

금속재와 복합재 이중구조물로 된 압력용기의 설계이론 개발

이방업* · 김원훈* · 구송회* · 손영일*

Development of a Design Theory of a Pressure Vessel with Combined Structure of the Metal and the Composite

Bang-Eop Lee* · Won-Hoon Kim* · Song-Hoe Koo* · Young-il Son*

ABSTRACT

A theory was developed to design a high pressure vessel with combined structure of the metal and the composite to withstand the pressure of several tens of thousands psias to reduce the weight of the impulse motor which produces high level of thrust within several tens of seconds. The elastic-plastic stress analyses were carried out to prove the validity of the design theory. A combustion chamber of the impulse motor was designed by the design theory, fabricated, and tested by the hydraulic pressure and the static firings. The bursting pressures from the tests were compared to those predicted by the design theory and the stress analyses and found to be almost the same. It will be possible to design the high pressure vessel with combined structure of the metal and the composite very easily by the proposed design theory.

초 록

수십 msec의 단시간에 큰 추력을 발생시키는 임펄스모타의 무게를 가볍게 하기 위하여 금속재와 복합재를 조합하여 수만 psia의 초고압을 지탱하는 압력용기의 설계이론을 개발하였고, 탄소성 구조해석을 통하여 이론식의 타당성을 입증하였다. 임펄스모타의 연소관을 이론식으로 설계하고 제작하여 유압시험과 지상연소시험을 실시하였다. 실험결과와 파열압력은 설계식과 구조해석 결과로 예측한 값과 유사한 값을 보였다. 본 논문의 설계이론을 통하여 설계단계에서 가볍고도 충분한 안전율을 갖는 고압용기를 간단히 설계할 수 있게 되었다.

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Safety Factor(안전계수), Hydraulic Test(유압시험), Medium Range Surface to Air Missile(중거리 지대공 유도무기), Maximum Experted Operating Pressure (최대작동압력), Impulse Motor(임펄스모타), Pressure Vessel(압력용기), Side Jet Thrust Engine(측추력기)

† 2006년 4월 18일 접수 ~ 2006년 6월 10일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소

연락처, E-mail: llbe130@add.re.kr

Nomenclature

- P, R : 연소관 내부압력과 반경
- $\delta_{m'}, \delta_c$: 금속재와 복합재 두께
- SF : 설계안전계수
- $\sigma_{\psi m'}, \sigma_c$: 금속재와 복합재의 원주방향 응력
- σ_{xm} : 금속재의 축방향 응력
- σ_{eq} : 금속재의 계산된 등가응력
- σ_i : 금속재의 실제 등가응력
- σ_{BC} : 복합재의 인장강도
- σ_{02}, σ_{BM} : 금속재의 항복강도와 인장강도
- $E_{m'}, E_c$: 금속재와 복합재의 탄성계수
- E_{m1} : 금속재의 소성계수
- E_{ms} : 최신회된 금속재의 탄성계수
- ϵ_{xm} : 금속재의 축방향 변형을
- $\epsilon_{\psi m'}, \epsilon_c$: 금속재와 복합재의 원주방향 변형을
- e_i : 금속재의 등가변형을
- e_{02} : 금속재의 항복강도에서의 변형을
- $error$: 계산의 정확도 설정값
- ν_0 : 금속재의 초기 포아송비
- ν : 최신회된 금속재의 포아송비

1. 서 론

최근 선진국에서 개발중인 고기동성의 중거리 지대공유도무기(M-SAM) 체계의 경우 유도탄 발사 후 초기방향 전환에 의한 급선회 능력 요구와 더불어 표적에 근접한 상태에서의 종말유도조종 단계에서 유도탄에 축방향 추력을 제공하는 측추력기(SJTE) 기술[1]이 필수적인 기술로 부각되고 있다.

