

# Three-dimensional Reconstruction of the Knee for Ligament Reconstruction

Sung-Hwan Kim, M.D., Seung-Joo Ha, M.D.

Arthroscopy & Joint Research Institute and Department of Orthopedic Surgery, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

As computer technology develops and this is applied to medical image field, three dimensional image reconstruction technology using computer simulation is utilized in various categories that include anatomical study and biomechanics study of human body.

Especially orthopedic surgeons are able to investigate biomechanical function and be provided information for operations with this technology in terms of ligament reconstruction of knee. And this technology can be utilized in preparing preoperative planning and instructions and training. This review is about three dimensional image reconstruction technology which is utilized in ligament reconstruction of knee.

**Key Words** Three-dimensional Reconstruction · Ligament · Knee.

Received: July 9, 2014 / Revised: July 11, 2014 / Accepted: July 15, 2014

Address for correspondence: Sung-Hwan Kim, M.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Yonsei University College of Medicine, 50-1 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, Korea

Tel: 02-2228-2184, Fax: 02-363-1139, E-mail: orthohwan@gmail.com

## 서 론

3차원 영상 재건기술 (3-Dimensional image reconstruction)을 이용한 생체역학 연구는 1970년대에 최초로 시도되었으며, 컴퓨터단층촬영 (Computed Tomography, CT)을 이용한 3차원 영상 재건기술은 1980년대 보고되기 시작하여 최근까지 매우 다양한 분야에서 이용되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 3차원 영상은 상대적으로 적은 비용과 시간을 사용하여 실제 시행하기 불가능한 실험을 시행할 수 있고 해부학적 구조에 대한 교육에 이용할 수 있으며 생체내의 역학적 특성에 대한 정보를 제공한다. 또한 얻을 수 있는 데이터의 종류가 많고 동일한 조건에서 다양한 상황을 연출하여 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.<sup>1</sup> 특히 정형외과 슬관절 영역중에서 인공관절치환술 및 인대재건술에 있어서 역학적 기능의 영향을 규명하거나 실제 수술에 사용될 정보를 제공함으로써 실제 수술에 앞서 수술 예비계획의 목적으로도 사용될 수 있다. 본 종설에서는 슬관절 인대재건술 영역에서 사용되는 3차원 영상 기술에 대하여 보고하고자 한다.

## 슬관절 전방십자인대 재건술

전방십자인대 손상은 정형외과 스포츠 외상중에서 가장 흔히 발생하는 손상 중 하나이다. 스포츠 인구 및 각종 사고의 증가로 인하여 전방십자인대 손상 환자의 빈도는 증가하고 있으며, 미국정형외과학회의 통계에 따르면 연간 10만건의 전방십자인대 재건술이 시행되고 있고, 한국 건강심사보험평가원의 자료에 따르면 연간 14690건의 전방십자인대 재건술이 시행된다고 보고되고 있다. 최근의 임상적인 연구에 의하면 전방십자인대 재건술 이후 만족스러운 결과가 보고되고 있으나, 전반적인 기술의 발전과 함께 전방십자인대 손상 이전의 상태로 돌아가려는 환자의 욕구 또한 매우 높기 때문에 해부학적으로 정확하며, 정상적인 전방십자인대의 기능에 가까운 재건술을 시행하기 위한 노력이 필요하다.<sup>2,3</sup>

전방십자인대 손상에 대해 주로 전내측 다발만을 재건하는 단일 다발 전방십자인대 재건술이 시행되어 비교적 좋은 결과들이 보고되고 있다. 슬관절의 운동에 따라 전방십자인대의 길이

가 변하지 않는 등장성 대퇴 부착부는 해부학적 대퇴 부착부와 다르다고 알려져 있으나, 일부 사체 실험에서는 해부학적 대퇴 부착부와 등장성 대퇴 부착부가 일치한다는 보고도 있다.<sup>4,5</sup> 전내측 다발은 관절 운동에 따라 길이 변화가 비교적 적은 것으로 알려져 있다. Boisgard 등<sup>6</sup>은 자기공명영상장치 (Magnetic Resonance Imaging, MRI)를 이용한 3차원 영상 재건 기술을 이용하여 관절 운동에 따른 전내측 다발 및 후외측 다발의 길이 변화를 측정하였다. 저자들은 전내측 다발이 후외측 다발에 비해 길이 변화가 적다고 보고하였고 이를 바탕으로 전방십자인대 재건술을 시행함에 있어 참고로 할 수 있다고 하였다. 그러나 전내측 다발의 재건을 목표로하는 단일 다발 재건술은 전후방 불안정성 및 회전 불안정성이 동반될 수 있으므로<sup>7</sup> 최근에는 대퇴터널을 해부학적인 위치에 만들기 위해 노력을 하고 있으며, 이중 다발 전방십자인대 재건술을 이용하여 두가지를 모두 교정하려는 방법이 시도되고 있다.

