

KAERI/TR-2735/2004

A형 운반용기 적용을 위한
충격완충재 및 흡수재

Shock Absorber Material and
Absorbent for Type A Package

KAERI

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2003년도 “의료 및 산업용 RI 운반용기 개발”에 관한 연구과제의
기술보고서로 제출합니다.

2004. 3.

과 제 명 : 의료 및 산업용 RI 운반용기 개발

주 저 자 : 방 경 식

공 저 자 : 이 주 찬

임 성 팔

서 기 석

요 약 문

I. 제 목

A형 운반용기 적용을 위한 충격완충재 및 흡수재

II. 목적 및 필요성

방사성 동위원소를 안전하게 운반하기 위한 A형 운반용기를 개발하고, 방사성 동위원소의 운반체계를 확립하기 위하여 A형 운반용기에 적용하기 위한 충격완충재 및 흡수재의 평가가 필요함.

III. 내용 및 범위

- 액체형 방사성 물질 A형 운반용기와 관련된 기술기준 검토
- 충격완충재 실험평가
- 흡수재 실험평가

IV. 결과의 활용계획

- 방사성 동위원소 A형 운반용기 개발에 활용
- 액체형 방사성 동위원소 운반용기 설계에 활용

SUMMARY

I. Project Title

Shock Absorbent Material and Absorbent for Type A Package

II. Objective and Importance of the Project

In order to develop the type A package, which safely transport radioisotope, and establish the system of transportation for the radioisotope, it is necessary that the shock absorber material and an absorbent material to apply to the shipping package, which is to transport liquid radioactive isotope, is estimated experimentally.

III. Scope and Contents of Project

- Investigation and examination of the related regulation on the type A package for the liquid radioactive materials
- Analysis for the present status on the Type A Package
- A classified criterion of the package in accordance with activity limits

IV. Applications of Results.

- Application for development of the type A package for the radioisotope
- Application for design of the packages for the liquid radioisotope

CONTENTS

Chapter 1. Introduction -----	1
Chapter 2. Shock Absorber Material and Absorbent -----	3
Sect. 1. Requirements for a Type A Package for liquid -----	3
1. Activity Limits and Material Restrictions -----	3
2. Requirement for Type A Packages -----	3
3. Test Items for Type A Package -----	5
4. Additional Tests for Type A Packages Designed for Liquids and Gases -----	7
Sect. 2. Shock Absorber Material -----	8
1. Shock Absorber Material -----	8
2. Test Method -----	10
3. Test Results -----	11
Sect. 3. Absorbent -----	19
1. Absorbent -----	19
2. Test Method -----	19
3. Test Results -----	22
Chapter 3. Conclusion -----	26
Chapter 4. References -----	27

목 차

제 1 장	서 론	1
제 2 장	충격완충재 및 흡수재	3
제 1 절	액체형 A형 운반용기 기술기준	3
1.	A형 운반용기의 내용물 제한치	3
2.	A형 운반용기에 대한 일반기준	3
3.	A형 운반용기의 시험항목	5
4.	액체 및 기체 운반을 위한 A형 운반용기의 추가시험	7
제 2 절	충격완충재	8
1.	충격완충재	8
2.	실험방법	10
3.	실험결과	11
제 3 절	액체흡수재	19
1.	흡수재	19
2.	실험방법	19
3.	실험결과	22
제 3 장	결 론	26
제 4 장	참고문헌	27

표 목 차

Table 1. Free Drop Distance for Testing Packages to Normal Conditions of Transport -----	6
Table 2. Polyurethane Specimens -----	9
Table 3. Expanded Poly Styrene Specimens -----	9
Table 4. Mechanical Material Property according to Specimens -----	16
Table 5. Absorbency in the case of a liquid with NaOH 0.4 % -----	22
Table 6. Absorbency in the case of a liquid with Na 0.9 % -----	23

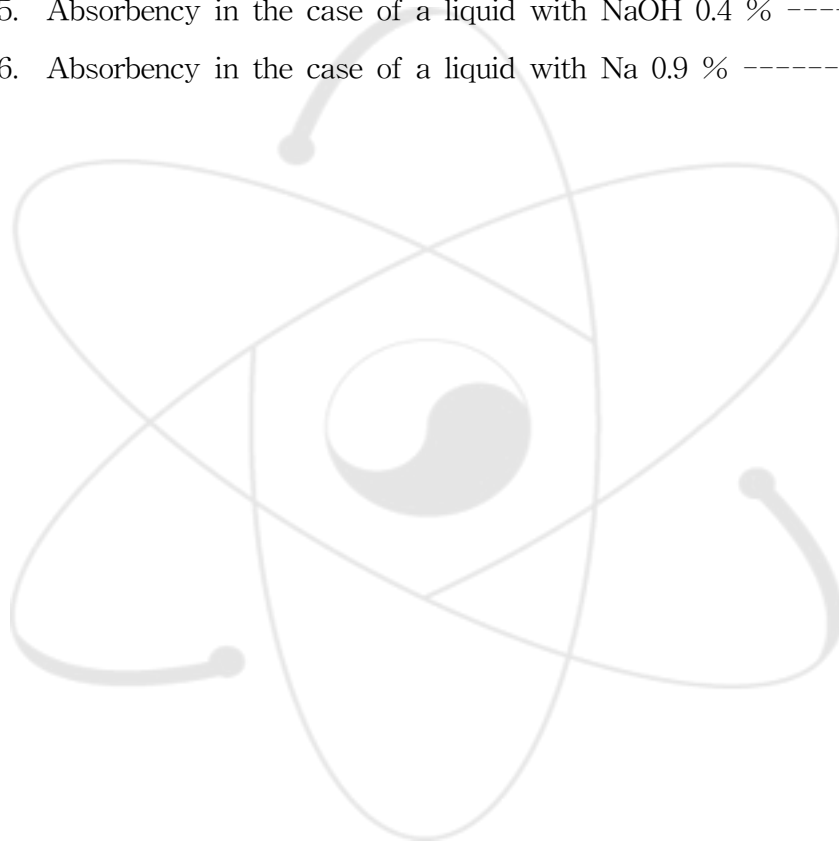


그림 목 차

Fig. 1.	Specimens for Compression Test	10
Fig. 2.	Micro Balance	10
Fig. 3.	Compression Test Equipment	11
Fig. 4.	PU H Stress-Strain Curve	12
Fig. 5.	PU N Stress-Strain Curve	12
Fig. 6.	PU F Stress-Strain Curve	13
Fig. 7.	EPS 16 Stress-Strain Curve	13
Fig. 8.	EPS 21 Stress-Strain Curve	14
Fig. 9.	EPS 30 Stress-Strain Curve	14
Fig. 10.	EPS 60 Stress-Strain Curve	15
Fig. 11.	Overpack Tresca Stress Contour	17
Fig. 12.	Pb Cover Tresca Stress Contour	17
Fig. 13.	Weight of Melanine Form	20
Fig. 14.	Weight of NaOH	21
Fig. 15.	Polymer within Sieve	21
Fig. 16.	Absorbency of Absorbent according to Liquid	24
Fig. 17.	Weight and Volume of Absorbent	25

제 1 장 서 론

방사성 동위원소(Radioactive Isotope)는 산업, 의료, 식품, 농업분야 등에 걸쳐서 광범위하게 사용되고 있으며, 각 분야의 발전과 더불어 지속적으로 증대될 것으로 예상되고 있다.

선진국에서는 원자력에너지 이용이 성숙기에 접어들면서 방사성 동위원소의 이용개발을 활발히 추진하고 있으며, 우리나라에서도 이용이 꾸준히 확대되는 추세로, 국내 방사성 동위원소 이용기관의 수가 1990년 698개 기관에서 2000년 1,692개 기관으로 약 2.5배 증가하였으며, 2001년에는 1,822개 기관으로 130개 기관이 증가하였다.

우리나라는 2010년까지 방사성 동위원소 관련 산업을 국가 중점사업의 하나로 육성하여 발전 대 비발전 비중을 매출액 기준으로 7:3의 수준으로 증대시키기 위하여, 방사성 동위원소의 안정적 생산 기반을 구축하고, 생산단계에서 소비단계까지의 유통체계를 확립하여 국산화율을 2000년 4%에서 2006년 25%로 제고하기 위하여 2001년 7월 제2차 방사선 및 방사성 동위원소 이용 진흥계획을 수립하여 추진하고 있다[1].

방사성 동위원소의 이용개발을 제고하기 위해서는 방사성 동위원소의 생산 확대와 더불어 생산단계에서 소비단계까지의 운반체계를 확립하는 것이 무엇보다 중요하다. 미국의 경우에 있어서는 2000년 기준으로 방사성 물질의 운반 중 의료용 방사성 동위원소의 운반이 전체의 62%나 차지할 정도로 방사성 동위원소의 운반체계가 잘 확립되어 있으며[2], 국내도 마찬가지로 2000년 기준으로 방사성 동위원소의 운반건수는 무려 58,935건으로 방사성 폐기물 운반건수 756건의 약 80배에 이를 정도로 많은 운반을 하고 있다[3].

