

The Korean Society of Computer Assisted Orthopaedic Surgery

강직성 척추염 환자의 후만 변형의 교정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션

최성훈 · 김민우* · 박예수[†]

한양대학교병원 서울병원 정형외과학교실, *부산의료원 정형외과학교실, †한양대학교 구리병원 정형외과학교실

Computer Simulation for Surgical Correction of Kyphotic Deformity in Ankylosing Spondylitis: A Narrative Review

Sung Hoon Choi, M.D., Ph.D., Min-Woo Kim, M.D., Ph.D.*, and Ye-Soo Park, M.D., Ph.D.[†]

Department of Orthopedic Surgery, Hanyang University Hospital, Seoul, *Department of Orthopedic Surgery, Busan Medical Center, Pusan, †Department of Orthopedic Surgery, Hanyang University Guri Hospital, Guri, Korea

Ankylosing spondylitis is a chronic systemic rheumatic disease that mainly affects the sacroiliac joints and the skeleton. When advanced, it results in cervical and thoracolumbar kyphosis and ankylosis. In ankylosing spondylitis, the main purpose of deformity correction surgery is to deter the progressive spasticity of the spine and to restore the alignment in the coronal and sagittal planes. Successful corrective surgery enables patients with ankylosing spondylitis to improve disability, pain, quality of life, as well as lung function. For successful deformity correction surgery in ankylosing spondylitis patients, a detailed preoperative evaluation of underlying medical diseases and complications related to anesthesia is essential. Also, the use of computer-assisted simulation programs to calculate the level of osteotomy correction and the operator's experience for precise planning of the level of correction can be beneficial. A computer simulation program for preoperative preparation for successful surgery of kyphosis due to ankylosing spondylitis, analysis of spinal sagittal alignment factors and compensation mechanisms, and determination of correction angles are introduced, and representative open and closed wedge osteotomy techniques are described.

Key words: ankylosing spondylitis, kyphosis, computer simulation, spine, corrective surgery

서론

강직성 척추염(Ankylosing spondylitis, AS)은 천장관절과 전신 골격에 주로 영향을 미치는 만성 전신 류마티스 질환으로, 진행된 단계에서 심각한 흉요추 후만증 및 척추의 강직을 초래한다.¹⁾ 강직성 척추염의 유병률은 0.1%~1.4%로 보고되어 있으며, 치료

되지 않은 강직성 척추염은 척추 기형을 유발할 수 있다.²⁾ 흉요추 후만증은 강직성 척추염 환자의 30% 이상에서 발견될 수 있다. 강직성 척추염에서 변형 교정술의 주된 목적은 진행되는 척추의 강직으로 인한 기형의 자연적 경과를 멈추고 관상면과 시상면에서 균형을 회복하는 것이다. 강직성 척추염 환자의 변형 교정술은 장애, 통증, 삶의 질의 향상 및 폐 기능을 개선하는 것으로 보고되었다.³⁻⁵⁾ 강직성 척추염 환자의 척추 변형 교정술에 대한 초기 결과는 성인 척추 변형(adult spinal deformity, ASD) 교정술에 비하여 높은 합병증으로 안전성 문제가 대두되었으나 현대적 수술 기법의 표준화를 통하여 최근에는 고령의 강직성 척추염 환자의 후만증에 대한 변형 교정의 양호한 결과가 보고되었

Received October 30, 2022 Revised February 23, 2023 Accepted March 14, 2023

Correspondence to: Ye-Soo Park, M.D., Ph.D.

Department of Orthopedic Surgery, Hanyang University Guri Hospital, 153 Gyeongchun-ro, Guri 11923, Korea

TEL: +82-31-560-2187 FAX: +82-31-557-8781 E-mail: hyparkys@hanyang.ac.kr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2801-2674>

다.⁶⁾ 흉요추에서 강직성 척추염의 변형 교정술은 수술 후 정렬 예측과 잔여 불균형 예방을 위한 조치 등이 주된 관심사이며, 경추에서는 안전한 수술 절차의 표준화와 재정렬 계획, 수술 중 교정 조치 및 합병증 방지 등에 대한 논점이 해결되어야 한다.^{3,7)} 본 중설에서는 강직성 척추염 환자에서 시상면 불균형에 대한 수술 계획 및 수술 시 특징을 열거하고 강직성 척추염의 경추 및 흉요추 교정에 대한 최신 성과 및 과제에 대하여 기술한다. 강직성 척추염 환자와 성인 척추 변형 환자 교정 수술의 차이점은 강직성 척추염 환자는 일반적으로 뻣뻣한 척추를 교정해야 한다는 것이다. 일면 고정형 시상면 불균형(fixed sagittal imbalance)에 대한 교정술과 유사하나, 강직성 척추염 환자의 뚜렷한 특징을 고려하여 수술 계획 및 정렬 예측, 수술 전략 선택에 대하여 기술한다.

본 론

1. 수술 전 준비(general preoperative preparation)

강직성 척추염으로 인한 후만증의 성공적인 수술을 위해서는 척추외과의 성인 척추 변형에 대한 충분한 치료 경험과 중환자실을 포함한 충분한 원내 기반 시설이 필수적이다. 강직성 척추염 환자는 많은 기저 질환을 동반하는 경우가 많아 수술 전, 후 다양한 합병증이 발생할 수 있다. 흉요추 후만증이 있는 강직성 척추염 환자를 수술할 때 신경학적 결손, 의인성 경막 손상 등의 주요 합병증 및 재수술의 비율은 30% 이상으로 알려져 있으며,⁸⁾ 이는 성인 척추 변형 수술 후 발생하는 신경학적 합병증의 비율보다 높은 수준이다.⁹⁻¹¹⁾ 마찬가지로 경추 기형 수술에서 24%~60%에서 주요 합병증이 보고되었으며 7%~25%에서 신경학적 합병증이 보고되었다.¹²⁾ 경흉추 유합술에서 재수술이 필요한 경우는 31%까지 비교적 높게 보고되어 있다.¹³⁾ 수술 중 신경 감시 장치의 사용이 경추 및 흉요추 절골술에서 척수 및 신경근 손상으로 인한 합병증을 예방할 수 있어 권장된다.

