석사학위논문

TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 에너지별 변형에너지 및 충격력에 대한 충격 연구

2022년

한 성 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스 템 공 학 과

기 계 시 스 템 전 공

김 영 준

석사학위논문
지도교수 윤주일

TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 에너지별 변형에너지 및 충격력에 대한 충격 연구

Impact Study on Strain Energy and Impact Force
by Impact Energy of TPU/ABS
Reentrant/Honeycomb Structures

2022년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스 템 공 학 과

기 계 시 스 템 전 공

김 영 준

석사학위논문
지도교수 윤주일

TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 에너지별 변형에너지 및 충격력에 대한 충격 연구

Impact Study on Strain Energy and Impact Force by Impact Energy of TPU/ABS Reentrant/Honeycomb Structures

위 논문을 기계시스템공학 석사학위 논문으로 제출함

2022년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스 템 공 학 과

기 계 시 스 템 전 공

김 영 준

김영준의 기계시스템공학 석사학위 논문을 인준함

2022년 6월 일

심사위원장 최 재 봉 (인)

심 사 위 원 윤 주 일 (인)

심 사 위 원 이 선 표(인)

국 문 초 록

TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 에너지별 변형에너지 및 충격력에 대한 충격 연구

한 성 대 학 교 대 학 원
기 계 시 스 템 공 학 과
기 계 시 스 템 전 공
김 영 준

사람의 낙상 사고는 일상 생활 중 낙상부터 오토바이 주행 중 낙상까지 다양한 충격 에너지 영역에서 일어나고 있다. 낙상 사고는 골밀도가 낮은 노령 인구에게 고관절 골절로 인한 장애 또는 사망 등으로 이어질 수 있다. 충격 에너지가 큰 오토바이 주행 중 낙상 사고는 척추, 두개골 등 단단한 신체 부위에도 손상을 발생시킬 수 있다. 이러한 신체 손상은 충격 보호 장비를 통해 예방 할 수 있다. 하지만 충격 보호 장비는 제품의 크기와 무게 때문에 착용이 불편하여 착용률이 낮은 실정이다. 이에 충격 보호 장비 내부에 유닛 구조가 적용된 충격 흡수 구조체에 대한 연구가 수행되고 있다. 충격 흡수 구조체는 일반 패드형 충격 보호 장비에 비해 무게 대비 높은 충격 흡수 성능을 보인다. 충격 흡수 구조체의 유닛 구조로는 리엔트런트 구조와 허니콤 구조가 일반적으로 적용된다. 리엔트런트 구조는 음의 포아송 비 특성을 가진 새로운 유형의 기계적 메타 구조이다. 이러한 충격 흡수 구조체는 사용처에 따라 특정 충격 에너지에 대해 측정되는 최대 충격력의 크기가 기준 임계값을 넘으

면 안되는 충격 시험 규격을 충족해야 한다. 하지만 충격 시험 규격을 충족하여도 사용자가 심각한 부상을 입을 수 있다. 때문에 다양한 충격 에너지 영역에서 충격 흡수 구조체를 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 대표적 소프트 타입 소재인 TPU와 하드 타입 소재인 ABS로 구성된 TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 에너지별 변형에너지 및 충격력에 대한 충격 연구를 수행하였다.

주요어 : 리엔트런트, 충격 연구

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구배경 ····· 1
제 2 절 연구동향 ····· 3
제 3 절 오그제틱 구조 ····· 9

제 2 장 연구 방법 ····· 11

제 1 절 소재 ····· 11
제 2 절 해석 모델 ····· 15
제 3 절 충격력 및 흡수 에너지 계산 방법 ····· 23
1) 충격력 계산 방법 ····· 23
2) 흡수 에너지 계산 방법 ····· 25
제 4 절 해석 케이스 ····· 27
제 5 절 실험 방법 ····· 29

제 3 장 해석 결과 ····· 31

제 1 절 점탄성 특성에 따른 충격 흡수 성능 ····· 31
제 2 절 TPU/ABS 소재 리엔트런트/허니콤 구조체 충격 해석 결과 ····· 33
1) TPU 구조체(40mm×20mm×40mm)의 구조별 흡수 에너지 및 충격력 비교 ····· 33
2) ABS 구조체(100mm×100mm×40mm)의 구조별 흡수 에너지 및 충격력 비교 ····· 34
3) TPU 구조체(100mm×100mm×40mm)의 구조별 흡수 에너지 및 충격력 비교 ····· 44

제 4 장 결 론 ····· 55

참 고 문 헌 ····· 56

ABSTRACT ····· 60

표 목 차

[표 2-1] 소재 물성치 ····· 14
[표 2-2] 접촉 조건 ····· 16
[표 2-3] 구조체 크기(40mm×20mm×40mm) 해석 케이스 ····· 27
[표 2-4] 구조체 크기(100mm×100mm×40mm) 해석 케이스 ····· 28

그 림 목 차

[그림 1-1] 상용 엉덩이 보호구의 충격 흡수 성능에 대한 연구 ····· 4
[그림 1-2] TPU/TPE 리엔트런트/허니콤 구조체 충격 실험 결과 ····· 6
[그림 1-3] 샌드위치 패널 구조체의 충격 해석 ····· 8
[그림 2-1] 오그제틱 구조의 특성 ····· 9
[그림 2-2] Gibson 모델 유닛 구조 ····· 10
[그림 2-3] ABS 소재의 응력-변형률 선도 ····· 12
[그림 2-4] TPU 소재의 응력-변형률 선도 ····· 13
[그림 2-5] TPU 소재의 응력 이완 곡선 ····· 13
[그림 2-6] 충격 흡수 구조체 유한 요소 모델 ····· 16
[그림 2-7] 경계 조건별 대퇴부 치밀골의 흡수에너지-시간 그래프 ····· 17
[그림 2-8] 경계 조건별 반력-시간 그래프 ····· 18
[그림 2-9] TPU 리엔트런트 구조체의 마찰 계수별 대퇴부 치밀골의 흡수 에너지-시간 그래프 ····· 19
[그림 2-10] ABS 리엔트런트 구조체의 마찰 계수별 대퇴부 치밀골의 흡수 에너지-시간 그래프 ····· 20
[그림 2-11] 구조체 크기(100mm×100mm×40mm)일 때 총 Elements 수에 따른 대퇴부 치밀골의 최대 흡수 에너지 그래프 ····· 21
[그림 2-12] 구조체 크기(40mm×20mm×40mm)일 때 총 Elements 수에 따른 대퇴부 치밀골의 최대 흡수 에너지 그래프 ····· 22
[그림 2-13] 충격 흡수 구조체 유닛 구조 크기별 충격 실험 및 해석 결과 24
[그림 2-14] 정적 압축 실험 해석 방법 ····· 25
[그림 2-15] 포아송 비 별 정적 압축 실험 및 해석 결과 ····· 26
[그림 2-16] 충격 실험 모식도 ····· 29
[그림 2-17] 충격 실험 사진 ····· 30
[그림 3-1] ABS/TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 ····· 32
[그림 3-2] TPU 리엔트런트/허니콤 구조체(40mm×20mm×40mm)의 충격 에너지별 최대 충격력 그래프 ····· 33

[그림 3-3] ABS 구조체(100mm×100mm×40mm) 충격 해석 결과 ····· 35
[그림 3-4] ABS 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 12J) ··· 36
[그림 3-5] ABS 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 12J) ····· 36
[그림 3-6] ABS 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 50J) ··· 37
[그림 3-7] ABS 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 50J) ····· 37
[그림 3-8] ABS 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 125J) · 38
[그림 3-9] ABS 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 125J) ····· 38
[그림 3-10] ABS 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 200J) 39
[그림 3-11] ABS 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 200J) ····· 39
[그림 3-12] ABS 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 12J) ····· 40
[그림 3-13] ABS 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 12J) ····· 40
[그림 3-14] ABS 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 50J) ····· 41
[그림 3-15] ABS 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 50J) ····· 41
[그림 3-16] ABS 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 125J) ····· 42
[그림 3-17] ABS 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 125J) ····· 42
[그림 3-18] ABS 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 200J) ····· 43
[그림 3-19] ABS 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 200J) ····· 43
[그림 3-20] TPU 구조체(100mm×100mm×40mm) 충격 해석 결과 ····· 46
[그림 3-21] TPU 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 12J) 47
[그림 3-22] TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 12J) ····· 47
[그림 3-23] TPU 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 50J) 48
[그림 3-24] TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 50J) ····· 48
[그림 3-25] TPU 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 125J) 49
[그림 3-26] TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 125J) ····· 49
[그림 3-27] TPU 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 200J) 50
[그림 3-28] TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 200J) ····· 50
[그림 3-29] TPU 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 12J) ····· 51
[그림 3-30] TPU 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 12J) ····· 51
[그림 3-31] TPU 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 50J) ····· 52

[그림 3-32] TPU 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 50J) ····· 52
[그림 3-33] TPU 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 125J) ····· 53
[그림 3-34] TPU 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 125J) ····· 53
[그림 3-35] TPU 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 200J) ····· 54
[그림 3-36] TPU 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 200J) ····· 54

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

사람의 낙상 사고는 작게는 일상 생활 중 낙상부터 크게는 오토바이 주행 중 낙상까지 다양한 충격 에너지 영역에서 일어나고 있다. 일상생활 중 낙상은 고관절 골절을 유발하며 고관절 골절은 장애, 사망 등 심각한 결과로 연결된다.[1] 오토바이 주행 중 낙상은 척추 골절 등 인명사고를 일으킨다. 이러한 문제는 일상 생활 중 낙상을 위한 엉덩이 보호대부터 오토바이 주행 중 낙상을 위한 등 보호대와 같은 충격 보호 장비를 통해 예방할 수 있다.[2] 충격 보호 장비는 충격 에너지 영역에 따라 소프트 타입의 소재부터 하드 타입의 소재까지 다양한 소재들이 적용되고 있다. 이러한 충격 보호 장비는 낙상사고 예방에 효과적이나 제품의 크기와 무게 때문에 착용이 불편하여 착용률이 낮은 실정이다.[3] 이에 제품의 크기와 무게를 개선하기 위해 제품의 내부에 구조가 적용된 충격 흡수 구조체의 연구가 진행되고 있다.[4] 충격 흡수 구조체는 충격 상황에서 내부 구조가 변형되어 충돌 시간을 지연시켜 순간적인 충격 에너지를 낮추는 효과가 있다. 충격 흡수 구조체의 유닛 구조로는 일반적으로 허니콤(Honeycomb) 구조가 많이 사용되고 있지만 최근 새로운 유형의 기계적 메타 구조인 오그제틱 구조 또한 사용되고 있다.[5] 충격 흡수 구조체

---

1) S. R. Cummings, S. M. Rubin, and D. Black. (1990) "The Future of Hip Fractures in the United States: Numbers, Costs, and Potential Effects of Postmenopausal Estrogen", Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007), vol. 252.

2) S. Afquir, A. Melot, A. Ndiaye, E. Hammad, J.-L. Martin, and P.-J. Arnoux. (2020). "Descriptive analysis of the effect of back protector on the prevention of vertebral and thoracolumbar injuries in serious motorcycle accident", Accident Analysis & Prevention, vol. 135. p. 105331.

3) R. Ledsham, J. Boote, A. Kirkland, and S. Davies. (2006). "What is it like to use hip protectors? A qualitative study of the views and experiences of nurses and patients", *Clinical Effectiveness in Nursing,* vol. 9. pp. e97-e105.

4) J. H. Park, H.-K. Jung, and J. R. Lee. (2019). "Development and Evaluation of Fall Impact Protection Pads Using Additive Manufacturing", Materials, vol. 12, no. 20.

의 충격 흡수 성능은 스포츠용 무릎 보호대[6], 오토바이용 등 보호대[7], 오토바이용 헬멧[8] 등 적용 분야에 따라 여러 충격 시험 규격에 따라 측정 되고 있다. 충격 시험 규격은 특정 충격 에너지에 대해 측정되는 최대 충격력의 크기가 기준 임계값을 넘지 않으면 충격 시험 규격을 충족하는 것이다. 스포츠용 무릎 보호대[6]은 12J의 충격 에너지에 대해 6kN 이하의 최대 충격력을, 오토바이용 등 보호대[7]은 50J의 충격 에너지에 대해 8kN 이하의 최대 충격력을, 오토바이용 헬멧[8]은 125J의 충격 에너지에 대해 20kN 이하의 최대 충격력을 충족해야 한다. 하지만 충격 흡수 구조체의 충격 흡수 성능이 충격 시험 규격에 충족한 결과를 보여도 사용자가 심각한 부상을 입을 수도 있다.[9] 때문에 기존 시험 규격에서 요구하는 충격 에너지뿐 아니라 다양한 충격 에너지 영역에서 충격 흡수 구조체의 충격 흡수 성능을 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 유한 요소 해석을 통해 다양한 충격 에너지 영역에서의 충격력과 신체에 흡수된 에너지를 측정하여 TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 에너지별 변형 에너지 및 충격력에 대한 충격 연구를 수행하였다.

5) İ. Özen, K. Çava, H. Gedikli, Ü. Alver, and M. Aslan. (2020). "Low-energy impact response of composite sandwich panels with thermoplastic honeycomb and reentrant cores", Thin-Walled Structures, vol. 156, p. 106989.

6) 국가기술표준원. (2009). “자율안전확인대상공산품의 안전기준 제2조 1항 24호”.

7) EN Standards. (2014). “EN1621-2 Motorcyclists' protective clothing against mechanical impact - Part 2: Motorcyclists' back protectors - Requirements and test methods”.

8) ISO/R 1511. (1970). “Protective helmets for road users”.

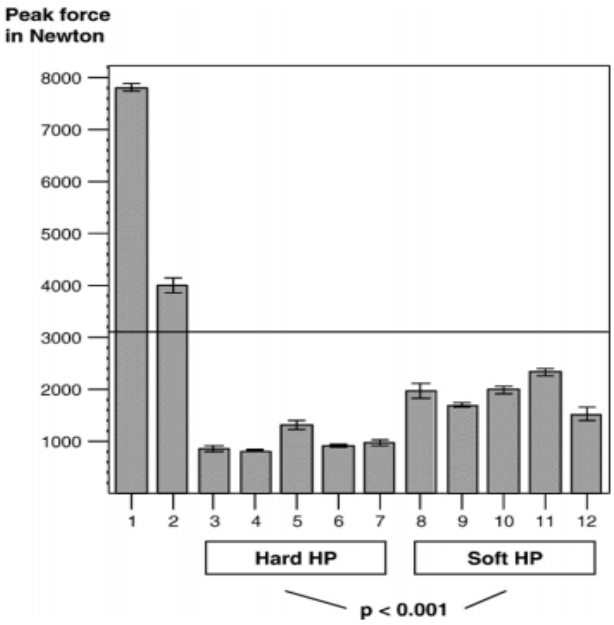
9) K.-U. Schmitt, B. Liechti, F. I. Michel, R. Stämpfli, and P. A. Brühwiler. (2010). "Are current back protectors suitable to prevent spinal injury in recreational snowboarders?", British Journal of Sports Medicine, vol. 44, no. 11, p. 822.

제 2 절 연구동향

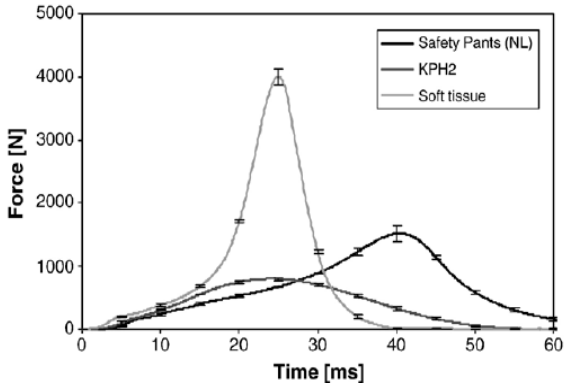
N. M. van Schoor, A. J. van der Veen, L. A. Schaap, T. H. Smit, and P. Lips[10]은 상용 엉덩이 보호구 10종을 소재의 강성에 따라 하드, 소프트 타입으로 나눈 후 충격 실험을 진행하여 엉덩이 보호구들의 충격 흡수 성능을 평가하였다. 실험은 25kg의 다트를 8cm 높이에서 자유 낙하시키는 방식으로 충격을 가하였다. 그림 1-1은 엉덩이 보호구 시편과 실험 결과이다. [그림1-1] a그래프에서 수평선(3100N)은 골절 임계선이다. 측정된 충격력이 골절 임계선인 3100N보다 낮으면 골절을 예방할 수 있는 엉덩이 보호구이다. 평가 결과 소프트 타입의 엉덩이 보호구들은 모두 골절 임계선보다 아래에 위치해 골절을 예방하는 결과를 보였지만 몇몇 하드 타입 엉덩이 보호구는 골절 임계값보다 위에 위치해 골절을 예방하지 못하는 결과를 보였다. [그림1-1] b 그래프는 소프트 타입 엉덩이 보호구인 Safety Pants와 하드 타입 엉덩이 보호구인 KPH2 두 소재의 충돌 시간에 따른 충격력 그래프이며, 소프트 타입인 Safety Pants는 하드 타입인 KPH2에 비해 충돌 시간이 지연되어 Peak Force값이 낮은 결과를 보였다. 하지만 충격 에너지가 25kg의 다트를 8cm 높이에서 자유 낙하 시키는 상황(충격 에너지 20J)에 대해서만 실험을 진행하였고 다양한 충격 에너지 영역에선 실험을 진행하지 않았다.