국내에서 생산되는 방사성 동위원소는 연구용 원자로인 하나로에서 생산되는 방사성 동위원소인 I-131, Ir-192, Co-60, Mo-99 및 Tc-99m 등이 있으며, 원자력 의학원의 싸이크로트론에서 생산되는 방사성 동위원소인 I-123, Ga-67, Tl-201 및 F-18 등이 있다.

국내에서 생산되는 이들 방사성 동위원소는 주로 의료용과 산업용으로 사용되고 있으며, 의료용으로 사용되는 방사성 동위원소는 액체형태 또는 캡슐

(capsule)형태로 제작되어 사용되고 있다.

방사성 동위원소를 생산지에서 소비지까지 안전하게 운반하기 위해서는 운반용기를 필요로 하게 되며, 운반용기는 과학기술부 고시 제 2001-23호, IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1 및 US 10 CFR Part 71 등에서 규정하고 있는 조건들에 만족하여야 한다[4~6].

국내에서 의료용으로 사용되는 액체형 방사성 동위원소의 방사능 세기는 주로 10~50 mCi가 많이 사용되고 있다. 이들 방사능 세기는 A₂ 값 이하로 법규에서 규정하고 있는 운반용기의 형태는 A형에 해당한다.

A형 운반용기는 5 cm/h의 살수시험, 중량에 따라 0.3 m~1.2 m 높이에서의 자유낙하시험, 적층시험 및 1 m 높이에서의 관통시험을 수행하여 안전성을 입증하도록 하고 있다. 그러나 액체 형을 운반하는 운반용기는 9 m 높이에서의 자유낙하시험과 1.7 m 높이에서의 관통시험을 추가로 수행하여 안전성을 입증하도록 규정하고 있다. 또한 이들 국내·외 관련법규에서는 운반 내용물이 액체인 경우 운반용기는 두 개의 격납경계 또는 흡수물질을 포함한 하나의 격납경계를 가져야 하며, 흡수물질은 내용물의 두 배를 흡수할 수 있는 용량이어야 한다고 명시하고 있다.

따라서 액체형태의 방사성 동위원소를 운반하기 위한 운반용기에 적용할 충격 완충재와 흡수재에 대한 실험적 평가를 수행하였다.

제 2 장 충격완충재 및 흡수재

제 1 절 액체형 A형 운반용기 기술기준

방사성 동위원소를 생산지에서 소비지까지 안전하게 운반하기 위해서는 운반용기를 필요로 하게 되며, 운반용기는 과학기술부 고시 제 2001-23호, IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1 및 US 10 CFR Part 71 등에서 규정하고 있는 조건들에 만족하여야 한다. 따라서 이들 규정들에서 명시하고 있는 A형 운반용기에 대한 기술기준 및 액체형 A형 운반용기 개발을 위해 필수적으로 알아야 할 내용 등을 중심으로 살펴보았다.

1. A형 운반용기의 내용물 제한치

가. A형 운반용기는 다음보다 큰 방사능(activities)을 포함하지 말아야 한다.

- 특수형 방사성물질의 경우 : A_1
- 다른 방사성 물질의 경우 : A_2

나. 각각의 방사능과 핵종을 알고 있는 방사성 핵종의 혼합물에 대해서는 다음 조건을 A형 운반용기의 방사성 내용물에 적용한다.

$$\sum_i \frac{B(i)}{A_1(i)} + \sum_j \frac{C(j)}{A_2(j)} \leq 1$$

여기서, B(i)는 특수형 방사성물질로서 방사성 핵종 i의 방사능

$A_1(i)$ 는 방사성 핵종 i에 대한 A_1 값

$C_1(j)$ 는 특수형 방사성물질과 다른 방사성 핵종 j의 방사능

$A_2(j)$ 는 방사성 핵종 j에 대한 A_2 값

2. A형 운반용기에 대한 일반기준

가. 운반용기의 가장 작은 전체 외부 크기는 10 cm 이상이어야 한다.

나. 운반용기의 외부는 쉽게 파손되지 않으며, 손대지 않는 한 개봉되지 않는 것이 증명되는 봉인과 같은 형상을 반영하여야 한다.

- 다. 운반용기의 어떤 결속 부착물은 정상운반 및 운반사고조건 하에서, 부착물에서의 힘들이 이들 규정의 요구사항들에 만족하도록 운반용기의 능력을 손상시키지 않도록 설계되어야 한다.
- 라. 운반용기의 설계는 운반용기의 구성품들에 대해 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위를 고려하여야 하며, 액체에 대한 결빙 온도 및 주어진 온도범위에서 운반용기 재질의 잠재적 감손을 주의하여야 한다.
- 마. 설계 및 제작은 국가 및 국제 표준 또는 관계 당국에서 용인할 수 있는 다른 요구사항들에 따라야 한다.
- 바. 설계는 운반용기 내부에서 발생할 수 있는 압력에 의해 또는 우연히 열릴 수 없도록 굳건한 잠금 장치에 의해 안전하게 폐쇄할 수 있는 격납 계통을 포함하여야 한다.
- 사. 특수형 방사성물질은 격납 계통의 한 요소로서 고려될 수 있다.
- 아. 만약 격납 계통이 운반용기의 별개 단위로 구성되었다면, 운반용기의 어떤 다른 부분의 독립된 굳건한 잠금 장치에 의해 안전하게 폐쇄될 수 있어야 한다.
- 자. 격납 계통의 어떤 요소의 설계는 액체 및 기타 취약물질의 방사 화학적 분해 및 화학 반응과 방사분해에 의한 가스 발생을 적용할 수 있는 곳을 고려하여야 한다.
- 차. 격납 계통은 주변 압력을 60 kPa로 감소한 상태에서 방사성 내용물을 보유할 수 있어야 한다.
- 카. 압력 안전판과 다른 모든 밸브들은 밸브로부터의 어떠한 누설을 보유하기 위한 밀봉장치를 제공하여야 한다.
- 타. 격납 계통의 한 부분으로 지정된 운반용기의 구성품을 둘러싼 방사선 차폐물은 차폐물로부터 구성품이 우연히 방출되지 않도록 설계되어야 한다. 방사선 차폐물과 그러한 구성품이 별개 단위로 이루어진 곳은 방사선 차폐물이 어떠한 다른 운반용기 구조물의 독립된 굳건한 잠금 장치로 안전하게 밀폐될 수 있어야 한다.
- 파. 운반용기는 시험평가 항목에서 규정한 시험을 수행한 후 다음을 방지할 수 있도록 설계되어야 한다.

- 방사성 내용물의 분실 또는 분산
 - 운반용기의 어떤 외부 표면에서 방사선 준위에 있어 20 % 이상 증가를 초래하는 차폐 건전성의 손실
- 하. 추가로, 액체를 포함하기 위해 설계된 A형 운반용기는
- 다음의 조건들 중 하나를 만족하여야 한다.
 - (i) 액체 내용물 체적의 두 배를 흡수하기 위한 충분한 흡수재를 제공하여야 한다. 그러한 흡수재는 누설의 사고에서 액체를 접촉할 수 있도록 적절한 위치에 놓여야 한다.
 - (ii) 비록 1차 내부 구성품이 누설이 발생한다 하여도, 2차 외부 격납 구성품 내에서 액체 내용물의 역류를 보증하기 위해 설계된 1차 내부 및 2차 외부 격납 구성품으로 구성된 격납 계통을 제공하여야 한다.

3. A형 운반용기의 시험항목

- 가. A형 운반용기에 대한 건전성 입증시험은 살수시험, 자유낙하시험, 적층시험 및 관통시험으로 구성되며, 살수시험이 각각의 경우에 앞서 수행되며, 각각의 시험은 시편이 최대의 손상을 받는 방법으로 실시되어야 한다.
- 나. 살수시험과 계속되는 시험과의 시간 간격은 시편 외부의 약간의 건조도 없이 물이 최대한도로 젖을 만큼 되어야 한다. 이와 반대로 어떤 증거도 없을 경우, 만약 살수가 동시에 네 방향으로부터 적용되었다면, 간격은 2시간이 되는 것으로 고려될 것이다. 그러나 만일 살수가 연속적으로 네 방향의 각 각으로부터 적용된다면, 어떤 시간 간격도 경과하지 않을 것이다.
- 다. 살수시험
- 시편은 적어도 1시간 동안 대략 시간당 5 cm의 강우량에 노출되는 것으로 가정된 살수시험을 필요로 할 것이다.
- 라. 자유낙하시험
- 시편은 시험되기 위한 안전 특징에 대해서 최대 손상을 받도록 목표물 위에 낙하한다.
 - 목표물은 시편의 충격에 의한 변위 또는 변형에 대한 저항의 증가가 시편에 대한 손상을 심각하게 증가시키지 않는 그러한 특성의 편평하고 수평한 면

이어야 한다.

