

# Biomechanics of Rotator Cuff

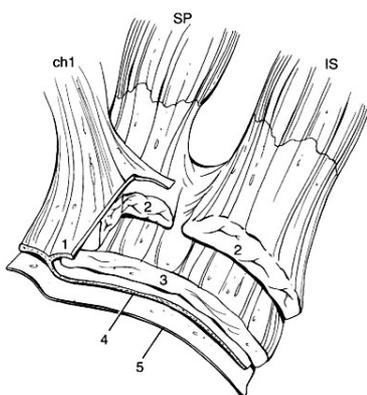
가톨릭의대

정진영

견관절주위에는 30여개의 근육이 서로 상호작용을 하고 있으며 견관절을 움직이거나 안정화시킨다. 회전근은 견관절을 안정화시키는 주작용과 함께 어깨를 움직이는 작용도 수행한다. 상지를 움직이는데 필요한 힘은 대부분 삼각근에서 제공하며 회전근은 관절운동범위에서 상완골이 견갑와에 적절하게 위치할 수 있도록 유지하는 역할을 수행한다.

## 회전근 (Rotator cuff)

회전근은 supraspinatus, infraspinatus, teres minor, subscapularis로 구성되어 있으며 상완골 부착 부근에서는 subscapularis를 제외한 각각의 근육들이 분리되지 않고 서로 융합된 형태를 취하며 단독의 작용보다는 복합 또는 병합된 작용을 수행한다. 회전근 손상의 생역학적 이해를 위하여 회전근의 세부 구조를 파악하는 것이 필요하며 supraspinatus 및 infraspinatus의 상완골 부착 부위는 5층의 구조로 이루어져 있다<sup>4,14)</sup> (Fig. 1).



**Fig. 1.** Five-layer structure of the cuff sectioned transversely at various sites in the supraspinatus (SP) and infraspinatus (IS) tendons, coracohumeral ligament (chl), and capsule of the shoulder.

- 제 1층: coracohumeral ligament의 superficial layer로 구성
- 제 2층: cuff tendon의 main portion으로 muscle belly에서 상완골 부착부로 바로 연결되는 촘촘히 뭉쳐진 parallel tendon fiber의 group들의 large bundle로 구성
- 제 3층: thick tendinous structure이지만 제2층에 비해 작은 fascicle로 구성되어 있으며 less uniform orientation을 보인다.
- 제 4층: 회전근의 primary fiber orientation 의 방향에 직각으로 주행하는 collagen fiber의 thick band와

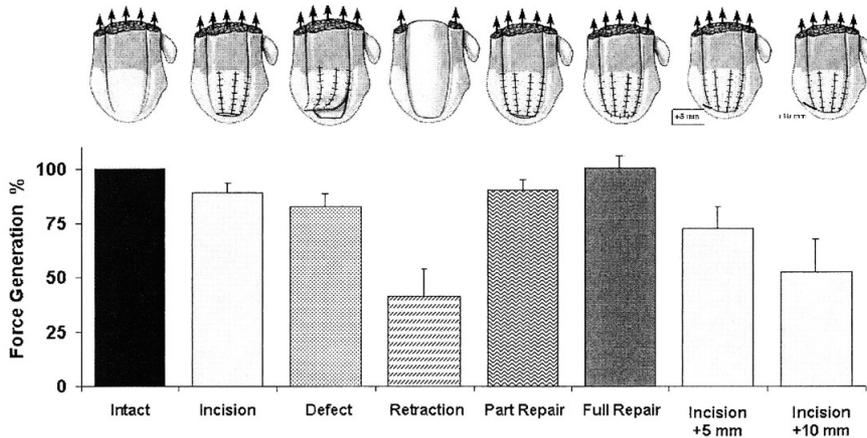
loose connective tissue로 구성. coracohumeral ligament의 deep extension이 있으며 transverse band, pericapsular band, rotator cable 등으로 여겨져 왔으며 tendinous insertion간에 작용하는 힘을 분산하는 역할을 하는 듯하며 이는 일부의 회전근의 파열이 있으면서도 임상증상을 나타내지 않는 이유 중의 한가지로 설명할 수 있을 것이다.