10) N. M. van Schoor, A. J. van der Veen, L. A. Schaap, T. H. Smit, and P. Lips. (2006). "Biomechanical comparison of hard and soft hip protectors, and the influence of soft tissue", Bone, vol. 39 2, pp. 401-7.

a)



b)



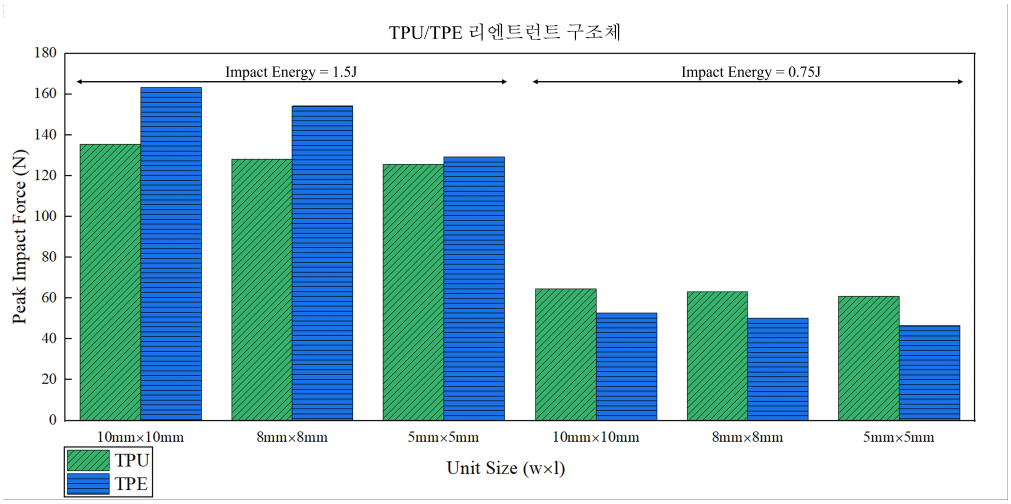
[그림 1-1] 상용 엉덩이 보호구의 충격 흡수 성능에 대한 연구[10)]

a)시편별 충격 흡수 실험 결과 b) 소재별 엉덩이 보호구의 충격력 측정 결과

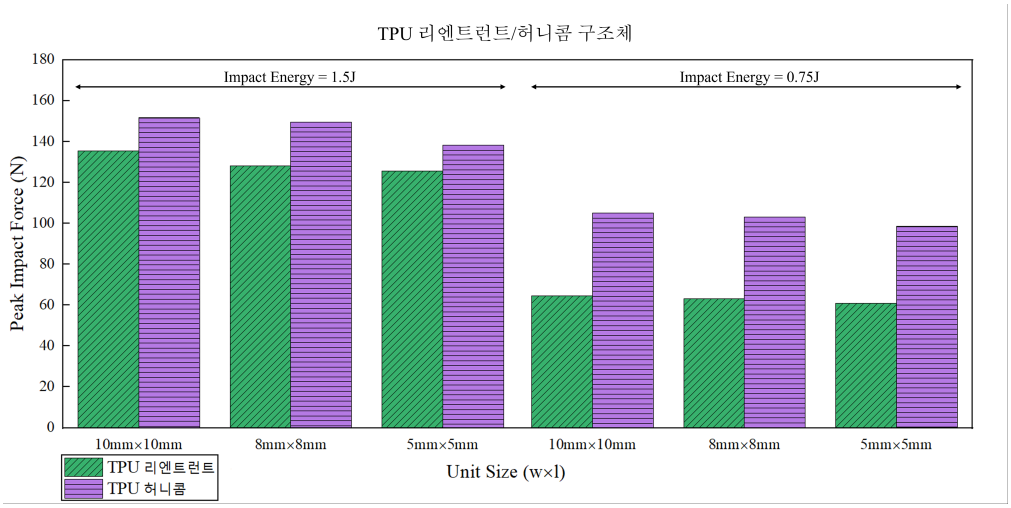
정석환[11]의 연구에서는 충격 흡수 구조체의 유닛 구조 형상과 크기에 따른 충격 흡수 성능 평가를 수행하였다. 시편 제작은 FDM 3D 프린팅을 이용하여 TPU/TPE로 구성된 리엔트런트/허니콤 구조체를 제작하였다. 실험은 520g의 강구를 낙하 높이 15cm(충격 에너지 0.75J), 30cm(충격 에너지 1.5J)에서 자유 낙하시키는 방법으로 진행되었다. [그림 1-2] a그래프는 구조별 충격 실험 결과이며 리엔트런트 구조체가 허니콤 구조체보다 낮은 충격력을 보였다. [그림 1-2] b그래프는 소재별 충격 실험 결과이며 낙하 높이 15cm일 때 연신율이 상대적으로 낮은 TPE로 제작한 구조체가 최대 충격력이 낮게 측정되었고 낙하 높이 30cm일 때에는 TPU가 최대 충격력이 낮게 측정되었다. 두 실험 결과 모두 유닛 구조의 크기가 작을수록 낮은 충격력이 측정되었다.

11) 정석환. (2019). "FDM 3D프린터로 제작한 Reentrant 구조체의 충격 흡수에 관한 연구 " 국내석사학위논문, 한성대학교 대학원.

a)



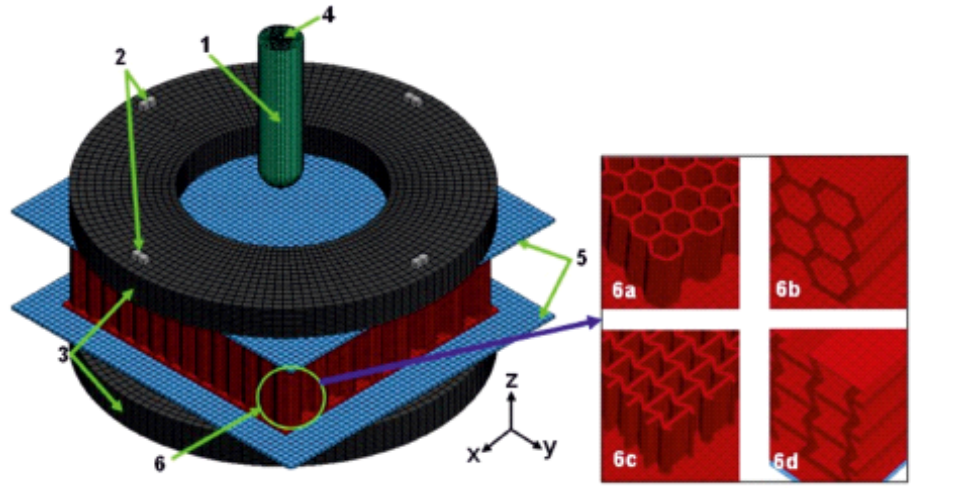
b)



[그림 1-2] TPU/TPE 리엔트런트/허니콤 구조체 충격 실험 결과[11)]
a) 리엔트런트 구조체의 소재별 실험 결과, b) TPU 구조체의 구조별 실험 결과

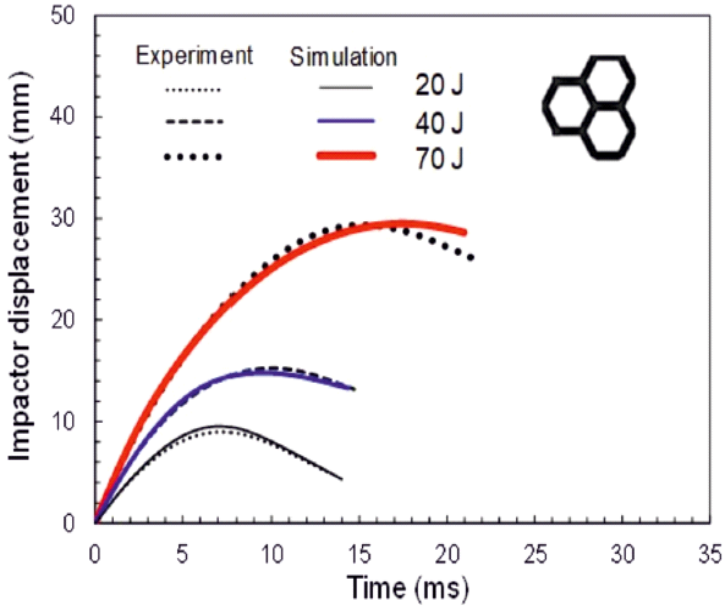
İ. Özen, K. Çava, H. Gedikli, Ü. Alver, and M. Aslan[5]의 연구는 내부 구조가 ABS로 이루어진 구조체와 상하단 시트가 탄소섬유강화플스틱(CFRP)로 구성된 샌드위치 패널의 충격 특성 분석을 위해 충격 에너지(20J, 40J, 70J)이 가해지는 충격 실험 및 해석을 수행하였다. 내부 구조는 리엔트런트 구조와 허니콤 구조이다. 충격 실험은 [그림 1-3] a와 같이 8kg의 낙하 다트를 25.5cm(충격 에너지 20J), 51cm(충격 에너지 40J), 89cm(충격 에너지 70J)에서 자유 낙하 시키는 방식으로 진행되었다. 해석에서는 초기속도가 2.236m/s(20J), 3.163m/s(40J), 4.183m/s(70J)인 방식으로 적용되었다. 시편과 하단 지그는 일반 접촉 조건이며 하단 지그의 최하단은 고정($U_x = U_y = UR = 0$)인 경계조건이 적용되었다. 해석 결과 [그림 1-3] b와 같이 허니콤 구조체의 충격 해석에서 다트의 압입이 허니콤 구조체의 충격 실험에서 다트의 압입과 유사한 결과를 보여 충격 흡수 구조체의 충격 해석 가능성을 확인하였다.

a)



1. Impactor tip
2. Limiter bolts
3. Clamping plates
4. Mass point
5. Composite face sheets
6a. In-plane honeycomb core
6b. Out-of-plane honeycomb core
6c. In-plane reentrant core
6d. Out-of-plane reentrant core

b)



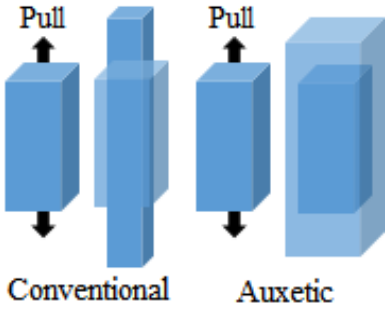
[그림 1-3] 샌드위치 패널 구조체의 충격 해석[5)]

a) 충격 해석 모델 b) 다트 압입량 실험 해석 비교 결과

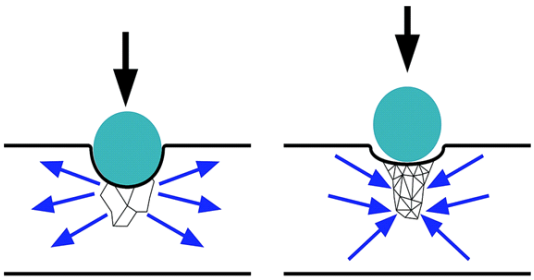
제 3 절 오그제틱 구조

음의 포아송 비를 뜻하는 오그제틱(Auxetic) 구조는 [그림 2-1] a와 같이 축 방향으로 압축/팽창할 때 횡 방향으로 수축/팽창하는 새로운 유형의 기계적 메타 구조이다. 오그제틱 구조는 충격 상황에서 충격 부위로 수축되는 거동을 보이는 특성으로 인해 [그림 2-1] b와 같이 충격 부위의 강성이 증가하게 된다. 오그제틱 구조는 이러한 거동 때문에 충격 보호를 위한 에너지 흡수 시스템 등 여러 응용분야에서 널리 연구되고 있다.[12),13)]

a)



b)



[그림 2-1] 오그제틱 구조의 특성

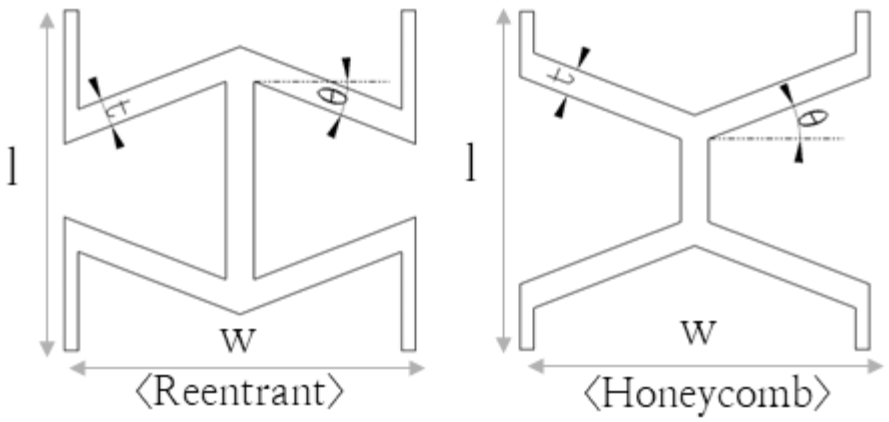
a) 오그제틱 구조의 메타 특성 b) 오그제틱 구조의 충격 특성

12) T. Shepherd, K. Winwood, P. Venkatraman, A. Alderson, and T. Allen. (2020). "Validation of a Finite Element Modeling Process for Auxetic Structures under Impact", physica status solidi (b), vol. 257, no. 10.

13) M. Sanami, N. Ravirala, K. Alderson, and A. Alderson. (2014). "Auxetic Materials for Sports Applications" Procedia Engineering, vol. 72.

오그제틱 구조중 대표적 구조로는 Gibson 모델의 리엔트런트 구조(Reentrant)가 있다.[14] Gibson 모델은 [그림 2-2]와 같다. Gibson 모델기반 유닛 구조는 식(1)과 같이 유닛 구조의 내부 각도와 종횡비(l/w)를 변경하여 유닛 구조의 포아송 비를 변경할 수 있다. 이 중 음의 포아송 비 구조를 리엔트런트, 양의 포아송 비 구조를 허니콤 구조라 한다. 본 연구에서는 충격 흡수 구조체에 적용되는 유닛 구조로 $\nu = -0.2$인 리엔트런트 구조와, $\nu = 0.2$인 허니콤 구조가 적용되었다.

$$\nu_{xy} = \tan(\theta) \cdot \frac{l}{w} \quad \cdots\cdots \text{식(1)}$$



[그림 2-2] Gibson 모델 유닛 구조[14]

14) L. J. Gibson, M. F. Ashby, G. S. Schajer, and C. I. Robertson. (1982). "The mechanics of two-dimensional cellular materials", Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, vol. 382, no. 1782, pp. 25-42.

제 2 장 연구 방법

제 1 절 소재

N. M. van Schoor et al[10]의 연구에서 소개한 소프트 타입 엉덩이 보호구 중 가장 우수한 성능을 보인 SaftyPants는 TPU 계열 제품이다. 이에 본 연구에서는 구조체에 적용되는 소프트 타입 소재로 TPU를 선택하였다. 또한 하드 타입 소재로는 İ. Özen et al[5]에서 사용한 ABS 소재로 선택하였다. ABS 소재는 [그림 2-3]과 같이 탄성영역이 탄성계수(E=1.74GPa) 하나로 설명되는 일반 탄성 모델이지만, TPU는 탄성영역이 비선형인 초탄성(Hyperelastic) 소재이다. 초탄성 소재는 식(2)과 같이 변형 에너지 밀도 함수로 표현된다.

$$W=\sum_{i,j=0}^{N=2} C_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j \quad \cdots\cdots \text{식(2)}$$

또한 TPU 소재의 정확한 동특성 구현을 위해 점탄성(Viscoelastic) 모델이 적용되었다. 점탄성 특성은 식(3)와 같이 응력 이완 곡선의 프로니 급수(Prony Series)로 표현할 수 있다.

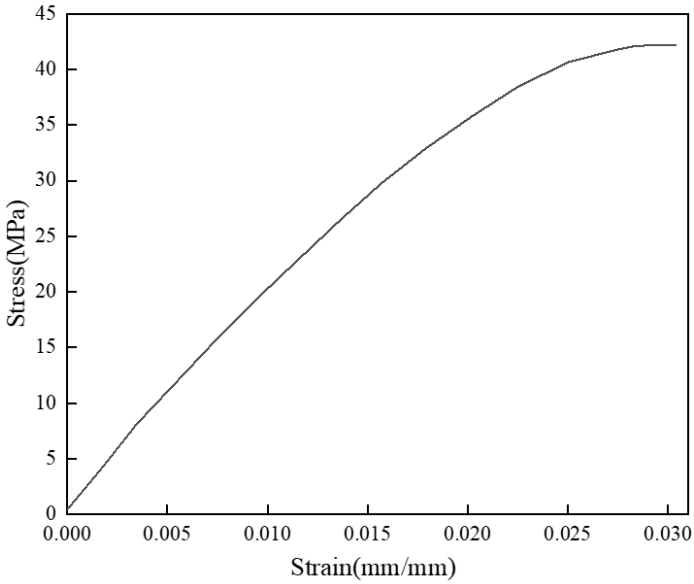
$$\sigma(t)=\sigma_0(1-\sum_{i=1}^{N}\alpha_i(1-e^{-\frac{t}{\beta_i}})) \quad \cdots\cdots \text{식(3)}$$

TPU 소재의 초탄성 물성치는 Y. Wang et al[15]의 연구, 점탄성 물성치는 L. Bartolome[16]의 연구를 참고하였다. TPU 소재의 응력-변형률 선도는

15) Y. Wang et al. (2020). "Simplification of Hyperelastic Constitutive Model and Finite Element Analysis of Thermoplastic Polyurethane Elastomers", Macromolecular Theory and Simulations, vol. 29, no. 4, p. 2000009.

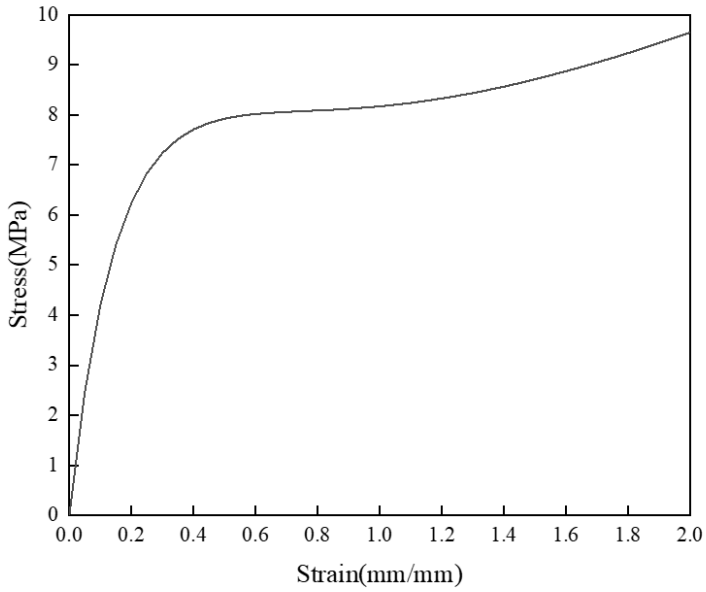
16) L. Bartolomé, A. Aginagalde, A. B. Martínez, M. A. Urchegui, and W. Tato. (2013). “EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND MODELLING OF LARGE-STRAIN VISCOELASTIC BEHAVIOR OF A THERMOPLASTIC POLYURETHANE ELASTOMER”, Rubber Chemistry and Technology, vol. 86, no. 1, pp. 146-164.

