

# 기계공학실험 보고서

재료의 인장 및 압축

기계공학실험 5 조 2019-15838 주기영



서울대학교  
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

# 기계공학실험: 구조재료 실험 A

## 재료의 인장 및 압축 실험

2019-15838 주기영 5 조

**초록** : 본 실험은 준비된 재료로 이루어진 시편의 인장 실험을 통해 재료의 물리적 특성과 다양한 물성치를 이해하며 기계적 거동을 관찰하고, 압축 실험을 통하여 재료와 구조체의 포아송 비의 개념을 이해하기 위해 진행하였다. 인장실험의 경우에 brass와 aluminum 시편을 인장시키며 재료의 파단이 일어날 때까지 공칭응력 - 공칭변형률 선도를 그려보고, 이를 통해 재료의 탄성계수를 직접 계산해보았다. 진변형률 - 진변형률과 공칭응력 - 공칭변형률 사이의 관계를 유도하고, 시편의 파단면을 Mohr's circle 으로 분석하였다. 압축 실험에서는 양의 포아송 비를 가지는 구조체와 음의 포아송 비를 가지는 구조체에 각각 압축력을 가하여서 각각의 포아송 비를 구하고, 음의 포아송 비를 가지는 구조체에 대해서 좀 더 알아보았다.

### 1. 서론

#### 1.1 인장 및 압축 실험의 필요성(효용)

새로운 재료를 발견하거나 연구할 때 그것을 공학적으로 이용하기 위해서는 재료의 물성치와 다양한 재료의 물리적 특성을 구하는 것은 매우 중요하다. 물질이 연성(ductile) 재료인지, 취성(brittle) 재료인지, 물질의 탄성 계수와 항복강도의 값, 포아송 비는 무엇인지는 실제로 다른 공학자들이 자신의 상황에 맞는 재료를 고를 때 중요한 지표가 된다. 본 실험은 실제로 어떤 재료의 대해 재료가 파단이 일어날 때까지의 응력-변형률 선도를 그리거나 또한 어떠한 물질이나 구조체에 대해 포아송 비를 구할 때 이용될 수 있는 실험으로, 재료의 물성치를 알아내기 위해 수행하는 실험의 일종이다. 이 실험을 통해 우리는 직접 재료의 물성치를 계산해볼 수 있으므로 필요성이 높다.

#### 1.2 실험의 배경, 실험의 목적

본 실험은 과거부터 재료의 응력-변형률 선도를 이용하여 재료의 다양한 물리적 특성과 물성치를 구하기 위해서 수행되어 오던 실험이다. 재료의 인장 실험은 재료의 응력이 가해질 때 재료의 기계적 거동을 살피기 위해 수행되었고, 재료의 압축 실험은 물질이나 구조체의 포아송 비를 계산하기 위해 수행되어 왔다.

우리는 이러한 실험을 똑같이 수행하여 인장 실험에서는 응력-변형률 선도를 직접 그려보고, 이로부터 재료의 탄성 영역, 소성 영역을 나누어 탄성계수, 인장강도 등의 재료의 기계적 특성을 살

펴볼 것이다. 압축 실험의 경우에는 재료가 아닌 구조체를 이용하여 포아송 비를 계산하여 양의 포아송 비를 갖는 구조체와 음의 포아송 비를 갖는 구조체로 구분하고, 포아송 비가 음수가 될 수 있는 이유에 대해 생각해보기 위해 실험을 수행하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험의 이론 및 배경

##### 2.1.1 응력-변형률 선도(stress-strain curve)

재료에 인장력을 가하면 재료가 변형된다. 이 때 인장력을 재료의 단면적으로 나눈 것을 응력(stress)로 정의하고, 재료의 변형된 길이를 재료의 처음 길이로 나눈 것을 변형률(strain)으로 정의하고, 두 개의 물리량 사이의 관계를 그래프로 나타낸 것을 stress-strain curve 로 칭한다.

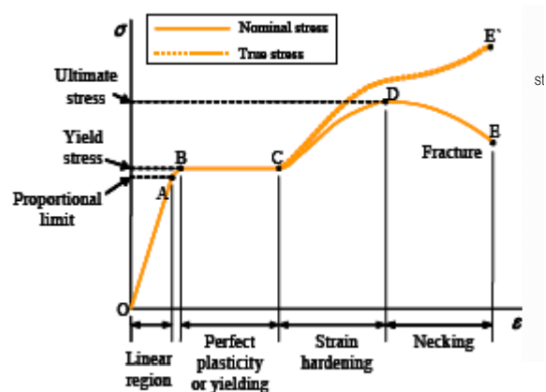


Fig. 1 stress-strain curve

### 2.1.2 공칭응력, 공칭변형률, 진응력, 진변형률

① 공칭응력(Engineering stress): 초기 단면적에 대한 현재 작용하는 하중의 비를 의미하는 물리량

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

② 공칭변형률(Engineering strain): 초기 길이에 대하여 신장된 길이의 비를 의미하는 물리량

$$\epsilon_{eng} = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

③ 진응력(True stress): 변형되면서 변화된 단면적에 대한 현재 하중의 비를 의미하는 물리량

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A_f} \quad (3)$$

④ 진변형률(True strain): 변화된 길이에 대하여 신장된 길이의 비를 의미하는 물리량

$$\epsilon_{true} = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} \quad (4)$$

즉, 공칭응력과 공칭변형률은 변형이 일어나지 않은 상태에서 단면적과 하중을 이용하는 반면에 진응력과 진변형률은 변형이 진행될 때 포아송 비를 통해 감소하는 단면적의 크기와 늘어난 길이를 직접 이용하여 응력과 변형률을 계산하는 것이다.

Fig1 에서 A,B,C,F 를 따라가는 그래프는 진응력-진변형률 선도이고, A,B,C,D 를 따라가는 그래프는 공칭응력-공칭변형률 선도이다.

### 2.1.3 탄성 영역, 소성 영역

특정 재료의 기계적 거동에서 재료의 물리적 특성을 유의미한 값을 물성치라고 한다. 단축하중을 받는 재료에 대해서 대표적으로 정의된 물성치들은 다음과 같다. 우리는 이러한 물성치를 공칭응력-공칭 변형률 선도에서 살펴볼 것이다.

#### ① 비례한도(Proportional limit)

재료에 변형이 없는 상태에서 재료에 하중이 처음 가해지기 시작하면 응력 - 변형률 선도는 선형 관계를 갖는다. 하지만 응력이 특정 값 이상으로 커지면 더 이상 선형 관계를 더 이상 유지하지 못한다. 선형 관계를 유지하게 되는 최대 응력을 비례한도라고 칭한다. Fig1 에서 A 점에 해당하는 응력이다.

