

## 콩팥 세관에서 주사전자현미경을 이용한 일차섬모의 길이 비교 연구

지미진<sup>1,2</sup>, 몽궁치메그<sup>1</sup>, 송수진<sup>1</sup>, 이수연<sup>1</sup>, 박소현<sup>1</sup>, 한정미<sup>2</sup>, 한기환<sup>1</sup>

이화여자대학교 의과대학 <sup>1</sup>해부학교실 & <sup>2</sup>나노이미징 실험실

## A Comparative Study of Primary Cilia Length in Renal Tubules Using Scanning Electron Microscopy

Mi Jin Jee<sup>1,2</sup>, Mungunchimeg Chultemsuren<sup>1</sup>, Soo-Jin Song<sup>1</sup>, Su-Youn Lee<sup>1</sup>,  
So-Hyun Park<sup>1</sup>, Jung-Mi Han<sup>2</sup>, Ki-Hwan Han<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Anatomy & <sup>2</sup>Nanoimaging Lab, Ewha Womans University College of Medicine

**Abstract** : The primary cilium is a hair-like structure extending from the luminal surface of kidney tubular cells. Its microstructure and function in the kidney are still not fully understood. This study aimed to detect and compare primary cilia across various renal tubules. Normal adult Sprague-Dawley rats were perfused with 2% periodate-lysine-paraformaldehyde fixative and processed for light and electron microscopy. Antibodies against acetylated  $\alpha$ -tubulin and aquaporin 1 were used to label primary cilia and proximal tubules, respectively. Primary cilia were largely concealed among the microvilli in proximal tubules, making accurate observation challenging under electron microscopy. No significant differences were found in the lengths of primary cilia in the distal tubules ( $2.1 \pm 0.22 \mu\text{m}$ ) and collecting ducts ( $1.86 \pm 0.31 \mu\text{m}$ ). However, primary cilia in the thin limbs of the loop of Henle were significantly longer, measuring  $4.2 \pm 0.73 \mu\text{m}$ , compared to those in adjacent distal tubules and collecting ducts. These findings demonstrate that the primary cilia in the thin limbs are the longest in the normal kidney, suggesting they may have a distinct function in this segment.

**Keywords** : Primary cilia, Renal tubules, Thin limbs, Electron microscopy

### 서 론

일차섬모(primary cilia)는 콩팥에서 보우만주머니의

본 논문은 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2020R1A2C1100184)와 이화여자대학교 학술연구과제(1-2024-1060-001-1) 지원으로 수행되었음.

저자(들)는 '의학논문 출판윤리 가이드라인'을 준수합니다.

저자(들)는 이 연구와 관련하여 이해관계가 없음을 밝힙니다.

**Received:** October 1, 2024; **Revised:** November 27, 2024;

**Accepted:** December 2, 2024

**Correspondence to:** 한기환(이화여자대학교 의과대학 해부학교실)

**E-mail:** khhan@ewha.ac.kr

벽상피(parietal layer of Bowman's capsule), 토리쪽세관(proximal tubule), 먼쪽세관(distal tubule) 및 집합관(collecting duct)에서 관찰되며, 세포 표면에 내강으로 돌출된 가는 머리카락 같은 구조이다. 전형적인 섬모들은 9쌍의 주위미세관두쌍(peripheral microtubule doublet)과 1쌍의 중심미세관으로 이루어진 소위 9+2 구조인 것과 대조적으로, 일차섬모는 중심미세관이 없는 9+0 구조를 가지고 있고 운동성이 없다[1-3].

콩팥에서 일차섬모의 기능은 유체의 흐름과 같은 물리적 자극을 칼슘( $\text{Ca}^{2+}$ ) 유입으로 전환시키는 감지기(sen-

sor) 역할을 하는 것으로 널리 인정되고 있다[4,5]. 일차섬모는 매우 가늘고 접근이 어려워서 기능을 밝히기 위한 연구를 실험으로 증명하는 데 많은 어려움이 있다[5]. 또한 일차섬모에서 발견되는 polycystin 1과 polycystin 2을 각각 코딩하는 PKD1과 PKD2 유전자의 변이 및 기능 소실은 임상적으로 다낭신장(polycystic kidney disease)의 발병과 연관이 있는 것으로 알려져 있다[3,6-9].

콩팥세관에서 섬모의 길이는 세포분열 주기 혹은 질병의 진행에 따라 변할 수 있다고 보고되었다[10]. 콩팥의 급성 허혈-재관류 손상(acute renal ischemia-reperfusion injury)이나 시스플라틴(cisplatin) 독성과 같은 실험적 동물모델에서 일차섬모의 길이가 유의하게 짧아지는 현상이 확인되었으며, 절단된 것으로 추정되는 일부 섬모의 구성성분이 소변에서 검출되기도 하였다[11,12]. 일차섬모의 소실은 상피중간엽이행(epithelial to mesenchymal transition)과도 관련이 있다[13]. 반대로 콩팥의 발생 또는 재생 과정에서는 일차섬모의 길이가 길어지는 현상이 보고되었다[14,15].

