

충격파 치료(1)

이 용 범 한림대학교 성심병원 정형외과 교수 | e-mail : drleeyb@naver.com

이 호 원 한림대학교 강남성심병원 정형외과 교수 | e-mail : lhwghm@gmail.com

1. 충격파 치료의 역사와 원리

충격파 치료는 신장 결석을 충격파로 파쇄하는 체외 충격파 쇄석술에서(ESWL : Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy) 파생되어 현재 의학의 다양한 질환에서 이용되고 있다. 체외 충격파가 의학에 이용된 역사는 그리 길지 않다. 2차 세계대전 중에 군인들의 폐가 외부 충격 없이 수중 폭발 이후 간접적으로 손상된 것을 발견하게 되었고, 이것이 충격파가 인체 조직에 영향을 미칠 수 있음을 발견한 첫 번째 사건이었다.(그림 1)

이후 1950년대에 충격파에 대한 체계적인 연구가 이루어지기 시작하였다. 전기 수압식(electrohydraulic) 충격파가 물속 세라믹 판을 파괴할 수 있음이 밝혀졌고, 수술 없이 뇌종양을 치료하는 방법을 고민하던 Frank Rieber에 의해 고안된 장치가 미국에서 전기 수압식 충격파에 대한 최초의 특허 등록이 되었으며(그림 2), 1950년대 후반에는 전자기적(electromagnetic) 충격파의 물리적 특성이 알려졌다. 1966년 Dornier사에서 고속 분사 실험을 하던 중 직접적인 전기적 자극이 없었음에도 간접적으로 중간 매개물을 통한 전기적 충

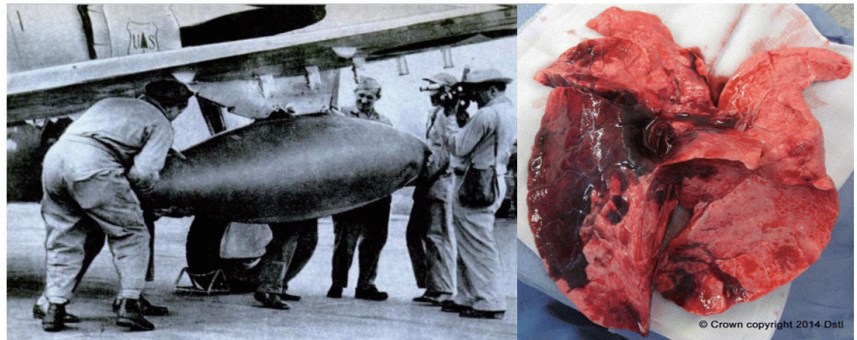


그림 1 2차 세계대전 중 수중 폭탄 폭발로 인해 발생한 폐의 간접 손상

격을 느낀 충격파에 대한 흥미로운 사건이 있었다. 1968년에서 1971년까지 독일에서 충격파와 동물의 생체 조직 간의 상호 작용에 대한 실험 및 조사가 진행되어 고에너지 충격파가 생체 조직에 영향을 미칠 수 있다는 것을 알게 되었다. 충격파가 진행되는 생체 매질에 어떤 영향을 미치는지 확인하였고, 충격파가 근육, 지방, 결합 조직을 지날 때는 부작용의 정도가 낮음을 확인하였으며, 폐, 뇌, 복부 장기 등에는 위험성이 있다고 조사되었다. 충격파의 가장 좋은 전도 매질은 물 및 젤라틴 성분이었었는데, 이는 조직의 음향 임피던스 유사성 때문으로 조사되었다.

