

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.6.605

이원 추진 시스템 고압 시험시의 파열 안전성 고찰

장세명*, 한조영**

Rupture Safety Assesment of Bipropellant Propulsion System
at High Pressure Testing

Se-Myong Chang* and Cho Young Han**

ABSTRACT

The geostationary satellite COMS is going to be launched in 2010, and, in the series of test, there are some high-pressure tests concerning the vessel tank filled with helium gas of hundreds atmospheric pressure. In this paper, authors evaluates risk associated with accidental rupture of the test system. Two possible scenarios are considered: 1) the 310-bar helium tank ruptures at the center of the acoustic chamber, and 2) the 116-bar reduced-pressure helium tank ruptures in the test room shielded by bullet-proof glasses. Using the theory of blast wave propagation and computational simulation, the dynamics of wave reflected in a confined space is investigated for highly complex unsteady flow physics.

초 록

정지궤도위성인 통신해양기상위성은 2010년 발사 예정인데, 관련된 일련의 성능 시험 중에는 수백 기압의 헬륨 가스로 채워진 추진계 탱크의 고압 내구 시험도 포함되어 있다. 이 논문에서는 시험 시스템에 최악의 사고가 일어날 경우를 대비하여 그 위험도를 계산하여 보았다. 두 가지 시나리오가 있는데, 첫째는 310 기압의 헬륨 탱크가 현재의 시험 챔버에서 일시에 파열하는 경우, 둘째는 116 기압의 감압된 헬륨 탱크가 방탄유리로 보호되고 있는 방에서 파열하는 경우를 가정해 보았다. 폭발파 전파 이론과 전산 수치 모사를 통하여, 제한된 공간에서 반사되는 파동의 역학을 매우 복잡한 비정상 유동 물리에 대하여 분석하였다.

Key Words : COMS(통신해양기상위성), High-Pressure Test(고압 시험), Rupture(파열), Blast Wave(폭발파), Shock Wave(충격파)

1. 서 론

본 연구에서의 관심 대상인 한국항공우주연구원의 통신해양기상위성(COMS, Communication,

Ocean, and Meteorological Satellite)은 우리나라 최초의 정지궤도위성(geostationary satellite)으로서 많은 기대를 받으며 2010년 발사를 목표로 만반의 준비를 갖추고 있다[1].

위성의 개발 과정에서 겪어야 하는 수많은 시험 중에서 추진계 고압 탱크의 내구 시험도 포함되어 있다. Fig. 1에서와 같이 위성의 궤도 수정 등의 임무 수행을 위하여 위성 본체의 내부에 헬륨이 채워진 고압 탱크가 위치하고, 고압 헬륨에

† 2010년 2월 8일 접수 ~ 2010년 5월 11일 심사완료

* 정회원, 군산대학교 기계공학과 파동공학실험실

교신저자, E-mail : smchang@kunsan.ac.kr

전북 군산시 대학로 1170

** 정회원, 한국항공우주연구원 위성기술실 열/추진팀

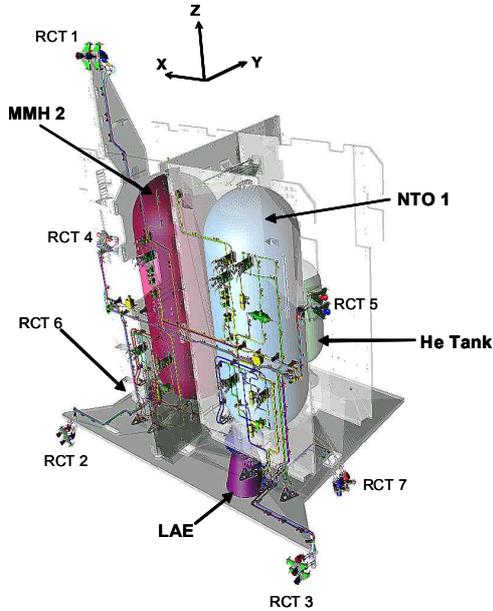


Fig. 1. KARI COMS: propulsion system

의한 압력 가압으로 추진제가 액체원지점엔진 (LAE, Liquid Apogee Engine) 또는 반동제어 추력기(RCT, Reaction Control Thruster)에 공급되어 임무에 필요한 추력을 발생한다.