제 5층: true capsular layer로 견갑와에서 상완골까지 continuous cylinder를 형성한다. 이 층의 layer는 대개 randomly oriented되어 있다.

회전근 tendon의 fiber orientation은 위치에 따라 다르다. musculotendinous junction부위에서는 parallel homogenous collagen fiber로 이루어져 있으나 상완골에 부착부에 가까워지면서 45도 각도로 서로 교차하는 flat ribbonlike bundle의 형태를 취한다. 이러한 다양한 fiber orientation 과 distinct layer로 인해 회전근에는 상당한 shear force가 존재하며 이는 회전근 손상에 일부 기여하는 것으로 생각된다. 또한 회전근의 intrasubstance tear는 회전근 구조의 intratendinous variations으로 설명할 수 있을 것이며 intratendinous tear가 발생하는 제4층에 shear force가 주로 작용하는 것으로 여겨진다.

극상근 전방부의 단면적은 후방부 보다 넓은데 비해 극상근의 전방부는 후방부보다 작다<sup>13)</sup>. 이러한 극상근 면적에 대한 극상근력 비율(muscle strength-to tendon area)의 증가는 극상근의 손상이 전방부에 호발하는 이유를 설명할 수 있을 것이다. 또한 견갑하근의 상부는 하부에 비해 stiff 하다<sup>8)</sup>.

Colachis 등<sup>5)</sup>에 의한 연구에 따르면 극상근과 극하근이 외전력의 45%, 외회전력의 90%를 담당하며, howell 등<sup>9)</sup>은 극상근과 삼각근이 견관절 운동력에 동일하게 기여한다고 하였다. 상지의 외전력은 극상근이 1/3-2/3 손상이 되었을 경우에는 5%, 전체 손상의 경우는 17%의 감소를 보이지만, 손상된 극상근이 퇴축(retraction)되었을 때는 1/3, 2/3, 그리고 전체 손상의 경우 각각 19%, 36%, 58%가 감소되는 결과를 가져왔으며 이는 side-to-side repair로 대부분 회복되었다(Fig. 2). 즉 회전근의 small tear는 근력에 큰 영향을 미치지 않지만 손상과 퇴축(retraction)이 동반되었을 경우에는 상당한 근력 감소 또는 상실을 유발하게 된다<sup>7)</sup>.



**Fig. 2.** Effects with involvement of the entire width of the supraspinatus tendon. Two additional conditions were tested in these experiments: Incision + 5 mm: Additional detachment of the total width of the supraspinatus tendon and 5 mm of the infraspinatus tendon at their insertions, and Incision + 10 mm: Additional detachment of the total width of the supraspinatus tendon and 10 mm of the infraspinatus tendon at their insertions.

## Force couple

회전근은 coronal plane과 transverse plane에서 force couple을 통하여 견갑상완 관절을 안정화시킨다.<sup>3,12)</sup>.

### 1. coronal plane force couple

상완골 외전에 deltoid와 supraspinatus가 작용하며, 상지가 외전 됨에 따라 resultant joint reaction force는 glenoid 방향으로 작용한다. 이러한 상완골의 견갑와에 대한 압력(compression)은 상지가 외전되었을 때 관절 안정성에 기여한다(Fig. 3).