대퇴 터널의 전후방 위치는 전방십자인대 재건술의 전후방 불안정성 실패를 결정하는 중요한 인자가 되는데, 이 때 Resident's ridge를 확인하는 것이 중요하다.<sup>8-10</sup> 이를 위해 Roh 등<sup>11</sup>은 다중채널컴퓨터단층촬영 (Multi-Detector Computed Tomography, MDCT)을 이용하여 3차원 재구성 분석을 시행하였으며, 대퇴골 후방 피질골로부터  $7.6 \pm 2.6\text{mm}$  지점에  $8.2 \pm 2.6\text{mm}$ 의 길이와  $3.5 \pm 1.5\text{mm}$  높이를 갖는 Resident's ridge가 존재하고 과관 절흔의 후벽에서 약 30% 앞쪽에 위치한다고 보고하였다. 이를 통해 수술 중 보다 정확한 대퇴 터널의 위치를 만들 수 있다고 하였다. 전방십자인대의 해부학적 대퇴 부착부는 여러 3차원 영상 재건 기술을 이용한 연구에서 그 위치가 밝혀졌는데<sup>9,12,13</sup> Iwahashi 등<sup>14</sup>에 의하면 3차원 영상 재건 기술로 확인한 전방십자인대의 대퇴부착부는 Resident's ridge와 대퇴 외과의 관절연골 사이에 위치하며  $128.3 \pm 10.5\text{mm}^2$  면적을 차지한다고 보고하면서 3차원 영상 재건 기술이 전방십자인대를 해부학적 위치에 정확히 위치시키는데 많은 도움이 된다고 하였다.

이중 다발 재건술은 전방십자인대의 전내측 다발과 후외측 다발의 해부학적 부착부에 위치하도록 대퇴 터널을 만들기 때문에 단일 다발 재건술에 비해 이론적으로는 해부학적 및 생역학적 측면에서 장점을 가지고 있다고 알려져 있다. Inoue 등<sup>15</sup>은 3차원 컴퓨터단층촬영을 이용하여 3차원 영상 재건술을 시행하고 여기에 터널의 위치가 보이도록 투명도를 높인 T-3DCT 소프트웨어를 개발하여 보다 정확히 터널의 위치를 평가할 수 있도록 하였다. 그러나 1983년 Mott<sup>6</sup>에 의해 이중 다발 재건술이 처음 소개된 이후 현재까지 보고된 문헌에 의하면 이중 다발 재건술이 단일 다발 재건술에 비해 뛰어난 임상적 결과를 보여주지 못

한다고 알려져 있다. Taketomi 등<sup>16</sup>은 최근에 3차원 투시 방식 선 촬영 내비게이션 장치 (3D fluoroscopic navigation)를 이용하여 전방십자인대의 해부학적 대퇴 부착부에 대퇴 터널을 만들어 이중 다발 재건술을 시행하였고, 수술 후 3차원 컴퓨터 단층 촬영 장치를 이용하여 대퇴 터널의 적정성 및 이에 따른 임상적 평가를 하여 단기 추시상 좋은 결과를 얻었다고 보고하였다. 그러나 Markolf 등<sup>17</sup>은 사체를 이용한 시뮬레이션된 축이동검사 (pivot shift test)를 진행하여 단일 다발 재건술만으로도 정상적인 슬관절 생역학의 회복이 가능하다고 하였으며, Kondo 등<sup>18</sup> 및 Tsuda 등<sup>19</sup>은 대퇴 터널의 위치를 보다 외측으로 시행하는 경우 회전 안정성 회복에 대하여 단일 다발 재건술과 이중 다발 재건술 사이의 차이가 없을 것이라고 하였다. 대퇴 터널의 위치를 외측으로 시행하기 위해서는 기존에 사용되었던 경골 터널 형성 술기 (transtibial technique)보다는 전내측 삽입구 형성 술기 (transportal technique)가 더 유리한 것으로 알려져 있다. Kopf 등<sup>20</sup>은 경골 터널 형성 술기로 만들어진 대퇴 터널을 3차원 컴퓨터단층촬영 장치를 이용하여 분석하였는데, 해부학적 대퇴 부착부보다 전방에 터널이 형성되기 때문에 해부학적 부착부에 터널을 만들기 위해서는 다른 수술적 방법을 고려할 것으로 권유하였다. 또한 Tashiro 등<sup>21</sup>은 3차원 컴퓨터 지원 설계 (3D-Computer Aided Design, 3D-CAD) 모델을 이용하여 경골 터널 형성 술기에 비해 전내측 삽입구 형성 술기가 보다 정확한 해부학적 위치에 터널을 만들 수 있으며, 타원형의 터널 입구를 피할 수 있다고 하였다.