일차섬모의 길이는 정상 상태에서도 세관마다 차이가 있을 것으로 여겨진다. 실험 조건에 따라 토리족세관은 2~4.5  $\mu\text{m}$ , 먼족세관은 2.2~3.7  $\mu\text{m}$ , 집합관은 1.6~2.6  $\mu\text{m}$  범위 내에서 다양하게 측정되었다[10]. 그러나 대부분의 연구는 일차섬모가 발견되는 표지단백질들의 이미지를 광학현미경을 이용하여 간접 측정한 이유로, 실제 측정 값의 정확성에 대한 의문이 있을 수 있다. 일차섬모를 전자현미경으로 관찰하는 것이 가장 좋으나, 고정 및 샘플처리 과정의 번거로움 때문에 교과서나 논문에서 콩팥 세관별로 완전한 섬모 구조를 찾아보기 어렵다.

본 연구의 목적은 고해상도의 전계 방출 주사 전자현미경(Field emission scanning electron microscope, FE-SEM)으로 콩팥 세관마다 일차섬모의 길이를 비교하고 정확한 정보를 제공하는 것이다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험동물

체중 200~250 g의 Sprague-Dawley 흰쥐 수컷 5마리를 사용하였다. 실험기간 동안 물과 사료의 양은 제한하지 않았다. 모든 동물실험은 이화여자대학교 동물실험윤리위원회의 승인(EWHA MEDIACUC 21-017-t)을 받았다.

### 2. 조직절편 제작

흰쥐를 1.5% 이소플루란(isoflurane, Abbott Laborato-

ries, Queenborough, Kent, UK) 흡입을 통해 마취하고 고정액(paraformaldehyde-lysine-periodate, PLP)으로 10분 동안 관류 고정하였다. 콩팥을 유두 전체가 나오도록 중앙 단면으로 자르고, 2.5% 글루타르알데히드(glutaraldehyde) 및 오스뮴(osmium tetroxide)으로 추가로 고정하였다. 고정된 콩팥 조직은 알코올 탈수 과정을 거치고 임계점건조기(critical point dryer, CPD300; Leica, Germany)를 이용하여 건조시켰다[16]. 일부 조직은 일반적인 광학현미경 연구를 위한 파라핀 포매 과정을 거쳤다[17].

### 3. 항체

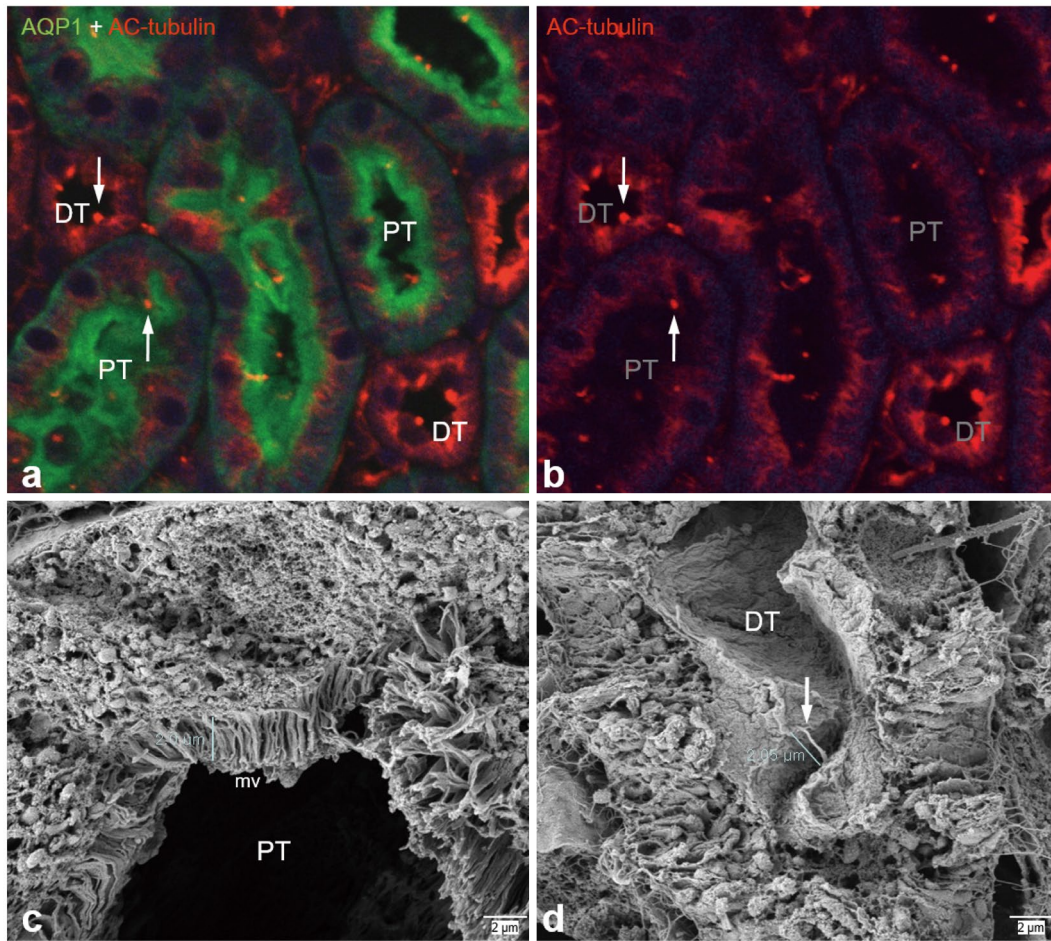
일차섬모를 표지하기 위해 acetylated  $\alpha$ -tubulin (Cat. No. T7451, Sigma-Aldrich Ltd, Gillingham, UK) 항체를 사용하였다. 토리족세관을 표지하기 위해 aquaporin 1 (Cat. No. AB2219, Millipore, Billerica, USA) 항체를 사용하였다[17-20].