이러한 실험 및 임상시험의 협업을 바탕으로 체외 충격파를 이용한 신장 결석 파쇄의 아이디어가 나오게 되

었다. 1971년 Haeusler와 Kiefer는 in-vitro 실험을 통하여 신장 결석의 직접적인 접촉 없이도 결석의 파쇄가 가능함을 첫 번째로 보고하였고, 지속적인 연구를 통해 1973년 물에 담근 결석을 충격파로 파쇄한 연구를 발표하였다. 1974년 독일에서 'ESWL의 적용'을 위한 실험 프로그램이 진행되었다. 이를 바탕으로 1980년 독일 뮌헨에서 프로토타입 기계인 Dornier Lithotripter HM1을 처음으로 인체에 적용하여 환자의 결석을 파쇄하였으며, 이후 21명의 환자에게 체외 충격파로 요로 결석을 효과적으로 치료했다는 연구 결과를 발표하였다(그림 3). 1983년에 독일(Stuttgart)에 첫 번째 상업용 파쇄 기계(HM3, Dornier)가 설치되었고, 이를 바탕으로 담석 파쇄 실험이 진행되었다. 1985년에 독일 뮌헨에서 ESWL을 이용한 담석 파쇄술의 첫 번째 임상적 치료가 시행되었고, 그로부터 1년 뒤 Mainz에서 구조통이 없는 결석 파쇄기 프로토타입이 테스트되어 오늘날 결석 치료의 첫 번째 치료 옵션으로 사용됐으며, 전 세계적으로 수많은 환자들의 치료에 이용되고 있다. 국내에서는 1987년 중앙대학교 용산병원에서 국내 최초로 신결석을 체외 충격파로 치료하였고, 적응증을 점점 넓혀가면서 1988년 담석을 체외 충격파로 파쇄하였다.

이렇게 체외 충격파 결석 파쇄술이 1980년대에 치료 방법으로 확립되어 자리를 잡고 난 이후 결석 파쇄술을 시행한 환자에게 골 형성이 관찰되면서 근골격계에 충격파가 미치는 영향에 대해 연구가 진행되었고, 1987년 Karpmann RR 등은 근골격계 체외 충격파를 고관절 전치환술의 재수술 케이스에서 처음으로 이용하였다. 1989년 Graff는 충격파의 영향으로 뼈에 48시간 뒤에 뼈 부종이 발생하면서 골세포가 파괴되는 양상을 보였다가, 2~3주 뒤에는 해당 부위 뼈의 재구성이 일어난다는 것을 확인했다. 1991년 Valchanou는 지연 유합이나 불유합 골절 환자 82명에게 충격파를 적용하여 70명의 환자에서 심각한 부작용 없이 골절의 유합이 진행됨을 확인하였으며, 1992년 Haupt 등은 충

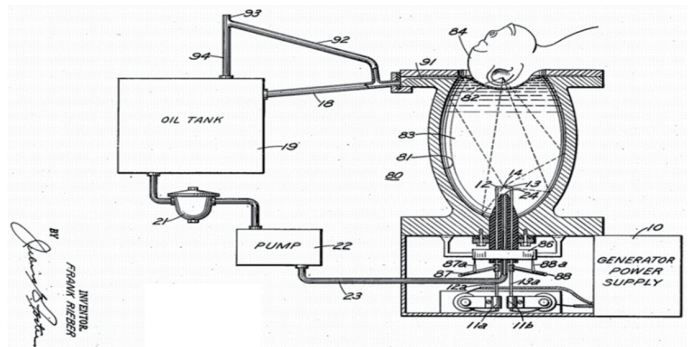


그림 2 뇌종양의 비수술적 치료에 대해 Frank Rieber에 의해 고안된 충격파 장치. 미국에서 전기 수압식 충격파에 대한 최초의 특허 등록



그림 3 독일 뮌헨에서 충격파를 이용하여 시행된 최초의 인체 적용 요로 결석 쇄석술

격파가 골절의 치유에 도움이 된다는 것을 발표하는 등 체외 충격파 치료의 근골격계에 대한 유용성이 알려지게 되었다.

근골격계 질환에 대한 체외 충격파 치료(ESWT : Extracorporeal Shock Wave Therapy)에 의해 관절의 통증이 완화되는 것이 관찰되면서 요통이나 건 부작 부위 통증 등 연부 조직에도 ESWT를 적용하는 응용법들이 발전하게 되었고, 이를 바탕으로 1992년 Dahmen은 어깨의 건병증에 충격파를 적용하였다. 결석을 제거하는 것과 비슷한 기전으로 근골격계 질환에서 석회화 병변을 치료하는 것에 충격파를 응용하여 1993년 Loew는 석회화 건염에 대한 ESWT의 유용성을 처음으로 보고하였다. 1996년 독일 대표팀은 애틀

런타 올림픽에서 ESWT 기계를 이용한 치료를 전문 운동 선수에게 적용하였다. 또한, 족저 근막염에 대한 체외 충격파 치료는 평균 약 81%의 치료 성공률을 보였는데, 이는 보존적 치료나 수술적 치료보다 우수한 결과임을 확인하였다. 족저 근막염과 유사하게, 외측 상과염에 ESWT를 실험적으로 사용하게 되었으며, 다른 건병증에도 ESWT를 이용하여 60~80% 정도의 치료 성공률을 보였다. 이렇게 점차 독일, 오스트리아 등 유럽을 중심으로 연부조직 질환에 대한 적응증이 확산되었다. ESWT는 아킬레스 건염의 치료에도 이용되었는데 Vulpiani 등은 2개월 추시 시에 47.2%, 장기 추시 시에 76%에 이르는 치료 효과를 보였다고 보고하였다. 또, ESWT는 슬개 건병증에서도 통증 감소와 기능 향상에 긍정적인 영향을 미치는 안전한 치료법이 될 수 있음이 보고되었다.