#### ② 탄성계수(Elastic modulus)

재료가 처음 변형하기 전부터 비례한도 이전까지는 응력-변형률 선도를 원점을 지나는 직선 형태로 표현할 수 있고, 이 영역을 linear region 이라고 한다. 이 때 이 직선의 기울기를 탄성계수(E)라고 하고, linear region 에서 재료의 응력과 변형률 사이에는 식(5)가 성립한다.

$$\sigma = E\epsilon \quad (5)$$

#### ③ 탄성한도(Elastic limit)

재료에 하중을 가해 변형이 일어날 때 가해진 하중을 제거하면 재료는 하중을 받기 전의 상태로 돌아가려고 하는 성질인 탄성을 갖는다. 하중이 제거될 때 재료의 응력-변형률 선도에서의 위치에 따라서 재료가 완전히 원래 상태를 회복할 수도 있고, 영원히 돌아가지 못할 수도 있다. 이 때 재료가 완전히 원래 상태로 회복할 수 있는 응력-변형률 선도의 한계점이 존재할 것이다. 그 한계점에서의 응력을 탄성한계라고 칭한다. Fig1 에서 B 점이 이러한 한계점이며, 따라서 B 점에서의 응력이 탄성한계라고 할 수 있다. 또한 점 O 에서 점 B 까지의 영역을 탄성 영역(Elastic region), 점 B 에서 재료의 과단까지의 영역을 소성 영역(Plastic region)이라고 한다.

#### ④ 항복(Yield), 항복점(Yield Point), 항복강도(Yield strength)

Fig1 의 소성영역에서 지점 B 부터 지점 C 까지의 영역을 보면 응력은 증가하지 않는데 변형률만 증가하는 구간이 존재한다. 이러한 구간에서 볼 수 있듯이 응력을 증가시키지 않아도 재료가 변하는 현상을 항복(Yield)라고 한다. 항복이 시작되는 점을 항복점이라고 하는데 항복점은 상항복점과 하항복점으로 나뉜다. Fig1 에서 뚜렷하게 나타나지 않지만 상항복점은 항복이 시작되는 지점이고, 항복이 시작한 후 평형을 이루어 응력이 상항복점에서의 응력보다 낮아지게 되는데 평형을 이룬 직후의 상태를 응력-변형률 선도에 나타낸 것이 하항복점이다. 통상적으로 하항복점에서의 응력을 항복강도라고 한다. 재료의 응력 - 변형률 선도를 그렸는데 항복점을 뚜렷하게 알 수 없는 경우가 있는데 이런 경우에는 오프셋 항복점(Offset yield point)를 이용할 수 있다. 오프셋 항복점을 구하는 것은 대표적으로 0.2% offset 을 이용하는데 응력 - 변형률 선도와 식(6)이 나타내는 직선의 교점을 구하고, 그것을 항복점으로 정의하는 방법이다.

$$\sigma = E(\epsilon - 0.002) \quad (6)$$

### ⑤ 인장강도(Ultimate tensile strength)

Fig1 에서 공칭응력-공칭변형률 선도에서 재료의 항복이 끝나고, 공칭변형률이 증가함에 따라 공칭응력도 증가하는 영역을 **strain handling** 이라고 하며, **strain handling** 이 끝나는 지점, 즉 공칭응력-공칭변형률 선도에서 가장 최대 응력을 가지는 점에서의 응력을 인장강도라고 한다. Fig1 에서 점 D 에 해당하는 점이다. 이후 점 E 에서는 그래프가 끊어지는데 이는 재료가 파단(fracture)이 일어나서 더 이상 응력-변형률 선도를 그리지 못하는 것이다. 점 D 부터 점 E 까지는 인장력의 수직 방향의 단면적이 감소하는 **Necking** 현상이 발생한다.

### ⑥ 파단(Fracture)과 연신율

Fig1 의 점 E 에서는 그래프가 끊어지는데 이는 재료가 파단(fracture)이 일어나서 더 이상 응력-변형률 선도를 그리지 못하는 것이다. 점 D 부터 점 E 까지는 인장력의 수직 방향의 단면적이 감소하는 **Necking** 현상이 발생한다. 재료가 파단에 이르는 순간 즉 Fig1 의 점 E 에서의 공칭변형률을 연신이라고 한다.

### 2.1.4 인성(Toughness)과 연성(Ductility)

① 인성 : 인성은 재료가 파단이 발생하기 전 까지 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 나타내는 물리량이다. 이는 응력-변형률 선도에서 그래프 아래 총면적이 바로 인성이다.

② 연성 : 연성은 재료에 인장력을 가할 때 재료가 파단에 이르지 않고, 늘어나는 성질을 말한다. 즉 연성이 높다는 의미는 파단이 발생하기 전 까지 소성영역에서의 변형이 많이 발생하고, 많은 에너지 흡수를 한다는 의미이다. 연성 재료는 연성이 높은 재료, 취성 재료는 연성 재료에 비해 상대적으로 연성이 낮은 재료를 말한다. 즉 연성 재료(Ductile material)가 취성 재료(Brittle material)보다 인성이 크다고 할 수 있다 .

③ 연신율과 단면수축율 : 앞서 설명했듯이 연신율은 파단이 일어났을 때의 변형률이며, 단면수축율이란 인장력을 가하기 전의 단면적에 비해 인 파단이 일어난 후에 단면적이 얼마나 줄어들었는지를 나타내는 물리량이다.

$$\text{Elongation} = \frac{L_p - L_0}{L_0} \quad (7)$$

$$\text{Reduction of area} = \frac{A_0 - A_p}{A_0} \quad (8)$$

### 2.1.5 연성 재료와 취성 재료의 파단 양상

연성 재료와 취성 재료는 파단이 발생했을 때의 서로 단면적의 형태가 다르게 나타난다. 연성 재료의 경우에는 단면적이 서서히 감소하다가 파단이 발생하기 때문에 단면이 컵이나 콘 모양으로 생기게 된다. 반면에 취성 재료의 경우에는 necking 이 뚜렷하게 발생하지 않는다. 또한 소성 변형이 적기 때문에 단면수축율이 0 에 가깝다. 연성 재료와 취성 재료의 파단면의 형상은 Fig3 을 통해 뚜렷하게 확인할 수 있다. 재료의 necking 은 대부분 응력-변형률 선도에서 strain handling 부분에서 발생하게 되는데 취성 재료는 소성 영역이 작기 때문에 necking 이 잘 관찰되지 않는 것이라고 할 수 있다.[6]

### 2.1.6 포아송 비(Poisson's ratio)

재료에 하중을 가했을 때 하중에 수직된 방향으로 변형이 일어나게 되는데, 이는 재료마다 다르게 나타나는 특성이다. 따라서 이러한 성질을 힘을 가한 방향의 변형율과 수직된 방향으로의 변형율의 비로 나타내서 재료의 하나의 물성치로 반영하였고, 이를 포아송 비라고 한다. 구조체 또한 포아송 비를 정의하는데 이때는 재료에 따라 고유한 값을 가지는 것이 아닌 구조체의 모양에 따라 다른 값을 가지게 된다. 일반적인 재료의 경우에는 양의 포아송 비를 갖게 되지만 음의 포아송 비를 가지는 구조체를 만들 수 있고, 본 실험에서는 그러한 구조를 대상으로 실험을 진행한다.