## 슬관절 후방십자인대 및 후외측 구조물 재건술

후방십자인대 손상은 전방십자인대 손상에 비하여 그 발생빈도는 낮지만, 전방십자인대에서처럼 스포츠 인구 및 교통 사고 등의 증가로 인해 발생빈도가 점차 증가하는 추세이다. 후방십자인대 단독 손상은 드물며, 슬관절의 기타 인대 손상이 동반되는 경우가 많기 때문에 후방 및 후외측 불안정성과 외회전 및 내만 불안정성이 발생하게 된다. 그러나 아직까지 후방십자인대를 포함한 슬관절의 후외측 구조물에 대한 3차원 영상 재건 기술을 이용한 문헌 보고는 전방십자인대의 그것에 비해 부족하다고 할 수 있다.

증상이 없는 급성의 단독 후방십자인대 손상에서는 보존적 치료를 시도할 수도 있지만, 고도의 후방 전위, 동반된 인대 손상, 증상이 있는 만성 후방십자인대 손상의 경우에는 하지 정렬 축의 부정정렬을 유발하고, 이로 인한 관절면의 퇴행성 변화를 유발할 수 있기 때문에 수술적 치료가 권장되고 있다.<sup>22,23</sup> 후방

십자인대 재건술에서 경골 터널의 위치보다 대퇴 터널의 위치를 정확히 하는 것이 슬관절의 운동역학을 회복하는데 중요하다고 보고되었다.<sup>24</sup> 이를 위해 과거에는 사체 실험이나 이차원적인 방사선 사진을 이용하였으나 이러한 방법으로는 대퇴 부착부의 후방십자인대의 구조적 복잡성으로 인해 해부학적 경골 터널을 정확히 판단하기가 어려웠다. 그러나 최근 3차원 영상 재건 기술이 발달함에 따라서 대퇴 부착부와 후방십자인대의 생역학에 대해 보다 정확히 이해할 수 있게 되었다.

Westermann 등<sup>25</sup>은 컴퓨터단층촬영 장치를 이용한 3차원 영상 재건 기술을 사용하여 후방십자인대의 해부학적 부착부위를 나타내었고, 이를 통해 Footprint-overlap mapping 기술을 이용하여 각기 다른 표본에서 검출된 대퇴 부착부위를 한개의 대퇴골 모형에 표현하였다. 저자들에 따르면 후방십자인대 대퇴 부착부의 중심은 과간 절흔의 천장에서 25% 하방, 전방 대퇴과에서 38% 되는 지점에 있다고 하였다. Covey 등<sup>26</sup>이 시행한 해부학적 및 생역학적 연구에서 후방십자인대 대퇴 부착부의 등장점은 해부학적 부착부의 5~15% 만 차지하며, 대부분은 비등장점에 부착되어 있다고 보고되었다. 또한 등장점에 대퇴 터널을 형성할 경우 45° 이상의 슬관절 굴곡상태에서는 후방 전위가 일어난다는 보고도 있다.<sup>27</sup> 생역학적인 연구에 따르면 정상적인 후방십자인대에서 전외측 다발이 슬관절의 후방 전위를 막아주는 역할을 한다고 알려져있어<sup>28</sup> 전외측 다발의 재건을 목표로하는 단일 다발 재건술이 시행되었다. 그러나 단일 다발 재건술 시행 후에도 30° 미만의 슬관절 굴곡시에 후방 전위가 발생할 수 있으며, 90° 이상의 슬관절 굴곡시에는 회전 불안정성이 나타날 수 있다고 보고<sup>29</sup>가 되면서 전방십자인대의 경우처럼 이중 다발 재건술에 대한 필요성도 제기되었다. Yoon 등<sup>30</sup>은 3차원 유한요소법 (finite element method)을 이용하여 단일 다발 재건술, 이중 다발 재건술, 인대 잔유물 보존 이중 다발 재건술의 경우를 비교하였고, 이중 다발 보강 재건술을 시행한 경우가 후방 및 회전 안정성에 가장 우수한 것으로 보고하였다. 후외측 구조물 손상이 동반된 만성 후방십자인대 손상에서는 하지 정렬축을 교정하기 위해 개방적 경골 절골술을 시행한다. Petrigliano 등<sup>31</sup>은 3차원 영상 재건기술및생역학적인연구를통해 이러한 개방적 경골 절골술을 시행하게 되면 관상면에서의 하지 정렬축이 교정될 뿐만 아니라 시상면에서의 경골후경사각이 증가하게 되어 후방안정성에 기여를 한다고 보고하였다.