이러한 적응증의 확산 및 기전에 대한 연구가 이루어지면서 1997년 유럽충격파 치료학회(ESMST : European Society for Musculoskeletal Shockwave Therapy)가 설립되고 다른 여러 국가의 의사들이 합류하게 되면서 1999년 국제충격파 치료학회(ISMST : International Society for Medical Shockwave Treatment)라는 국제 학회로 발전되었고 충격파에 관한 기초적 임상적 지견이 공유되면서 정형외과 영역의 근골격계 치료 적응증을 점점 확장하게 되었다. 의학 분야에서 최초로 사용된 충격파 치료 장비는 전기 수력 타원체(electrohydraulic ellipsoid) 방식의 초점형(focus type)이었으며, 환자에게 충격파를 적용하기 위해서 커다란 수조와 거대한 기계가 필요하였고, 매우 고가의 치료였으므로 제한적으로 사용될 수밖에 없었다. 과학 기술이 발전하고 연구를 거듭하여 충격파 치료 장비가 점점 다양해지고 소형화되었으며, 충격파를 전달하는 매질이 물 대신에 초음파 젤을 사용하게 되었다. 필요한 비용과 시간이 줄어들어 치료 장비가 널리 보급되기 시작하면서 충격파 치료의 적응증이 확장되었다. 최근에는 미용 시술이나 성기능과 관련된 치료, 협심증 치료 등 더욱 다양한 분야에서 충격파 요법이 응용되고 있다. 현재 ISMST에서는 적응증의 정도에 따

라 승인된 표준 치료, 일반적 경험적 임상 적응증을 가진 치료, 극히 예외적인 적응증을 가진 치료, 실험적인 적응증을 가진 치료, 이렇게 네 개의 대분류를 하였고, 그 아래에 19개의 소분류 영역을 나눠 46개의 질병과 급성 손상에 대해 충격파 치료의 적응증을 인정하고 있다.

충격파는 대량의 에너지가 순간적으로 방출되는 경우 발생하는 불연속적 파동의 한 종류로 파동이 액체, 기체, 플라즈마 등의 유체 속을 음속보다 빠르게 지날 때 발생하는 것을 의미한다. 초기에는 충격파가 인체 내에서 어떤 기전을 통해 치료 효과를 갖는지 알지 못했다. 따라서 비슷한 효과를 보일 것으로 판단되는 질병에 실험적으로 충격파를 적용하고 결과를 분석하여 적응증을 늘려갔다. 2000년대에 들어서 충격파가 생체 조직에 어떤 변화를 일으키는 지 관찰하는 기술들이 발달함에 따라 충격파의 체내 작용 기전을 밝혀내는 데 진전이 있었으나 아직 정확하게 모든 기전을 알아내진 못하였다.

체외 충격파를 만드는 원리는 크게 초점형, 방사형으로 나눌 수 있다(그림 4). 초점형 체외 충격파는 사람의 몸이 물과 비슷한 음향 임피던스를 갖추고 있는 점에 착안해 사람의 몸이 매질이 되어 충격파를 전달하는 원리를 이용한다. 전기 에너지를 기계적 에너지로 전환시켜 충격파를 만든 뒤 반사판을 이용해 특정 부위에 충격파를 집중시킨다. 조직의 특정 부위에 에너지가 집중되어 상대적인 통증이 심할 수 있다. 크게 세 가지로 나눌 수 있는데, 전기 수력(electrohydraulic), 전자기(electromagnetic), 압전기(piezoelectric) 원리가 있다. 전기 수력 원리는 1세대 타입으로 전자기나 압전기 방식보다 상대적으로 더 큰 에너지를 내는 장점이 있으며 고압의 전기를 이용한 수중 폭발을 일으켜 발생한 충격파를 반사체를 이용하여 하나의 초점에 모이게 하는 장치이다. 전자기 원리는 전류를 코일을 통과시키면서 강한 자기장이 형성되고, 이렇게 만들어진 충격파를 렌즈를 이용하여 초점을 형성하는 방식이다. 압전기 원리는 전류 공급에 따라 부피가 수축과 팽창을 하는 압전 금속(piezoelectric crystals)이 주변의 수중에서 충