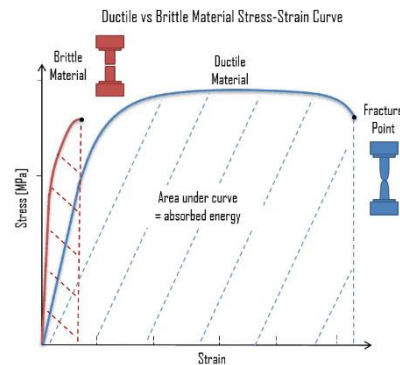


Fig. 2 brittle vs ductile

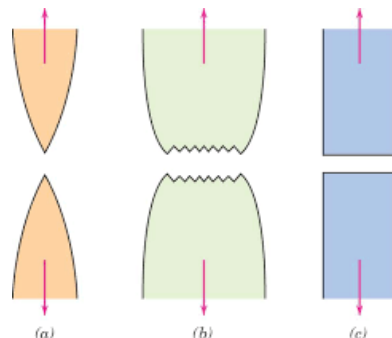


Fig. 3 brittle vs ductile

## 2.2 실험 장비 및 실험 방법

### 2.2.1 실험 장비

인장 실험의 경우에는 MTS\_C43.034 장비로 인장력을 가하며 이 장비는 최대 가용하중이 30kN이다. Manual commander 를 이용하여 장비를 움직이고, 시편의 변위 측정을 위하여 Extensometer 을 사용한다. 또한 장비의 측정 결과를 기록하기 위해서 소프트웨어 MTS-TestWorks 4-Station manager 을 사용한다. 인장 실험 시 사용되는 시편의 종류로는 Brass BC3 과 Aluminum alloy 6061 이 있다. 인장 실험의 분석을 위해 matlab 소프트웨어를 이용한다.

압축 실험의 경우에는 KUM-2A 장비로 압축력을 가하며 이 장비의 최대 가용하중은 5kN 이다. 실험에 사용할 구조체는 양의 포아송 비를 가진 구조체와 음의 포아송 비를 가진 구조체를 각각 3D printer 를 이용하여 만들며 이의 재료는 Amitel ID 2045 의 재료를 이용한다. 압축되는 영상을 촬영할 카메라와 matlab 소프트웨어를 이용하여 압축 실험을 진행한다.

### 2.2.2 실험 방법

인장 실험의 경우에는 다음과 같은 순서로 실험이 진행된다.

① 파단이 발생한 후에 연신율을 계산하기 위해서 기준이 되는 gauge length 를 시편에 표시한다.

② 실험 장비의 Grip 을 이용하여 시편의 상단을 고정된 뒤에 MTS-TestWorks 4-Station manager 의 Load cell 을 보정한다.

③ 하단의 Cross head 를 내려서 Grip 을 이용하여 시편의 하단 또한 고정한다. Grip 을 이용한 시편의 고정이 끝나면 상단의 cross head 를 보정하여 Load 가 0 이 되도록 grip 에 의한 시편의 잔류응력을 제거한다.

④ 시편의 변위 측정을 위해서 Extrometer 를 설치하고, MTS-TestWorks 4-Station manager 에서 Extrometer 의 영점을 보정한다.

⑤ 준비를 모두 마친 후 MTS-TestWorks 4-Station manager 에서 시작 버튼을 눌러서 인장 실험을 시작하고, 시편에서 파단이 발생한다면 실험 데이터를 저장하고, 장비를 원래대로 되돌린다.

⑥ matlab 을 이용하여 두 시편의 인장 실험의 결과를 도출한다.

압축 실험의 경우는 인장 실험에 비해 과정이 간단하며 다음과 같은 순서로 진행된다.

① 2 개의 구조체에 tracking 을 목적으로 점을 표시한다. Fig5 의 오른쪽 구조체에 대해서는 4x3 의 총 12 개의 점을 표시하고, Fig5 의 왼쪽 구조체 2

에 대해서는 3x3 총 9 개의 점을 표시한다. 그리고 구조체를 장비의 가운데에 설치하여 카메라가 구조체를 촬영할 수 있도록 설치한다.

② 구조체에 하중이 가해지지 않도록 crosshead 를 움직이고, crosshead 의 변위와 하중을 모두 영점으로 조절한다.

③ 카메라를 작동시킨 후 장비의 시작 버튼을 눌러 압축을 진행한다. 구조체의 강성이 낮기 때문에 구조체의 원래 높이의 20%까지 압축을 진행시키고, 압축을 종료한다.

④ matlab 을 이용하여 두 구조체의 포아송 비를 계산해본다.

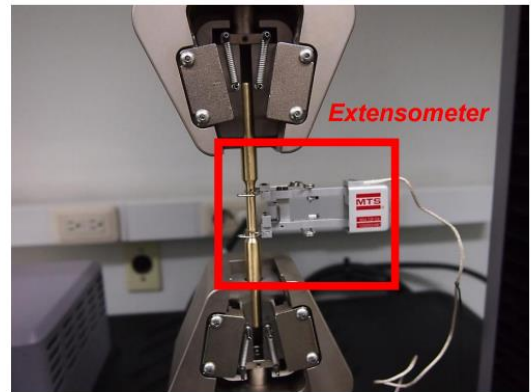


Fig. 3 Extensometer

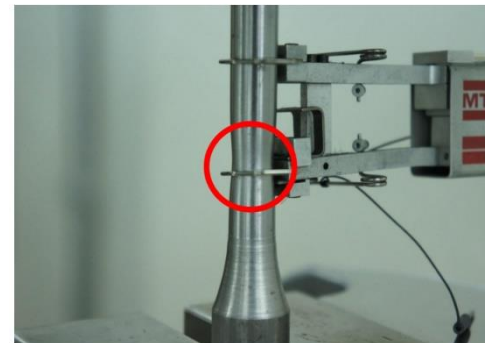


Fig. 4 Necking

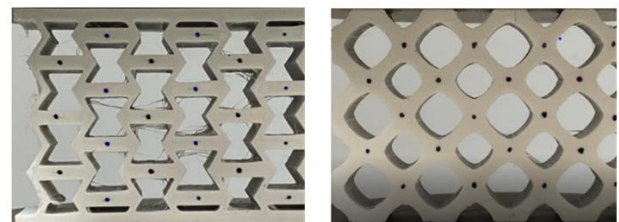


Fig. 5 Negative Poisson's ratio structure(left), Positive Poisson's ratio structure(right)



## 2.3 실험 결과

### 2.3.1 인장 실험의 결과

먼저 Aluminum alloy 6061 시편에 대한 공칭응력 - 공칭변형률 선도는 Fig6 에 나타나 있다. 재료가 여러 오차에 의해서 탄성영역을 정확히 구분 지을 수 없다.