문제는 이 헬륨 탱크에 걸리는 압력이 대기압의 수백 배에 이른다는 점이다. 따라서 우주 환경에서의 적절한 내구 시험(endurance test)을 위하여 시험 챔버 및 6 축 가진기 위에서 정적 및 동적 테스트들을 거쳐야만 한다. 본 연구에서는 시험 도중 만일에 일어날 수 있는 최악의 사고에 대비하여 시험 설비의 고압 파열 안전성에 대해 고찰하였다.

본 연구의 목적은 기초 파동 이론과 전산 수치 모사를 이용하여 이러한 안전성 해석을 위한 기초 도구를 마련하는데 있다. 따라서 현상을 제대로 표현할 수 있는 간략화된 공학적 모델을 개발하고, 이를 즉시 해석해서 의미 있는 물리 현상을 찾아내어 적절하게 대책을 제시하기로 한다.

II. 문제의 정의

2.1 정적 시험 설비

Fig. 2에서는 한국항공우주연구원 위성환경시험동에 설치되어 있는 위성 모델의 개념 도사(a)와 이의 공학적 모델(b)을 보여주고 있다. 이 방의 한쪽 면은 철재-콘크리트 문이 매달려 있

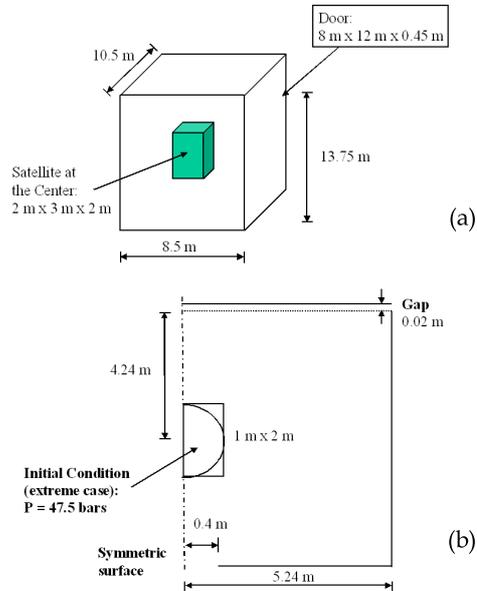


Fig. 2. Static test system: (a)configuration, (b)simplified computational model

며, 시험 도중 문이 닫혀 있을 경우라도 약 2 cm의 틈새가 발생한다. 이 문은 위성체가 파열 하더라도 옆방에 있는 인명과 정밀기기 등을 보호하는 역할을 한다. 차폐문의 반대편에는 폭 80 cm의 작은 출입문이 하나 더 있다. 시험할 때 이 문을 열어 놓는 것이 더 안전한지도 고려 대상이 된다. 본 연구에서는 이 방의 중심에서 310 bar의 He 탱크가 일시에 파열할 경우 폭발파의 반사, 회절, 간섭 등에 대해 고찰하고, 최대 압력 범위를 설정, 이에 대한 대책을 세우도록 한다.

2.2 동적 시험 설비

통신해상기상위성의 추진계 부품인 He 탱크의 압력을 116 bar까지 낮춘 다음 동적 시험도 실시하였다. 내구 시험은 6 자유도로 진동하는 가진기 위에 가압된 탱크를 올려놓고 흔드는 방식이다(Fig. 3 참조).