### 4. 공초점현미경

이전에 보고한 바와 같이, 콩팥조직을 4  $\mu\text{m}$  두께 절편으로 만들고, 정상 혈청으로 30분간 처리하였다[20]. AQP1과 acetylated  $\alpha$ -tubulin 일차항체를 각각 1 : 1,000으로 희석하여 4°C에 하룻밤 동안 반응시키고, 다음날 1 : 200으로 희석한 2차 항체들(Cy3-conjugated donkey anti-mouse IgG와 FITC-conjugated donkey anti-rabbit IgG, Fab fragments, Jackson ImmunoResearch Laboratory, West Grove, PA, USA)을 1시간 동안 반응시켰다. 0.01 M PBS로 수세 후 봉합하여(antifade mounting medium, Vecta, USA) 공초점현미경(LSM800, Carl ZEISS, Germany)으로 관찰하였다.

### 5. 주사전자현미경

임계점건조기(CPD)로 건조된 콩팥 조직을 Sputter coater (Q150RS, Quorum, UK)를 사용하여 표면을 금으로 코팅하였다. 관찰에는 전계 방출 주사전자현미경(FE-SEM, Sigma300, Carl ZEISS, Germany)이 사용되었다. 길이 분석을 위해 흰쥐 5마리의 콩팥조직을 사용하였다. 각 동물 개체로부터 얻은 조직절편당 근위 세관, 원위세관 및 집합관 5곳 이상을 찾고, 한 세관당 2개 이상의 섬모 길이를 측정하였다(SmartSEM 6.04, Carl ZEISS, Germany). 본 연구에서의 일차섬모 길이 데이터는 정규성을 만족하였으며, 통계 분석(GraphPad Prism, La Jolla, CA, USA)은 one-way ANOVA와 post-hoc Tukey 검정을 사용하여 각 그룹 간 차이를 비교하였다. 유의 확률(p값)이 0.05보다 작은 경우 유의미한 것으로 해석하였다.



**Fig. 1.** Confocal microscopy images (a & b) and scanning electron microscopy images (c & d) showing primary cilia in the proximal and distal tubules. The fluorescent image of acetylated  $\alpha$ -tubulin (red), which labels the primary cilia, projects toward the lumen from the apical plasma membrane. In the proximal tubules, most cilia are embedded within the brush border that expresses AQP1 (green) and are difficult to observe by electron microscopy (a & c, arrows). In contrast, the primary cilia in the distal tubules are relatively easy to identify under electron microscopy (d, arrow). PT: proximal tubule, DT: distal tubule, mv: microvilli.

## 결 과

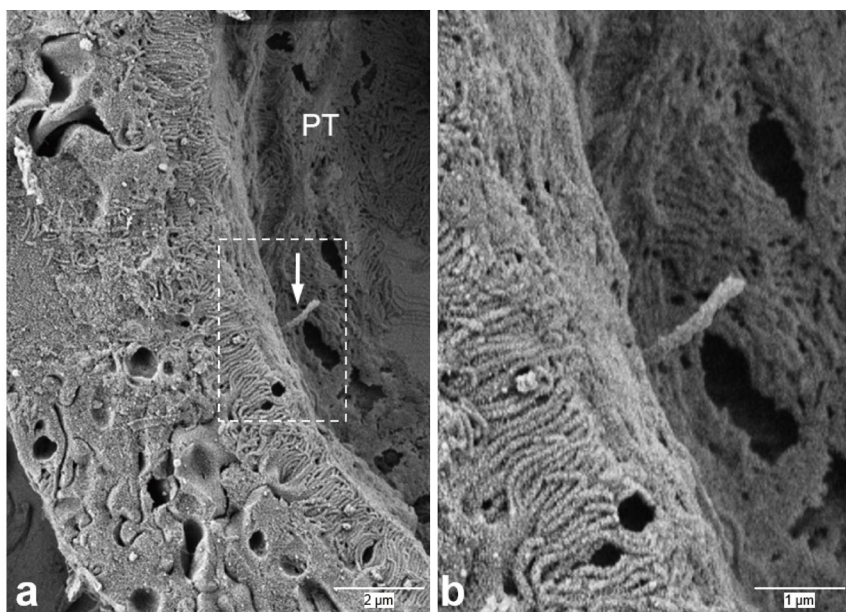
### 1. 토리쪽세관(proximal tubule)

