

말초신경에 가해지는 장력에 대한 지지봉합의 효과

서울대학교 의과대학 정형외과학교실

이한구 · 정문상 · 이상훈 · 백구현 · 정용진

— Abstract —

Effect of Stay-suture on Peripheral Nerve Tension

Han-Koo Lee, M.D., Moon-Sang Chung, M.D., Sang-Hoon Lee, M.D.,
Goo-Hyun Baek, M.D. and Yong-Jin Chung, M.D.

*Department of Orthopedic Surgery, Seoul National University,
College of Medicine, Seoul, Korea*

The purpose of this study is to confirm the effectiveness of stay-suture which is commonly used in the procedure of end to end anastomosis, to find out general biomechanical properties of peripheral nerve with gradual stretching and to evaluate the histological difference after breakage of the nerve. The sciatic nerves of adult rabbits were excised and they were grouped by I and II. Group I was composed of 14 normal sciatic nerves and group II, 14 sciatic nerves sutured with 5-0 nylon after transection. They were stretched on the "Instron" universal testing machine at a constant rate of 200mm/min until breakage took place and the results were compared. The mean maximal tensile strength was 13.6N in group I and 2.1N in group II, representing about one seventh value. The mean ultimate tensile strength was 4.2MPa in group I and 0.9MPa in group II, representing about one fifth value. In load-elongation curve of group I, viscoelastic property was noted as all other biological tissues have. The mean modulus of elasticity was 19 in normal sciatic nerves, which is somewhat lower value than other tissues, indicating superior elastic property of peripheral nerves. Transverse histologic examination showed that epineurium lost its continuity earlier than perineurium, implying perineurium is a more resistant structure than epineurium. However, to confirm this, it is thought to be necessary to examine the nerves serially during distraction at each different status.

In conclusion, stay-suture provided about one fifth of ultimate tensile stress, implying its usefulness of resisting excessive tension in end to end anastomosis of peripheral nerves. Normal sciatic nerves showed viscoelastic property with mean modulus of elasticity of 19.

Key Words : Peripheral nerve, Stay-suture, Biomechanical property

※ 통신저자 : 이 한 구

서울특별시 종로구 연건동 28번지

서울대학교병원 정형외과학교실

※ 이 연구는 1994년도 서울대학교병원 지정진료 공동연구비 (02-94-295) 지원에 의한 결과임.

서 론

말초신경 손상은 각종 재해 발생이 증가하면서 최근에 임상적으로 흔히 접할 수 있게 되었고 이에 따라 신경을 봉합할 경우도 많아 졌다. 신경이 단열되었을 경우에 치료방법에는 크게 원래 신경의 절단단을 봉합하는 방법과 신경의 소실이 큰 경우 신경이식술을 시행하는 방법등이 있고 어느 방법을 사용하더라도 말초 신경을 봉합할때 봉합부의 장력이 적당한지 또는 과도한지에 대해 관심을 갖게 된다. 봉합부의 장력은 매우 중요하여 장력이 과도할 경우 예후가 좋지 않다고 알려져 있고 극단적으로는 봉합부에 장력이 과도하게 작용할 경우 봉합부가 파열이 일어날 수도 있을 것이다. 봉합부의 장력을 줄일 목적으로 여러 방법들이 사용되고 있으며 경험적으로 흡수성 봉합사에 의한 지지봉합을 하는 방법도 사용되고 있으나 그 효과에 대해서는 구체적으로 증명되어 있지 않다. 말초신경도 다른 생체조직과 마찬가지로 점탄성을 가지고 있다고 알려져 왔고 실제로 단열된 신경의 양 절단단이 근위와 원위부로 수축되어 중간에 간격이 생기는 사실로 말초신경이 탄성을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 신연에 의한 것이라고 생각되는 말초신경 손상이 아무런 치료를 하지 않아도 추시중 자연 치유되는 경우가 보고 되고 있어^{6,7)} 말초신경이 신연에 저항력을 가진것은 인정된 사실이나 그 정확한 생역학적 특성에 관하여는 끝에서처럼 활발하게 논의되지 않았다. Sunderland와 Bradley⁸⁾는 cadaver에서 각 부위의 말초신경을 절제한 후 견인 실험을 하여 탄성을 가지고 있는것을 확인하였으며 탄성 한도까지의 %변형율(% strain)은 신경의 종류에 따라서 틀리지만 7~20%라고 하였고 30% 신연시 파열이 일어난다고 하였다. 또, 각 부위의 말초 신경의 역학적 특성이 약간의 차이가 있음을 관찰하였고 그 이유는 서로 구성 성분에 차이가 있기 때문이라고 하였다. Sunderland^{9,10)}는 신경을 구성하는 신경외막이 서로 다른 신경끼리는 물론이고 같은 신경이라도 그 부위에 따라서 달라 22%에서 88%까지로 다양하다고 하였다. Haftek⁵⁾은 토끼의 경골 신경을 파열할때까지 지속적으로 견인하여 탄성 한도까지의 %변형율은 평균 55.7%이며 최대 변형율은 53.3~122%라고 하였고 탄성 한

