

단열재가 극저온 용기의 내부지지대 구조설계에 미치는 영향

A Study on Thermal Insulator Effect for Structure Design of Internal Support on Cryogenic Vessel

김 두 호* 지 현 진* 김 기 열* 조 성 백*

Dooho Kim Hyunjin Ji Kiyoul Kim Sung-Baek Cho

Abstract

The cryogenic vessel, storing a liquified solutions as LOX and LN₂, consists of a external vessel, internal vessel, thermal insulator and internal support. The internal support should be satisfied with mechanical strength not only to support weight of internal tank but also to maintain uniform space between external and internal tank in spite of external mechanical shock. However, excessive structure design of internal supports is able to increase the amount of heat conduction and the rate of vaporization. The thermal insulator, filled with space between a external and internal vessel, reduces the rate of heat transfer and guarantees the standing time of cryogenic vessel. Especially powder type of insulator has low thermal conductivity and reduce the specification of structure design. In order to evaluate the effect of insulator on structure design, the experiment set-up simulated cryogenic vessel was tested in shock environment according to thermal insulator. As a result, the behavior of internal support under external shock was understood and the design criteria was able to be suggested.

Keywords : Thermal Insulation(단열재), Shock(충격), Cryogenics Vessel(극저온 용기)

1. 서론

최근 들어 다양한 산업 분야에서 액화수소(LH₂), 액화산소(LOX), 액화질소(LN₂)와 같은 극저온 액화기체들의 사용량이 증가하고 있다. 저온 용기는 산업용 기체들을 액화된 상태로 저장할 수 있으므로 고압의 압축가스로 저장하는 방법에 비해 공간대비 저장량이 상대적으로 높으며 충전 압력을 보다 낮게 유지할 수

있으므로 기체 저장 및 운용 안전성을 향상시킬 수 있다.

지금까지 극저온용기는 반도체 산업 등과 같은 대규모 제조업에 주로 사용되어 왔기 때문에 정치형으로 제작되어 산업 현장에 설치되어 운용되어 왔으나, 연료전지 및 태양전지 산업의 발달과 함께 수소 및 산소에 대한 수요가 증가하면서 극저온용기의 저장능력뿐만 아니라 다양한 운전 환경에 따른 안전성에 대한 연구가 필요시 되고 있다.

극저온 용기는 외부로부터의 열전달을 억제시키기 위해 외용기와 내용기로 구성된다. 이와 같은 2중 용기 형태를 구조적으로 유지시켜주기 위해서는 내용기

† 2011년 3월 2일 접수~2011년 5월 13일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김두호(addh@add.re.kr)

와 외용기를 연결하는 내부지지대(internal support)가 필요하다. 내부지지대는 내용기 및 액화기체의 하중을 지지할 뿐만 아니라 외부 충격에 대해서도 내용기와 외용기 사이의 단열재 충전 공간이 존재할 수 있도록 정적하중 조건보다 높은 수준의 기계적 강도가 요구된다. 그러나 내부지지대의 지나친 구조설계는 외용기로부터 내부지지대를 통해 침입하는 열량을 증가하여 내용기에 저장되어 있는 저온용액의 기화 속도를 높일 수 있다. 저온용액의 빠른 기화 속도는 극저온용기의 내부 압력을 상승시켜 액화기체의 저장시간을 단축시키고 운용 안전성을 감소시킨다. 이와 같이 극저온 용기의 내부지지대는 설계에 따라 구조적인 특성과 열전달 특성이 서로 상반되게 작용한다.

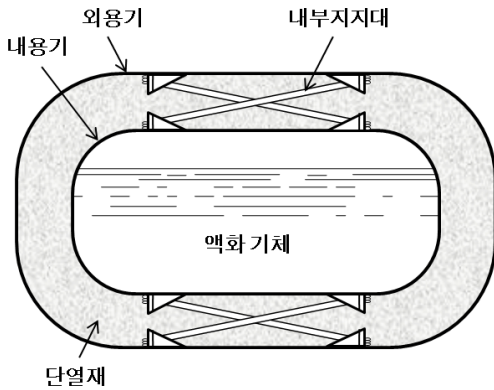


Fig. 1. 극저온 용기의 구조

단열재는 외용기와 내용기 사이의 공간에 존재하며, 외부로부터 전달되는 열침입을 억제하여 저온용액이 장시간 동안 보관될 수 있도록 한다. 극저온 용기에 주로 사용되는 단열재는 섬유상 물질 또는 분말 형태의 단열재, MLI(Multi-Layer Insulation)의 단열 방법들이 사용된다. 이러한 단열재들은 비용, 적용성, 하중, 단열의 효과 등을 고려하여 극저온 용기에 적용될 수 있다^[1,2]. 특히 분말형태의 단열재는 상대적으로 낮은 열전달 계수로 인해 열침입량을 감소시켜 줄 뿐만 아니라 외부에서 전달되는 충격을 흡수 또는 분산시켜 내부지지대의 구조 설계조건을 완화시켜 줄 수 있다.