이는 발사 혹은 궤도 이동시 위성체에 가해지는 여러 가지 외력들을 가정한 것이다. 시험을 감시하는 위치는 위성 모델의 하단 약 3 m 거리에 방탄유리가 설치되어 있고, 이 뒤에서 모니터링이 이루어진다. 따라서 시험 도중 최악의 상황은 탱크가 폭발하는 것인데, 이에 의한 인명 보호를 위하여 파편에 가해지는 힘을 계산하고 이의 운동에너지를 구하는 것이 본 연구의 또 다른 목적이 된다. 앞 절에서와 유사한 방법으로 Fig. 3에서는 시험 설비의 개략도(a)와 이의 간략화된 공학적 모델(b)을 제시하고 있다.

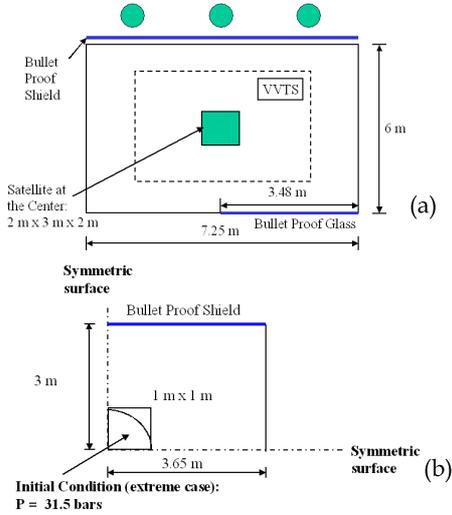


Fig. 3. Dynamic test system: (a)configuration, (b)simplified computational model

III. 연구 방법

3.1 폭발 에너지의 계산

비정상 1 차원 압축성 유동에 대하여 유체 점성과 열전달 효과를 무시하면, 일반적으로 충격파 강도(p_2/p_1)는 초기 고압부와 저압부의 압력비(p_4/p_1)에 대하여 다음의 함수로 표현된다. 여기에서 작동 기체는 헬륨이므로 $\gamma_4 = 1.67$ 이고, 매질인 공기의 비열비는 $\gamma_1 = 1.4$ 이다[2].

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{p_2}{p_1} \left\{ 1 - \frac{(\gamma_4 - 1) \frac{a_1}{a_4} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)}{\sqrt{2\gamma_1 \left[2\gamma_1 + (\gamma_1 + 1) \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \right]}} \right\}^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}} \quad (1)$$

여기에서 아래첨자 1, 2, 4는 각각 매질 영역, 충격파 후방 영역, 그리고 작동 기체 영역을 의미한다.

Table 1. Basic wave properties in each case(p_4 : driver pressure, Z : compressibility, m : mass of He, E_k : kinetic energy)

Sec.	p_4 (bar)	Z	m (kg)	p_2/p_1	E_k (MJ)
2.1	310	1.15	4.36	23.3	3.19
2.2	116	1.06	1.76	16.0	0.84

이때 충격파의 강도는 파동 선단의 전파 마하수(M_s)로 표현하며 다음과 같다.

$$M_s = \sqrt{\frac{\gamma_1 + 1}{2\gamma_1} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) + 1} \quad (2)$$

식 (2)와 같은 충격파에 의해 유도되는 유동 입자의 속도(u_p)는 다음과 같다.

$$u_p = \frac{a_1}{\gamma_1} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \left(\frac{2\gamma_1}{(\gamma_1 + 1) \frac{p_2}{p_1} + \gamma_1 - 1} \right)^{1/2} \quad (3)$$

따라서 작동 기체로부터 전달되는 유동 입자의 에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_k \approx \frac{1}{2} m u_p^2 \quad (4)$$

Table 1은 이러한 방법으로 구한 각 시험 조건에서의 충격파 강도 및 에너지를 보여주고 있다.

3.2 상사 감쇠 이론의 적용

앞 절에서 1 차원 비정상 충격파 이론을 적용하여 폭발로 인한 에너지를 추정할 수 있었다. 그러나 폭발과는 3 차원 구면파(spherical wave)의 형태로 전파되므로, Fig. 4와 같이 모든 에너지가 초기에 한 점으로 집중되어 있다는 가정을 하였다. 여기에 상사(similarity) 이론을 적용하면, 주어진 시간 t 로부터 다음과 같이 폭발파의 강도가 감쇠하는 것으로 알려져 있다[3].

$$p = k \rho_1 \left(\frac{E_k}{\rho_1} \right)^{\frac{2}{5}} t^{-\frac{6}{5}} \quad (5)$$

여기에서 ρ_1 는 매질 기체의 밀도를 의미하며, 본문에서는 표준 대기의 값을 사용한다. k 는 상수로서 참고문헌 [3]에 제시되어 있다.

