

## 혈관내 풍선 확장에 의한 대동맥 차단소생술이 적용된 돼지 복부 장기 조직의 기계적 거동 평가

왕일재<sup>1,2</sup> · 유지훈<sup>3</sup> · 허엽<sup>2,4</sup> · 송승환<sup>2,4</sup> · 안효영<sup>2,4</sup> · 송찬희<sup>3</sup> · 이치승<sup>2,5,6</sup> · 유동만<sup>2,7†</sup>

<sup>1</sup>부산대학교병원 응급의학과, <sup>2</sup>부산대학교병원 의생명연구원, <sup>3</sup>부산대학교 대학원 의공학전공,  
<sup>4</sup>부산대학교병원 흉부외과, <sup>5</sup>부산대학교 의과대학 융합의학교실,  
<sup>6</sup>부산대학교 의과대학 의공학교실, <sup>7</sup>미시간주립대학교 기계공학과

## Mechanical Behavior of Porcine Abdominal Organ Tissue with Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta

Il Jae Wang<sup>1,2</sup>, Ji-Hun You<sup>3</sup>, Up Huh<sup>2,4</sup>, Seunghwan Song<sup>2,4</sup>, Hyo Young Ahn<sup>2,4</sup>,  
Chan-Hee Song<sup>3</sup>, Chi-Seung Lee<sup>2,5,6</sup> and Dong-Man Ryu<sup>2,7†</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Emergency Medicine, Pusan Nat'l Univ. Hospital, Busan, 49241, Republic of Korea

<sup>2</sup>Biomedical Research Institute, Pusan Nat'l Univ. Hospital, Busan, 49241, Republic of Korea

<sup>3</sup>Dept. of Biomedical Engineering, Graduate School, Pusan Nat'l Univ., Busan, 49241, Republic of Korea

<sup>4</sup>Dept. of Thoracic and Cardiovascular Surgery, Pusan Nat'l Univ. Hospital, Busan, 49241, Republic of Korea

<sup>5</sup>Dept. of Convergence Medicine, School of Medicine, Pusan Nat'l Univ., Busan, 49241, Republic of Korea

<sup>6</sup>Dept. of Biomedical Engineering, School of Medicine, Pusan Nat'l Univ., Busan, 49241, Republic of Korea

<sup>7</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Michigan State Univ. East Lansing, MI, 48824, USA

(Received February 24, 2020 : Revised March 23, 2020 : Accepted March 31, 2020)

**Abstract** Abdominal organs are the most vulnerable body parts under vehicle trauma, and there is high mortality from acute injuries in accidents. There are various ways to reduce this high mortality; one method is Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta, which has recently become very popular as a minimally invasive alternative in the emergent management of patients with non-compressible hemorrhages below the diaphragm. However, high safety factor for patients is applied in actual clinical practice because there is no exact standard for the operating time. Therefore, in this study, the effects of the mechanical behavior of organ tissues for the duodenum, kidney, and liver on the operating time of Resuscitative Endovascular Balloon Occlusion of the Aorta is investigated in order to obtain data needed to establish standards of operating time. In characteristic analysis of organ tissues, uniaxial tensile test and compression test are conducted according to the operating time.

**Key words** uniaxial tensile test, compression test, soft tissue, resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta.

### 1. 서 론

오늘날 교통사고는 전 세계적으로 많은 경제적 비용으로 소비되고 있는 사망, 장애 및 입원의 주요 원인 중 하나로 정의되고 있다. 특히, Gad et al.(2012) 및 Singh

et al.(2014)의 연구결과에 따르면 교통 사고 발생 시 복부 부상 관련 외상 발생률이 현저히 높다는 것을 알 수 있다.<sup>1,2)</sup> 또한, 이러한 복부 장기는 차량 외상 중 가장 취약한 부위로 알려져 있으며, 특히 간, 신장 등과 같은 기관들이 급성 부상으로 발전하여 사망까지 이르게 할 수

†Corresponding author

E-Mail : babopanda@pusan.ac.kr (D. M. Ryu, Pusan Nat'l Univ. Hospital)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

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.

도 있다.<sup>3)</sup> 이러한 위험성을 감소시키기 위하여 여러 가지 대안들이 개발되고 있는 가운데 최근에는 혈관내 풍선 확장에 의한 대동맥 차단소생술(REBOA, resuscitative endovascular balloon occlusion of the aorta)이 인기를 얻고 있다. 특히, REBOA는 횡경막 아래에서 발생하는 비압축성 출혈 환자에게 적용이 많이 되고 있으며, 개복 수술을 통하여 대동맥을 거쳐가는 혈액을 차단하는 기존 시술법인 개방 대동맥 교차 클램핑(open aortic cross-clamping)에 대한 최소 침습적 대안으로 대두되고 있는 실정이다.<sup>4,5)</sup>