도까지 신연되는 경우는 생리적 신경차단(neurapraxia)이나 축색단열(axonotmesis)이고 그 이상 신연되면 신경단열(neurotmesis)에 해당된다고 하였다. 신경은 여러 물질로 이루어진 중합체(composite)로서 각 구성성분의 생역학적 특성이 합하여서 전체의 특성이 나타나고 또 각 부위마다 그 구성 성분이 달라 그 생역학적 특성을 일괄적으로 규정하는 것은 어렵지만 전반적인 특성을 알아 보는 것은 신연에 의한 신경 손상후의 치료 방침과 예후 판정에 어느 정도 도움이 될것이다. 저자들은 신경 손상 후 단단봉합술시 이용되는 지지봉합이 인장력에 어느 정도의 저항을 갖는지 규명하고자 하였고 이와 함께 견인에 대한 역학적 특성을 알아보고자 하였으며 또, 신연하여 파열한 말초신경의 조직학적 변화를 관찰하였다.

연구대상 및 방법

1) 연구대상

연구 재료로는 서울대학교 병원 동물 실험실에서 분양 받은 2~2.5kg 전후의 성숙한 14마리 백색 가토의 좌골신경을 암수 구별없이 사용하였다. 좌골신경은 기시부인 근위 대퇴부부터 원위부까지 최대한으로 길게하여(20mm) 절단하였다(Fig. 1-A).

2) 연구방법

14마리의 토끼 좌골신경 28개를 채취하여 단면적을 구하고 정상신경 14개와 중간부위에서 단열한 후 지지봉합한 14개를 각각 1군과 2군으로 나누었다(Fig. 1-B). 이 신경들을 Instron 실험기계로 신연하여 인장력-변형 곡선을 구하고 최대 하중치와 그 시점의 변형량 길이를 측정한 후 두 군간의 최대하중과 극한응력을 비교하였다. 1군에서는 인장력-변형 곡선에서 비례한도점을 찾고 측정한 최대 하중치와 신연 길이로부터 비례한도점의 인장력과 신연 길이를 구한 후 각각의 응력과 변형율을 계산하였다.

가) 좌골신경의 채취 및 견인 실험

갓 죽은 14마리 토끼의 좌우 좌골 신경 28개를 채취하여 설압자에 양 끝을 묶은 후 Ringer 용액으로 적신 gauze로 덮어 주어 변형을 막고자 하였다. Grip에 고정하는 길이를 고려하여 좌골 신경은 근위

대퇴부부터 원위 대퇴부까지 적어도 20mm 이상이 되도록 절제하였다(Fig. 1-A). 신경의 단면적을 타원형으로 생각하여 그 장지름과 단지름의 길이를 측정 한 후 타원의 면적을 구하는 공식($A = \pi \times ab/4$)을 이용하여 단면적(A)를 구하였다. 2군에서는 신경의 중앙을 장축에 수직으로 절단한 후 양 절단부에 충분한 간격을 두고 5-0 nylon으로 봉합한 후 신연하였다(Fig. 1-B). 초기길이(gauge length, l_0)는 신경이 장력을 받기 시작하는 순간의 길이를 기준으로 하였으나 실제로 이 점을 정확히 알기는 어려워 Instron 실험기계의 crosshead 이동 속도를 최소로(5mm/min) 신연하여 주그러졌던 신경이 완전히 찢은 순간을 육안으로 확인하고 그 순간 grip 간의 거리를 초기길이라고 하였다(Fig. 3). 초기길이 측정상의 오차를 줄이기 위하여 가능한 한 길게 유지하려고 하였다(>10mm). 신경의 압착과 미끄러짐을 방지하면서 양 끝을 고정하도록 고안된 grip을 사용하여 일정한 속도로 신연하면서 파열할때까지의 인장력-변형 곡선을 기록하였다. 주위 환경의 변화에 따른 신경의 생역학적 특성의 변화를 최소한으로 막기 위하여 실험하는 동안 Ringer 용액으로 신경을 적셔주었다. 신연 속도는 일정하게 200mm/min로 하였다. 1군에서는 14개의 좌골 신경을 가지

고 실험하였으나 실험도중 4개는 grip 부분에서 재료의 파열이 일어나서 결과를 얻을 수 있었던 신경은 총 10개였고 2군에서는 14개중 9개에서 결과를 얻을 수 있었다. 2군에서는 grip고정 부위의 파열은 없었고 전부 봉합부위에서 봉합사가 신경을 cutting out 하는 양상을 보였다. 신연후 측정된 최대 하중치와 그 시점의 변형 길이를 기록하였다.