[그림 2-4]와 같으며 TPU 소재의 응력 이완 곡선은 [그림 2-5]와 같다. 또한 구조체에 적용되는 하드 타입 소재인 ABS 소재의 물성치는 İ. Özen et al 의 연구를 참고 하여 일반 탄성 모델이 적용되었다.[5] 또한 본 연구의 보호물에 적용되는 소재는 대퇴부 치밀골[17]로 일반 탄성 모델이 적용되었다. 본 연구에 사용된 소재의 물성치를 정리하면 [표 2-1]과 같다.

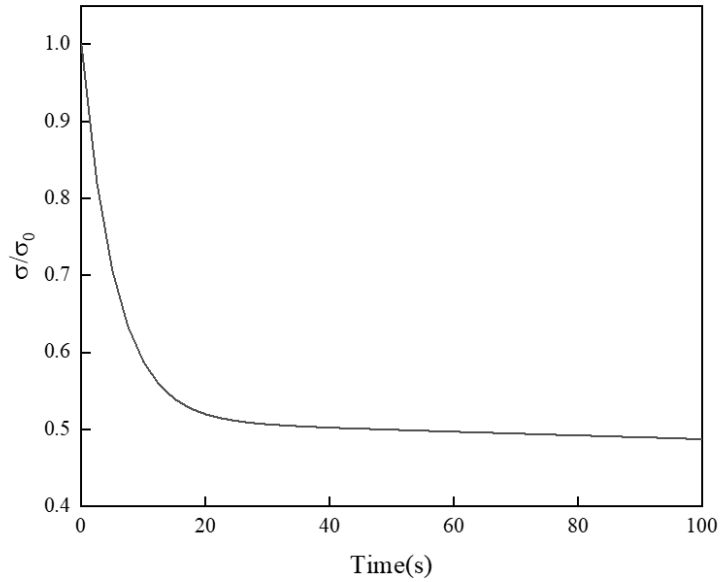


[그림 2-3] ABS 소재의 응력-변형률 선도[5]

17) E. Budyn, T. Hoc, and J. Jonvaux. (2008). "Fracture strength assessment and aging signs detection in human cortical bone using an X-FEM multiple scale approach", Computational Mechanics, vol. 42, pp. 579-591.



[그림 2-4] TPU 소재의 응력-변형률 선도[15)]



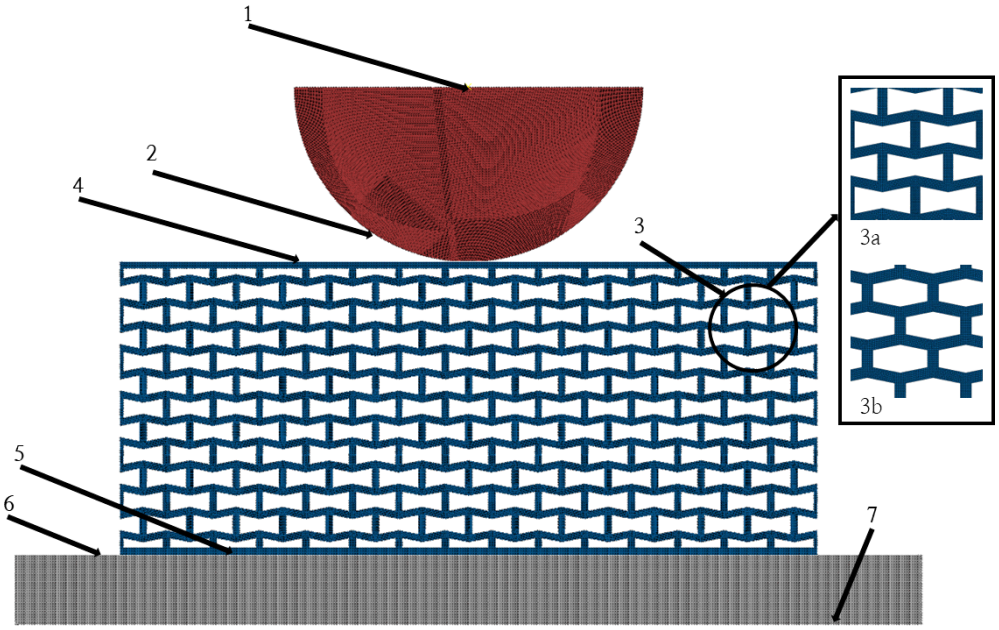
[그림 2-5] TPU 소재의 응력 이완 곡선[16)]

<table>
<tr><td rowspan="5">TPU</td><td colspan="9">초탄성 물성(MPa)</td></tr>
<tr><td>C00</td><td>C01</td><td>C02</td><td>C10</td><td>C11</td><td>C12</td><td>C20</td><td>C21</td><td>C22</td></tr>
<tr><td>0</td><td>24.36</td><td>0</td><td>-16.5</td><td>0</td><td>0</td><td>4.524</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td>밀도(g/cc)</td><td colspan="8">점탄성 물성</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">α_1</td><td colspan="2">α_2</td><td colspan="2">β_1</td><td colspan="2">β_2</td></tr>
<tr><td>1.2</td><td colspan="2">0.48719</td><td colspan="2">0.18281</td><td colspan="2">5.4532</td><td colspan="2">676.33</td></tr>
<tr><td></td><td>밀도(g/cc)</td><td colspan="4">탄성 계수 (GPa)</td><td colspan="4">포아송 비</td></tr>
<tr><td>ABS</td><td>1.2</td><td colspan="4">1.74</td><td colspan="4">0.35</td></tr>
<tr><td>대퇴부 치밀골</td><td>1.8</td><td colspan="4">13.5</td><td colspan="4">0.3</td></tr>
</table>

[표 2-1] 소재 물성치

제 2 절 해석 모델

본 연구의 유한 요소 해석은 ABAQUS/Explicit-Dynamic을 통해 진행되었다. 해석의 목표는 사람의 낙상 보호를 위한 충격 흡수 구조체의 충격 흡수 성능 평가를 목표로 하고 있다. 이를 위해 구조체 하단에 대퇴부 치밀골 형상을 추가하였다. 낙하 다트의 형상은 N. M. van Schoor et al[10] 의 연구를 참고하여 직경 50mm인 원형이다. 충격 흡수 구조체의 형상은 유닛 구조가 폭, 높이 방향으로 유닛 구조가 단순 반복되는 형상에 같은 두께의 시트(Sheet)가 상단과 하단을 덮은 샌드위치 패널 구조이다. 충격 흡수 구조체의 전체 크기는 폭=100mm, 깊이=100mm, 높이=40mm 이며 구조체의 상대 밀도는 50% 이다. Rib 두께(t)를 조절하여 충격 흡수 구조체의 무게를 동일하게 하였다. 충격 흡수 구조체의 유닛 구조는 유닛 구조의 크기가 w(6.67mm)×l(6.67mm)인 리엔트런트 구조와 허니콤 구조가 적용되었다. 구조체 하단에 위치한 대퇴부 치밀골의 크기는 폭=130mm, 깊이=100mm, 높이= 30mm이다. 추가로 본 연구의 선행 연구인 정석환[11]의 연구에서 진행한 충격 실험 기반 확장 해석을 진행하였다. 정석환[11] 연구의 구조체 크기는 폭=40mm, 깊이=20mm, 높이=40mm 이며, 구조체의 상대 밀도는 20% 이다. [그림 2-6]은 충격 흡수 구조체의 충격 해석을 위한 2차원 유한 요소 모델이다. 해석 조건은 İ. Özen et al[5]의 해석조건을 참고하였다. 낙하 다트는 무게 25kg의 강(Steel)이며 초기 조건으로 초기속도를 변경하여 충격 에너지를 변경하였다. 이 때 다트는 오직 수직방향(Y-axis)으로만 움직이는 경계 조건($U_x = UR = 0$)이 적용되었다. 또한 다트, 구조체, 대퇴부 치밀골 세 대상에 하중 조건으로 중력가속도($-9810 mm/s^2$)이 적용되었다. 충격 해석을 위한 접촉 조건은 [표 2-2]와 같다.



1. 다트 무게 중심
2. 다트 외곽면
3. 충격 흡수 구조체 유닛 구조
4. 충격 흡수 구조체 최상단면
5. 충격 흡수 구조체 최하단면
6. 치밀골 최상단면
7. 치밀골 최하단면

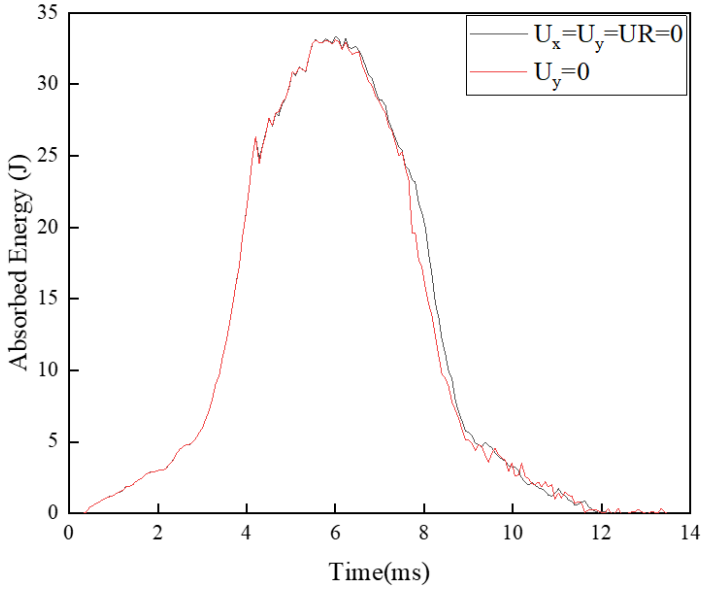
3a. 리엔트런트 구조
3b. 허니콤 구조

[그림 2-6] 충격 흡수 구조체 유한 요소 모델

접촉 영역	접촉 알고리즘
다트 외곽면 - 충격 흡수 구조체 최상단면	Surface to Surface
충격 흡수 구조체 최하단면 - 대퇴부 치밀골 최상단면	
충격 흡수 구조체 내부 구조간 접촉	

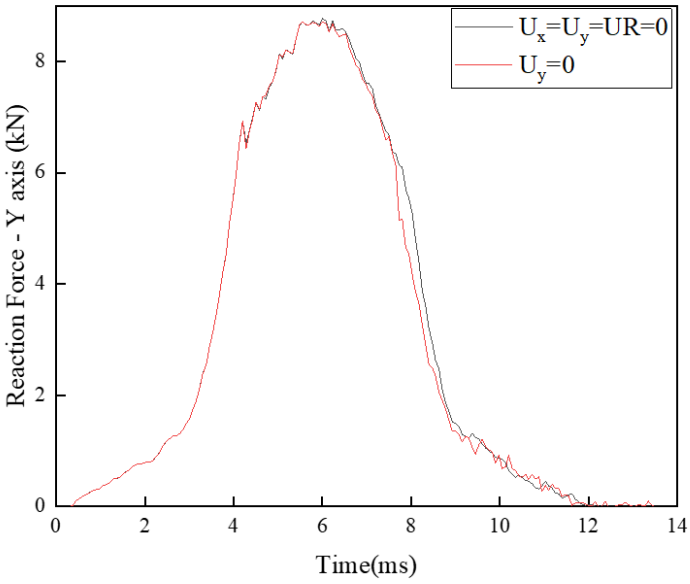
[표 2-2] 접촉 조건

본 연구에서는 대표 케이스인 충격 흡수 구조체가 리엔트런트 구조체인 경우에 대퇴부 치밀골 최하단면에 $U_x = U_y = UR = 0$ 인 경계 조건과 $U_y = 0$인 경계 조건이 적용된 두 해석의 결과를 비교하였다. 두 구조체에 가해지는 충격 에너지는 25kg의 다트가 81.5cm 높이에서 자유 낙하하는 에너지와 같은 200J이다. [그림 2-7]은 두 경계 조건에 따른 흡수 에너지-시간 그래프이며 그래프 확인 결과 두 경계 조건에 따른 대퇴부 치밀골의 흡수 에너지 차이는 거의 없다. [그림 2-8]은 두 경계 조건에 따른 반력-시간 그래프이며 Y방향 반력은 큰 차이가 없으나 X방향 반력은 큰 차이를 보였다. 하지만 X방향 반력의 크기는 Y방향 반력의 크기에 비해 매우 작아 반력의 총합은 큰 차이가 없다. 따라서 두 경계 조건에 따른 흡수 에너지, 충격력 차이는 거의 없다. 이에 본 연구에서는 $U_x = U_y = UR = 0$인 경계 조건으로 해석을 진행하였다.

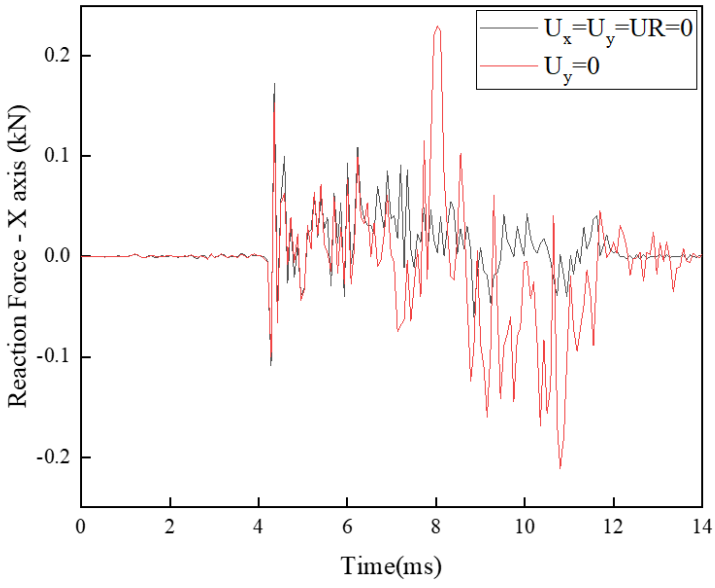


[그림 2-7] 경계 조건별 대퇴부 치밀골의 흡수에너지-시간 그래프

a)



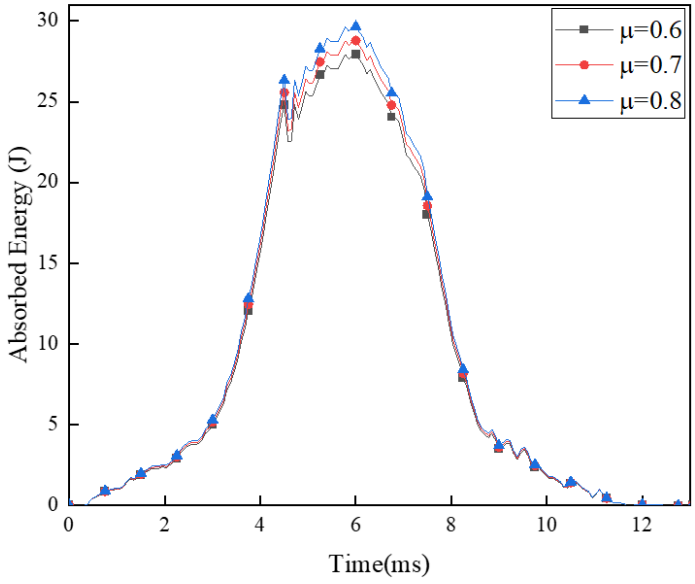
b)



[그림 2-8] 경계 조건별 반력-시간 그래프

a) Y방향 반력 그래프 b) X방향 반력 그래프

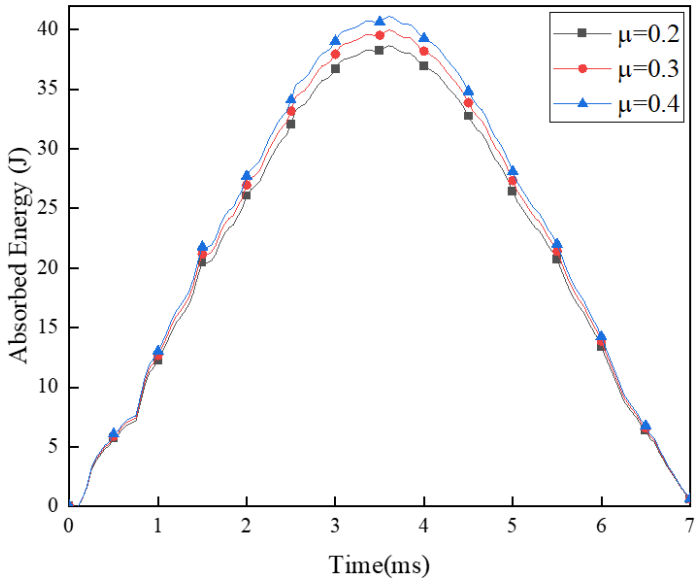
J. M. Farstad, Ø. Netland, and T. Welo[18]은 TPU 소재와 강(Steel) 소재 사이의 동마찰 계수를 측정하였다. TPU 소재와 강 소재 사이의 동마찰 계수는 두 대상의 상대 속도 차이에 따라 0.6 부터 0.8 까지 측정된다. 본 연구의 TPU 소재와 강 소재 사이의 마찰 계수 적용을 위해 0.6, 0.7, 0.8 3종류의 마찰 계수가 적용된 TPU 리엔트런트 구조체의 충격 해석을 진행하였다. 25kg의 다트가 81.5cm에서 자유 낙하하는 에너지와 같은 충격 에너지 200J일 때 결과는 [그림 2-9]와 같다. 해석 결과 3종류의 마찰 계수에 따른 대퇴부 치밀골의 흡수 에너지는 큰 차이를 보이지 않았다. 이에 본 연구에서는 TPU 소재와 강 소재 사이의 마찰 계수로 평균값인 0.7로 설정하였다.



[그림 2-9] TPU 리엔트런트 구조체의 마찰 계수별 대퇴부 치밀골의 흡수 에너지-시간 그래프

18) J. M. Farstad, Ø. Netland, and T. Welo. (2017). "Surface Friction of Rapidly Prototyped Wheels from 3D-Printed Thermoplastic Elastomers: An Experimental Study", *Procedia CIRP,* vol. 60, pp. 247-252.