대량의 출혈에 대한 응급처치는 환자의 생존에 아주 중요한 문제이며, REBOA는 이러한 외상성 출혈성 쇼크에서 출혈을 조절할 수 있고, 일시적으로 혈압을 유지할 수 있다.<sup>6)</sup> REBOA의 절차는 Fig. 1과 같이 대퇴부 동맥으로 접근하여 와이어를 삽입한 후 흉부 또는 복부 대동맥 부위에서 풍선을 확장시켜 심장으로부터 전달되는 혈류를 차단시키는 것이다. 최근 일본의 임상 사례 보고서에 따르면, 자궁 파열로 인해 임신 후기에 생명을 위협하는 출혈성 쇼크 치료에 적용되었다고 보고된 바 있다.<sup>7)</sup> 이처럼 REBOA의 적용성은 점차 증가하고 있는 추세이며, 국내에서도 최근에 도입된 바 있다. 하지만, 이러한 REBOA의 적용 단계에서 적용 시간에 대한 임상실험을 할 수 없기 때문에 이에 대한 기준을 명확히 할 수가 없는 실정이다. 그리하여 본 연구에서는 처음으로 돼지에 REBOA를 적용하여 시간에 따른 돼지 복부 장기 조직의 재료 거동 평가를 수행하게 되었다.

기계적 특성을 먼저 파악하는 것은 외상을 시뮬레이션하기 위해 필요한 첫 번째 필수 조건으로 추후 재료 거동을 모사하는 수치 모델에서의 재료 정수 산정과 시뮬레이션을 수행하는 데에 큰 영향을 미친다. 이로 인하여 사고 환경을 보다 효과적으로 설계할 수 있게 되며,

장기를 심각한 손상으로부터 보호할 수 있을 뿐만 아니라 생체 의학 측면에서 수술 도구와 수술 환경을 보다 면밀하게 설계할 수 있게 된다.<sup>9)</sup> 또한, 자기 공명 탄성 초음파(magnetic resonance elastography) 영상으로부터 도출되는 탄성 계수(E) 또는 전단 계수(G)와 비교 분석을 통하여 체내에서의 조직 물성을 파악하고, 이를 통해 장기 조직의 거동을 파악하는 데에 큰 영향을 미칠 것이다.<sup>10)</sup> 이러한 장기 조직에 대한 기계적 물성치를 분석하는 데에는 일반적으로 정적 및 동적 조건하에서 수행되는 압축, 인장, 전단 실험 기법들이 있다. 하지만, 비장의 경우, 작은 열상으로도 혈류가 발생하기 때문에 샘플을 만들지 않고 장기 조직의 형상 및 구조를 고려하여 압축 실험만을 수행하기도 한다.<sup>3)</sup>

장기 조직에 대한 기계적 물성 파악은 많은 연구팀들에 의해서 지속적으로 수행되어 왔는데 그 중 Gao et al.(2010)은 돼지 간 조직의 기계적 특성을 파악하기 위하여 전단 시험, 압축 및 일축 인장 시험을 수행하였다.<sup>11)</sup> 그리고 기존의 초탄성 구성 모델(hyper-elastic constitutive model)을 기반으로 두 가지의 새로운 구성 모델을 제안하였으며, 간 조직의 압축, 인장, 및 전단 하중 아래 하에서 응력과 변형을 관계를 모사하였다. 또한, Roan and Vemaganti(2007)는 압축 실험 시 자주 발생하는 미끄럼 현상을 방지하기 위하여 압박을 활용한 압축 시험법을 제안하였으며, 계산상 결정된 보정 계수 세트를 활용하여 미끄럼 방지 실험으로부터 비선형 재료 물성치를 확보하는 방법을 제시하였다.<sup>12)</sup> Umale et al.(2013)는 준정적 조건 하에서 간, 신장, 비장의 기계적 특성을 파악하기 위해 압축 및 인장 시험을 수행하였으며, 신장은 신장 캡슐과 신장 피질로 나누어 각각 인장 및 압축 시험을 수행하였다.<sup>3)</sup> 이 외에도 여러 조직에 대한 시험 및 분석을 한 연구들이 지속적으로 발표되고 있다. 하지만, 이러한 결과들 중 십이지장 관련된 실험 연구들은 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 장기 조직의 기계적 거동 평가 기법들을 참조하여 REBOA의 적용 시간에 따른 십이지장, 간, 신장과 같은 장기 조직들의 기계적 거동 효과를 파악하였으며, 이를 통해 장시간의 REBOA 적용 가능성을 검토하였다. 본 연구의 결과는 생체 역학 및 의학 응용 분야에서 사용될 수 있는 십이지장, 간, 신장의 FE 모델을 개발 및 REBOA에 의한 장기 조직의 기능을 평가하는 데에 필수적이라 사료된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 시나리오