본 논문에서는 분말 형태의 단열재가 내부지지대 설계 조건에 미치는 영향을 분석하기 위하여 극저온 용기를 모사할 수 있는 실험 장치를 구성하였고, 단열재의 유무에 따라 외부 충격에 대한 내부지지대의 동적거동을 분석하였다.

2. 축소모델의 설계

Fig. 2는 극저온 용기를 모사하기 위한 축소모델의 단면도를 보여주고 있다. 축소모델은 실제 극저온 용기와 유사한 구조로서 원통모양의 중공관 중심부에 스테인리스 스틸 재질의 추가 매달려 있도록 설계하였다. 이때 무게추는 액화기체가 만충전된 내용기를 모사하기 위하여 22kg의 중실봉으로 제작하였다. 중공관의 위 덮개에는 단열재 충전 주입구가 존재하고, 덮개의 안쪽 면에는 내부지지대가 탈부착 될 수 있도록 설계하였다. 또한 중공관 아래 면에는 가이드핀(guide pin)을 설치하여 외부충격에 의해서 내부지지대가 Z축 방향으로만 변형될 수 있도록 하였다.

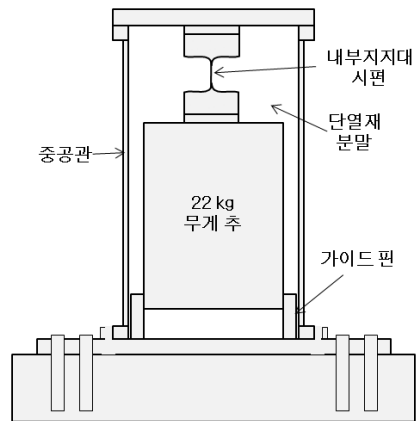


Fig. 2. 축소모델의 구조

내부지지대는 무게 추가 중공관 중심에 위치할 수 있도록 지지해 주는 구조물로서, 스테인리스 스틸 ASME SA-240 재질을 사용하였다. 내부지지대 시편은 Fig. 3과 같이 두께가 1mm이고 폭이 9mm, 7mm, 5mm, 3mm, 1mm가 되도록 제작하였다. 이와 같이 설계된 내부지지대 시편은 무게 22kg의 추로 인해 발생하는 정적 응력(static stress)이 SA-240의 항복응력(yield stress) 범위 내에 있다. 각 시편에 대한 정적 응력을 계산하면 시편 A(1 × 1mm)의 경우 215.8MPa, 시편 B(3 × 1mm)는 71.9MPa, 시편 C(5 × 1 mm)는 43.2MPa, 시편 D(7 × 1mm)는 30.8MPa, 시편 E(9 × 1mm)는 24.0MPa의 값을 가지며, 모든 시편이 SA-240의 항복강도인 290MPa 안에 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이때 각 시편의 안전계수(safety factor)는 1.34(시편 A)에서부터 12.08(시편 E)까지 계산된다.

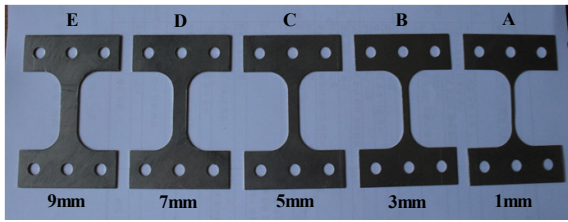


Fig. 3. 내부지지대 시편

3. 단열재의 선택

극한 환경조건에서 사용되는 단열재는 외부 충격 하중에 의해서 기존의 단열구조가 유지되고 단열 효과도 변화가 없어야 한다. 또한 내부지지대가 외부 충격에 의한 급격한 동적하중에 노출되지 않도록 충격 하중을 주위로 분산시켜야 한다. 본 연구에서는 단열 효과 및 충격 흡수/분산 효과를 동시에 만족시키기 위하여 분말형태의 단열재 사용을 고려하였다. 특히 단열재가 구 형상을 가짐으로써 외부 충격으로부터 전달되는 동적하중을 전체적으로 분산시킬 수 있고, 단열재의 흐름성이 향상되어 복잡한 형상을 가진 공간에서도 높은 충전 밀도(packing density)를 기대할 수 있다고 판단하였다.

