

## 실시간 방광 내 압력 변화 측정을 위한 Prototype 압력 측정 센서의 유효성에 대한 기초 연구

<sup>1</sup>가톨릭대학교 의과대학 비뇨기과학교실, <sup>2</sup>서강대학교 기계공학과

김수진<sup>1</sup> · 이동섭<sup>1</sup> · 김종찬<sup>2</sup> · 이호영<sup>2</sup> · 최범규<sup>2</sup>  
조혁진<sup>1</sup> · 홍성후<sup>1</sup> · 이지열<sup>1</sup> · 황태곤<sup>1</sup> · 김세웅<sup>1</sup>

### Preliminary Report about the Efficacy of Prototype Pressure Sensor for the Real-Time Intravesical Pressure Monitoring in the Rabbit

Su Jin Kim<sup>1</sup>, Dong Sup Lee<sup>1</sup>, Jong Chan Kim<sup>2</sup>, Ho Young Lee<sup>2</sup>, Bumkyoo Choi<sup>2</sup>, Hyuk Jin Cho<sup>1</sup>,  
Sung Hoo Hong<sup>1</sup>, Ji Youl Lee<sup>1</sup>, Tae Kon Hwang<sup>1</sup>, Sae Woong Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Urology, The Catholic University of Korea College of Medicine,

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul, Korea

#### = Abstract =

**Purpose:** To maintain physiologic intravesical pressure is important in preventing secondary renal functional impairment in patients with voiding problems like neurogenic bladder or severe bladder outlet obstruction. Therefore, if real-time monitoring of the intravesical pressure were possible, physicians could not only monitor voiding status more precisely but also manage patients with voiding problems appropriately to protect renal function. In this study, we evaluate the validity of the prototype intravesical pressure sensor in a rabbit model.

**Materials and Methods:** The manufactured prototype intravesical pressure sensor was placed into the intravesical space of each of 3 rabbits. Conventional cystometry was performed and the intravesical pressure was measured by the prototype intravesical pressure sensor at the same time in all of the animals. The measured intravesical pressure by the prototype intravesical pressure sensor was compared with the measured value by conventional cystometry. The reliability between the two methods was determined using cross-table analysis.

**Results:** In each of the 3 animals, the index of coincidence was observed as 0.70, 0.79, and 0.77, respectively. This result meant that the intravesical pressure monitoring by the prototype intravesical pressure sensor showed good reproducibility with respect to the continuous intravesical pressure monitoring by conventional cystometry.

**Conclusions:** In this study, we demonstrated the reliability of the prototype intravesical pressure sensor to monitor intravesical pressure change compared with the conventional cystometric result. Further investigations to overcome the limitations of the prototype intravesical pressure sensor will be necessary for real clinical application.

