼 수 있으나 다른 지점에서는 비교적 실제와 유사한 결과가 도출 될 것으로 생각한다. 사용된 요소는 3차원 적층 쉘 요소로서 294개의 4-절점 요소와 344 절점이

적용되었다. Fig.7-9는 해석 결과를 나타내고 있다. 기하학적 비선형 해석과 재료 비선형 결과를 시험치와 비교하였는데, 자오선 변형도에 비해 원주 방향 변형도값에서 재료 비선형 특성을 볼 수 있다. 이러한 이유는 덤과 원통부 경계부위에서의 와인딩 각도가 약 10° 정도로서 자오선 방향으로는 섬유 특성인 반면 원주 방향으로는 수지 특성을 보여 주기 때문에 내압으로 인한 수지 파괴 영향이 원주 방향의 변형도로 나타나기 때문이다. 그리고 해석과 시험치 간에는 특히 접선부에서 많은 차이를 보이는데, 그 이유는 실제 와인딩시 섬유의 미끌어짐 대부분이 접선 부에서 발생되고, 또한 해석에 이용된 재료 물성이 평판 시편 결과이기 때문에 실제 물성과 차이가 나기 때문이다. Fig.10은 내압의 하중 단계에 따른 수지 파손 분포로서 최종 압력 단계에서는 거의 대부분의 영역에서 수지 균열이 발생됨을 알 수 있다.

5. 시험 평가

본 연구에는 모두 5개의 STEB이 제작되어 시험을 수행하였는데, 3개는 초기제작/공정 변수용으로 제작되어졌고, 나머지 2개로 파괴압력 향상의 목적으로 이용하였다. 2개중 1개는 기준 STEB으로하고, 나머지 1개는 취약부 보강 설계용으로 설계/제작/시험 되어졌다. 모든 STEB은 수압 시험을 수행하였는데, 3호기인 경우 해석 결과와 비교하기 위해 Fig.11,12와같이 Strain Gage를 부착한 후 압력 주기 시험을 수행하였고, 4-5호기는 3번의 주기 시험후 수압 파괴 시켰다. 그리고 Strain Gage와 Data Acquisition 장비(System 4000)를 이용하여 압력별 변형도를 측정하였다. 4호기는 2500psi에서 Fig.13와같이 전방 접선부의 후프 증파괴가 발생되었고 5호기는 해석과 시험 결과를 통해 취약부인 접선부에 T300-평직을 2장 보강하여 3500 psi에서 Fig.14와같이 후방보스 이탈 파괴가 발생되었다. 이상의 시험된 STEB의 결과를 복합재 압력용기의 성능 척도로 사용되는 성능 계수(Performance Factor) 값으로 환산하여 Table 4와 같이 외국 결과와 비교해 보았다.

성능 계수 = $P V / W$ (4)
(P: 용기 파열 압력, V: 용기의 내부 용적,
W: 용기의 무게)

6. 결 론

탄소 섬유/에폭시로 제작된 STEB의 설계/해석, 제작/시험 평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 적층 설계시 접선부와 보스 경계부의 응력 집중이 고려된 웨이퍼 보강 설계가 요구 된다.

- 보강 설계 없이는 설계 압력 3800psi에 못미치는 2500 psi에서 파괴가 발생되었으나, 접선부를 보강한 경우 3500 psi에서 보스가 이탈되는 파괴가 발생되었음.

2) 외국의 STEB와 비교하여 성능 계수가 약 76% 수준이다.

- 외국과 같은 Dome Cap 보강 방법이 고려된다면 더 향상된 값이 기대됨 (보스 경계부 보강)

3) 필라멘트 와인딩시 전, 후방 돔에서의 미끄러짐 최소화 공정이 요구됨

- 전, 후방 보스 opening 차이로 인한 섬유 적층의 미끄러짐 발생으로 접선부 변형 증가

- 외국의 경우 미끄러짐에 유리한 Pre-preg 와인딩 적용 결과임.

이상의 결과는 현재 국과연에서 수행하고 있는 파괴 압력 향상 프로그램의 일부 결과로서, '95년도내에 모두 약 20조의 STEB 시험이 수행될 예정인데, 프로그램이 종결되는 시점에는 파괴 압력과 성능 계수면에서 현재보다 향상된 결과가 도출될것으로 생각한다.

