

## Thermocapsulorrhaphy for Shoulder Instability

울지대학교 의과대학 정형외과학교실

이 광 원

### Introduction

최근 수 년간 불안정성 견관절의 치료에 열 에너지(thermal energy)의 임상적인 이용이 점차 증가하고 있으며 미국의 경우 연간 약 5000에 이상이 시술 되는 것으로 보고되고 있다. 본래는 holmium 레이저 에너지의 형태로 사용되었으나, 최근에는 radiofrequency(RF) 에너지의 사용이 증가하는 추세이다. 그러나 한편에서는 충분한 연구 결과나 임상적인 뒷받침이 부족한 상태에서 그 남용으로 그 합병증이 많이 보고되고 있다.<sup>(2,5,6,9,10,50,51)</sup>

문헌상에는 BC400년 경에 Hippocrate가 처음으로 열 에너지를 견관절 탈구와 불안정성의 치료에 사용하였다고 기록되어있다.<sup>(1)</sup> 임상적으로 열 에너지의 응용은 콜라겐에 열 에너지가 가해졌을 때 발생하는 콜라겐의 3중 나선구조의 변성 및 수축되는 성질을 기반으로 하였다.<sup>(20,22,23,24,33,37,40,45)</sup>

본 중설에서는 열 에너지에 의한 콜라겐의 변화에 대한 병태 생리 및 임상적인 응용, 결과, 합병증 등에 대하여 살펴보고자 한다.

### Basic Science (Pathophysiology)

인체 내의 인대와 관절낭은 주로 제 1형 콜라겐으로 구성되어 있다. 제 1형 콜라겐 분자는 3개의 polypeptide chains으로 구성되어 있으며 이는 분자간 교차결합(cross-link)으로 연결된 3중 나선구조로 이루어져있다.<sup>(19)</sup> 이런 분자들은 서로 평행하게 응집하면서 콜라겐 원섬유를 형성하며 이때 분자내 교차결합에 의하여 원섬유의 배열이 유지되게 되며 조직의 인장강도를 얻게 된다. 분자내 교차결합은 공유 환원적 알데하이드 결합(covalent reducible aldehyde bonds)으로서 조직이 노쇠해짐에 따라 점차적으로 비가역적인 다가 교차결합(irreducible multivalent crosslinks)으로 대체된다. 조직에 열이 가해지면 열에 불안정한 분자내 교차결합이 파괴되면서, 단백질은 잘 결합된 투명한 구조물에서 임의의 겔과 유사한 형태로의 변성이 일어난다. 콜라겐의 수축은 열에 불안정한 분자내 교차결합에 의하여 3중 나선구조가 퍼지면서 나타나는 효과 및 열에 안정된 교차결합의 남아있는 장력에 의

하여 일어난다.<sup>(11)</sup>

콜라겐의 변성은 일반적으로 약 65°C에서 시작이 되는 데, 열에 의한 결체 조직의 성상의 변화와 조직 수축의 정도는 도달할 수 있는 최대 온도, 가열 시 조직에 가하여진 기계적인 하중, 인종, 나이, 주위 환경의 pH, 전해질의 농도, 콜라겐 섬유 방향, 조직의 수분 함량 정도 등 여러 요인의 영향을 받는다. 콜라겐 함량의 증가, 콜라겐 섬유의 배열 방향, 인장 하중의 증가의 경우, 수축에 필요한 온도를 더 높여야 하며, 연령이 증가하는 경우에는 아마도 열에 불안정한 교차결합보다 안정된 교차결합의 비중이 증가함에 따라 수축에 필요한 온도를 더 높여야 하며, 주위 환경의 pH의 증가, 조직의 탈수 등의 경우에도 수축에 필요한 온도를 더 높여야 하는 요인이 된다.<sup>(4,7,13,28,30,31,43,44,61,63)</sup>