측추력기 기술은 프랑스의 Aster 유도탄[2]과 같이 가스발생기를 이용하여 무게 중심에 설치하여 유도탄을 횡으로 이동시키는 방식과 미국의 PAC-3[3]와 러시아의 Triumph[4]와 같이 유도탄의 전방에 임펄스모터를 사용한 측추력기를 급회전시키는 방식이 있으며, 후자의 경우가 훨

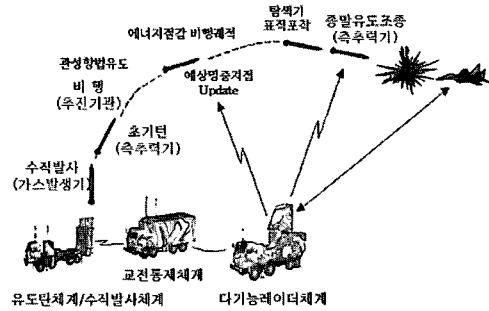


Fig. 1 Operation concept of the SJTE



Fig. 2 Configuration of the M-SAM

씬 더 반응 속도가 빠르고 진보된 최신기술이다. 중거리지대공 유도무기는 전투기나 탄도미사일 등 고속의 표적을 격추하는 유도탄으로서, 고기동성이 생명이므로 유도탄 구성품의 무게 경량화가 초미의 관심사로 대두되었으며 측추력기의 성능을 만족시키기 위한 연소관의 최대작동압력(MEOP)이 20,000psia 정도가 요구되어 초고압을 지탱하며 무게를 최소화하는 구조체 기술의 개발이 필요하게 되었다.

본 논문의 측추력기에는 하나의 노즐블록에 고압 압력용기인 연소관이 Fig. 3과 같이 축방향으로 86개 체결된 형상을 갖고 있다. 연소관을 축방향으로 체결해야 하므로 연소관의 외경을 가능하면 작게 설계해야 한다[5].

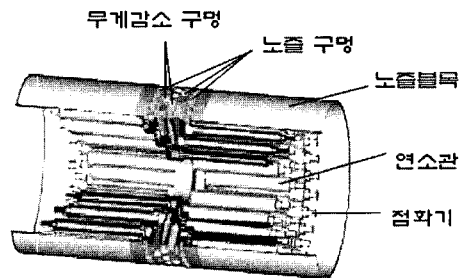


Fig. 3 Configuration of the SJTE

최대압력에 구조안전계수를 1.2 적용한 설계압력 24,000psia 에서 여러 가지 소재로 Fig. 4와 같은 연소관을 설계하여 Table 1에 나타내었다.



Fig. 4 Structure of the impulse motor

Table 1. Design results for various materials

소재	강도	밀도	두께	총무게 (86개)	
Steel (Maraging250)	180	8	0.89	10.37	
Steel (SUS 630)	130	7.8	1.24	12.30	
Steel (AISI4130)	108	7.8	1.49	13.82	
Steel (SUS 304)	42	7.8	3.83	27.91	
티타늄 (Ti-6Al-4V)	95	4.5	1.69	8.68	
알루미늄 (Al7175)	45	2.8	3.57	9.47	
티타늄 + 복합재	Ti	95	4.5	1.00	6.27
	T800	265	1.6	1.00*	1.24*
				0.60**	0.74**
- 강도: kg/mm ² , 밀도: g/cm ³ , 두께: mm - 실린더길이 : 130mm - 체결부 부피 : 7226E-6 mm ³ * 탄성범위 설계, ** 소성허용설계					

Table 1에서는 전방/후방제결부를 같은 형상으로 가정하여 무게를 계산하였으며 금속재와 복합재의 이중재료 연소관은 탄성범위의 설계와 소성을 허용한 설계결과를 제시하였다.

연소관 두께에 따른 외경 증가와 무게 등의 장단점을 비교해 본 결과 금속재의 소성을 허용하고 복합재의 기능을 최대한 활용한 이중재료 압력용기의 개발이 가장 유리하다고 판단되었다.

2. 이론적 배경

2.1 이론식 전개

이론식의 가정 사항은 아래와 같다.