따라서 N 개의 데이터를 이용하여 선형분석을 하고, N에 따른 1차 회귀함수의 기울기를 표로 나타낸 것은 Fig7 과 같다. Fig7을 보면 N이 작을 때는 그래프의 변동이 크다가 N이 50 일 때부터 안정을 찾는다. 또한 N이 200 까지 회귀함수의 기울기가 일정한 값을 가지다 다시 감소하므로, N이 50 부터 150 까지의 데이터가 유의미하다고 판단하여 탄성계수를 51 번째의 데이터부터 150 번째의 데이터를 이용한 1차 회귀함수의 기울기로 설정하였다. 또한 결정계수 51 번째 데이터부터 150 번째의 데이터를 이용한 1차 회귀함수의 결정계수 ( $R^2$ ) 또한 0.9977 로 크게 나오므로 유의미함을 뒷받침할 수 있다.

Aluminum alloy 6061 의 경우에는 상항복점과 하항복점의 구분이 뚜렷하기 때문에 하항복점에서의 응력인 325.17GPa 를 항복강도로 정의할 수 있다. 또한 인장강도는 Fig7 에서 최대값을 갖는 점에서의 인장 응력인 335.05GPa 를 인장강도로 정의할 수 있다. 연신율은 마지막 데이터 점의 변형을 0.149 를 이용하여 계산하였다.

Brass 시편에 대한 공칭응력-공칭변형률 선도는 Fig 10 에 나타나 있다. Brass 도 앞선 Aluminum 과 마찬가지로이지만 탄성계수를 구할 때의 N 값은 50 부터 130 까지로 설정하였다. 이 때의 1차 회귀함수의 결정계수( $R^2$ ) 은 0.9942 이다. 또한 차이점은 Brass 의 경우에는 상항복점과 하항복점의 구분이 뚜렷하지 않으므로 0.2% offset 을 이용하여 항복점과 항복강도를 구하였다. 연신율은 마찬가지로 마지막 데이터 점의 변형을 0.173 을 이용하여 계산하였다. 0.2% offset 은 matlab 에서 Fig 10 에서의 응력 변형률 선도와  $\sigma = 78.33 \times 10^3(\epsilon - 0.002)$ 의 교점을 구함으로써 구하였다.

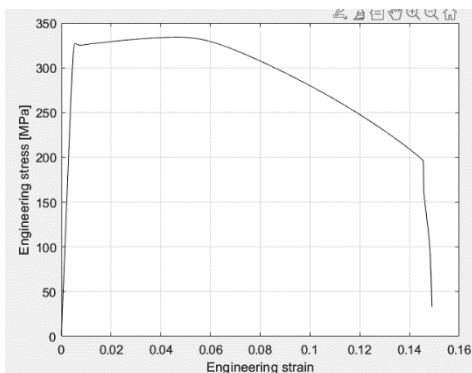


Fig. 7 Engineering Stress-strain curve of Aluminum alloy

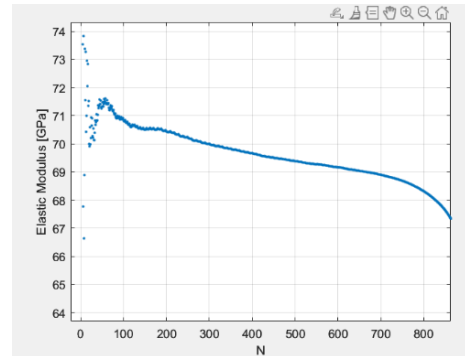


Fig. 8 Elastic Modulus - N curve of Aluminum

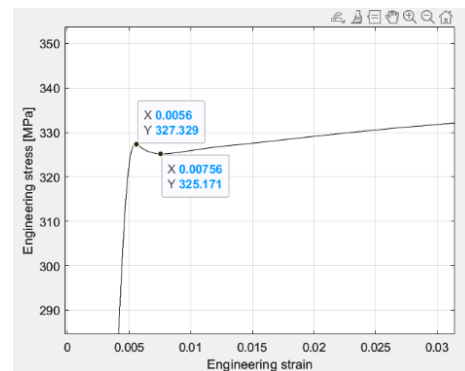


Fig. 9 Yield point of aluminum alloy

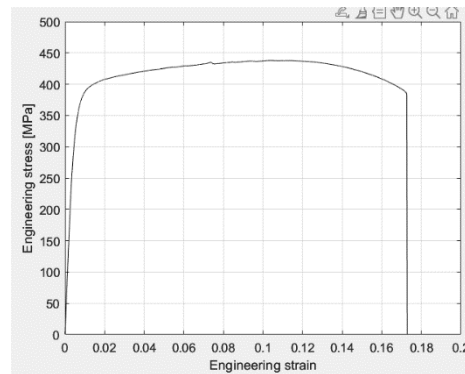


Fig. 10 Engineering Stress-strain curve of Brass

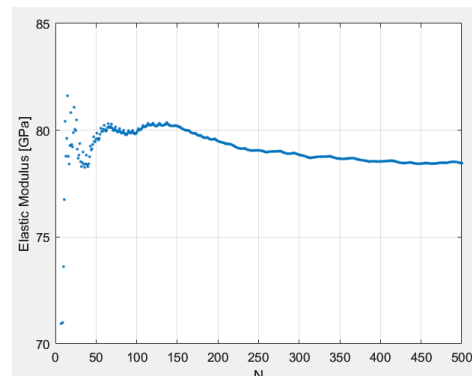


Fig.11 Elastic Modulus - N curve of brass

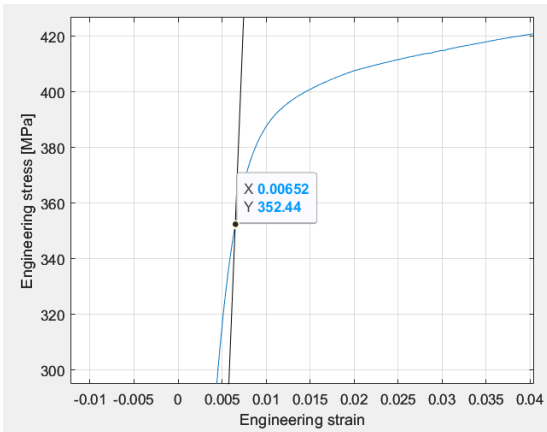


Fig.12 0.2% offset(Brass)

	Aluminum alloy 6061	Brass BC3
Elastic modulus [GPa]	69.66	78.33
Proportional limits [MPa]	297.2	210.7
Yield Strength [MPa]	325.2	352.4
Ultimate tensile Strength [MPa]	334.2	438.3
Elongation	0.149	0.173

Table.1 Tensile test results

### 2.3.2 압축 실험의 결과

재료의 압축 실험의 경우 포아송 비를 측정하기 위하여 구조체를 압축력을 가하는 장비로 압축시키며 그 과정을 카메라로 촬영하였다. 실험을 수행하기 전 구조체의 특정 지점에 검정색 점을 표시해두어서 동영상 분석할 때 각 프레임에서 점의 좌표를 얻어낼 수 있다. 점의 좌표를 이용하여 압축되는 방향과 압축에 수직인 방향의 변형률을 계산할 수 있다.

