

## 폴리우레탄 폼의 기계적 성능에 미치는 방사선의 영향에 대한 연구

손영무<sup>1</sup> · 김태욱<sup>2</sup> · 이제명<sup>†</sup>

(Received August 30, 2018 ; Revised November 14, 2018 ; Accepted November 15, 2018)

### Effect of irradiation on the mechanical performance of polyurethane foam

Young-Moo Son<sup>1</sup> · Tae-Wook Kim<sup>2</sup> · Jae-Myung Lee<sup>†</sup>

**요약:** 조선해양산업분야에서 액화천연가스(LNG)의 수요가 상승함에 따라 LNG 운반선의 수요 역시 계속해서 증가하고 있다. LNG 화물창에서의 단열 시스템은 LNG 운반선에서 가장 중요시되는 부분 중 하나로 화물창 내부의 유체에 의한 정수압과 슬로싱(Sloshing)에 의한 하중을 지속적으로 받기 때문에 기계적 강도를 충분히 만족시켜야 하므로 이를 위해 전 세계적으로 LNG 화물창의 단열 시스템에 적용되는 단열소재의 기계적 성능 향상을 통해 파손을 방지하고자 하는 연구와 개발이 지속적으로 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 액화가스 운반 시 단열재로 사용되는 폴리우레탄 폼의 기계적 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로, 방사선을 폴리머에 투과하면 분자구조가 변화하여 성능이 개선되는 연구를 바탕으로 폴리우레탄 폼에 사이클로트론을 이용하여 양성자를 가속화 시켜 폴리우레탄 폼의 분자 구조에 변화를 주었다. 투과된 양성자는 폴리우레탄 내부의 분자구조에 Crosslinking과 scissioning 같은 화학반응을 일으켜 결합에 영향을 주고 그 결과 폴리우레탄 폼의 기계적 성능에도 영향을 주게 된다. 이에 따라 폴리우레탄 폼에 투과한 양성자의 방사량에 변화를 주어 방사량에 의존한 폴리우레탄 폼의 인장시험과 전단시험을 통하여 기계적 강도를 분석 하였다.

**주제어:** 양성자, 사이클로트론, 폴리우레탄폼, 전단거동, 인장거동

**Abstract:** The recent increase in the consumption of liquefied natural gas (LNG) has led to greater demand for LNG carriers that are employed by naval and marine industries. The insulation system is one of the most important components of an LNG carrier's cargo containment system. The insulation system is often subjected to various loading conditions such as the hydrostatic pressure of fluids inside the cargo hold and sloshing loads. Hence, developmental research is consistently being conducted at a global level for enhancing the mechanical performance of insulation materials and for preventing damage of LNG cargo containment systems. In this study, polyurethane foam was permeated with accelerated protons by cyclotron for improving its mechanical performance. Permeating protons can cause chemical reactions such as crosslinking and scissioning in polyurethane foam. It is observed that alterations in the molecular structure of polyurethane foam improve its mechanical performance. Furthermore, based on amount of permeating protons, the mechanical strength of polyurethane foam was analyzed through tensile and shear tests.

**Keywords:** Proton, Cyclotron, Polyurethane foam, Shear behavior, Tensile behavior

### 1. 서 론

최근 국제적으로 선박에 대한 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>와 CO<sub>2</sub>와 같은 배출가스 규제를 지속적으로 강화하고 있으며, 이에 따라 친환경 에너지 수요가 증가하고 있다. 이로 인하여 중·단기적 대체 방안으로 천연가스 수요가 증가하고 있으며 이는 천연가스 운반선에 대한 수요 역시 급증을 유발하고 있다. 또한 천연가스를 원료로 한 천연가스 추진선에 대한 연구와 개발 역시 지속적으로 진행되고 있다. 이 때 천연가스의 효율적인 운반과 저장에 위해서 한정된 화물창 내부에 최대한

많은 양의 천연가스를 저장하도록 액화공정을 통하여 부피를 1/600로 줄인 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 형태로 운반을 하고 있는데 이 때 천연가스의 액화 온도는 -163°C이다. 이에 따라 저장 탱크에 대한 단열성능이 필수적으로 보장되어 기화로 인한 천연가스의 손실량을 최소화하여야 한다. 현재 액화천연가스 운반선의 저장 탱크의 경우 단열재로 비교적 적은 생산비용과 우수한 단열성능을 가지고 제작이 용이한 폴리우레탄폼(Polyurethane foam, PUF)을 널리 사용되고 있다. 하지만 순수 폴리우레탄 폼의 경우