**Key Words:** Urination disorder, Urodynamics, Medical device

## 서 론

성인 남성에서 하부요로증상을 유발하는 원인으로 전립선비대증, 과민성방광, 신경학적 이상 및 손상에 의한 신경인성방광이 있다. 하부요로증상을 호소하는 남성에서 진단을 위해 시행하는 검사 중 요역동학검사는 진단을 위해 반드시 시행해야 하는 검사는 아니지만 다음과 같은 경우에 도움이 될 수 있다.<sup>1</sup> 전립선비대증과 함께 뇌경색, 척수손상, 파킨슨병, 당뇨가 있거나 골반 종양 수술 및 방사선 치료를 받은 경우 등과 같은 신경인성방광이 동반되어 있을 때 요역동학검사를 통해 좀 더 정확한 진단이 가능하다.<sup>2</sup> 신경인성방광 환자에서 치료의 목적은 방광 내 압력이 과도하게 상승되는 것을 예방하여 신기능을 보전하는 것이며 신기능의 저하를 유발하는 요역동학검사 소견으로는 방광순응도의 저하, 배뇨근괄약근협조장애와 배뇨근과반사에 의한 방광내압의 과도한 상승 등과 같은 것들이 있으며 주로 방광의 충전기 때 나타나는 현상이다.<sup>3,4</sup> 실제 임상적으로 시행되고 있는 요역동학검사 방법은 평소 환자의 배뇨 양상을 비교적 유사하게 재현이 가능하여 신경인성방광뿐만 아니라, 필요한 경우 전립선비대증과 과민성방광 환자에서도 유용한 검사 방법으로 여겨진다.<sup>5</sup> 그러나 현재 시행되고 있는 요역동학검사는 검사실에서 검사과정을 관찰하는 의료인이 함께 있는 상황에서 시행되기 때문에 검사 중 심리적인 불편함을 유발하여 검사 결과에 영향을 미칠 수 있다. 또한 검사 중 방광의 충전기에 생리적인 속도보다 빠르게 방광이 충전되어 일부 환자에서는 검사가 실제 환자의 배뇨 양상을 정확하게 재현하지 못한다는 단점이 있다. 그리고 하부요로증상을 유발하는 원인에 따라 배뇨의 양상이 하루 종일 동일한 양상으로 나타나지 않는 경우도 있을 수 있어 검사실에서 시행되는 요역동학검사 결과를 가지고 전체적인 배뇨 양상을 예측하고 진단하는 데 부적절한 부분이 있다.<sup>6</sup>

이상에서 살펴 본 바와 같이 고식적인 요역동학검사는 그 유용성에도 불구하고 실제 일상 생활에서 배뇨 양상을 재현하는 데 한계가 있다. 특히 신경인성방광 환자에서 고식적인 요역동학검사를 통해 방광 내 압력의 변화를 실시간으로 예측하는 것은 불가능하기 때문에 신기능의 보전을 위해서 실시간으로 방광 내 압력을 측정할 수 있는 방법이

필요하다. 또한 실시간으로 방광내압을 측정할 수 있다면 일상 생활 환경에서 방광내압 변화에 대해 알 수 있어 실제 배뇨 양상에 대한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 실시간 방광내압 측정을 위한 방법으로 토끼에서 방광 내 삽입 가능한 센서를 이용한 방광내압 측정 결과를 기존의 고식적인 방광내압측정술의 결과와 비교, 분석하여 하여 유효성에 대해 연구해 보려고 한다.

## 대상 및 방법

### 1. 실험동물

실험동물은 2.5 kg New Zealand계 수컷 토끼 3마리 (A, B, C)를 사용하였다. 실험동물은 스테인리스 사육함에 1마리씩 사육하였다. 사육장은 인공조명을 이용하여 오전 6시를 기준으로 하여 낮과 밤의 비율을 16 : 8시간으로 하여 조절하였으며, 실내온도는 18~23°C와 40~60%의 습도를 유지하고 식수와 사료를 자유롭게 먹게 하였다. 본 연구는 Institutional Animal Care and Use Committee of the Catholic University of Korea의 승인하에 진행되었다 (IRB approval no. CUMC-2010-0106-02).

### 2. 방광 내 삽입 압력 측정을 위한 prototype 센서의 제작

센서는 printed circuit board에 silicone pressure die (US9173; Unisense, Aarhus, Denmark)를 본딩하여 UV epoxy (TB3003; Three Bond Co. Ltd., Tokyo, Japan)로 고정 한 후 polydimethylsiloxane (PDMS, Sylgard 184 Silicone Elastomer; Dow Corning Co., Seoul, Korea)로 몰딩하여 센서 표면을 마무리 하였다. 제작된 센서는 지름 5 mm의 원통형이고 길이는

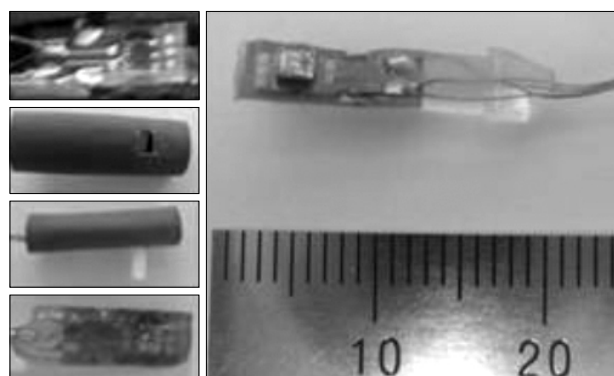


Fig. 1. Prototype intravesical pressure sensor.