식 (5)에 대응하는 구면파의 반경(r)은 다음의 식으로 구한다.

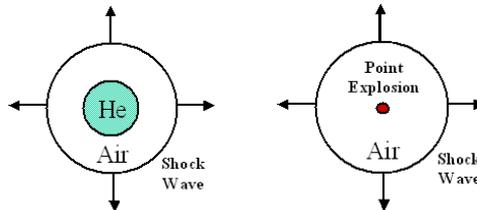


Fig. 4. Basic assumption: (left)real explosion, (right)simplified model

$$r = \left(\frac{E_k}{\rho_1} \right)^{\frac{1}{5}} t^{\frac{2}{5}} \quad (6)$$

전반적으로 폭발과 선단 충격파의 강도는 전파되면서 다음과 같이 감소된다.

$$\frac{p_2}{p_1} \propto \frac{1}{r^\nu} \quad (7)$$

여기에서 원통파(2 차원)일 경우 $\nu = 2$, 구면파(3 차원)일 경우 $\nu = 3$ 이다.

3.3 동역학 모델

폭발할 때 압력 용기의 깨진 파편은, 비록 확실적인 단면적(A)과 질량(m) 분포를 갖지만, 다음과 같은 시간에 대한 2 계도 상미분 방정식으로 표현되는 동역학 모델을 이용하여 그 궤적을 추적할 수 있다.

$$p_1 \left(\frac{p_2 r_0^2}{p_1 r^2} - 1 \right) A - \frac{1}{2} \rho_1 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 A C_D = m \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (8)$$

여기에서 C_D 는 파편의 항력 계수로서 형상 파라미터의 함수가 된다.

식 (8)을 시간에 대해 적분하면 궤적 거리(r)를 얻을 수 있다. 비록 여기에서 충격파 전후의 압력차를 사용하였지만, 실제 파편에 걸리는 압차는 이보다 훨씬 작을 것이므로, 최대 속력과 궤적 거리를 구하는 데는 유효한 방법이라고 사료된다.

3.4 전산 수치 모사

본 연구에서는 Fig. 2~3에서처럼 3 차원 형상에 대한 2 차원 또는 축대칭 근사 모델을 만들어 전산 유체 역학 기법을 적용한다. 비점성 압축성 유동에 대해서 지배방정식인 Euler 방정식을 수치 해석하는 방법을 채택한다[4].

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E+p)u \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E+p)v \end{pmatrix} = -\frac{\sigma}{y} \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (E+p)v \end{pmatrix} \quad (9)$$

여기에서 $\sigma = 0$ 인 경우는 2 차원, $\sigma = 1$ 인 경우는 축대칭 유동을 의미한다.

식 (9)를 벡터 형태로 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial x_i} = \mathbf{S} \quad (10)$$

식 (10)에서 Roe 근사 자코비언 행렬을 구한 다음 고유치(λ_i)와 고유 벡터 행렬(\mathbf{A})을 이용,

정칙화된 특성 형으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \lambda_i \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x_i} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S} \quad (11)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{A} \mathbf{W}$$

따라서 유한 체적법에 근거, 다음과 같이 이산화된 식을 얻는다.

$$U_j^{n+1} = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \left(F_{j+\frac{1}{2}}^n - F_{j-\frac{1}{2}}^n \right) + S_j^n \quad (12)$$

식 (12)를 CFL 조건을 만족하도록 시간 적분한다. 2차 정확도를 얻기 위해 MUSCL 방법으로 확장을 시행하고, 충격파와 같이 물리량의 구배가 큰 부분에서는 van Leer 유량 제한자를 사용하여 TVD(total variation diminishing) 조건을 만족하도록 한다.