강직성 척추염으로 인한 후만증이 발생한 환자는 수술대에 눕기 어려운 경우가 많고, 복와위를 취할 때 복압이 증가하고 폐환기가 어려워질 수 있으므로 사전에 평가하는 것이 필수적이다. 수술 전 최소 3개월 전 금연이 바람직하며 비만한 환자의 경우 체중 조절에 대한 내과적 평가가 이루어져야 한다. 엎드린 자세에서 장기간 수술을 하면 안압이 높아질 수 있어 시력 저하를 유발하기 때문에 경추 후만증이 있는 강직성 척추염 환자는 안과 전문의의 술전 상담이 필요하다.¹⁴⁾ 비디오 투시 연하기능 검사 등 이비인후과적 평가는 삼관이 어려울 것으로 예상되는 환자나 경추 후만증 교정 후 연하곤란의 위험이 예상되는 환자에게 필요하다. 기타 심폐기능, 보행기능에 대한 평가 등 내과 및 외과적 위험 요소를 낮추기 위한 다양한 평가 및 조치가 필요하다. 골다공증은 강직성 척추염 환자의 30% 내외에서 동반되어 있는 것으로 보고되어 있어 골밀도 검사 및 골다공증에 대한 적절한 조

치가 수술 전에 이루어져야 한다.¹⁴⁾ 주요 골다공증성 골절의 위험도가 높은 환자에서는 술전 6개월 이상의 골형성 촉진제의 사용 및 술 후 사용이 권장된다. 일반적으로 술 후 골흡수 억제제의 사용은 수술 후 골유합에 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ 폐 기능은 수술 전, 후 악화될 수 있으므로 주의하여야 한다.

수술 전 영상의학적 평가에는 사진과 두개골과 대퇴골 근위부가 충분히 포함되도록 촬영한 전척추 기립 방사선 사진이 필수적이다. 또한 교정이 필요한 부위 및 전신 선별 자기공명영상 검사 및 전산화 단층 촬영 검사가 시행되어야 한다. 경추부 후만증의 교정이 필요한 경우 전산화 단층 척추 동맥 조영술(Computed tomography vertebral arteriography)이 필요하다. 전척추 기립 방사선 검사를 통하여 교정이 필요한 부분 및 교정의 정도를 술전에 예측할 수 있으며, 이에 대한 자세한 방법에 대하여는 이후 기술한다.

2. 척추 시상면 정렬 분석(spinal sagittal alignment analysis)

시상면의 정렬 인자 중 체간 불균형을 식별하기 위해 가장 중요한 인자는 시상면 수직축(sagittal vertical axis, SVA)이다. 경추, 흉요추 및 전 척추의 전방 이동으로 인한 불균형을 평가하기 위하여 각각 제2경추에서 제7경추까지 혹은 제1천추까지 내린 수선의 수평면 거리인 C2-C7 시상면 수직축, C2-S1 시상면 수직축이나, 제7경추에서 제1천추까지 내린 수선의 수평거리인 C7-S1 시상면 수직축의 측정이 필요하다(Fig. 1). 강직성 척추염 환



Figure 1. Schematic drawings of translational (A) and angular (B) parameters for evaluating spinal alignment in ankylosing spondylitis. SVA, represents the sagittal vertical axis; PI, pelvic incidence; PT, pelvic tilt; SS, sacral slope; LL, lumbar lordosis; TK, thoracic kyphosis; C2-C7 SVA, C2-C7 sagittal vertical axis; C2-S1 SVA, C2-S1 sagittal vertical axis; C7-S1 SVA, C7-S1 sagittal vertical axis.

자의 경우 요추, 경추의 굴곡-신전 측정으로 가동성 분절을 식별하는 것이 중요하다. 역동적 방사선 검사를 통하여 가동 척추 분절의 확인은 술 전 허용 가능한 운동 범위를 알려주기도 하지만 다른 한편으로 운동성이 있는 부위가 강직성 척추염 환자에서 통증의 원인이 되는 분절일 수 있으므로 압박 등을 반드시 확인하여야 한다.

턱-이마 수직각(chin-brow vertical angle, CBVA)은 특히 경추의 강직이 있는 강직성 척추염에서 흉요추 후만 변형의 교정에 매우 중요하다(Fig. 2).¹⁶⁾ 이전 연구에서 Suk 등¹⁷⁾은 -10° 와 10° 사이의 턱-이마 수직각을 가진 환자는 수평 시선이 좋았다고 보고하였다. 그러나 임상에서 수술 후 -10° 에서 10° 사이의 턱-이마 수직각 환자는 우수한 수평 시선을 가지고 있음에도 불구하고 요리, 청소, 책상 작업 등의 실내 활동에 어려움을 호소하는 것으로 나타났다. 기형 교정을 위한 최적의 턱-이마 수직각을 찾기 위한 연구로 Song 등¹⁶⁾은 환자의 측면 사진에서 수술 전후 턱-이마 수직각을 구하였고, 이를 수술 기법에 상관없이 턱-이마 수직각 각도에 따라 6개 군으로 나누어 분석하였다(그룹 A: 턱-이마 수직각 $<0^\circ$; 그룹 B: $0^\circ \leq$ 턱-이마 수직각 $<10^\circ$; 그룹 C: $10^\circ \leq$ 턱-이마 수직각 $<20^\circ$; 그룹 D: $20^\circ \leq$ 턱-이마 수직각 $<30^\circ$; 그룹 E: $30^\circ \leq$ 턱-이마 수직각 $<40^\circ$; 그룹 F: 턱-이마 수직각 $\geq 40^\circ$). 수술에 대한 만족도 및 실내 활동에서 경추 강직을 동반한 강직성 척추염의 흉요추 후만증 환자는 술 후 턱-이마 수직각이 하방 10° 에서 하방 20° 일 때 최상의 만족도를 보였다고 보고하였다.