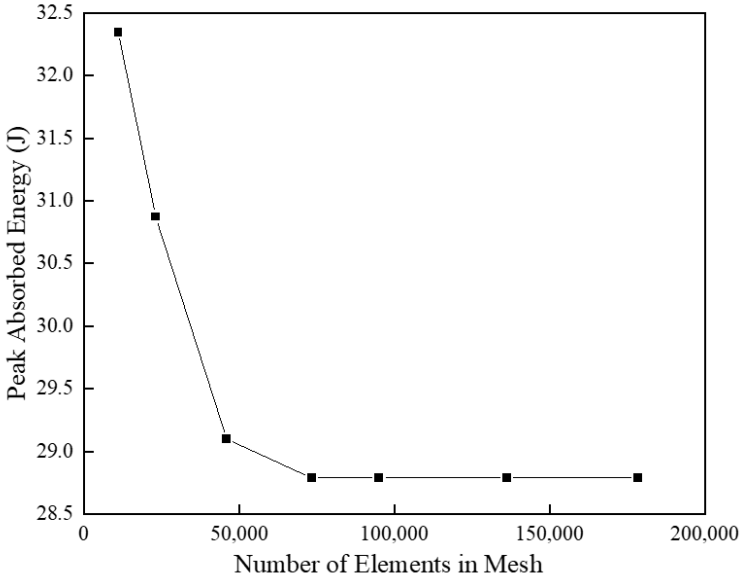
M. Tasdemir, V. Babat, and U. Yerlesen[19]의 연구에서 ABS와 강 이의 마찰 계수 0.2~0.4로 측정되었다. ABS와 강 사이의 마찰 계수 적용을 위해 0.2, 0.3, 0.4 3종류의 마찰 계수가 적용된 ABS 리엔트런트 구조체의 충격 해석을 진행하였다. 25kg의 다트가 81.5cm에서 자유 낙하하는 에너지와 같은 충격 에너지 200J 일 때 결과는 [그림 2-10]과 같다. 해석 결과 3종류의 마찰 계수에 따른 대퇴부 치밀골의 흡수 에너지는 큰 차이를 보이지 않았다. 이에 본 연구에서는 ABS와 강 사이의 마찰 계수로 평균값인 0.3로 설정하였다.



[그림 2-10] ABS 리엔트런트 구조체의 마찰 계수별 대퇴부 치밀골의 흡수 에너지-시간 그래프

19) M. Tasdemir, V. Babat, and U. Yerlesen. (2014). "Effect of friction and wear parameters on acrylonitrile butadiene styrene/aluminum-boron carbide-glass spheres polymer composites" *Mechanics,* vol. 20.

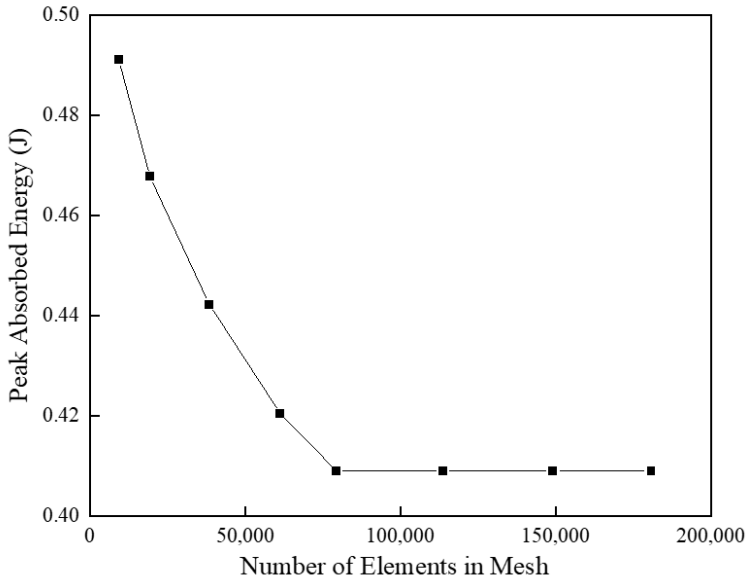
본 연구에서 진행한 유한 요소 해석은 근사적인 수치해석 방법이므로 해석의 Elements 수에 따라 오차가 발생한다. 이에 25kg의 다트가 81.5cm에서 자유 낙하하는 에너지와 같은 충격 에너지 200J 일 때 총 Elements 수에 따른 대퇴부 치밀골의 최대 흡수 에너지를 비교하였다. 총 Elements 수는 다트, 구조체, 대퇴부 치밀골의 Elements 수의 총합이다. [그림 2-11]은 TPU 리엔트런트 구조체의 크기가 폭(100mm)×깊이(100mm)×높이(40mm)일 때 총 Elements 수에 따른 대퇴부 치밀골의 최대 흡수 에너지 그래프이다.



[그림 2-11] 구조체 크기(100mm×100mm×40mm)일 때 총 Elements 수에 따른 대퇴부 치밀골의 최대 흡수 에너지 그래프

TPU 리엔트런트 구조체의 크기가 폭(100mm)×깊이(100mm)×높이(40mm)일 때 다트, 구조체, 대퇴부 치밀골의 총 Elements 수가 약 90,000개 이후부터 최대 흡수 에너지가 28.79J로 수렴하였다. 이후 구조체의 크기가 폭(100mm)×깊이(100mm)×높이(40mm)인 구조체의 해석은 Elements 수 약 90,000개로 유지되어 수행되었다.

또한 520g의 다트가 30cm에서 자유 낙하하는 에너지와 같은 충격 에너지 1.5J일 때 [그림 2-12]은 TPU 리엔트런트 구조체의 크기가 폭(40mm)×깊이(20mm)×높이(40mm)일 때 총 Elements 수에 따른 대퇴부 치밀골의 최대 흡수 에너지 그래프이다.



[그림 2-12] 구조체 크기(40mm×40mm×20mm)일 때 총 Elements 수에 따른 대퇴부 치밀골의 최대 흡수 에너지 그래프

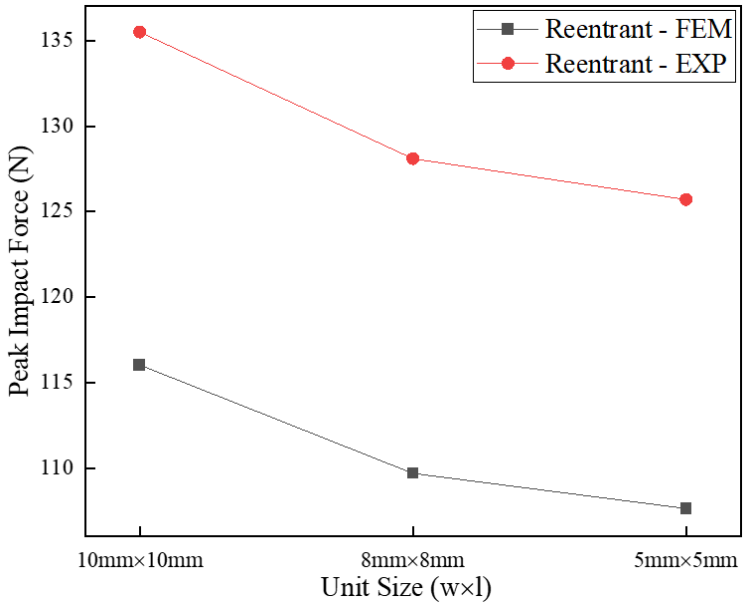
TPU 리엔트런트 구조체의 크기가 폭(40mm)×깊이(20mm)×높이(40mm)일 때 다트, 구조체, 대퇴부 치밀골의 총 Elements 수가 약 80,000개 이후부터 최대 흡수 에너지가 0.409J로 수렴하였다. 이후 구조체의 크기가 폭(40mm)×깊이(20mm)×높이(40mm)인 구조체의 해석은 Elements 수 약 80,000개로 유지되어 수행되었다.

제 3 절 충격력 및 흡수 에너지 계산 방법

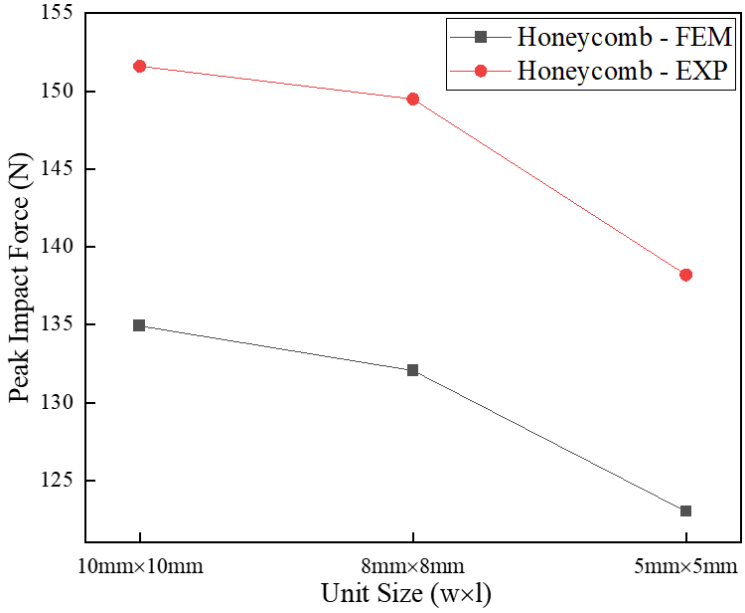
1) 충격력 계산 방법

충격력 계산 방법의 검증은 구조체 크기(40mm×20mm×40mm)의 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체에 520g의 다트가 30cm(충격 에너지 1.5J)에서 자유낙하 하는 충격 실험과 동일한 해석 결과 비교를 통해 진행되었다. 구조체의 상대 밀도는 20%이다. 유닛 구조의 크기는 10mm×10mm, 8mm×8mm, 5mm×5mm 총 세 종류 이다. [그림 2-13]은 충격 흡수 구조체 유닛 구조 크기별 충격 실험 및 해석 결과 이다. 구조체 크기(40mm×20mm×40mm)의 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 실험 결과 TPU 리엔트런트 구조체는 10mm×10mm 리엔트런트 구조체의 최대 충격력을 기준으로 유닛 구조의 크기가 8mm×8mm인 리엔트런트 구조체는 94%, 5mm×5mm인 리엔트런트 구조체는 92%로 유닛 구조의 크기가 작을수록 최대 충격력이 낮아진다. 허니콤 구조체는 10mm×10mm 허니콤 구조체의 최대 충격력을 기준으로 유닛 구조의 크기가 8mm×8mm인 허니콤 구조체는 98%, 5mm×5mm인 허니콤 구조체는 91%로 리엔트런트 구조와 같이 유닛 구조의 크기가 작을수록 최대 충격력이 낮아진다. 반면에 해석 결과 TPU 리엔트런트 구조체는 정석환의 실험 결과보다 평균 14%낮은 최대 충격력을 보였고 TPU 허니콤 구조체는 평균 11% 낮은 최대 충격력을 보였다. 하지만 TPU 리엔트런트 구조체의 해석 결과 10mm×10mm 리엔트런트 구조체의 최대 충격력을 기준으로 8mm×8mm, 5mm×5mm 리엔트런트 구조체의 최대 충격력은 94%, 92%이며 TPU 허니콤 구조체의 해석 결과 10mm×10mm 허니콤 구조체의 최대 충격력을 기준으로 8mm×8mm, 5mm×5mm 허니콤 구조체의 최대 충격력은 98%, 91%로 유닛 구조의 크기가 작아질수록 최대 충격력이 감소하는 비율은 충격 실험과 유사한 결과를 보였다.

a)



b)

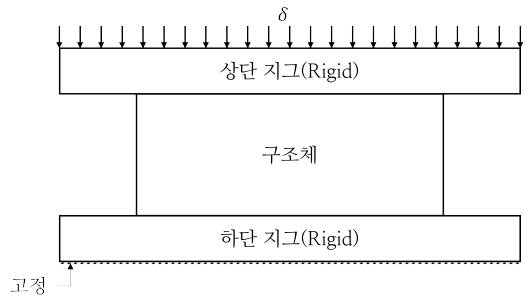


[그림 2-13] 충격 흡수 구조체 유닛 구조 크기별 충격 실험 및 해석 결과

a) 리엔트런트 구조체 비교 결과 b) 허니콤 구조체 비교 결과

2) 흡수 에너지 계산 방법

본 연구에서 구조체 및 대퇴부 치밀골의 흡수 에너지는 구조체 및 대퇴부 치밀골의 각 Element에 발생한 변형 엔너지(Strain Energy)의 총합으로 계산하였다. 충격 에너지 계산 방법의 검증은 T. Li, Y. Chen, X. Hu, Y. Li, and L. Wang[20]의 실험 결과와 비교를 통해 진행하였다. T. Li, Y. Chen et al[20]은 소프트 소재인 VeroWhite와 TangoPlus로 구성된 복합 소재로 제작된 포아송 비별 리엔트런트 구조체의 정적 압축 실험을 통해 각 구조체의 단위 체적당 에너지 흡수율을 측정하였다. 이에 본 연구의 주 대상인 구조체 크기가 폭(100mm)×깊이(100mm)×높이(40mm)인 포아송 비별 TPU 리엔트런트 구조체의 정적 압축 실험 해석을 진행 하였다. 해석 방법은 [그림 2-14]와 같이 강체인 상하단 지그사이에 위치한 구조체를 상단 지그가 $\epsilon = 0.2$ 인 δ =8mm 압축 시키는 방식이다. 이 때 하단 지그의 변위는 고정되어 있다.



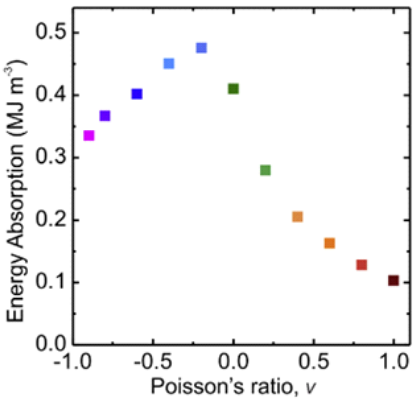
[그림 2-14] 정적 압축 실험 해석 방법[20]

[그림 2-15]는 포아송 비 별 정적 압축 실험 및 해석 결과이다. [그림 2-15]a 그래프는 T. Li, Y. Chen et al[20]의 실험 결과이며 포아송 비가 ν =-0.9에서 포아송 비가 증가할수록 높은 에너지 흡수율을 보이다 ν=-0.2에서 0.48MJ/m^{3}의 최대 에너지 흡수율을 보인 후 포아송 비가 증가할수록 에너지 흡수율이 낮아진다. 반면 정적 압축 해석 결과 포아송 비 ν=-0.2 에너

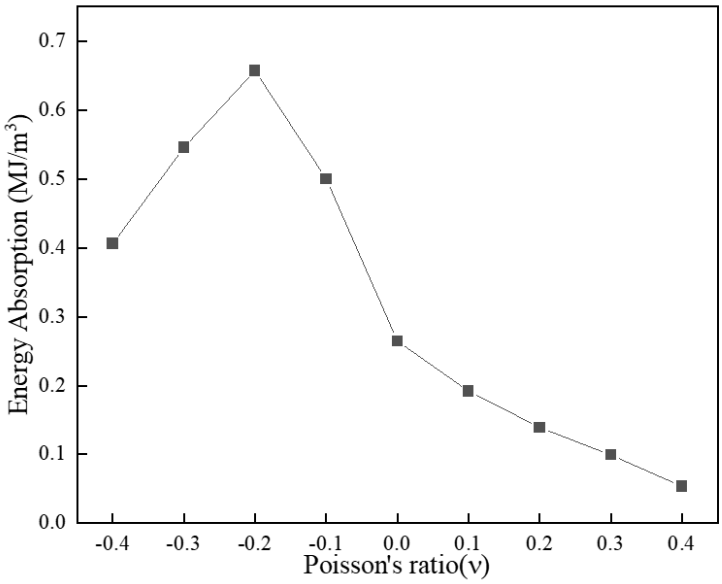
20) T. Li, Y. Chen, X. Hu, Y. Li, and L. Wang. (2018). "Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties", Materials & Design, vol. 142, pp. 247-258.

지 흡수율 기준으로 35% 높은 0.65MJ/m^{3}의 에너지 흡수율을 보였다. 하지만 T. Li, Y. Chen et al[20]의 실험과 같이 포아송 비 ν=-0.2에서 최대 에너지 흡수율을 보인 후 포아송 비가 증가할수록 에너지 흡수율이 낮아지는 유사한 결과를 보였다.

a)



b)

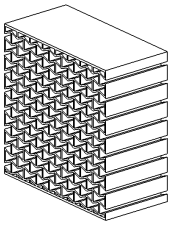


[그림 2-15] 포아송비 별 정적 압축 실험 및 해석 결과

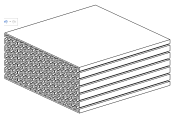
a) T. Li, Y. Chen et al의 실험 결과[20] b) 정적 압축 실험 해석 결과

제 4 절 해석 케이스

본 연구에서 수행한 해석 케이스는 다음과 같다.