## 결 론

1970년대 이래로 3차원 컴퓨터 영상 재건 기술이 의학 영상 기술과 접목이 되면서 많은 발전을 이루었다. 3차원 영상 재건

기술은 인체의 해부학적 구조 및 생역학적인 기능에 대하여 보다 방대하고 자세한 연구를 가능하게 하였다. 특히 비침습적인 방법으로 반복적인 결과를 도출할 수 있기 때문에 이전의 사체 실험이나 2차원 영상 이미지를 이용하여 시행되었던 연구에 비해 시간과 비용 측면에서의 장점을 지니고 있다. 또한 Yeom 등<sup>32</sup>은 3차원 영상 재건 기술을 이용하여 환자의 슬관절 실험 모형 모델을 제작하고, 이를 통해 초심자들의 교육 및 훈련에 유용하게 사용할 수 있다고 하였다. 따라서 3차원 영상재건 기술은 인체의 생역학적인 정보제공뿐만 아니라 수술 전 계획 및 훈련에 이르기까지 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. Pena E, Calvo B, Martinez MA, Doblare M. A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint. *J Biomech* 2006; 39(9):1686-1701
2. Meredick RB, Vance KJ, Appleby D, Lubowitz JH. Outcome of single-bundle versus double-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament: a meta-analysis. *Am J Sports Med* 2008; 36(7):1414-1421
3. Irrgang JJ, Bost JE, Fu FH. Re: Outcome of single-bundle versus double-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament: a meta-analysis. *Am J Sports Med* 2009;37(2):421-422; author reply 422
4. Hoogland T, Hillen B. Intra-articular reconstruction of the anterior cruciate ligament. An experimental study of length changes in different ligament reconstructions. *Clin Orthop Relat Res* 1984(185):197-202
5. Schutzer SF, Christen S, Jakob RP. Further observations on the isometricity of the anterior cruciate ligament. An anatomical study using a 6-mm diameter replacement. *Clin Orthop Relat Res* 1989(242):247-255
6. Boisgard S, Levai JP, Geiger B, Saidane K, Landjerit B. Study of the variations in length of the anterior cruciate ligament during flexion of the knee: use of a 3D model reconstructed from MRI sections. *Surg Radiol Anat* 1999;21(5):313-317
7. Colombet P, Robinson J, Christel P, Franceschi JP, Djian P. Using navigation to measure rotation kinematics during ACL reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 2007;454:59-65
8. Fu FH, Jordan SS. The lateral intercondylar ridge--a key to anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. *J Bone Joint Surg Am* 2007;89(10):2103-2104
9. Purnell ML, Larson AI, Clancy W. Anterior cruciate ligament insertions on the tibia and femur and their relationships to critical bony landmarks using high-resolution volume-rendering computed tomography. *Am J Sports Med* 2008;36(11):2083-2090
10. Hutchinson MR, Ash SA. Resident's ridge: assessing the cortical thickness of the lateral wall and roof of the intercondylar notch. *Arthroscopy* 2003;19(9):931-935
11. Roh J-H, Min B-H, Park J-W, Ahn B-M. Geometry of Resident's ridge with Multidetector-Row Computed Tomograph Image. *Journal of Korean Arthroscopy Soc.* 2008;12:40-44
12. Abreu ESGM, Oliveira MH, Maranhao GS, Deligne LD, Pfeilsticker RM, Novais EN, et al. Three-dimensional computed tomography evaluation of anterior cruciate ligament footprint for anatomic single-bundle reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Ar-*