### In Vitro Studies

Ovine(sheep), bovine, rabbit 및 인간의 아킬레스 건, 슬개건, 하상완인대 등을 이용한 여러 in vitro study에 의하면 65°C 에서 75°C 사이에서 콜라겐의 수축이 일어나며 그 이상의 온도나 열에 대한 노출 시간이 증가 되었을 때 수축이 더 증가한다고 보고하였다.<sup>(11)</sup> 10%에서 20%정도의 조직의 수축은 생역학적인 약화와 stiffness의 감소를 야기한다. 콜라겐 조직을 65°C 에서 85°C 정도 의 고열에 노출시켰을 때 급속한 변성이 일어난다는 것은 잘 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 일정한 온도에서는 열에 노출이 증가됨에 따라서 수축이 증가되나 어느 시점에 도달하여서는 더 이상의 수축은 일어나지 않는다. 이 최대 수치는 조직에 열이 가해지는 동안의 열의 온도<sup>(4)</sup>와 기계적인 하중<sup>(20,61)</sup>에 따라 변화하게 된다. 장시간에 걸쳐 과도한 열을 가하게 되면 과도한 조직의 파괴가 일어나 조직의 피사를 야기시킨다. 일련의 실험 결과를 보면 65°C에서 10분 정도에서 10%의 수축이, 80°C에서 15분 정도에서 약 60%의 수축이 관찰되었다고 보고되며<sup>(21)</sup>, 이런 결과는 열의 온도가 높을수록 수축의 정도가 증가되는 것을 의미한다. 반면에 Sheep의 상완 관절낭에 radiofrequency (RF)을 이용한 실험에서 65°C에서 4%, 80°C에서 14%의 조직의 수축이 관찰되었다는 보고<sup>(60)</sup>도 있다. 그 결과의 차이는 아마도 실험 대상에 따른 것으로 해석 할 수 있다.

## Radiofrequency(RF) Energy

### In Vivo Studies

생체 내에서 이루어진 실험 결과를 살펴보면 Schaefer 등<sup>12)</sup>은 rabbit 의 슬개건을 이용한 한 연구에서 레이저 에너지를 가한 후 슬관절을 고정시키지 않은 경우에 시간이 지나면서 수축된 조직이 다시 이완된다고 하였다. Hayashi 와 Hecht 등<sup>13)</sup>은 sheep의 대퇴 슬개 관절낭에 레이저를 가한 후 고정을 하지 않은 경우 14일째 stiffness가 감소하였으며, 30일째 정상적인 기계적 성질을 회복하였다고 보고하였다. 또 다른 sheep의 슬관절 지지대를 이용한 연구에서 보면 monopolar RF 에너지를 가하였을 때 6-8주째에 정상적인 기계적 성질을 회복하였다고 보고하였다<sup>14)</sup>. 이상의 여러 실험 결과를 볼 때 조직의 이완을 예방하기 위하여 술 후 일정기간 동안의 운동 제한 및 고정이 필요하다.

### Delivery of Thermal Energy

현재까지 레이저 에너지와 RF 에너지의 두 가지 형태의 열 에너지가 이용되고있다.

#### Laser Energy

Laser는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 의 약자로서 관절경 수술에서는 1980년대에 개발된 2.1 $\mu$ m Holmium: YAG (Ho: YAG) laser system이 가장 널리 이용되고있다.<sup>12, 14, 39, 50)</sup>

RF 에너지는 전자(electromagnetic) 에너지의 한 형태로서, 이것이 조직에 가해졌을 때 electromagnetic field의 빠른 oscillation으로 조직내의 charged particle이 운동을 하게 되고 결과적으로 이로 인하여 열을 발생하게 된다. 이 에너지는 bipolar 와 monopolar의 두 가지 형태로 적용할 수 있다.<sup>2, 10, 12, 38, 57)</sup> 현재 제품으로 사용 가능한 것은 monopolar 형태로는 Oratec(Oratec Interventions, Menlo Park, CA) ,Bipolar 형태로는 VAPR(Mitek Products, Norwood, MA), Arthrocare(Arthrocare Corp, Sunnyvale, CA) 등의 제품이 있다. bipolar는 탐침자(probe) 끝의 두 지점 사이에서 전달이 되고, monopolar는 grounding plate와 탐침자 끝 사이에서 전달이 된다. bipolar 방식에서 monopolar 방식보다 더 적은 양의 에너지로 동등한 효과를 얻을 수 있으며 조직의 손상은 bipolar 방식에서 더 줄일 수 있다. 레이저 에너지와 마찬가지로 RF 에너지의 열 효과는 RF 에너지의 level (power, impedance), 기간, 조직의 특성, electrode의 종류, 크기, 모양 등에 의하여 결정이 된다<sup>11)</sup>. 어떤 종류의 RF device는 탐침자 끝의 온도를 감지하고 조절할 수 있어 안정성과 효율성을 높일 수 있을 것으로 생각되나, 뒷받침할 수 있는 발표된 자료는 없다. 레이저와 마찬가지로 조직의 변성의 정도는 술자와 시술 시에 관찰되는 시야에서 결정이 된다. 또한 가해지는 시간과 열의 정도에 비례하므로 한군데에 오래 시간 머무르게 되면 조직의 괴사를 일으키게 된다. 그 외에 연령, 조직의 두께, hydration 정도, tissue quality등도 영향을 미치게 된다. 비록 에너지를 방출하는 형태도 다르며, 각각의 장단점이 있지만 궁극적으로 콜라겐의 변성과 조직의 수축을 일으킬 수 있는 열을 만들어 낸다 (Table 1).