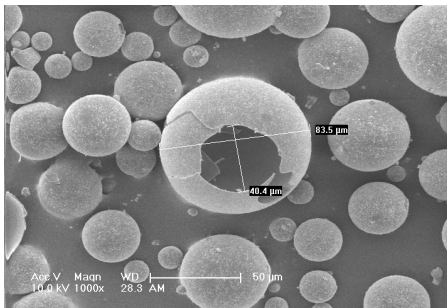


Fig. 4. 단열재의 SEM 사진

Fig. 4는 본 연구에 사용된 단열재(K series, 3M™) 분말에 대한 SEM 사진이다. 단열재는 20 ~ 85μm 크기를 가진 중공체 구조이므로 단열재의 요구조건들을 만족한다고 판단하였다. 특히 주재료로 SiO₂를 사용하기 때문에 외부 온도에 대한 재료의 안정성을 확보할 수 있으며, 다양한 입자 크기가 존재하여 단열재 충전 시 충전밀도를 높일 수 있었다. Table 1은 단열재 분말에 대한 주요 물성치를 나타내고 있다.

Table 1. 단열재 주요 물성치

항 목	물성치
밀도	0.34 ~ 0.40g/cc
열전달율	0.124W/m.K (@21 °C)
입자크기	20 ~ 85μm
정적 파열강도	90%이상이 3000psi에서 견딤

4. 실험장치의 구성 및 실험방법

가. 시험장치의 구성

극저온 용기의 축소모델은 Fig. 5와 같이 자유낙하형 충격시험 장비(Model P122L, Lansmont Co.)를 사용하여 충격 하중이 인가되었다. 축소모델이 고정된 충격시험 장비의 시험테이블은 사용자가 미리 정해 놓은 높이에서 자유 낙하된다. 이때 가속도는 시험테이블이 충격시험 장비 아래쪽 베드(bed)와 충돌할 때 발생되며, 이러한 가속도 환경은 축소모델을 포함한 시험테이블 전체에 동일하게 적용된다.

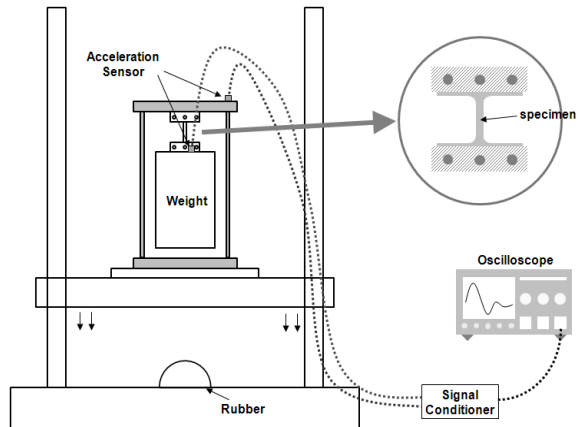


Fig. 5. 실험장치 구성

가속도 센서(PCB piezotronics)는 낙하 충돌 시 축소 모델 및 내부지지대 작용하는 가속도를 측정하기 위해 중공관 위덮개 와 무게추에 각각 장착하였다. 위 덮개에 부착된 센서는 축소모델에 인가되는 가속도량을 측정하고, 무게 추에 부착된 센서는 외부에서 인가되는 가속도에 의한 내부지지대의 충격 응답특성을 측정한다. 시험과정 중 가속도 센서를 통해 획득한

신호는 증폭기를 통해 오실로스코프(agilent, infinium MS08104A)로 파형을 확인하였다.