12 mm의 유선 센서이다 (Fig. 1).

### 3. 방광압력 측정 센서의 방광 내 삽입

실험동물은 2.5 kg New Zealand계 수컷 토끼 3마리를 사용하였다. Mobinul (Myungmoon Pharm. Co. Ltd., Seoul, Korea) (2 ml/kg)를 피하주사 후 zoletil (Vibac Laboratories, Carros, France) (15 mg/kg)와 rompun (Bayer Korea, Seoul, Korea) (5 mg/kg)를 혼합하여 근육주사하여 실험동물들을 마취시킨 후 양와위에서 하복부를 종절개하여 방광을 노출시켰다. 방광을 종 절개 후 제작된 센서를 삽입 후 PDMS로 몰딩된 wire를 방광 경부를 통과시켜 요도를 통해 빼낸 후 절개된 방광을 봉합하였다 (Fig. 2). 요도를 통해 빼낸 몰딩된 wire를 방광내압 측정을 위해 외부의 instrumental amplifier (AD620; Analog Devices Inc., Norwood, MA, USA)에 연결하였고 측정값은 DAQ (USB 6229; National Instruments Corp., Austin, TX, USA)를 이용하여 기록하였다.

### 4. Prototype 센서를 이용한 방광내압 측정

방광 내에 유치시킨 prototype 압력센서는 센서 내부의 cavity와 방광 내의 압력 차에 의해 diaphragm이 변형하는 구조로 diaphragm상의 Piezoresistor bridge는 diaphragm의 변형량에 따라 저항이 변한다. 센서는 Piezoresistor bridge의 저항변화에 비례하는 전압값을 신호로써 나타낸다. 전압 신호의 측정값은 요도를 통해 유선으로 이루어지며 외부의 instrumental

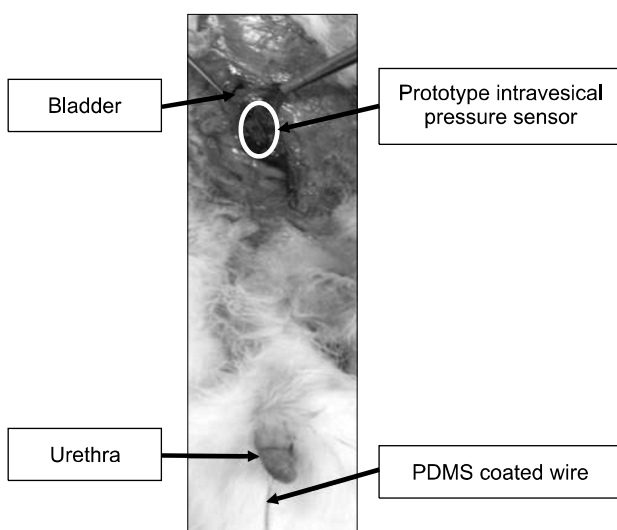


Fig. 2. Prototype intravesical pressure sensor was placed into the intravesical space.

amplifier에 의해 증폭되고 lowpass filter에 의해 고주파 신호가 제거된다. Amplifier와 filter를 거쳐 처리된 전압 신호는 DAQ를 통해 기록된다. Prototype 센서에 의해 측정된 전압 신호를 압력 (cmH<sub>2</sub>O)으로 변환하기 위해  $\text{Pressure (cmH}_2\text{O)} = \text{Signal (V)} \times 2,325.02 - 2,140.35$ 라는 관계식을 사용하였고 방광내압측정술 결과와 비교하였다.