Table 1. Laser energy 와 RF energy의 비교

	장 점	단 점
Laser	임상 경험이 비교적 많다 Noncontact probe Small depth of penetration of thermal energy	온도 측정이나 feedback control이 안됨 Probe not bendable cost high
Oratec RF	Probe bendable 온도 측정이나 feedback control이 가능 Cost reasonable	Depth of penetration unclear
VAPR	Malleable probe Indirect feedback Cost reasonable	Depth of penetration unclear 온도 표시가 안됨
Arthrocare	Tip probe, various angles Cost reasonable	Depth of penetration unclear 온도 측정이나 feedback control이 안됨 Probe not bendable

관절낭 열 수축술(Thermocapsulorrhaphy)견관절의 관절경 수술 시와 동일한 방법으로 준비를 하며 이때 견인장치에 대한 효율성에 대하여는 아직 확실하지않은 상태이다. 관절 내에 삽입하는 용액으로는 normal saline을 사용하며 일반적인 삽입구를 사용한다. 간혹 액와부의 하방의 관찰이 어려운 경우에 추가적으로 후하방 삽입구가 권유되기도 한다. 일반적으로 RF 탐침자를 이용한 관절낭의 표면처리에는 paintbrush 방법과 grid 방법이 이용되고있다. 이중에서도 probe로 처리된 표면 사이 사이에 정상적인 조직이 유지되게 하는 grid방법이 선호되고 있으며 이 경우에 혈관과 세포의 재생이 초기에 잘 이루어지는 것으로 알려져 있다<sup>19)</sup>. 관절낭에 열을 가할 때, 특히 후하방의 관절낭이 얇기 때문에 액와 신경의 손상에 대하여 주의할 것을 여야 한다. 또한 열이 전달되는 정도는 오직 조직표면의 색 변화만으로 감지가 되므로 과도한 열에너지로 인한 피사나 신경 손상에 대한 주의가 필요하다.

### Postoperative Care

아직까지 정립된 것은 없지만 현재까지의 동물 실험이나 다른 임상 결과를 토대로 할 때 약 12주까지는 열에 의하여 약해진 조직의 보호가 필요하다는 것이 일반적인 견해이다.

### Clinical Results

최근에 발표되는 임상 결과를 보면 대부분의 논문들이 non-peer-reviewed articles로서 추시 기간이 짧고, 수술 방법이 비교적 쉬운 관계로 광범위한 환자의 선택, 술 후 고정 및 재활, 아직 불확실한 이론적인 배경 등의 여러 요인 등을 고려할 때 신중하게 받아들여야 할 것이다. 견관절의 전방 불안정성의 임상 결과에 대하여 Thabit<sup>4)</sup>, Fantor<sup>9)</sup>, Hawkins<sup>18)</sup>, Karas<sup>29)</sup> 등이 다양한 임상 결과를 보였다. Hawkins<sup>18)</sup>, Karas and Hawkins<sup>29)</sup>, Abrams 등<sup>2)</sup>은 후방 불안정성 환자에서 rotator interval closure의 중요성에 대하여 강조하였다. 다방향성 불안정성에 있어서도 Karas<sup>29)</sup>, Miniaci<sup>30)</sup>, Jones and Paulos<sup>27)</sup>, Lyons 등<sup>35)</sup>이 다양한 결과를 보고하였으며 rotator interval closure의 중요성에 대하여 강조하였다