3. 보상 기전에 대한 분석 (analysis for compensation mechanisms)

성인 척추 변형 환자는 체간의 무게중심이 앞으로 이동하는 것에 대응하여 골반을 후방 회전(retroversion)시켜 무게중심을 유지

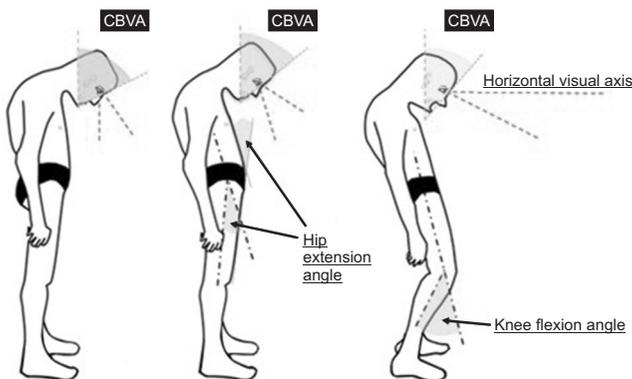


Figure 2. Evaluation of spinal deformities using the chin-brow vertical angle (CBVA). The amount of correction can be estimated by measuring the change of CBVA and the angle of extension of the hip joint and the angle of flexion of the knee joint to maintain the horizontal gaze in the knee joint extension state.

하려 한다. 강직성 척추염 환자에서도 무게 중심을 엉덩이 축을 기준으로 최소한의 근육 에너지로 균형을 잡을 수 있도록 반응한다. 그러나 인대와 근육의 자가면역반응에 의한 구축에 의하여 강직성 척추염 환자의 하지, 골반 및 척추 관절의 보상은 성인 척추 변형 환자의 보상 기전과 다를 수 있다. 강직성 척추염 환자에서는 주로 고관절의 신전 구축과 슬관절의 굴곡 구축이 흔히 발생한다. 강직성 척추염 환자의 고관절 이완은 25%~30%에서 보고되어 있으며 고관절의 구축 변형이 진행된 경우 척추 절골술 전에 고관절 전치환술이 시행되는 것이 바람직하다는 견해도 있지만,¹⁸⁾ 저자의 경험으로는 고관절 수술 후 척추 절골술을 시행하게 되면 수술 후 변화된 시상축으로 인해 골반에서의 회전이 일어나야 하지만 강직성 척추염의 특성상 골반에서의 회전 적응이 일어나지 않고, 수술한 고관절에 과도한 힘이 가해짐으로 인해 수술한 고관절의 탈구가 일어나는 경우를 볼 수 있어 신중한 결정이 필요하다고 하겠다.

흉요추 교정 수술 후 강직성 척추염 환자의 방사선 사진 보상은 골반 경사각(pelvic tilt, PT), 대퇴골 굴곡 각도(femoral flexion angle, FFA), C2-C7 시상면 수직축, C7-S1 시상면 수직축, 제2 경추-제7경추 전만각(C2-C7 lordosis) 및 두개골-제2경추 전만각(C0-C2 lordosis) 등에 의해 평가된다(Fig. 1). 흉요추 후만증이 있는 강직성 척추염 환자 중 경추 과전만증의 보상 기전이 유지되는 환자는 경추 후만증이 있는 환자보다 전방 시야가 유지되어 더 나은 삶의 질 수치를 보이는 것으로 알려져 있다.¹⁹⁾ 강직성 척추염 환자 중 흉추부의 유연성이 있는 경우 경추 후만증에 대한 변형 교정 술 후 흉추 후만(thoracic kyphosis, TK)은 증가하고 제7경추(C7 slope) 및 제1흉추(T1 slope)의 경사각은 감소하는 것으로 보고되어 있다.³⁾ 즉, 경추 후만증에 대하여 흉요추부의 보상기전으로 전방 시야를 유지하고 있는 환자에서는 경추 후만증에 대한 교정술을 시행한 경우 흉요추부의 보상 기전의 정도가 약화되어 골반 경사각과 흉추 후만각이 감소한다. 반면에, 이러한 흉요추부 보상기전이 없이 흉요추부가 유합된 강직성 척추염 환자들은 경추 후만증 교정술을 시행하여도 C2-C7 시상면 수직축은 지속적으로 증가하여 있다. 따라서 흉요추부가 유합되어 있는 환자에서는 경추 후만증과 C2-C7 시상면 수직축을 함께 교정하기 위하여 제7경추 척추경 제거 절골술(Pedicle subtraction osteotomy, PSO)의 추가 실시가 필요할 수 있다. 따라서 후만 변형에 대해 추정된 모든 보상 메커니즘의 합을 고려하여 최종 교정 목표 각도를 예상하여야 한다.

4. 교정 분절과 교정각(location of correction and correction angle)

척추 변형에 대한 교정을 경추 또는 흉요추 중 어느 분절에서 수행해야 하는지 여부는 C2-S1 시상면 수직축, C7-S1 시상면 수직축 및 C2-C7 시상면 수직축에 대한 평가가 중요하다. 세 지표

를 순차적으로 분석하여 어느 부위가 전체적인 불균형에 가장 크게 기여하는지, 그리고 그것이 국소적 혹은 전척추에 영향을 미치는 기형인지 구별해야 한다. 강직성 척추염 환자에서 흉추는 늑골 관절의 강직이 동반되어 있으므로 일반적으로 절골술 교정을 시행하지 않는다.²⁰ 흉요추의 경우 변형 교정술에 대한 교정각을 최대한으로 하면서 조화로운 정렬 상태를 얻기 위해서는 절골술을 시행하는 분절은 신경학적 위험이 가장 낮고 후만 변형의 정점에 가까운 분절로 결정하는 것이 좋다.²¹⁻²³⁾

절골술의 위치는 골반에 가까운 아래 척추 분절일수록 동일한 절골술의 교정각에 대한 C2-S1 시상면 수직축과 C7-S1 시상면 수직축을 후방 이동시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.²⁴⁾ 최근 Kim 등²⁵⁾은 성인 척추 변형 교정술을 시행한 환자에서 하위 요추에서 절골술을 시행할수록 동일한 요추 전만각의 회복에서 더 많은 골반 경사각의 감소를 유발한다고 보고하였다. 경흉추 이행부인 제7경추-제1흉추 주위에서 시행하는 절골술은 C2-C7 시상면 수직축을 후방 이동시켜 두개골의 무게 중심을 몸통 위로 다시 재배치하여 경흉부 근육의 부하를 줄일 수 있다고 보고되었다.²⁶⁾ 대부분의 강직성 척추염 환자에서 경추 후만증의 교정은 척추 동맥의 해부학을 고려하여 C6-C7 분절에서 시행된다.