### 5. 방광내압 측정

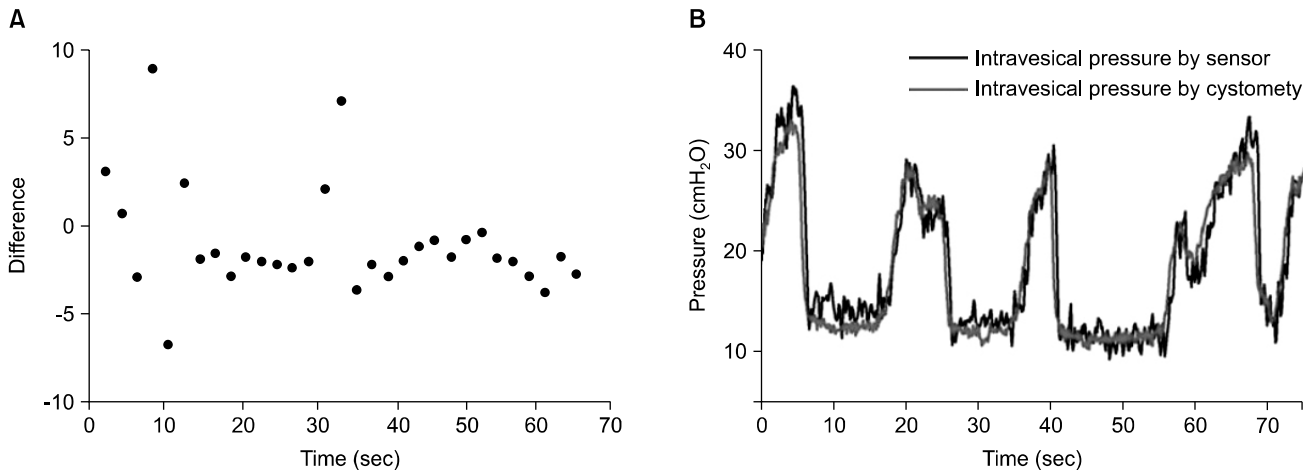
방광압력 측정을 위한 prototype 센서를 방광 내 삽입 후 절개 부위를 봉합하고 7일 후 Corona-Quintanilla 등<sup>7</sup>이 방광내압측정을 한 방법에 따라 20 gauge butterfly needle을 방광의 침부에 삽입한 후 관류펌프 (Harvard Apparatus, Holliston, MA, USA)와 압력변환기 (Research Grade Blood Pressure Transducer; Harvard Apparatus)에 연결하고 0.8 ml/min의 속도로 39°C의 생리적 식염수를 주입하였다. 방광압력의 변화는 방광내압 측정 시작과 동시에 prototype 센서를 이용한 측정을 실시간으로 진행하였다. 복압은 측정하지 않고 방광내압의 변화만을 측정하였다. 방광내압 측정을 시행하는 동안 온열 매트와 온열 등을 사용하여 토끼의 체온을 37°C로 유지를 하였다.

### 6. 결과 분석

세 마리의 토끼 (A, B, C) 각각에서 prototype 센서에 의해 측정된 전압 신호를 변환한 압력 측정값과 방광내압측정술을 통해 측정한 방광압력 측정값과 사이의 일치도는 교차분석 (crosstable analysis)을 이용하여 k 상수를 구하였으며, k 상수가 0.81 이상이면 매우 우수한 일치도, 0.61에서 0.80 사이이면 우수한 일치도, 0.40 이하이면 두 측정값 사이의 일치도가 낮은 것으로 평가하였다. 통계 분석은 SPSS ver. 12.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하였다.

## 결 과

세 마리의 토끼에서 각각 일치도를 나타내는 k 상수가 A 토끼에서는 0.70, B 토끼에서는 0.79, C 토끼에서는 0.77로 prototype 센서에 의해 측정된 전압 신호를 변환한 압력 측정값과 방광내압측정술을 통해 측정한 방광압력 측정값과 사이에 우수한 일치도를 보였다. 세 마리의 토끼 중 일치도를 나타내는 k 상수가 0.79로 가장 우수한 일치도를 보인 토끼에서 방광내압측정술로 측정한 경우에 10초,



**Fig. 3.** Comparison of intravesical pressure measured by the prototype intravesical pressure sensor and conventional cystometry. (A) Differences of intravesical pressure measured by the prototype intravesical pressure sensor and conventional cystometry. (B) The graph showed that the intravesical pressure measured by the prototype intravesical pressure sensor accorded with the value by conventional cystometry.