본 연구에서는 REBOA 시행에 의한 돼지의 장기 조

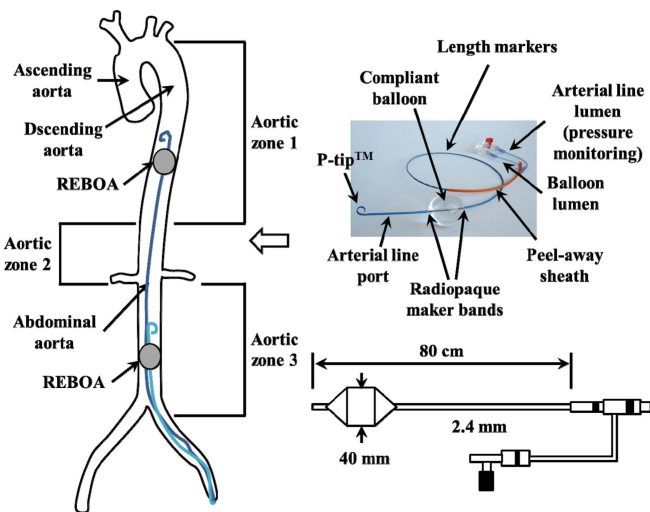


Fig. 1. REBOA and Aortic zones related to aortic occlusion.<sup>8)</sup>

**Table 1.** Test scenario for soft tissue.

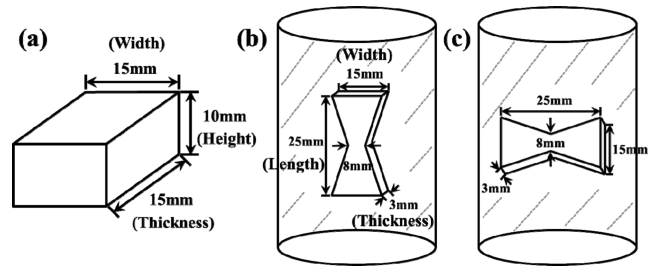
Specimen	Region	Test	Loading direction	REBOA time (min)
DTC1	Duode-num	Uni-axi-al tensile test	Circumferential	-
DTC2				90
DTC3				180
DTL1			Longitudinal	-
DTL2				90
DTL3				180
KC1	Kidney	Compression test	-	-
KC2				90
KC3				180
LC1	Liver	Compression test	-	-
LC2				90
LC3				180

직들에 대한 물성들을 분석하기 위하여 기계적 거동 평가를 실시하였다. 특히, REBOA 시행 시간에 따른 기계적 거동 평가를 수행하였으며, 이에 대한 내용은 Table 1에서 보여주고 있다. Table 1에서 나타내고 있는 시편 명칭은 장기 조직의 명칭과 일축 및 압축 시험, 그리고 하중 방향에 대한 내용을 포함하기 위하여 각각의 영문 명칭 중 첫 글자들을 바탕으로 하여 설정되었다. 뿐만 아니라, REBOA 시행에 따른 조직들의 물성 변화를 확인할 수 있는 표본에 대한 데이터를 확보하기 위하여 REBOA를 적용하지 않은 돼지의 장기 조직들을 활용한 기계적 거동 평가 역시 수행하였다.

**2.2 시편 제작**

본 연구에서의 동물 실험은 부산대학교병원의 동물실험윤리위원회(IACUC)에 의해 검토 및 승인 후에 수행되었다(PNUYH-2019-070). 돼지의 각종 장기 조직 샘플들에 대한 시편 제작 전에 먼저 Fig. 1과 같이 돼지에 Zone 1구역에서 REBOA를 설치한 후, 시나리오 설명에서 언급한 바와 같은 REBOA 시행 시간 이후에 각종 장기 조직 샘플들을 확보하였다.

그리고 신장, 간, 십이지장의 각 시험 샘플들은 REBOA가 시행된 암컷 돼지(45 kg) 2마리와 REBOA가 시행되지 않은 암컷 돼지(45 kg) 2마리로부터 추출되었다. 이후, 추출된 샘플들을 활용하여 신장 시편은 신장 캡슐을 제거한 후, 압축 실험에 적용하기 위해 신피질을 15 mm × 15 mm × 10 mm(폭 × 두께 × 높이)의 규격으로 Fig. 2(a)와 같이 제작되었다. 간 시편 역시 신장 시편과의 동일한 규격으로 제작되었으며, 십이지장 시편은 일축 인장 시험을 수행하기 위해 하중 방향을 고려하여 길이 방향과 원주 방향으로 기준을 설정한 후 Fig. 2(b)