토리쪽세관은 콩팥 겉질(cortex)에서 대부분 겉질미로(cortical labyrinth)에 존재하며, 단면상 원형에서 S자 모양에 이르기까지 다양하게 나타났다. 이것은 토리쪽세관이 구불구불한 경로를 이루며 소위 곱슬세관(convoluted tubule)을 이루기 때문이다. 또한 일부 토리쪽세관은 겉질에서 속질부챗살(medullary ray)에 존재하며, 이 부위의 토리쪽세관은 바깥속질(outer medulla)의 토리쪽세관과 함께 보다 곧은 형태(straight tubule)를 보였다.

공통적으로 토리쪽세관은 미세융모(microvilli)들이 잘 발달되어 있으며, 이것들이 광학현미경에서 두드러지게

잘 보이는 솔가장자리(brush border)를 형성하였다(Fig. 1a & c). 토리쪽세관의 표지 단백질 중 하나인 AQP1은 솔가장자리를 포함한 세포막 꼭대기 면(apical membrane)과 바닥가쪽면(basolateral membrane)에서 발현되었다(Fig. 1a). 일차섬모를 표지하는 acetylated  $\alpha$ -tubulin 형광 이미지는 세포막 자유면에서 내강을 향해 돌출하였으며, 대부분 AQP1을 발현하는 솔가장자리 속에 파묻혀 있었다. 전형적으로 가는 머리카락처럼 완전한 섬모의 모양을 보이기도 하였지만, 세포막 자유면에서 떨어져 내강 속에 점과 같이 나타나기도 하였다(Fig. 1a & b).

주사전자현미경에서 토리쪽세관의 단층 입방형 세포 중앙에 위치한 핵과 세포질의 많은 미토콘드리아들이 잘 관찰되었다. 또한 특징적인 미세융모들이 뚜렷하게 보였다(Fig. 1c). 전자현미경에서 측정된 미세융모의 길이는



**Fig. 2.** Scanning electron microscopy images of primary cilia (arrow) protruding between microvilli in the proximal tubule (PT). Right panel (b) is an enlargement of the rectangle area of (a). One primary cilium is visible by chance.

2.4±0.71 μm였다. 일차섬모는 거의 관찰되지 않았고, 매우 드물게 미세융모들 사이에서 내강으로 뻗어 있는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 따라서 토리쪽세관의 일차섬모 길이는 대부분이 미세융모와 비슷한 것으로 추정된다.

### 2. 먼쪽세관(distal tubule)

먼쪽세관은 토리쪽세관과 마찬가지로 콩팥 겉질과 바깥 속질에 위치하며, 곱슬한 또는 곧은 형태로 다양하게 나타났다. 먼쪽세관은 AQP1을 발현하지 않고 술가장자리 구조가 없어서, 토리쪽세관과 쉽게 구분되었다(Fig. 1a).

주사전자현미경에서 먼쪽세관은 미세융모가 드물고 길이도 길지 않아, 토리쪽세관에 비해 표면이 상대적으로 밋밋하게 보이는 것을 확인할 수 있었다. 토리쪽세관과 마찬가지로 단층 입방형 세포의 중앙에 핵이 위치하였으며, 바닥가쪽면 세포질 돌기 사이로 긴 막대 모양의 미토콘드리아들이 바닥막에 수직으로 위치하는 것을 볼 수 있었다. 토리쪽세관과 다르게 내강으로 돌출된 일차섬모를 비교적 쉽게 관찰하고 길이를 측정할 수 있었다. 먼쪽세관에서 섬모의 길이는 2.1±0.22 μm였다(Fig. 1d).

### 3. 집합관

집합관은 토리쪽세관 및 먼쪽세관과 비교하여 최소한 두 종류의 이상의 다른 세포, 즉 으뜸세포(principal cell)와 사이세포(intercalated cell)들로 구성되어 있다[21,22]. 으