20초, 30초, 40초, 50초, 60초, 70초의 방광압력 측정값이 각각 13.6 cmH<sub>2</sub>O, 29.0 cmH<sub>2</sub>O, 12.5 cmH<sub>2</sub>O, 12.3 cmH<sub>2</sub>O, 11.9 cmH<sub>2</sub>O, 19.9 cmH<sub>2</sub>O, 13.5 cmH<sub>2</sub>O였다. Prototype 센서로 측정한 경우 10초, 20초, 30초, 40초, 50초, 60초, 70초의 방광압력 측정값이 각각 12.6 cmH<sub>2</sub>O, 28.1 cmH<sub>2</sub>O, 11.1 cmH<sub>2</sub>O, 15.9 cmH<sub>2</sub>O, 11.1 cmH<sub>2</sub>O, 22.6 cmH<sub>2</sub>O, 14.5 cmH<sub>2</sub>O로 실시간 측정된 방광압력 수치가 방광내압측정술을 시행한 경우와 유사한 방광압력 측정값으로 관찰되었다. 실시간으로 같은 시간대에 측정한 방광압력 측정값은 검사 초기에는 두 방법에서 큰 차이를 보였으나 시간이 갈수록 prototype 센서가 방광 내 환경에 적응되어 안정화 되면서 방광압력 측정값 차이가 줄어드는 양상으로 관찰되었다 (Fig. 3).

## 고 찰

이상의 연구 결과에서 방광 내 prototype 센서를 유치한 후 실시간으로 동시에 기존의 방광내압측정술을 시행하였을 때 두 방법으로 측정된 방광 내 압력의 수치가 통계적으로 일치를 보여 prototype의 센서의 유효성을 확인할 수 있었다.

Prototype이라는 용어의 공학적인 정의는 어떤 구조물이나 장비에 대하여, 형상이나 설계, 적합성 또는 성능 등을 평가하기 위해 만든 실물 크기의 모형을 지칭하는 것이다. 본 연구에 사용된 센서는 PDMS로 패키징 한 후 크기가 가로 5 mm, 세로 12

mm로 실제 인체의 방광 내 유치가 가능한 실물 크기의 모형으로 prototype 센서라고 할 수 있다. Fletter 등<sup>8</sup>이 방광내압 측정을 위해 제작한 압력 센서를 최대한 비침습적인 방법으로 방광 내로 삽입하기 위한 방법을 모색하기 위해 돼지에서 방광경을 이용하여 삽입한 센서 경우 크기가 5 mm×9 mm×18 mm로 본 연구에서 사용한 prototype 센서와 유사한 크기를 보였다. 또한 센서의 작동은 센서가 위치하게 되는 주변 환경적인 요인에 의해서 영향을 받을 수 있는데 소변 내라는 특수한 환경에서도 prototype 센서를 통해 측정된 방광 내압이 기존의 방광내압측정술로 측정된 결과와 우수한 일치도를 보였다. 이러한 결과에서 본 연구에 사용된 prototype 센서가 기능적으로 무리 없이 작동이 가능함을 알 수 있다.

현재까지 비뇨기 질환 이외에 체내 삽입형 센서의 적용에 대한 연구는 심혈관계 질환의 치료, 실시간 혈당 감시와 체내 삽입형 약물전달시스템 등에 대한 것들이 있으며 한 단계 더 발전하여 체내에 삽입된 센서의 신호를 무선으로 수신하여 원격으로 환자의 상태에 대해 실시간으로 관찰하고 이를 치료에 이용하기 위해 노력을 기울이고 있다.<sup>9-13</sup> 비뇨기 질환 중 체내 삽입형 센서를 포함한 측정 기구들은 주로 배뇨와 관련된 방광의 기능적인 변화를 알아보기 위한 것들로 동물모델에서 방광의 압력 및 용적의 변화에 대해 측정하였다.<sup>14-16</sup> 방광의 용적 및 압력을 실시간 측정할 수 있는 센서 개발에