두 가지 방법으로 포아송 비를 계산하였는데 점 2 개 이상을 뛰어넘는 간격으로 계산한 global 포아송 비와 인접한 점을 이용하여 계산한 local 포아송 비로 나눌 수 있다.

Global 한 영역에서의 포아송 비의 경우에 양의 포아송 비를 갖는 구조체에서 x 방향 4개, y 방향 3

개의 점을 찍어 총 12 개의 점을 추적하였다. 1 행 1 열의 점을 1 번으로 하고, 오른쪽으로 가며 2 번, 3 번, 4 번 점을 설정하면 y 방향의 변형률은 (1, 9) 점으로부터 얻은 변형률, (2,10), (3, 11), (4,12) 번 사이의 변형률을 각각 계산하고 평균값을 이용하였다. x 방향 변형률은 (1, 4), (5,8), (9,12)의 변형률의 평균값을 이용하였다. 음의 포아송 비를 갖는 구조체에서도 마찬가지로 Global 포아송 비를 계산하였다. Local 포아송 비의 경우에는 x 방향으로의 변형률은 (1,2), (2,3), (3,4) 변형률의 평균으로 계산하였고, y 방향으로의 변형률은 (1,5), (2,6), (3,7), (4,8) 변형률의 평균으로 계산하였다.

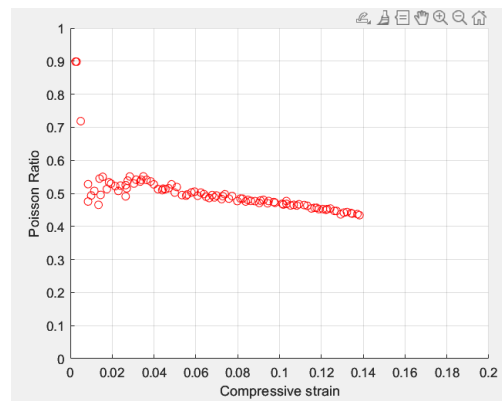


Fig.13 Positive PR, Global

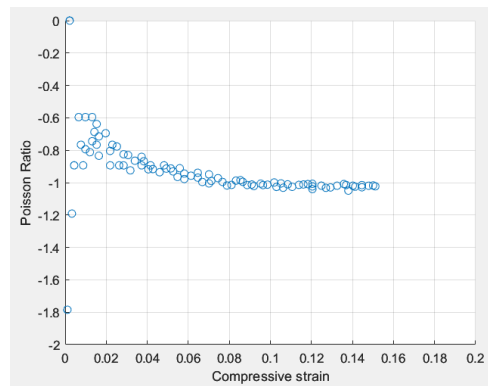


Fig.13 Negative PR, Global

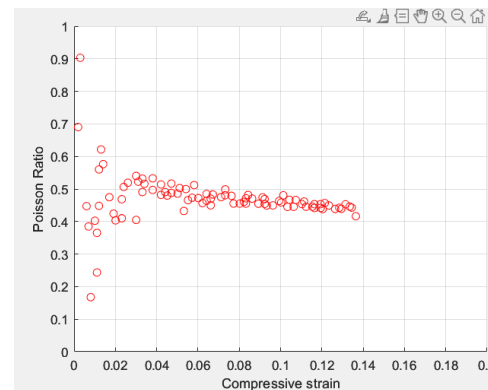


Fig.13 Positive PR, Local

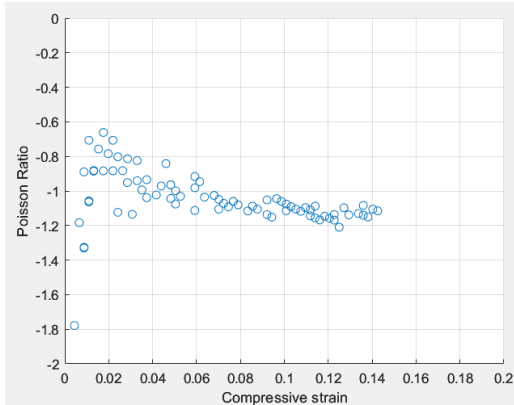


Fig.14 Negative PR, Local

### 3. 결 론

#### 3.1 재료의 인장실험의 결론

##### 3.1.1 재료의 연성과 인성

연성 재료와 취성 재료를 나눌 수 있는 기준 중 하나로, 시편의 인장 실험에서 응력-변형률 선도를 그렸을 때 시편이 소성 영역을 얼마나 가지는지를 지표로 이용할 수 있다. 소성 영역을 많이 가지는 재료를 연성 재료라고 하는데 Brass 와 Aluminum 은 모두 Fig 7 과 Fig 10 에서 볼 수 있듯이 항복점에 도달하고도 충분히 긴 소성 변형이 발생한 후에 파단이 발생하기 때문에 두 재료 모두 연성 재료임을 알 수 있다.

2.1 에서 논의했듯이 인성은 연성 재료가 취성 재료보다 크고, 연성이 클수록 크다는 것을 알 수 있다. 또한 인성은 응력-변형률 선도에서 그래프 아래 면적과 같다. Fig 10 과 Fig 7 의 그래프에서 확인하면 적분 영역(연신율)은 Brass 가 더 크고, 각 strain 에 대한 stress 또한 Brass 가 큰 것을 관찰하면 Brass 가 응력 - 변형률 선도의 아래 면적이 큰 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 이는 MATLAB 을 통해 계산해도 같은 결과가 나온다. 즉, 이 실험의 결과로 Brass 의 연성이 Aluminum 보다 크다고 주장할 수 있다.

##### 3.1.2 재료의 Necking 현상

재료의 Necking 은 인장 시험에서 재료가 소성 변형을 시작할 때부터 재료의 단면적의 크기가 변화하여 불균일하게 특정 부분만 단면적의 변화가 일어나는 현상이다.