Reference

1. A.K.Munjaj,"Product acceptance testing for filament wound composite rocket motor components",ASC/ESD Advanced composite conference,1985
2. N.L.Newhouse and W.D.Humphery, "Development of standard test and evaluation bottle(STEB)", SAMPE Journal, March

/April,1986

3. W.D.Hunphery and N.L.Newhouse,"The standard test & evaluation bottle(STEB)-five years later", SAMPE Journal,, July / August ,1986

4. J.M.Whitney,"On the use of shell theory for determining stress in composite cylinders",J.Composite materials, Vol.5, 1971,p.340

5. S.W.Tsai, Composite design, 1988

6. L.Lemoine,"Effects of geometrical and material nonlinearities on deflections of filament wound motor chambers",AIAA78-1565,1978

7. S.Idelsohn,G.Laschet and C.Nyssen,"Pre -ans post-degradation analysis of composite materials with different moduli in tension and compression",Computer method in applied mechanics and engineering, Vol.30, 1982, pp133-149

8. J.P.Jeusette, G.Laschet and P.Charpentier,"Finite element analysis of composite revolution structures wound by wide plies", Composite structure, Vol.8, 1987, pp221-237

9. EMRC NISAI, Users manual, 1992

Table 1 The Input data and thickness on Netting Theory for STEB (USA) and STEB(ADD)

	설계 압력 (psi)	적층 각도 (°)	섬유 강도 (ksi)	강도 전이율 (1)	강도 전이율 (2)	헬리컬 층두께 (mm)	후프층 두께 (mm)	섬유 부피 함유율	적층 두께 (mm)
STEB (USA)	3800	18/90	531.2	0.8	0.75	0.457	0.20	60 (%)	3.1
STEB (ADD)	3800	18/90	814.0	0.8	0.8	0.45	0.20	60 (%)	2.1

Table 2 The analysis results of laminated shell theory and the safety factors by failure theory based on ASTM material test results (Pressure : 3800 psi)

S/N	Hoop Strain (%)	Axial Strain (%)	Max. Strain Failure	Tsai - Wu	Layup
STEB (USA)	1.8	1.26	0.987	0.267	[(±18) ₃ /(90) ₉] _T
STEB (ADD)	1.25	0.66	1.2	0.20	[(±18) ₃ /(90) ₇] _T

Table 3 STEB 에 적용된 소재

Mandrel	Boss	Insulation	Filament Winding	Adhesion
모래(주물사63)	SCM4	EPDM	Carbon (T800)	Chemlok(7701/238)
물유리(수용성1호)		B-Stage EPDM	Epoxy(Epon9405)	Aw106/HV953U

Table 4 The comparison of performance factor between STEB(USA) and STEB(ADD)

S/N	파괴압력 (psi)	부피 (cm ³)	무게 (Kg)	성능계수 (inch X 10 ⁶)	비고
STEB(USA)	3800	23.0	-	1.054	7개의 기준용기중 2개의 평균치 (모두 Dome Cap 있음, 원통부 파괴)
STEB - 04	2500	23.0	3.0	0.53	Dome Cap 없음
STEB - 05	3500	23.0	2.95	0.76	접선부만 T300 평직으로 보강