나) 생역학적 수치의 계산

제 1군에서는 정상 좌골신경을 전인하여 인장력-변형 곡선을 구하고 최대 인장력(극한 인장력, F_w), 그 시점의 신경의 변형량(Δl_w)을 알고 난 후 인장력-변형곡선에서 선형 탄성변형(linear elastic deformation)이 마지막으로 관찰되는 점의 인장력(F_{p1}), 변형량(Δl_{p1})을 계산하였다. 말초신경이 인장력을 받으면 선형 탄성 변형을 하다가 비선형 탄성변형(non-linear elastic deformation)을 한 후 소성변형(plastic deformation)으로 넘어간다고 하는데 관찰한 곡선에서는 선형 탄성변형과 비선형 탄성의 구별이 어려워 비례한도점을 탄성한도점(elastic limit), 즉 항복점(yield point)으로 생각하였다(Fig. 4). 따라서 이 비례한도점의 응력을 항복응력(yield stress)으로 생각하였다. 신경이 탄성 한도를

Fig. 1-A. Photograph of a sciatic nerve of rabbit after dissection of medial aspect of thigh.

B. Left : normal sciatic nerve of rabbit immediately after removal.

Right : transected sciatic nerve of rabbit with stay suture(5-0 nylon).

지나 소성 변형이 일어나게 되면 신연되는 부위의 단면적(A)은 줄어 들게 되는데 각 시점에서 정확한 응력을 알기 위하여는 그 때의 단면적을 알아야 하지만 이것은 불가능하기 때문에 실험전 측정된 초기 단면적(A₀)으로 각 시점의 인장력을 나누어 응력을 계산하였다. 인장력-변형 곡선에서 X-축은 실제로는 시간의 변화인데 신경이 항상 일정한 비율로 신연된다고 가정하여 변형량으로 표시하였다(Fig. 4). 응력-변형을 곡선에서 선형 비례 관계를 보이는 부분의 기울기를 탄성계수라고 하는데 본 연구에서는 계산한 비례한도점의 평균 응력을 평균변형율로 나누어 탄성계수를 구하였다(Table 1). 제 2군에서는 토끼의 좌골신경의 중간부위를 절단하여 5-0 nylon으로 봉합한 후 견인하였다. 최대인장력치를 구할수 있었던 9개의 신경 모두 봉합사가 신경의 끝을 cutting-out하는 양상이었고 봉합사가 파열하는 경우는 찾을 수 없었다.

다) 정상 신경과 파열한 신경의 조직학적 비교

정상 신경을 2.5% glutaraldehyde용액에 고정시켜 24시간 후 인산 완충용액으로 세척하고 1% osmium tetroxide로 1시간 고정하였다. 그 후 다시 인산 완충용액으로 3번 세척하고 30-100% alco-

hol로 단계를 거쳐 탈수한 후 Epon resin에 imbedding시켜 Epon block을 준비하였다. Epon block에 imbedding된 좌골신경의 횡단 절편을 얻고 toluidine blue 염색을 하여 40배 및 100배의 비율로 관찰하였다(Fig. 5-A, 6-A). 견인하여 파열이 일어난 신경을 파열 부위 0.5cm 상방에서 채취하여 위와 같은 과정을 거친 후 역시 toluidine blue 염색을 하고 40배 및 100배의 비율로 관찰하였다(Fig. 5-B, 6-B).

연구 결과

14마리의 토끼에서 절제한 28개의 좌골 신경중 grip부위에서 재료의 파열이 일어난 9개를 제외한 1군의 10개와 2군의 9개를 대상으로 연구 성적을 구하였다.

1) 정상 좌골신경과 지지봉합 신경의 역학적 수치의 비교

정상 좌골신경의 최대 인장강도는 7.4N에서 25.4N까지로 평균은 13.6N이었고 비례한도점의 인장강도는 3.47N에서 15.2N까지의 값을 보였으며 평균은 9.0N으로 이것은 평균 최대 인장강도의 약

Fig. 2. Schematic representation of neurorrhaphy.

Above : simple end to end anastomosis, below : end to end anastomosis with stay-suture

64%였다(Table 1). 지지봉합을 한 군의 최대 인장 강도의 평균은 2.1N으로서 정상신경의 약 1/7값을 보였다(Table 3). 측정된 정상 좌골신경의 극한 인장 응력(ultimate tensile stress, σ_u)은 2.1MPa~8.5MPa로 평균은 4.2MPa이었고 이에 대응하는 변형율인 최대 균일 변형율(ultimate tensile strain, ϵ_u)은 0.22~0.66으로 평균은 0.47이었다(Table 1). 지지봉합을 한 군의 극한 인장응력은 0.9MPa로 정상신경의 약 1/5값을 보였다(Table 3). 정상 좌골신경의 비례한도점의 응력($\sigma_{pl} = F_{pl}/A_o$)은 0.9MPa~5.4MPa로 평균은 2.8MPa이었고 변형율은 ($\epsilon_{pl} = \Delta l_{pl}/\Delta l_o$) 0.08~0.36으로 평균은 0.18이었다(Table 1). 탄성 계수(Modulus of elasticity, M_E)는 항복점의 응력을 변형율로 나누어 구한 결과 8.6에서 42.5까지로 평균은 19였다.