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8096-4306>): Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea, E-mail: jaemlee@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2342

1 M.S. candidate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: youngmoo45@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2340

2 Ph.D. candidate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: kty2345@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2340

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기계적 성능이 충분히 만족되지 않아 화물창 내부에서 유체에 의한 정수압과 유체의 유동에 의한 충격으로 발생하는 슬로싱 하중의 작용으로 인하여 폴리우레탄 폼이 파손되는 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 환경을 고려하여 폴리머 폼의 기계적 성능 개선에 관한 많은 연구들이 수행되고 있는데, 주로 합성과정에서 유리섬유, 케블라, 그래파이트와 같은 첨가물을 추가를 통한 합성으로 기계적 성능을 개선하는 연구는 다양하게 진행되고 있다.[1]-[3] 합성 이외의 방법으로 폴리머 재료에 방사선 투과를 하면 분자구조가 바뀐다는 연구를 결과가 있으며[4]-[6], 특히 감마선을 투과를 하고 압축 성능 평가를 시행하였을 때 성능이 개선된 것에 대해서는 이미 증명된 바 있다.[7] 본 연구는 방사선 중에서 양성자를 이용하여 재료의 분자구조에 변화 일으키는 연구를 바탕으로 진행하였다.[8]-[10] 양성자 투과에 대한 폴리우레탄 폼의 기계적 성능 영향에 대한 분석이 목적으로, 인장시험과 전단시험을 통하여 분석을 하였다. 현재 폴리우레탄 폼의 압축 성능에 대해서는 많은 연구가 진행되었지만 인장시험에 대해서는 연구가 부족한 상태이며 특히 전단 성능에 대한 연구는 찾아보기가 힘들기 때문에 본 연구에서 인장시험과 전단시험을 통해 양성자 투과에 대한 폴리우레탄 폼의 기계적 성능 영향에 대한 분석 동시에 인장과 전단 거동에 대해서 연구를 진행 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 폴리우레탄 폼 합성

본 연구의 대상 재료는 LNG 탱크에서 주로 사용되고 있는 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam, PUF)이며, 제작을 위해 폴리올(Polyol, Korea Polytech corporation), 이소시아네이트(polymeric MDI M20R, Korea Polytech corporation), 발포제(HFC-245fa, Korea Polytech corporation)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 폴리우레탄 폼은 폴리올, 이소시아네이트, 발포제를 1000:1160:50의 비율로 충분히 혼합시킨 후 용액의 균질성을 위하여 Homogenizer를 이용하여 4800rpm에서 약 60초 동안 섞은 후 혼합용액을 제작하였다. 마지막으로, 상온에서 약 24시간 동안 혼합용액을 충분히 발포를 시키고 Bulk형태의 폴리우레탄 폼을 완성하였다. Figure 1은 폴리우레탄 폼의 제작과정을 나타내었고 Bulk형태의 폴리우레탄 폼에서 인장시편과 전단시편을 제작하였다. 본 연구의 시편은 사이클로트론을 이용하여 양성자를 폴리우레탄 폼에 투과하기 위하여 최대 길이 50 mm 이내로 제작이 되어야 한다. 소형 폴리우레탄 폼의 기계적 성능평가에 대한 규정된 시험법이 없기 때문에 MAF(Modified Archan Fixture)방법[11][12]을 통하여 실험을 수행하였으며 시편은 Figure 2와 같다.