5. 턱-이마 수직각을 이용한 교정각 결정

강직성 척추염 환자의 변형 교정술시 교정각은 변형이 발생하기 전에 비하여 환자의 슬관절 굴곡 구축, 고관절 신전 손실 혹은 굴곡 구축의 각을 반영한 후 턱-이마 수직각의 평가를 통하여 전방 시야를 확보하기 위한 각과 후방 경사된 골반 보상을 추가하여 결정한다.¹⁷⁾ 경추 후만증으로 인하여 전방 시야의 결손이 발생한 경우 C2-C7 시상면 수직축과 C2-C7 후만각을 고려하여 경추 후만증의 교정량을 추가할 수 있다. 일반적으로 강직성 척추염 환자에서 턱-이마 수직각은 10° 이상을 유지하는 것이 보행 시 전방 주시 및 일상생활에 유리하다고 알려져 있다. 과도한 교정으로 턱-이마 수직각이 10° 이내가 될 경우 하방 주시를 위한 시선과 요리, 청소 및 책상 작업과 같은 기능에 상당한 제한을 초래한다. Song 등¹⁶⁾의 연구에서는 기능적 한계, 주관적인 외모, 수평 시선의 성취와 관련하여 10°에서 20° 사이로 턱-이마 수직각이 교정된 경우 이상적이라고 보고하였다. 다만 각 강직성 척추염 환자의 다양한 요구를 감안하여 수술 후 턱-이마 수직각은 개별적으로 결정되어야 한다.

영상의학적 턱-이마 수직각은 심한 기형이 없는 강직성 척추염 환자에서는 전척추 시상면 단순 방사선 검사상 측정이 가능하다. 그러나 진행성 후만증이 있는 강직성 척추염 환자에서는 드물지 않게 영상검사상 턱-이마 수직각의 측정이 불가능한 경우가 있다. 통상적으로 건강한 성인에서 영상 의학적 턱-이마 수직각과 후두경사(occipital slope, OS)와 연관성이 있으며 턱-이마 수직각과 후두경사 사이에 약 10°의 차이가 있음이 보고되었

다.²⁷⁾ 다른 연구에서는 McGregor 선의 기울기와 턱-이마 수직각과의 유사성에 대하여 보고하였다.²⁸⁾ 따라서 강직성 척추염 환자에서 방사선 사진에서 후자를 평가할 수 없는 경우 후두경사 또는 McGregor 선의 기울기가 턱-이마 수직각에 대한 대체 지표로 사용 가능하다.

6. 교정 순서에 대한 전략(sequence correction strategy)

강직성 척추염에 대한 교정은 흉요추 교정이 경추보다 낮은 위도를 보이고 있어 통상적으로 먼저 시행되며, 경추 및 흉요추 변형이 복합된 환자에서는 흉요추부 교정 수술 후 전체적인 정렬 및 전방 시야 유지능력이 개선되어 추가적인 경추 후만증의 교정이 필요하지 않는 경우가 많다. 따라서 경추 및 흉요추부의 유연성이 저명하지 않은 경우에는 전체 척추를 강직된 척추로 가정하고 제2경추에서 경흉부 이행부까지의 정렬을 평가하여 경흉추의 후만 변형이 저명하지 않거나 후만과 전만 사이의 생리적 중립 경추 정렬이 존재하는 경우, 흉요추의 교정으로 전체적인 불균형이 해결될 수 있다. 경추 후만증이 동반된 경우에는 필요시 흉요추부 교정을 시행한 후 변화된 C7-S1 시상면 수직축을 고려하여 추가적인 경추 후만증의 교정을 시도할 수 있다. 강직성 척추염 환자를 대상으로 한 일련의 경추 후만증 수술에서 24%의 환자에서 이전에 흉요추 교정을 받은 적이 있음이 보고되어 있다.¹³⁾ 심한 경추 후만증이 있으나 요추 변형 또는 흉추 후만증이 심하지 않은 경우, 혹은 C7-S1 시상면 수직축이 50 mm 이내에 있는 강직성 척추염 환자의 경우 흉요추 교정은 전체 척추 정렬의 후방 이동을 초래할 수 있으므로 경추 후만에 대하여만 교정하는 것이 적절하다.

7. Surgimap을 통한 교정각 결정

강직성 척추염 환자의 후만증 교정시에 절골할 분절과 교정각을 결정하고, 시상면 정렬을 미리 예측하는 것은 성공적인 결과를 얻기 위해 필수적이다. 이에 따라 여러 가지 방사선학적 지표들을 이용하여 술 후 시상면 정렬을 계산하는 방법들이 소개되어 왔다. Gertzbein와 Harris²⁹⁾는 방사선 필름을 오려 붙이는 방법을 이용하여 교정 정도를 계산하는 방법을 소개하였으며, 그 외에도 tangent method, chin-brow vertical angle method와 whole body kyphosis angle method 등의 다양한 방법이 소개되었으나, 이들의 방법은 직접 방사선 필름을 자르고 수동적으로 변형각을 결정해야 하거나 소요되는 시간이 길어 시행 시 불편한 점이 단점으로 지적되어 사용이 제한적이다.^{17,30,31)} Lafage 등⁹⁾은 시상면 불균형 환자를 대상으로 비유합 분절의 보상기전과, 골반 기울기를 포함한 골반지표들을 이용하여 높은 예측 정확도를 보인 바 있으나, 강직성척추염 환자에서는 대부분의 분절이 유합되어 있어, 비유합 분절의 보상기전이 의미가 없고, 골반지표들의

보상작용 또한 정상적으로 발생하지 않아, 일반적으로 아래 소개된 공식을 적용하기 어렵다.

lumbar lordosis (LL)=0.45×pelvic incidence (PI)+32°.

