

체적의 변화를 통한 방광벽 두께와 기계적 재료상수 변화가 배뇨근 활동에 미치는 영향

Effect of Bladder Wall Thickness Through Change of Bladder Volume and Material Properties on Detrusor activity Study

전수민¹, 이문규¹, 최범규^{1,✉}

Su Min Jun¹, Moon Kyu Lee¹ and Bumkyoo Choi^{1,✉}

¹ 서강대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Sogang Univ.)
✉ Corresponding author: bkchoi@sogang.ac.kr, Tel: 02-705-8639

Manuscript received: 2011.3.23 / Revised: 2011.11.15 / Accepted: 2012.1.14

The structural and functional disorder of a detrusor induces a bladder hypertrophy and degenerates a bladder muscle gradually by preventing normal urination. Thus, the thickness of the bladder wall has been increased in proportion to the degree of bladder outlet obstruction. In this study, the mechanical characteristics of the detrusor is analyzed for the physical properties and the thickness changes of the bladder muscle using a mathematically analytic method. In order to obtain the mechanical property of the bladder muscle, the tensile test of porcine bladder tissue is performed because its property is similar to that of human. The result of tensile test is applied to the mathematically model as Mooney Rivlin coefficients which represent the hyperelastic material. The model of the bladder is defined as the spherical shape with the initial volume of 50ml. The principal stress and strain according to the thickness are analyzed. Also, computer simulations for three types of the material property for the model of the bladder are performed based on the fact that the stiffness of the bladder is weakened as the progress of the benign prostatic hyperplasia. As a result, the principal stress is 341kPa at the initial thickness of 2.2mm, and is 249kPa at 6.5mm. As the bladder wall thickness increases, the principal stress decreases. The principal stress and strain decrease as the stiffness of the bladder decreases under the same thickness.

Key Words: Bladder (방광), Hyperelastic Model (초탄성 모델), Finite Element Method (FEM, 유한요소법), Detrusor Overactivity (배뇨근 과활동), Bladder Wall Thickness (방광벽두께)

1. 서론

국제요실금학회의 정의에 따르면 배뇨근과활동성은 방광충만기에 환자가 억제할 수 없는 비억제성 배뇨근수축이 존재하는 것인데, 과민성방광은 주간빈뇨와 야간뇨를 동반한 요절박증상이 있는 환자군을 말하며,¹ 일반적으로 배뇨근 과활동성과

방광출구폐색이 원인이다.² 기존 연구는 방광 벽의 두께(bladder wall thickness, BWT)의 증가가 방광출구 폐색과 관련이 있다고 보고되었다.^{3,4} 또한 전립선비대증에 의해 방광의 출구가 폐색되는데 이는 배뇨근의 구조적, 기능적 변화를 유도하여 방광벽의 두께 증가 즉, 방광비후가 일어나게 하고 방광근육을 점차 퇴화시켜 정상적인 배뇨를 하지 못하

게 되므로 방광벽의 두께 증가는 방광 출구폐색의 정도에 비례한다고 알려져 있다.^{5,6} Bostwick⁷ 는 전립선비대증은 사정관이 전립선 이행대로 이어지는 부분에서의 과도한 결절성 증식을 동반한 요도 주위의 선상피 조직과 기질조직의 진행성과증식에 의해 발생하고 전립선 비대증에 의한 조직학적인 변화측면에서 기저세포의 과증식, 세포의 기질 침착의 증가, 탄력성 있는 조직의 감소 등의 소견을 보인다고 말한다. 초음파를 통한 시각적인 방광벽 두께 측정은 하부요로 폐색이 심해지면 배뇨근이 비대해진다는 임상자료 바탕으로 전립선 증식을 확인하는데 실제로 사용되고 있다.^{8,9} Kessler¹⁰ 의 연구에서는 방광벽 두께 2.9mm 이상의 환자는 검사를 통해 예측된 값으로 방광출구 폐쇄를 진단 할 수 있다고 보고되었다. 방광벽 두께 값은 100ml 에서 200ml 사이의 방광부피에서 3.0mm 에서 3.3mm 의 크기를 가지고 있으며, 방광벽 두께는 일반적으로 연령에 따라 증가된다고 보고 되었다.¹¹ 또한 방광벽 두께는 방광출구폐쇄를 가진 환자와 방광이 민감한 환자 사이에 주요하게 다른 점이 없으나 방광출구 폐쇄 정도나 방광의 민감 정도에 상관관계가 있음을 알 수 있다.¹²