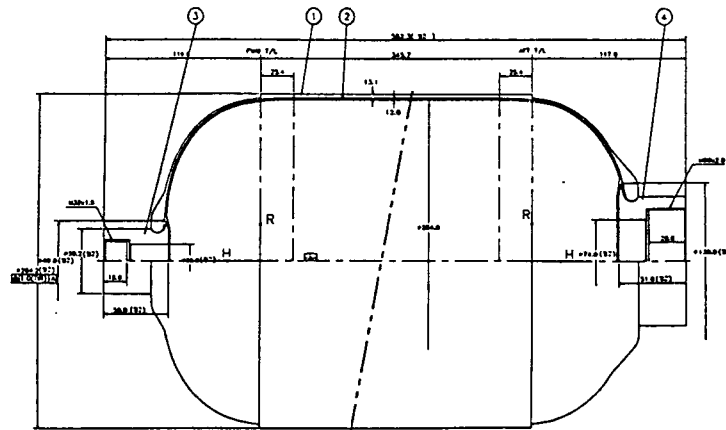


Fig.1 STEB Configuration

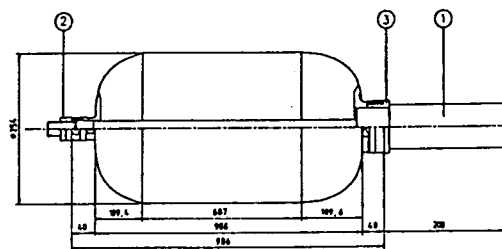


Fig.2 Configuration of STEB mandrel for filament winding

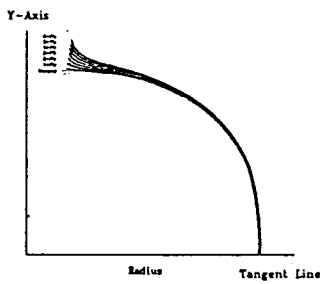


Fig.3 Geodesic dome shape variation

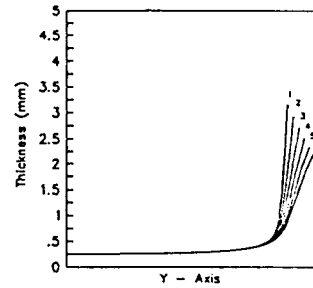


Fig.4 Winding thickness variation

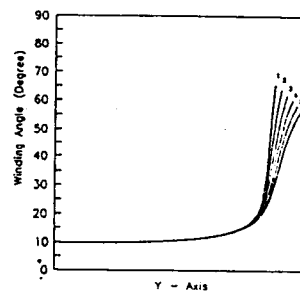
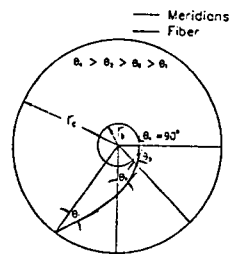


Fig.5 Winding angle variation along the location and the increase of wound layer number

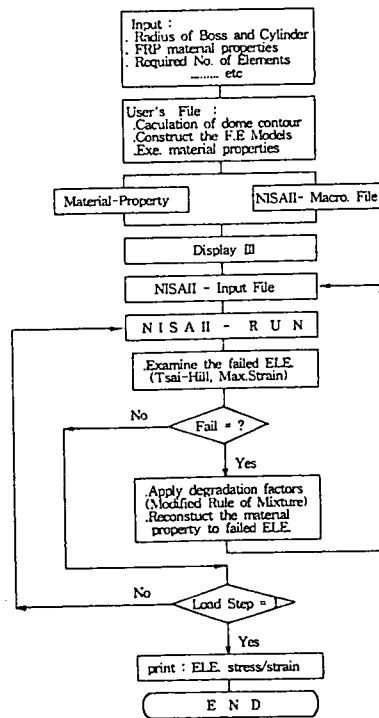


Fig.6 A flow diagram of finite element analysis

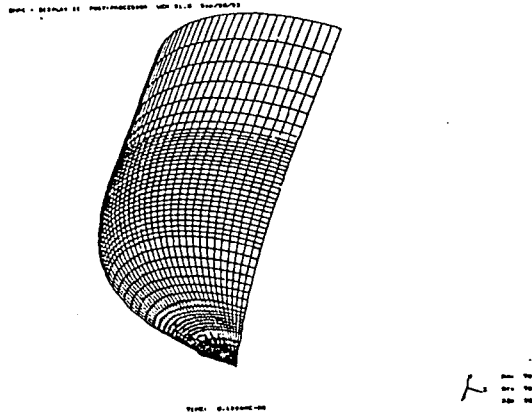


Fig.7 Geometry of finite element model

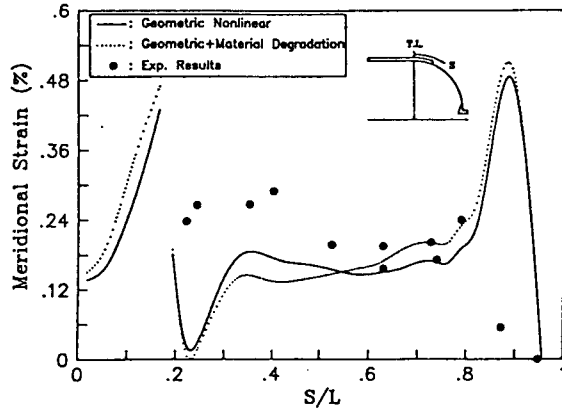


Fig.8 Comparison of surface meridional strain between calculate results and experimental results along the meridional line at dome parts (p=1400 psi)