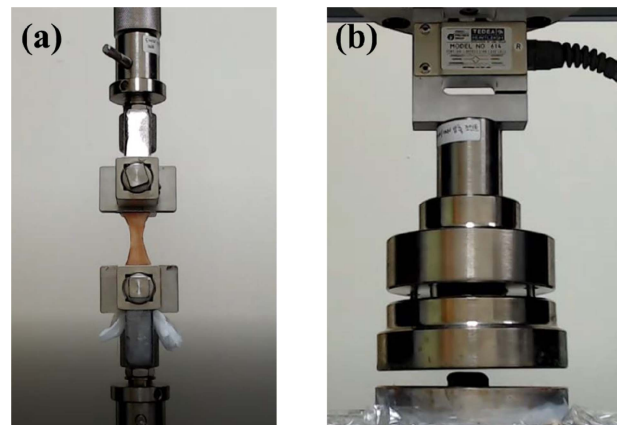


**Fig. 2.** Schematic diagram of the (a) compression test specimens and uniaxial tensile test specimens according to loading direction (b) longitudinal and (c) circumferential direction).

와 (c) 같이 제작되었다. 또한, 실험의 실패율을 최소화하기 위하여 가운데 폭을 감소시켜 25 mm × 15 mm × 3 mm × 8 mm(길이 × 폭 × 두께 × 가운데 폭)의 규격으로 제작 되었으며, 두께는 상/중/하단 부위를 측정하여 평균 값으로 설정하였다.<sup>13,14)</sup> 모든 시편은 조직의 사후 변화를 최소화하기 위하여 시험이 수행되기 전까지 생리 식염수 용액(염화나트륨 0.9 g, JW중외제약, Seoul, South Korea)을 활용하여 20 °C에 보관되었으며, 샘플 추출 후, 24시간 이내에 실험을 수행하였다.

**2.3 일축 인장 시험 및 압축 시험**

본 연구에서는 만능 시험기(EZ-TEST 500N, Shimadzu, Kyoto, Japan)가 사용되었으며, 십이지장 시편들은 Fig. 3(a)과 같이 일축 인장 시험이 수행되었다. 또한, 실험 환경은 실온으로 유지되었으며, 시험이 종료되기 전까지 생리 식염수를 활용하여 재료 시편의 습도를 지속적으로 유지시켰다. 시험 지그에는 사포를 설치하여 시편의 슬립 현상을 최소화하여 실험 시 중앙 부위에 파단이 발생하는 확률을 61.9%로 향상시켰다. 또한, 재료 시편의 응력 완화와 일정한 응력 및 변형을 파악하기 위하여 인장 시험 전에 1 mm/min의 변형률 속도로 시편 길이의



**Fig. 3.** Experimental apparatus for (a) uniaxial tensile test and (b) compression test.

10%까지 10회의 사이클 시험을 먼저 진행하였다.<sup>15,16)</sup> 이후, 시편은 1 mm/min의 변형률 속도로 중앙 부위 파단이 발생하기 전까지 일축 인장 시험을 수행하였다.

또한, 신장 시편들과 간 시편들은 일축 인장 시험을 수행하는 데에 한계가 있어 Fig. 3(b)와 같이 압축 시험을 통해 재료 성질을 분석하였으며, 이 실험 역시 실온으로 실험 환경을 유지하였다. 압축 실험에서는 1 mm/min의 속도로 압축 하중을 가하였으며, 압괴 현상이 발생하기 전까지 수행되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 일축 인장 실험 결과 및 분석

Fig. 4는 REBOA의 적용 시간이 장기 조직의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기계적 특성 분석 방법 중 인장 시험을 수행하고 그 대표적인 결과들을 정리하여 응력-신장률 그래프로 나타낸 것이다. 본 절에서 사용된 시험 시편은 앞서 설명한 듯이 REBOA를 적용하지 않은 십이지장 정상 조직과 90분 및 180분 동안 REBOA를 적용한 십이지장 조직으로 제작되었다. 또한, 실제 십이지장 구조와 하중 방향을 고려하여 원주 방향과 축 방향으로 시편을 제작하였다.

원주 방향 및 축 방향으로의 하중이 적용된 인장 시험 결과에서는 Table 2과 3에서와 같이 REBOA가 적용되지 않은 시편에 대한 결과가 REBOA가 적용된 시편들의 결과보다 높게 나타남을 알 수 있었다. 특히, 원주 방향의 하중이 적용된 평균 응력 결과에서는 REBOA가 적용되지 않는 시편의 응력 값이 REBOA가 적용된 시편보다 44.5%, 127.8%가 높게 나타났으며, 최대 응력 결과에서는 REBOA가 적용되지 않는 시편의 응력 값