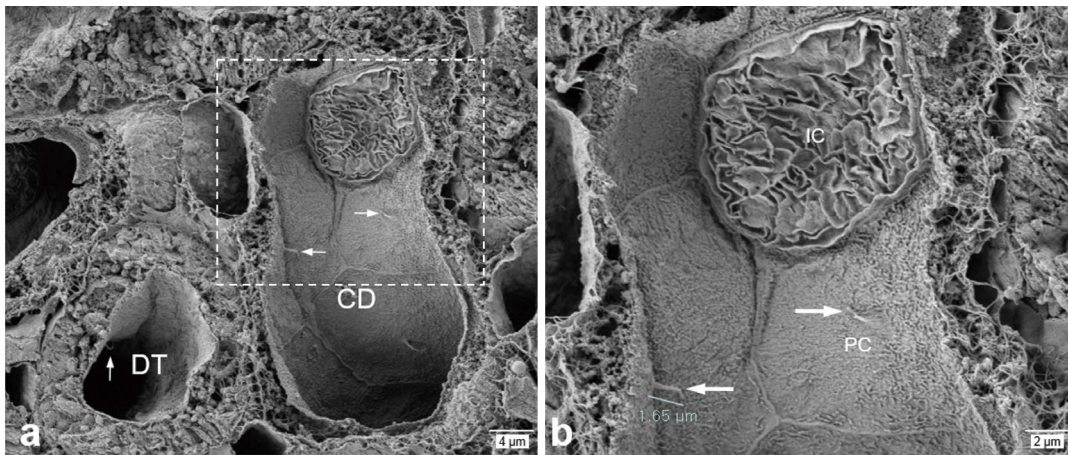
뜸세포는 꼭대기 면에 소수의 짧은 미세융모들이 있고, 중앙에 내강으로 향해 있는 하나의 긴 섬모의 존재로 쉽게 식별할 수 있었다. 이에 비해, 사이 세포는 꼭대기 면에 섬모가 없으며, 특징적으로 많은 미세 주름(microplicae)들이 형성되어 있는 것을 볼 수 있었다(Fig. 3a & b). 으뜸세포에서 일차섬모의 길이는 1.86±0.31 μm로 인접해 보이는 먼쪽세관(2.1±0.22 μm)과 서로 유의한 차이가 없었다.

### 4. 헨레고리의 가는다리

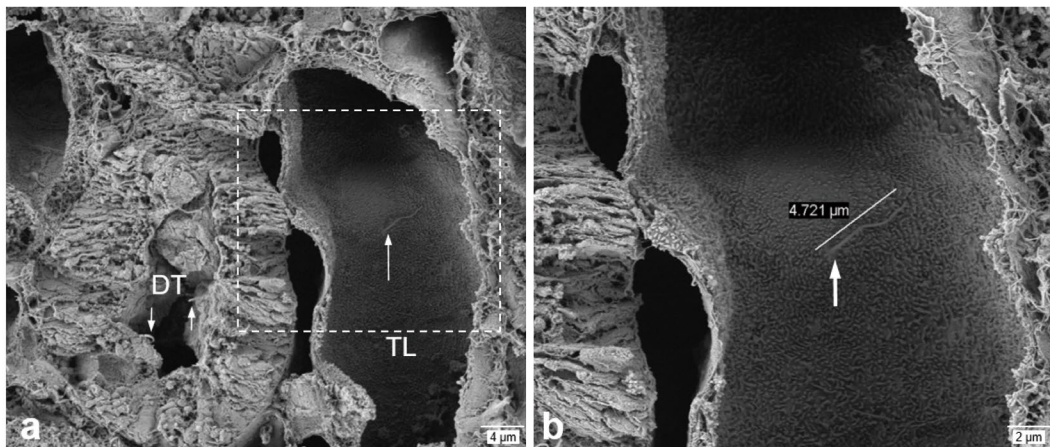
헨레고리는 U자 모양의 고리로서 가는다리 세관 부분을 포함한다. 헨레고리의 가는다리(thin limbs of the Henle's loop) 또는 중간세관(intermediate tubule)은 토리쪽세관과 먼쪽세관을 연결하고 있으며, 주사전자현미경에서 토리쪽세관과 먼쪽세관 및 집합관이 단층 입방형 세포인 것에 비교하여 납작하게 보이는 단층편평형으로 보여 구분이 가능하였다. 헨레고리의 가는다리에서 일차섬모 길이는 4.2±0.73 μm로 주변 먼쪽세관 및 집합관에 비해 유난히 길게 보였으며(Fig. 4a & b), 통계분석에서 유의한 차이를 보였다(Fig. 5).

## 고 찰

본 연구에서는 주사전자현미경을 이용하여 흰쥐의 콩팥에서 세관별로 일차섬모의 길이를 분석하였으며, 특히 헨



**Fig. 3.** Scanning electron microscopy images of the distal tubule (DT) and collecting duct (CD). Right panel (b) is an enlargement of the rectangle area of (a). The morphological differences between the principal (PC) and intercalated cells (IC) in the collecting duct can be distinguished (b). Primary cilia (arrows) are present exclusively in the principal cells of the collecting duct and are absent in the intercalated cells.