축소모델에 인가되는 충격 기준은 크기가 30g's이고 지속시간이 20msec인 반정현파(half sine)로 정의하였다. 자유 낙하형 충격시험 장비는 기설정된 충격 기준과 최대한 유사한 가속도 파형이 얻을 수 있도록 베드에 장착되는 고무 패드(rubber pad) 및 실험테이블 낙하높이가 설정되었다. Fig. 6은 시행착오법(trial and error)을 통해 충격시험 장비로부터 획득한 가속도 파형을 보여주고 있다. 파형과 진폭 등에서 이론값과 실제측정값이 일부 차이가 존재하지만, 시험장치로부터 인가되는 가속도가 충격기준을 모사하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

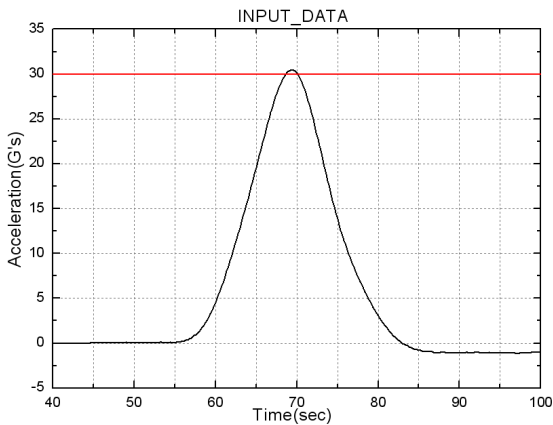


Fig. 6. 동적하중 입력(20ms, 30g)

나. 실험방법

극저온 용기 축소모델은 Table 2와 같이 단열재의 유무에 따라 분리하여 충격 실험을 진행하였다. 먼저 단열재가 충진되지 않은 상태에서 축소모델에 대한 충격실험을 수행하여 내부지지대 시편에 따라 응답 특성을 확인하였다. 이후 단열재를 충진하여 실험을 수행할 시에는 중공관 내부에 존재하는 미세한 공간까지 단열재가 채워질 수 있도록 축소모델에 30분 이상 진동을 인가하여 단열재 충진 높이의 변화가 없음을 확인하고 덮개를 밀봉하였다. 충격 실험은 내부지지대 시편의 폭이 넓은 순서대로(9mm → 1mm) 실시하였으며, 각 시편당 충격 횟수는 3회로 제한하였다. 충격 시험 이후에는 내부지지대 시편을 수거하여 육안 및 버니어캘리퍼스도 절단 유무 및 길이 변형 정도를 확인하였다.

Table 2. 시험순서 및 방법

순번	시편 번호	폭(mm)	단열재
1	E-1	9	충진 안함
2	D-1	7	
3	C-1	5	
4	B-1	3	
5	A-1	1	
6	E-2	9	충진함
7	D-2	7	
8	C-2	5	
9	B-2	3	
10	A-2	1	

5. 실험 결과 및 분석

가. 단열재가 없는 경우

Fig. 7은 단열재가 충진 되지 않은 경우, E-1 시편(w = 9mm)에 대한 충격실험 결과로서, 축소모델에 인가된 가속도와 내부지지대에 응답 특성을 보여주고 있다. 충격응답특성을 보면 충격 후 초기 5ms 동안에는 외부에서 입력된 가속도 파형과 유사하게 거동하나 그 이후에는 가속도의 기울기가 입력 가속도에 비해 줄어든 것을 볼 수 있다. 이는 외부에서 입력된 가속도에 의해서 내부지지대가 소성 변형하여 나타나는 특성이라고 판단되었으며, Fig. 10(a)와 같이 실험 후 시편의 상태를 확인한 결과 시편의 길이가 실험 전보다 9mm정도 늘어나 있었다.

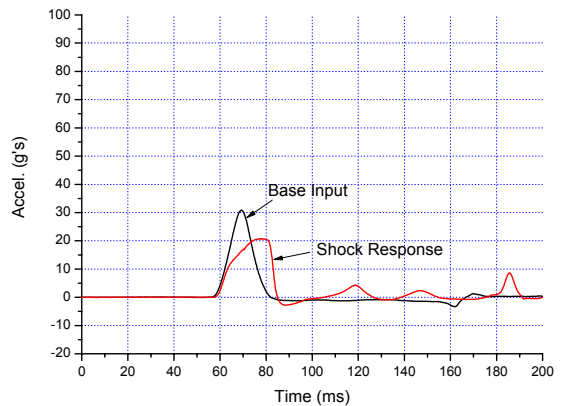


Fig. 7. 충격 인가에 따른 응답곡선(E-1시편)

Fig. 8은 D-1 시편(w = 7mm)에 대한 실험 결과로서, E-1 시편의 결과와는 달리 충격 응답특성이 입력가속도 파형과는 반대로 형성된 것을 확인할 수 있다. 이는 소성변형이 진행되면 응답 가속도의 기울기가 감소하게 되기 때문에 외부로부터 가속도 인가 직후 약 25ms 동안 내부지지대가 소성변형이 진행되었다고 판단할 수 있었다. 25ms 이후에는 내부지지대가 절단되었기 때문에 내부지지대에 의해 고정되어 있던 무게추가 낙하하여 바닥면과의 충돌로 발생한 진동이 나타났다. Fig. 10(b)에서 necking(necking)현상 이후 파단된 D-1 시편을 보여주고 있다.