### Current Recommendations

최근의 임상 결과를 보면 불안정성 견관절 치료에 열 에너지의 이용은 단독적인 사용보다는 suture anchor를 이용한 관절경적 봉합술이나 capsular plication, rotator interval closure 등과 함께 사용해야 좋은 결과를 얻을 수 있다고 보고하고 있으며 특히 상완골 두나 관절외의 중대한 골 결손이 없는 환자가 좋은 적응증이 된다고 하였다.

최근의 치료 경향을 소개하면 전방 불안정성의 경우에는 필요하면 관절경적 관절외순의 봉합술을 시행하거나 capsular plication을 시행한 후 grid 형태로 관절낭 열 수축술을 시행할 때 좋은 결과를 얻을 수 있다고 하며, 후방 불안정성의 경우에도 역시 가능하면 관절경적 관절외순의 봉합술을 시행하거나 capsular plication을 시행(보통 2개정도)한 후 rotator interval 을 봉합 후 grid 형태로 관절낭 열 수축술을 권한다. 다방향성 불안정성의 경우에는 관절경적 전,후방 관절낭의 plication 후에 전, 후하방의 관절낭 열 수축술을 시행한 후, rotator interval closure를 시행한다. 관절낭 열 수축술 시에 RF 탐침자는 어느 한 곳에 너무 오래 머무르지 않도록 하고, 관절낭의 표면을 누르기 보다는 탐침자의 끝이 약 1/3 정도 잠길 정도로 가볍게 대는 식으로 접촉하여야 하며 진행 속도는 초당 2 mm정도로 하며, 가급적이면 5시 방향에서 7시 방향 사이는 피해야 한다. 수축정도는 조직의 색상 변화를 보면서 판단해야 하는 단점이 있는데 IGHJ이나 MGHJ등의 콜라겐이 풍부한 곳에서 더 수축이 잘 되는 것을 알 수 있다.

### Complications

#### Recurrent Instability

D'Allesandra와 Bradley<sup>3)</sup>은 60례의 불안정성 견관절에 monopolar RF 관절낭 수축술 시술한 후 12개월째 추시 결과 우수 및 만족이 각각 38%, 불만족이 23%의 결과를 보였고, 특히 다방향성 불안정성 환자에서 가장 나쁜 결과를 보여 고정 기간을 최초 2~4주에서 6주 까지 연장이 필요하고, 관절낭 열 수축술의 단독 사용보다는 suture anchor를 이용한 관절경적 봉합술이나 capsular plication, rotator interval closure 등에 부수적으로 사용해야 좋은 결과를 얻을 수 있다고 보고하였다<sup>27)</sup>.

Wong 등은 ASES, AANA, AOSSM의 379명의 의사를 Survey한 결과 레이저 술식의 경우 8.4%, monopolar 8.3%, Bipolar 7.1%의 재발율을 보였다고 하였다<sup>24)</sup>.

재탈구에 관여하는 인자로는 다방향성 불안정성, 재탈구의 빈도가 많은 경우, 수술의 횟수, 접촉성 스포츠, 불충분한 고정기간 등이 있다<sup>24)</sup>.

#### Capsular Necrosis

열 에너지를 너무 과도하게 사용하였을 때 관절낭의 피사가 발생하여 콜라겐 구조가 파괴되고 amorphous gelatinous tissue로 변하게 된다<sup>2,31,62)</sup>. 이러한 피사는 관절낭이 얇아거나, 중간에 정상 조직을 남기지 않고 paintbrush 방식으로 수축을 하였을 때, 15%에서 20%이상의 과도한 수축, 술 후 고정이 불충분하였을 경우와 관련이 있

다<sup>3,60)</sup>.

Wong 등의 조사에 의하면 레이저 술식의 경우 33%에서, monopolar의 경우 18%에서, bipolar의 경우 20%에서 revision surgery를 요할 정도의 관절낭의 약화를 초래한다고 하였다<sup>62)</sup>.