2) 정상 좌골신경의 견인시 나타나는 인장력-변형 곡선의 분석

인장력-변형곡선에서 신연 초기에는 신경이 어느 정도 늘어나도 인장력을 받지 않다가(a) 어느 순간 이후부터는 인장력을 받게 되며 변형량에 따라 인장력이 거의 직선적으로 비례하여 증가하는 부분(b)이 보이다가 비례한도점(proportional limit, PL)을 지나면서 인장력이 증가하지 않고 다시 감소하는 부분(c)이 관찰되었다. 그 후 다시 인장력이 증가하여 최대 인장력치(인장강도, tensile strength, F_u)에 이르렀다가 바로 파열(f)에 이르게 된다. 정상 좌골신경의 인장력-변형곡선에서는 비례 한도점과 탄성 한도점을 구별하기 어려워서 비례 한도점을 탄성 한도점 즉 항복점으로 생각하였다(Fig. 4). Beel등²⁾

Fig. 3. Measuring gauge length(l_o) before stretching.

이 쥐의 좌골 신경을 신연하여 얻은 인장력-변형 곡선도 이 실험에서 얻은 곡선과 거의 유사한 형태를 갖고 있으나 신연 초기에 인장력이 비선형으로 증가하는 모습과 소성 변형을 하는 부위에 인장력이 감소하는 사실이 더욱 뚜렷하였다.

3) 횡단면의 조직 비교

견인전 정상 좌골신경의 단면을 조직처리 과정을 거쳐 확인한 결과 oligofascicular 양상을 보이고 신경섬유와 결합조직으로 이루어진 비균일한 조직임을 확인하였다(Fig. 5-A). 견인 후 파열 부위 0.5cm 근위부의 좌골신경의 단면을 조직학적 처리과정을 거쳐 확인한 결과 각각의 fascicle들은 주위 결합조직에 둘러 싸인채 잘 유지되고 있는것으로 관찰되었다(Fig. 5-B). 남아있는 주위 결합조직은 신경주막(perineurium)이며 견인전보다 그 두께는 감소하였으나 연속성은 유지되어 있고 가장 외측의 신경의 막(epineurium)의 연속성은 없어진 것으로 확인

되었다(Fig. 5-B, 6). 또, 신경섬유의 수도 정상보다 감소한 것으로 관찰되었다(Fig. 6).

고 찰

말초신경이 탄성을 가지고 있는 것은 단열된 신경의 양 절단단이 근위와 원위부로 수축되어 중간에 간격이 생기는 것과 신경의 소실이 있는 손상을 받은 후 단단 신경 봉합술을 한 경우에 봉합부위에 어느 정도의 장력이 있어도 양호한 기능의 회복을 관찰할 수 있는 사실로 쉽게 알 수 있다. Leffert와 Seddon⁶⁾, Narakas⁷⁾는 견인에 의한 것이라고 생각되는 상완 신경총 손상 환자중 보존적으로 치료하여도 자연 치유되는 경우가 있음을 보고하였다. 이와 같이 말초신경이 신연에 강한것은 인정된 사실이나 그 정확한 생역학적 특성에 관하여는 많이 알려져 있지 않다. 신경단열 후 단단봉합을 할 경우 봉합부의 장력이 과도하면 신경의 혈액순환, 축색재생등이