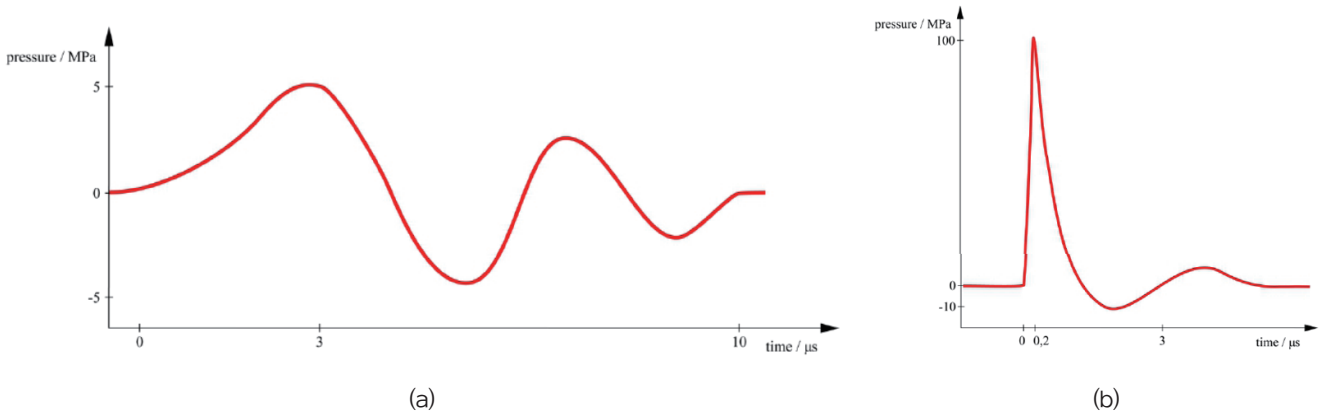


그림 4 (a) 방사형 충격파 파형; (b) 초점형 충격파 파형

격파를 발생시키는 원리이며, 형성된 충격파가 바로 초점을 형성할 수 있게 압전 금속이 기하학적으로 정렬하게 된다. 방사형 체외 충격파는 공기압을 이용해 압력파(pressure wave)를 만드는 방식으로 발사체에서 압축 공기를 가속화시킨 후 애플리케이터(applicator)에서 피부에 운동 에너지를 전달하는 방식으로 조직에 전반적으로 체외 충격파를 전달하는 효과가 있어 근육 질환 등에 많이 이용된다. 반면 충격파의 에너지를 조직의 한 곳에 집중할 수 없는 단점이 있다.

충격파는 일반 파동과 마찬가지로 원거리까지 에너지를 전달할 수 있고, 다양한 매질을 통해 전달될 수 있으며, 갑작스럽게 매질의 압력, 온도, 밀도에 불연속적인 변화를 일으키는 것이 특징이다. 의학에서 사용하는 충격파는 10ns의 짧은 시간 안에 5~120MPa까지의 높은 압력 상승을 보이고 최고 압력의 지속 시간은 매우 짧다. 이후에 압력의 크기가 양성 압력 진폭의 10% 정도 되는 음성 압력 위상이 뒤이어 나타나며 이는 공동화(cavitation) 현상을 일으키는 주원인이라고 생각된다. 이런 공동화는 세포막의 투과성과 생물학적 분자의 이온화를 증가시킨다. 충격파가 지나갈 때 조직의 분자들은 진동하면서 충격파에 대한 반응으로 공동화 거품(cavitation bubble)의 군집(cluster)을 형성하게 되는데 한 연구에 의하면 체외 충격파는 이러한 공동화 거품 군집이 석회성 결석을 분쇄하여 제거한다고 하였다. 어깨 석회화에 대한 ESWT 치료의 기전은 아직 확실하

지는 않으나 높은 에너지의 충격파가 회전근개 석회질 침착물에 직접적인 기계적인 분해 효과를 발휘하고 낮은 에너지의 충격파는 과자극 진통의 효과가 있는 것으로 생각된다.