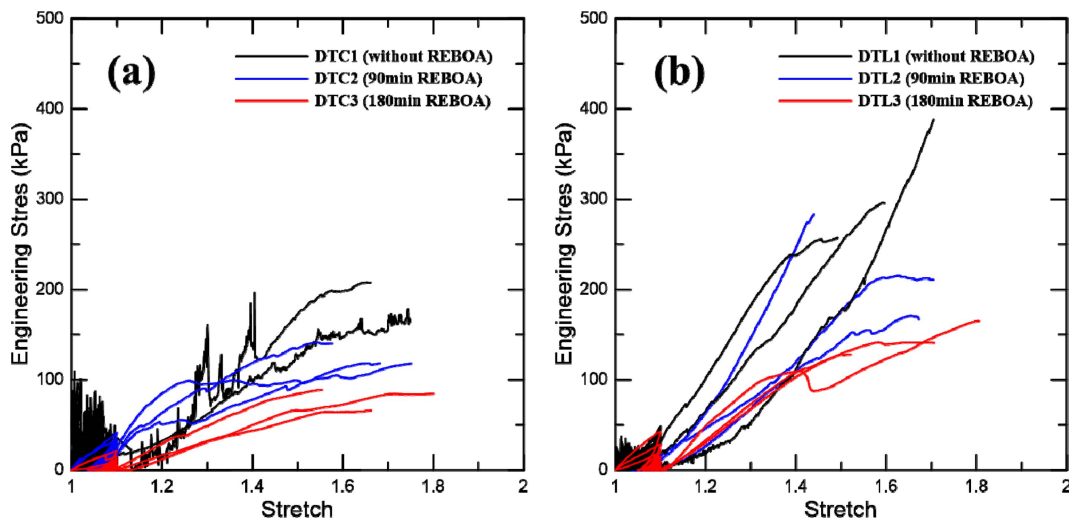
이 다른 시편들보다 47.3%, 133.6% 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한, 축 방향의 하중이 적용된 평균 응력 결과에서는 REBOA가 적용되지 않는 시편의 응력

**Table 2.** Uniaxial tensile stress according to loading direction in Duodenum specimen.

Specimen (circumfer-entia direction)	DTC1 (without REBOA)	DTC2 (90 min REBOA)	DTC3 (180 min REBOA)
$\sigma_{avg}$ (kPa)	181.97	125.91	79.88
$\sigma_{max}$ (kPa)	207.83	141.06	88.98
$\sigma_{min}$ (kPa)	160.05	118.08	66.05
Specimen (longitude-nal direction)	DTL1 (without REBOA)	DTL2 (90 min REBOA)	DTL3 (180 min REBOA)
$\sigma_{avg}$ (kPa)	313.85	223.22	144.88
$\sigma_{max}$ (kPa)	388.23	283.07	165.16
$\sigma_{min}$ (kPa)	257.14	171.08	128.08

**Table 3.** Uniaxial tensile stretch according to loading direction in Duodenum specimen.

Specimen (circumfer-entia direction)	DTC1 (without REBOA)	DTC2 (90 min REBOA)	DTC3 (180 min REBOA)
$\lambda_{avg}$	1.6833	1.6701	1.6723
$\lambda_{max}$	1.7491	1.7514	1.8004
$\lambda_{min}$	1.6395	1.5765	1.5539
Specimen (longitude-nal direction)	DTL1 (without REBOA)	DTL2 (90 min REBOA)	DTL3 (180 min REBOA)
$\lambda_{avg}$	1.5980	1.6056	1.6778
$\lambda_{max}$	1.7049	1.7043	1.8051
$\lambda_{min}$	1.4924	1.4400	1.5213



**Fig. 4.** Representative uniaxial tensile test results for stress-stretch curve of (a) DTC and (b) DTL.

값이 REBOA가 적용된 시편보다 40.6 %, 116.6%가 높게 나타났으며, 최대 응력 결과에서는 REBOA가 적용되지 않은 시편의 응력 값이 다른 시편들보다 37.1 %, 135.1 % 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, 두 하중 방향에 대한 신장률 결과들에서는 전체적으로 비슷한 결과들이 나타남을 알 수 있었다.

일반적으로 조직들은 혈류의 공급이 잘 이루어지지 않을 경우, 물질대사에 필요한 산소와 글루코스가 부족해지는 허혈이 발생하여 조직이 경화될 수 있고 그로 인해 신장률(Stretch) 감소와 인장 강도가 증가할 수도 있다.<sup>17-20</sup> 특히, Lee et al.(2015)의 연구에서는 혈전이 2주 내지 4주 사이에 발생하는 과정에서 조직의 재료 강성 변화를 관측함으로써 혈전과의 조직 간의 관계를 발표한 바 있다. 하지만, 본 연구에서는 이들과의 반대적 경향성이 파악되었는데 이는 십이지장의 두께가 매우 얇고 혈관의 크기가 매우 작아 허혈(Ischemia)이 발생하더라도 조직이 경화되는 현상이 표출되지 않는 것으로 사료된다.