방광은 유체가 유입되는 동안에 수직 압력에 의해 천천히 증가하고 그 모양은 대략적으로 Fig. 1 처럼 구형으로 여겨진다. 또한 유체가 유입되는 동안 방광 내벽의 장력을 감소시킴으로써 방광에 일정한 압력을 유지하려고 한다. 유체가 유입되는 동안에 방광은 1L 의 부피까지 늘어날 수 있다는 것으로 알려져 있다.¹³ 많은 연구자들은 여러 가지 검사를 통해 방광 벽의 기계적 성질을 연구했다.¹⁴⁻¹⁶ 이에 모델의 대부분은 등방성, 균질성, 비압축성 및 유체가 유입되는 동안의 방광내벽은 구면형상을 지닌다고 가정했다.^{15,17} 하지만 방광벽이 팽창함에 따라 방광벽의 두께 및 재료상수에 따른 생체역학적인 영향을 분석한 연구는 드물다. 따라서 본 연

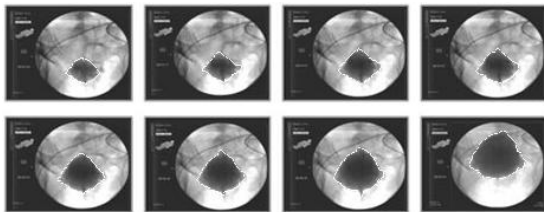


Fig. 1 Variation of bladder shape during filling by radiographic visualization

구에서는 방광근 조직에 대한 수학적인 방법으로 모델을 정의하였고 방광근의 기계적 재료상수와 두께 변화에 대해 방광근의 팽창에 따른 생체역학적인 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료 상수

방광근육의 모델링을 위하여 방광조직에 대한 인장시험을 통해 재료상수를 측정하였다. 재료는 사람의 방광 조직과 유사한 돼지방광의 것으로 기계적 재료상수를 측정하였다. 돼지방광 시편은 근육 두께가 일정하지 않은 부분과 상처가 있는 부분을 제외하고 40mm×15mm×10mm 의 크기로 시편을 절단하여 인장시험을 수행 하였다. 각 시편들은 지그에 고정 되어 변형률 약 1.5 까지 인장시험을 수행 하였다. 시편의 인장속도는 2 mm/min 의 값으로 고정하여 수행하였다. 각 하중과 변위 그래프에서 단면과 초기 길이로부터 응력-변형률의 결과를 나타내었다(Fig. 2). 재료 상수의 방향성을 분석하기 위해 시편은 방광의 가로 방향의 시편과 세로방향의 시편으로 두 가지에 대해 수행하였다. 그 결과는 가로방향의 시편과 세로방향의 시편을 통해 응력-변형률의 경향이 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 문헌의 내용과도 일치한다.^{15,17} 이에 방광근육의 모델링을 등방성 재료로 가정하여 재료상수를 부과하였다. 응력-변형률 곡선에 대해 회귀선법을 이용하여 초탄성 재료상수를 대표하는 Mooney Rivlin 계수를 얻었다(Table 1).

Mooney Rivlin 계수는 초탄성 재료상수를 대표하는 계수로 Ogden 모델과 같은 다른 모델에 비하여 상대적으로 간단한 재료상수로 표현하고 대 변형에 대한 초기 거동을 잘 나타내는 것으로 알려져 있어 고전적으로 가장 널리 사용되고 있다. Mooney Rivlin 변형에너지 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^e - 1)^2 \quad (1)$$

여기서 U 는 단위 부피당 변형에너지를 나타내고, J^e 는 온도에 의존하는 탄성 부피 비율을 말하는 것이다. C_{10} , C_{01} 그리고 D_1 은 Mooney Rivlin 재료상수를 의미한다. \bar{I}_1 과 \bar{I}_2 는 불변의 1 차 2 차 변형률으로써 정의된 식으로 다음과 같다.