본 보고서의 2.1 에서 다뤘듯이 Necking 현상은 인장강도의 응력을 받은 후부터 변형률이 증가함에 따라 응력이 감소하는 영역에서 관찰되는데, Fig 7 과 Fig 10 에서 그 영역을 쉽게 관찰할 수 있다.

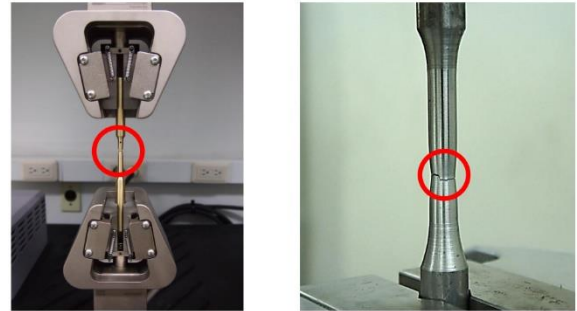


Fig.14 Necking of tow material

#### 3.1.3 구조물을 설계할 때 fracture 의 기준을 yielding 으로 간주하는 이유와 장점

본 실험에서 확인했듯이 재료에 계속하여 인장 응력을 가하면 yield point 를 넘게 되고, 소성 영역 을 거쳐 fracture 가 발생한다. 하지만 일상생활에서 공학자로서 기계나 구조물을 설계할 때 yielding 을 재료의 fracture 로 간주한다. 이러한 이유는 yielding 이 시작하면 인장응력을 증가시키지 않아도 소성영역에서의 영구적인 변형이 급격하게 일어나기 때문이다. 따라서 yield point 를 재료의 fracture 로 간주하여야 재료의 소성 변형이 급격하게 일어나기 전에 구조물이 불안정함을 예측하고, 대처할 수 있는 것이다.

또한 yield point 를 지나면 인장력을 제거하더라도 잔류응력이 남게 되어 구조물이나 재료의 원래의 상태로 돌아가지 못하고, 이는 구조물이나 재료의 역할에서 치명적인 역할을 할 수 있다. 예를 들어 서로 상호작용하는 기계의 재료가 치수가 맞지 않을 수도 있고, 재료의 강성이 중요한 기계나 구조물도 있기 때문이다.

따라서 공학적인 상황에서 재료의 항복은 곧 재료가 자신의 역할을 더 이상 하지 못한다고 간주하는 것이 좋은 방법이다. 또한 공학자에게 있어 안전은 매우 중요한 요소이므로, 보수적으로 해석하는 것이 손해가 되지 않는다고 생각한다.

#### 3.1.4 진응력 공칭응력과의 관계, 진변형률과 공칭변형률과의 관계

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A_f} = \frac{F \cdot L_f}{A_f \cdot L_f} = \frac{F \cdot L_f}{A_0 \cdot L_0} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (9)$$

$$\epsilon_{true} = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right) = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (10)$$



진변형률의 변화율  $d\varepsilon_{true} = \frac{dl}{l}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 분모  $l$ 은 인장된 길이로서 함수이다. 따라서 이를 초기 상태부터 적분할 수 있고, 이를 적분한 것이 식(10)에 해당한다.

공칭응력과 진응력 사이의 관계식을 얻기 위해서는 재료의 부피는 변하지 않는다는 가정으로부터 출발해야 한다. 이를 이용하여 공식을 유도한 것이 식(9)에 해당한다.

### 3.1.5 진응력 - 진변형률 선도

Fig 15는 Aluminum의 진응력 - 진변형률 선도와 공칭응력 - 공칭변형률 선도를 함께 나타낸 것이고, Fig 16은 Brass의 응력-변형률 선도들을 나타낸 것이다. 실제로 Fig 1에서의 선도와 비교해보면 똑같지는 않지만 진응력 - 변형률 선도가 공칭응력 - 변형률 선도보다 위에 있고, 전체적으로 동일한 양상을 보인다는 것을 알 수 있다.

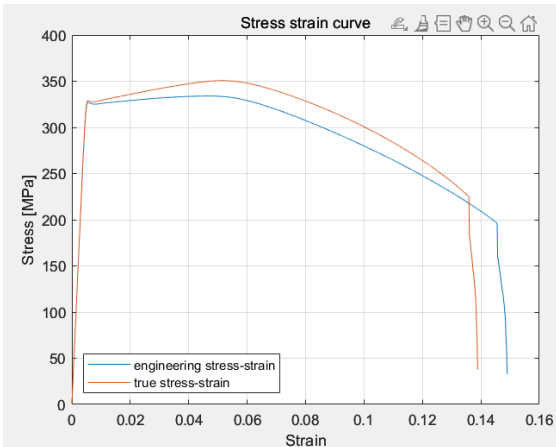


Fig.15 True stress-strain curve and Engineering stress-strain curve of aluminum

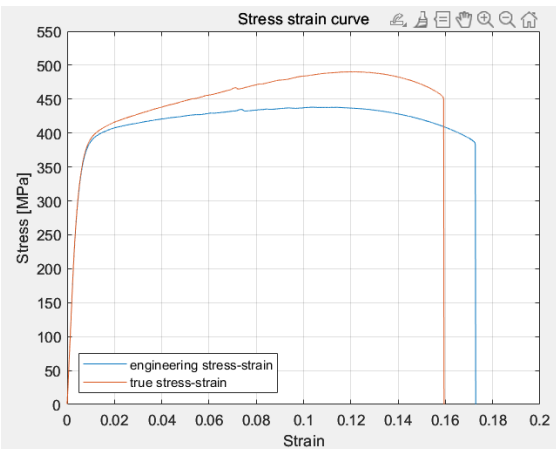


Fig.16 True stress-strain curve and Engineering stress-strain curve of brass

### 3.1.6 공칭응력, 공칭변형률 개념과 공칭응력 - 공칭변형률 선도를 사용하는 이유

먼저 공칭응력, 변형률의 사용은 당연하지만 측정을 용이하게 만들어준다. 공칭응력과 공칭변형률을 계산하는 것은 단순히 현재 가하고 있는 하중과 현재 인장된 길이, 초기 단면적, 초기 길이만을 알면 계산할 수 있는 반면에 진응력과 진변형률의 정확한 측정을 위해서는 단면적의 변화량을 따로 측정해줘야 하는 불편함이 있다. 또한 다양한 공학적 상황에서 소성 변형이 중요하게 여겨지는데, 이 때는 공칭응력의 사용이 더 유리하다. 진응력 개념을 사용하면 necking과 같은 재료의 거시적인 거동을 확인하지 못하는 반면에 공칭응력을 사용하면 어떤 지점에서부터 necking이 일어나는지 확인할 수 있다.