- 티타늄 금속재는 탄소성 거동을 한다.
- 축방향 응력은 금속재가 담당하며 축방향변형율은 변하지 않는다.
- 원주방향 응력은 금속재와 복합재가 함께 담당하며 경계면은 함께 거동한다.
- 두께 내에서의 응력은 일정하다.

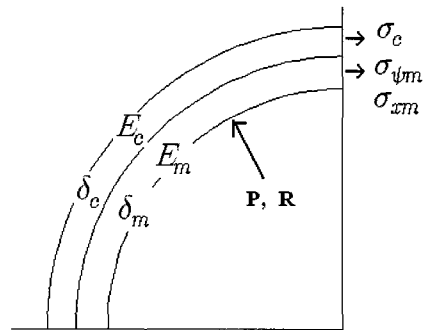


Fig. 5 Nomenclature of the pressure vessel

Figure 5는 압력용기의 단면에서 재료의 물성과 치수, 응력 및 변형율의 기호를 나타낸다.

원주방향 평형방정식은 Eq. 1과 같다.

$$\sigma_{\psi m} \cdot \delta_m + \sigma_c \cdot \delta_c = P \cdot R \tag{1}$$

응력과 변형율의 관계는 Eq. 2와 같다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xm} \\ \epsilon_{\psi m} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_m} \begin{bmatrix} 1 & -\nu \\ -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xm} \\ \sigma_{\psi m} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

복합재의 원주방향 변형율은 Eq. 3과 같다.

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} \tag{3}$$

금속재와 복합재의 경계면에서는 Eq. 4와 같이 원주방향 변형율이 같다.

$$\epsilon_{\psi m} = \epsilon_c \quad \text{at } r = R + \delta_m \tag{4}$$

강도 설계조건은 Eq. 5와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &\leq \sigma_{BC} \\ \sigma_i &\leq \sigma_{BM} \\ \sigma_i &\leq \sigma_{02} \end{aligned} \tag{5}$$

2.2 이론식의 프로그래밍

프로그램은 Borland C++ s/w의 C-언어로 작성하였다. 설계압력은 최대압력에 안전계수(SF)를 적용하고, 금속재 두께는 축방향응력이 항복강도 정도되도록 Eq. 6과 같이 설정한다.

$$\delta_m = \frac{SF \cdot PR}{2\sigma_{o2}} \quad (6)$$

금속재의 원주방향응력을 Eq. 7과 같이 축방향응력으로 표현하고 Eq. 1-4에 대입하면 매개상수 B를 Eq. 8과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_{\psi m} = B \cdot \sigma_{xm} \quad (7)$$

$$B = (2 + \nu \frac{\delta_c E_c}{\delta_m E_m}) / (1 + \frac{\delta_c E_c}{\delta_m E_m}) \quad (8)$$

금속재의 등가응력과 등가변형율을 Eq. 9-11로 계산하며 물리적 개념은 Fig. 6과 같다.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{xm}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{\psi m} + \sigma_{\psi m}^2} \quad (9)$$

$$e_i = \sigma_{eq} / E_m \quad (10)$$

$$\sigma_i = \sigma_{o2} + E_{m1}(e_i - e_{o2}) \quad (11)$$

금속재의 계산된 등가응력과 실제 등가응력을 비교하여 에러범위에 들면 계산을 종료한다.

$$(\sigma_{eq} - \sigma_i) < error \quad (12)$$

금속재의 등가응력 차이가 에러범위를 벗어나면 탄성계수와 포아송비를 Eq. 13, 14와 같이 최신화한다.

$$E_{ms} = \sigma_i / e_i \quad (13)$$

$$\nu = (1 - \frac{E_{ms}}{E_m}(1 - 2\nu_0)) / 2 \quad (14)$$

Equation 14의 포아송비는 축방향 변형율이 항상 같다는 가정으로부터 유도할 수 있다.