- 시편의 가장 낮은 위치로부터 목표물의 상부 표면까지의 측정된 낙하 높이는 적용 중량에 대해 표 1에서 지정한 거리 이상이어야 한다.
- 중량이 50 kg을 초과하지 않는 직사각형 섬유 판 또는 목재 운반용기에 대해서는, 별도 시편을 0.3 m 높이에서 각 모서리 위로 자유낙하 하여야 한다.
- 중량이 100 kg을 초과하지 않는 원통형의 섬유 판 운반용기에 대해서는, 별도 시편을 0.3 m 높이로부터 각 테두리의 1/4 되는 곳 위로 자유낙하 하여야 한다.

표 1. Free Drop Distance for Testing Packages to Normal Conditions of Transport

<i>Package Mass(kg)</i>	<i>Frees Drop Distance(m)</i>
<i>Package Mass</i> < 5 000	1.2
5 000 ≤ <i>Package Mass</i> <10 000	0.9
10 000 ≤ <i>Package Mass</i> <15 000	0.6
15 000 ≤ <i>Package Mass</i>	0.3

마. 적층시험

- 운반용기가 적층이 가능한 형상인 경우, 시편은 24시간 동안 실제 운반용기 중량의 5배에 상당하는 하중 또는 운반용기의 수직 투영면적에 13 kPa을 곱한 값에 상당하는 하중과 같거나 보다 큰 압축하중을 받아야 한다.

바. 관통시험

- 시편은 시험이 수행되는 동안 심각하게 움직이지 않는 단단하고 편평하며 수평한 표면 위에 고정시켜야 한다.
- 반구 끝을 가진 직경 3.2 cm, 중량 6 kg의 봉이 충분히 떨어져서 관통한다면, 격납계통을 타격 하므로 시편의 가장 약한 부분의 중심 위로 세로 축 수직 방향으로 낙하한다. 봉은 시험 수행에 의해 심각하게 손상되지 않아야 한다.

- 봉의 가장 낮은 곳으로부터 시편의 상부 표면 위의 충격 예정 지점까지의 측정된 봉의 낙하 높이는 1 m 이다.

4. 액체 및 기체 운반을 위한 A형 운반용기의 추가시험

시편 또는 별도의 시편들은 하나의 시편이 보다 엄격한 시험을 필요로 하는 어떠한 경우에 있어 다른 것 보다 문제의 시편에 대해 보다 엄격하다는 것을 입증하지 못하는 한 다음의 시험을 조건으로 할 것이다.

가. 자유낙하시험

- 시편을 격납에 대해서 최대의 손상을 받도록 목표물 위로 낙하한다. 시편의 가장 낮은 위치로부터 목표물의 상부 표면까지의 측정된 낙하 높이는 9 m 이다. 목표물은 낙하시험에서 정의한 것과 같다.

나. 관통시험

- 시편은 “3항의 바”에서 지정한 낙하높이를 1 m에서 1.7 m로 증가한 것을 제외하고 “3항의 바”에서 지정한 시험조건으로 수행한다.

제 2 절 충격 완충재

방사성 동위원소를 운반하기 위한 운반용기는 0.3 m~1.2 m 높이의 자유낙하 조건에서 안전성을 입증하여야 하며, 액체형 방사성 동위원소를 운반하기 위한 운반용기는 9 m 높이의 자유낙하조건에서 안전성이 입증되어야 한다. 운반용기의 건전성을 입증하기 위한 해석을 수행하기 위해서는 충격 완충재로 사용되는 재질에 대해 물성 치를 확보하는 것이 중요하다. 이러한 일련의 과정은 적절한 충격 완충재를 선정하여 성능 면에서 충격흡수에 대한 관점과 취급 면에서 크기 및 무게에 대한 관점을 만족시킬 수 있다. 따라서 충격 완충재로 사용되는 재질에 대해 압축 시험을 수행하여 물성 치를 확보하여 해석을 위한 기본 자료로 활용하기 위하여 충격 완충재 시험평가를 수행하였다.

1. 충격 완충재

충격 완충재로 사용되는 재질로는 Polyurethane(이하 PU)이 가장 일반적이며, 이외에 고려할 수 있는 재질로는 스티로폼 또는 스티로폴로 알려져 있는 Expanded Poly Styrene(이하 EPS), Cork 등이 있다. 압축시험에 사용한 충격 완충재는 취급과 가공성이 좋은 PU와 EPS를 사용하였고 각 시편에 대한 특성은 표 2 및 3과 같다. 시편의 구분은 크게 PU와 EPS로 나눌 수 있으며 본 연구에서는 다음과 같이 구분하여 표기하였다.

PU는 재질이 단단한 PU H와 난연성 소재인 Filler를 첨가하여 발포한 PU F 그리고 가장 일반적인 PU N의 세 가지 종류가 있다. EPS는 그 제작과정이 원료를 발포하여 둥근 공 형상의 모양을 만들어 숙성한 뒤 다시 이를 압축하여 만든다. 따라서 원료의 부피에 대한 최종 부피에 따라 EPS 16, EPS 21 등으로 표기하였고, 16, 21 등 뒤의 표시 숫자가 낮을수록 밀도가 높다. 또한 각 시편 구분표기 뒤의 번호 -1, -2, -3은 같은 종류의 시편 개수에 대한 표기이다.

시편의 크기는 대략 $30 \times 30 \times 30$ mm 의 정육면체로 가공 했으나 PU H의 경우 일반적인 시편 가공의 어려움으로 선반가공으로 원통 형상을 하고 있다. 아래 그림 1은 PU와 EPS의 대표적 시편이다. 총 7개의 종류에 20개의 시편에 대해 압축시험을 수행하였다.

표 2. Polyurethane 시편

시편 구분	시편 크기(W1×W2×H) [mm]	Mass(g)	밀도(kg/m ³)
PU H-1	35.25(Dia)×35.08(H)	16.4463	480.3972
PU H-2	35.18(Dia)×35.02(H)	17.8861	525.4337
PU H-3	35.25(Dia)×35.08(H)	13.7288	466.0811
PU N-1	31.01×30.91×30.49	1.7694	60.5435
PU N-2	30.81×30.98×30.72	1.7256	58.8499
PU N-3	30.48×29.45×30.67	1.6695	60.6418
PU F-1	30.75×30.53×30.47	2.0169	70.5083
PU F-2	30.74×31.17×30.70	2.0660	70.2346
PU F-3	30.48×30.01×30.49	1.9595	70.2598

표 3. Expanded Poly Styrene 시편

시편 구분	시편 크기(W1×W2×H) [mm]	Mass(g)	밀도(kg/m ³)
EPS 16-1	30.66×29.99×30.44	1.8244	65.1819
EPS 16-2	30.35×32.09×28.02	1.7658	64.7061
EPS 16-3	30.31×31.60×29.23	1.7077	60.9972
EPS 21-1	30.36×30.01×28.55	1.1994	46.1095
EPS 21-2	30.60×30.33×31.22	1.1749	40.5484
EPS 30-1	30.39×30.51×29.87	0.8116	29.3045
EPS 30-2	30.55×29.93×30.38	0.8187	29.4726
EPS 30-3	30.50×30.33×30.64	0.8068	28.4646
EPS 60-1	30.21×30.75×30.45	0.6952	24.5769
EPS 60-2	30.66×30.21×30.58	0.7108	25.0950
EPS 60-3	30.47×30.19×30.62	0.6945	24.6565

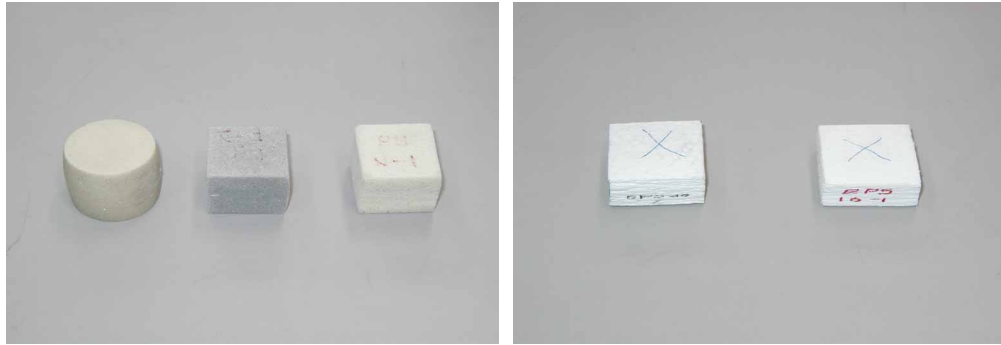


그림 1. 압축시험용 시편 (PU H, PU F, PU N, EPS 60, EPS 16).