관심이 많은 이유는 기존의 요역동학검사가 일상 생활을 하는 동안 실제 환자의 배뇨 양상을 완벽하게 재현하기 어렵기 때문이다.<sup>6</sup> 또한 요역동학검사에 의한 불편함 때문에 정확한 검사를 시행할 수 없는 경우가 발생할 수 있는데 특히 검사에 대한 불안감, 통증 등과 같은 심리적 요인에 의해 발생할 수 있다.<sup>17</sup> 요역동학검사에 의한 심리적 부담감에 대해 조사한 연구에 의하면 요역동학검사를 시행한 297명의 여성 중 검사에 대해 중등도의 불안을 보인 환자에서 42%, 심한 불안을 느낀 환자의 40%가 검사하는 과정에서 당황스러움을 호소하였고 요역동학검사를 하는 동안에는 27%의 여성이 통증을 호소하였고 검사 후에는 13%의 여성이 통증을 호소하였다.<sup>18</sup> 이상에서 살펴본 바와 같이 정확한 요역동학검사를 제한하는 요인들에 의한 영향을 최소화하기 위한 검사 방법으로 휴대용 요역동학검사가 있다.<sup>6,19,20</sup>

휴대용 요역동학검사는 검사실에서 고정된 자세로 검사를 받는 것 대신 방광압력을 측정하는 요도 카테터와 복압을 측정하기 위한 카테터를 유치시킨 후 측정결과를 기록하는 수신기를 휴대하여 일정한 시간 동안 평소와 유사하게 활동하면서 검사를 하는 방법이다. 휴대용요역동학검사 방법은 고식적인 요역동학검사에 비해 환자가 일상 활동을 하는 동안의 방광의 변화를 확인할 수 있다는 장점이 있으나 병원에서 제한된 시간 동안만 검사가 가능하다는 공간적, 시간적 제한이 있어 환자가 집, 직장 등에서 일상 생활을 하는 동안 배뇨 양상에 대한 검사가 가능한 방법이 요구되므로 prototype 센서의 적용을 고려해 볼 수 있다. 그러나 prototype 센서는 기존의 휴대용 요역동학검사와는 달리 복압이라는 변수를 고려하지 않고 단순히 방광 내 압력의 변화만을 측정하였다는 한계가 있어 좀 더 정확한 검사를 위해서는 복압을 측정하기 위한 방법에 대해서도 더 연구가 필요하다.

배뇨장애 질환의 연구를 위한 동물실험에서도 고식적인 방광내압측정술은 동물을 마취시킨 상태에서만 검사가 가능하여 실제 활동하는 동안의 방광의 압력 및 용적 변화를 나타내는 검사 결과는 되지 못한다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위해 몇몇 연구자들은 정상 및 방광출구폐색 등과 같은 동물 모델에서 체내에 방광의 압력을 측정할 수 있는 무선 검사 장치를 짧게는 3일에서 길게는 2~4개월 유치한 후 실험동물이 깨어 있는 상태에서 방

광압력의 측정이 가능함을 보고하였다.<sup>21,22</sup> Shaw 등<sup>22</sup>은 돼지에서 휴대용 요역동학검사를 시행하여 실시간 방광내압의 측정이 방광출구폐색에 의한 방광의 기능적 변화에 대한 실제적인 정보를 얻을 수 있는 장점을 보여 실험동물에서 마취를 하지 않고 검사가 가능한 체내에 삽입 가능한 방광압력 측정 시스템의 유용성에 대해 언급하였다. 위 연구에서는 방광 내 압력을 측정하기 위해 압력 센서를 직접 방광 내로 유치시키지 않고 방광 내에는 단순히 압력을 센서로 전달할 수 있는 도관을 삽입 한 후 피하층에 센서를 삽입하는 방법을 이용하였는데 이는 센서의 크기가 방광 내에 삽입될 수 있을 정도로 작지 않았기 때문으로 여겨진다. 본 연구의 목적은 최대한 비침습적인 방법으로 실시간 방광압력을 측정할 수 있는 기구를 고안하기 위한 것으로 실제 인체에서는 절개를 요하지 않고 방광경을 통해 방광 내로 삽입 가능한 크기로 제작된 센서를 사용하였다는 차이가 있다.