LL+PI+TK≤45°

LL>PI+9°, ±9

LL≥TK+20°

LL=1/2(PI TK)+10°

Park 등³²⁾은 Surgimap Spine Software (Nemaris, Inc)를 통한 유용성을 확인한 바 있으며 술 전 예측 값과 술 후 방사선학적 지표의 유의한 연관성을 확인하였고, 시상 수직축의 개선과 임상적 지표 향상의 연관성을 확인하였다(Fig. 3). 상용화 프로그램인 Surgimap 등의 프로그램을 사용하면 수술적 교정량을 쉽게 계산할 수 있다. Surgimap은 다양한 수준에서 절골술의 시뮬레이션이 가능하고 국소 교정각 및 C7-S1 시상면 수직축의 변화 및 골반 지표(골반 경사각, sacral slope, PI)의 변화를 시각화한다. 절골술 수준에서 교정 벡터를 사용하면 예상 회전 중심을 예측할 수 있다. Park 등³³⁾은 강직성 척추염을 진단받은 환자 중 후만증에 대해 수술적 치료를 받은 환자 18예를 대상으로 술 전 가상 교정은 Surgimap을 이용하여 시행한 결과를 보고하였다. 가상 교정을 통해 절골 부위와 교정 정도를 결정하였고, 척추경제거 절골술을 단독으로 시행하거나 Smith-Peterson osteotomy (SPO)를 추가로 시행할지 결정하였다.³²⁾ 수술은 가상교정을 통해 결정한 술식에 따라 시행한 뒤 후외방 척추 유합술을 시행하였으며, Andersson 병변이 동반되어 있는 경우 전방 추체간 유합술을 병행하여 치료하였다. 절골 술 전후 방사선학적 평가는 전후 기

립 자세에서 촬영한 척추전장 측면 사진을 촬영하였다. 흉추 후만각, 요추 전만각 및 C7-S1 시상면 수직축의 술 전 값, 술 전 컴퓨터 계측 값을 측정하였으며, 술 후 값을 평가하였다. 저자들은 Surgimap을 통하여 술 전 예측 값과 술 후 방사선학적 지표의 유의한 연관성을 확인하였고, 시상 수직축의 개선과 임상적 지표 향상의 연관성을 확인하였다.^{32,33)} 술 전 가상교정을 통하여 교정 분절과 교정각을 예측하는 데 도움이 될 뿐만 아니라 척추경제거 절골술을 단독으로 시행하거나 SPO로 추가적인 교정이 필요한 지 등을 판단할 수 있으며, 외래에서 간편하게 사용할 수 있으며, 술 전후 변화를 간단히 도식화할 수 있어, 이전에 소개된 방법들과 비교하여 쉽고 빠르게 가상교정이 가능한 장점이 있으며, 수술 후 정면 주시 각도의 이동, 자세 변화 등에 대해 쉽고 정확하게 이해하는데 도움을 주고, 특히 교정술 후 변화된 형태를 시각적으로 보여줌으로써 환자의 만족감을 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 강직성 척추염 환자의 후만 변형의 교정 시 Surgimap을 이용한 수술 전 가상교정을 통해 고도의 후만 변형을 교정하는 어려운 수술을 시행하기 전에 정확한 수술 계획을 세움으로써 신체적 정신적 평가지표의 개선을 보였다.³⁴⁾

성인 척추 변형 수술에서 수술 후 정렬을 정확하게 계획하는 것과 관련된 문제는 수술 후 잔여 시상 불균형으로 통상적으로 C7-S1 시상면 수직축>40 mm을 기준으로 하였을 때 약 20%의 비율에서 잔여 불균형이 있음이 보고되었다.³⁵⁾ 한 연구에서는 전체 환자의 3분의 2에서 ‘과소교정’ 또는 ‘과교정’이 있음을 보고하였다.³⁵⁾ 잔여 불균형으로 인해 기구 파손(implant failure), 불유합, 교정각 손실 등의 위험이 보고되어 있으며,^{36,37)} 잔류 변형과 기계적 손상 사이에 유의미한 상관 관계가 보고되었다. 따라서, 수술 후 정렬의 정확한 예측은 합병증 비율을 낮출 수 있기 때문에 중요한 요소이다.

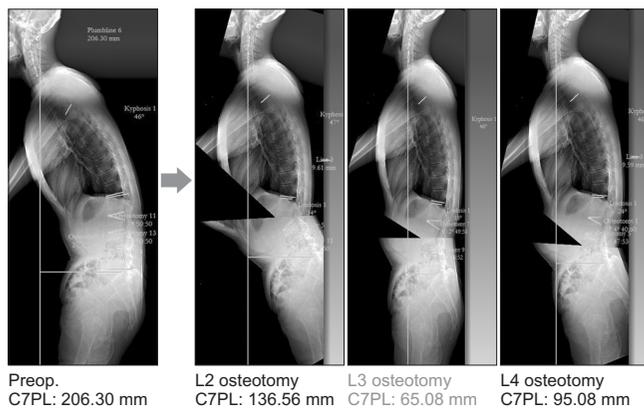


Figure 3. A representative case demonstrating postoperative sagittal imbalance correction. A 35-year-old man with severe kyphotic deformity underwent an L3 pedicle subtraction osteotomy. Based on the surgimap simulation, L3 was decided because the highest C7-S1 sagittal vertical axis reduction was estimated by L3 pedicle subtraction osteotomy 31. C7PL, C7 plumb line.