$$\epsilon_{xm} = \frac{\sigma_{xm} - \nu\sigma_{\psi m}}{E_m} \quad (15)$$

$$= \frac{PR}{2\delta_m E_m}(1 - 2\nu) = \frac{PR}{2\delta_{m0} E_{m0}}(1 - 2\nu_0)$$

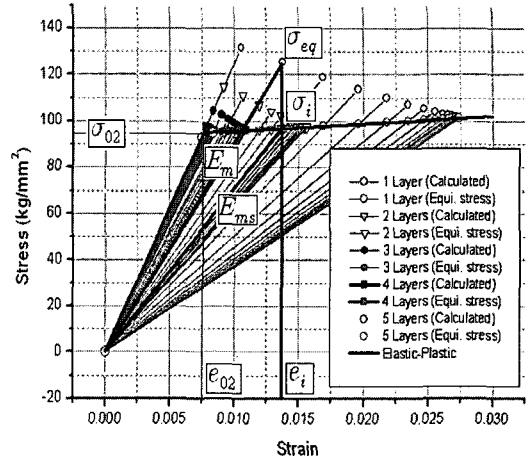


Fig. 6 Stress vs. strain for design procedure

복합재를 한 층씩 추가 와인딩하며 금속재의 등가응력을 계산하여 Eq. 12의 판별식으로 계산의 종결여부를 결정한다.

금속재 응력을 탄성범위로 설계하려면 금속재의 실제 등가응력과 항복강도를 비교하여 에러범위에 들 때까지 복합재를 와인딩한다.

$$(\sigma_i - \sigma_{o2}) < error \quad (16)$$

2.3 설계 결과

설계와 구조해석에 적용된 재료의 기계적물성은 Table 2와 같다.

Table 2. Mechanical properties of the materials

재료	물성	탄성/소성계수	항복강도	인장강도	포아송비	
티타늄 (Ti-6Al-4V)		12,500/331	95	110	0.3	
복합재 (T800)	탄성계수	E1	888	G12	306	ν12
		E2	888	G13	306	ν13
		E3	17700	G23	544	ν23
	- 인장강도 : 265 - 파괴신율 : 1.8% - 한층의 두께 : 0.2mm					
- 강도와 계수의 단위 : kg/mm ²						

설계압력에서 금속재 두께를 1mm로 설계한다.

$$\delta_m = \frac{SF \cdot PR}{2\sigma_{o2}} = 0.98 \quad (17)$$

Figure 6과 Table 3에서 보는 바와 같이 복합재를 4층 와인딩할 때까지 금속재는 소성역에 있고 5층에서 탄성범위가 되며 복합재의 두께는 1.0mm가 된다. 축추력기 연소관의 경우는 수십 msec의 아주 짧은 시간동안 작동하므로 금속재에 소성변형을 허용하여 복합재를 3층 와인딩하여 0.6mm로 설계한다.

Table 3. Design results at the design pressure

층수	부품		비고		
	티타늄 등가 응력	금속재 안전 여유	T800 복합재 Hoop 응력	안전 여유	
1 층	101.5	0.08	385.5	-0.31	소성역
2 층	97.6	0.13	209.1	0.27	
3 층	96.1	0.14	143.9	0.84	
4 층	95.3	0.15	109.8	1.41	
5 층	92.9	0.18	92.4	1.87	탄성역

설계된 두께(금속재 1mm, 복합재 0.6mm)에서 압력에 따른 금속재와 복합재의 응력을 Fig. 7에 FEM을 이용한 수치해석결과와 함께 나타내었다.

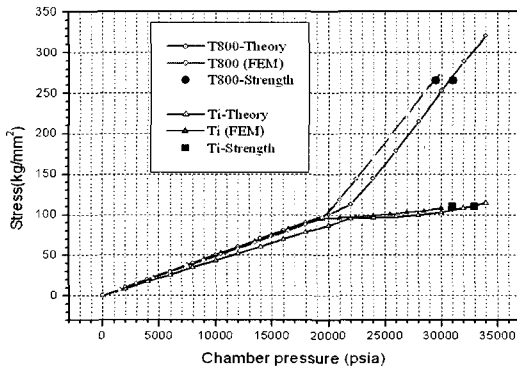


Fig. 7 Stress vs. chamber pressure

설계이론식의 결과를 보면 압력이 22,000 psia 이상이 될 때 금속재가 소성역에 들어가며 복합재는 29,000 psia, 금속재는 33,000 psia 때 인장강도에 도달되므로 29,000 psia와 33,000 psia 사이의 압력에서 파열이 예측된다.