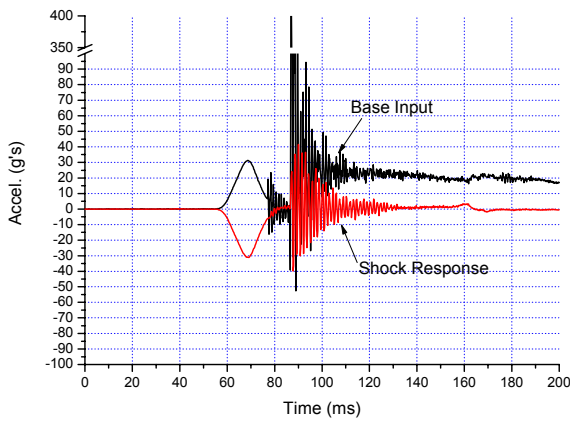


Fig. 8. 충격 인가에 따른 응답곡선(D-1시편)

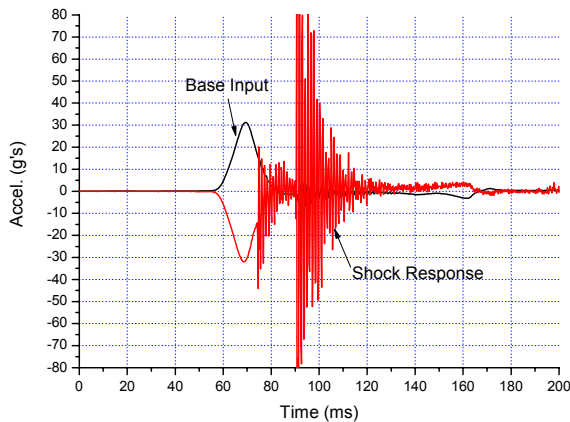


Fig. 9. 충격 인가에 따른 응답곡선(C-1시편)

C-1 시편(w = 5mm)의 경우 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 D-1 시편과 동일하게 내부지지대가 소성 변형 후 절단되는 것을 볼 수 있다. 그러나 C-1 시편은 외부

가속도 인가 직후 약 15ms 이후에 무게추 낙하에 따른 진동 현상이 나타났다. 이는 C-1 시편이 D-1 시편보다 내부지지대의 폭이 2mm가 더 작기 때문에 절단되는 시간이 단축된 것으로 판단할 수 있었다. C-1 시편 역시 necking 현상 이후 파단되었다는 것을 Fig. 10(c)에서 확인할 수 있다.

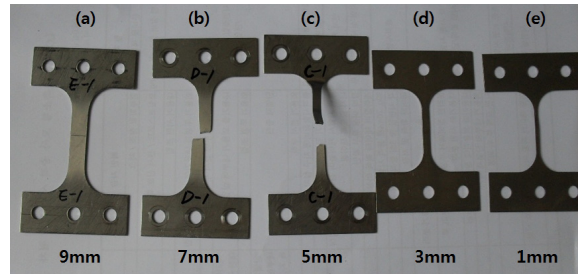


Fig. 10. 충격실험 이후 내부지지대 시편

E-1, D-1, C-1 시편에 대한 충격실험 결과는 B-1 및 A-1 시편에 대한 실험결과를 바탕으로 유추가 가능하므로 이후 추가적인 충격 실험을 수행하지 않았다.

Table 3. 내부지지대의 크기 및 정적 응력

시편	시편 크기	응력(@ 30 g/s)	실험결과
A-1	1 × 1mm	6474.6MPa	절단
B-1	3 × 1mm	2158.2MPa	절단
C-1	5 × 1mm	1294.9MPa	절단
D-1	7 × 1mm	924.9MPa	절단
E-1	9 × 1mm	719.4MPa	소성변형