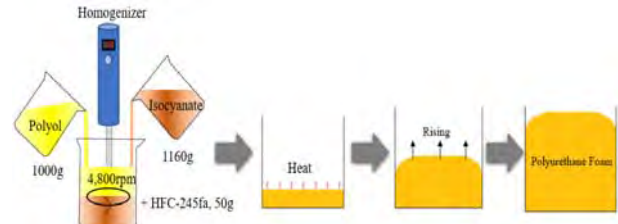


Figure 1: Fabrication process of polyurethane foam

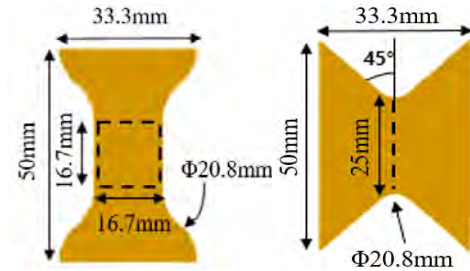


Figure 2: Specimen geometries for tension and shear test

### 2.2 양성자 투과

본 연구에서 폴리우레탄 폼의 기계적 성능향상을 위한 방안으로 방사선 양성자를 투과하는 방법을 택하였다. 양성자 투과 장비 MC-50 사이클로트론을 이용하여 양성자를 폴리우레탄 폼에 투과하였다. Figure 3은 사이클로트론 장비를 사용하여 양성자를 투과하는 과정으로, 양성자를 Dees라고 부르는 전류관 D1과 D2 사이 Gap이라고 불리는 공간에 배치하고 D1과 D2에 전압을 걸어 전류를 흘려보낸 후 N극에서 S극으로 자기장을 형성시킨다. D1과 D2에 전류를 흘려보내면 각각 음극과 양극의 성질을 갖게 되는데 주기적으로 각각의 Dees의 극성을 바꿔준다. 이 때 Gap에 위치한 양성자는 양극으로부터 척력을 받고 음극으로 인력을 받는 성질로 Figure 3에서 D1방향으로 이동을 한다. Dees의 주기적으로 변하는 극성으로 인하여 D1이 양극이 되고 D2가 음극이 되면 양성자는 D2 방향으로 움직이게 되며 이와 같은 현상을 반복을 하면 Figure 4와 같이 나선운동을 한다. 사이클로트론의 주파수를  $v_c$ 라고 하였을 때, 양성자가 나선운동을 유지하고 가속하기 위해서 Dees의 극성이 바뀌는 주기는  $T/2$ 로 유지 하였다.

$$T = \frac{1}{v_c} = \frac{2\pi m}{qB} \tag{1}$$

$q$ 는 전하,  $m$ 은 전하의 질량,  $B$ 는 자기장을 의미한다. 주기  $T$ 를 갖는 사이클로트론에서 입자의 속도  $v$ 는 식 (2)와 같다.

$$v = \frac{qBR}{m} \tag{2}$$

이 때  $R$ 은 입자가 운동하는 궤도에 대한 반지름이고, 양성자 입자가 가속되어 폴리우레탄 폼에 충돌을 할 때 전달하는 에너지는 입자의 운동에너지로 식 (3)과 같다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m} \quad (3)$$

나선운동을 하는 과정에서 자기력과 전기력에 의해 양성자는 가속을 하며 높은 에너지를 갖게 되고 표적물질인 폴리우레탄 폼에 충돌을 하여 분자구조에 영향을 준다.

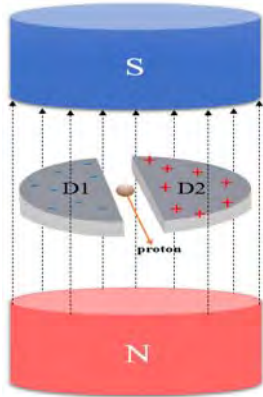


Figure 3: Radiation of proton to polyurethane foam by cyclotron

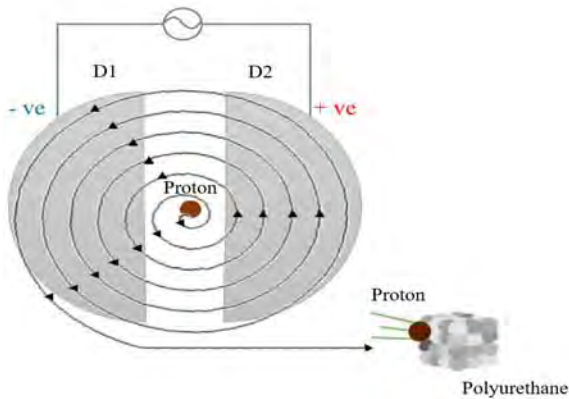


Figure 4: Principle of cyclotron

높은 에너지를 갖는 양성자의 충돌로 인하여 폴리우레탄 폼의 분자가 결합과 분해가 동시에 일어나며, 이러한 분자구조의 변화는 기계적 성능 변화를 유발하게 된다. 양성자 투과 시 Cross-Linking, Scissioning과 같은 분자구조의 변화가 주로 발생을 하게 된다[13]-[15]. Cross-Linking의 경우 2개 이상의 폴리머 분자구조가 높은 에너지를 받아 하나의 분자형태로 결합하는 현상이고, Scissioning 현상은 단일 폴리머 분자구조가 높은 에너지로 인하여 절단되어 2개 이상의 분자구조로 분해되는 현상이다. 폴리우레탄 폼에 양성자 투과량에 따라 Cross-Linking과 Scissioning 현상의 반복으로 전체적인 분자구조에 변화를 주게 되고, 기계적 성능 변화를 유발한다.