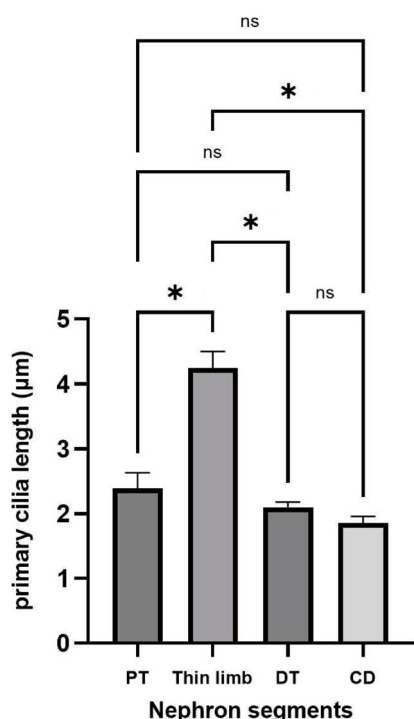
**Fig. 4.** Scanning electron microscopy images of the distal tubule (DT) and the thin limb of Henle's loop (TL). Right panel (b) is an enlargement of the rectangle area of (a). The primary cilia (arrow) length is notably longer in the thin limb.

레고리의 가는다리에서 섬모의 길이가 가장 길다는 사실을 처음으로 증명하였다. 헨레고리는 수질과 피질 사이에 삼투 기울기를 형성하여 소변의 농축 및 희석을 조절하는 곳으로, 이 부위의 섬모는 유체의 흐름과 농도의 변화를 보다 민감하게 감지하는 것으로 추측된다.

일차섬모는 몇 가지 표지 인자 단백질들의 항체를 이용하여 광학현미경으로 비교적 간편하게 관찰이 가능하다[23,24]. 그러나 광학현미경은 전자현미경에 비해서는 정확성과 해상도가 부족할 수밖에 없다. 조직 표본 제작 과정이 상대적으로 덜 섬세하고 고정, 탈수 및 포매 시 조직 보존에 필수적인 과정이 누락되거나 시약을 사용하지 않

아, 조직이 쉽게 수축하거나 손상될 수 있기 때문이다[25]. 또한 광학현미경은 미세구조의 특징을 확인할 수 없고, 발현되는 단백질의 형광 이미지를 간접적으로 보는 방식이어서 실제 섬모와 다소 차이가 날 가능성이 있다. 본 연구에서도 광학현미경으로 관찰한 형광 이미지는 섬모의 정확한 형태를 확인하기 어렵고, 상피세포와 떨어져 있거나 마치 빈 내강 공간에 떠 있는 것과 같은 양상들을 볼 수 있었다.

따라서 섬모의 길이는 전자현미경으로 측정하는 것이 가장 정확하지만 여기에도 기술적인 어려움이 있다. 투과 전자현미경의 경우 단면상 9+0와 같은 미세관 구조를 볼



**Fig. 5.** The mean values of primary cilia length in each kidney tubule were compared. Values are presented as means ± SD. \*P < 0.05, determined using one-way ANOVA followed by Tukey’s post-hoc test.

수 있지만, 가느다란 섬모의 전체 길이 이미지를 얻기 매우 어렵다[2,23]. 주사전자현미경의 경우 내강 표면이 잘 노출된다면, 비교적 섬모의 전체적인 모양을 관찰하기 수월한 이점이 있다. 그러나 토리쪽세관의 경우 본 연구 결과와 같이 대부분의 섬모가 솔가장자리를 형성하는 미세융모들 속에 숨겨져 있어 계측에 어려움이 있었다. 드물게 미세융모보다 돌출되어 관찰되는 일차섬모의 길이만 측정한다면 통계처리를 위해 충분한 수를 확보하기 어려울 뿐 아니라, 길이가 상대적으로 긴 섬모만 선별적으로 측정하는 셈이 되어 결과가 왜곡될 수 있다. 불가피하게 본 연구에서는 미세융모의 길이를 측정하여 인접한 타 세관의 섬모와 길이를 비교하였다.

이전 연구들에서 광학현미경만으로 콩팥 세관의 섬모의 길이를 관찰한 결과, 각 세관마다 다양한 범위 내에서 작은 차이가 있었다[10]. 본 연구에서는 전자현미경 시야에서 인접하여 동시에 관찰되는 세관들의 섬모를 관찰하고자 노력하였으며, 섬모의 길이를 전자현미경 소프트웨어에서 제공되는 측정도구를 상용하여 보다 정확하게 비교하였다.

가장 긴 일차섬모를 가지고 있는 헨레고리는 U자 모양

의 고리로서 가느다란 중간세관 부분을 포함한다. 헨레고리는 토리쪽세관과 먼쪽세관 사이에 위치하며, 토리쪽세관과 연결되는 내림가는다리(descending thin limb)와 먼쪽세관과 연결되는 오름가는다리(ascending thin limb)가 있다. 헨레고리의 내림가는다리에서는 수분이 자유롭게 이동하지만, 나트륨과 염소(NaCl)는 투과하지 못한다. 반대로 오름가는다리는 수분이 투과하지 못하고 나트륨과 염소는 투과하는 특성이 있다. 이런 기능적 특징으로 헨레고리의 가느다리는 소위 대항류증폭계(countercurrent multiplier)로서 사이질의 고삼투압농도를 이루게 하며, 소변농축 기전에 관여하는 것으로 알려져 있다[26,27].