Table 3은 정적으로 30g/s의 가속도가 인가되었을 경우 내부지지대 시편에 작용하는 정적 응력을 나타내었다. SA-240 재료의 항복응력 및 극한응력(ultimate stress)이 약 290MPa과 621MPa 임을 감안할 때 모든 시편은 30g/s의 가속도 환경에서는 절단되어야 한다. 그러나 보통 연신율이 10% 이상인 강재(steel)와 주조강(cast iron)의 항복응력은 동적하중 적용시 재료의 경화 특성으로 증가할 수 있다고 보고되고 있으며 SA-240의 경우에는 항복응력이 430MPa 까지 증가할 수 있다^[3]. 이러한 재료 특성은 동적하중이 적용될 때에는 극한 응력 역시 증가할 가능성이 있다고 판단할 수 있었다. 실제로 E-1 시편에 대한 충격실험 결과에

서도 볼 수 있듯이 극한 응력(621MPa)보다 높은 응력(719.4MPa)이 시편에 인가되더라도 소성변형만 일어날 뿐 절단되지 않은 것을 보면 동적하중 상태에서 극한 응력의 한계가 증가한다고 볼 수 있으며, SA-240의 경우 극한 응력은 720 ~ 925MPa까지 증가한다는 것을 유추할 수 있었다.

나. 단열재가 있는 경우

Fig. 11은 분말형태의 단열재가 충전되어 있는 경우에 E-2 시편(w = 9mm)에 대한 충격실험 결과로서, 충격 시험장치로 인가된 가속도와 내부지지대에 응답 특성을 보여주고 있다. 첫 번째 충격을 인가했을 경우에는 입력된 파형의 최대값인 30g/s 보다 약 1.8배 이상 높은 55g/s 정도의 응답 가속도를 보였으나, 연속하여 두 번째 충격을 인가했을 때부터는 입력 가속도 파형과 응답 가속도가 거의 유사하게 거동하는 것을 볼 수 있다.

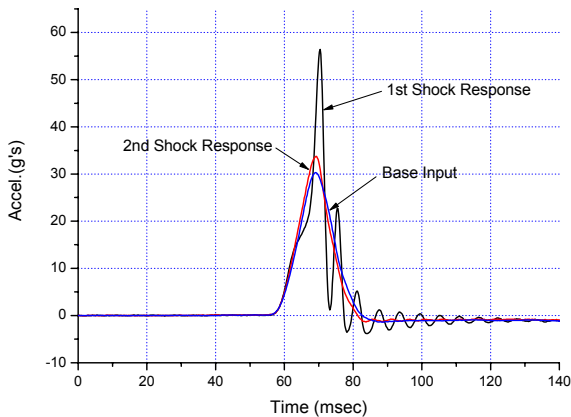


Fig. 11. 충격 인가에 따른 응답곡선(E-2시편)

이러한 물리적 현상은 크게 두 가지로 나눠서 설명할 수 있다. 먼저 충격 인가 시 높은 응답 가속도가 나타나는 이유는 내부지지대가 제작하는 과정에서 발생하는 유격 때문이라 생각할 수 있다. 내부지지대의 제작공차는 외부충격이 인가되는 동안에 무게추의 유도하지 않은 거동을 일으켜 순간적으로 최대 가속도를 증가시킬 수 있다. 이와 함께 첫 번째 충격 시험과 두 번째 충격시험 결과의 응답 파형이 상이한 이유는 단열재의 충전 상태가 변화로 설명할 수 있다. 단열재는 외부에서 진동을 가하면서 축소시제 내부로 충전되었기 때문에 최종적으로는 높은 충전밀도가 확보되

었다고 판단하였다. 그러나 실제로는 축소모델 내부에는 국부적으로 존재하는 공기로 인해 단열재가 충전되지 못한 미소공간이 존재하였고, 30g/s라는 높은 충격이 인가되는 동안 무게추가 진동하며 단열재가 빈 공간을 충분히 채울 수 있다. 이러한 과정을 거치는 동안 단열재는 무게 추를 보다 견고히 고착시킴으로써 두 번째 충격부터는 축소모델 전체가 하나의 강체인 것처럼 거동하여 입력 가속도와 응답 가속도가 동일한 양상을 보인다고 생각할 수 있다. 이러한 현상은 D-2, C-2, B-2, A-2 시편에서도 동일하게 나타났다.