8. 교정각 결정을 위한 계획

강직성 척추염 환자에서 흉요추 후만증에 대한 수술적 교정량은 골반의 후방 변형 및 FFA을 고려하고 턱-이마 수직각의 과도한 교정을 피하면서 천골 종판 위에 C7-S1 시상면 수직축, C2-C7 시상면 수직축이 평행하게 내려오도록 결정하여야 한다. 경추의 후만증이 없는 강직성 척추염 환자의 경우 위의 방법으로 두개골이 고관절 축위에 놓여 균형대(Cone of economy)위에 무게중심이 놓이게 된다. Surgimap 등을 이용한 시뮬레이션에서 적절한 교정각을 구현할 수 있다(Fig. 3). 방사선학적으로 계산된 교정량은 턱-이마 수직각, 고관절 신전 및 하지 보상 메커니즘을 고려하여 임상적으로 계획된 교정량과 비교하여 술자가 최종 결정하여야 한다. 수술 후 예상되는 턱-이마 수직각은 방사선 사진이나 후두경사를 통해 평가할 수 있다. 수술 후 턱-이마 수직각은 절골술 교정에 의해 감소할 수 있으며, 수술 후 골반 전방 회전 및 슬관절 고관절의 신전 능력에 의해 증가할 수 있다.

경추 후만변형의 교정 각도를 계획하는 것은 두개골의 수직선, C7-S1 시상면 수직축과 턱-이마 수직각을 고려하여 결정하여야 하며 골반 및 하지 보상도 고려하여야 한다. 통상적으로 C2-C7 시상면 수직축 40 mm 이내 턱-이마 수직각 10°에서 20° 사이로 교정하는 것이 바람직하다. 경추 후만증이 있는 강직성 척추염 환자의 수술 목표는 시각적 축의 회복 및 경추 주위 근육의 피로로 인한 목 통증을 최소한으로 줄이는 것으로 C2-C7 시상면 수직축을 C7에 가깝게 이동시켜 생리학적 체중 부하 축과 시각적 축의 복원이다.

9. 강직성 척추염에 의한 후만증에 대한 절골술

수술적 치료로 교정할 부위와 각도가 결정되면 계획된 교정량을 달성하기 위해 어떠한 절골술을 시행할 것인지에 대한 질문이 남아 있다. 각 절골술의 교정 메커니즘, 달성 가능한 교정각, 교정 후 안정성, 교정 손실 위험, 수술 이환율 및 합병증의 빈도에 이해하는 것이 중요하다. 성인 척추 변형에서 교정하는 것과 마찬가지로 강직성 척추염 환자의 변형 교정술 후에도 복강 부피가 증가하고 복부 장축 길이가 증가하며, 흉요추 후만증의 교정으로 상 장간막 동맥 증후군(superior mesenteric artery syndrome)이 발생할 가능성이 있다.^{38,39)}

제거될 척추의 해부학적 부위와 절제량을 고려하여 절골술의 종류는 Schwab 등⁴⁰⁾이 제안한 분류표에 의하여 결정되며(Fig. 4), 경추의 경우 Ames 등⁴¹⁾이 제안한 분류표에 의한다. 절골술은 폐쇄형 대 개방형 췌기형 절골술(closed wedging osteotomy,

CWO/open wedge osteotomy, OWO)로 구분될 수 있다.

폐쇄형 췌기형 절골술은 척추경제거 절골술이 가장 많이 사용되고 있으며 Enercan 등⁴²⁾은 강직성 척추염 환자에게 척추경제거 절골술을 사용한 결과를 보고하였다. 척추경제거 절골술에서 후방 추체 높이가 감소할 수록 후방 단축을 통해 척추경제거 절골술 교정각을 증가시킬 수 있으며 한 분절에서 약 30°까지 교정각을 이끌어낼 수 있다. 강직성 척추염 환자에서 시행된 척추경제거 절골술 상, 하 분절의 추간판은 일반적으로 골화되거나 자발적인 유합 가능성이 있으며 후관절의 접촉에 의해 후방 유합이 이루어진다.

개방형 췌기형 절골술은 SPO가 가장 많이 시행된다. 1 mm의 후관절 사이의 간격으로 약 1°의 교정을 얻을 수 있다. 일반적으로 척추경을 제거하지는 않으며 의인성 추간공 협착증을 예방하기 위하여 후관절 주위의 신경관의 충분한 감압에 주의하여야 한다.⁴³⁾ 강직성 척추염 환자에서 자발적인 전방 유합의 비율은 높은 편이나 과교정시의 불유합에 주의하여야 한다. 각 분절에서 시행된 개방형 췌기형 절골술은 약 10° 정도의 교정을 기대할 수 있다.

결론

강직성 척추염 환자의 경추 및 흉요추 후만 변형에 대한 교정은 마취와 관련한 합병증 및 다양한 기저질환으로 인하여 내과적인 세심한 계획이 필요하다. 또한 교정량 및 교정 부위에 대한 정밀한 계획을 세우기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 사용이 권장되며, 술자의 풍부한 경험을 통한 섬세한 수술이 필수적이다. 적절한 변형 교정은 강직성 척추염 환자의 장애와 통증 감소, 폐기능 개선뿐만 아니라 삶의 질에 대한 향상을 도모할 수 있으므로 후만 변형이 심한 환자에게 세심한 교정 수술을 시행하여야 할 것이다.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors have nothing to disclose.

ORCID

Sung Hoon Choi, <https://orcid.org/0000-0003-3328-2043>

Min-Woo Kim, <https://orcid.org/0000-0001-5609-3507>

Ye-Soo Park, <https://orcid.org/0000-0002-2801-2674>

REFERENCES

1. Dakwar E, Reddy J, Vale FL, Uribe JS. A review of the

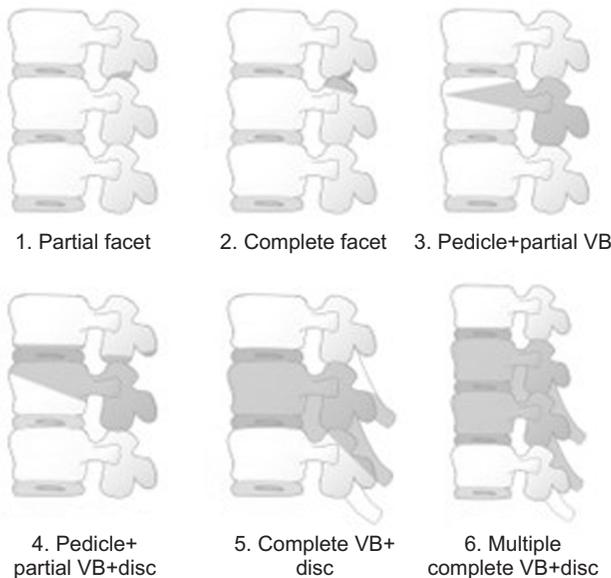


Figure 4. Schwab classification of the types of osteotomies. 1. Partial facet joint. 2. Complete facet joint. 3. Pedicle and partial vertebral body. 4. Pedicle, disc, and partial vertebral body. 5. Complete vertebral body and disc. 6. Multiple vertebral bodies and discs.