### 3.2 압축 실험 결과 및 분석

Fig. 5와 6은 1 mm/min 변형률 속도의 압축 하중 하에서 수행된 REBOA가 적용되지 않은 신장과 간 조직과 90분 및 180분 동안 REBOA가 적용된 신장과 간 조직의 거동들을 보여주고 있다. 또한 Table 4에서는 신장 조직에서의 압과 현상이 발생된 부분을 제외한 최대 응력과 최대 응력 발생 시 신장률을 나타내고 있다. 그 결과, 신장 조직 시편들은 REBOA가 적용되지 않았을

경우보다 REBOA가 적용되었을 시 높게 나타남을 알 수 있었다. 특히, 180분 동안 REBOA가 적용된 시편의 평균 응력 값이 90분 동안 REBOA가 적용된 시편과 REBOA가 적용되지 않은 시편에서의 평균 응력 값보다 37.9 %, 117.3 %가 높게 나타났으며, 최대 응력 결과에서는 180분 동안 REBOA가 적용된 시편의 최대 응력 값이 90분 동안 REBOA가 적용된 시편과 REBOA가 적용되지 않은 시편에서의 최대 응력 값보다 33.6 %, 100.0 %가 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 최대 응력 값 발생 시 신장률에 대한 결과에서는 REBOA의 적용 시간이 증가할수록 신장률 역시 증가하는 것을 알 수 있었다.

이는 혈류 공급이 잘 이루어지지 않음으로 인하여 신장 조직에서 허혈이 발생하여 신장 조직 안에 남아있던 혈류들이 혈전(Thrombus)화됨으로 인해 경화된 것으로 사료된다.<sup>17-20</sup> 또한, 다른 시편들보다 신장 조직에서

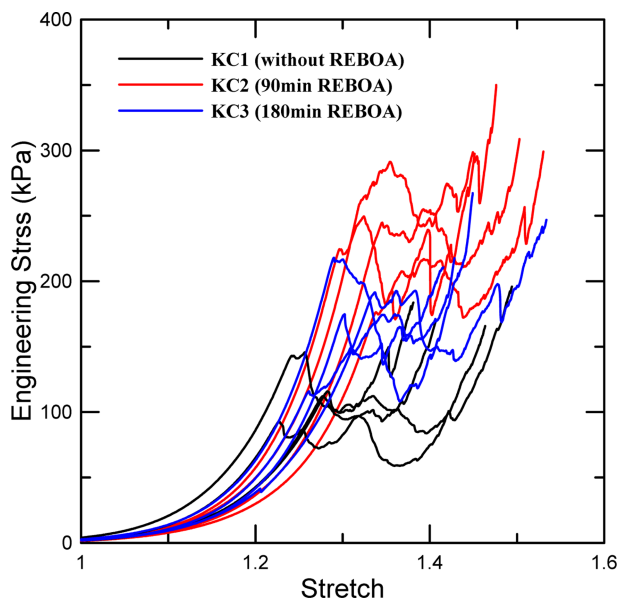


Fig. 5. Representative compression test results for stress-stretch curve of KC.

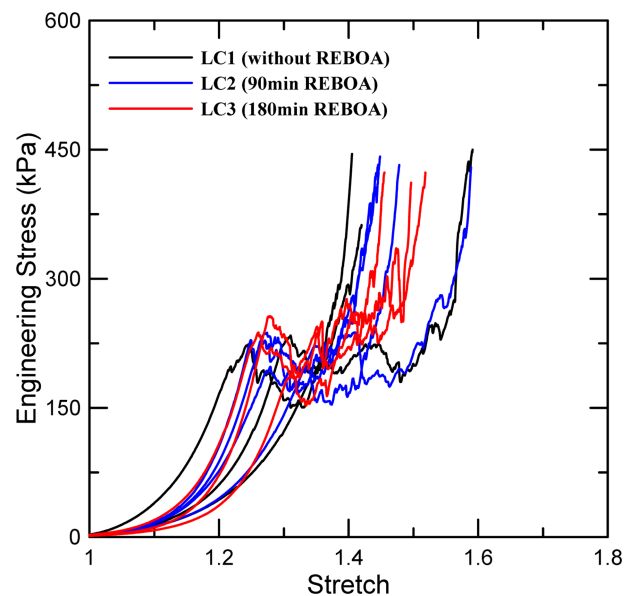


Fig. 6. Representative compression test results for stress-stretch curve of LC.

Table 4. Compression stress and stretch in Kidney specimen.