또한 본 실험에서 진응력 - 변형률 선도와 공칭응력 - 변형률 선도를 비교해 봤을 때 전자의 그래프가 후자의 그래프에 비해서 낮은 응력에서 항복과 과단이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 일상생활에 쓰이는 재료의 대부분이 탄성 영역에서 거동하는데, 탄성 영역에서는 두 그래프가 거의 겹쳐보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 공칭응력 - 공칭변형률을 사용해도 오차가 작고, 안정성에서는 더 보수적인 기준을 채택하는 것은 바람직하므로, 계산하기 편리한 공칭응력 - 공칭변형률을 사용하는 것에 문제가 없다.

### 3.1.7 재료의 파괴 단면과 Mohr's circle

Fig 17에 표현된 Mohr's circle에서 단면의 회전각에 대한 물리량인  $2\alpha = 90^\circ$ 를 만족하게 되면 최대 전단응력이 발생하는 단면이다. 최대 전단응력이 발생하면 단면에 과단이 발생하는데, 이 말은 즉,  $45^\circ$  회전한 단면에서 과단이 발생함을 알 수 있다. 본 실험에서 사용한 시료 두 가지 모두 연성 재료이므로, Necking 현상이 발생한다. 따라서 재료의 파괴 단면은 처음 단면보다는 얇은 컵 모양을 띄고 있으며 또한 단면의 수직 방향이 압축력을 가한 방향과  $45^\circ$  각도와 가까운 것을 관찰할 수 있다.

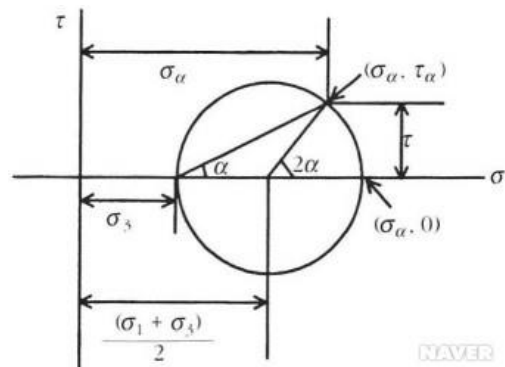


Fig.16 Mohr's circle

이는 실제로 분필에 비틀림 하중을 주었을 때 분필이 파단이 발생하였을 때의 분필의 파단면과 비슷하다고 할 수 있다. 다만 비틀림 하중 하에서 분필은 necking 현상이 없는 반면 본 실험에서 시편은 necking 이 발생한다.

### 3.1.8 오차 원인

시료를 장치의 Grip 에 고정할 때, 지면에 완전한 수직 방향으로 고정해야만 단축 하중을 가할 수 있는데, 이 과정에서 수평계를 사용한 것이 아닌 사람의 육안을 통하여 확인하였기에 시료가 회전하여 시료에 자중에 의한 굽힘 하중이 발생하거나 시료가 회전됨에 따른 오차가 발생하였다.

또한 시료에 Gauge length 를 그리는 과정과 Extensometer 의 설치 과정에서 오차가 발생한다. Gauge length 는 네임펜과 자를 이용하여 그리는데, 변형의 단위가 mm 임을 감안하면 네임펜의 두께와 자의 눈금에 의한 측정의 한계는 큰 오차의 원인이 될 수 있다. Extensometer 에 Gauge length 를 맞추는 과정에서도 위와 같은 오차가 발생할 수 있다.

한편 시편에 인장력이 온전히 전달되지 않을 수 있다. 시편에 가하는 인장력이 커질수록 Grip 사이에 미끄러짐이 발생할 것이고, 미끄러짐으로 인한 비틀림도 발생할 수 있다. 이러한 현상이 발생하면 단축방향으로의 인장력이 시편에 온전히 전달되지 않기 때문에 응력-변형률 선도에서 주어진 응력에 대응하는 변형률의 값이 낮게 나오는 오차를 초래할 수 있다.

마지막으로, 실험을 수행하기 전 프로그램의 응력, 변형률 등등을 영점으로 설정하고 실험을 시작해야 하는데 모든 값을 0 으로 맞추는 것이 불가능하고, 값이 진동하기 때문에 영점을 맞추지 않고 실험을 진행한 것에 대한 오차가 발생하였다.

## 3.2 구조체의 압축 실험

### 3.2.1 구조체가 음의 포아송 비를 가질 수 있는 이유와 조건

본 보고서의 2.1 에서 논의했듯이 재료는 대부분 양의 포아송 비를 갖는다. 하지만 구조체의 경우 설계함에 따라 음의 포아송 비를 갖게 만들 수 있다.

양의 포아송 비를 갖는 재료로 구조체를 만들 때 음의 포아송 비를 갖게 하려면 구조체가 축소될 수 있는 충분한 공간이 마련되어 있어야 하기 때문에 음의 포아송 비를 갖는 대부분의 구조체는 구조체 사이의 빈 공간이 많은 다공성 구조로 되어 있어야 한다. 즉, 음의 포아송 비를 가지려면 구조체 내부에 충분한 빈 공간이 존재해야만 하고, 음의 포아송 비를 갖는 구조체는 파괴에 대한 저항이 생기고, 에너지를 많이 흡수한다.

### 3.2.2 음의 포아송 비를 갖는 다른 예시

Fig. 17(a)는 오목구조(re-entrant structure)라고 부르며, 2 차원의 허니컴 구조를 갖는다. Fig. 17(b)는 키랄구조(chiral structure)라고 부르며, 직선 요소가 원이나 다각형의 꼭짓점에 나선형으로 배치된 구조를 말한다. Fig. 17(c)는 회전구조 (rotating structure)라고 부르며, 다각형의 강체들이 꼭짓점에서 서로 연결된 형태를 갖는다. 이와 같은 3 가지 음의 포아송 비를 갖는 구조는 높은 공극률을 갖는 다공성 구조로 내부의 빈 공간이 많기 때문에 구조체로 활용할 때에는 강도는 크게 낮다.[1]

40% 이하의 공극률을 갖는 다공질 재료의 경우 구성물질 자체가 팽창성이 아니면 재료 전체적으로 팽창성 특성을 가질 수 없는 것으로 알려져 있다.[1] 이 말은 즉, 양의 포아송 비를 가진 재료로 음의 포아송 비를 갖는 구조체를 설계하기 위해서는 구조체 부피 전체의 40%가 빈 공간으로 되어 있어야 한다는 뜻이다.