- throsc 2013
13. Han Y, Kurzenczyg D, Hart A, Powell T, Martineau PA. Measuring the anterior cruciate ligament's footprints by three-dimensional magnetic resonance imaging. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20(5):986-995
  14. Iwahashi T, Shino K, Nakata K, Otsubo H, Suzuki T, Amano H, et al. Direct anterior cruciate ligament insertion to the femur assessed by histology and 3-dimensional volume-rendered computed tomography. *Arthroscopy* 2010;26(9 Suppl):S13-20
  15. Inoue M, Tokuyasu S, Kuwahara S, Yasojima N, Kasahara Y, Kondo E, et al. Tunnel location in transparent 3-dimensional CT in anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction with the trans-tibial tunnel technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2010;18(9):1176-1183
  16. Taketomi S, Inui H, Nakamura K, Hirota J, Sanada T, Masuda H, et al. Clinical outcome of anatomic double-bundle ACL reconstruction and 3D CT model-based validation of femoral socket aperture position. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2013
  17. Markolf KL, Park S, Jackson SR, McAllister DR. Simulated pivot-shift testing with single and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *J Bone Joint Surg Am* 2008;90(8):1681-1689
  18. Kondo E, Merican AM, Yasuda K, Amis AA. Biomechanical comparison of anatomic double-bundle, anatomic single-bundle, and nonanatomic single-bundle anterior cruciate ligament reconstructions. *Am J Sports Med* 2011;39(2):279-288
  19. Tsuda E, Ishibashi Y, Fukuda A, Tsukada H, Toh S. Comparable results between lateralized single- and double-bundle ACL reconstructions. *Clin Orthop Relat Res* 2009;467(4):1042-1055
  20. Kopf S, Forsythe B, Wong AK, Tashman S, Irrgang JJ, Fu FH. Transtibial ACL reconstruction technique fails to position drill tunnels anatomically in vivo 3D CT study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20(11):2200-2207
  21. Tashiro Y, Okazaki K, Uemura M, Toyoda K, Osaki K, Matsubara H, et al. Comparison of transtibial and transportal techniques in drilling femoral tunnels during anterior cruciate ligament reconstruction using 3D-CAD models. *Open Access J Sports Med* 2014;5:65-72
  22. Rubinstein RA, Donald Shelbourne K. Diagnosis of posterior cruciate ligament injuries and indications for nonoperative and operative treatment. *Operative Techniques in Sports Medicine* 1993; 1(2):99-103
  23. Johnson DH, Fanelli GC, Miller MD. PCL 2002: indications, double-bundle versus inlay technique and revision surgery. *Arthroscopy* 2002;18(9 Suppl 2):40-52
  24. Jeong WS, Yoo YS, Kim DY, Shetty NS, Smolinski P, Logishetty K, et al. An analysis of the posterior cruciate ligament isometric position using an in vivo 3-dimensional computed tomography-based knee joint model. *Arthroscopy* 2010;26(10):1333-1339
  25. Westermann RW, Sybrowsky C, Ramme AJ, Amendola A, Wolf BR. Three-dimensional characterization of the femoral footprint of the posterior cruciate ligament. *Arthroscopy* 2013;29(11):1811-1816
  26. Covey DC, Sapega AA, Sherman GM. Testing for isometry during reconstruction of the posterior cruciate ligament. *Anatomic and biomechanical considerations. Am J Sports Med* 1996;24(6):740-746
  27. Galloway MT, Grood ES, Mehalik JN, Levy M, Saddler SC, Noyes FR. Posterior cruciate ligament reconstruction. An in vitro study of femoral and tibial graft placement. *Am J Sports Med* 1996;24(4):437-445
  28. Harner CD, Xerogeanes JW, Livesay GA, Carlin GJ, Smith BA, Kusayama T, et al. The human posterior cruciate ligament complex: an interdisciplinary study. Ligament morphology and biomechanical evaluation. *Am J Sports Med* 1995;23(6):736-745
  29. Gill TJ, DeFrate LE, Wang C, Carey CT, Zayontz S, Zarins B, et al. The biomechanical effect of posterior cruciate ligament reconstruction on knee joint function. Kinematic response to simulated muscle loads. *Am J Sports Med* 2003;31(4):530-536
  30. Yoon KH, Kim YH, Ha JH, Kim K, Park WM. Biomechanical evaluation of double bundle augmentation of posterior cruciate ligament using finite element analysis. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2010;25(10):1042-1046
  31. Petrigliano FA, Suero EM, Voos JE, Pearle AD, Allen AA. The effect of proximal tibial slope on dynamic stability testing of the posterior cruciate ligament- and posterolateral corner-deficient knee. *Am J Sports Med* 2012;40(6):1322-1328
  32. Yeom JS, Lee KW, Kim MH, Kim Y, Kim N, Lee JB, et al. Surgical Simulation for Placement of Isometric Point of Anterior Cruciate Ligament: A System using Three-dimensional Computer Models and Rapid Prototyping Models. *J Korean Orthop Assoc* 2002;37(5):600-605