3.5 벤치마크 검증

본 문제를 풀이하기에 앞서 앞 절의 전산유체 해석 방법이 과연 물리적으로 타당성이 있는지 검증해 보기로 한다. Table 1에서 헬륨을 작동 기체로 $p_4/p_1 = 310$ 일 때, $E_k = 3.19 MJ$ 의 점원 상당 에너지가 발생한다. 이 값을 열린 공간의 원점에서 폭발이 일어난 후, $1 \mu s$ 가 지난 후 식 (6)에 의해 규정되는 영역에 식 (5)에 의한 초기조건을 적용하였을 때, 앞 절의 수치 해법을 사용하여 풀이한 결과가 Fig. 5(a),(b)에 제시되어 있다. 점원 파열에 의하여 폭발파가 발생하고, 이 폭발파는 식 (7)에 의해 감소한다. 이론(실선)과 수치해석(점)의 결과가 서로 비교되어 있다.

Fig. 5(a)에서 구면 충격파 선단의 위치는 현재의 계산 범위 내에서 이론과 수치해석에서 최대 25%의 상대오차가 발생하였다. 수치해석에서의 반경이 더 컸으며, 시간이 지날수록 그 차이는 두드러져 보인다. 이는 충격파 포획 기법(shock capturing scheme) 특유의 수치 감쇠(numerical dissipation) 때문으로 보인다. 그럼에도 불구하고 Fig. 5(b)를 보면 원점에서의 정체 압력 값(p_0)은 이론과 수치해석이 거의 일치했는데, 이는 보존형인 식 (9) 마지막 행의 에너지 방정식이 에너지 보존법칙을 만족시키기 때문으로 보인다.

이상으로부터 본 연구에서의 접근법이 대체적으로 타당한 근사해를 구하고 있음을 알 수 있다.

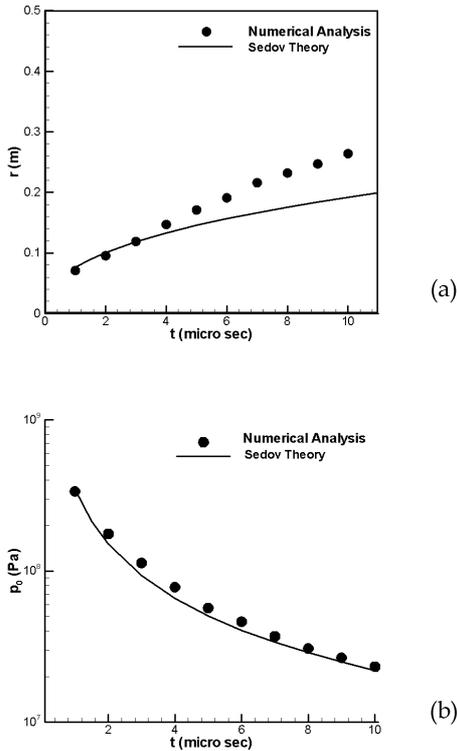


Fig. 5. Benchmark validation: (a)radius of blast wave, (b)pressure ratio of the moving shock front

IV. 결과 및 토의

4.1 위성체 내부 폭발파의 전파

원기둥 모양의 He 탱크가 일시에 폭발할 경우, Fig. 1에서 사각 기둥 모양 위성체의 벽면에 원통파의 선단이 부딪친다. 강체 반사의 경우 충격파 선단 후류의 유동 속도가 0이 되므로 이를 정체점 속도로 보아도 무관하다. 고압탱크의 중심 대칭축 영역에 3.5 절에서와 같은 점원을 일직선으로 배치하고 식 (5)의 초기 조건에 대하여 식 (9)를 축대칭으로 풀어서 위성체 벽에 반사되는 충격파의 강도를 구하면, 각각 $p_4/p_1 = 47.5$ (폭발 후 $485 \mu s$ 경과)와 $p_4/p_1 = 31.5$ (폭발 후 $650 \mu s$ 경과)를 얻을 수 있다. 이 값들은 위성체 벽면의 일부(Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)의 수평 중심선 부근)에만 한정되는 값이지만, 극한 조건으로 생각하여 Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)의 사각형 영역에 균일한 초기 압력 조건으로 주고 2 차원 해석

을 실시하기로 한다. 즉, 고압탱크의 파열로 인한 충격파가 위성체의 내부 벽면에 반사되면서 발생하는 고압에 의하여 위성체가 일시에 파손된다고 가정하기로 한다.