헨레고리의 가느다리들이 일차섬모를 가지고 있는 사진은 일부 교과서에서 제한적으로 찾아볼 수 있다[21]. 그러나 사람을 포함한 특정 동물종에서 콩팥 세관별로 길이를 분석한 연구는 없다. 내림가는다리와 오름가는다리의 구분은 투과전자현미경으로 일부 가능하다. 그러나 세계적인 권위의 교과서에서조차도 세포 연결 구조 외에 일차섬모를 포함한 내강 표면의 구조의 차이에 대해 언급하고 있지 않다[21,28]. 본 연구결과에서도 측정된 헨레고리의 가느다리에서 일차섬모의 길이를 내림다리와 오름다리에서 따로 구분하지 못하였다. 향후 최신 연구 방법인 상관관계적광학현미경과전자현미경(correlative light and electron microscope, CLEM) 등을 활용한다면, 오름가는다리와 내림가는다리를 추가적으로 구별할 수 있을 것이다[29].

본 연구에서는 각 세관의 일차섬모를 해부학적으로 구별하려 노력하였다. 이상의 결과들은 다양한 콩팥 세관들의 고유한 기능들과 연관되어 일차섬모의 역할을 이해하는 데 기여할 것이다.

## REFERENCES

1. Webber WA, Lee J. Fine structure of mammalian renal cilia. *Anat Rec.* 1975;182:339-43.
2. Singla V, Reiter JF. The primary cilium as the cell’s antenna: signaling at a sensory organelle. *Science.* 2006;313:629-33.
3. McConnachie DJ, Stow JL, Mallett AJ. Ciliopathies and the Kidney: A Review. *Am J Kidney Dis.* 2021;77:410-9.
4. Praetorius HA, Spring KR. The renal cell primary cilium functions as a flow sensor. *Curr Opin Nephrol Hypertens.* 2003;12:517-20.
5. Praetorius HA. The primary cilium as sensor of fluid flow: new building blocks to the model. A review in the theme: cell signaling: proteins, pathways and mechanisms. *Am J*