3. 구조해석

3.1 구조해석 조건

구조해석시의 FEM 해석코드는 ABAQUS s/w의 탄소성 응력해석 모듈[7]을 사용하였으며, 결과분석은 MSC PATRAN s/w[8]를 사용하였다. 가정 사항과 해석조건은 아래와 같다.

- 금속재와 복합재 경계면은 함께 거동한다.
- 연소관 후방체결부는 반경방향으로 고정한다.
- 전방체결부는 내압을 축방향힘으로 적용시킨다.
- 내부압력은 30,000 psia까지 선형으로 증가한다.



Fig. 8 FEM model of the chamber

3.2 구조해석 결과

설계압력에서의 응력분포를 나타낸 Fig. 9와 10을 보면 전·후방 체결부위에서 응력집중이 나타난다.

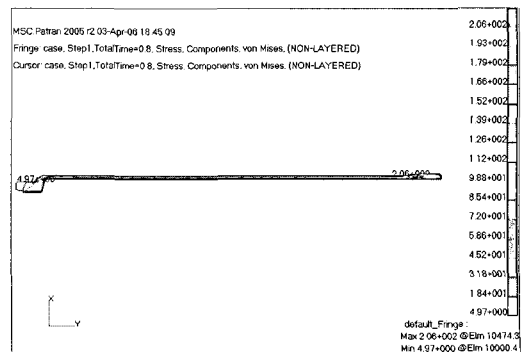


Fig. 9 Stress distribution of the structure

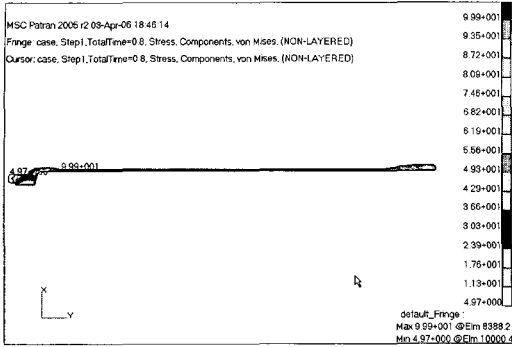


Fig. 10 Equivalent stress distribution of the metal

Table 4에 요약한 구조해석과 설계이론식의 실린더 부위에서의 결과를 보면, 금속재는 해석치가 13% 정도 복합재는 17-22% 크게 나타났는데 이는 설계이론에서는 두께 내에서 응력이 일정하고 해석에서는 응력변화가 있기 때문으로 판단된다. 응력 집중부위에서는 해석결과가 당연히 크게 나타난다.

Table 4. Results of the calculation

부품	실린더부				응력집중부	
	구조해석		설계이론		구조해석	
	등가 응력	안전 여유	등가 응력	안전 여유	등가 응력	안전 여유
티타늄 금속재	98.7- 99.0	0.11	96.1	0.14	99.9	0.10
T800 복합재	169- 176	0.51- 0.57	144.3	0.84	206.0	0.29

압력 증가에 따른 응력을 나타낸 Fig. 7을 보면, 구조해석 결과는 응력집중 때문에 설계이론보다 낮은 압력에서 금속재의 소성역이 나타나고 있다.

4. 연소관 제작 및 시험

4.1 연소관 제작

연소관은 티타늄(Ti-6Al-4V) 재료로 튜브를 만들고 외면에 복합재(T-800 Carbon/Epoxy)를 필

라멘트 와인딩으로 감은 이종구조물로 제작하였다.