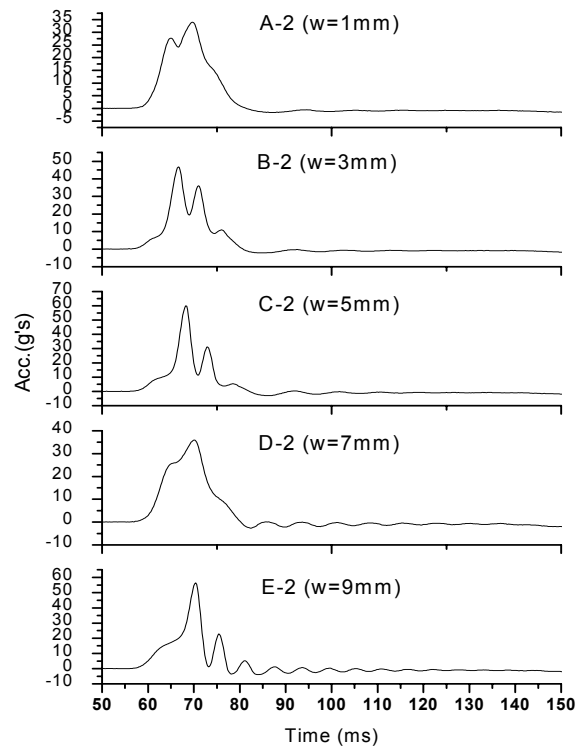


Fig. 12. 충격 인가에 따른 응답곡선 - 첫 번째 충격에 대한 시편별 응답곡선 비교

Fig. 12는 첫 번째 충격 인가 시 각 시편의 응답 특성을 보여주고 있다. 앞서 언급하였듯이 내부지지대의 제작공차 및 장착상태가 각 시편마다 상이하므로 응답 가속도의 앞부분은 모두 상이하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 외부로부터 인가되는 가속도가 끝나는 시점 이후의 그래프를 보면 내부지지대의 폭이 넓을수록 진동수가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이런 결과로 유추해 볼 때, 첫 번째 충격에서는 내부

지지대의 구조 설계가 잔류 진동에는 영향을 미칠 수 있다고 생각할 수 있다. 그러나 Fig. 13과 같이 두 번째 충격부터는 단열재가 무게추를 증공관 내부에 완전히 고착시킴으로써 내부지지대의 구조 설계가 내부 구조물의 동적거동에는 아무런 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다.

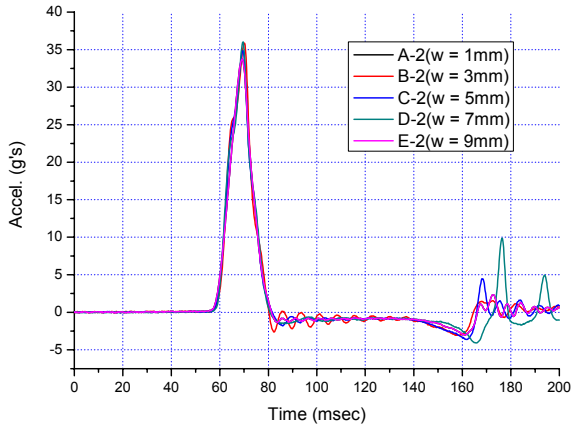


Fig. 13. 충격 인가에 따른 응답곡선 - 두번째 충격에 대한 시편별 응답곡선 비교

이러한 단열재의 충진 효과는 충격 시험 이후의 시편의 길이변화에서도 확인할 수 있었다. 충격시험 이후 축소모델에서 수거된 내부지지대는 육안으로는 변형 유무를 확인할 수 없었으며 버니어 캘리퍼스를 이용하여 초기 길이와 충격시험 후 길이 변화를 분석한 결과 역시 Table 4에서와 같이 모든 시편의 변형률이 오차범위 내에서 존재하지 않았다.

Table 4. 내부지지대의 크기 및 정적 응력

시편	시편 크기	넓이	변위량
A-2	1 × 1mm	1 × 10 ⁻⁶ m ²	ΔL ≈ 0
B-2	3 × 1mm	3 × 10 ⁻⁶ m ²	ΔL ≈ 0
C-2	5 × 1mm	5 × 10 ⁻⁶ m ²	ΔL ≈ 0
D-2	7 × 1mm	7 × 10 ⁻⁶ m ²	ΔL ≈ 0
E-2	9 × 1mm	9 × 10 ⁻⁶ m ²	ΔL ≈ 0

더욱이 A-2 시편의 경우에는 재시험 과정에서 Fig. 14와 같이 정적 설계 기준보다 약 70배 이상인 95 g/s

의 높은 가속도 환경에 노출시켰지만 응답 가속도 및 충격 후 변형률에서 내부지지대의 이상 유무를 확인할 수 없었다.