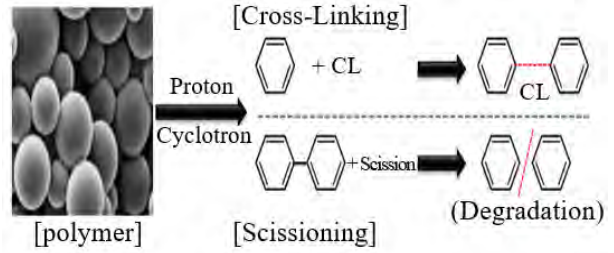


Figure 5: Change molecular structure by proton

본 연구에서는 폴리우레탄 폼에 양성자 투과한 양에 따라 총 4가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. 초기에 35MeV의 에너지를 투사하였고, 알루미늄 윈도우 2 mm 통과 후 공기층 1m를 통과하여 폴리우레탄 폼에 투과하였으며 이 때 최종적으로 폴리우레탄 폼에 전달되는 에너지는 약 25.3MeV이다. 투과 시간을 조절하여 총 흡수선량 0Gy, 30Gy, 60Gy, 90Gy에 대한 폴리우레탄 폼을 제작하였고, 인장시험과 전단시험을 통해 양성자의 투과량이 폴리우레탄 폼의 기계적 성능에 어떤 영향을 주는지에 대해 분석을 하였다.

### 2.3 실험 장비 및 시나리오

본 연구에서는 폴리우레탄 폼의 인장성능과 전단성능을 평가하기 위하여 인장시험, 압축시험, 전단시험, 2축 인장-전단시험, 2축 압축-전단시험을 동시에 수행할 수 있는 Modified Archan Fixture(MAF)형태의 시험 방법을 통하여 수행하였다. Figure 6 와 같은 형태의 지그를 사용하였으며, 각 위치마다 10°의 각도변화를 줄 수 있도록 제작을 하여 다양한 하중에 대해서 실험을 할 수 있다. 본 연구에서는 시편과 인장축에 대해서 일치하는 0°일 때 단순 인장시험에 대해서 구현을 하였고, 시편과 인장축이 90°일 때의 단순 전단시험에 대해서 구현을 하여 실험을 진행 하였다.

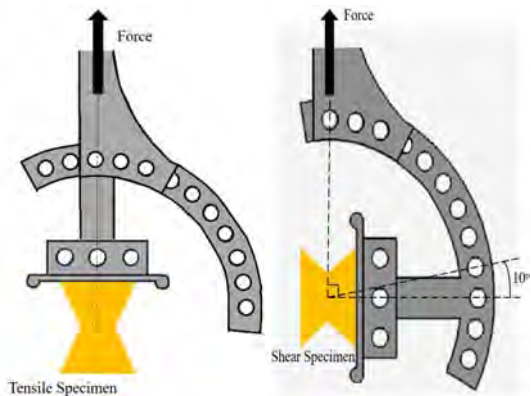


Figure 6: Evaluation of material performance for angle

지그와 폴리우레탄폼을 부착하기 위해서 복합재와 스테인리스의 부착이 가능한 2액형 아랄다이트 에폭시 접착제 (Araldite Epoxy Adhesive, Huntsman)를 사용하였다. 본 접착제의 경우 2액형 접착제로 주제와 경화제로 구성이 되어

있으며, 충분히 혼합 후 부착을 하였고, 상온에서 최소 경화시간이 12시간이기 때문에 충분히 경화가 된 24시간 이후에 실험을 진행 하였다.

본 연구에서 폴리우레탄 폼의 기계적 성능에 방사선 양성자의 투과량이 어떤 영향을 미치는지에 대해서 인장시험과 전단시험을 진행하였다. 방사선 투과량은 일반적인 MC50 사이클로트론 최대 투과량인 90Gy를 기준으로 0Gy, 30Gy, 60Gy, 90Gy에 대해 구간을 나누어 고려를 하였다. 실험 온도는 25°C에 대해서 실험을 진행하였다. 변형률 속도에 대해서는 준정적인 속도 1.0E-03/s에 대해서 진행을 하였고, 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 각각의 실험 시나리오에 대해서 5회 반복 실험을 진행하였다.