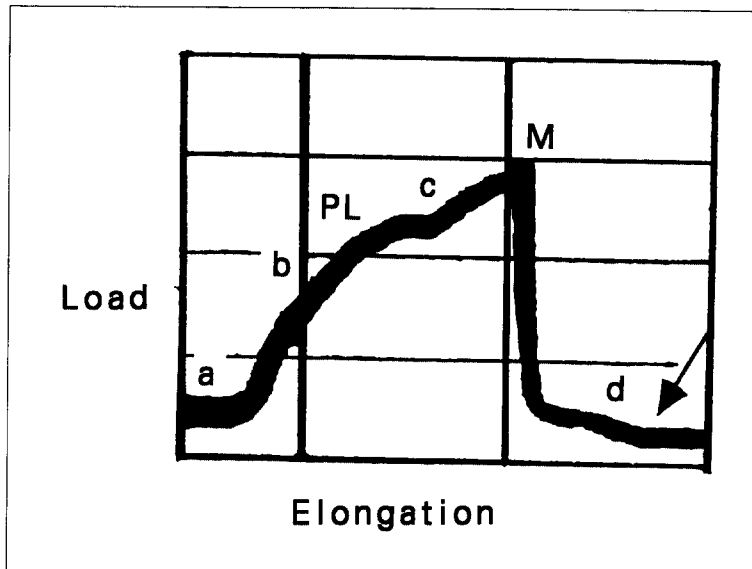


Fig. 4. A typical load-elongation curve of a normal sciatic nerve recorded by Instron testing machine during gradual stretching(rate : 200mm/min). First part(a) showed no increment of load with increasing elongation, which implies viscosity of nerve. Second part(b) is non-linear region, nerve behaved as an elastic material. Beyond the limit of elasticity (proportional limit. PL), load reached a plateau(c) and then reached maximal tensile strength(M). Load decreased suddenly and then steadily(d) until complete rupture took place(arrow).

장애를 받고 신경과 관계없는 결합조직이 과도하게 생성되어 결과에 나쁜 영향을 미치게 된다. 또, 장력이 아주 과도하면 완전한 신경조직의 재생이 일어나기 전에 봉합부가 파열할 수도 있다. 신경의 단단봉합시에 사용되는 미세봉합사는 절단단을 접촉시키는 역할만 하고 봉합부의 장력을 유지하기는 미흡할 것으로 생각되어 임상적으로는 어느 일정 기간동안만 취약한 봉합부를 지지하는 역할을 하고 그 이후에는 신경조직의 재생에 장애가 되지 않게 인체에 흡수되도록 흡수성 봉합사에 의한 지지봉합이 이용되기도 한다(Fig. 2). 본 실험에서 이용한 지지봉합과 같은 방법은 시행과정에서 봉합침이 신경조직에 손상을 줄수도 있으나 Sunderland¹⁰⁾에 의하면 말초신경에서 신경조직자체가 차지하는 비율이 30%에서 75% 정도이고, 한 예로 좌골신경은 20-30%밖에 안된다고 하여 생각보다는 신경조직 손상의 가능성이 적을 것으로 사료되었다. 본 실험에서는 지지봉합의 생역학적 효과를 알아보기 위하여 토끼 좌골신경의 중앙 부위를 절단한 후 5-0 nylon으로 지지봉합한 후 200mm/min의 일정한 속도로 견인하여 극한응력 및 변형율을 구하고 정상 좌골신경의 결과와 비교하였다(Table 1, 2, 3). 지지봉합한 군의 최대 인장강도의 평균은 2.1N으로 정상신경 13.6N의 약 1/7에 해당하였고 극한응력의 평균은 0.9MPa로 정상 좌골신경 4.2MPa의 약 1/5값을 보였다(Table 3). 신경손상시 단단봉합술을 하면서 지지봉합을 같이

할 경우 정상신경의 약 1/5의 장력을 가지고 있는 효과가 있는 것으로 단순히 미세봉합사로 봉합한 것보다는 인장력에 대해 어느 정도 저항을 가질 것으로 생각되었다. 지지봉합을 한 신경에 인장력이 가해지면서 봉합부위가 장력을 받을때 봉합사도 장력을 받게 되므로 측정 결과에 영향을 미칠 수도 있다고 생각되었으나 실제로는 봉합부위가 장력을 받자마자 봉합사가 신경의 끝을 cutting out 하는 양상이 관찰되어 신경의 생역학적 특성이 저자들이 얻은 수치의 주된 결정요소라고 생각되었다. 말초신경의 생역학적 특성을 알기 위해서는 개개의 구성 성분의 특성을 알아야 하지만 이것은 거의 불가능하기 때문에 현재로서는 말초신경의 전체적인 특성 밖에는 알 수가 없고 또, 이에 대한 연구도 활발하지 않았다. Denny-Brown과 Doherty⁴⁾는 고양이 말초 신경의 신연 실험을 통하여 말초 신경이 소성체(plastic material)의 성질이 있고 병리학적 변화가 없이 100%까지 변형할 수 있으나 그 이상으로 변형되면 신경주막(perineurium)의 파열이 일어난다고 하였다. Sunderland와 Bradley⁹⁾는 cadaver에서 각 부위의 말초신경을 절제한 후 견인실험을 하여 말초 신경이 탄성을 가지고 있는것을 확인하였으며 탄성한도(elastic limit)까지의 %변형율(% strain)은 신경의 종류에 따라서 틀리지만 7~20%라고 하였고 약 30% 신연시 파열이 일어난다고 하였다. 또, 각 부위의 말초신경의 역학적 특성이 약간의 차이가 있

Fig. 5-A. Photograph of cross section of normal sciatic nerve of rabbit showed oligofascicular pattern. Epineurium(black arrow) surrounding nerve bundle and perineurium(open arrow) surrounding each fascicle were observed(Toluidine-blue, $\times 40$).
B. After stretching, fascicular pattern was maintained but cross sectional area was decreased compared to normal nerve(Toluidine-blue, $\times 40$).