### Axillary Nerve Injury

액와 신경 손상은 대부분이 일시적인 것으로 D'Alessandro와 Bradley 등은 60례의 불안정성 견관절에 monopolar RF 관절낭 열 수축술을 시술한 후 5명(8%)에서 일시적인 액와 신경 손상이 있었으나 전례에서 완전 회복이 되었다고 하였다. 그 외 Fanton 등<sup>61)</sup>은 54명중 1명에서, Andrew 등<sup>5)</sup>은 140명 중에서 1명의 신경 손상을 보고하였고, Wong 등<sup>62)</sup>은 Survey에서 1.4%의 액와 신경 손상과 그 중 93%에서 감각만이 소실되었으며 그 중 95%에서 완전 회복되었다고 하였다. Gryler 등<sup>15)</sup>은 사체를 이용한 실험에서 열 에너지를 가했을 때 액와 신경 내의 온도를 측정할 때 42도에서 52도까지의 충분히 액와 신경에 손상을 줄 수 있는 온도를 관찰하였다고 보고하였다. 액와 신경의 손상을 줄이기 위하여는 탐침자를 어느 한 곳에 너무 오래 머무르지 않도록 하고, 누르기 보다는 가볍게 대는 식으로 접촉하여야 하며, 가급적이면 5시 방향에서 7시 방향 사이는 피해야 한다. Ciccone 등<sup>6)</sup>은 사체 실험에서 견관절 두께를 측정하였는데 Glenoid에서 상완골 쪽으로 갈수록 얇아져 1.32 mm에서 4.47 mm 정도의 두께를 보였고, 특히 액와 신경에 접하여있는 부분은 2.76 mm에서 3.18 mm까지의 분포를 보였다고 보고하였다. Lephart 등은 관절낭 열 수축술 시행한 환자 20명에서 proprioception을 검사한 바 (평균 추시기간: 1년, 범위 6~24개월) 전례에서 회복되었다는 것을 관찰할 수 있었다고 하였다<sup>32)</sup>.

### Postoperative Stiffness

과도한 관절낭의 수축으로 인하여 관절의 강직이 발생할 수 있다<sup>10,51)</sup>. 또한 blond 혹은 red hair, keloid 형성의 경우에 위험성이 더 높은 것으로 알려져 있다<sup>9)</sup>. Wong 등의 Survey에 의하면 전체적인 빈도는 약 0.3%로 상당히 낮은 것으로 조사되었다<sup>62)</sup>.

### Summary

관절낭 열 수축술은 시술 자체가 쉽고 편리하게 적용할 수 있어 최근에 그 사용이 증가하는 추세이다. 최근에 발표되는 임상 결과를 볼 때 비교적 만족할 만한 성과를 얻는 것을 볼 수 있으나 그 결과 분석에 세심한 주의가 필요할

것이다. 또한 아직까지도 열 에너지를 이용한 상완 관절낭 수축술 후에 나타나는 관절낭의 생역학적 혹은 생화학적인 변화에 대한 연구가 진행 중이며 항상 만족스러운 결과만을 예측할 수만은 없는 상황으로 단독적인 사용보다는 관절경적 plication이나 anchor를 이용한 재건술과 함께 사용할 때 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### REFERENCES