구조체 크기 폭× 깊이× 높이	구조 형상 (포아송 비)	소재	충격 에너지 (J)
 40mm × 20mm × 40mm	리엔트런트 ($\nu=-0.2$)	TPU	0.75 0.80 0.85 0.90
		ABS	0.95 1.00 1.05 1.11
	허니콤 ($\nu=0.2$)	TPU	1.15 1.20 1.25 1.30
		ABS	1.35 1.40 1.45 1.50

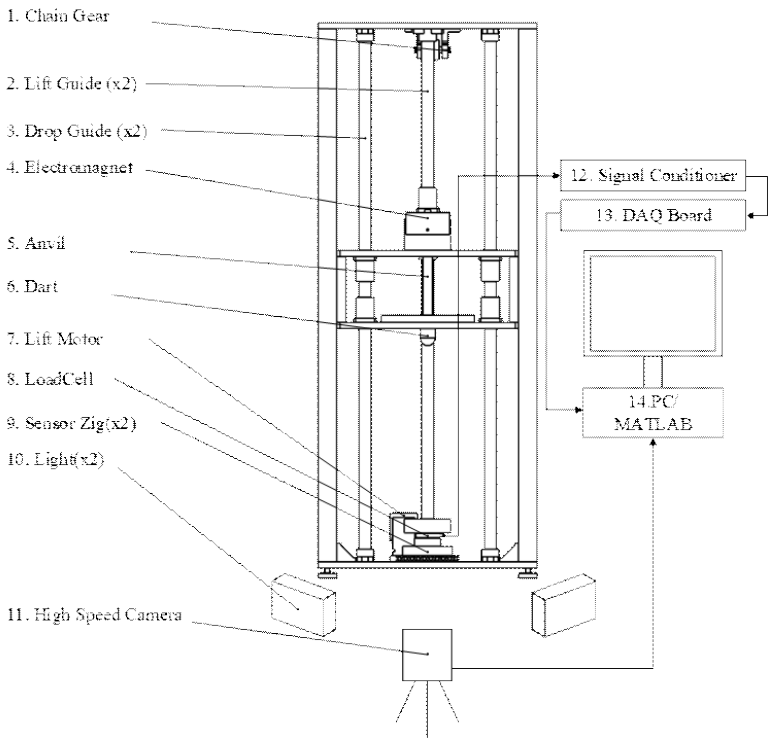
[표 2-3] 구조체 크기(40mm×20mm×40mm) 해석 케이스

구조체 크기 폭× 깊이× 높이	구조 형상 (포아송 비)	소재	충격 에너지 (J)
 100mm × 100mm × 40mm	리엔트런트 ($\nu=-0.2$)	TPU	12 – 스포츠용 무릎 보호대[6] 25
		ABS	50 – 오토바이용 등 보호대[7] 75
	허니콤 ($\nu=0.2$)	TPU	100 125 – 오토바이용 헬멧[8] 150
		ABS	175 200

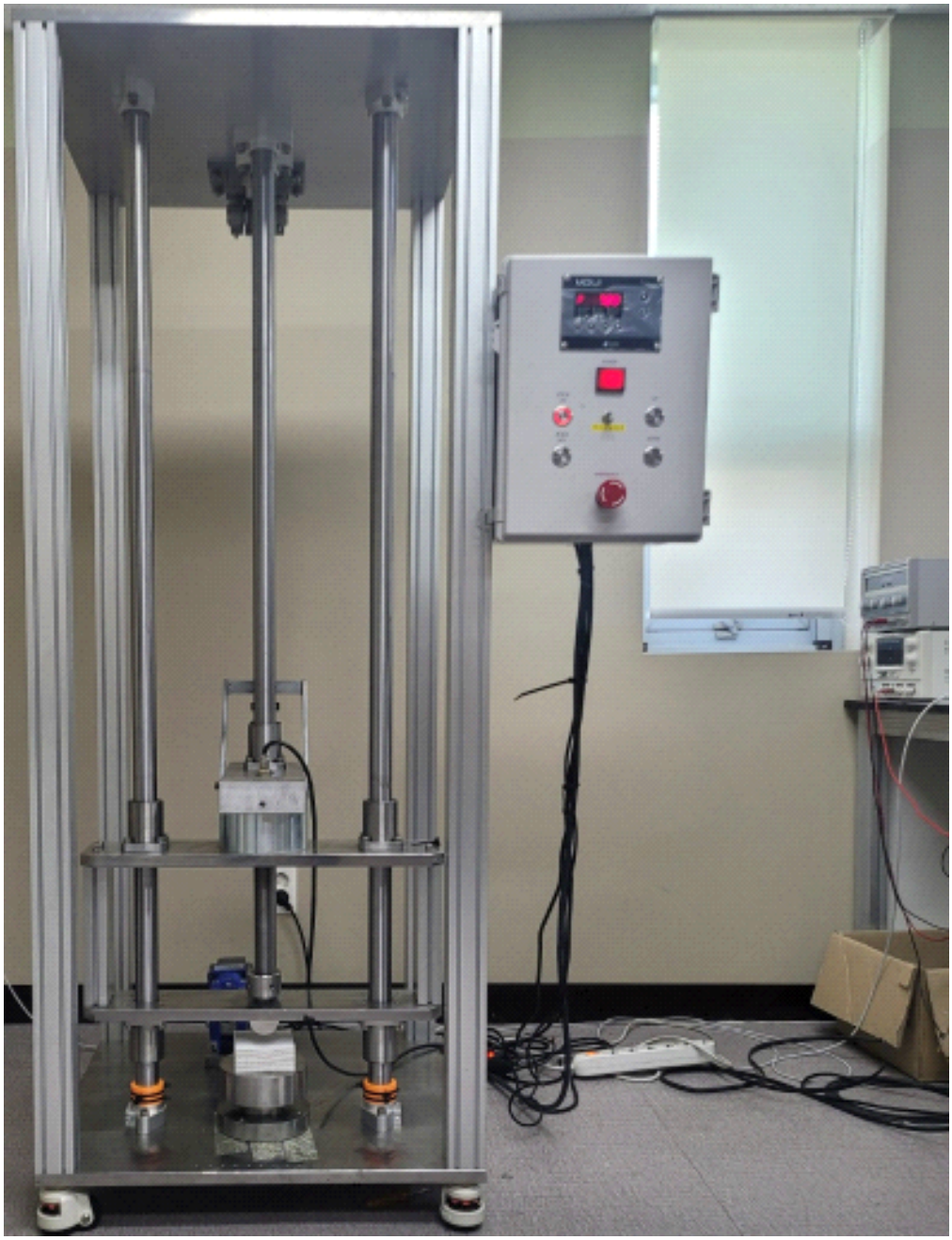
[표 2-4] 구조체 크기(100mm×100mm×40mm) 해석 케이스

제 5 절 실험 방법

본 연구에서는 구조체의 크기가 폭(100mm)×깊이(100mm)×높이(40mm)인 TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체에 12J, 50J, 125J, 200J의 충격 에너지가 가해지는 충격 실험을 진행하였다. [그림 2-16]은 충격 실험 모식도이다. 무게 추와 다트의 총 무게 합은 25kg이다. TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체에 가해지는 충격 에너지는 전자석을 통해 무게 추와 다트를 수직 상승시킨 후 4.9cm(12J), 20.4cm(50J), 51cm(125J), 81.5cm(200J) 높이에서 자유 낙하하는 방식으로 가해진다. 무게 추와 다트는 낙하 가이드에 의해 오로지 수직 방향으로 자유 낙하 한다. 다트의 형상은 직경 50mm의 원통형이다. 충격 실험 데이터는 MATLAB을 통해 측정되며 샘플링 레이트는 100kHz이다. 충격 실험 과정은 고속카메라를 통해 10,000fps의 셔터 속도로 촬영되었다.



[그림 2-16] 충격 실험 모식도



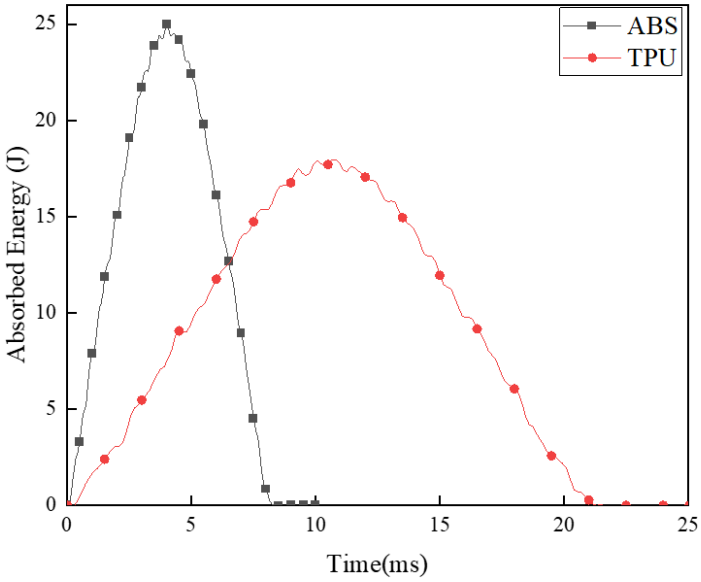
[그림 2-17] 충격 실험 사진

제 3 장 해석 결과

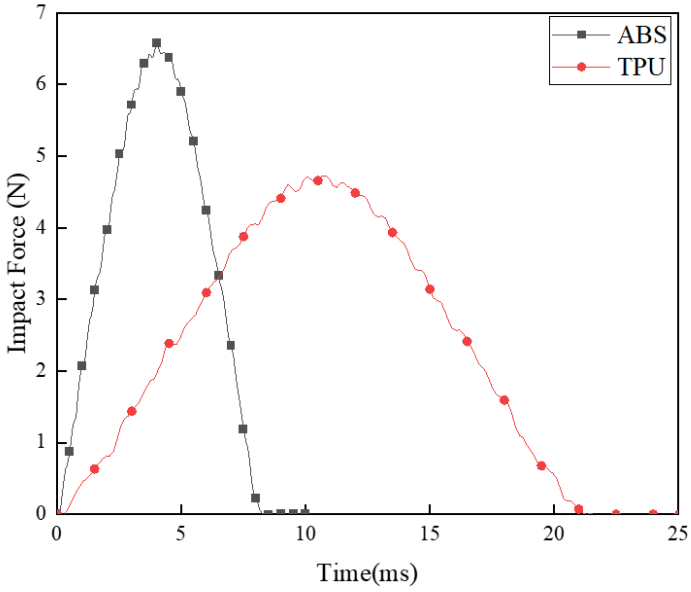
제 1 절 점탄성 특성에 따른 충격 흡수 성능

점탄성 특정에 따른 충격 흡수 성능을 확인하기 위해 점탄성 특성이 적용된 TPU 소재와 점탄성 특성이 적용되지 않은 ABS 소재로 구성된 리엔트런트 구조체의 충격 해석을 진행하였다. 충격 에너지는 25kg의 낙하 다트가 30cm에서 자유 낙하하는 에너지와 같은 75J이다. [그림 3-1]은 ABS/TPU 리엔트런트 구조체의 시간에 따른 흡수 에너지 및 충격력 그래프이다. TPU 리엔트런트 구조체의 최대 충격력은 4.7kN이다. ABS 리엔트런트 구조체의 최대 충격력은 6.6kN이다. TPU 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 충격 에너지 75J에 비해 76% 감소된 18J이며, ABS 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 충격 에너지 75J에 비해 67% 감소된 25J이다. TPU 리엔트런트 구조체가 ABS 리엔트런트 구조체보다 더 많은 충격 에너지를 감소하였다. 또한 TPU 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력을 보인 충돌 시간은 10.8ms이며, 총 충돌 시간은 21.6ms이다. ABS 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력을 보인 충돌 시간은 0ms이며, 총 충돌 시간은 8ms이다. 이러한 결과는 점탄성 효과로 인한 충돌 시간 지연으로 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 낮아 지는 것으로 보인다. 하지만 점탄성 특성에 따른 충격 흡수 성능 연구는 추후에 더 많은 소재의 점탄성 물성 확보 후 추가 해석을 진행하여 검증할 필요가 있다.

a)



b)



[그림 3-1] ABS/TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답

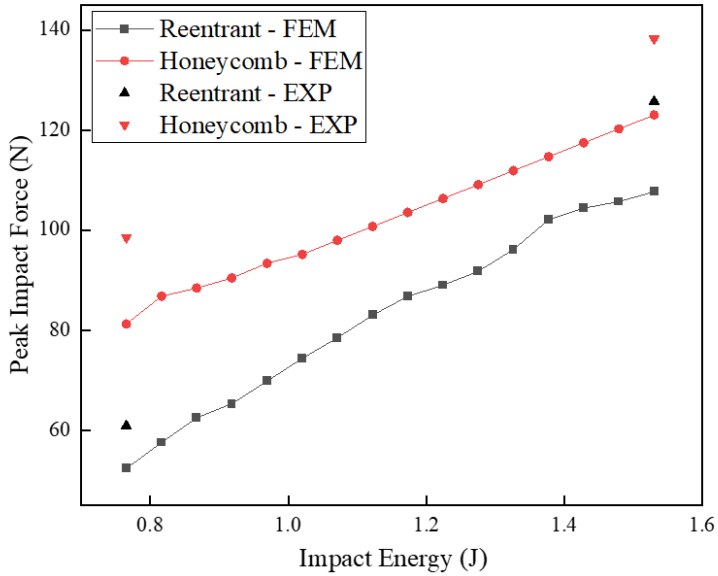
a) ABS/TPU 리엔트런트 구조체의 시간에 따른 흡수 에너지 그래프

b) ABS/TPU 리엔트런트 구조체의 시간에 따른 충격력 그래프

제 2 절 TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체 충격 해석 결과

1) TPU 구조체(40mm×20mm×40mm)의 구조별 충격력 비교

TPU 구조체(40mm×20mm×40mm)에 520g의 다트를 높이 15, 30cm(충격에너지 0.75, 1.5J)에서 자유 낙하 시키는 충격 실험 결과 리엔트런트 구조체가 허니콤 구조체 보다 낮은 최대 충격력을 보였다. 이에 본 연구에서는 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체(40mm×20mm×40mm)에 520g의 다트가 충격에너지 0.75~1.5J이 가해지는 충격 해석을 진행하였다. [그림 3-2]는 충격에너지별 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체의 최대 충격력 그래프이다. 충격 에너지 0.75J 일 때 리엔트런트 구조체의 해석 결과는 실험 결과 보다 14%낮은 최대 충격력을, 허니콤 구조체는 18% 낮은 최대 충격력을 보였다. 충격에너지 1.5J 일 때 리엔트런트 구조체의 해석 결과는 실험 결과 보다 14%낮은 최대 충격력을, 허니콤 구조체는 11% 낮은 최대 충격력을 보였다.



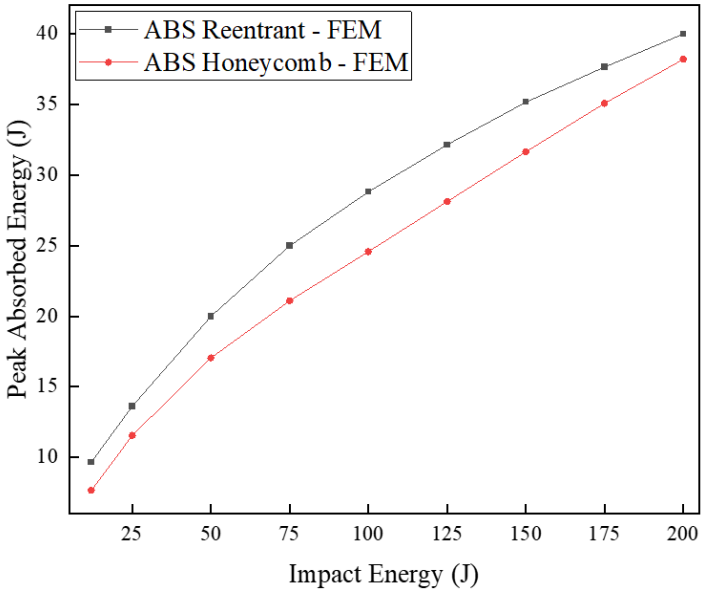
[그림 3-2] TPU 리엔트런트/허니콤 구조체(40mm×20mm×40mm)의 충격에너지별 최대 충격력 그래프

2) ABS 구조체(100mm×100mm×40mm)의 구조별 흡수 에너지 및 충격력 비교

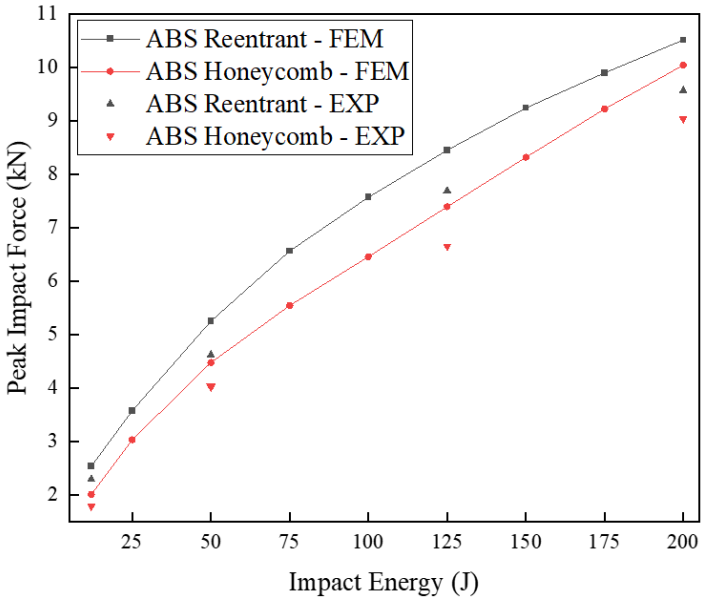
구조체의 크기가 폭(40mm)×깊이(20mm)×높이(40mm)인 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체에 충격 에너지 0.75~1.5J이 가해지는 충격 해석에서는 리엔트런트 구조체가 허니콤 구조체보다 낮은 최대 충격력을 보였다. 그런데 ABS 구조체의 크기가 폭(100mm)×깊이(100mm)×높이(40mm)인 리엔트런트/허니콤 구조체에 충격에너지 12~200J이 가해지는 충격 해석 결과 ABS 허니콤 구조체가 ABS 리엔트런트 구조체보다 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 낮았다. 충격 에너지가 12J일 때 ABS 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 9.67J, 최대 충격력은 2.5kN 이며 ABS 허니콤 구조체의 최대 흡수 에너지는 7.657J, 최대 충격력은 2kN으로 ABS 허니콤 구조체가 ABS 리엔트런트 구조체 보다 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 21% 더 낮았다. 충격 에너지가 50J일 때 ABS 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 20J, 최대 충격력은 5.3kN 이며 ABS 허니콤 구조체의 최대 흡수 에너지는 17J, 최대 충격력은 4.5kN으로 ABS 허니콤 구조체가 ABS 리엔트런트 구조체 보다 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 15% 더 낮았다. 또한 충격 에너지 125J에 대하여 ABS 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 32J, 최대 충격력은 58.5kN 이며 ABS 허니콤 구조체의 최대 흡수 에너지는 28J, 최대 충격력은 7.4kN으로 ABS 허니콤 구조체가 ABS 리엔트런트 구조체 보다 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 13% 더 낮았다.