티타늄을 황삭가공한 후 950℃에서 열처리 한 다음 540℃에서 템퍼링 후 정삭가공하며, 접착성 향상을 위해 Sand blast로 표면 처리한다. 연소관 경화시 금속재와 복합재의 열팽창계수 차이에 의한 분리를 방지하기 위해 와인딩할 때 사용하는 에폭시를 바른 상태에서 부직포를 간 후 복합재를 와인딩한다.

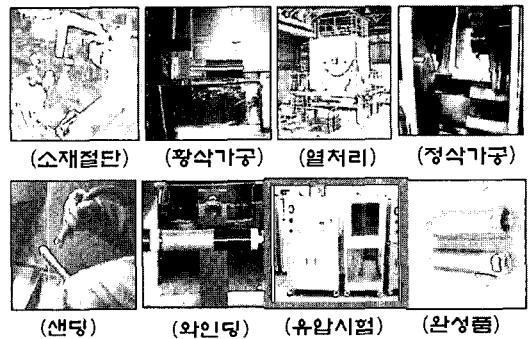


Fig. 11 Manufacturing process of the chamber

4.2 구조시험

연소관의 구조시험은 5만 psia 까지 가압할 수 있는 유압시험 장비를 Fig. 11과 같이 제작하여 연소관 4기에 대하여 구조시험을 실시하였다[5].

Figure 12와 같이 연소관의 실린더 중앙에서 원주방향변형율을 측정한 결과를 설계이론 및 지상연소시험결과와 함께 Fig. 13에 나타내었다.

Figure 13에서 보는 바와 같이 구조시험에서의 변형율이 설계이론 보다 낮은 값을 보이는데, 이는 계산시 사용된 재료물성의 차이와 복합재가 약간 두껍게 제작되었기 때문으로 판단된다. 연소관의 파열강도는 Table 5와 같이 31,474~32,157 psia였으며, 파열된 연소관 형상은 Fig. 14와 같다.

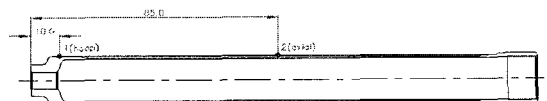


Fig. 12 Position of the strain gage

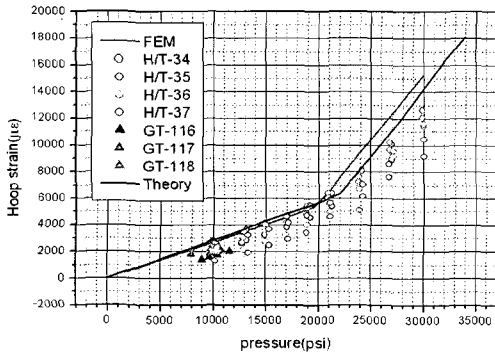


Fig. 13 Hoop strains of the composite at the center of the chamber

Table 5. Predicted and measured bursting pressure

파열부위	금속재	복합재
예측방법		
설계이론식	33,000	31,000
구조해석	31,000	29,000
구조시험	31,474 - 32,157	
지상연소시험	32,500 - 36,000	

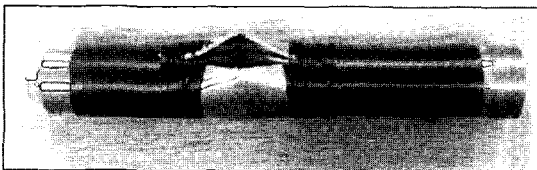


Fig. 14 Chamber destroyed at the hydraulic test

4.3 지상연소시험

연소관에 추진제를 충전하고 노즐치구를 장착한 Fig. 15의 추추력모타에 Fig. 12와 같이 변형을 개이지를 부착하였으며 Fig. 16과 같이 시험대에 장착하여 지상연소시험을 실시하였다[9].