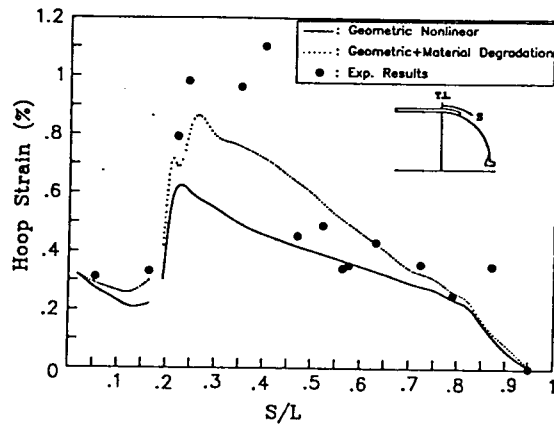


Fig.9 Comparison of surface hoop strain between calculate results and experimental results along the meridional line at dome parts (p=1400 psi)

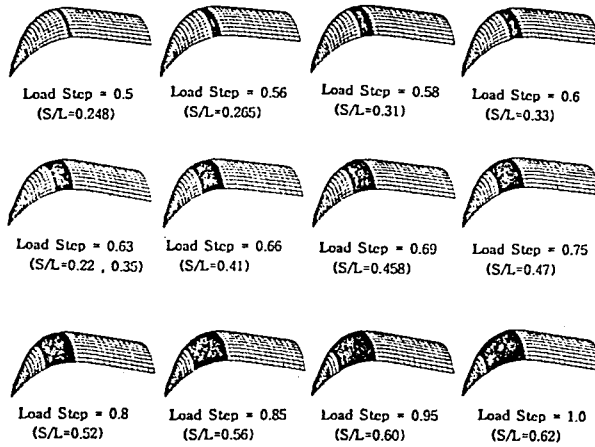


Fig.10 A figure of matrix propagation along the increase pressure

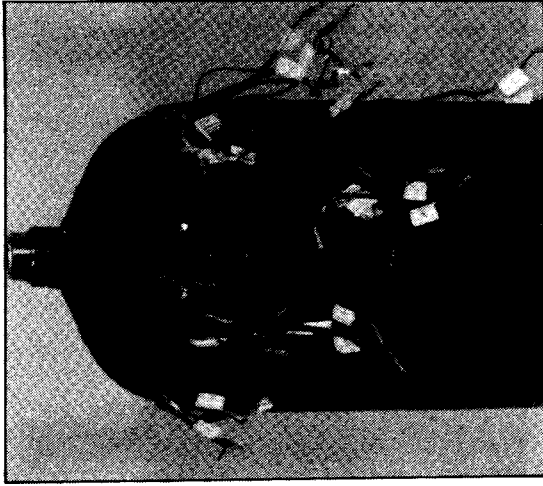


Fig.11 The location of strain gage for STEB

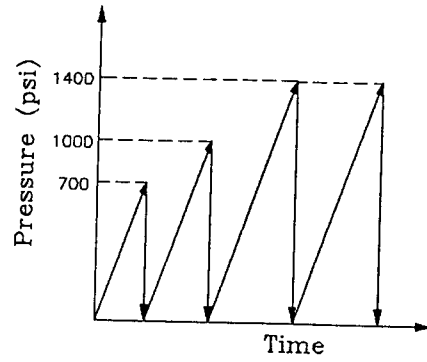


Fig.12 Experimental hydraulic loading condition

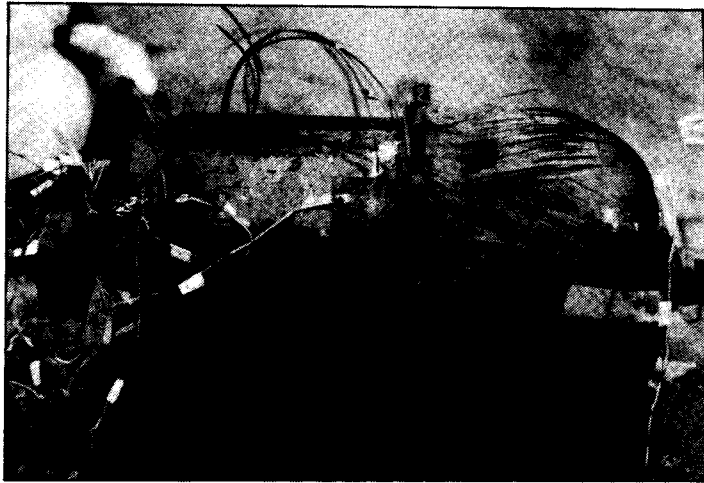


Fig.13 Figure of STEB-04 after hydrostatic bursting test



Fig.14 Figure of STEB-05 after hydrostatic bursting test