4.2 밀폐 및 개방 공간의 충격파 반사

본 문제를 풀기 이전에 Fig. 2(b)의 형상에서 방 내부가 강체 벽으로 완전히 밀폐되었다고 가정하고 충격파의 전파를 추적하여 본 것이 Fig. 6(a),(b)로서, 각각 폭발 후 $5 ms$ 와 $10 ms$ 시점에서의 등압력선(isobars)을 도시화한 것이다. 폭발파 선단 충격파가 최초로 벽면에 반사될 때 대기압의 14.8 배의 정압이 걸리지만, 오른쪽 위 귀퉁이에서는 반사파와 입사파의 간섭으로 파동들의 재반사가 일어나 대기압의 25.3 배까지 압력이 상승한다. 이렇게 되면 순간적으로 압력이 지나치게 높아지는 지점이 발생한다.

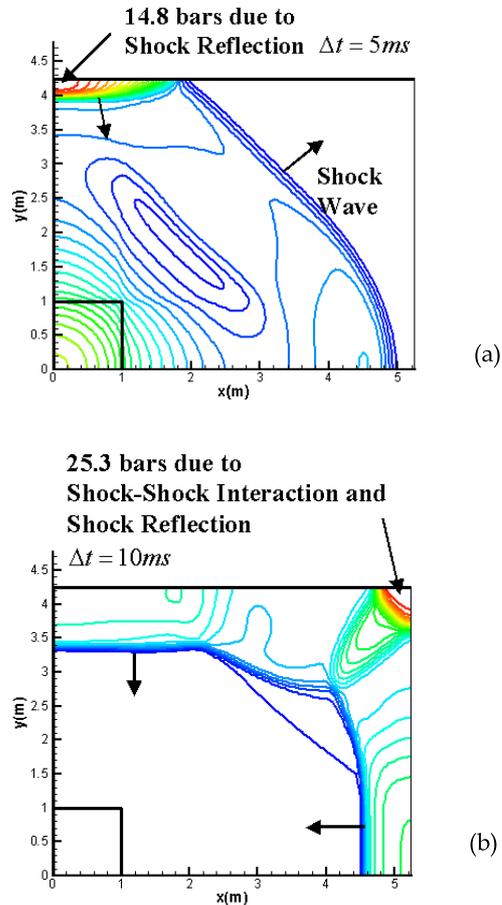


Fig. 6. Pressure fields of the closed door case: (a)earlier stage, (b)later stage

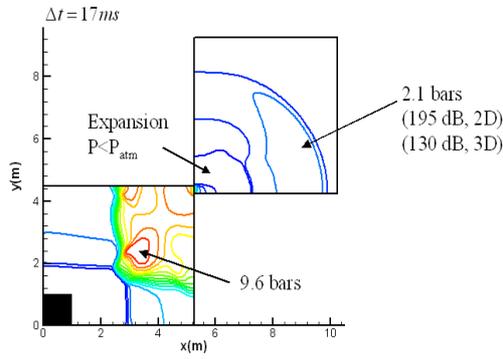


Fig. 7. Pressure field of the leaked case

따라서 Fig. 2(b)의 문을 현재의 틈새보다 12.5 배에 해당하는 25 cm 정도 개방하는 안이 검토 되었다. Fig. 7은 폭발 후 17 ms가 경과하였을 때 파동의 양상을 보여주고 있다. 개방된 문틈으로 고압의 기체가 누출되면서 팽창과가 발생하기 때문에, 최대 압력이 9.6 기압까지 떨어졌음을 알 수 있다. 틈새를 통하여 옆 실험실로 퍼져나가는 폭발파의 충격과 강도는 $p_2/p_1 = 2.1$ 에 불과하다. 이 수준이면 식 (7)을 적용, 3차원 감쇠를 가정하였을 때, 130 dB 정도의 충격 소음으로 추정된다[5]. 실험자가 귀마개를 착용한다면 충분히 견딜 수 있는 압력이라고 생각된다.