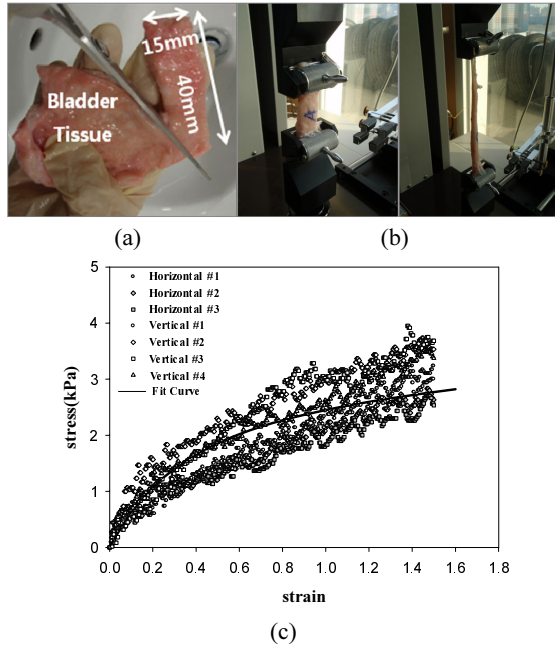


Fig. 2 Experimental Results of the porcine bladder tissue (a) porcine bladder tissue (b) porcine bladder tissue tensile test (c) strain-stress curve of porcine bladder tissue and mathematical model

Table 1 Mechanical properties of porcine bladder wall

Material property	Value
Mooney Rivlin Coefficients	$C_{10}=0.16$ kPa $C_{01}=1.08$ kPa $D_1=0.0405$
Poisson's ratio	0.48

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (2a)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \quad (2b)$$

긴장도는

$$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (3)$$

이고, J 는 전체 부피 비율, λ_i 는 주방향 신장률로 정의된다. 초기 전단 계수와 체적 탄성률은 다음 수식에 의해 주어진다.

$$\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (4)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1}$$

초탄성에 대한 Mooney Rivlin 재료상수 표현은 단순인장시험을 통해 나타낼 수 있다. 단순 인장시험 방법은 주방향 신장률(λ_U)에 의해서 결정된다.

$$\lambda_1 = \lambda_U, \lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda_U} \quad (5)$$

여기서 λ_U 는 하중 방향의 신장률을 의미하고, 다음 식에 의해서 법선 변형률이 정의된다.

$$\varepsilon_U = \lambda_U - 1 \quad (6)$$

단층 법선 변형력을 유도하기 위한 T_U , 가상적인 일의 원리를 적용하면 다음과 같은 수식을 얻어 낼 수 있다.

$$\delta U = \lambda_U - 1 \quad (7)$$

그러므로 T_U 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$T_U = \frac{\partial U}{\partial \lambda_U} = 2(1 - \lambda_U^{-3})(\lambda_U \frac{\partial U}{\partial I_1} + \frac{\partial U}{\partial I_2}) \quad (8)$$

본 논문에서는 위의 함수를 바탕으로 돼지방광의 인장실험결과에 대한 보간법을 수행하였다.

Table 2 Mooney Rivlin coefficient of mathematical model

Material property	Mooney Rivlin Coefficient	Value
Model 1 (Basic)	C_{10}	0.16 kPa
	C_{01}	1.08 kPa
	D_1	0.0405
Model 2	C_{10}	0.25 kPa
	C_{01}	2.3 kPa
	D_1	0.0159
Model 3	C_{10}	0.4 kPa
	C_{01}	2.4 kPa
	D_1	0.0145

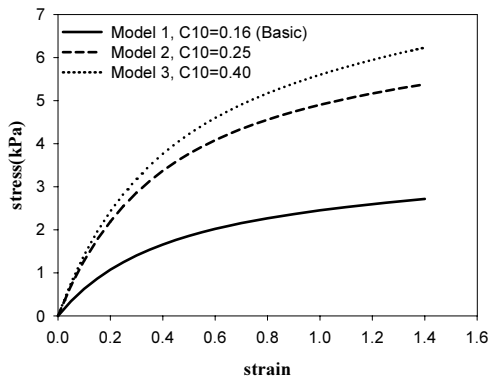


Fig. 3 Tensile strain-stress curve of mathematical model for three types of material properties

Table 2 는 방광근의 평균적인 재료상수와 함께 방광근의 경색에 따른 방광의 팽창거동을 분석하기 위해 실험값의 범위를 근거로 최대한도가 될 수 있는 재료상수곡선(Model 2) 및 이보다 최대값이 20% 더 증가된 재료상수곡선(Model 3)을 가정하여 수행하였다 (Fig. 3). Model 1 은 정상인의 평균치이고 임상적으로 전립선 비대증은 방광벽의 강성이 증가하는 방향으로만 진전되므로 최대한도 20%까지 증가되는 재료상수만 포함하였다.