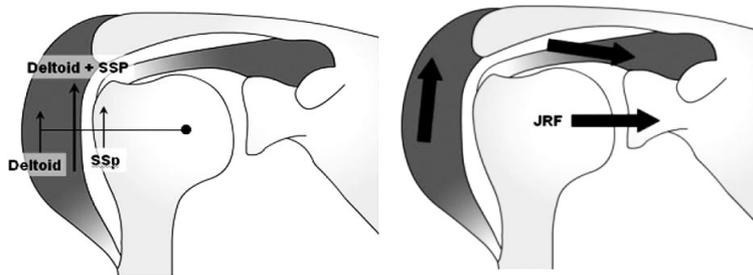


Fig. 3. Force couple (coronal plane)

### 2. transverse plane force couple

관절운동의 전범위에 걸쳐서 transverse plane의 compressive resultant joint reaction force는 관절의 안정성에 기여한다. 이는 cuff tear에 따른 상완골두의 상반 전위에 저항하는 주 기전이며 subscapularis와 infraspinatus 사이에서 force couple의 균형이 유지되는 한 관절은 제 위치를 유지할 수 있다(Fig. 4).

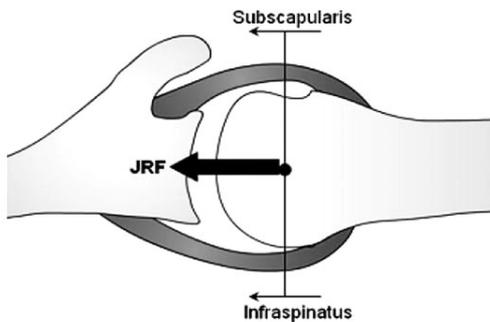


Fig. 4. Force couple (transverse plane)

## Static restraint

Dynamic stabilizer 이외에 cuff tear에 따른 상완골두의 상반 전위의 이차적 저항 역할을 한다.

## 1. coracoacromial arch

Coracoid, coracoacromial ligament, acromion 등으로 구성되며 회전근과 상완골두의 위쪽 아치를 형성한다.

## 2. long head of biceps

이두장건은 상완골두 위를 지나면서 꺾이면서 물음표 형태를 취한다. 특히 scapular plane에서 상지가 abduction and external rotation 시 견관절 안정에 주로 기여한다<sup>17,18)</sup>(Fig. 5).

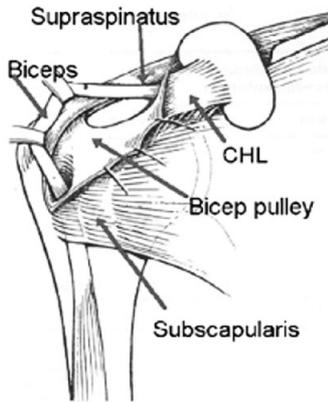


Fig. 5. The biceps pulley is a stabilizer of the long head of biceps in the biceps groove.

## Etiology of cuff tears

### 1. extrinsic<sup>2,6)</sup>

- Subacromial impingement: acromial spur나 coracoacromial ligament에 의한 회전근의 bursal side의 압박
- Internal impingement: 과도한 외전 및 외회전 상태에서 관절와와 상완골 사이에 회전근의 articular side의 감입