본 실험에서 사용한 음의 포아송 비를 갖는 구조체는 Fig 17(a)에 해당하는 오목구조라고 할 수 있다. 이외에 Fig 17(b)에 나타난 카탈 구조는 y 방향의 압축력이 작용했을 때 cylinder가 반시계방향으로 회전하여 x 방향으로도 압축변형이 발생하고, 이를 이용하여 음의 포아송 비가 도출된다. Fig 17(c)에 나타난 회전 구조는 사각형 형태의 구조물들이 꼭짓점으로만 연결되어 압축력이 작용하면 사각형의 회전을 유도하고, 각 사각형의 시계/반시계 방향으로의 회전은 음의 포아송 비를 도출할 수 있다. 이러한 다공성 구조를 가진 구조체들이 음의 포아송 비를 가지는 것이다.[7]

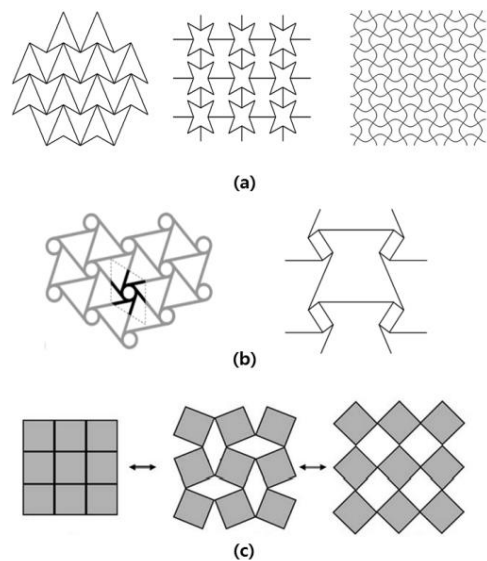


Fig.17 Auxetic structures; (a) re-entrant structure, (b) chiral structure, (c) rotating structure[1]

### 3.2.2 압축 실험에 영향을 미치는 조건

구조체의 압축 실험에서는 구조체를 구성하고 있는 재료의 물성치가 매우 중요하다. 음의 포아송 비를 갖는 구조체에서는 구조체가 꺾이는 부분이 존재하는데, 이 부분에서는 응력이 다른 부분에 비해서 집중되어 구조체 전체적으로 보았을 때 대부분의 변형이 이 부분에서 발생한다. 따라서 항복점이 높지 않은 재료를 사용한다면 압축 시 소성변형이 일어날 가능성이 크고, 소성변형이 일어나는 것은 실험을 정확하게 진행되는 것에 큰 방해요소가 될 수 있을 것이다. 본 실험에서 사용한 구조체는 Armitel ID 2045의 항복점은 앞서 언급한 문제가 일어나지 않을 정도로 높으므로, 구조체의 재료가 잘 선정되었다고 할 수 있다.

동일한 패턴을 가진 구조체라도 패턴의 크기가 포아송 비의 영향을 미친다. 즉, 완전히 닮은꼴의 구조체더라도 포아송 비가 달라질 수 있고, 또한 패턴의 크기에 대한 구조체 벽의 두께 비 또한 달라질 수 있다. 패턴의 길이에 비해 패턴의 두께가 굵으면, 결합점에서의 굽힘 변형이 주요 변형이 될 수 있다. 이러한 굽힘 변형은 y 축 변형을 초래하지만 x 축 변형에는 기여하지 않으므로, 포아송 비가 더 작아지는 결과를 초래한다. 따라서 어떠한 구조체의 포아송 비를 재료의 물성치처럼 정확하게 규명하는 것은 어려우며, 본 실험에서도 구조체에 대한 포아송 비가 양수인지 음수인지가 중요하다.

어떠한 점을 이용하여 포아송 비를 구할 것인지도 중요하다. 본 실험의 2.3.2에서 확인할 수 있듯이 global 한 영역에서 구한 포아송 비는 local 한 영역에서 구한 포아송 비는 비슷하지만 조금씩 다르게 분포하는 것을 관찰할 있다. 따라서 동일한 압축 실험을 진행하더라도 구조체의 서로 다른 두 점을 설정하는 것이 영향을 미친다고 할 수 있다.

압축력의 크기나 압축을 끝내는 순간의 변형률 또한 실험에 영향을 미칠 수 있다. 본 실험에서는 구조체의 높이의 20%까지만 압축을 진행하였는데, 압축을 계속 진행하면 음의 포아송 비를 갖는 구조체에서도 더 이상 빈 공간이 충분하지 않아 재료 자체가 압축이 진행되어 양의 포아송 비가 관찰될 수 있다.

### 3.2.4 압축 실험의 오차 원인

앞서 3.2.3에서 언급했듯이 변형률을 분석할 점의 간격을 어떻게 설정할 것인지가 중요하다. 간격을 짧게 하면 구조체의 국소적 기계 거동(굽힘 변형 등)이 변형률에 많은 반영이 될 수 있고, 측정의 정밀도가 떨어질 수 있다. 하지만 너무 넓게 잡으면 점이 멀어지는 속도가 빨라져 카메라가 추적하는 것에 지연이 생긴다. 실제로 본 실험에서도 카메라의 마킹 점이 실제 점을 따라가지 못

하여 지연이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 더불어 카메라가 3차원의 구조물을 온전히 2차원의 영상으로 정확하게 옮길 수 없고, 또한 카메라의 수직, 수평방향 또한 인간의 육안을 통하여 확인한 후 실험이 진행되었기 때문에 이로 인한 오차가 발생할 수 있다.

하지만 포아송 비를 정확히 측정하는 것이 아닌 포아송 비가 일정한지를 확인하기 위해서는 카메라가 항상 일정하게 촬영하므로, 카메라에 의한 영향이 적다고 말할 수 있다.

Global 영역에서의 포아송 비는 최외각 점들(1,4,9,12)만을 이용한 것이 아닌 가장 가장자리의 점들을 모두 이용하여 평균을 낸 결과로 이용하였다. 이는 (1,4,9,12)만을 이용하는 분석보다 간격이 같은 점들을 모두 이용하여 평균을 내는 것이 데이터의 fluctate 가 더 작아질 것이라는 판단 하에 수행되었다.

## 4. 참고문헌

- (1) Dae Seung Kang. A Wire-Woven Kagome Transformed to have a Negative Poisson's Ratio. Vol. 40, No. 9, pp. 827~833, 2016.
- (2) Oh, M. H., Choi, M. J., Byun, T. W., Cho, S. H., 2017, "Porous Structures with Negative Poisson's Ratio using Pattern Transformation Triggered by Deformation", Computational Structural Engineering Institute of Korean, Vol. 30, No. 4, pp. 275~282.
- (3) Seoul National University Mechanical Engineering, "Mechanical Engineering Experiment", Westsea planning, pp.12~32.
- (4) "Mohr's circle", The Northwestern University mechatronics design wiki, last modified July 4. 2006, accessed on March 17. 2023, [http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Mohr%20s\\_Circle](http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Mohr%20s_Circle)
- (5) Wikipedia, 03.17.2022., "Necking(engineering)".
- (6) H.M.A. Kolken and A.A. Zadpoor, 2017, "Auxetic mechanical metamaterials," RSC Adv. 7, pp.5111=5129