음을 관찰하였고 그 이유는 각 부위의 신경의 구성 성분의 비율에 차이가 있기 때문이라고 하였다. Haftek⁹⁾은 토끼의 경골신경을 파열할때까지 지속적으로 견인하는 실험을 하고 탄성한도까지의 % 변형율은 평균 55.7%이며 최대 변형율은 53.3~122%라고 하였고 탄성한도까지 신연되는 경우는 생리적 신경차단(neurapraxia)이나 축색단열(axonotmesis)이고 그 이상 신연되면 신경단열(neuromesis)에 해당된다고 하였다. Beel 등²⁾은 1.22mm/sec의 속도로 신연하여 인장력-변형 곡선을 구하고 비례한도점의 %변형율($E_{pl} = \Delta l_{pl} / \Delta l_0$)은 40%이며 응력($\sigma_{pl} = F_{pl} / A_0$)은 3.2MPa이라고 하였다. 본 실험에서 비례한도점의 응력은 0.9MPa에서 5.4MPa로 평균은 2.8MPa 이었고 %변형율은 8%에서 36%까지로 평균은 18%였다(Table 1). 점탄성 물질에서는 변형 속도가 증가할수록 같은 변형율을 얻으려면 응력이 커지는 특성이 있는데 본 실험에서는 정상 좌골신경의 극한응력은 평균 4.2MPa이고 최대 % 변형율은 47%였다(Table 1). 탄성계수는 응력-변형을 곡선에서 항복점까지의 직선 부분의 기울기로 본 연구에서는 비례한도점의 응력을 변형율로 나누어 구한 결과 범위는 7.5~42.5이고 평균치는

19로 생체 조직중 비교적 낮았다. 이것은 말초신경이 다른 생체조직보다 탄성이 크다는 것을 의미한다고 생각되었다.

Beel 등²⁾은 쥐의 좌골 신경을 신연하여 인장력-변형 곡선을 구하여 신연 초기에 인장력이 비선형으로 증가하는 것을 관찰하고 말초신경도 점탄성을 갖고 있다고 하였고 Bora 등³⁾도 같은 양상을 발견하였다. 저자들도 인장력-변형곡선의 초기에는 변형이 시작되자마자 인장력이 증가하는 것이 아니고 어느 정도 시간이 경과한 후에 인장력의 증가가 시작됨을 관찰할 수 있었다(Fig. 4). 이 현상은 말초신경이 어느 정도의 하중을 받기 이전에는 변형이 일어나지 않는 성질인 점성을 갖고 있기 때문이라고 생각되었다. 그 후 변형이 일정량 증가함에 따라 인장력이 일정량 증가하는 선형비례 관계(linear relationship)를 보이다가 어느 점을 지나면서는 인장력의 증가가 변형에 비례하지 않고 일정하거나 오히려 감소하는 부분이 발견되었다. 이렇게 선형비례가 끝나는 점을 비례한도(proportional limit)라 하며 생역학적으로는 비선형 비례가 끝나는 점인 탄성한도(proportional limit)와 구별하지만 본 실험에서는 구분하기 어려워 같은 의미로 사용하였다. Beel 등²⁾은

Fig. 6. After stretching, intact fascicular pattern with intervening connective tissue was observed but grossly the number of axon was diminished. Epineurium was not observed but perineurium(arrow) maintained its continuity despite of decreased width(Toluidine-blue, $\times 100$).

쥐의 말초신경을 건인하여 외장력-변형 graph를 구하고 생역학적 특성을 연구하여 비례한도점 이상의 응력이 말초신경에 가해지면 구조적, 역학적인 특성의 변화가 일어나며 이 변화는 결합조직인 신경외막과 신경주막의 파열에 의한 것이라고 하였다. 그들이 구한 인장력-변형 곡선에서는 말초신경이 인장력을 받으면 선형비례 부분 다음에 비례한도점을 지나 탄성한도를 지나고 소성변형 (plastic deformation)을 하는 부위에서 인장력이 일시적으로 감소한 다음 최대하중치에 이르렀다가 파열이 일어난다고 한다. 본 실험에서 비례한도와 탄성한도의 구별이 어려웠고 소성변형시의 인장력의 감소도 뚜렷하지 않았으며 최대하중치에 도달한 다음에는 인장력이 급격하게 감소하는 부위가 관찰 되어 Beel²⁾ 등의 결과와 비

슷하였다. 저자들이 구한 인장력-변형곡선에서 비례한도점을 지나면 한 구성 성분이 파열하고 다른 성분에 의해서 인장력이 증가하여 최대치에 도달했다가 결국은 신경 전체가 파열하는 것으로 관찰되어 말초신경의 역학적 특성은 그 특성이 약간 다른 두가지 구성 성분에 의해 결정된다고 생각되었다(Fig. 4).

