

비절개 채취시 모터 토크에 따른 모낭 손상에 대한 생역학적 분석

그로우의원 장 태 호

ACADEMY

성공적인 비절개식 채취를 위해서는 펀치팁이 두피에 접촉하는 순간 발생하는 역학에 대한 이해가 필요합니다. 두피의 특성은 환자 개인마다 차이가 크고 저희가 통제할 수 없는 변수이지만 펀치 팁은 그렇지 않습니다. 펀치 소요 시간을 줄이고 절단율을 낮출 수 있는 다양한 펀치팁이 소개되어 왔습니다.

그런데 저희가 완전하게 통제할 수 있는 변수임에도 불구하고 상대적으로 관심을 적게 받은 것이 바로 펀치 팁을 회전시키는 모터입니다. RPM과 토크 셋팅에 따라 절단율이 어떻게 변화하는지에 대한 실험적인 연구가 일부 소개되고 있습니다만, 이론적인 분석은 여전히 부족합니다.

본 연구에서는 이런 변인 중 모터의 토크를 어떤 수준으로 맞추는 것이 성공적인 채취에 가장 적합한지 이론적인 수준에서 예측해보려고 합니다.

회전하는 펀치팁이 피부에 접촉하는 순간 회전의 접선 방향으로 접선력(tangential force, F)가 발생합니다. 접선력은 피부에 전단응력(shear stress)을 발생시키고, 이 값이 피부의 최대 전단강도(Ultimate Shear Strength, USS)를 넘어서면 피부가 절개됩니다.

먼저 피부와 모발과 관련된 지표를 계산해 보겠습니다. 두피와 모발의 최대전단강도를 직접 측정할 문헌을 발견할 수는 없었습니다만, 일반적으로 구조적으로 균일한(homogenous) 물성을 가진 물체의 최대전단강도는 최대인장강도(Ultimate Tensile Strength, UTS)와 비례 관계로 나타나는 경향(Von Mises criterion)이 있습니다.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max}}{\sqrt{3}}$$

where τ_{max} : USS, σ_{max} : UTS

피부의 UTS는 평균적으로 15~20MPa, 모발의 UTS는 평균 200MPa로 알려져 있습니다. 위 식에 따라 두피의 최대 전단강도는 8.6~11.5MPa, 모발의 최대전단강도는 115.4MPa로

예측됩니다.

다음으로 모터와 관련된 지표를 확인하겠습니다. 핸드피스에 사용되는 마이크로모터의 정격출력 시 토크(τ) 값은 일반적으로 3~5N·cm 정도입니다. 3N·cm의 토크를 가진 모터에 외경 1.0mm의 라운드 펀치를 장착하고, 펀치가 한 번 회전할 때 0.1mm가 전진한다고 가정해보겠습니다. 이 펀치가 피부에 접촉했을 시 발생하는 전단응력(Shear Stress, SS)를 계산해보겠습니다.

우선 펀치가 한 바퀴 회전할 때 두피와 접촉하는 면적을 계산해보겠습니다.

$$A = 2\pi rh = 2\pi \cdot 0.5mm \cdot 0.1mm = 0.3142mm^2$$

(where A: surface area, r: radius of the punch, h: depth of incision)

토크(T)는 펀치의 접선 방향으로 접선력(F)을 발생시킵니다.

$$F = \frac{T}{r} = \frac{30N \cdot mm}{0.5mm} = 60.0N$$

전단응력(τ)은 접선력의 크기를 접촉면의 면적으로 나눠주면 구할 수 있습니다.

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{60.0N}{0.3142mm^2} \approx 190.99MPa$$

즉, 상대적으로 모터의 토크가 3N·cm 정도로 낮더라도 피부에 작용시킬 수 있는 전단응력(τ)의 크기는 두피의 최대전단강도에 비해 훨씬 높습니다. 이상적인 환경에서는 토크가 부족해서 피부 절개가 불가능할 가능성은 없다는 뜻입니다. 다만 실제 피부는 위의 단순화된 모델과는 달리 완전히 균일한 조직이 아니며, 펀치 방향으로 피부가 밀리는 등 다양한 변형이 생기므로 저희가 시술 시 실제로 발생하는 전단응력은 이보다 낮을 수 있습니다.

주목할만한 점은 펀치가 발생시키는 전단응력이 모발의 최대 인장강도보다도 높다는 점입니다. 만일 펀치팁이 모발에 가

깝게 접근한다면, 그래서 전단응력이 뒤틀림 응력(torsional shear stress)으로 모발에 작용한다면 펀치팁이 모발을 직접 건드리지 않더라도 모발이 끊어질 가능성을 배제할 수 없습니다. 모발이 끊어질 정도라면 외모근초(Outer root sheath) 등의 연조직 역시 손상될 수 밖에는 없습니다.