**Table 1:** Test scenario for tensile test

No	Test Type	Amount of proton (Gy)	Temperature (°C)	Strain Rate (s <sup>-1</sup> )
1	Tensile	0	25	1.0E-03
2		30		
3		60		
4		90		

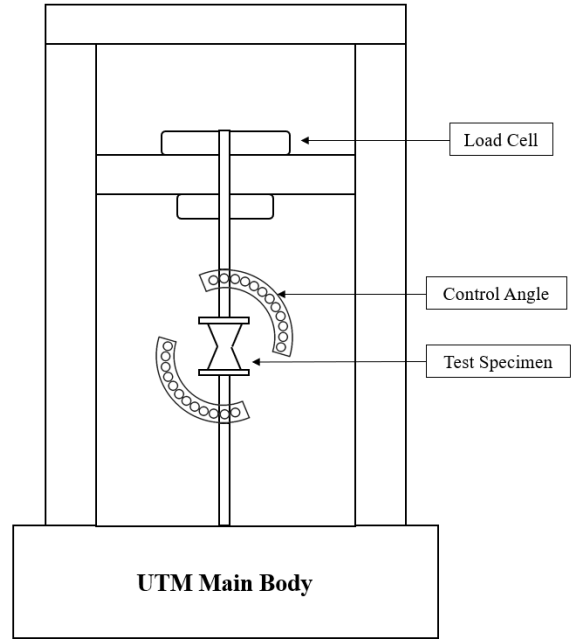
**Table 2:** Test scenario for shear test

No	Test Type	Amount of proton (Gy)	Temperature (°C)	Strain Rate (s <sup>-1</sup> )
1	Shear	0	25	1.0E-03
2		30		
3		60		
4		90		

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 실험장비

본 연구에서는 폴리우레탄 폼 제작 시 용액의 경화시간이 짧기 때문에 균일하게 용액을 혼합하기 위해서 IKA사 호모게나이저(T50-digital ULTRA-TURRAX)를 사용하였다. 제작된 폴리우레탄 폼을 시편형태로 제작을 하고 양성자를 투과하기 위하여 MC50 사이클로트론 장비를 사용하였다. 폴리우레탄 폼의 기계적 성능 평가를 하기 위해서 복합재용 만능재료시험기(KSU-5M)를 사용하였고 정확한 시편의 표점에 대한 변형을 분석하기 위해서 초고속카메라(Y5M, Integrated Design Tools)를 사용하여 실험 중 시편의 표점의 변위에 대해서 측정하였다.



**Figure 7:** Universal testing machine (UTM)

#### 3.2 양성자 투과량에 대한 밀도변화

폴리우레탄 폼에 양성자 투과량에 따라 인장시험과 전단 시험을 바탕으로 기계적 성능을 평가 하였다. 인장시험편과 전단시험편에 대한 밀도 측정에 대한 결과 값은 Table 3, Table 4와 같다. 방사선을 투과하였을 때 폴리우레탄 폼의 밀도는 증가한다. 인장시험편에서 0Gy에 대비해 30Gy는 3%, 60Gy에서 4%, 90Gy에서 8% 상승하였고 방사량이 증가할수록 밀도역시 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 전단시험편 역시 인장시험편과 마찬가지로, 0Gy 대비 30Gy에서 1%, 60Gy에서 2%, 90Gy에서 6% 증가하였다. 양성자를 투과하였을 때, 감마선을 투과하였을 때와 마찬가지로 밀도가 상승한 연구결과를 얻었다.[7] 이는 질량을 갖는 양성자가 폴리우레탄 폼 내부에 투과되고 질량보존법칙에 의해 전체 폴리우레탄 폼의 질량을 증가시키므로 양성자 투과량이 많을수록 질량이 증가한다.

**Table 3:** Density of tensile specimen

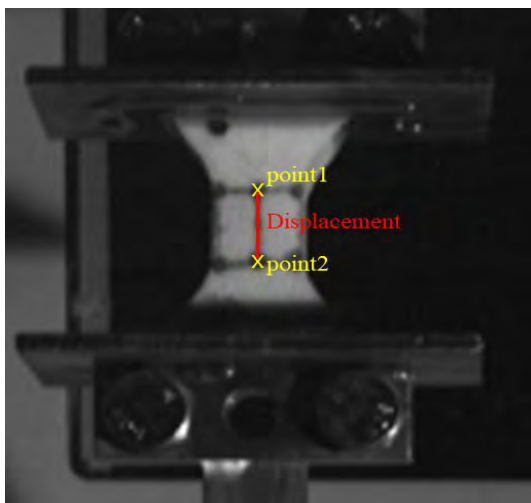
No	Specimen Type	Amount of proton (Gy)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
1	Tensile	0	138.96
2		30	142.56
3		60	144.01
4		90	149.4

**Table 4:** Density of shear specimen

No	Specimen Type	Amount of proton (Gy)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
1	Shear	0	136.75
2		30	137.78
3		60	139.15
4		90	144.95