또한 ABS 리엔트런트/허니콤 구조체에 25kg의 다트를 높이 5cm, 20cm, 50cm, 80cm(충격 에너지12, 50, 125, 200J)에서 자유 낙하시키는 충격 실험을 수행한 결과는 충격 해석 결과에 비해 충격 에너지 12J, 50J, 125J, 200J 일 때 10% 낮은 최대 충격력을 보였다. ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 해석 및 실험 결과 충격 에너지 12J, 50J, 125J에 대해 6kN, 8kN, 20kN 이하의 최대 충격력을 보여 스포츠용 무릎 보호대[6], 오토바이용 등 보호대[7], 오토바이용 헬멧[8] 충격 시험 규격을 충족하였다.

a)



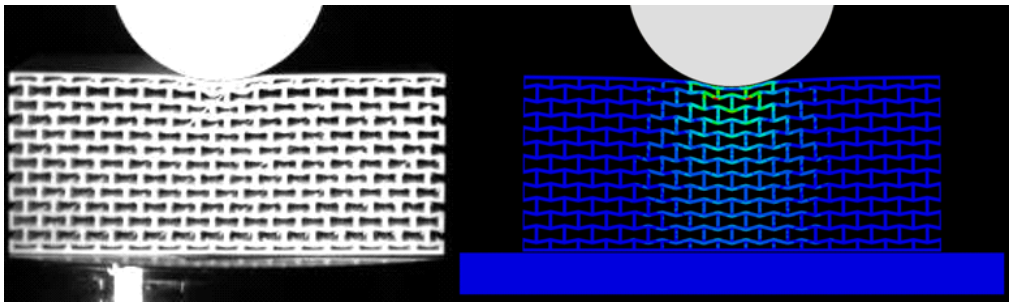
b)



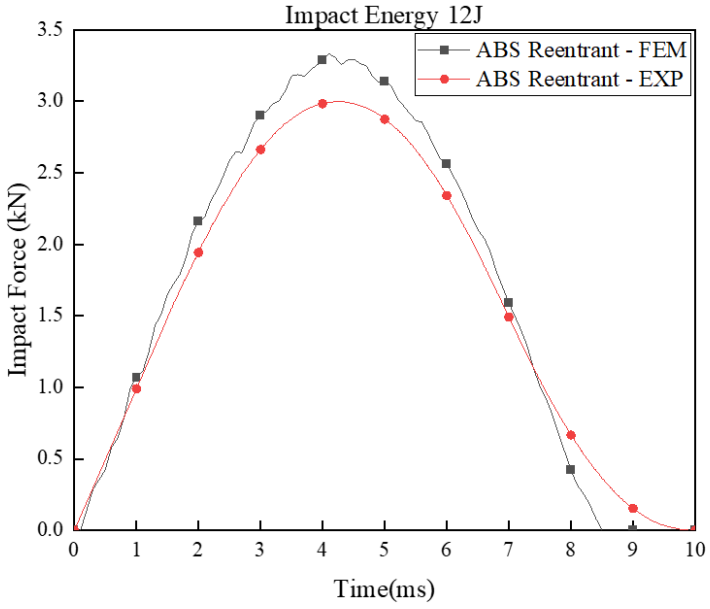
[그림 3-3] ABS 구조체(100mm×100mm×40mm) 충격 해석 결과

a)ABS 구조체의 충격 에너지별 최대 흡수 에너지 그래프

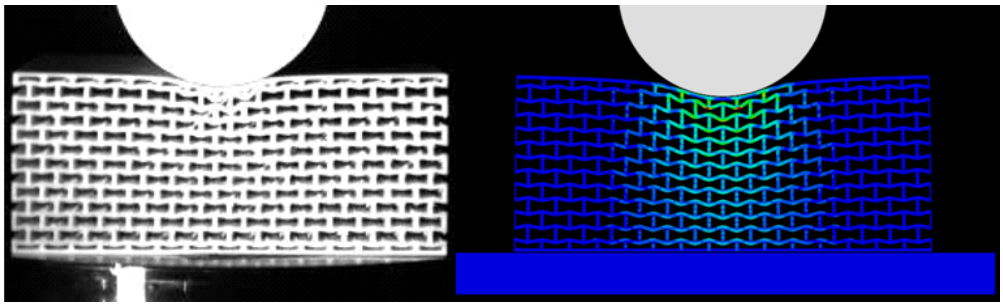
b)ABS 구조체의 충격 에너지별 최대 충격력 그래프



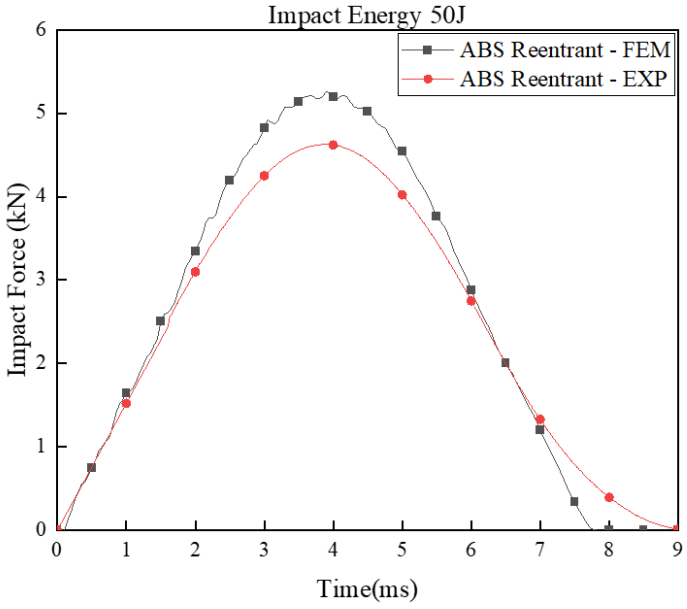
[그림 3-4] ABS 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 12J)
좌) 실험 사진(t=4.2ms), 우) 해석 사진(t=4.1ms)



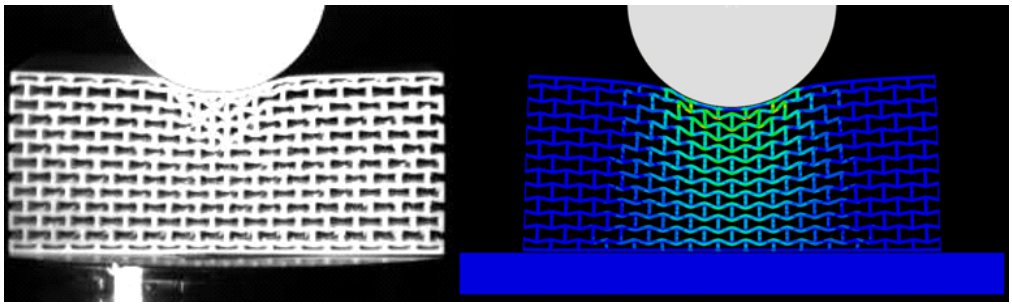
[그림 3-5] ABS 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 12J)



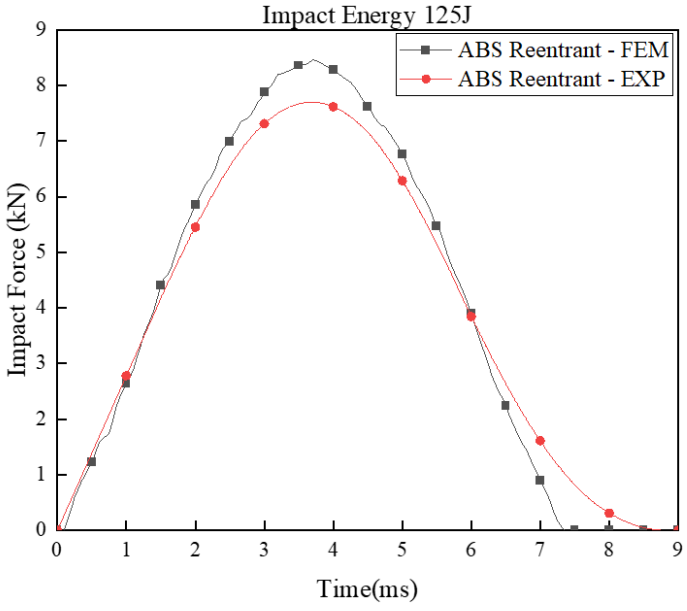
[그림 3-6] ABS 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 50J)
좌) 실험 사진(t=3.9ms), 우) 해석 사진(t=3.9ms)



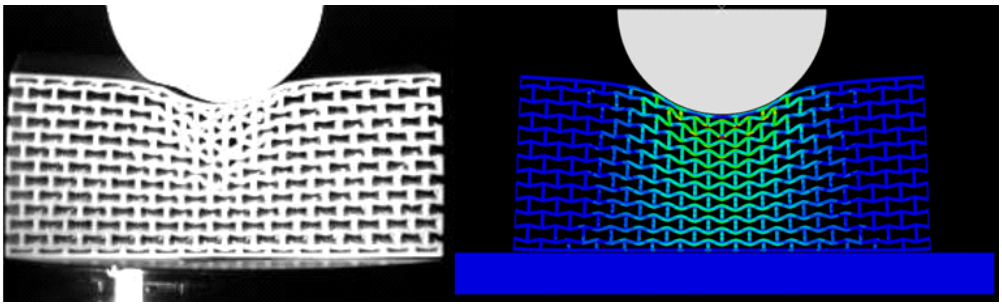
[그림 3-7] ABS 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 50J)



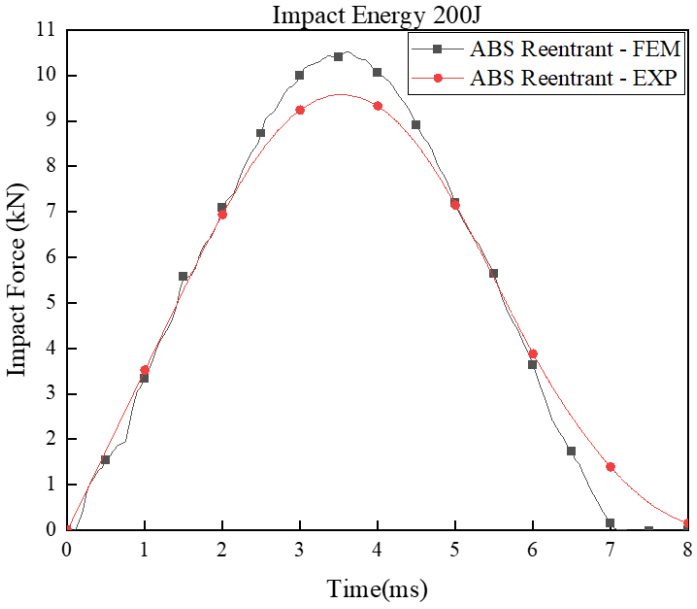
[그림 3-8] ABS 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 125J)
좌) 실험 사진(t=3.7ms), 우) 해석 사진(t=3.7ms)



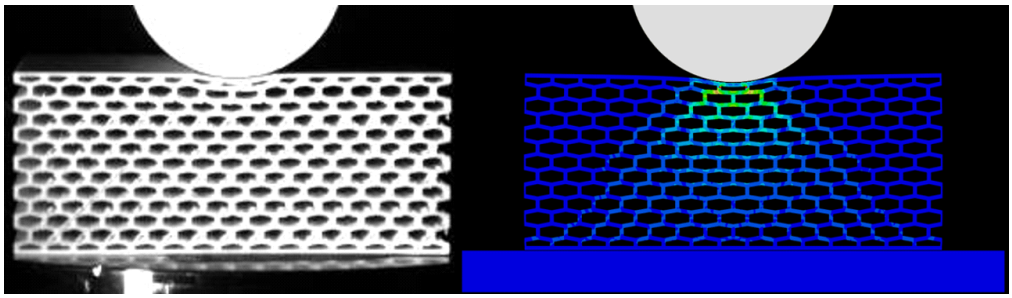
[그림 3-9] ABS 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 125J)



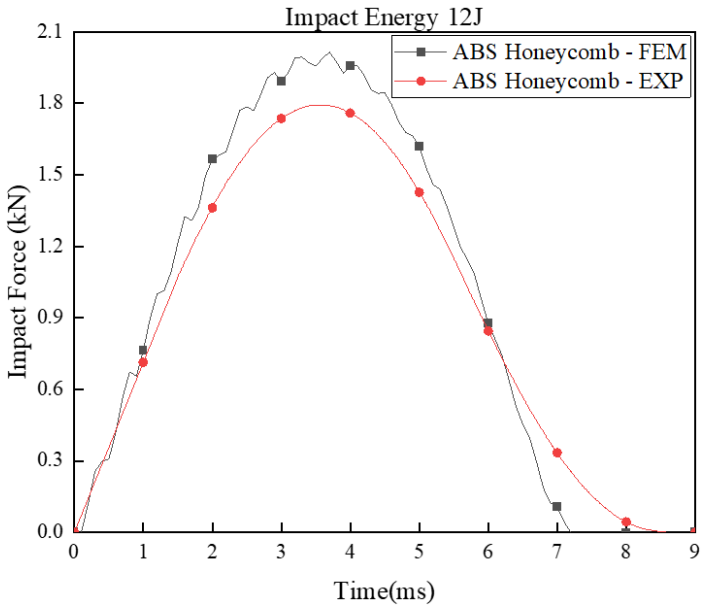
[그림 3-10] ABS 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 200J)
좌) 실험 사진(t=3.6ms), 우) 해석 사진(t=3.6ms)



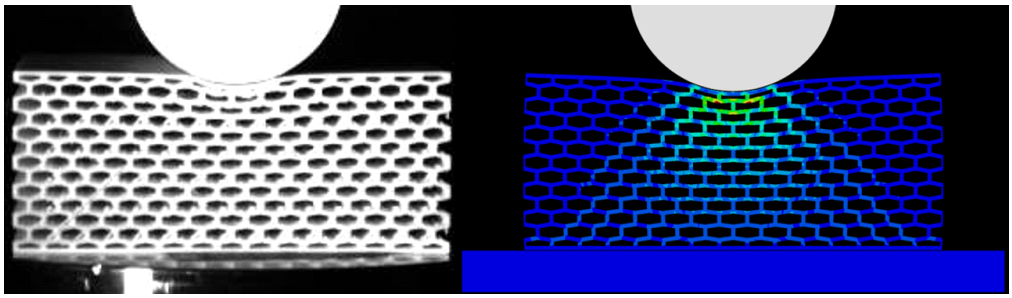
[그림 3-10] ABS 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 200J)



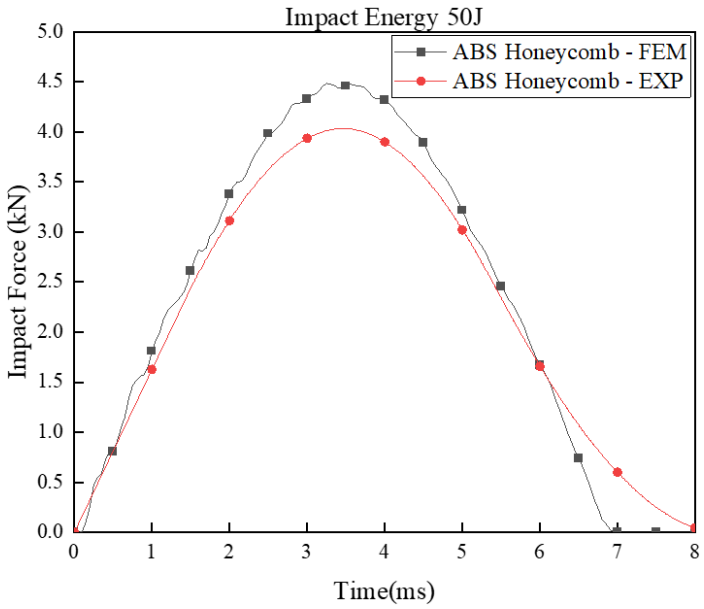
[그림 3-12] ABS 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 12J)
좌) 실험 사진(t=3.6ms), 우) 해석 사진(t=3.7ms)



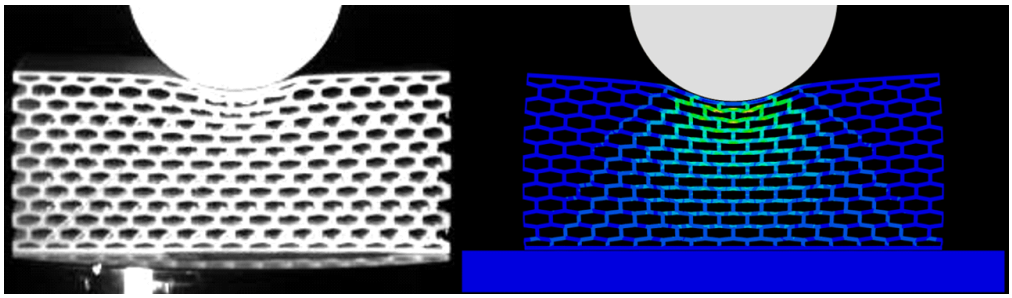
[그림 3-13] ABS 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 12J)



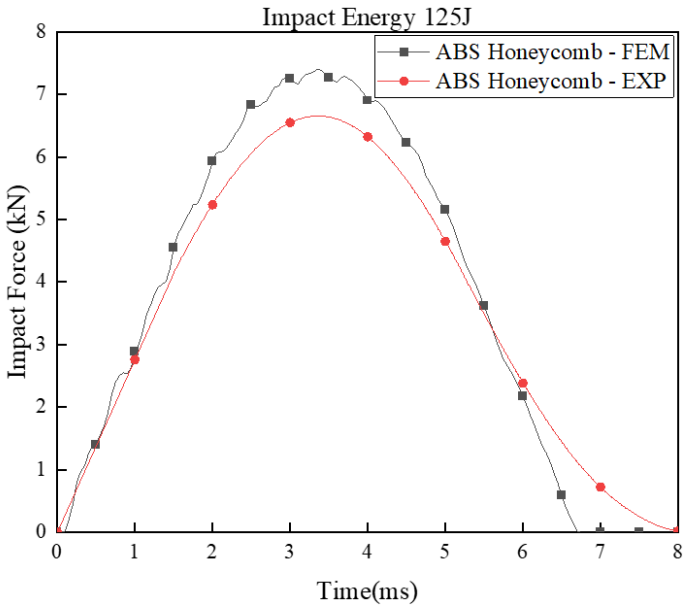
[그림 3-14] ABS 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 50J)
좌) 실험 사진(t=3.5ms), 우) 해석 사진(t=3.4ms)



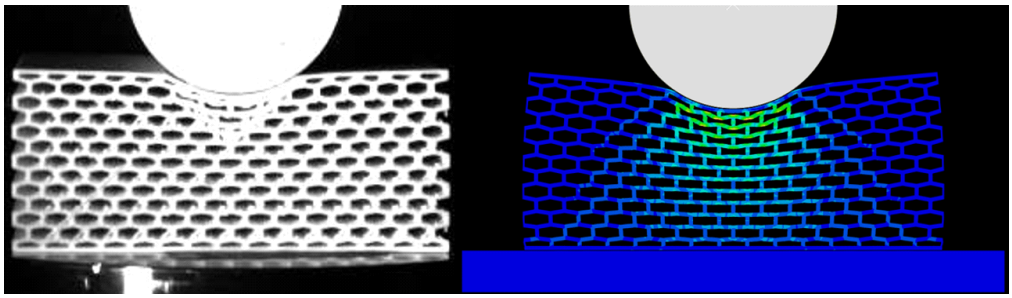
[그림 3-15] ABS 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 50J)