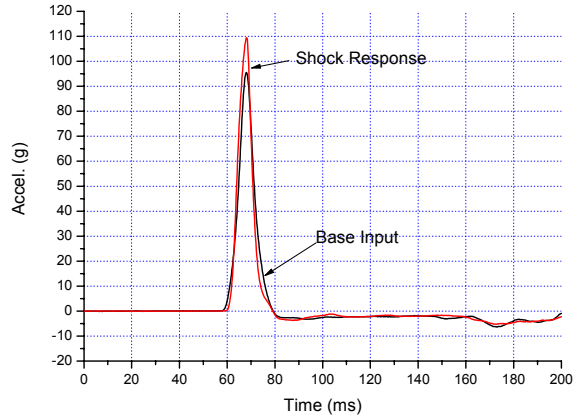


Fig. 14. 95 g/s 충격 인가에 따른 응답곡선(w = 1mm)

이러한 결과는 비록 외부에서 높은 충격이 인가되더라도 분말형태의 단열재가 존재함으로써 내부지지대가 단성영역에서 거동될 수 있다는 것을 보여주고 있다. 즉, 분말형태의 단열재가 구 형상을 가짐으로써 외부 충격으로부터 전달되는 동적하중을 전반적으로 분산시킬 수 있으며, 충격의 일부는 단열재 분말이 미소 거동하면서 흡수되어진다고 생각할 수 있었다.

다. 단열 효과 분석

충격실험을 통해 분말형태의 단열재는 외부에서 인가되는 충격을 분산 또는 흡수한다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에 사용된 단열재 분말은 구형

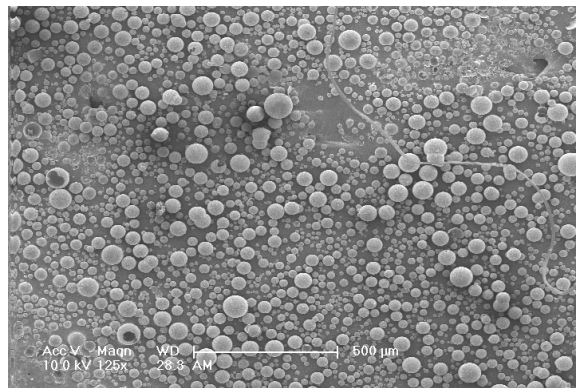


Fig. 15. 충격 하중 노출 후 단열재 SEM 사진

태의 증공체 구조이므로 단열 효과가 유지되기 위해서는 충격 인가 전후로 증공체 구조가 그대로 유지되어 있어야 한다. Fig. 15는 3차례의 충격시험 및 95g's 이상의 충격 인가 이후에 수집한 단열재의 SEM 사진으로 Fig. 4와 비교하여 증공체 구조가 그대로 유지되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결론

극한 환경에 사용해야 되는 극저온 용기는 진동, 충격 등과 같은 외부 동적 하중에 대한 구조 안정성을 가져야 할 뿐만 아니라 단기간 내에 용기압력이 상승되지 않도록 단열성능을 유지하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 두 가지 요구조건을 만족시키기 위하여 내용기와 외용기 사이에 분말형태의 단열재 사용을 제안 하였다.

분말형태 단열재의 외부 충격에 대한 흡수/분산 효과를 분석하기 위하여 극저온 용기를 모사할 수 있는 축소모델을 제작하였으며, 자유낙하형 충격시험 장비를 사용하여 단열재 충전 유무에 따른 내부지지대의

응답 가속도를 측정하였다. 실험 결과 단열재는 외부 충격 시 내용기, 외용기, 내부지지대를 고착시켜 하나의 강체처럼 거동시키는 역할을 함으로써 동적하중에 대한 내부지지대의 구조 안정성이 확보되었다.

본 논문에서는 분말형태의 단열재를 사용함으로써 극저온 용기의 우수한 내환경 특성을 확보할 수 있다는 것을 제시하였다. 또한 내부지지대의 구조설계 시 안전계수를 보다 낮게 설정할 수 있기 때문에 내부지지대를 통한 외부 열침입을 감소시켜 액화기체의 기화에 따른 내용기 압력상승 효과를 최대한 억제시킬 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] Barron, Randall F., 1985, "CRYOGENIC SYSTEM", CLARENDON.
- [2] 지현진, 윤수열, 김영철, "액체산소탱크 구조 및 기본설계", 국방과학연구소, ADDR-413-091777.
- [3] Federal Board of Defense Engineering and Aquisition Koblenz, BV-043, 1985.