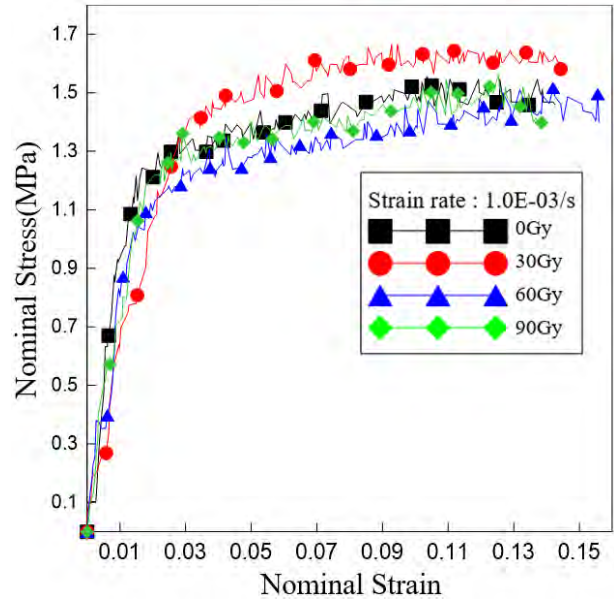
3.3 양성자 투과량에 대한 기계적 성능

폴리우레탄 폼의 인장시험 결과로 시간에 대한 UTM에서의 힘과 Figure 8과 같이 초고속 카메라에서 시편의 표점 거리를 측정하여 시간에 따른 힘-변위 데이터를 확보하였다.



**Figure 8:** Measure the displacement by using by high speed camera

폴리우레탄 폼에 양성자 투과량에 대한 인장시험의 결과를 Figure 9과 같이 응력-변형률 관계로 나타내었다. 신뢰성을 확보하기 위하여 동일한 시험을 총 5회 반복시험을 통하여 평균에 가장 근접한 실험결과 값을 대푯값으로 나타내었다. 본 실험은 상온(25°C)에서 실험을 진행 하였고, 변형률 속도는 준정적인 속도로 1.0E-03/s의 속도로 진행하였다. Table 5에서 인장시험 결과 각 방사량에 따른 기계적 물성치 탄성계수, 항복응력, 인장강도, 연신율에 대한 값을 나타내었다. 인장성능에서 방사선을 투과하였을 때 폴리우레탄 폼의 탄성계수는 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 0Gy 대비 30Gy에서 가장 크게 22% 감소하였다. 60Gy를 제외한 30Gy, 90Gy에서 기존 순수 폴리우레탄 폼보다 높은 항복강도, 인장강도를 가진다. 특히 30Gy에서는 항복강도 20%, 인장강도 8%가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 모든 양성자 투과 폴리우레탄 폼의 연신율은 순수 폴리우레탄 폼의 연신율 13.38%에 대비 증가하는 경향을 보였다.



**Figure 9:** Stress-Strain curve of tensile test

**Table 5:** Tensile test result

Amount of proton (Gy)	Elastic Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
0	72.55	1.23	1.55	13.38
30	56.65	1.47	1.67	13.89
60	59.97	1.13	1.52	15.38
90	63.21	1.25	1.61	14.03

방사선 투과한 폴리우레탄 폼의 전단거동은 Figure 10과 같이 응력-변형률 관계로 나타내었다. 전단시험 역시 신뢰성 확보를 위하여 5회 반복시험을 하였고, 실험온도는 상온(25°C), 변형률속도는 준정적 속도 1.0E-03/s로 실험을 진행하였다. Table 6에서 전단시험 결과를 통해 기계적 물성치를 나타내었다. 0Gy를 기준으로 탄성계수의 경우 30Gy와 90Gy에서 각각 9%, 6% 증가하였으나 60Gy에서는 8% 감소하는 결과를 얻었다. 항복강도의 경우 30Gy, 60Gy, 90Gy 순으로 크게 증가하였고, 최대 11%까지 상승한 결과를 얻었다. 최대 전단강도는 90Gy에서 가장 높은 3% 상승을 보였고 60Gy에서 감소하였다. 전단시험에서 파단이 될 때까지의 연신율은 양성자를 투과하였을 때 모두 순수 폴리우레탄 폼과 비교하였을 때보다 상승하는 결과를 얻었고 특히 60Gy에서 0Gy 대비 24% 증가로 가장 높은 값을 얻었다. 이는 높은 에너지를 갖는 양성자의 충돌로 폴리우레탄 폼의 내부 분자구조가 결합하고 분해되는 Cross-Linking과 Scissioning현상으로 인하여 분자구조의 형태와 배열이 모두 변하기 때문에 기계적 물성치 역시 변화한 결과를 얻었다.