- pathogenesis of ankylosing spondylitis. *Neurosurg Focus*. 2008;24:E2.
2. Koller H, Koller J, Mayer M, Hempfing A, Hitzl W. Osteotomies in ankylosing spondylitis: where, how many, and how much? *Eur Spine J*. 2018;27(Suppl 1):70-100.
 3. Iyer S, Nemani VM, Nguyen J, et al. Impact of cervical sagittal alignment parameters on neck disability. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2016;41:371-7.
 4. Kim KT, Lee SH, Suk KS, Lee JH, Jeong BO. Outcome of pedicle subtraction osteotomies for fixed sagittal imbalance of multiple etiologies: a retrospective review of 140 patients. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37:1667-75.
 5. Fu J, Zhang G, Zhang Y, et al. Pulmonary function improvement in patients with ankylosing spondylitis kyphosis after pedicle subtraction osteotomy. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2014;39:E1116-22.
 6. Theologis AA, Tabaraee E, Funao H, et al. Three-column osteotomies of the lower cervical and upper thoracic spine: comparison of early outcomes, radiographic parameters, and peri-operative complications in 48 patients. *Eur Spine J*. 2015;24 Suppl 1:S23-30.
 7. Mundwiler ML, Siddique K, Dym JM, Perri B, Johnson JP, Weisman MH. Complications of the spine in ankylosing spondylitis with a focus on deformity correction. *Neurosurg Focus*. 2008;24:E6.
 8. Liu H, Yang C, Zheng Z, et al. Comparison of Smith-Petersen osteotomy and pedicle subtraction osteotomy for the correction of thoracolumbar kyphotic deformity in ankylosing spondylitis: a systematic review and meta-analysis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2015;40:570-9.
 9. Lafage V, Bharucha NJ, Schwab F, et al. Multicenter validation of a formula predicting postoperative spinopelvic alignment. *J Neurosurg Spine*. 2012;16:15-21.
 10. Gupta MC, Ferrero E, Mundis G, et al. Pedicle subtraction osteotomy in the revision versus primary adult spinal deformity patient: is there a difference in correction and complications? *Spine (Phila Pa 1976)*. 2015;40:E1169-75.
 11. Glassman SD, Dimar JR 2nd, Carreon LY. Revision rate after adult deformity surgery. *Spine Deform*. 2015;3:199-203.
 12. Smith JS, Ramchandran S, Lafage V, et al. Prospective multicenter assessment of early complication rates associated with adult cervical deformity surgery in 78 patients. *Neurosurgery*. 2016;79:378-88.
 13. Koller H, Meier O, Zenner J, Mayer M, Hitzl W. Non-instrumented correction of cervicothoracic kyphosis in ankylosing spondylitis: a critical analysis on the results of open-wedge osteotomy C7-T1 with gradual Halo-Thoracic-Cast based correction. *Eur Spine J*. 2013;22:819-32.
 14. Wang DM, Zeng QY, Chen SB, Gong Y, Hou ZD, Xiao ZY. Prevalence and risk factors of osteoporosis in patients with ankylosing spondylitis: a 5-year follow-up study of 504 cases. *Clin Exp Rheumatol*. 2015;33:465-70.
 15. Joaquim AF, de Oliveira SA, Appenzeller S, Patel AA. Spine surgery and ankylosing spondylitis: optimizing perioperative management. *Clin Spine Surg*. 2023;36:8-14.
 16. Song K, Su X, Zhang Y, et al. Optimal chin-brow vertical angle for sagittal visual fields in ankylosing spondylitis kyphosis. *Eur Spine J*. 2016;25:2596-604.
 17. Suk KS, Kim KT, Lee SH, Kim JM. Significance of chin-brow vertical angle in correction of kyphotic deformity of ankylosing spondylitis patients. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2003;28:2001-5.
 18. Hu J, Qian BP, Qiu Y, et al. Can acetabular orientation be restored by lumbar pedicle subtraction osteotomy in ankylosing spondylitis patients with thoracolumbar kyphosis? *Eur Spine J*. 2017;26:1826-32.
 19. Qian J, Qiu Y, Qian BP, Zhu ZZ, Wang B, Yu Y. Compensatory modulation for severe global sagittal imbalance: significance of cervical compensation on quality of life in thoracolumbar kyphosis secondary to ankylosing spondylitis. *Eur Spine J*. 2016;25:3715-22.
 20. Chang KW, Chen HC, Chen YY, Lin CC, Hsu HL, Cai YH. Sagittal translation in opening wedge osteotomy for the correction of thoracolumbar kyphotic deformity in ankylosing spondylitis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006;31:1137-42.
 21. Zheng GQ, Song K, Zhang YG, et al. Two-level spinal osteotomy for severe thoracolumbar kyphosis in ankylosing spondylitis. Experience with 48 patients. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2014;39:1055-8.
 22. Wang Y, Zhang Y, Mao K, et al. Transpedicular bivertebrae wedge osteotomy and discectomy in lumbar spine for severe ankylosing spondylitis. *J Spinal Disord Tech*. 2010;23:186-91.
 23. Atici Y, Akman YE, Balioglu MB, Kargin D, Kaygusuz MA. Two level pedicle subtraction osteotomies for the treatment of severe fixed sagittal plane deformity: computer software-assisted preoperative planning and assessing. *Eur Spine J*. 2016;25:2461-70.
 24. Qian BP, Wang XH, Qiu Y, et al. The influence of clos-