2. 실험 방법

압축시험 수행에 있어 방법상 기준이 되는 Reference는 ASTM D 1621-00 Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics와 ASTM D 695-02a Standard Test Method for Compressive Properties Rigid Plastics를 참조하였다. 위의 두 ASTM에서 명시한 시편 형상은 정육면체와 원통형 모양으로서 크기는 한 변이 12.7 mm ~ 152.4 mm이다. 본 시험에서는 가공성과 압축시험기의 성능을 고려하여 한 변을 30 mm 기준으로 하여 가공하였고 PU H의 경우 원통형 모양으로 지름을 30 mm로 가공하였다. 시편의 측정치는 $\pm 1\%$ 의 오차를 기준으로 하여 측정하였고 중량은 소수점 넷째 자리까지 측정하였다. 아래 그림 2는 시편의 중량을 측정하는 사진이다.



그림 2. Micro Balance.

또한 ASTM에 명시된 압축시험기의 CrossHead 하강 속도는 1.3 mm/min ~ 2.5 mm/min로 본 시험에서는 2.5 mm/min로 시험하였다. 아래의 그림 3은 압축시험기를 보여주고 있다.



그림 3. 압축시험기

다음은 압축실험을 수행하는 절차를 요약하여 정리하였다.

- i) 각 시편 종류별로 시편을 3 개씩 준비한다.
- ii) 각각 시편의 크기 및 무게를 측정한다(그림 2).
- iii) 압축 시험기에 시편을 올려놓고 명시된 속도로 압축 실험을 수행한다.
- iv) 압축시험기에서 얻은 Force와 Displacement로 시편의 Stress-Strain Curve를 도식한다.

3. 실험결과

다음 그림 4 ~ 그림 10은 시편 종류에 대해 Stress-Strain Curve 그래프를 표시한 것이다. 압축시험기에서 얻는 data는 일반적으로 Force와 Displacement이므로 다음의 식들을 사용하여 Stress와 Strain을 구할 수 있다.

$$S = \frac{F}{A_0} \quad S : \text{Stress}, F : \text{Force}, A_0 : \text{Initial Area}$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad e : \text{Strain}, \Delta l : \text{Displacement}, l : \text{Initial Length (Height)}$$

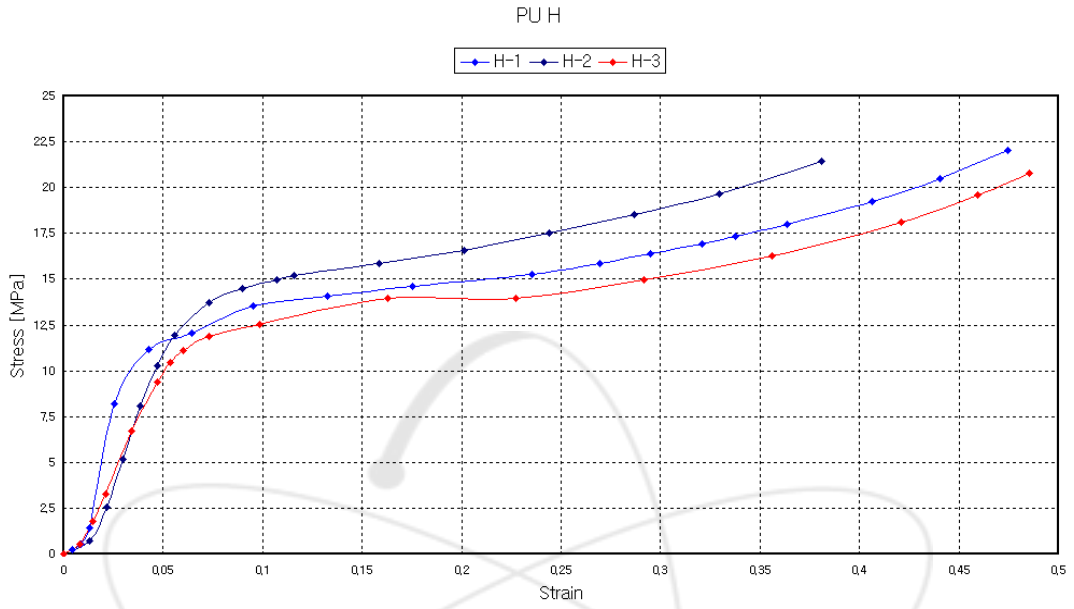


그림 4. PU H Stress-Strain Curve.

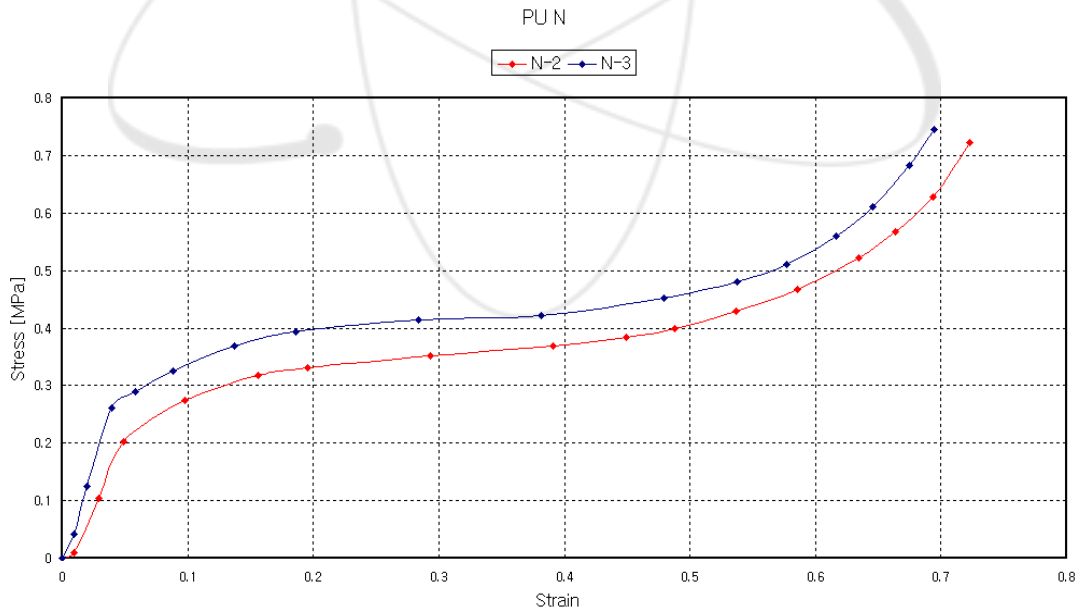


그림 5. PU N Stress-Strain Curve.

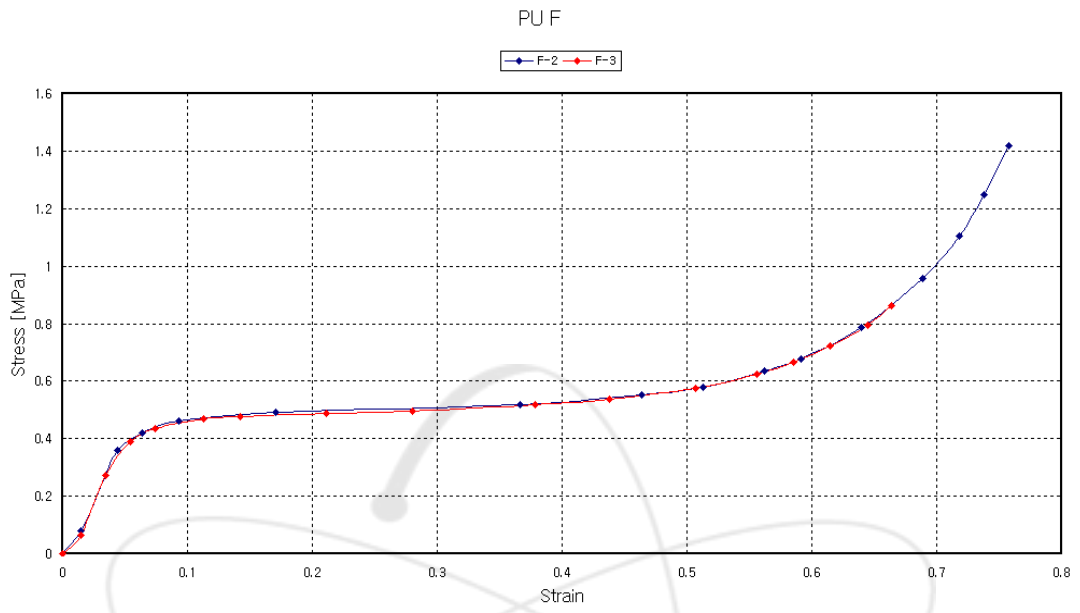


그림 6. PU F Stress-Strain Curve.