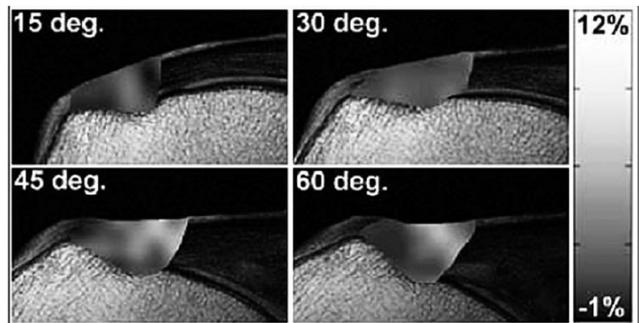
### 2. intrinsic<sup>15)</sup>

- 회전근 자체의 변성 및 변형에 의함

## Strain

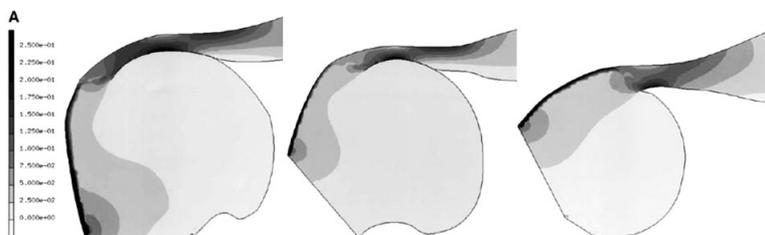
Tension overload는 회전근 손상을 줄 수 있는 기전으로 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 극상건의 bursal side는 articular side에 비해서 탄성계수(modulus elasticity)가 작지만 ultimate stress와 strain은 크다. 따라서 articular side와 bursal side에 동일한 부하가 작용한다면 articular side가 손상을 쉽게 받을 것이

다. 실제로 Bey 등<sup>11)</sup>이 MRI를 이용한 intratendinous strain 측정에서 견관절의 각도가 증가함에 따라서 intratendinous strain field가 증가하지만 articular 와 bursal side 간에는 큰 차이가 없는 것으로 측정되었다. 즉 60도 외전까지 극상건의 strain은 증가하며 bursal & articular side의 차이는 없었다<sup>11)</sup>(Fig. 6).

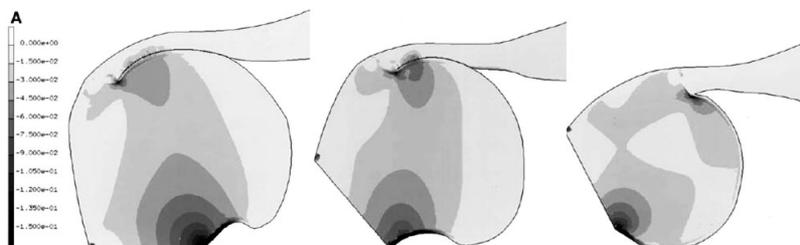


**Fig. 6.** Representative specimen demonstrating a map of maximum principal strain throughout the intact supraspinatus tendon at four glenohumeral joint positions.

또한 Wakabayashi 등<sup>16)</sup>의 연구에 따르면 tensile stress 와 compressive stress는 articular side가 bursal side보다 높으며 compressive stress는 견관절위치에 따른 큰 변화는 없으나 tensile stress는 외전 각도가 커짐에 따라 stress concentration이 distal로 이동된다<sup>10)</sup>(Fig. 7).



**Fig. 7.** Tensile stress at abduction angles of 0° (A), 30° (B), and 60° (C). The darker the color, the greater the stress.



**Fig. 8.** Compressive stress at abduction angles of 0° (A), 30° (B), and 60° (C). The darker the color, the greater the stress.

따라서 이러한 연구 결과들은 극상건의 손상이 articular cular side에 더 흔한 이유를 설명할 수 있을 것이며, 견관절 외전 상태에서 극상건의 손상 특히 articular side에 손상이 더 쉽게 발생할 수 있으므로 근력 운동 시 외전 상태보다는 내전상태에서 하는 것이 회전근 보호에 유리할 수 있을 것이다.

## Deltoid

극상근이 손상 되거나 기능이 상실되었을 경우 삼각근이 유일하게 견관절을 거상하는 역할을 수행하게 되므로 회전근 손상에서는 삼각근의 재활에 초점을 두게 된다. 따라서 상지의 위치와 조건에 따라 삼각근에 가해지는 부하를 이해하는 것이 올바른 재활 및 운동에 도움을 주게 된다.

### Deltoid force 계산

삼각근에 작용하는 힘은 물건을 주관절이 신전된 상태에서 드는지 굴곡된 상태에서 드는지에 따라 크게 달라지게 된다.