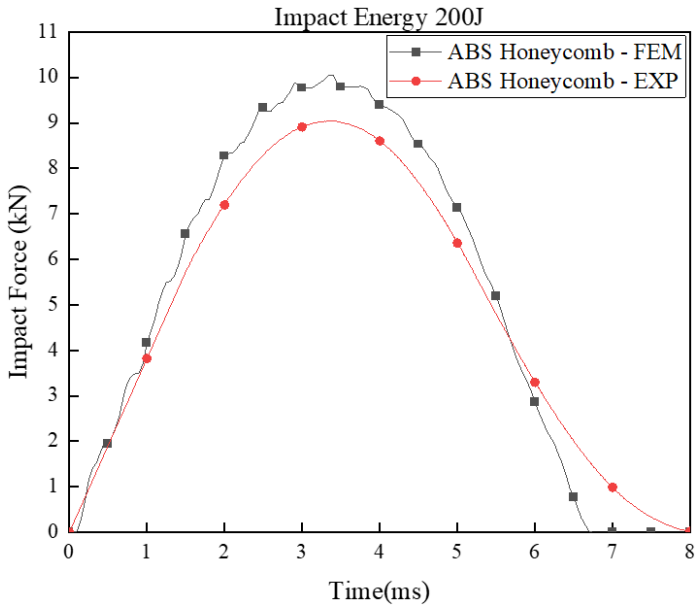
[그림 3-16] ABS 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 125J)
좌) 실험 사진(t=3.3ms), 우) 해석 사진(t=3.3ms)



[그림 3-17] ABS 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 125J)



[그림 3-18] ABS 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 200J)
좌) 실험 사진(t=3.2ms), 우) 해석 사진(t=3.2ms)



[그림 3-19] ABS 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 200J)

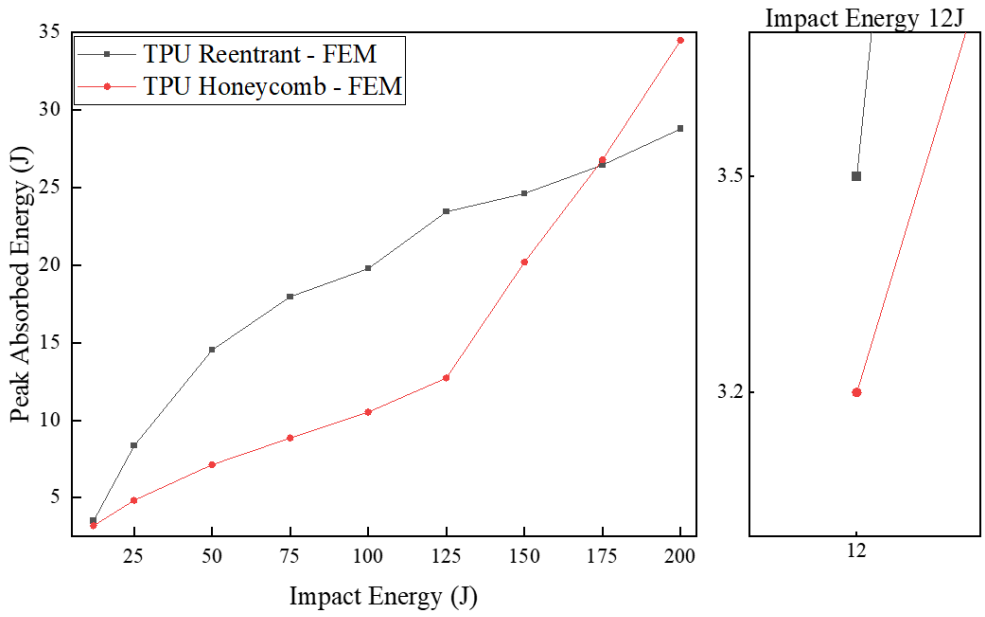
3) TPU 구조체(100mm×100mm×40mm)의 구조별 흡수 에너지 및 충격력 비교

구조체의 크기가 폭(100mm)×깊이(100mm)×높이(40mm)인 TPU로 구성된 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 에너지별 충격 해석을 수행하였다. 충격 에너지가 12J일 때 TPU 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 3.5J, 최대 충격력은 0.92kN 이며 TPU 허니콤 구조체의 최대 흡수 에너지는 3.2J, 최대 충격력은 0.84kN으로 TPU 허니콤 구조체가 TPU 리엔트런트 구조체 보다 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 9% 더 낮았다. 충격 에너지가 50J일 때 TPU 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 14.57J, 최대 충격력은 3.8kN 이며 TPU 허니콤 구조체의 최대 흡수 에너지는 7.1J, 최대 충격력은 1.87kN으로 TPU 허니콤 구조체가 TPU 리엔트런트 구조체 보다 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 51% 더 낮았다. 또한 충격 에너지 125J에 대하여 TPU 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 23.5J, 최대 충격력은 6.13kN 이며 TPU 허니콤 구조체의 최대 흡수 에너지는 12.73J, 최대 충격력은 3.35kN으로 TPU 허니콤 구조체가 TPU 리엔트런트 구조체 보다 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 45% 더 낮았다. 앞선 ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 해석과 같이 허니콤 구조체가 리엔트런트 구조체보다 낮은 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력을 보였다. 하지만 충격 에너지 175J에서 TPU 리엔트런트 구조체의 최대 흡수 에너지는 26.5J, 최대 충격력은 6.9kN 이며 TPU 허니콤 구조체의 최대 흡수 에너지는 26.8J, 최대 충격력은 7.0kN으로 두 구조체의 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력의 차이는 거의 없다. 뿐만 아니라 충격에너지 200J일 때 TPU 리엔트런트 구조체가 TPU 허니콤 구조체 보다 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력이 더 낮았다.

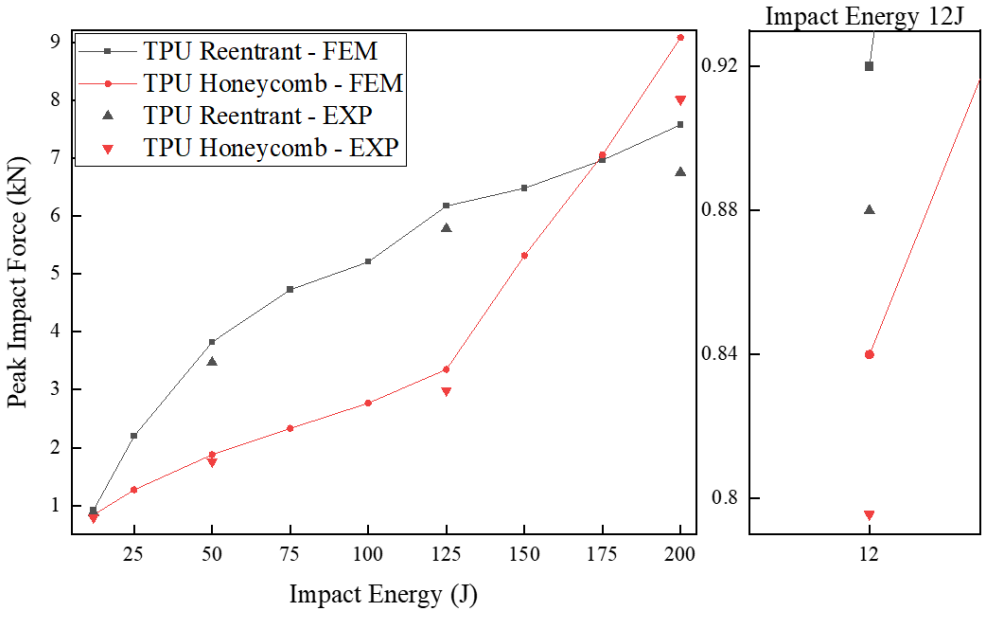
또한 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체에 25kg의 다트를 높이 5cm(충격 에너지 12J), 20cm(충격 에너지 50J), 50cm(충격 에너지 125J), 80cm(충격 에너지200J)에서 자유 낙하시키는 충격 실험을 수행하였다. TPU 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 실험 결과는 충격 해석 결과에 비해 충격 에너지 12J일 때

에는 5%, 충격 에너지 50J일 때에는 9%, 충격 에너지 125J일 때에는 8%, 충격 에너지 200J일 때에는 11% 낮은 최대 충격력을 보였다. TPU 리엔트런트/허니콤 구조체는 충격 에너지 12J 일 때 해석 및 실험 결과 모두 6kN이하를 보여 스포츠용 무릎 보호대 충격 시험 규격[6]을 충족하였다. 충격 에너지 50J일 때 해석 및 실험 결과 모두 8kN 이하를 보여 오토바이 용 등 보호대 충격 시험 규격[7]을 충족하였다. 또한 충격 에너지 125J에 대해 해석 및 실험 결과 모두 20kN이하를 보여 오토바이용 헬멧[8] 충격 시험 규격을 충족하였다. 충격 에너지 12J, 50J, 125J일 때 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체는 ABS 리엔트런트/허니콤 구조체 보다 더 낮은 최대 흡수 에너지 및 최대 충격력을 보였다.

a)



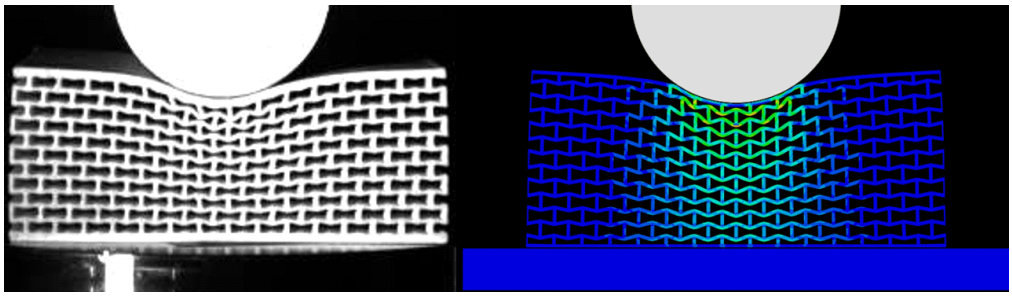
b)



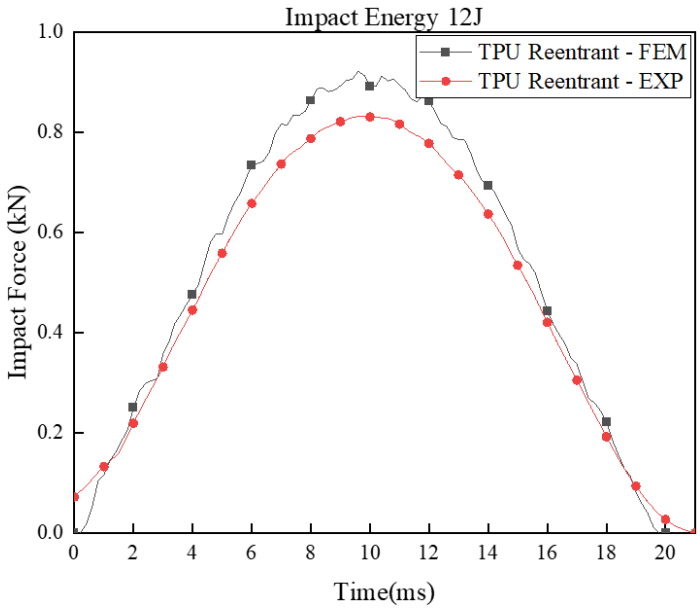
[그림 3-20] TPU 구조체(100mm×100mm×40mm) 충격 해석 결과

a)TPU 구조체의 충격 에너지별 최대 흡수 에너지 그래프

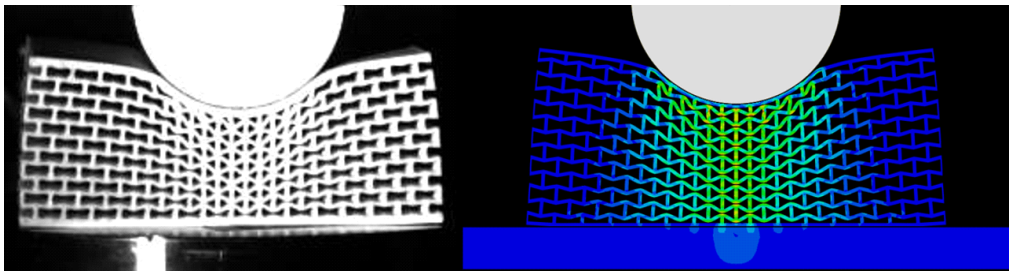
b)TPU 구조체의 충격 에너지별 최대 충격력 그래프



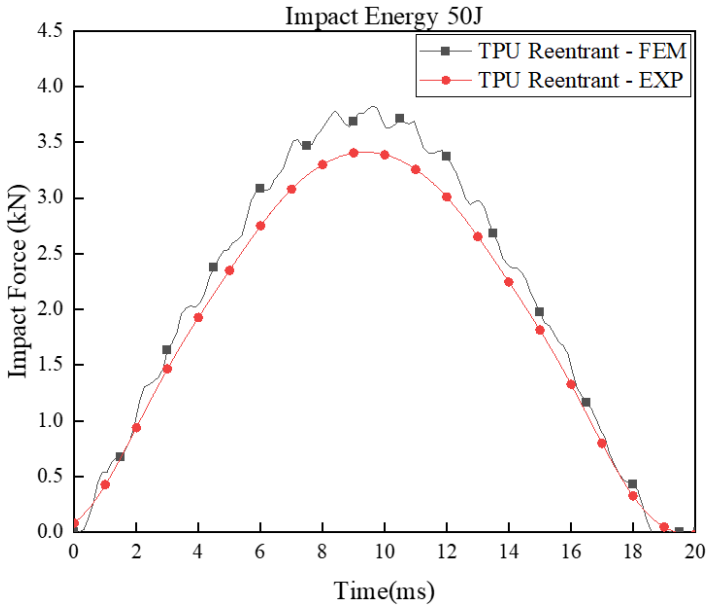
[그림 3-21] TPU 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 12J)
좌) 실험 사진(t=9.7ms), 우) 해석 사진(t=9.6ms)



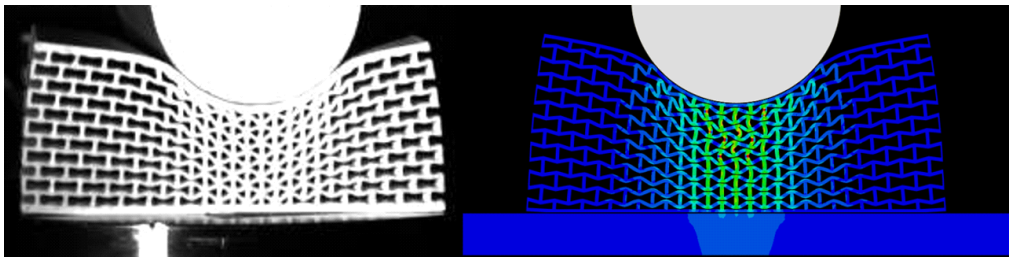
[그림 3-22] TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 12J)



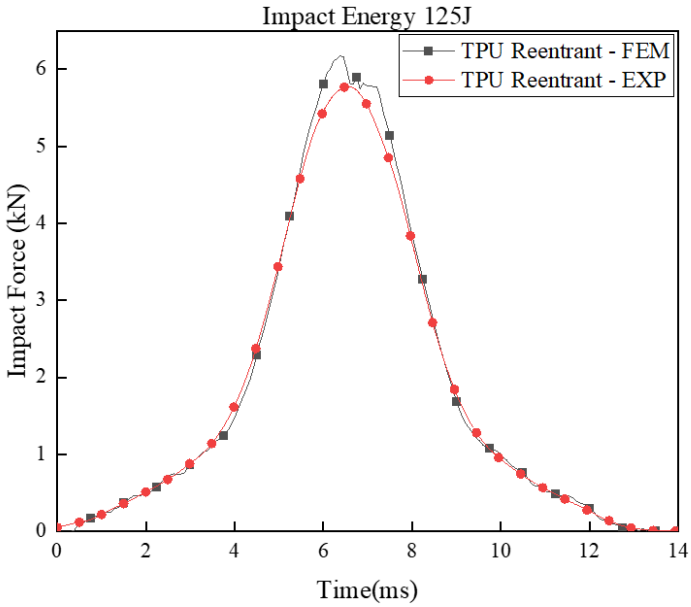
[그림 3-23] TPU 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 50J)
좌) 실험 사진(t=9.5ms), 우) 해석 사진(t=9.6ms)



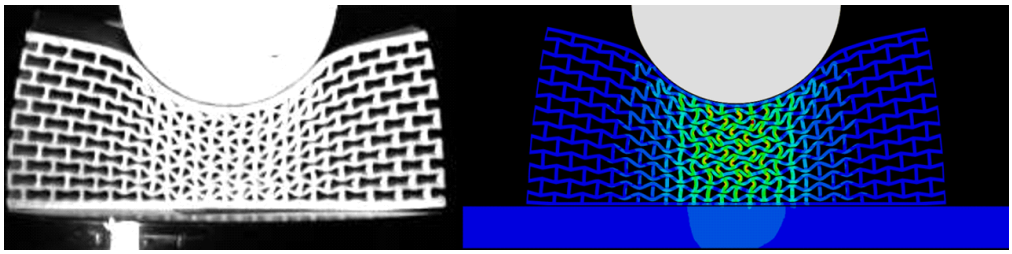
[그림 3-24] TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 50J)