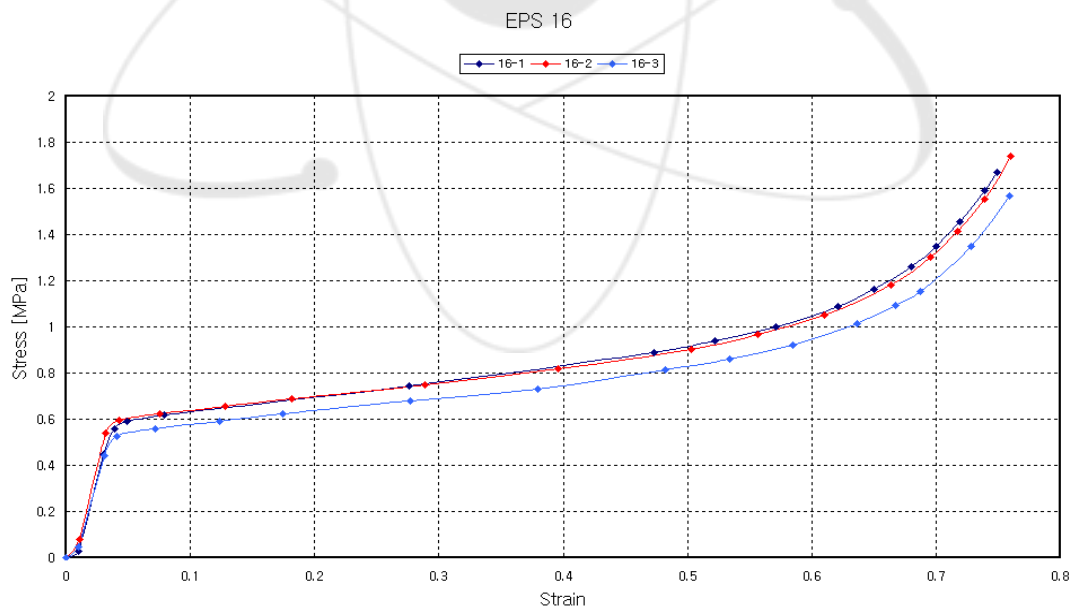


그림 7. EPS 16 Stress-Strain Curve.

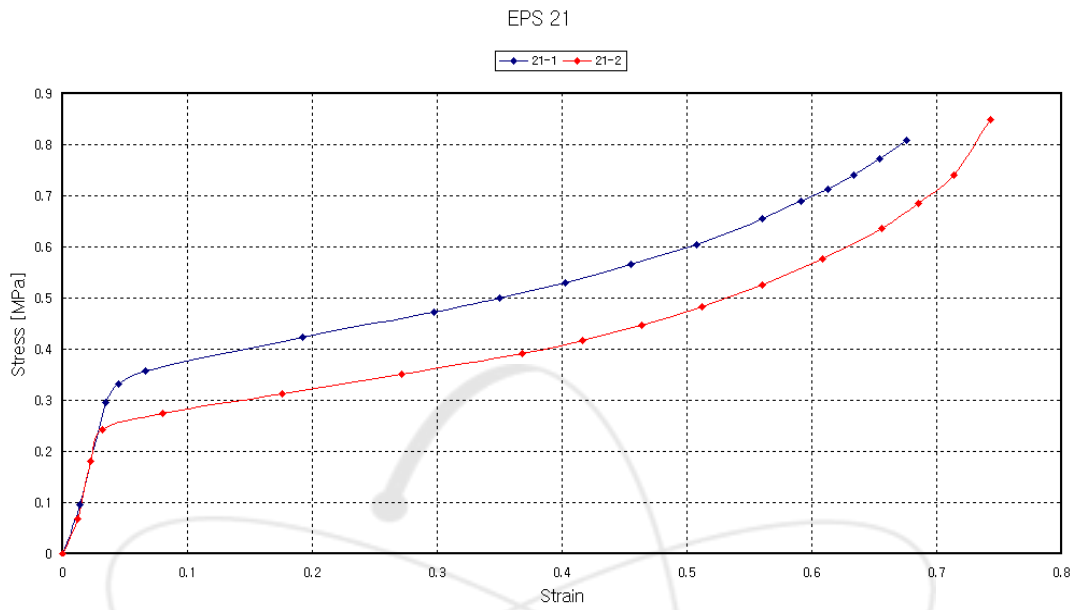


그림 8. EPS 21 Stress-Strain Curve.

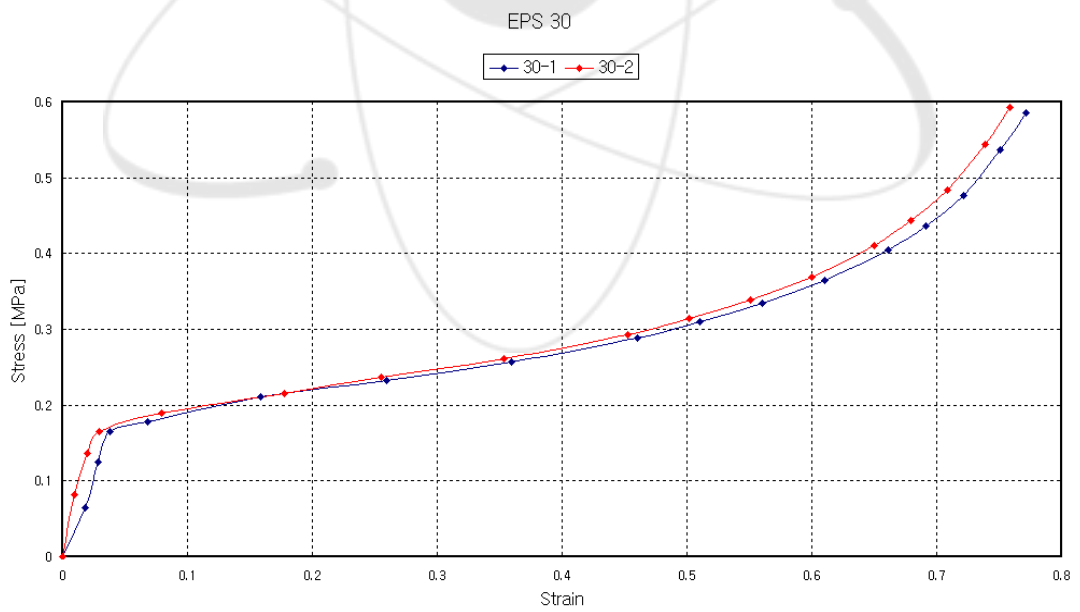


그림 9. EPS 30 Stress-Strain Curve.

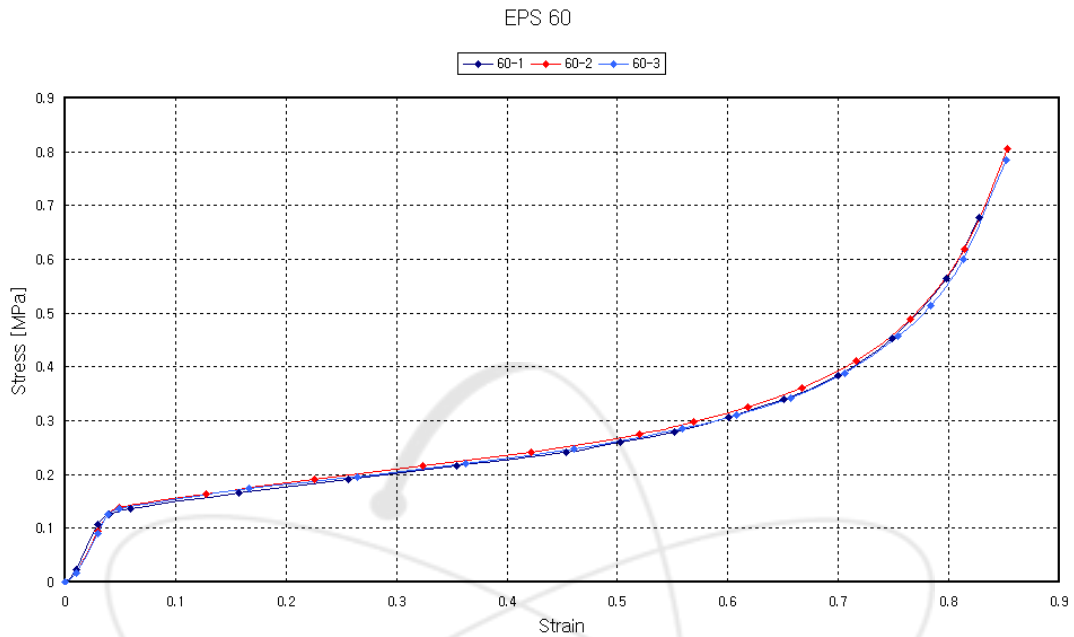


그림 10. EPS 60 Stress-Strain Curve.