- Physiol Cell Physiol. 2015;308:C198-208.
6. Nauli SM, Alenghat FJ, Luo Y, Williams E, Vassilev P, Li X, et al. Polycystins 1 and 2 mediate mechanosensation in the primary cilium of kidney cells. *Nat Genet.* 2003;33:129-37.
  7. Qian F, et al. The molecular basis of focal cyst formation in human autosomal dominant polycystic kidney disease type I. *Cell.* 1996;87:979-87.
  8. Ma M, Gallagher AR, Somlo S. Ciliary Mechanisms of Cyst Formation in Polycystic Kidney Disease. *Cold Spring Harb Perspect Biol.* 2017;9.
  9. Lee SH, Somlo S. Cyst growth, polycystins, and primary cilia in autosomal dominant polycystic kidney disease. *Kidney Res Clin Pract.* 2014;33:73-8.
  10. Park KM. Can Tissue Cilia Lengths and Urine Cilia Proteins Be Markers of Kidney Diseases? *Chonnam Med J.* 2018;54:83-9.
  11. Kong MJ, Bak SH, Han KH, Kim JI, Park JW, Park KM. Fragmentation of kidney epithelial cell primary cilia occurs by cisplatin and these cilia fragments are excreted into the urine. *Redox Biol.* 2018;20:38-45.
  12. Kim JI, Kim J, Jang HS, Noh MR, Lipschutz JH, Park KM, et al. Reduction of oxidative stress during recovery accelerates normalization of primary cilia length that is altered after ischemic injury in murine kidneys. *Am J Physiol Renal Physiol.* 2013;304:F1283-94.
  13. Han SJ, Jung JK, Im SS, Lee SR, Jang BC, Park KM, et al. Deficiency of primary cilia in kidney epithelial cells induces epithelial to mesenchymal transition. *Biochem Biophys Res Commun.* 2018;496:450-4.
  14. Saraga-Babic M, Vukojevic K, Bocina I, Drnasin K, Saraga M. Ciliogenesis in normal human kidney development and post-natal life. *Pediatr Nephrol.* 2012;27:55-63.
  15. Verghese E, Ricardo SD, Weidenfeld R, Zhuang J, Hill PA, Langham RG, et al. Renal primary cilia lengthen after acute tubular necrosis. *J Am Soc Nephrol.* 2009;20:2147-53.
  16. Lee SY, Lee SJ, Piao HL, Yang SY, Weiner ID, Kim J, et al. Hydration status affects osteopontin expression in the rat kidney. *J Vet Sci.* 2016;17:269-77.
  17. Lee SY, Han SM, Kim JE, Chung KY, Han KH. Expression of E-cadherin in pig kidney. *J Vet Sci.* 2013;14:381-6.
  18. Han KH, Lee SY, Kim WY, Shin JA, Kim J, Weiner ID. Expression of ammonia transporter family members, Rh B glycoprotein and Rh C glycoprotein, in the developing rat kidney. *Am J Physiol Renal Physiol.* 2010;299:F187-98.
  19. Han KH, Croker BP, Clapp WL, Werner D, Sahni M, Kim J, et al. Expression of the ammonia transporter, rh C glycoprotein, in normal and neoplastic human kidney. *J Am Soc Nephrol.* 2006;17:2670-9.
  20. Lee SY, Shin JA, Kwon HM, Weiner ID, Han KH. Renal ischemia-reperfusion injury causes intercalated cell-specific disruption of occludin in the collecting duct. *Histochem Cell Biol.* 2011;136:637-47.
  21. Verlander JW, Clapp WL. Anatomy of the Kidney, in Brenner and Rector's The Kidney, A.S.L. Yu, et al., Editors, Elsevier: Philadelphia; 2020. p. 38-79.
  22. Roy A, Al-bataineh MM, Pastor-Soler NM. Collecting duct intercalated cell function and regulation. *Clin J Am Soc Nephrol.* 2015;10:305-24.
  23. Deane JA, Verghese E, Martelotto LG, Cain JE, Galtseva A, Rosenblum ND, et al. Visualizing renal primary cilia. *Nephrology (Carlton).* 2013;18:161-8.
  24. Larkins CE, Aviles GD, East MP, Kahn RA, Caspary T. Arl13b regulates ciliogenesis and the dynamic localization of Shh signaling proteins. *Mol Biol Cell.* 2011;22:4694-703.
  25. Graham L, Orenstein JM. Processing tissue and cells for transmission electron microscopy in diagnostic pathology and research. *Nat Protoc.* 2007;2:2439-50.
  26. Dantzler WH, Layton AT, Layton HE, Pannabecker TL. Urine-concentrating mechanism in the inner medulla: function of the thin limbs of the loops of Henle. *Clin J Am Soc Nephrol.* 2014;9:1781-9.
  27. Imai M, Taniguchi J, Tabei K. Function of thin loops of Henle. *Kidney Int.* 1987;31:565-79.
  28. Takahashi-Iwanaga H, Iwata Y, Adachi K, Fujita T. The histotopography and ultrastructure of the thin limb of the Henle's loop: a scanning electron microscopic study of the rat kidney. *Arch Histol Cytol.* 1989;52:395-405.
  29. de Boer P, Hoogenboom JP, Giepmans BN. Correlated light and electron microscopy: ultrastructure lights up! *Nat Methods.* 2015;12:503-13.

**간추림** : 일차섬모는 콩팥 세관 세포에서 내강 표면으로 돌출된 머리카락 같은 구조이다. 콩팥에서 일차섬모의 미세 구조와 기능은 아직 알려지지 않은 부분들이 많다. 본 연구의 목적은 다양한 콩팥 부분에서 일차섬모를 구분하고 비교하는 것이다. 정상 성체 흰쥐의 콩팥 조직을 2% paraformaldehyde-lysine-periodate로 관류고정한 후, 광학 및 전자현미경으로 관찰하였다. 일차섬모를 표지하기 위해 acetylated  $\alpha$ -tubulin에 대한 항체를 사용하였고, 토리쪽세관을 표지하기 위해 각각 aquaporin 1 항체를 사용하였다. 먼쪽세관에서 일차섬모는 대부분 솔가장자리를 형성하는 미세융모들 속에 숨겨져 있어서 전자현미경으로 정확한 관찰이 어려웠으나, 공초점현미경에서 대략 주변의 먼쪽세관 및 집합관 일차섬모와 길이가 비슷하게 나타났다. 정확한 측정을 위해 전자현미경으로 관찰했을 때, 먼쪽세관과 집합관의 일차섬모 길이는 각각  $2.1 \pm 0.22 \mu\text{m}$ 와  $1.86 \pm 0.31 \mu\text{m}$ 로 서로 유의한 차이가 없었다. 이것은 또한 토리쪽세관의 미세융모 길이( $2.0 \pm 0.41 \mu\text{m}$ )와 거의 유사하였다. 그러나 헨레고리의 가는다리에서 일차섬모는  $4.2 \pm 0.73 \mu\text{m}$ 로 주변의 먼쪽세관 및 집합관에 비해 매우 길이가 길었다. 이상의 결과로 헨레고리에서는 일차섬모가 다른 세포들에 비해 특별하게 길다는 것을 증명하였다. 헨레고리에서 일차섬모의 역할은 역류증폭계통과 같은 특징적인 기능과 관련이 있을 것으로 생각된다.

**찾아보기 낱말** : 콩팥, 세관, 일차섬모, 전자현미경