#### 1) 주관절 신전된 상태(Fig. 9)

주관절을 완전히 신전한 상태에서 손으로 25Kg 무게를 들고 있을 때 삼각근에 작용하는 힘은

a. 상완을 아래로 당기는 모멘트 (Moments puling humerus down):

$$25 \text{ Kg} \times f(\text{중력 } 9.81 \text{ m/s}^2) \times \text{팔길이 } (0.71 \text{ m}) = (25 \times 9.81) \times 0.71 = 174 \text{ Nm}$$

$$\text{팔 무게}(5.07 \text{ Kg}) \times f(\text{중력 } 9.81 \text{ m/s}^2) \times \text{상완길이 } (0.34 \text{ m}) = 16.91 \text{ Nm}$$

$$\text{따라서 } 174 + 16.91 = 190.91 \text{ Nm}$$

b. 삼각근에 작용하는 모멘트 (Moments puling humerus up):

$$\text{Deltoid } (d) \times \sin 10^\circ \times 0.088 = 0.01528 d \text{ Nm}$$

Assume equilibrium: moments up = moments down

$$190.91 = 0.01528 d$$

따라서, Deltoid tension  $d = 12494.11 \text{ N}$

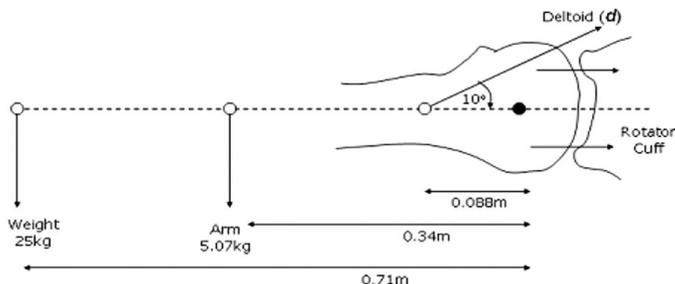


Fig. 9. Free body diagram for calculating deltoid force with the arm fully extended

## 2) 주관절 굴곡 상태(Fig. 10)

주관절을 완전히 굴곡한 상태에서 손으로 25 Kg 무게를 들고 있을 때 삼각근에 작용하는 힘은

a. 상완을 아래로 당기는 모멘트 (Moments puling humerus down):

$$25 \text{ Kg} \times f(\text{중력 } 9.81 \text{ m/s}^2) \times \text{팔길이 } (0.28 \text{ m}) = (25 \times 9.81) \times 0.28 = 40.32 \text{ Nm}$$

$$\text{팔 무게}(5.07 \text{ Kg}) \times f(\text{중력 } 9.8 \text{ m/s}^2) \times \text{상완길이 } (0.17 \text{ m}) = 8.46 \text{ Nm}$$

$$\text{따라서, } 40.32 + 8.46 = 48.78 \text{ Nm}$$

b. 삼각근에 작용하는 모멘트 (Moments puling humerus up):

$$\text{Deltoid } (d) \times \sin 10^\circ \times 0.088 = 0.01528 d \text{ Nm}$$

Assume equilibrium: moments up = moments down

$$48.78 = 0.01528 d$$

따라서, Deltoid tension  $d = 3192.41 \text{ N}$

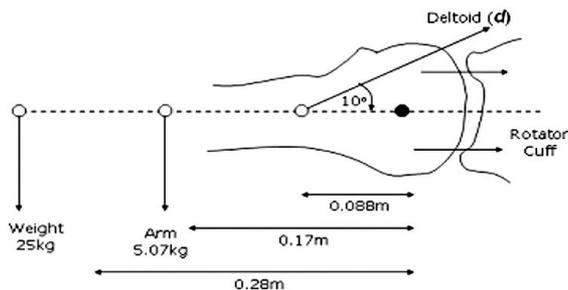


Fig. 10. Free body diagram for calculating deltoid force with the arm bended

## 결론

회전근 손상을 일으키는 요인은 상당히 다양하며 서로 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로 생각된다. 따라서 회전근에 대한 해부학 및 생역학적인 이해는 치료 계획 수립에 필수적일 것이다.