Sunderland와 Bradley⁸⁾는 cadaver에서 각 부

Table 3. Comparison between group I and group II.

	$F_u^*(N)$	$\sigma_u^{**}(MPa)$	ϵ_u^{***}
Group I	13.6	4.2	0.47
Group II	2.1	0.9	0.19

* : ultimate tensile strength, ** : ultimate tensile stress, *** : ultimate tensile strain

Table 1. Biomechanical variables in group I (normal sciatic nerves of rabbit)

No	GL($10^{-3}m$)	$F_u(N)$	$F_{pl}(N)$	Δl_u	Δl_{pl}	σ_u	σ_{pl}	ϵ_u	ϵ_{pl}	M_E
1	18.7	13.4	11.6	12.4	6.8	3.5	3.1	0.66	0.36	8.6
2	16.7	14.8	11.4	10.2	5.5	4.0	3.0	0.61	0.33	9.1
3	21.6	18.0	15.0	7.4	2.9	6.6	5.4	0.34	0.13	41.5
4	20.1	10.8	8.8	6.4	2.7	3.6	2.9	0.32	0.13	22.3
5	33.6	7.4	3.8	8.7	4.4	2.1	1.1	0.26	0.13	8.5
6	30.6	11.0	3.4	9.4	3.7	2.9	0.9	0.31	0.12	7.5
7	21.7	12.6	7.0	7.8	3.6	4.2	2.3	0.36	0.17	13.5
8	30.5	10.4	6.6	6.7	2.5	3.5	2.2	0.22	0.08	27.5
9	28.9	12.4	7.2	8.7	6.1	3.3	1.9	1.30	0.21	9.0
10	25.6	25.4	15.2	6.8	3.1	8.5	5.1	0.27	0.12	42.5
mean		13.6	9.0	8.5	4.1	4.2	2.8	0.47	0.18	19.0

Note : GL - gauge length, F_u - ultimate tensile force, F_{pl} - tensile force at proportional limit, σ - stress, ϵ - strain, M_E - modulus of elasticity

Table 2. Biomechanical variables in group II (transsected sciatic nerves of rabbit sutured with 5-0 nylon).

No	GL($10^{-3}m$)	F_u	Δl_u	σ_u	ϵ_u
1	19.5	1.8	7.1	0.8	0.36
2	23.2	2.1	4.3	1.5	0.19
3	29.0	1.9	3.2	1.0	0.11
4	31.5	2.7	9.9	1.0	0.31
5	29.3	2.2	5.5	1.5	0.19
6	24.9	1.4	3.8	0.5	0.15
7	21.6	1.3	2.3	0.6	0.11
8	23.3	1.4	3.2	0.5	0.14
9	24.0	3.8	3.9	0.9	0.16
mean		2.1	4.8	0.9	0.19

위의 말초신경을 채취하여 신연 실험을 하고 말초신경 전체의 단면적과 신경속만의 단면적(funicular area)으로 계산한 최대 인장응력을 비교하여 신경주막(perineurium)이 탄성체의 성질을 갖게한다고 주장하였다. Haftek⁹⁾은 말초신경이 탄성을 갖는 이유를 신경외막때문이라고 하였고 신경외막이 끊어지고 난 후에는 점성을 갖는다고 하였다. Beek와 Kleinert¹⁾도 신경외막이 신경의 구성성분중 가장 탄력이 있는 조직이라고 하였다. 신경외막의 주성분은 Thomas¹¹⁾가 전자 현미경적 관찰을 통하여 신경의 장축을 따라서 주로 배열된 교원섬유로 이루어져 있는 것을 발견하여 이 교원섬유에 의해서 신경외막의 특성이 결정지어지는 것으로 생각하였다. 토끼의 정상 좌골신경은 oligofascicular 양상으로 fascicle을 둘러싸고 있는 신경주막과 혈관을 포함한 신경외막이 관찰되었다(Fig. 5-A). 신연후 파열부위 약 0.5cm 상방의 신경의 횡단면을 관찰한 결과 각각의 fascicle들을 둘러싸는 신경주막은 잘 유지되고 있으나 가장 바깥쪽의 신경외막은 관찰되지 않았다(Fig. 5-B, 6). 또, 전반적으로 신경섬유의 수가 감소하였으나 신경외막이 파열한 후에도 유지가 되고 있는 신경섬유가 다수 관찰되었다(Fig. 6). 이 결과만으로 단언할 수는 없지만 관찰 소견상으로 신경주막이 신경외막보다 인장력에 더 강한 조직일 수도 있다고 생각되었다. 그러나 이에 대해서는 신연 각 단계에서 조직학적 변화를 추시하여 확인하는 과정이 필요할 것으로 생각되었다.