- 1) **Abelow SP:** Laser capsulorrhaphy for multidirectional instability of the shoulder. *Op Tech Sports Med*, 5:244-248, 1997.
- 2) **Abrams JS:** Thermal capsulorrhaphy for instability of the shoulder: Concerns and applications of the heat probe. *AAOS instructional Course Lectures*, 50:29-36, 2001.
- 3) **Adams F, ed.:** The genuine works of Hippocrates, New York: William Wood, 1886.
- 4) **Allain JC, Le Lous M, Cohen-Solal L, Bazin S and Maroteaux P:** Isometric tensions developed during the hydrothermal swelling of rat skin. *Connect Tissue Res*, 7:127-133, 1980.
- 5) **Andrews JR and Dugas JR:** Diagnosis and treatment of shoulder injuries in the throwing athlete: The role of thermal-assisted capsular shrinkage. *AAOS Instructional Course Lectures*, 50:17-21, 2001.
- 6) **Brillhart AT:** Complications of thermal energy. *Op Tech Sports Med*, 6:182-184, 1998.
- 7) **Chvapil M and Jenovsky L:** The shrinkage temperature of collagen fibers isolated from the tail tendons of rats of various ages and from different places of the same tendon. *Gerontologia*, 7:18-29, 1963.
- 8) **Ciccone WJ, Hunt TJ, Lieber R, Pedowitz R, Esch J and Tasto JP:** Multi-quadrant digital analysis of shoulder capsular thickness. *Arthroscopy*, 16:457-461, 2000.
- 9) **Fanton GS:** Arthroscopic electrothermal surgery of the shoulder. *Op Tech Sports Med*, 6:139-146, 1998.
- 10) **Fanton GS:** Monopolar electrothermal arthroscopy for treatment of shoulder instability in the athlete. *Op Tech Sports med*, 8:242-249, 2000.
- 11) **Flory PJ and Garrett RR:** Phase transitions in collagen and gelatin systems. *J Am Chem Soc* 80: 4836-4845, 1958.
- 12) **Foster TE and Elman M:** Arthroscopic delivery systems used for thermally induced shoulder capsulorrhaphy. *Op Tech Sports Med*, 6:126-130, 1998.
- 13) **Fung YC (ed):** Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues, ed 2. New York, NY. Springer-Verlag, 1993.
- 14) **Gartsman GM, Roddey TS and Hammerman SM:** Arthroscopic treatment of anterior-inferior glenohumeral instability: Two to five-year follow-up. *J Bone Joint Surg Am*, 82:991-1003, 2000.