Fig. 2(b)의 형상 전체를 고려하여 대칭면의 수치 계산을 실시한 예가 Fig. 8에 제시되어 있다. 이 장면의 상반부는 Fig. 6(b)와 같은 시간대에서 서로 비교 가능하다. 2 cm 틈새 사이로 기체의 누설이 있기 때문에 최대 압력은 완전 밀폐되었을 경우의 57% 수준(14.4 기압)까지 낮출 수 있다. 오른쪽 아래 코너 부분에서는 압력이 16.5 기압으로 다소 높게 나오지만, 이 부분은 철근 콘크리트 벽이므로 이 정도의 순간 압력은 크게

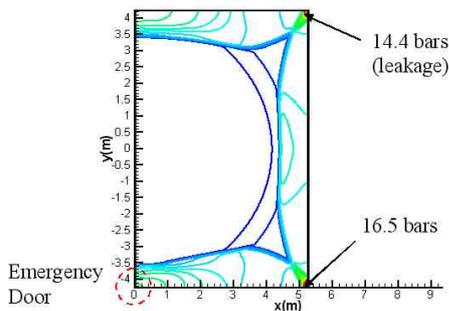


Fig. 8. Pressure field of the full model, static

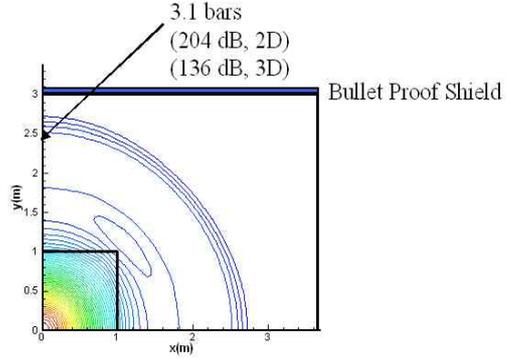


Fig. 9. Pressure field, dynamic case

문제가 되지 않을 것으로 파악된다. Fig. 2(b) 아랫면 중앙의 비상문은 기체 압력이 그다지 높지 않은 부분이므로, 이 부분에서 누설에 의한 압력 강하 효과는 크게 기대할 수 없기 때문에 (Fig. 8의 붉은 점선 원 부분 참조), 이 문을 닫고 시험해도 큰 차이는 없을 것으로 추정된다.

4.3 파편의 운동

앞에서와 비슷한 방법으로 Fig. 3(b)의 모델에 대하여 계산을 실시하면, Fig. 9와 같은 압력장이 발생한다. 이 파동은 앞 절에서와는 달리 열린 공간으로 퍼져 나간다. 수음자에게 전달되는 충격과 강도는 $p_2/p_1 = 3.1$ 정도로 추정되고, 식 (7)에 의해 3 차원으로 환산된 충격 소음 값은 136 dB이다. 실험자의 청각 보호 이외에는 특별한 조치가 필요하지는 않아 보인다.