Specimen	KC1 (without REBOA)	KC2 (90 min REBOA)	KC3 (180 min REBOA)
$\sigma_{avg}$ (kPa)	116.55	183.63	253.24
$\sigma_{max}$ (kPa)	145.61	217.99	291.26
$\sigma_{min}$ (kPa)	92.54	149.04	217.03
Specimen	KC1 (without REBOA)	KC2 (90 min REBOA)	KC3 (180 min REBOA)
$\lambda_{avg}$	1.2611	1.3212	1.3660
$\lambda_{max}$	1.2827	1.3835	1.3930
$\lambda_{min}$	1.2274	1.2900	1.3242

는 REBOA의 적용 시간에 의한 경향성이 뚜렷하게 보이는 것으로 보아 REBOA에 가장 취약하다는 것을 유추해 볼 수 있다. 뿐만 아니라, 신장은 허혈에 매우 취약한 부위중 하나이기 때문에 본 연구 결과를 통하여 REBOA로 인한 만성 신부전의 가능성을 고려해야 할 것으로 사료된다.<sup>21)</sup>

마지막으로 간 조직 시편들에 대한 결과에서는 최대 응력과 신장률의 값들이 Table 5와 같이 대체로 비슷함을 알 수 있었다. 평균 응력 결과값들을 분석해 보면, 180분 동안 REBOA를 적용한 시편에서의 평균 응력 값이 가장 크게 나타나지만 다른 시편들에서의 평균 응력값들과의 차이가 8.3%~9.4%로 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 최대 응력 값들의 비교 역시 180분 동안 REBOA를 적용한 시편에서의 최대 응력 값이 가장 크게 나타나지만 다른 시편들보다 8.1%~9.7% 높게 나타나므로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 신장률 역시 3가지 환경에서의 실험 모두 비슷한 결과값들을 지니고 있음을 알 수 있었다. 일반적으로 간은 간이식 상황에서 허혈에 관한 문제들이 많이 발생하는 데에 반면, 본 연구 결과들로부터 REBOA를 적용하는 데에 있어 간 조직은 크게 영향을 받지 않음을 파악할 수 있었다. 이는 간의 경우, 간은 대동맥에서 직접적으로 연결되어 있는 간동맥과 소장 및 대장 등을 돌아서 연결되어 있는 간문맥으로부터 혈액을 공급 받기 때문에 REBOA시행 이후에도 일정부분 간문맥으로부터 혈액의 공급을 받았기 때문으로 사료된다.<sup>22,23)</sup>

본 연구에서는 REBOA적용 시간에 따른 십이지장 및 신장, 그리고 간 조직들의 기계적 특성 변화를 각각 분석하였다. 그 결과로, 장기 조직들은 REBOA적용 시간에 따라 각기 다른 특성들을 지니고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 장기들마다 혈액을 공급 받는 경로가 각기 다르기 때문에 각 장기들의 특성 변화가 다르게 나타나는 것으로 사료된다. 일반적으로 앞서 언급한 선행

연구들에 따르면 혈액의 공급이 제대로 이루어지지 못할 경우, 혈전이 발생하고 이로 인하여 조직의 특성들이 변화하기 시작한다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 간의 경우와 같이 REBOA로 인하여 대동맥이 차단 될 경우, 다른 경로로 일부 혈액을 공급받을 수도 있기 때문에 변화가 뚜렷하게 나타나지 않을 수도 있다. 게다가 십이지장의 경우 혈관이 매우 작기 때문에 혈전이 발생하는 현상보다는 혈액의 공급이 잘 이루어지지 않음으로 인한 강성의 변화가 크다는 것을 본 연구로부터 파악할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 REBOA를 수행함으로써 인하여 돼지 장기 조직의 기계적 성질이 변화할 것으로 가정하고 이를 파악하기 위하여 십이지장, 신장, 간 조직을 활용한 일축 인장 실험과 압축 실험을 수행하였다. 나아가 REBOA의 적용 시간을 변수로 설정하여 혈류의 제약으로 인하여 상당히 취약해지는 십이지장, 신장, 간 조직의 기계적 성질을 분석하였다. 본 연구의 주요한 결론을 기술하면 다음과 같다.

- REBOA의 적용 시간이 증가할수록 원주 및 축 방향으로의 인장 하중 하에서 십이지장 조직의 강도가 감소하는 경향이 나타났다.
- 또한, 십이지장 조직의 평균 응력 및 최대 응력 값들이 차이가 나는 반면, 신장률은 큰 차이 나타나지 않음을 알 수 있었다.
- 신장 조직에 대한 기계적 성질 분석으로부터 REBOA의 적용 시간이 증가할수록 신장 조직의 강도와 신장률은 증가하는 것을 파악할 수 있었다.
- 하지만, 간 조직에 대한 기계적 성질 분석에서는 REBOA의 적용 시간에 따라 조금씩의 차이는 보였으나 그 영향은 크지 않음을 파악할 수 있었다.