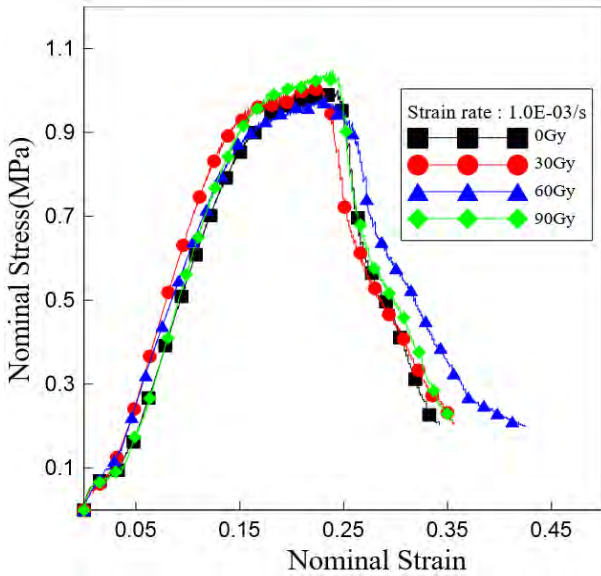


Figure 10: Stress-Strain curve of shear test

Table 6: Shear test result

Amount of proton (Gy)	Elastic Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Elongation (%)
0	7.35	0.83	1.01	34.20
30	8.01	0.92	1.02	35.64
60	6.75	0.90	0.99	42.45
90	7.79	0.87	1.04	35.52

각 실험에서 최대전단응력 이후 훨씬 낮은 응력으로 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이는 Figure 11과 같이 시편이 국부적으로 파손이 진행되기 때문에 시편이 작은 힘에도 저항력을 잃고 쉽게 변화한다.

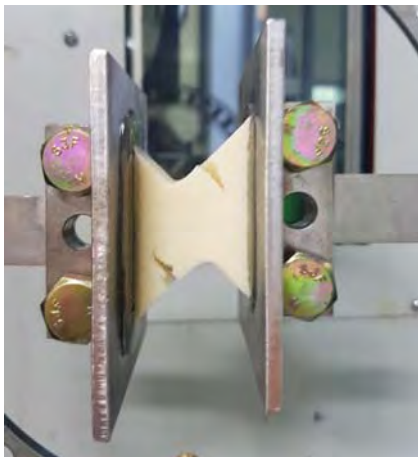


Figure 11: Fracture behavior during shear test

#### 4. 결 론

본 연구에서는 폴리우레탄 폼에 양성자를 투과를 하였고, 각각의 투과량에 대해 상온에서 기계적 성능을 평가하

였으며, LNG CCS 단열시스템의 단열소재로써의 기계적 성능 향상에 대해 성능을 검토하였다. 본 연구의 결과를 다음과 같이 간략하게 정리하였다.

- 양성자 투과량이 증가할수록 폴리우레탄 폼의 밀도가 높아지는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 질량은 갖는 양성자가 폴리우레탄 폼 내부에 투과하여 보존되어 질량이 증가하는 결과를 초래하였다고 판단된다.
- 양성자 투과량에 따라 인장거동과 전단거동의 변화가 나타나며, 이러한 차이는 높은 에너지를 갖는 양성자가 폴리우레탄 폼에 충돌하면서 Cross-Linking과 Scissioning 같은 현상을 일으켜 분자구조를 변화시키기 때문이다.
- 인장시험과 전단시험에서 항복강도와 인장강도가 30Gy 투과 시 증가하다가 60Gy에서 오히려 감소를 하며 90Gy에서 다시 상승하는 것을 확인할 수 있는데 이는 양성자 투과 시 끊임없는 분자구조의 결합과 분해의 반복으로 투과량이 많을 수록 기계적 성능이 향상되는 것은 아니라는 것을 알 수 있다.
- 두 시험에서 모두 과단까지의 변형률은 양성자를 투과하였을 때 증가하는 모습을 보이며 특히 60Gy에서 눈에 띄게 큰 증가폭을 보였는데 양성자 투과로 인한 분자결합 변화에서 연신율과 관련된 분자결합에 크게 영향을 주는 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 폴리우레탄 폼에 양성자를 투과하였을 때 기계적 거동이 어떻게 변하는지에 대해서 분석을 하였다. 일반적으로 재료에 90Gy까지 양성자를 투과하는 것을 바탕으로 구간을 나누어 0Gy, 30Gy, 60Gy, 90Gy에 대해 기계적 성능을 분석하였다. 양성자가 투과하여 분자결합을 끊기도 하고 결합시키기도 하기 때문에 투과량에 따라 기계적 성능이 향상되기도 하며 감소되기도 한다. 그렇기 때문에 양성자 투과에 따른 수많은 분자 분해와 결합의 반복에서, 밀도 증가를 감안하여 가장 이상적인 수치를 찾기 기계적 성능을 최대화 시키는 것이 중요하기 때문에 추후 연구를 통해 양성자 투과량에 따른 폴리우레탄 폼의 분자구조에 대한 분석을 진행하여 최적의 투과량에 대한 연구를 진행 할 계획이다.