Stress-Strain Curve를 보면 같은 종류의 시편에 대해 같은 형상의 그래프를 보이는 시편 종류가 있고, 반대로 그래프 형상에 많은 차이를 보이는 시편 종류가 있다. 이를 시편의 밀도와 비교해 보면 PU H, PU N, EPS 21 등은 같은 종류의 시편임에도 밀도차이가 큰 것을 알 수 있고, 그 외에 PU F, EPS 16, EPS 30, EPS 60 등은 같은 종류의 시편 중에는 밀도 차이가 적은 것을 알 수 있다. 또한 밀도가 클수록 Stress-Strain Curve의 Yielding Point가 큰 값을 가지는 것을 알 수 있으며 Yielding 후의 소성 구간에 대한 Stress-Strain Curve는 시편 종류별로 형상이 비슷함을 알 수 있다. 따라서 시편의 밀도에 따른 Yielding 값의 차이가 충격 완충 에너지 값을 결정하는 것을 알 수 있다.

표 4는 시편 종류별 중요 기계적 물성치를 산출하여 나타낸 것이다.

표 4. 시편 종류별 기계적 물성치.

종류	ρ [kg/m ³]	E [Mpa]	σ_y [MPa]	ϵ_y	σ_u [MPa]	ϵ_u
PUH	480.40	527.53	11.14	0.043	22.03	0.475
PUF	70.26	10.71	0.39	0.054	0.57	0.507
PUN	60.64	6.90	0.26	0.039	0.51	0.577
EPS - 16	65.18	21.38	0.56	0.039	1.00	0.572
EPS - 21	46.11	9.53	0.33	0.045	0.65	0.560
EPS - 30	29.47	5.54	0.17	0.030	0.37	0.600
EPS - 60	24.58	4.30	0.13	0.039	0.31	0.601

운반용기의 중량 중 가장 지배적인 차폐체의 중량에 따라 위의 충격 완충재를 적절히 사용하면 충격 완충과 취급에 대해 효과적으로 설계를 할 수 있다.

다음은 그 예로 위의 충격완충재 중 PUH 밀도 480.40 [kg/m³]를 적용한 운반용기에 대한 구조해석을 수행한 결과이다.

완충재 물성치

$$\rho : 480.40 \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad E : 527.53 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_y : 11.40 \text{ [MPa]}, \quad \epsilon_y : 0.043, \quad \sigma_u : 22.03 \text{ [MPa]}, \quad \epsilon_u : 0.415$$

해석 방법

모델 : 3차원 1/2 모델

해석 코드 : ABAQUS/Explicit

해석 요소 : C3D8R - 3차원 Solid 요소

가정 : 9m 낙하 시 바닥면과 충격 속도 13.5 [m/s]

해석 결과

Max. Stress 기준 ($1.6\sigma_y$)

OverPack : 419.2 [MPa] ($\sigma_y : 262$ [MPa])

Pb Cover : 330.9 [MPa] ($\sigma_y : 206.84$ [MPa])

Max. Stress

OverPack : 338.0 [MPa]

Pb Cover : 358.3 [MPa]

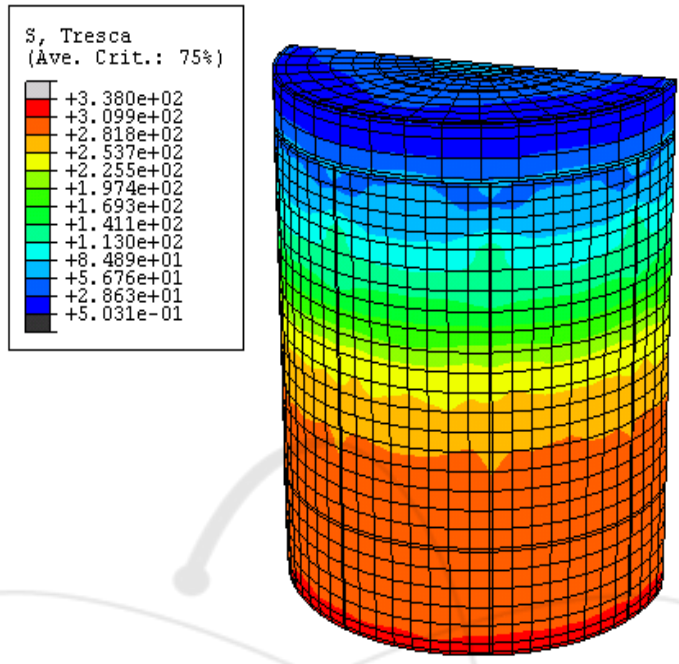


그림 11. OverPack Tresca Stress Contour

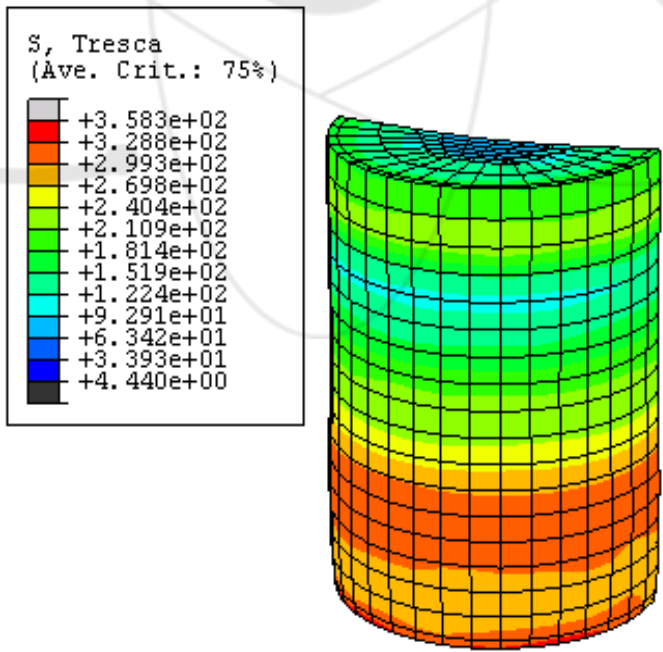


그림 12. Pb Cover Tresca Stress Contour.

위의 해석과 같이 PU H 중 밀도 $\rho : 480.40 [kg/m^3]$ 를 적용한 낙하 해석에서 OverPack에서는 Stress가 기준값보다 보수적으로 나왔으며, Pb Cover의 경우 Stress는 기준값보다 약 8.3 % 정도 크게 나왔다. 충격 완충 효과는 밀도의 영향이 지배적이므로 해석에 사용된 밀도의 충격 완충재보다 약간 높은 밀도의 완충재를 사용하면 용기내의 최대 Stress 값은 기준값 내에 존재 할 것이다.



제 3 절 액체 흡수재

국내·외 관련법규에서는 운반 내용물이 액체인 경우 운반용기는 두 개의 격납경계 또는 흡수물질을 포함한 하나의 격납경계를 가져야 하며, 흡수물질은 내용물의 두 배를 흡수할 수 있는 용량이어야 한다고 명시하고 있다.

방사성 동위원소를 사용하는 사용자들은 가능하다면 간결하게 제작되어 사용하기 편한 운반용기를 바라고 있다. 그렇다면, 두 개의 격납경계로 구성된 운반용기보다는 흡수물질과 하나의 격납경계로 구성된 운반용기가 보다 간결하게 제작될 수 있을 것이며, 사용하기에도 편리할 것이다. 따라서 액체형태의 방사성 동위원소를 운반하기 위한 운반용기에 적용할 흡수재를 평가하였다.

1. 흡수재

액체 흡수재로 사용되는 재질로는 filter paper, facial tissue, cellulose acetate sponge, polyurethane sponge, wood pulp fluff, cotton ball 및 흡수성 폴리머 등이 있다. 이들 중 filter paper 및 facial tissue 등은 물 흡수력이 1.8 g/g 및 4.0 g/g 등으로 낮은 흡수율을 보여주고 있으며, polyurethane sponge 및 흡수성 폴리머 등은 10.5 g/g 및 100 ~ 1,000 g/g 등으로 비교적 높은 흡수율을 보여주고 있다. 따라서 흡수율이 낮은 재질은 제외하고, 비교적 흡수력이 높은 것으로 알려져 있는 친수성 polyurethane sponge 및 흡수성 폴리머, 그리고 magic block으로 잘 알려져 있는 멜라닌 폼을 채택하여 흡수재 실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

방사성 동위원소 I-131과 I-123은 NaOH(수산화나트륨) 약 0.4 %(0.1 mol)인 용액에, Tl-201은 Na 0.9 %인 용액에 용해된 상태로 운반된다. 따라서 흡수재 실험을 수행하기 위한 용액으로는 NaOH 0.4 %인 수산화나트륨수와 Na 0.9 %의 식염수를 적용하였다.

친수성 polyurethane sponge 및 멜라닌 폼은 다음과 같은 방법으로 수산화나트륨수에 대해 3회, 식염수에 대해 3회씩 실험을 수행하였다.