방광의 압력 변화를 측정한 연구 중 Tan 등<sup>23</sup>도 압력 센서를 장착한 카테터를 돼지의 방광내에 유치시켜 본 연구와 유사한 방법으로 압력의 변화를 측정하였다. 이 저자들은 돼지의 복강을 통해 방광내와 복강 내 공간에 압력 센서가 장착된 카테터를 유치시켰고 피하층에 센서의 작동을 위한 전지와 압력 신호를 받기 위한 수신기를 삽입하였다. 3일 동안 마취를 하지 않고 깨어 있는 상태에서 자유롭게 활동하는 돼지에서 체내에 삽입한 센서를 통해 측정한 결과에서 배뇨와 연관하여 방광 내의 압력이 변화하는 것을 확인하였다. 저자들의 경우 위 연구와는 다르게 무선으로 압력의 변화를 측정하지 않았고 상대적으로 단기간 방광의 압력 측정을 하였다는 점에서 한계가 있다. 그러나 기존의 방광내압측정술에 의해 측정된 방광압력과 실시간으로 센서에 의해 측정된 결과를 비교하여 기존의 연구에 비해 측정값의 신뢰도가 상대적으로 높은 것으로 볼 수 있다. 또한 기존의 연구에서는 방광의 압력을 psi (Pound per Square Inch)라는 압력의 단위로 표현하였는데 본 연구에서는 기존의 방광내압측정술에서 방광내 압력을 표현하는 단위인 cmH<sub>2</sub>O로 환산하여 표현이 가능하므로 검사 결과를 해석할 때 실제적으로 도움이 될 수 있다는 장점이 있다.

지금까지 살펴본 바와 같이 저자들의 연구에 사용된 prototype 방광압력 센서에 의해 측정된 방광내압은 기존의 고식적인 방광내압측정술로 측정한

방광 압력과 우수한 일치도를 보여 체내 삽입형 센서로 유효성이 있는 것으로 여겨진다. 그러나 본 연구에 사용된 prototype 센서는 유선으로 작동이 되므로 무선으로 측정 결과를 수신할 수 없으며 복압을 함께 고려하지 않아 기존의 휴대용 요역동학검사를 대체하기에는 아직 무리가 있는 것으로 여겨져 추후 인체 적용을 위해서는 이러한 한계를 극복하기 위한 연구가 더 필요하다.

## 결론

본 연구는 인체 삽입형 실시간 방광압력 측정 센서의 개발을 위한 기초 연구로 방광 내 prototype 센서를 유지한 후 실시간으로 방광압력 변화의 측정이 가능함을 확인하였다. 현재 연구에 사용된 prototype 센서의 한계점에 대해 보완, 개선하여 발전시키는 과정을 통해 임상적으로 적용 가능한 인체 삽입형 방광 압력 측정 센서의 개발이 가능할 것으로 기대한다.