- 15) **Gryler EC, Greis PE, Burks RT and West J:** Axillary nerve temperatures during radiofrequency capsulorrhaphy of the shoulder. *Arthroscopy*, 17:567-572,2001.
- 16) **Hackett Gs (ed):** Ligaments and Tendon Relaxation (skeletal Disability) Treating Prolotherapy (Fibro-Osseous Proliferation), ed3. Springfield IL, CC Thomas, 1958.
- 17) **Hashimoto T, Hamada T, Sasaguri Y and Suzuki K:** Immunohistochemical approach for the investigation of nerve distribution in the shoulder joint capsule. *Clin Orthop*, 305:273-282,1994.
- 18) **Hawkins RJ, Noonan TJ and Horan M:** Arthroscopic laser capsulorrhaphy for the treatment of shoulder instability: a minimum two-year follow-up. Presented at the annual meeting of American Shoulder and Elbow Surgeons, 2000.
- 19) **Hayashi K, Hecht P, Thabit G, et al.:** The biologic response to laser thermal modification in an in vitro sheep mode. *Clin Orthop*, 373:265-276,2000.
- 20) **Hayashi K, Marke MD, Thabit G, Bogdanske JJ and Thieike RJ:** The effect of nonablative laser energy on joint capsular properties: An in vitro mechanical study using a rabbit mode. *Am J Sports Med*, 23:482-487,1995.
- 21) **Hayashi K, Massa KL, Thabit G, et al:** Histologic evaluation of the glenohumeral joint capsule after the laser-assisted capsular shift procedure for glenohumeral instability. *Am J Sports Med*, 27:162-167,1999.
- 22) **Hayashi K, Thabit G, Bogdanske JJ, Mascio LN and Markel MD:** The effect of nonablative laser energy on the ultrastructure of joint capsular collagen. *Arthroscopy*, 12:474-481, 1996.
- 23) **Hayashi K, Thabit G, Massa KL, et al:** The effect of thermal heating on the length and histologic properties of the glenohumeral joint capsule. *Am J Sports Med*, 25:107-112,1997.
- 24) **Hecht P, Hayashi K, Cooley AJ, et al:** The thermal effect of monopolar radiofrequency energy on the properties of joint capsule: An in vivo histologic study using a sheep model. *Am J Sports Med*, 26:808-814,1998.
- 25) **Hecht P, Hayashi K, Lu Y, et.al:** Monopolar radiofrequency energy effects on joint capsular tissue: Potential treatment for joint instability - An in vivo mechanical, Morphological, and biochemical study using an ovine model. *Am J Sports Med*, 27:761-771,1999.
- 26) **Horn G, Spears KG, Lopez O, et al:** The effects of different laser energy on the human inferior glenohumeral ligament. AAOS Poster B015, San Francisco, 1997.
- 27) **Jones D and Paulos L.** Thermal capsular shrinkage for shoulder instability: a prospective study comparing electrocautery and laser heat sources. Presented at the 17th open meeting of American Shoulder and Elbow Surgeons, San Francisco, CA,2001.
- 28) **Kang T, Resar J and Humphery ID:** Heat-induced changes in the mechanical behavior of passive coronary arteries. *J Biomech Eng*, 117:86-93,1995.
- 29) **Karas SG, Noonan, TJ, Hawkins RJ, et al.:** Electrothermal arthroscopic capsulorrhaphy for the treatment of shoulder instability:a minimum two-year followup. Presented at the annual meeting of American Academy of Orthopaedic Surgeons, San Francisco, CA, 2001.
- 30) **Le Lous M, Allain JC, Cohen-Solal L and Maroteaux P:** Hydrothermal isometric tension curves from different connective tissues: Role of collagen genetic types and noncollagenous components. *Connect Tissue Res*, 11:199-206, 1983.
- 31) **Le Lous M, Cohen-Solal L, Allain JC, Bonaventure J and Maroteaux P:** Age related evolution of stable collagen retinaculation in human skin. *Connect Tissue Res* 13(2):145-55,1985.
- 32) **Lephart SM, Myers, Bradley JP and Fu FH:** Unpublished data, AANA Annual Meeting, Miami, Florida, 2001.
- 33) **Lopez MJ, Hayashi K, Vanderby R, Thabit G, Fanton GS, Markel MD:** Effects of monopolar radiofrequency energy on ovine joint capsular mechanical properties. *Clin Orthop*, 374:286-297,2000.
- 34) **Lu Y, Hayashi K Edwards RB, Fanton GS, Thabit G, Markel MD:** The effect of monopolar radiofrequency treatment pattern on joint capsular healing: In vitro and in vivo studies using an ovine model. *Am J Sports Med*, 28:711-719,2000.
- 35) **Lyons TR, Griffith PL, Savoie FH, et al.:** Laser-assisted capsulorrhaphy for multidirectional instability of the shoulder. *Arthroscopy*, 17:25-30, 2001.
- 36) **Miniaci A, McBirnie J and Miniaci S.:** Thermal capsulorrhaphy for the treatment of multi-directional instability of the shoulder. Presented at the annual meeting of American Academy of Orthopaedic Surgeons, San Francisco, CA, 2001.
- 37) **Naseef GS, Foster TE, Trauner K, Solhpour S, Anderson RR, Zarins B:** The thermal properties of bovine joint capsule: The basic science of laser and radiofrequency-induced capsular shrinkage. *Am J Sports Med*, 25:670-674,1997.
- 38) **Nath S, DiMarco JP and Haines DE:** Basic aspects .of radiofrequency catheter ablation. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 5:863-876,1994.
- 39) **Nottage WM:** Laser-assisted shoulder surgery. *Arthroscopy*, 13:635-638, 1997.
- 40) **Obrzut SL, Hecht P, Hayashi K, Fanton GS, Thabit G and Markel MD:** The effect of radiofrequency energy on the length and temperature properties of the glenohumeral