체외 충격파 치료 시 충격파를 집중시키는 위치를 초점(focal point)이라고 하는데 이는 최대 방출 에너지의 80%가 도달하는 지역이다. 이러한 초점에서의 에너지는 임펄스당 에너지 속 밀도(EFD : Energy Flux Density)로 정의하며 단위 면적당 Joule로(mJ/mm^2) 기록한다. 의학적으로는 보통 $0.001\sim 0.4\text{mJ}/\text{mm}^2$ 이 이용된다. Rompe는 EFD를 기준으로 충격파의 강도를 낮음($< 0.08\text{mJ}/\text{mm}^2$), 중간($< 0.28\text{mJ}/\text{mm}^2$) 및 높음($< 0.60\text{mJ}/\text{mm}^2$)으로 분류하였다. 낮은 EFD 충격파 치료에서는 세포 핵 항원(PCNA), 산화 질소(NO : Nitric Oxide) 생성, 콜라겐 합성의 증가가 관찰되었다. 여기서 산화 질소는 진통, 혈관 신생, 항염 효과가 있어 임상 치료에 매우 유용하게 작용되며, 이런 산화 질소의 기전으로 ESWT가 상처 회복에 도움이 된다고 보고되고 있다. 또한, 최근 연구에 따르면 저에너지 ESWT는 대식 세포 표현형의 극성 이동($\text{M1} \rightarrow \text{M2}$)을 자극시킨다고 밝혔다. M1 대식 세포는 일반적으로 미생물에 의해 자극되어 염증을 촉진하는 역할을 하며, 반대로 M2 대식 세포는 T-helper type2(Th2)의 면역 반응에 의해 생성되고 일반적으로 인터류킨(IL - 4,5,9,13)의 생합성을 증가시켜 항염증 반응을 일으킨

표 1 충격파 치료의 인체내 기전(ISMST)

1. Cavitation
2. Direct, mechanical effect or tearing (stone disintegration, bone fissures, and tissue tearing)
3. Thermal and chemical effects
4. Biological effects of shock waves
5. Mechanotransduction
6. Gene expression
 - A. Nitric oxide (NO)
 - B. Prostaglandin E2
 - C. COX-2
 - D. Substance P
 - E. PGP (Phosphoglycolate Phosphatase)
 - F. CGRP (Calcitonin Gene Related Peptide)
 - G. eNOS (endothelial Nitric Oxide Synthetase)
 - H. VEGF (Vessel Endothelial Growth Factor)
 - I. PCNA (Proliferating Cell Antinuclear Antigen)
 - J. Signal-regulated kinase (ERK)
 - K. p38 kinase
8. Macroscopically recognizable healing
9. Hyperstimulation analgesia (gate-control mechanism)

다. 또한 사이토카인과 성장 인자 방출을 통하여 혈관 신생의 역할도 하는 것으로 알려져 있다.

Hausdorf 등은 EWST를 시행하고 나서 6~24시간 이후에 substance P가 증가했다가 6주 정도 지나면 다시 감소하게 되는데 이것이 ESWT가 근골격계 조직의 통증 감소에 작용하는 분자 기전이라고 하였다. 최근 연구자들은 건세포의 증가와 성장 인자의 유도에 의해 EWST가 힘줄의 회복에 관여하는 것으로 생각한다. ESWT가 건염의 회복에 영향을 준다는 근거 중 하나는

ESWT가 TGF- β 1 및 IGF-I의 증가를 유도한다는 것이다. 이러한 성장 인자는 건세포에 의한 세포 외 기질 생합성을 향상시키는 것으로 밝혀져 있다. 건세포는 기계적 자극에 대한 반응으로 TGF- β 1 유전자 발현을 증가시킬 수 있다. 이러한 발견들은 건 조직이 충격파 자극을 생화학적 신호로 전환하여 건염의 회복을 가능하게 한다는 것을 보여준다. 또한 TGF- β 1은 상처 치유 과정에서 대식 세포에 의한 세포 외 기질 분해 및 염증 작용의 강력한 억제제로 작용하는 것으로 보고되어 있다. 0.22mJ/mm²의 에너지로 ESWT를 시행한 섬유 아세포(fibroblast)는 증식의 증가를 보였는데 이는 ESWT를 시행하지 않은 섬유 아세포보다 더 높은 결과를 보였으며, TGF- β 1, 콜라겐(Type I, III)의 mRNA 발현 또한 ESWT를 시행한 군에서 더 높았다. 또한, Han 등은 일반적으로 건병증 세포에서 관찰되는 더 높은 농도의 사이토카인과 기질 금속 단백질 분해 효소(MMP : Matrix MetalloProteinase)가 충격파 자극 후에 그 농도가 낮아짐을 확인하였다. 이러한 데이터는 결합 조직의 복구 과정과 관련된 주요 요인이 ESWT에 의해 활성화되었음을 보여준다. 충격파 치료가 인체 내에서 어떤 기전으로 효과를 나타내는지 여러가지 가능성들을 포함하여 현재까지 밝혀진 바를 중심으로 ISMST에서는 다양한 기전을 인정하고 있다.(표 1)