## REFERENCES

- 1) Roehrborn CG. Male lower urinary tract symptoms (LUTS) and benign prostatic hyperplasia (BPH). *Med Clin N Am* 2011;95:87-100
- 2) Bosch JL, Cardozo L, Hashim H, Hilton P, Oelke M, Robinson D. Constructing trials to show whether urodynamic studies are necessary in lower urinary tract dysfunction. *Neurourol Urodyn* 2011;30:735-40
- 3) Klausner AP, Steers WD. The neurogenic bladder: an update with management strategies for primary care physicians. *Med Clin North Am* 2011;95:111-20
- 4) Rule AD, Lieber MM, Jacobsen SJ. Is benign prostatic hyperplasia a risk factor for chronic renal failure? *J Urol* 2005;173:691-6
- 5) Schäfer W, Abrams P, Liao L, Mattiasson A, Pesce F, Spangberg A, et al; International Continence Society. Good urodynamic practices: uroflowmetry, filling cystometry, and pressure-flow studies. *Neurourol Urodyn* 2002;21:261-74
- 6) Radley SC, Rosario DJ, Chapple CR, Farkas AG. Conventional and ambulatory urodynamic findings in women with symptoms suggestive of bladder overactivity. *J Urol* 2001;166:2253-8
- 7) Corona-Quintanilla DL, Castelán F, Fajardo V, Manzo J, Martínez-Gómez M. Temporal coordination of pelvic and perineal striated muscle activity during micturition in female rabbits. *J Urol* 2009;181:1452-8
- 8) Fletter PC, Majerus S, Cong P, Damaser MS, Ko WH, Young DJ, et al. Wireless micromanometer system for chronic bladder pressure monitoring. The 6th International Conference on Networked Sensing System, Pittsburgh, USA, 2009, 228-31
- 9) Kadhiresan K, Carlson G. The role of implantable sensors for management of heart failure. *Stud Health Technol Inform* 2004;108:219-27
- 10) Renard E. Implantable continuous glucose sensors. *Curr Diabetes Rev* 2008;4:169-74
- 11) Renard E, Costalat G, Chevassus H, Bringer J. Artificial beta-cell: clinical experience toward an implantable closed-loop insulin delivery system. *Diabetes Metab* 2006;32:497-502
- 12) Hao Y, Foster R. Wireless body sensor networks for health-monitoring applications. *Physiol Meas* 2008;29:R27-56
- 13) Kakaday T, Hewitt AW, Voelcker NH, Li JS, Craig JE. Advances in telemetric continuous intraocular pressure assessment. *Br J Ophthalmol* 2009;93:992-6
- 14) Seif C, Herberger B, Cherwon E, Martinez Portillo FJ, Molitor M, Stieglitz T, et al. Urinary bladder volumetry by means of a single retrosymphysically implantable ultrasound unit. *Neurourol Urodyn* 2004;23:680-4
- 15) Young DJ. Wireless micromanometer system for chronic bladder pressure monitoring. The 5th IEEE International Conference on Nano/Micro engineered and Molecular Systems, Xiamen, China, 2010, 604-7
- 16) Lee DS, Kim SJ, Sohn DW, Yoo JM, Choi BK, Lee MK, et al. Measurement of bladder volume using an implantable volume sensor in rats. *Korean J Androl* 2010;28:169-74
- 17) Bates CP, Whiteside CG, Turner-Warwick R. Synchronous cine-pressure-flow-cysto-urethrography with special reference to stress and urge incontinence. *Br J Urol* 1970;42:714-23
- 18) Gorton E, Stanton S. Women's attitudes to urodynamics: a questionnaire survey. *Br J Obstet Gynaecol* 1999;106:851-6
- 19) Webb RJ, Ramsden PD, Neal DE. Ambulatory monitoring and electronic measurement of urinary leakage in the diagnosis of detrusor instability and incontinence. *Br J Urol* 1991;68:148-52
- 20) Heslington K, Hilton P. Ambulatory monitoring and

- conventional cystometry in asymptomatic female volunteers. Br J Obstet Gynaecol 1996;103:434-41
- 21) Mills IW, Noble JG, Brading AF. Radiotelemetered cystometry in pigs: validation and comparison of natural filling versus diuresis cystometry. J Urol 2000;164:1745-50
- 22) Shaw MB, Herndon CD, Cain MP, Rink RC, Kaefer M. A porcine model of bladder outlet obstruction incorporating radio-telemetered cystometry. BJU Int 2007;100:170-4
- 23) Tan R, McClure T, Lin CK, Jea D, Dabiri F, Massey T, et al. Development of a fully implantable wireless pressure monitoring system. Biomed Microdevices 2009;11:259-64