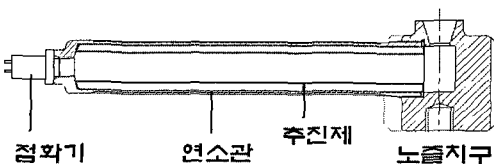


Fig. 15 Configuration of the impulse motor

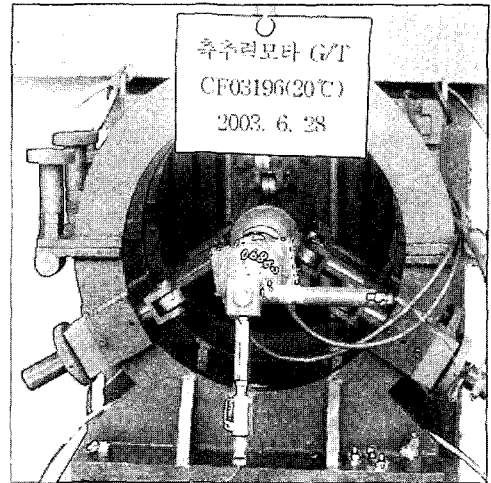


Fig. 16 Impulse motor for firing test

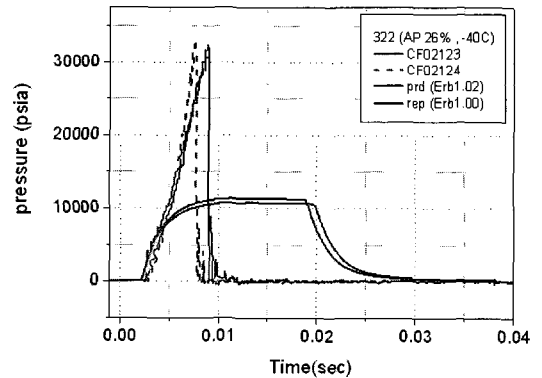


Fig. 17 Pressure curve of the impulse motor destroyed during firing test

비정상적인 압력증가에 의해 파열된 8기의 지상연소시험[10] 결과 중 하나인 Fig. 17의 파열압력 값을 설계이론 및 구조시험 결과와 비교하여 Table 5에 나타내었으며 파열압력 값이 유사한 결과를 보이고 있어 설계이론의 타당성을 입증하고 있다.

5. 결 론

- 금속재와 복합재의 이중재료를 적용하여 가볍고도 구조적으로 안전한 압력 용기의 설계이론을 개발하였다.

- 이론식으로 설계한 이중재료 고압 용기에 대한 탄소성 구조해석 결과는 설계식의 타당성을 입증하고 있다.

- 유압시험과 지상연소시험을 통해 압력 용기의 파열압력을 측정하였으며 설계이론이나 구조해석 결과 예측된 값과 유사한 결과를 보이고 있다.

참 고 문 헌

1. 박상현, 기무현, 김성익, 천명석, "중거리지대 공유도무기 체계 개념 설계(2)," 국방과학연구소 기술보고서, 1999. 9, pp.112-127
2. Dong Richardson, "France may test Aster against a ballistic missile target," Jane's Missiles and Rockets, Dec, 2001
3. Patrick O'Reilly, Ed Walters, "The Patriot PAC-3 Missile Program-An Affordable Integration Approach,"
4. Sergei B., Leonid Y., "Triumph Advances to Firing Line," Military Parade, May, 1999
5. 손영일, 구송희, 김원훈, "M-SAM 측추력 구조체 개발," 국방과학연구소 기술보고서, 2005. 10
6. Borland C++ V4.5, Borland International Inc., 1994
7. ABAQUS v.6.5.4, HKS, 2005
8. MSC PATRAN v.2.03, 2005
9. 이방업, 김원훈, 손영일, 구송희 외 8인, "M-SAM 측추력모타 63~68차 지상연소시험," 국방과학연구소 기술보고서, 2003. 4
10. 이방업, 김원훈, 손영일 외 10인, "M-SAM 측추력모타 119~134차 지상연소시험 및 측추력기의 1차 진자시험 보고서," 국방과학연구소 보고서, 2003. 11