이렇게 충격파는 세포 사이 및 세포 외 반응을 생성하여 통증 완화, 혈관 형성, 단백질 생합성, 세포 증식, 신경 및 연골 보호, 근골격 구조의 칼슘 침착 파괴 등과 같은 다양한 효과를 생성할 수 있다. 이러한 효과의 조합은 조직 재생 및 통증 완화로 이어져 손상된 조직의 기능적 결과를 개선할 수 있다. 이러한 사실을 고려할 때 충격파 치료의 적용은 수많은 근골격계 손상 및 다양한 의학적 치료에 유용한 기술로서 큰 잠재력을 보여주고 있다.

충격파 치료(2)

김재희 피노키오정형외과 원장/대한충격파치료학회 총무이사 | e-mail : drleeyb@naver.com

2. 충격파 치료 적용의 실제

“하룻밤만 통증 때문에 깨지 않고 푹 자봤으면 소원이 없겠어요!”, “목뒤랑 양쪽 어깨 위에 바위 덩어리를 하나씩 얹어 놓고 사는 것 같아요.”, “병원이나 한의원 가서 치료를 받아도 그때뿐이고 금방 똑같아져요.”, “병원에 가서 엑스레이를 찍으면 뼈나 관절은 별 이상 없고 근육통이라고, 아프면 물리 치료 받고, 자세 바르게 하고 운동하고 지내라고 하는데, 바른 자세를 유지하는 것도 어렵고 통증 때문에 운동하기도 쉽지 않고, 누구나 아는 뻘한 얘기일 뿐 현실적으로 별 도움이 되지를 않아요.”, “한동안 약물 치료랑 물리 치료라도 열심히 받으면 좀 덜해진다 싶다가도, 좀 좋아졌나 싶어 안 가면 금방 똑같이 아파져요.”, “원인이라도 속 시원히 알고, 언젠가는 좋아질 수 있다는 희망이라도 있으면 버티겠는데 그렇지 않으니, 이렇게 고통스러울 바에는 차라리 죽고 싶을 때도 있어요!”

위와 같이 말하면서 목, 어깨, 등, 허리, 골반 등 신체 여러 부위의 끊이지 않는 심한 통증을 호소하며 진료를 받으러 오는 환자들 생각보다 꽤 많다. 이런 환자들 중에는 “정말 고생 많으셨겠어요!” 이 한 마디에 평평 눈물을 보이는 사람들도 적지 않다. 남들은 알아주지 않는 심한 통증 때문에 얼마나 괴로운 삶을 살았는지 알 수 있는 순간이다. 겉으로 보기에야 멀쩡하니까 주

위 사람들 그 누구도, 심지어는 그동안 만났던 대부분의 의사들조차도 자기들의 고통을 알아주지 못하고, 심한 경우에는 피병 취급을 받는 경우까지도 있었으니 신체적 고통은 물론 정신적 고통까지 이루 말할 수가 없었을 것이다. 실제로 이런 근골격계의 심한 만성 통증을 가진 환자들 중 상당수가 우울증을 가지고 있고, 그 중에 적지 않은 사람들이 통증 때문에 자살을 선택하기도 한다는 보고도 있다.