2.2 유한요소모델

사람의 방광은 주머니 모양의 장기로 근육질의 확장부분이다. 형상, 크기, 벽의 두께는 요량의 증감에 따라 변하는데, 본 연구에서는 대칭조건을 적용하여 3 차원 구형의 1/4 을 모델링 하였고, 각 두께의 변화에서 모두 50ml 에서 250ml 로 체적이 커지는 형상을 구현하였다. 이에 따른 반경은 50ml 때의 23mm, 250ml 일 때의 39mm 로 구의 체적을 계산하여 그 값을 이용하였다.

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \tag{9}$$

요도의 길이와 내부 반경은 전체 해석 결과에 영향을 주지 않는 범위에서 각각 50mm, 1mm 로 가정하였다. 마지막으로 입력 값으로 방광벽과 요도의 두께를 2.2mm~6.5mm 까지 각각 5 지점의 변화를 주어 두께에 따른 주응력과 변형률을 알아보고자 하였다.⁷

유한요소모델은 3 차원 변형모델로 구성하였고 요소망은 등방성 육면체 모델로 구성하였다. 모델

의 총 노드 수는 8565 개이고 요소망의 수는 6228 개이다. J.Pel¹⁸ 은 전체 방광에 대해 2D 모델링을 하였고 1700 개의 요소로 나누어 전립선 출구 폐색에 대한 연구를 하였다. 우리는 실제 모델에 조금 더 가까운 해석을 수행하기 위하여 3D 모델링으로 충분히 많은 요소수로 구성하였다.

방광 크기 변화는 50ml 에서 250ml 까지 팽창하는 것으로 제한하였고, 경계조건으로 방광의 안쪽 곡면에 반경 방향으로 변위를 가해주어 전체적으로 팽창되는 형상을 재현하였다. 50ml 에서 250ml 는 프로그램상의 제한 값으로 지정함으로써 250ml 의 체적 팽창에 대한 결과값을 정리하였다. 또 방광을 일정한 방향으로 팽창시키기 위해서 요도 끝 부분과 방광의 양쪽 단면을 고정시켜 팽창에 의한 영향을 받지 않게 하였다. 대칭조건을 위해서 양쪽 단면에는 원통 좌표계를 구성하여 원주방향으로만 구속을 주었고 반경방향으로는 구속을 주지 않음으로 안쪽 면과 바깥쪽 면에 두께 변화가 발생하도록 하였다. 또한 방광에서 요도로 이어주는 부분에 라운드를 주어 응력이 집중되지 않도록 하였다(Fig. 4). 방광의 유한요소 모델의 구성과 해석 툴은 ABAQUS/ Standard (Ver. 6.9, SIMULIA,USA)을 사용하였다.

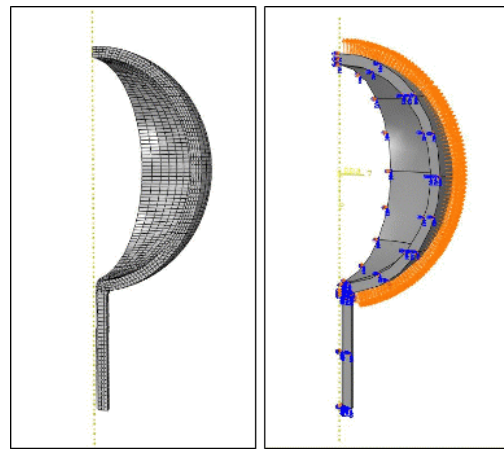


Fig. 4 Finite element model of bladder (a) the quarter symmetric model of the bladder volume, 50ml (b) the boundary conditions