## REFERENCES

1. Bey MJ, Song HK, Wherli FW, et al; Intratendinous strain fields of the intact supraspinatus tendon: the effect of glenohumeral joint position and tendon region. J Orthop Res 2002;20:869-74.
2. Bigliani LU, Ticker JB, Flatow EL, Soslowky LJ, Mow VC; The relationship of acromial architecture to rotator cuff disease. Clin Sports Med. 1991 Oct;10(4):823-38.
3. Burkhart SS. Fluoroscopic comparison of kinematic patterns in massive rotator cuff tears. A suspension bridge model. Clin Orthop 1992;284:144-152.
4. Clark JM, Harryman DT; Tendons, ligaments, and capsule of the rotator cuff. J Bone Joint Surg Am

1992;74:713-725.

5. Colachis SCJ, Strohm BR; Effect of suprascapular and axillary nerve blocks and muscle force in upper extremity. *Arch Phys Med Rehabil* 1971; 52:22.
6. Gill TJ, McIrvin E, Kocher MS, Homa K, Mair SD, Hawkins RJ; The relative importance of acromial morphology and age with respect to rotator cuff pathology. *J Shoulder Elbow Surg.* 2002 Jul-Aug;11(4):327-30.
7. Halder AM, O' Driscoll SW, Heers G, Mura N, Zobitz ME, An KN, Kreuzsch-Brinker R; Biomechanical comparison of effects of supraspinatus tendon detachments, tendon defects, and muscle retractions. *J Bone Joint Surg Am.* 2002 May;84-A(5):780-5.
8. Halder A, Zobitz ME, Schultz E, et al; Structural properties of the subscapularis tendon. *J Orthop Res* 2000; 18:829-834.
9. Howell SM, Imobersteg AM, Segar DH, et al; Clarification of the role of the supraspinatus muscle in shoulder function. *J Bone Joint Surg Am* 1986; 68(3):398-404.
10. Lee SB, Nakajima T, Luo ZP, et al; The bursal and articular sides of the supraspinatus tendon have a different compressive stiffness. *Clin Biomech* 2000; 15:241-247.
11. Mehta S, Gimbel JA, Soslowsky LJ; Etiologic and pathogenetic factors for rotator cuff tendinopathy. *Clin Sports Med* 22 (2003) 791-812.
12. Parsons IM, Apreleva M, Fu FH, Woo SL; The effect of rotator cuff tears on reaction forces at the glenohumeral joint. *J Orthop Res.* 2002 May;20(3):439-46.
13. Roh MS, Wang VM, April EW, et al; Anterior and posterior musculotendinous anatomy in the supraspinatus. *J Shoulder Elbow Surg* 2000; 9:436-440.
14. Soslowsky LJ, Carpenter JE, Bucchieri JS, et al; Biomechanics of the rotator cuff. *Orthop Clin North Am* 1997;28(1):17-30.
15. Teefey SA, Rubin DA, Middleton WD, Hildebolt CF, Leibold RA, Yamaguchi K; Detection and quantification of rotator cuff tears. Comparison of ultrasonographic, magnetic resonance imaging, and arthroscopic findings in seventy-one consecutive cases. *J Bone Joint Surg Am.* 2004 Apr;86-A(4):708-16.
16. Wakabayashi I, Itoi E, Sano H, Shibuya Y, Sashi R, Minagawa H, Kobayashi M; Mechanical environment of the supraspinatus tendon: A two-dimensional finite element model analysis. *J Shoulder Elbow Surg* 2003;12:612-7.
17. Walch G, Laurent NJ, Levigne C, Renaud E; Tears of the supraspinatus tendon associated with "hidden" lesions of the rotator interval. *J Shoulder Elbow Surg* 1994;3:353-360.
18. Warner JJ, McMahon PJ; The role of the long head of the biceps brachii in superior stability of the glenohumeral joint. *J Bone Joint Surg Am.* 1995 Mar;77(3):366-72.