#### 후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018R1A2B6007403). 이 논문은 2013년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0030013).

#### References

[1] Y. Wang, J. Li, and D. Zhao, "Mechanical properties of fiber glass and kevlar woven fabric reinforced

- composites,” *Composites Engineering*, vol. 5, no. 9, pp. 1159-1175, 1995.
- [2] F. Stazi, F. Tittarelli, F. Saltarelli, G. Chiappini, A. Morini, G. Cerri, and S. Lenci, “Carbon nanofibers in polyurethane foams: Experimental evaluation of thermo-hygrometric and mechanical performance,” *Polymer Testing*, vol. 67, pp. 234-245, 2018.
- [3] J. M. Kim, J. H. Kim, J. H. Ahn, J. D. Kim, S. K. Park, K. H. Park, and J. M. Lee, “Synthesis of nanoparticle-enhanced polyurethane foams and evaluation of mechanical characteristics,” *Composites Part B : Engineering*, vol. 136, pp. 28-38, 2018.
- [4] W. Voit, T. Ware, and K. Gall, “Radiation crosslinked shape-memory polymers,” *Polymer*, vol. 51, no. 15, pp. 3551-3559, 2010.
- [5] J. O. Jeong, Y. M. Lim, and J. S. Park, “Improving thermal stability and mechanical performance of polypropylene/polyurethane blend prepared by radiation-based techniques,” *European Polymer Journal*, vol. 94, pp. 366-375, 2017.
- [6] E. Adem, E. Angulo-cervera, A. González-Jiménez, J. L. Valentín, and A. Marcos-Fernández, “Effect of dose and temperature on the physical properties of an aliphatic thermoplastic polyurethane irradiated with and electron beam,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 112, pp. 61-70, 2015.
- [7] T. W. Kim, S. K. Kim, S. K. Park, K. H. Park, and J. M. Lee, “Effect of irradiation on the cryogenic mechanical characteristics of polyurethane foam,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 317, no. 1, pp. 145-159, 2018.
- [8] S. Shah, N. L. Singh, A. Qureshi, D. Singh, K. P. Singh, V. Shrinet, and A. Tripathi, “Dielectric and structural modification of proton beam irradiated polymer composite,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 266, no. 8, pp. 1768-1774, 2008.
- [9] I. M. Ghauri, N. Afzal, and Y. Idrees, “A study of microstructure and tensile properties of proton beam irradiated Al-Mg-Si Alloy,” *International Journal of Modern Physics B*, vol. 25, no. 12, pp. 1645-1652, 2011.
- [10] T. Sasuga, S. Kawanishi, T. Seguchi, and I. Kohno, “Proton irradiation effects on several organic polymers,” *Polymer*, vol. 30, no. 11, pp. 2054-2059, 1989.
- [11] S. T. Taher, O. T. Thomsen, J. M. Dulieu-Barton, and S. Zhang, “Determination of mechanical properties of PVC foam using a modified Arcan fixture,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, no. 10, pp. 1698-1708, 2012.
- [12] A. R. Hamilton, O. T. Thomsen, L. A. O. Madaleno, L. R. Jensen, J. C. M. Rauhe, and R. Pyrz, “Evaluation of the anisotropic mechanical properties of reinforced polyurethane foams,” *Composites Science and Technology*, vol. 87, pp. 210-217, 2013.
- [13] A. O. Delgado, M. A. Rizzutto, M. H. Tabacniks, N. Added, and D. Fink, “Infrared analysis of ion beam irradiated polymers,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 267, no. 8-9, pp. 1546-1548, 2009.
- [14] E. H. Lee, “Ion-beam modification of polymeric materials - fundamental principles and applications,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 151, no. 1-4, pp. 29-41, 1999.
- [15] S. F. Ahmed, K. R. Lee, J. I. Yoon, M. W. Moon, “Nanoporous structures of polyimide induced by Ar ion beam irradiation,” *Applied Surface Science*, vol. 258, no. 8, pp. 3841-3845, 2012.