- i) 적정한 비율의 크기로 각각 3 개씩 자른다.
- ii) 각각 시편의 무게를 측정한다(그림 13).
- iii) 용액체(수산화나트륨수 또는 식염수)에 담근다.
- iv) 시편이 충분히 액체를 흡수한 후 무게를 측정한다.



그림 13. 멜라닌 폼 무게.

그러나 흡수성 폴리머는 분말 형태로 되어있기 때문에 다음과 같은 방법으로 친수성 polyurethane sponge 및 멜라닌 폼의 경우와 같이 수산화나트륨수에 대해 3회, 식염수에 대해 3회씩 실험을 수행하였다.

- i) 비이커에 폴리머를 담아 무게를 측정한다.
- ii) 비이커에 용액(수산화나트륨수 또는 식염수)을 부어 무게를 측정한다(그림 14).
- iii) 폴리머가 충분히 액체를 흡수하도록 약 1시간 정도 그대로 놓아둔다.
- iv) 약 1시간 경과 후 체(sieve)에 액체를 흡수한 폴리머를 쏜는다(그림 15).
- v) 체를 통해 밑으로 액체가 충분히 떨어지도록 약 1시간 정도 그대로 놓아둔다.

vi) 체를 통해 밑으로 떨어진 액체의 무게를 측정한다.

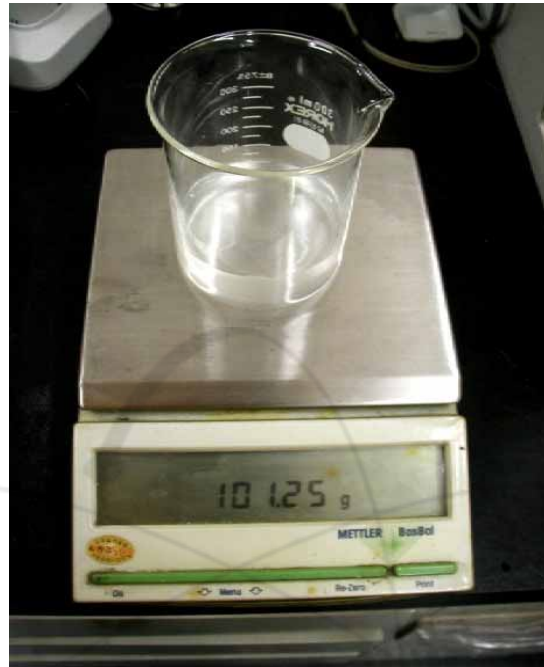


그림 14. NaOH 무게.



그림 15. 체에 쏟은 폴리머.

3. 실험결과

표 5는 NaOH 0.1 mol인 수산화나트륨수의 경우 흡수재별 흡수력을 보여주고 있다. 표 1에서 보면 흡수력은 친수성 polyurethane sponge가 약 20으로 가장 낮게 나타났고, 멜라닌 폼이 약 91로 가장 높았으며, 흡수성 폴리머의 경우는 약 73으로 나타났다.

표 6은 Na 0.9 %인 식염수의 경우 흡수재별 흡수력을 보여주고 있다. 여기에서도 NaOH 0.1 mol인 수산화나트륨수의 경우와 마찬가지로 친수성 polyurethane sponge가 약 18로 가장 낮은 흡수력을 보여주고 있으며, 멜라닌 폼이 약 88로 가장 높게 나타났고, 흡수성 폴리머의 경우는 약 58로 나타났다.

흡수력과 함께 살펴보아야 할 것은 흡수속도와 흡착력이다. 흡수속도는 멜라닌 폼이 가장 빨랐다. 멜라닌 폼은 액체와 접촉되는 순간 바로 액체를 흡수하며 액체가 담겨있는 비이커 속으로 빨려 들어갔다. 친수성 polyurethane sponge는 멜라닌 폼보다 다소 늦지만 빠른 흡수속도를 보여주었다. 흡수성 폴리머의 경우는 물의 경우는 상당히 빠르지만 수산화나트륨수와 식염수의 경우는 상당히 느려 흡수성 폴리머가 자기 흡수력대로 모두 흡수하기까지는 상당한 시간이 소요되었다.

표 5. NaOH 0.1 mol 수산화나트륨수의 경우 흡수재별 흡수력

흡 수 재		중 량(g)		흡수력 (g/g)	평 균 흡수력 (g/g)
		흡수재	액체 흡수후		
친수성 Polyurethane Sponge (티앤엘)	1	0.6354	13.4755	21.2	19.8
	2	1.2196	23.24	19.1	
	3	1.939	37.1816	19.2	
멜라닌 폼 (바스프)	1	0.0937	8.6928	92.8	91.2
	2	0.1734	15.826	91.3	
	3	0.2724	24.4204	89.6	
흡수성 폴리머(코오롱 유화)	1	0.30	22.49	75.0	72.7
	2	0.60	43.77	73.0	
	3	1.00	70.14	70.1	

표 6. Na 0.9% 식염수의 경우 흡수재별 흡수력

흡 수 재		중 량(g)		흡수력 (g/g)	평 균 흡수력 (g/g)
		흡수재	액체 흡수후		
친수성 Polyurethane Sponge (티앤엘)	1	0.6465	12.9675	20.1	18.3
	2	1.1476	20.404	17.8	
	3	2.005	34.0812	17.0	
멜라닌 폼 (바스프)	1	0.0663	5.9145	89.2	88.4
	2	0.1448	12.664	87.5	
	3	0.3406	30.187	88.6	
흡수성 폴리머(코오롱 유화)	1	0.30	18.99	63.3	58.1
	2	0.60	32.62	54.4	
	3	1.11	62.90	56.7	

흡착력의 경우는 어떠한 외부 압력이 주어지지 않는 경우는 멜라닌 폼이 매우 우수하였으며, 친수성 polyurethane sponge는 물이 떨어져 흡착력에 있어서 다소 떨어지는 모습을 보여주었고, 흡수성 폴리머는 물의 경우는 빠른 속도로 고화되는 것을 볼 수 있었지만 수산화나트륨수와 식염수의 경우는 분말이 겔 타입으로 되어 흡착력을 평가하기 다소 어려웠으며, 외부 압력이 주어질 경우는 흡수성 폴리머가 가장 좋았다.

그림 16은 액체의 종류에 따른 흡수재의 흡수력을 보여주고 있다. 여기에서 보면 NaOH 0.1 mol인 수산화나트륨의 경우보다 Na 0.1 %인 식염수의 경우가 흡수력이 떨어짐을 알 수 있다. 따라서, 액체 방사성 동위원소 운반용기에 적용할 흡수재를 설계하기 위한 기준으로는 흡수력이 떨어지는 Na 0.9 %인 식염수의 경우를 적용하여 흡수재를 설계한다면 I-131, I-123 및 Tl-201도 운반할 수 있으므로 바람직한 방향이 될 것이다.

액체 방사성 동위원소를 운반하기 위한 운반용기에 적용할 유리병(vial)은 12 ml 용으로 병목까지 액체를 가득 채울 경우 액체의 중량은 12.8 g이었다. 따라서, 액체의 두 배인 25.6 g 이상으로 흡수재를 설계하면 국내·외 관련법규에서 규정하고 있는 흡수재의 조건을 만족시킬 수 있다.

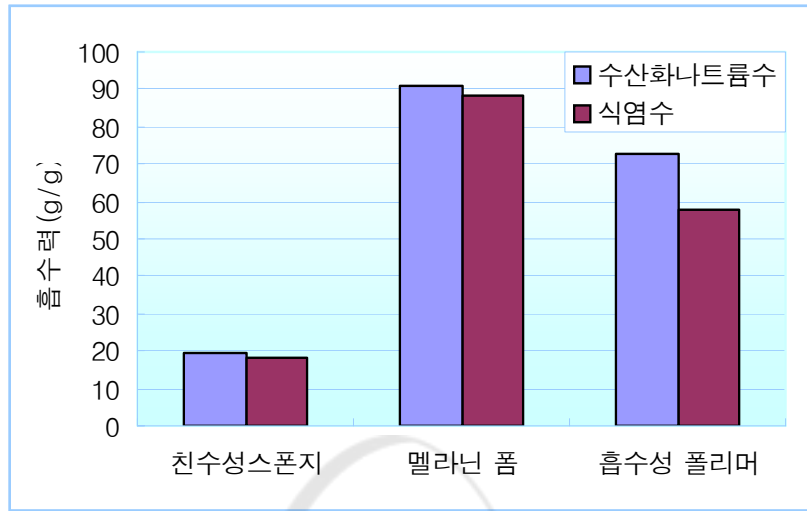


그림 16. 액체의 종류에 따른 흡수재의 흡수력.