- ing-opening wedge osteotomy on sagittal balance in thoracolumbar kyphosis secondary to ankylosing spondylitis: a comparison with closing wedge osteotomy. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37:1415-23.
25. Kim HJ, Alluri RK, Lafage R, et al. Upper versus lower lumbar lordosis corrections in relation to pelvic tilt - an essential element in surgical planning for sagittal plane deformity. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2022;47:1145-50.
26. Patwardhan AG, Havey RM, Khayatadeh S, et al. Postural consequences of cervical sagittal imbalance: a novel laboratory model. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2015;40:783-92.
27. Iyer S, Lenke LG, Nemani VM, et al. Variations in occipitocervical and cervicothoracic alignment parameters based on age: a prospective study of asymptomatic volunteers using full-body radiographs. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2016;41:1837-44.
28. Bao H, Varghese J, Lafage R, et al. Principal radiographic characteristics for cervical spinal deformity: a health-related quality-of-life analysis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42:1375-82.
29. Gertzbein SD, Harris MB. Wedge osteotomy for the correction of post-traumatic kyphosis. A new technique and a report of three cases. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1992;17:374-9.
30. Min K, Hahn F, Leonardi M. Lumbar spinal osteotomy for kyphosis in ankylosing spondylitis: the significance of the whole body kyphosis angle. *J Spinal Disord Tech*. 2007;20:149-53.
31. Qian BP, Mao SH, Jiang J, Wang B, Qiu Y. Mechanisms, predisposing factors, and prognosis of intraoperative vertebral subluxation during pedicle subtraction osteotomy in surgical correction of thoracolumbar kyphosis secondary to ankylosing spondylitis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42:E983-90.
32. Park YS, Kim HS, Baek SW, Oh JH. Preoperative computer-based simulations for the correction of kyphotic deformities in ankylosing spondylitis patients. *Spine J*. 2014;14:2420-4.
33. Park JS, Kim YH, Yang JH, Ko YI, Park YS. Psychological changes and employment outcomes after kyphosis correction in patients with ankylosing spondylitis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2019;44:996-1002.
34. Park YS, Kim HS, Baek SW. Spinal osteotomy in ankylosing spondylitis: radiological, clinical, and psychological results. *Spine J*. 2014;14:1921-7.
35. Ploumis A, Simpson AK, Cha TD, Herzog JP, Wood KB. Coronal spinal balance in adult spine deformity patients with long spinal fusions: a minimum 2- to 5-year follow-up study. *J Spinal Disord Tech*. 2015;28:341-7.
36. Blondel B, Schwab F, Bess S, et al. Posterior global malalignment after osteotomy for sagittal plane deformity: it happens and here is why. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2013;38:E394-401.
37. Schwab FJ, Patel A, Shaffrey CI, et al. Sagittal realignment failures following pedicle subtraction osteotomy surgery: are we doing enough?: clinical article. *J Neurosurg Spine*. 2012;16:539-46.
38. Ji ML, Qian BP, Qiu Y, et al. Change in abdominal morphology after surgical correction of thoracolumbar kyphosis secondary to ankylosing spondylitis: a computed tomographic study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2015;40:E1244-9.
39. Qian BP, Ji ML, Jiang J, Zhu ZZ, Wan B, Qiu Y. Anatomic relationship between superior mesenteric artery and aorta before and after surgical correction of thoracolumbar kyphosis. *J Spinal Disord Tech*. 2013;26:E293-8.
40. Schwab F, Blondel B, Chay E, et al. The comprehensive anatomical spinal osteotomy classification. *Neurosurgery*. 2014;74:112-20; discussion 120.
41. Ames CP, Smith JS, Scheer JK, et al. A standardized nomenclature for cervical spine soft-tissue release and osteotomy for deformity correction: clinical article. *J Neurosurg Spine*. 2013;19:269-78.
42. Enercan M, Ozturk C, Kahraman S, Sarier M, Hamzaoglu A, Alanay A. Osteotomies/spinal column resections in adult deformity. *Eur Spine J*. 2013;22(Suppl 2):S254-64.
43. Chang KW, Chen YY, Lin CC, Hsu HL, Pai KC. Closing wedge osteotomy versus opening wedge osteotomy in ankylosing spondylitis with thoracolumbar kyphotic deformity. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30:1584-93.

대한정형외과컴퓨터수술학회

강직성 척추염 환자의 후만 변형의 교정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션

최성훈 · 김민우* · 박예수[†]

한양대학교병원 서울병원 정형외과학교실, *부산의료원 정형외과학교실, †한양대학교 구리병원 정형외과학교실

강직성 척추염(Ankylosing spondylitis)은 천장관절과 전신 골격에 주로 영향을 미치는 만성 전신 류마티스 질환으로, 진행된 경우 경추 및 흉요추 후만증 및 강직을 초래한다. 강직성 척추염에서 변형 교정술의 주된 목적은 진행되는 척추의 강직으로 인한 기형의 자연적 경과를 멈추고 관상면과 시상면에서 균형을 회복하는 것이다. 강직성 척추염 환자의 변형 교정술은 장애, 통증, 삶의 질의 향상 및 폐 기능의 개선을 도모할 수 있는 것으로 알려져 있다. 강직성 척추염 환자의 후만 변형에 대한 교정은 마취와 관련한 합병증 및 다양한 기저질환에 대한 세심한 술전 계획이 필요하며, 교정량에 대한 정밀한 계획을 세우기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 사용이 권장된다. 강직성 척추염으로 인한 후만증의 성공적인 수술을 위한 수술 전 준비, 척추 시상면 정렬 인자 및 보상 기전에 대한 분석 및 교정각 결정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램에 대하여 소개하고 대표적인 교정술에 대하여 기술한다.

색인단어: 강직성 척추염, 후만증, 컴퓨터 시뮬레이션, 척추, 교정술

접수일 2022년 10월 30일 수정일 2023년 2월 23일 게재확정일 2023년 3월 14일

†책임저자 박예수

11923, 구리시 경춘로 153, 한양대학교 구리병원 정형외과학교실

TEL 031-560-2187, FAX 031-557-8781, E-mail hyparkys@hanyang.ac.kr, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2801-2674>