3. 결과 및 토의

본 연구에서 시뮬레이션에 의해 얻어진 결과는 방광에서의 벽두께와 방광벽의 재료상수에 의한

주응력과 변형률이다. 좌표가 0,0 인 초기 지점의 변형 전과 변형 후의 두께 값의 차이를 계산하였다. 또한 1/4 구의 반경방향으로 양 끝점과 중앙점, 수직인 방향의 양 끝점의 응력 값을 구하고 이들의 평균값을 구하였다. 우선 방광의 체적에 따른 벽두께를 검증하기 위해 기존의 논문과 비교하였다.^{19,20} 기존논문을 근거로 하여 성인남성 방광의 체적 50ml 일 때의 벽두께 2.2mm 을 초기 모델로 선정하고 실험값에서 얻은 재료상수를 적용하여 방광의 체적을 250ml 까지 팽창시켰다. 방광의 벽두께 증가에 따른 영향에서 방광의 체적이 팽창함과 동시에 벽두께는 0.807mm 로 줄어들었고, 정상적인 방광을 갖은 사람의 벽두께를 초음파 촬영한 Kuo 의 연구 체적 250ml 의 벽두께 1.07±0.29mm 의 범위 안에 드는 것을 확인할 수 있었다. 모델의 검증 후 방광벽의 두께를 증가시키면서 해석을 수행하였고 250ml 까지 팽창했을 때의 주응력과 변형률을 확인하였다.

전체적인 방광 근육의 분포양상에 대한 변화는 거의 없고 일정한 주응력과 변형률 윤곽을 나타낼 수 있었다(Fig. 5). 방광벽의 두께에 따른 영향에서 2.2mm 일 때 주응력 약 91kPa, 6.5mm 일 때 약 46kPa 로 두께가 증가할수록 주응력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 2.2mm 일 때 변형률 0.32 이고, 6.5mm 일 때 변형률은 0.18 로 두께가 증가할수록 변형률 역시 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6). 이는 동일한 재료상수에 대한 방광벽의 두께 증가가 발생했을 경우에 동일한 체적 팽창에도 불구하고 방광벽 조직에 미치는 응력 또는 변형률은 상대적으로 작은 변화가 발생함을 의미한다.

방광의 재료상수에 따른 영향에서는 재료상수가 증가한 Model 3 에서 초기 두께 2.2mm 의 모델에 대해 250ml 로 팽창시키면 주응력 약 341kPa 발생하고, 초기 두께 6.5mm 일 때에는 250ml 팽창시키면 주응력이 약 249 kPa 발생함을 알 수 있다(Fig. 6a). 즉, 방광근의 재료상수가 증가하게 되면 같은 초기 두께를 가진 모델에 대해 팽창 시 주응력의 값도 증가함을 알 수 있다.

변형률에 대해서도 재료상수가 증가한 model 3 에서 팽창 시 값이 0.52 로 기존의 재료상수에 비해 같은 팽창 영역에 대해 0.2 가 증가함을 알 수 있다(Fig. 6b).

일반적으로 전립선비대증으로 인해 방광벽이 비대해진 경우 방광의 확장능력이 감소되고 방광근

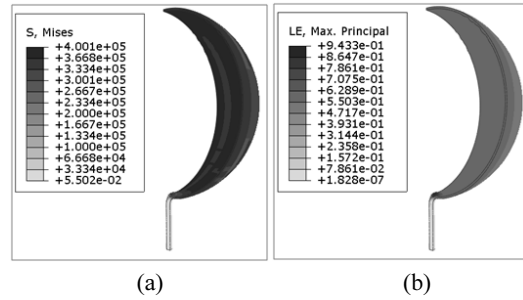
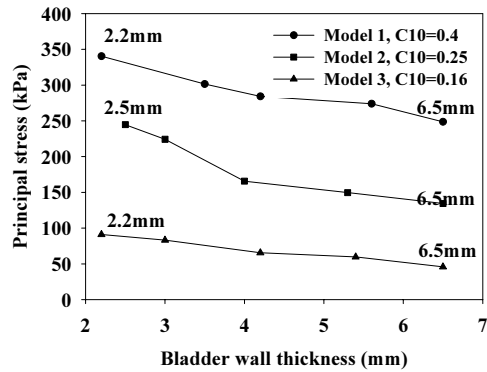
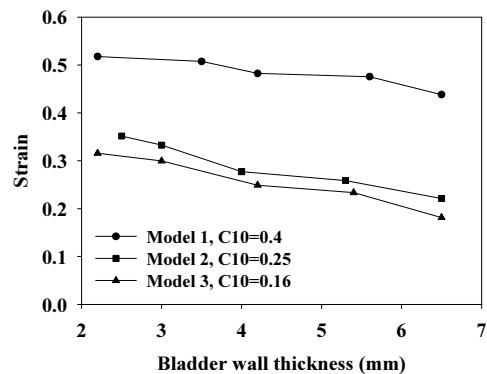