표 7 및 그림 17은 Na 0.9 %인 식염수 25.6 g 적용 시 흡수재의 중량 및 체적을 나타내고 있다. 법규에서 만족하는 조건의 흡수재를 적용하였을 때 중량은 멜라닌 폼이 가장 가볍고, 친수성 polyurethane sponge가 가장 무거운 반면, 체적은 흡수성 폴리머가 가장 작고 멜라닌 폼이 가장 컸다. 그것은 멜라닌 폼은 흡수력은 좋지만 밀도가 낮아 가장 작은 중량에도 불구하고 체적이 가장 큰 것이며, 친수성 polyurethane sponge는 밀도는 흡수성 폴리머보다 낮지만 흡수력이 좋지 않아 가장 무거운 중량과 비교적 큰 체적이 요구되는 것이고, 흡수성 폴리머는 밀도는 높지만 비교적 흡수력도 좋기 때문에 중량이 가벼우며 또한 체적이 적은 것이다.

실험결과만 놓고 본다면 흡수성 폴리머가 가장 적합한 소재로 판단된다. 그러나, 흡수성 폴리머는 분말 형태로 액체 방사성 동위원소 운반용기에 적용을 하기 위해서는 적당히 성형되어야 한다. 예를 들어 위생용품으로 사용되는 아기 기저귀와 같이 용도에 맞게 성형을 필요로 하게 된다. 또한, 흡수성 폴리머는 액체 흡수 시 체적 팽창이 발생하지만 체적이 팽창할 때 팽창할 만큼의 공간이 충분히 주워 지지 않는다면 팽창을 하지 못해 자기 흡수력만큼 흡수를 하지 못하기 때문에 충분한 팽창공간을 마련해야만 한다.

표 7. 액체 방사성 동위원소 운반용기 적용을 위한 흡수재의 중량 및 체적

흡수재	구분	밀도 (g/cm ³)	흡수력 (g/g)	식염수 25.6 g 적용 시	
				중량(g)	체적(cm ³)
친수성 Polyurethane Sponge		0.065	18.3	1.40	21.5
멜라닌 폼		0.011	88.4	0.29	26.3
흡수성 폴리머		0.6~0.8	58.1	0.44	0.73

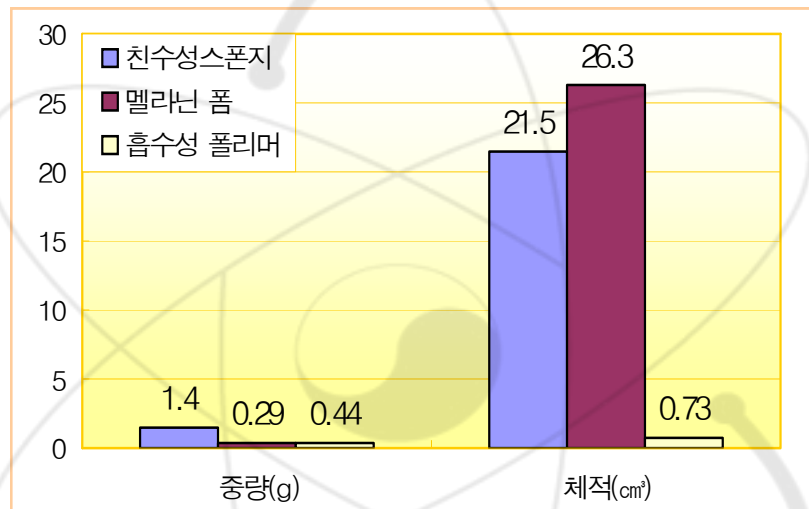


그림 17. 흡수재의 중량 및 체적.

제 3 장 결 론

본 연구에서는 액체 방사성 동위원소를 운반하기 위한 운반용기에 적용하기 위한 충격완충재 및 흡수재의 최적설계를 하기 위하여 실험적 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

충격완충재의 실험을 통하여 완충재의 밀도가 클수록 Stress-Strain Curve의 Yielding Point가 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 충격완충효과는 밀도의 영향이 지배적임을 알 수 있었다. 실험결과 중 밀도가 가장 큰 PU H의 밀도 $\rho : 480.40 [kg/m^3]$ 를 적용한 낙하해석에서 운반용기의 Over-pack에서는 Stress가 기준값보다 보수적으로 나타났으며, Pb Cover의 경우 Stress는 기준값보다 약 8.3 % 정도 크게 나왔다. 따라서 해석에 사용된 밀도의 충격 완충재보다 약간 높은 밀도의 완충재를 사용하면 용기내의 최대 Stress 값은 기준값 내에 존재 할 것이다.

방사성 동위원소 I-131과 I-123의 운반에 사용되는 NaOH 0.4 %인 수산화나트륨수에서의 흡수율은 멜라닌 폼이 약 91로 가장 좋았고, 방사성 동위원소 Tl-201의 운반에 사용되는 Na 0.9 %인 식염수에서의 흡수율 역시 멜라닌 폼이 약 88로 가장 좋았으며, 흡수속도 및 흡착력 또한 멜라닌 폼이 가장 좋았다.

액체 방사성 동위원소를 운반하기 위한 운반용기에 적용되는 유리병에 채워지는 액체의 두 배 이상을 흡수하기 위한 흡수재의 체적은 0.73 cm^3 로 흡수성 폴리머가 가장 작았다.

그러나 성형성 및 팽창 공간 등의 문제가 발생하므로, 비교적 체적은 다소 크지만 흡수력, 흡수속도 및 흡착력이 좋고, 또한 성형성도 좋은 멜라닌 폼을 액체 운반용기의 흡수재로 적용하는 것이 가장 바람직하다.

제 4 장 참고문헌

- [1] 과학기술부, “원자력관련 주요현황 및 통계자료”, 2002.
- [2] Brookhaven National Laboratory, “Transportation”, 2000.
- [3] 과학기술부, “2000년도 제6회 원자력산업실태조사”, 2001.
- [4] 과학기술부 고시 제 2001-23호, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”, 2001.
- [5] IAEA Safety standard Series No. TS-R-1, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”, 2000 Ed.
- [6] U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, “Packaging of Radioactive Material for Transport and Transportation of Radioactive Material under Certain Conditions”, as revised in Federal Register, Vol. 48, No. 165, 1983.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-2735/200 4					
제목 / 부제	의료용 운반용기 내부 충격완충 및 액체 흡수재 평가				
주 저 자	방 경 식(S/F 특성계량화기술개발)				
연구자 및 부서명	이 주 찬(S/F 특성계량화기술개발) 강 경 훈(S/F 특성계량화기술개발) 서 기 석(S/F 특성계량화기술개발)				
출 판 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발 행 년	2004. 1
페 이 지	p.	도 표	있음(), 없음(○)	크 기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비(), 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약 번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>방사성 동위원소를 생산지에서 소비지까지 안전하게 운반하기 위해서는 운반용기를 필요로 하게 되며, 운반용기는 법규에서 규정하고 있는 조건들에 만족하여야 한다. 방사성 동위원소는 액체형태 또는 캡슐(capsule)형태로 제작되어 사용되고 있으며 운반 내용물이 액체인 A형 운반용기는 9 m 높이에서 낙하하는 경우에 건전성이 유지되어야 한다. 또한, 두 개의 격납경계 또는 흡수물질을 포함한 하나의 격납경계를 가져야 하며, 흡수물질은 내용물의 두 배를 흡수할 수 있는 용량이어야 한다고 명시하고 있다. 따라서 액체형태의 방사성 동위원소를 운반하기 위한 운반용기에 적용하기 위한 충격완충재 및 흡수재를 평가하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	방사성 동위원소, A형 운반용기, 건전성, 낙하, 격납 충격완충, 흡수재				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2735/2004					
Title / Subtitle		A Present Status and Requirements for Type A Package			
Main Author		K. S. Bang (Dept. of S/F Examination Tech.)			
Researcher and Department		J. C. Lee (Dept. of S/F Examination Tech.) K. H. Kang (Dept. of S/F Examination Tech.) K. S. Seo (Dept. of S/F Examination Tech.)			
Publication Place		Publisher		Publication Date	2002. 11
Page	p.	Ill. & Tab.	Yes(), No (○)	Size	26 Cm.
Note					
Classified	Open(○), Restricted(), Class Document		Report Type	Art Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)		<p>A shipping package needs to safely transport from producing center to consuming center. The shipping package has to be met for conditions as prescribed by law. Radioactive isotope is used as liquid form or capsule form. A Type A package, which is to transport liquid radioactive materials, has to maintain the structural integrity for the condition of 9 m free drop. The Type A Package shall be provide with a containment system composed of primary inner and secondary outer containment components or shall be provided with sufficient absorbent material to absorb twice the volume of the liquid contents. Accordingly, a shock absorber material and an absorbent material to apply to the shipping package, which is to transport liquid radioactive isotope, was estimated.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		Radioisotope, Type A Package, Integrity, Drop Containment, Shock Absorber, Absorbent			