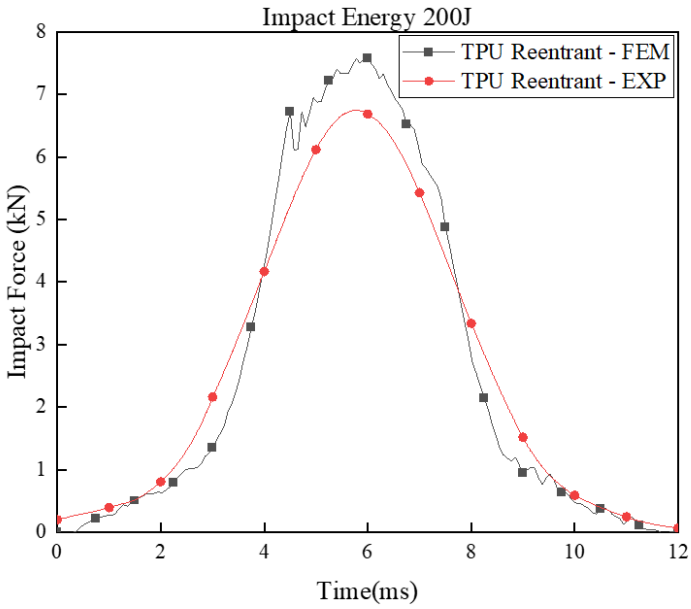
[그림 3-25] TPU 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 125J)
좌) 실험 사진(t=6.6ms), 우) 해석 사진(t=6.4ms)



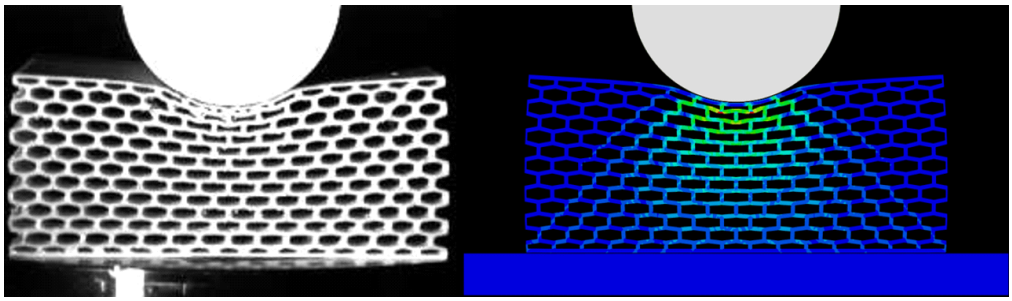
[그림 3-26] TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 125J)



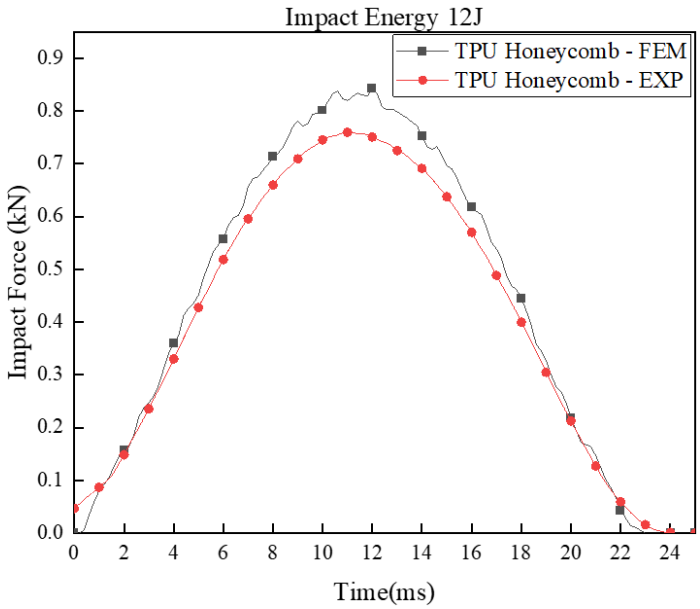
[그림 3-27] TPU 리엔트런트 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 200J)
좌) 실험 사진(t=5.8ms), 우) 해석 사진(t=6.0ms)



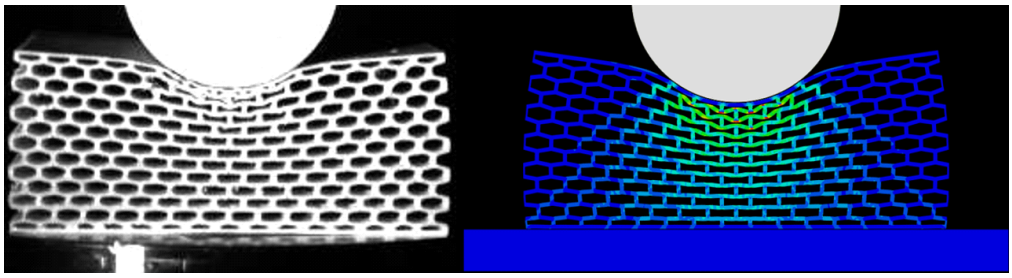
[그림 3-28] TPU 리엔트런트 구조체 충격 응답 (충격에너지 200J)



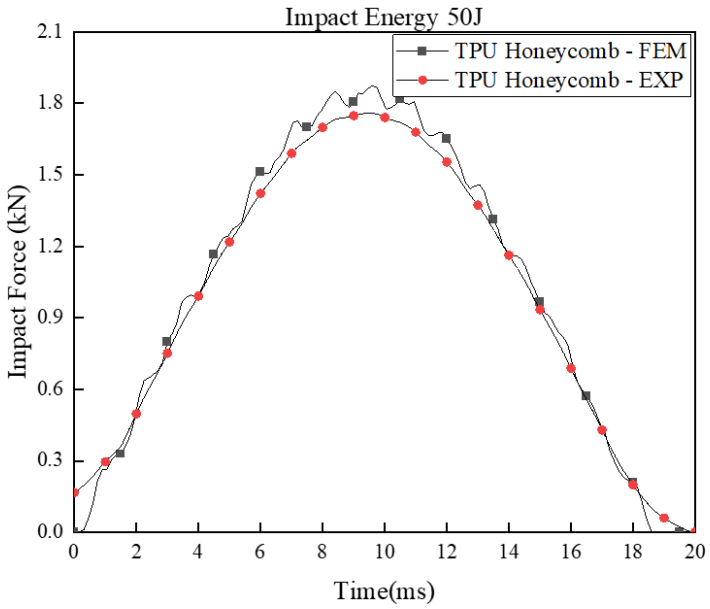
[그림 3-29] TPU 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 12J)
좌) 실험 사진(t=11ms), 우) 해석 사진(t=12ms)



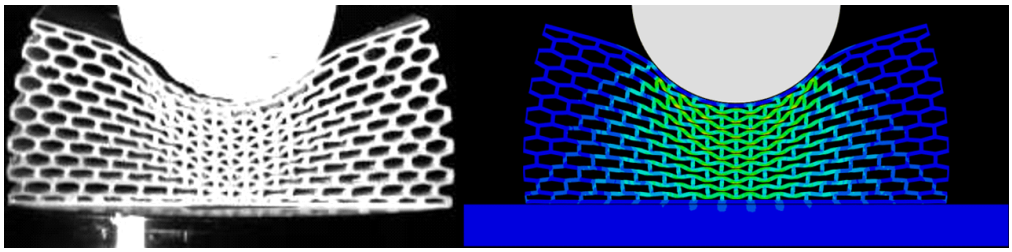
[그림 3-30] TPU 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 12J)



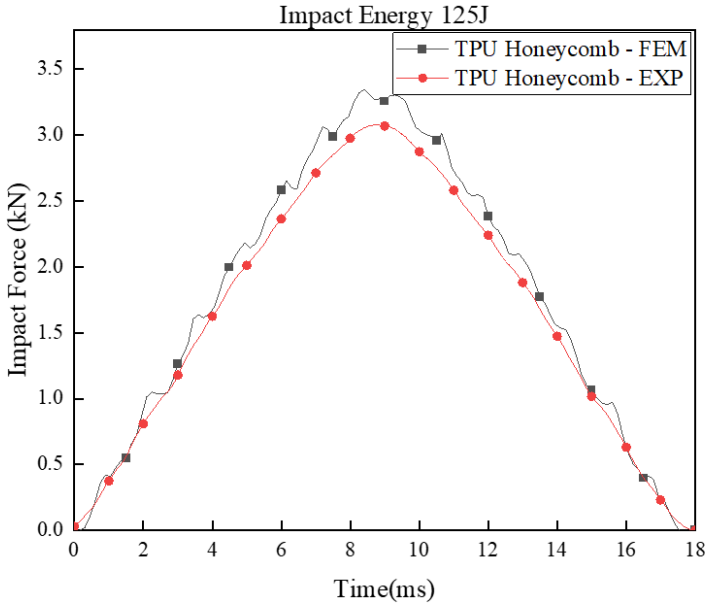
[그림 3-31] TPU 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 50J)
좌) 실험 사진(t=9.5ms), 우) 해석 사진(t=9.6ms)



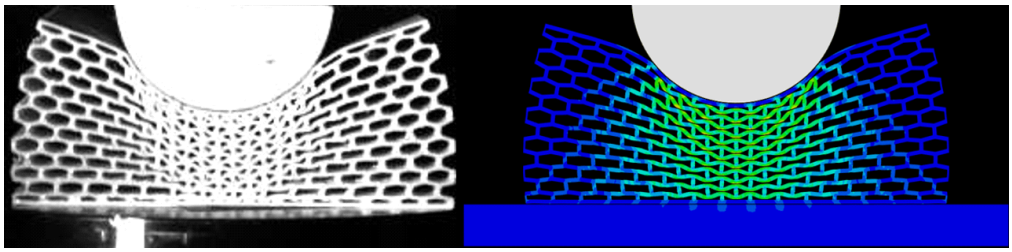
[그림 3-32] TPU 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 50J)



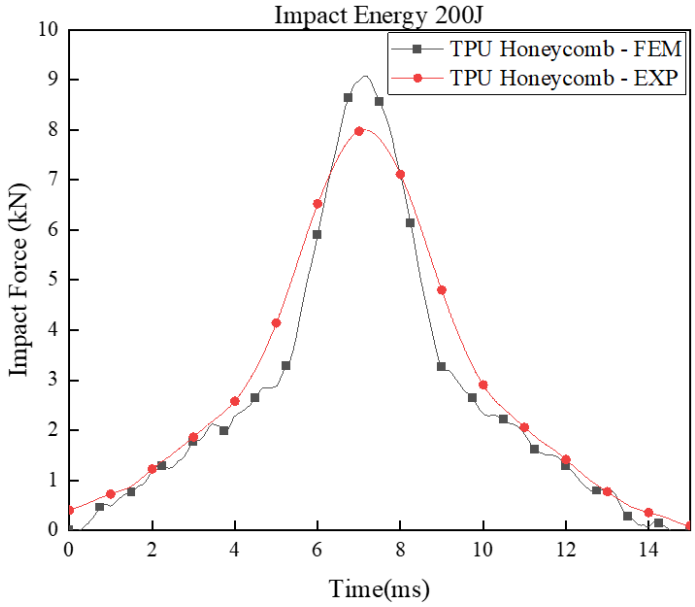
[그림 3-33] TPU 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 125J)
좌) 실험 사진(t=8.6ms), 우) 해석 사진(t=8.4ms)



[그림 3-34] TPU 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 125J)



[그림 3-35] TPU 허니콤 구조체 실험 및 해석 사진(충격에너지 200J)
좌) 실험 사진(t=7.1ms), 우) 해석 사진(t=7.2ms)



[그림 3-36] TPU 허니콤 구조체 충격 응답 (충격에너지 200J)

제 4 장 결론

본 연구에서는 유한 요소 해석을 통해 TPU/ABS 소재의 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 에너지별 충격 흡수 성능 평가를 진행하였다.

1) 구조체의 크기가 폭(100mm)×깊이(100mm)×높이(40mm)인 TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체는 스포츠용 무릎 보호대(충격 에너지 12J)[6], 오토바이용 등 보호대(충격 에너지 50J)[7], 오토바이용 헬멧(충격 에너지 125J)[8] 충격 시험 규격에 모두 충족하였으며 TPU/ABS 리엔트런트/허니콤 구조체 중 TPU 허니콤 구조체가 가장 낮은 최대 충격력을 보였다.

2) 구조체의 크기가 폭(40mm)×깊이(20mm)×높이(40mm)인 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 해석 결과 TPU 리엔트런트 구조체가 TPU 허니콤 구조체보다 낮은 최대 충격력을 보였다. 그러나 구조체의 크기가 폭(40mm)×깊이(20mm)×높이(40mm)인 ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 해석 결과 ABS 허니콤 구조체가 ABS 리엔트런트 구조체보다 낮은 최대 충격력을 보였다. 그리고 TPU 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 해석 결과는 ABS 리엔트런트/허니콤 구조체의 충격 해석 결과와 같이 TPU 리엔트런트 구조체가 TPU 허니콤 구조체 보다 낮은 최대 충격력을 보였으나 충격 에너지 175J이상 일 경우 TPU 허니콤 구조체가 TPU 리엔트런트 구조체 보다 낮은 최대 충격력을 보였다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

국가기술표준원. (2009). “자율안전확인대상공산품의 안전기준 제2조 1항 24호”.

정석환. (2019). "FDM 3D프린터로 제작한 Reentrant 구조체의 충격 흡수에 관한 연구 " 국내석사학위논문, 한성대학교 대학원.

2. 국외문헌

S. R. Cummings, S. M. Rubin, and D. Black. (1990) "The Future of Hip Fractures in the United States: Numbers, Costs, and Potential Effects of Postmenopausal Estrogen", Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007), vol. 252.

S. Afquir, A. Melot, A. Ndiaye, E. Hammad, J.-L. Martin, and P.-J. Arnoux. (2020). "Descriptive analysis of the effect of back protector on the prevention of vertebral and thoracolumbar injuries in serious motorcycle accident", Accident Analysis & Prevention, vol. 135. p. 105331.

R. Ledsham, J. Boote, A. Kirkland, and S. Davies. (2006). "What is it like to use hip protectors? A qualitative study of the views and experiences of nurses and patients", Clinical Effectiveness in Nursing, vol. 9. pp. e97-e105.

J. H. Park, H.-K. Jung, and J. R. Lee. (2019). "Development and Evaluation of Fall Impact Protection Pads Using Additive Manufacturing", Materials, vol. 12, no. 20.

İ. Özen, K. Çava, H. Gedikli, Ü. Alver, and M. Aslan. (2020). "Low-energy impact response of composite sandwich panels with thermoplastic honeycomb and reentrant cores", Thin-Walled Structures, vol. 156, p. 106989.

EN Standards. (2014). “EN1621-2 Motorcyclists' protective clothing against mechanical impact - Part 2: Motorcyclists' back protectors - Requirements and test methods”.

ISO/R 1511. (1970). “Protective helmets for road users”.

K.-U. Schmitt, B. Liechti, F. I. Michel, R. Stämpfli, and P. A. Brühwiler. (2010). "Are current back protectors suitable to prevent spinal injury in recreational snowboarders?", British Journal of Sports

Medicine, vol. 44, no. 11, p. 822.

N. M. van Schoor, A. J. van der Veen, L. A. Schaap, T. H. Smit, and P. Lips. (2006). "Biomechanical comparison of hard and soft hip protectors, and the influence of soft tissue", Bone, vol. 39 2, pp. 401-7.

T. Shepherd, K. Winwood, P. Venkatraman, A. Alderson, and T. Allen. (2020). "Validation of a Finite Element Modeling Process for Auxetic Structures under Impact", physica status solidi (b), vol. 257, no. 10.

M. Sanami, N. Ravirala, K. Alderson, and A. Alderson. (2014). "Auxetic Materials for Sports Applications" Procedia Engineering, vol. 72.

L. J. Gibson, M. F. Ashby, G. S. Schajer, and C. I. Robertson. (1982). "The mechanics of two-dimensional cellular materials", Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, vol. 382, no. 1782, pp. 25-42.

Y. Wang et al. (2020). "Simplification of Hyperelastic Constitutive Model and Finite Element Analysis of Thermoplastic Polyurethane Elastomers", Macromolecular Theory and Simulations, vol. 29, no. 4, p. 2000009.

L. Bartolomé, A. Aginagalde, A. B. Martínez, M. A. Urchegui, and W. Tato. (2013). "EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND MODELLING OF LARGE-STRAIN VISCOELASTIC BEHAVIOR OF A THERMOPLASTIC POLYURETHANE ELASTOMER", Rubber Chemistry and Technology, vol. 86, no. 1, pp. 146-164.

E. Budyn, T. Hoc, and J. Jonvaux. (2008). "Fracture strength assessment and aging signs detection in human cortical bone using an X-FEM multiple scale approach", Computational Mechanics, vol. 42, pp. 579-591.

J. M. Farstad, Ø. Netland, and T. Welo. (2017). "Surface Friction of

Rapidly Prototyped Wheels from 3D-Printed Thermoplastic Elastomers: An Experimental Study", Procedia CIRP, vol. 60, pp. 247-252.

M. Tasdemir, V. Babat, and U. Yerlesen. (2014). "Effect of friction and wear parameters on acrylonitrile butadiene styrene/aluminum-boron carbide-glass spheres polymer composites" Mechanics, vol. 20.

T. Li, Y. Chen, X. Hu, Y. Li, and L. Wang. (2018). "Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties", Materials & Design, vol. 142, pp. 247-258.

ABSTRACT

Impact Study on Strain Energy and Impact Force by Impact Energy of TPU/ABS Reentrant/Honeycomb Structures

Kim, Young-Joon

Major in Mechanical Systems Engineering

Dept. of Mechanical Systems Engineering

The Graduate School

Hansung University

Human fall accidents occur in a variety of impact energy areas, from falls in daily life to falls in motorcycle driving. Falling accidents can lead to disabilities or deaths due to hip fractures in the elderly population with low bone density. Falling accidents while driving motorcycles with high impact energy can also cause damage to hard body parts such as the spine and skull. Such physical damage can be prevented by impact protection equipment. However, impact protection equipment is inconvenient to wear due to the size and weight, so the wearing rate is low. Accordingly, research on a impact absorbing structure to which a unit structure is applied inside the impact protecting equipment is being conducted. The impact absorption structure shows higher impact

absorption performance compared to weight compared to general pad-type impact protection equipment. As the unit structure of the impact absorption structure, a reentrant structure and a honeycomb structure are generally applied. The reentrant structure is a new type of mechanical meta-structure with negative Poisson-ratio properties. These impact absorption structures must meet impact test specifications where the magnitude of the peak impact force measured for a particular impact energy must not exceed the reference threshold. However, meeting the impact test standards can still cause serious injury to the user. Therefore, it is necessary to evaluate the impact absorption structure in various impact energy. Therefore, in this study, an impact study was conducted on the strain energy and impact force of each impact energy of the TPU/ABS Reentant/Honeycomb structures

---

Keywords : Reentrant, Impact study