- joint capsule. *Arthroscopy*, 14:395-400, 1998.
- 41) **Osmond C, Hecht P, Hayashi K, et al:** Comparative effects of laser and radiofrequency energy on joint capsule. *Clin Orthop*, 375:286-294, 2000.
  - 42) **OzMC, Bass LS, Popp HW, et al:** In vitro comparison of thulium-holmium-chromium:YAG argon ion lasers for welding of biliary tissue. *Lasers Surg Med*, 9:249-258, 1993.
  - 43) **Privalov PL:** Stability of proteins: Proteins which do not present a single cooperative system. *Adv Protein Chem*, 35:1-104, 1982.
  - 44) **Privalov PL:** Thermodynamic problems of protein structure. *Annu Rev Biophys Chem*, 18:47-69, 1989.
  - 45) **Putlin JG, Collier MA, Johnson LL, DeBault LE and Walls RC:** Holmium:YAG laser-assisted capsular shift in a canine model: Intraarticular pressure and histologic observations. *J Shoulder Elbow Surg*, 6:272-285, 1997.
  - 46) **Rodeo SA, Suzuki K, Yamauchi M, Bhargava M and Warren RF:** Analysis of collagen and elastic fibers in shoulder capsule in patients with shoulder instability. *Am J Sports Med*, 6:139-146, 1998.
  - 47) **Schaefer SL, Ciarelli J, Arnoczky SP and Ross HE:** Tissue shrinkage with the holmium:yttrium aluminum garnet laser: A postoperative assessment of tissue length, stiffness, and structure. *Am J Sports Med*, 25:841-848, 1997.
  - 48) **Schulz MM, Lee TQ, Sandusky MD, Tibone JE and McMahon PF:** The healing effects on the biomechanical properties of joint capsular tissue treated with Ho:YAG laser: An in vivo rabbit study. *Arthroscopy*, 17:343-347, 2001.
  - 49) **Selecky MT, Vangasness T, Liao WL, Saadat V and Hedman TP:** The effects of laser-induced collagen shortening on the biomechanical properties of the inferior glenohumeral ligament complex. *Am J Sports Med*, 27:168-172, 1999.
  - 50) **Sekiya JK, Golladay GJ and Wojtya EM:** Autodigestion of a hamstring anterior cruciate ligament autograft following thermal shrinkage: A case report and sentinel of concern. *J Bone Joint Surg Am*, 82:1454-1457, 2000.
  - 51) **Shaffer BS and Tibone JE:** Arthroscopic shoulder in stability surgery: Complications. *Clin Sports Med*, 18:737-767, 1999.
  - 52) **Sperling JW, Anderson K, McCarty EC and Warren RF:** Complications of thermal capsulorrhaphy. *AAOS Instructional Course Lectures*, 50:37-41, 2001.
  - 53) **Thabit G:** Therapeutic heat: A historical perspective. *Op Tech Sports Med*, 6:118-119, 1998.
  - 54) **Thabit G:** The arthroscopically assisted holmium:YAG laser surgery in the shoulder. *Oper Tech Sports Med*, 6:131-138, 1998.
  - 55) **Tibone JE, Lee TQ, Black AD, Sandusky MD and McMahon PJ:** Glenohumeral translation after arthroscopic thermal capsuloplasty with a radiofrequency probe. *J Shoulder Elbow Surg*, 9:14-18, 2000.
  - 56) **Tibone JE, McMahon PJ, Shrader TA, Sandusky MD and Lee TQ:** Glenohumeral joint translation after arthroscopic, nonablative, thermal capsuloplasty with a laser. *Am J Sports Med*, 26:495-498, 1998.
  - 57) **Van Haesendonck C, Sinnaeve A, Willems R, Vandembulcke F, and Stroobandt R:** Biophysical and electrical aspects of radiofrequency catheter ablation. *Acta Cardiologica*, 50:105-115, 1995.
  - 58) **Vangsnest CT, Ennis M, Taylor JG and Atkinson R:** Neural anatomy of the glenohumeral ligaments, labrum, and subacromial bursa. *Arthroscopy* 11:180-184, 1995.
  - 59) **Vangsnest CT, Mitchell W, Nimmi M, et al:** Collagen shortening: An experimental approach with heat CORR 337:267-271, 1997.
  - 60) **Wall MS, Deng XH, Torzilli PA, Doty SB, O'Brien SJ and Warren RF:** Thermal Modification of collagen. *J Shoulder Elbow Surg*, 8:339-344, 1999.
  - 61) **Weir CE:** Rate of shrinkage of tendon collagen-heat, entropy, and free energy of activation of the shrinkage of untreated tendon: Effect of acid, salt, pickle, and tannage on the activation of tendon collagen. *J Am Leather Chem*, 13:145-155, 1985.
  - 62) **Wong KL, and Williams GR:** Complications of thermal capsulorrhaphy of the shoulder. *J Bone Joint Surg Am*, 83 Suppl 2 Part 2:151-155, 2001.
  - 63) **Wright NT, Chen SS and Humphery JD:** Time-temperature equivalence of heat-induced changes in cells and proteins. *J Biomech Eng*, 120:22-26, 1998.