이상의 결과로 저자들은 신경의 단단봉합술에 이용되는 지지봉합은 정상신경의 약 1/5에 해당하는 장력을 갖게 하여 봉합부위의 장력을 줄이는데 어느 정도 효과가 있는 것을 확인하였다. 또, 말초신경은 점탄성 물질이며 그 탄성계수는 평균 19로 매우 유연한 조직이고 극한 응력은 평균 4.2MPa여서 생체 조직중에서 근육(0.2MPa)과 피부(8MPa) 사이로 인장력에는 비교적 강한 조직임을 알 수 있었다. 조직학적인 비교로 신경의 구성성분중 신경주막이 신경외막보다 늦게 파열하여 신연에 대한 저항력이 보다 클 것으로 관찰되었으나 이에 대한 연구는 더 필요할 것으로 생각되었다. 말초신경은 여러 성분으로 구성되어 있고 또 그 구성 성분의 비율도 부위에 따라 차이가 있어 전체의 정확한 생역학적 특성을 규명하기가 쉽지 않지만 어느 성분이 신경의 생역학적

특성에 큰 영향을 미치는지와 견인에 의한 신경 손상시의 병태생리등은 더 연구해야 할 과제로 생각된다.

요 약

말초신경에서 지지봉합의 효과 및 정상 말초신경의 생역학적 특성 그리고 신연후의 조직 변화를 알아보기 위하여 성숙한 토끼 14마리의 좌우 좌골신경 28개를 채취하여 정상좌골신경 14개와 절단후 지지봉합을 한 14개를 200mm/min의 속도로 파열이 일어날 때까지 일정하게 견인하였다. 그 중 결과를 얻을 수 있었던 10개와 9개의 신경의 측정치를 비교하고 인장력-변형 곡선을 분류하였고 정상 좌골신경 횡단면과 파열이 일어난 후의 신경의 횡단면을 조직학적으로 비교하였다.

1. 지지봉합은 정상 좌골신경의 약 1/5의 인장력을 가지므로 신경봉합시 봉합부의 장력을 줄이는 효과가 있을 것으로 생각되었다.

2. 견인시작후 인장력이 증가하기까지 어느 정도의 시간이 걸리고 그 이후 변형과 인장력이 선형비례 관계를 보이는 부분이 있어 말초신경이 점탄성체의 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

3. 최대 인장력에 도달하기전 인장력이 일시 감소하는 부분이 있어 적어도 두종류의 구성 성분이 말초신경의 생역학적 특성과 관련이 있음을 알 수 있었다.

4. 정상 말초신경에서 극한 응력의 평균은 4.2MPa, 그 시점의 변형율은 0.47이었으며 평균 탄성계수는 19로 다른 생체조직보다 낮았다.

5. 말초신경 파열후에 가장 바깥쪽의 신경외막은 관찰되지 않지만 신경주막은 관찰되어 신경외막이 더 일찍 파열하는 것으로 생각되었다.

REFERENCES

- 1) Beek, A V and Kleinert, H E : Practical microneuroplasty. *Orthop Clin North Am*, 8:377-386, 1977.
- 2) Beel, J, Grosswald, D and Lutges, M C : Alterations in the material properties of peripheral nerve following crush injury. *Journal of Biomechanics*, 17:185-193, 1984.
- 3) Bora, F W, Richardson, S and Black, J : The bio-

- chemical responses to tension in a peripheral nerve. *J Hand Surg*, 5:21-25, 1980.
- 4) **Denny-Brown, D and Doherty, M M** : Effects of transient stretching of peripheral nerve., *Archives of Neurology*, 54:116-129, 1945.
 - 5) **Haftak, J** : Stretch injury of peripheral nerve-acute effects of stretching on rabbit nerve. *J Bone Joint Surg*, 52B:354-365, 1970.
 - 6) **Leffert, R D and Seddon, H** : Infraclavicular brachial plexus injuries. *J Bone Joint Surg*, 47B:9-22, 1965.
 - 7) **Narakas, A** : Brachial plexus surgery. Symposium on peripheral nerve injuries. *Orthop Clin North Am*, 12:303-323, 1981.
 - 8) **Sunderland, S and Bradley, K C** : Stress-strain phenomena in human peripheral nerve trunks. *Brain*, 84:491-516, 1961.
 - 9) **Sunderland, S** : The anatomic foundation of peripheral nerve repair techniques. *Orthop Clin North Am*, 12:245-266, 1981.
 - 10) **Sunderland, S** : Nerve injuries and their repair. 1st ed. page 34, *Edinburgh*, Churchill Livingstone Co, 1991.
 - 11) **Thomas, P K** : The connective tissue of peripheral nerve-an electron microscope study. *J. Anat.*, 97-1:35-44, 1963.