정상적인 일상생활이 어려울 정도로 많은 사람들을 괴롭히는 이러한 질환들은 보통 근막 통증 증후군, 섬유근통(섬유근육염), 골부착부병증, 근육염, 힘줄염 등의 진단명을 받게 되는데, 이러한 종류의 질환들은 정상적인 생활을 하면서 약간의 불편함을 느끼는 가벼운 정도에서부터 죽고 싶을 만큼 심한 통증까지 매우 폭넓은 다양한 경과를 보인다. 그 정확한 진단도 쉽지 않고, 그 호전과 악화 정도를 객관적으로 확인하기도 어려우며, 근본적인 완치 또한 매우 어려운 경우가 많다. 이론적으로야 충분한 휴식을 취하면서 바른 자세로 지내고, 병이 들고 약해진 부위가 건강하고 튼튼해지도록 하는 운동을 시기별로 적절하게 하고 지낸다면 좋아질 수 있다고 알려져 있지만, 이런 병이 생기는 사람들 대부분이 하고 있는 일 때문에 충분한 휴식을 취하는 것이 불가능하고 반복적으로 과사용할 수밖에 없는 경우

가 많으며, 이미 병증이 심하여 바른 자세를 취하거나 유지하는 것도 또 운동을 하는 것도 어렵거나 아예 불가능한 상태인 경우가 많다. 그리고 약물 요법과 일반적인 물리 치료만으로는 그 치료가 충분치 않아 좋은 효과를 기대하기가 어렵다.

근골격계 질환의 진단에 있어서 일반적으로 널리 시행되는 1차 검사인 엑스레이만으로는 보통 이러한 질환들의 정확한 진단이 쉽지 않다. 의사가 환자의 증상을 자세히 듣고 이러한 종류의 질환을 의심하는 것이 그 진단의 첫 걸음이며, 의심되는 진단을 확인하기 위해 세심한 이학적 검사와 함께 초음파 검사나 MRI 검사 같이 연부 조직을 자세히 관찰할 수 있는 검사들을 통해서 보다 정확한 진단이 가능하기는 하지만, 이러한 검사들을 추가적으로 시행하기 위해서는 시간과 비용이 추가된다. 그리고 이러한 질환들은 그 병증의 호전 또는 악화의 상세한 경과를 객관적으로 판단하기가 매우 어려우며, 그렇다 보니 기껏 효과가 있는 치료를 좀 받다가도, 환자 스스로 느끼기에 어느 정도 좋아졌다 싶으면 완전히 다 낫지 않은 상태에서 임의로 치료를 중단하여, 얼마 지나지 않아 다시 악화되는 일이 자주 발생한다.

충격과 치료는 이러한 환자들의 진단 및 경과 관찰, 그리고 치료 이 두 가지 모두에 획기적인 발전을 가지고 왔다.

이런 난치성 연부 조직의 질환을 가진 환자들에게 충격과 치료는 과거 어떤 치료보다도 근본적이고도 우수한 치료 효과를 보인다. 충격과 치료의 태동기에는 한 때 일시적 통증 완화의 수단인 아닐까 여겨지기도 하였으나, 이후 지속적인 연구 결과에 따르면 충격과 치료가 일시적인 통증 완화에 그치지 않고 근본적으로 이러한 연부 조직의 병증을 좋아지게 한다는 것을 알게 되었으며, 이제는 생체 내에서 충격과 치료 자극이 조직과 세포 수준에서 어떠한 변화를 일으키는지, 그 기전 또한 많이 알려지게 되었다. (이 부분에 대해 보다 상세한 정보가 궁금하신 분께서는 충격과 치료(1) 칼럼을 참고하시기를...) 이제는 정확한 진단하에 치료가 필요한 환부를 정확히 특정하여 적절한 조건으로 충격과 자

극을 가할 때, 일시적인 통증의 경감이 아니라 근본적인 완치를 기대할 수 있다는 것이 의학계에서 의심의 여지 없이 받아들여지고 있다.

전술한 바와 같이 이러한 질환을 정확히 진단하고, 그 병증의 정도를 객관적으로 평가한다는 것 자체가 어렵지만 충격과 치료는 여기에 있어서도 큰 도움을 준다. 의학 분야에서 이용하는 충격과 치료의 특성 중 환자가 자각할 수 있는, 생체 내에서 충격과에 의해 일어나는 변화를 가리키는 ‘바이오피드백(biofeedback)’이라는 현상이 있다. 환자에게 환부에 충격과 치료를 적용하였을 때 나타나는, 환자가 느낄 수 있는 자극을 말하는데 이는 보통 통증으로 나타난다. 충격과 치료를 받는 환자들은 치료가 필요한 환부에 충격과 자극을 받을 때 그 특유의 묘한 통증을 경험하게 되는데, 이러한 통증의 정도는 병증의 정도에 따라 정비례 관계로 다르게 나타난다. 물론 어떠한 자극에 대해 통증을 느끼는 정도는 사람마다 다르기 때문에, 똑같은 정도의 똑같은 질병을 가진 모든 환자들이 똑같은 세기의 충격과 자극에 대해 똑같은 정도의 통증을 느낀다고 할 수는 없고, 또 같은 환자에서도 그날그날 여러 가지 조건들에 따라 약간의 편차는 있을 수도 있지만, 이러한 충격과 자극에 의한 바이오피드백 현상은 근골격계 연부 조직 질환의 치료는 물론 진단과 경과 관찰에 있어서 매우 유용하다.