그런데 시험자들을 동적 시험 설비 테이블 위에 설치된 위성체의 파편(주로 복합 재료임)으로부터 보호하기 위해 방탄유리 설비가 추가로 필요하다. 본 연구에서는 표준 크기인 30 cm × 30 cm (2.5kg) 규모의 파편의 궤적을 $C_D = 0$ 인 극한 상황에 대하여 그 궤적을 모사해 보았다. 그 결과는 Fig. 10(a),(b)에 각각 궤적과 속도로 도시하였는데, 대략 50 m/s 정도의 속도가 나오므로 직접 파편에 맞았을 경우 생명을 지장을 줄수도 있을 것으로 추정된다. 이를 운동 에너지로 환산하면 약 3.1 kJ이 나온다. 대략 총탄이나 포탄의 운동 에너지는 0.324에서 450 kJ에 이른다. 한국항공우주연구원 내부 자료인 참고 문헌 [6]에서 방탄유리의 내충격 시험 데이터는 최대 허용치가 100 kJ/m^2 이므로, 별다른 조치 없이도 충분히 파편을 막아낼 수 있을 것으로 기대된다.

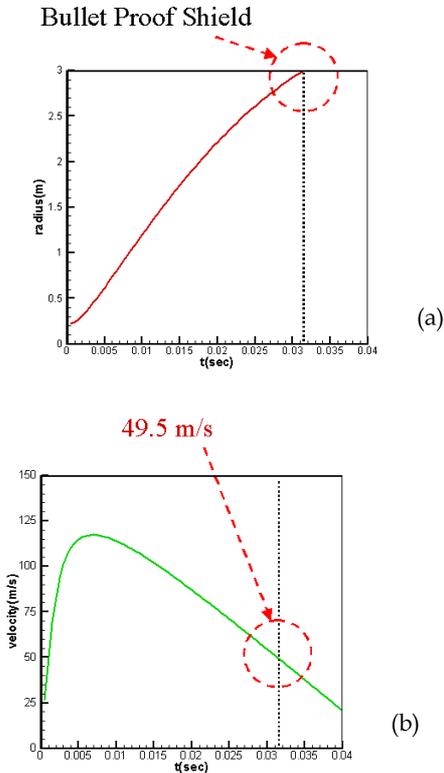


Fig. 10. Computation of dynamics: (a)distance of trajectory, (b)speed of the broken piece

V. 결 론

본 연구에서는 한국항공우주연구원의 실제 우주 환경시험 설비를 대상으로 통신헤양기상위성의 추진계 헬륨 탱크의 파열을 가정하고 최악의 상황을 대비하여 추정된 폭발파 강도에 대한 대

책에 대하여 논하였다. 고려된 모델은 음향 챔버 내에 설치된 정적 시험 설비와 헬륨 탱크가 이보다 감압되었으나 6 자유도의 가진을 받는 동적 시험 설비 두 가지이다.

(1) 정적 설비의 경우, 차폐문의 틈새로 기체의 누설이 발생하면서 충격과 반사에 의한 고압을 상당 부분 누그러뜨릴 수 있음을 알았다. 옆방 시험자의 생명이나 고가 장비에 가해지는 충격 역시 미미한 것으로 파악된다.

(2) 동적 설비의 경우, 폭발과 선단 충격파로 인하여 발생하는 충격 소음은 그리 심각하지 않으므로 시험자가 귀마개와 헬멧 등을 착용하는 등 안전 장비를 충분히 갖추었다는 전제 아래 안전한 것으로 판명되었다. 파열시 발생하는 파편에 대해서는 현재의 방탄유리 설비가 충분히 막아낼 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) http://space.skyrocket.de/doc_sdat/coms.htm
- 2) 이희준, 박동균, 장세명, 장근식, "충격파관에서 정상 초음속 유동장이 확립되는 과정에 관한 연구", 한국항공우주학회지, Vol. 28, No. 7, 2000, pp. 17~23.
- 3) Sedov, L. I., *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics* (translated by Friedman, M.), 4e, Academic Press, New York, 1959.
- 4) 장세명, 장근식, "유한 원추에 입사하는 이동 충격파의 회절", 한국항공우주학회지, Vol. 27, No. 4, 1999, pp. 13~22.
- 5) Dowling, A. P. and Ffowcs Williams, J. E., *Sound and Sources of Sound*, Ellis Horwood Ltd., John Wiley and Sons, New York, 1983.
- 6) *Blast Shield Test Report*, KARI, 2006.