Fig. 5 Result of finite element analysis (a) the principal stress contour (b) the strain contour



(a)



(b)

Fig. 6 Result of biomechanical characteristics for the initial thickness and the material property of the bladder wall: (a) the principal stress (b) the strain

경색에 의한 재료상수의 증가는 배뇨시 상대적으로 큰 힘이 필요함을 알 수 있다. 본 연구 결과는 방광벽 두께를 증가시키에 따라 방광벽이 비대해지는 현상을 해석한 것으로 동일한 체적 변화에서 배뇨근에 미치는 주응력 및 변형률이 감소함을 알 수 있다. 이는 Ogden 모델에서도 확인 가능하다.

Ogden 모델은 상대적으로 대변형 변형률에 대해서도 잘 묘사할 수 있다는 장점이 있으나, 다음 식에서 처럼 재료상수가 지수항에 있기 때문에 물성치의 중복성이 있다는 단점을 갖고 있다. 즉, 하나의 재료물성에 대해 두 가지의 재료 상수 값이 존재하는 문제이다.

Ogden 의 잠재적인 탄성률 에너지는 다음 식으로 표현된다.

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (10)$$

여기서 $\bar{\lambda}_i$ 는 편향주긴장도 $\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$ 로 표현된다.

λ_i 는 주긴장도, N 은 재료상수, μ_i 와 α_i D_i 는 온도에 종속적인 재료상수를 말한다. Ogden 식의 초기 전단 및 크기 계수는 다음 식으로 표현된다.

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (11)$$

Mooney-Rivlin 식과 Neo-Hookean 식은 부분적인 재료 모델로 일반적인 Ogden 잠재적 에너지 긴장도로부터 특별한 α_i 와 μ_i 를 선택하여 얻을 수 있다. 또한 배뇨근의 재료상수가 증가함에 의해서는 방광벽 두께의 증가에 의해 감소되는 주응력보다 상대적으로 더 큰 주응력을 발생시킴을 알 수 있다. 결과적으로 방광근육의 수축과 이완활동이 정상적이지 못한 과민성방광 즉, 주간빈뇨와 야간뇨를 동반한 요절박증상 등의 원인이 되는 것을 알 수 있다. 방광벽 두께에 대한 생체역학적인 거동 연구는 방광 질병에 대한 기초 자료로 활용될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 초기 방광 두께의 영향을 보았을 때 두께가 증가할수록 주응력과 변형률이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 두께에서 방광의 강성을 증가시키면서 일정한 체적까지 변형시켰을 때 주응력과 변형률이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 전립선 비대증으로 인한 방광 출구폐색이 있는 경우는 상대적으로 조직의 경색이 일어나고 이어 평활근 비대, 교원질 침착 및 방광신경 지배와 대사에 영향을 미친다는 Hong²¹

의 소견과 연결되는 결과로 보인다. 이처럼 방광벽이 비대해지는 등의 질환에서 방광벽이 일정한 체적으로 팽창 시 배뇨근의 주응력 및 변형률이 감소하는 변화는 방광의 수축과 이완활동을 평가하는 주요한 인자가 됨을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 보건복지부 보건의료연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임. (과제고유번호 A111055)

참고문헌

1. Abrams, P. and Wein, A., "Introduction: Overactive Bladder and its Treatments," *Urology*, Vol. 55, No. 5, Suppl. 1, pp. 1-2, 2000.
2. Korean Continence Society, "Textbook of Voiding Dysfunction and Female Urology," Ilchokak, pp. 234-236, 2009.
3. Oelke, M., Hofner, K., Jonas, U., De La Rosette, J., Ubbink, D. and Wijkstra, H., "Diagnostic Accuracy of Noninvasive Tests to Evaluate Bladder Outlet Obstruction in Men: Detrusor Wall Thickness, Uroflowmetry, Postvoid Residual Urine, and Prostate Volume," *European Urology*, Vol. 52, No. 3, pp. 827-835, 2007.
4. Kelly, C. E., "The Relationship Between Pressure Flow Studies and Ultrasound-Estimated Bladder Wall mass," *Reviews in Urology*, Vol. 7, No. 6, pp. S29-34, 2005.
5. Mirone, V., Imbimbo, C., Longo, N. and Fusco, F., "The Detrusor Muscle: an Innocent Victim of Bladder Outlet Obstruction," *European Urology*, Vol. 51, No. 1, pp. 57-66, 2007.
6. Hakenberg, O. W., Linne, C., Manseck, A. and Wirth, M. P., "Bladder Wall Thickness in Normal Adults and Men With Mild Lower Urinary Tract Symptoms and Benign Prostatic Enlargement," *Neurourol Urodynamics*, Vol. 19, No. 5, pp. 585-93, 2000.
7. Bostwick, D. G., Cooner, W. H., Denis, L., Jones, G. W., Scardino, P. T. and Murphy, G. P., "The Association of Benign Prostatic Hyperplasia and Cancer of The Prostate," Vol. 70, Suppl. 1, pp. 291-301, 1992.