본 연구를 통하여 REBOA의 장시간 사용은 부작용이 발생할 수도 있음을 기계적 거동 평가를 통해 파악하게 되었으며, 본 연구의 결과들은 추후 생체 역학 분야에서 활용되는 십이지장, 신장, 간에 대한 FE 모델을 개발하는 데에 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) and Ministry of Education (No. 2018R1D1A1B07044567). This work was supported by clinical research grant from Pusan National University

**Table 5.** Compression stress and stretch in Liver specimen.

Specimen	LC1 (without REBOA)	LC2 (90 min REBOA)	LC3 (180 min REBOA)
$\sigma_{avg}$ (kPa)	227.28	225.18	246.24
$\sigma_{max}$ (kPa)	233.96	237.56	256.75
$\sigma_{min}$ (kPa)	223.68	197.62	237.57
Specimen	LC1 (without REBOA)	LC2 (90 min REBOA)	LC3 (180 min REBOA)
$\lambda_{avg}$	1.3337	1.3428	1.2966
$\lambda_{max}$	1.4458	1.4205	1.3510
$\lambda_{min}$	1.2450	1.2700	1.2605

Hospital in 2020.

References

1. M. A. Gad, A. Saber, S. Farrag, M. E. Shams and G. M. Ellabban, *N. Am. J. Med. Sci.*, **4**, 129 (2012).
2. R. Singh, H. K. Singh, S. C. Gupta and Y. Kumar, *Indian J. Community Med.*, **39**, 30 (2014).
3. S. Umale, C. Deck, N. Bourdet, P. Dhumane, L. Soler, J. Marescaux and R. Willinger, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **17**, 22 (2013).
4. L. A. Osborn, M. L. Brenner, S. J. Prater and L. J. Moore, *Open Access Emerg. Med.*, **11**, 29 (2019).
5. Z. Qasim, M. Brenner, J. Menaker and T. Scalea, *Resuscitation*, **96**, 275 (2015).
6. J. J. Morrison, T. J. Percival, N. P. Markov, C. Villamaria, D. J. Scott, K. A. Saches, J. R. Spencer and T. E. Rasmussen, *J. Surg. Res.*, **177**, 341 (2012).
7. A. Okada, O. Nakamoto, M. Komori, H. Arimoto, H. Rinka and H. Nakamura, *Clin. Case. Rep.*, **5**, 1565 (2017).
8. ER-REBOATM Catheter. Prytime medical and the REBOA Company Home Page On the Web. Retrieved March 03, 2010 from <https://prytimemedical.com/>
9. R. Akhtar, M. J. Sherratt, J. K. Cruickshank and B. Derby, *Mater. Today*, **14**, 96 (2011).
10. K. Reik, D. Klatt, H. Nuzha, S. Mueller, U. Neumann, I. Sack and J. Braun, *J. Biomech.*, **44**, 1380 (2011).
11. Z. Gao, K. Lister and J. P. Desai, *Ann. Biomed. Eng.*, **38**, 505 (2010).
12. E. Roan and K. Vemaganti, *J. Biomech. Eng.*, **129**, 450 (2007).
13. C. Forsell, J. Swedenborg, J. Roy and T. C. Gasser, *Ann. Biomed. Eng.*, **41**, 1554 (2013).
14. D. M. Pierce, F. Maier, H. Weisbecker, C. Viertler, P. Verbrugghe, N. Famaey, I. Fourneau, P. Herijgers and G. A. Holzapfel, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **41**, 92 (2015).
15. M. L. Raghavan, M. W. Webster and D. A. Vorp, *Ann. Biomed. Eng.*, **24**, 573 (1996).
16. D. H. Wang, M. Makaroun, M. W. Webster and D. A. Vorp, *J. Biomech. Eng.*, **123**, 536 (2001).
17. D. A. Manly, J. Boles and N. Mackman, *Annu. Rev. Physiol.*, **17**, 515 (2011).
18. J. A. Ambrose and M. Weinrauch, *Arch. Intern. Med.*, **156**, 1382 (1996).
19. B. Hmoud, A. K. Singal and P. S. Kamath, *J. Clin. Exp. Hepatol.*, **4**, 257 (2014).
20. Y. U. Lee, A. Y. Lee, J. D. Humphrey and M. K. Rausch, *Biorheology*, **52**, 235 (2015).
21. R. A. Preston and M. Epstein, *J. Hypertens.*, **15**, 1365 (1997).
22. R. E. Kleinman, I. R. Sanderson, O. Goulet, P. M. Sherman, G. Mieli-Vergani and B. L. Shneider, *Walker's Pediatric Gastrointestinal Disease*, 5th ed., p. 751, B. C. Decker, USA (2008).
23. E. E. Montalvo-Jave, T. Escalante-Tattersfield, J. A. Ortega-Salgado, E. Pina and D. A. Geller, *J. Surg. Res.*, **147**, 153 (2008).

<저자소개>

**왕일재**  
부산대학교병원 교수

**유지훈**  
부산대학교 석사과정

**허업**  
부산대학교병원 교수

**송승환**  
부산대학교 교수

**안효영**  
부산대학교 교수

**송찬희**  
부산대학교 박사과정

**이치승**  
부산대학교 교수

**유동만**  
부산대학교병원 & 미시간주립대학교 박사후연구원