그렇다면 모낭이 펀치 내경의 정중앙을 따라가는 완벽한 펀치를 가정한다면 어떨까요? 이 경우 모낭이 펀치의 날에서 멀리 떨어져 있지만, 펀치의 내벽과 모낭 사이의 마찰력으로 생긴 토크(T_f)의 영향을 받습니다. 분석의 편의를 위해 모낭을 0.1mm 두께의 원통으로 가정하고 펀치의 한 가운데 위치하고 있다고 가정해보겠습니다.

먼저, 마찰 토크부터 계산해보겠습니다.

$$T_f = f \cdot N \cdot r_f$$

where f : coefficient of friction, N : contact force between the punch and the follicle, r_f : radius of follicle

일반적으로 수술용 스테인리스 기구와 피부의 마찰계수는 0.2~0.5로 알려져 있습니다. 이 계산에서는 0.3으로 가정해보겠습니다. 또한 접촉힘(N)값은 피부 조직을 신장시킬 때 탄성을 잃기 직전인 힘인 항복강도(Yield strength)와 접촉면적의 곱으로 나타냅니다. 일반적으로 피부의 항복 강도는 1~2MPa로 알려져 있습니다. 이 계산에서는 1MPa로 가정해보겠습니다.

$$T_f = 0.3 \cdot \left(1 \times \frac{10^6 N}{m^2} \right) \cdot 2\pi \cdot 0.05mm \cdot 0.1mm \cdot 0.05mm$$

$$= 0.000471N \cdot mm$$

이를 통해 뒤틀림 응력을 계산할 수 있습니다.

$$\tau_f = T_f \cdot \frac{r_f}{J} = \frac{0.000471N \cdot mm \times 0.05mm}{9.8715 \times 10^{-7} mm^4} \approx 24.0MPa$$

비교적 보수적으로 수치들을 적용했음에도 불구하고 이 값은 피부 조직의 최대 전단강도보다 높습니다. 즉, 이 계산에 따르면 모낭이 펀치 내경의 중앙을 따르도록 완벽하게 펀치를 하더라도 모발을 둘러싸고 있는 외모근초(Outer root sheath) 등의 연조직은 뒤틀림 응력에 의해 손상될 수 밖에는 없다는 뜻입니다. 이 계산대로라면 비절개식으로 정상적인 모낭을 채취할 가능성은 없습니다. 제 계산이 잘못된 것일까요?

사실 정상적인 모낭을 비절개식으로 채취할 수 있는 것은 펀치의 모터가 실제 시술 환경에서는 정격 토크를 모두 발휘하지 않기 때문입니다. 핸드피스에 사용되는 모터는 제품마다 차

이가 있으나 최대 회전수가 보통 40,000RPM 전후입니다. 그런데 임상에서 실제로 사용되는 회전수는 1,000~4,000RPM 사이입니다. 특별한 이유가 있다고 하기보다는 이 정도 수준의 RPM이면 충분히 빠르게 채취를 할 수 있으면서도 발열이 억제된다는 경험 덕분일 것입니다.

그런데 이 수준의 RPM에서는 모터에 정격 전압보다 더 낮은 전압이 인가됩니다. 핸드피스에 들어가는 저가의 마이크로모터는 PWM(Pulse Width Modulation)과 같이 유효 전압을 높이고 낮추는 비교적 단순한 방식으로 RPM을 제어하기 때문입니다. 그리고 일반적으로 모터는 설계 방식에 따라 토크가 전압에 비례하거나 또는 그 제곱값에 비례합니다. 그래서 저희가 펀치를 할 때 실제로 모터가 발휘하는 토크는 정격 토크에 비해 훨씬 낮습니다. 그래서 모낭에 가해지는 뒤틀림 응력도 더 낮기 때문에 정상적인 모낭을 채취할 수 있는 것으로 생각됩니다.

이 계산 결과를 통해서 저는 다음과 같은 결론을 내리고자 합니다. 모터의 RPM은 (그리고 그 결과로 토크는) 가능한 낮으면 낮을수록 좋습니다. 높은 RPM과 토크가 시술 시간을 단축시키고 질긴 두피 등 난이도 높은 케이스에서 절단율을 낮출 수는 있겠지만, 강력한 뒤틀림 응력이 외모근초와 같은 연약한 연조직을 파단시킬 가능성이 있습니다. 그리고 이런 종류의 손상은 흔히 사용하는 광학현미경으로는 쉽게 확인할 수 없을 것입니다. 모발은 손상되지 않은 것처럼 보이기 때문이죠.