8. Manieri, C., Carter, S. S. C., Romano, G., Trucchi, A., Valenti, M. and Tubaro, A., "The diagnosis of bladder outlet obstruction in men by ultrasound measurement of bladder wall thickness," *The Journal of Urology*, Vol. 159, No. 3, pp. 761-775, 1998.
9. Jin, Y. M. and Kim, T. K., "The Usefulness of Bladder Wall Thickness Measurement Using Ultrasound in Patients With Benign Prostatic Hyperplasia," *Korean Journal of Urology*, Vol. 43, No. 7, pp. 598-604, 2002.
10. Kessler, T. M., Gerber, R., Burkhard, F. C., Studer, U. E. and Danuser, H., "Ultrasound Assessment of Detrusor Thickness in Men Can It Predict Bladder Outlet Obstruction and Replace Pressure Flow Study?" *The Journal of Urology*, Vol. 175, No. 6, pp. 2170-2713, 2006.
11. Francisco, C., John, H., Vikram, K. and Andrea, T., "Bladder Wall Thickness in Overactive Bladder: Does It Have a Role?" *European Urology Supplements*, Vol. 8, No. 9, pp. 769-771, 2009.
12. Yeung, C. K., Screedhar, B., Leung, Y. F. and Sit, K. Y., "Correlation between Ultrasonographic Bladder Measurements and Urodynamic Findings in Children with Recurrent Urinary Tract Infection," *British Journal of Urology International*, Vol. 99, No. 3, pp. 651-655, 2007.
13. Korkmaz, I. and Rogg, B., "A Simple Fluid-Mechanical Model for the Prediction of the Stress-Strain Relation of the Male Urinary Bladder," *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, No. 3, pp. 663-668, 2007.
14. Fung, Y. C., "Biomechanics," Springer, p. 35, 1993.
15. Wagg, A. and Fry, C. H., "Visco-Elastic Properties of Isolated Detrusor Smooth Muscle," *Scandinavian Journal of Urology and Nephrology*, Vol. 201, No. 201, pp. 12-18, 1999.
16. Sotirios, K., Fiona, B., Jenny, S., Eileen, I. and John F., "Regional Biomechanical and Histological Characterization of the Passive Porcine Urinary Bladder: Implications for Augmentation and Tissue Engineering Strategies," *Biomaterials*, Vol. 30, No. 2, pp. 266-275, 2009.
17. Damaser, M. S. and Lehman, S. L., "The Effect of Urinary Bladder Shape on Its Mechanics During Filling," *Journal of Biomechanics*, Vol. 28, No. 6, pp. 725-732, 1995.
18. Pel, J. J. M. and van Mastrigt, R., "Development of a CFD Urethral Model to Study Flow Generated Vortices under Different Conditions of Prostatic Obstruction," *Physiological Measurement*, Vol. 28, No. 1, pp. 13-23, 2007.
19. Kuo, H. C., Chen, Y. C. and Chancellor, M. B., "Transabdominal Ultrasound Measurement of Detrusor Wall Thickness in Patients with Overactive Bladder," *Tzu Chi Medical Journal*, Vol. 21, No. 2, pp. 129-135, 2009.
20. Oelke, M., Hofner, K., Jonas, U., Ubbink, D., De La Rosette, J. and Wijkstra, H., "Ultrasound Measurement of Detrusor Wall Thickness in Healthy Adults," *Neurourol Urodyn*, Vol. 25, No. 4, pp. 308-317, 2006.
21. Hong, S. J., "Benign Prostatic Hyperplasia: Multiple Factors for Prostate Tissue Change with Aging," *Korean Journal of Urology*, Vol. 46, No. 6, pp. 46547-46554, 2005.