예를 들어, 목과 목덜미에 오랫동안 지속되어 온 심한 통증을 호소하는 환자가 내원했을 때, 엑스레이상에서 보통 ‘일자목’, ‘거북목’이라고 부르는 목뼈들의 배열 형태 변화를 볼 수 있는 경우가 많기는 하지만, 직접적으로 통증을 일으키는 주위 근육이나 힘줄의 이상을 엑스레이만으로 확인한다는 것은 거의 불가능하다. (엄밀히 말하면 오랜 기간 동안의 울혈 상태나 근육 실질 내 섬유소 조직의 증가 등에 의한 음영 변화를 관찰할 수 있기는 하지만, 이는 고도로 숙련되고 경험 많은 의사들에게나 가능한 일이기도 하고, 엑스레이 장비의 질적 차이나 얻은 영상을 처리하는 방사선 기사의 능력에 따라 큰 편차를 보일 수 있기 때문에 일반적으로 객관적 진단의 근거로는 받아들여지지 않는 경우가 많다.)

이럴 때 기존에는 세밀한 이학적 검사를 통해 근육띠(taut band)를 촉진하고, 손으로 눌러 자극을 가할 때 환자가 통증을 느끼는지 여부(압통), 통증 유발점(trigger point)을 확인하는 것이 일반적인 진찰 방법이었다. 그러나 이러한 진찰 방법은 그 병증의 정도를 객관화 및 정량화할 수는 없다는 것과, 이후에 그 현장에 있지 않았던 제3자에게 진단의 근거로 입증하기가 어렵다는 단점이 있다.(그림 1, 2)

이런 환자들의 진단 및 경과 관찰 과정에서 충격과 치료를 활용하는 것은 매우 유용하다. 쉽게 말하자면 병이 있는 부위에 충격과 자극을 가하면 환자가 심한 통증을 느끼지만, 바로 몇 mm만 옆으로 움직여도 정상적인 부위에서는 아무런 자극을 느끼지 않기 때문에, 질병의 존재 유무는 물론 치료가 필요한 병소를 매우 정확하게 찾을 수 있다. 또 병의 정도가 심한 부위는 아주 약한 강도의 충격과 치료 자극에도 심한 통증을 느끼지만, 병의 정도가 가벼운 부위는 약한 강도의 자극에 대해서는 통증을 느끼지 않고, 점점 강도를 높여 가다 보면 어느 정도 높은 강도의 자극에 대해서만 통증을 느끼기 때문에 병증의 호전 또는 악화 정도를 객관적으로 파악하기가 좋다. 즉 치료 초기 단계에서 환자의 병증 정도가 심할 때에는 아주 낮은 강도의 충격과 치료에 대해서도 심한 통증을 호소하지만, 적절한 주기로 치료를 반복하다 보면 몇 회 뒤부터는 최초 치료 시의 낮은 강도에 대해서는 아무런 자극을 느끼지 못하게 되기 때문에, 치료 강도를 올려 가면서 다시 자극이 느껴지는 강도에서 치료를 이어가게 되며, 치료가 완성될 무렵에는 대부분의 정상인 사람들이 견딜 수 있는 기준 강도의 충격과 치료 자극을 견딜 수 있게 되거나, 심지어는 전혀 자극을 느끼지 않게 되어 전에 어느 부위를 치료 했었는지 찾지 못하게 되는 경우도 있기 때문에, 병증의 호전 정도 및 완치를 객관적으로 관찰하는 것은 물론, 수치화 하여 기록을 남길 수 있다. 그리고 이러한 현상은 방사형 충격과 치료 장비보다는 초점이 잘 모아지는 좋은 초점형 충격과 치료 장비에서 보다 정확하게 관찰할 수 있다.

따라서 치료 초기의 병증이 심한 상태에서 충격과 치

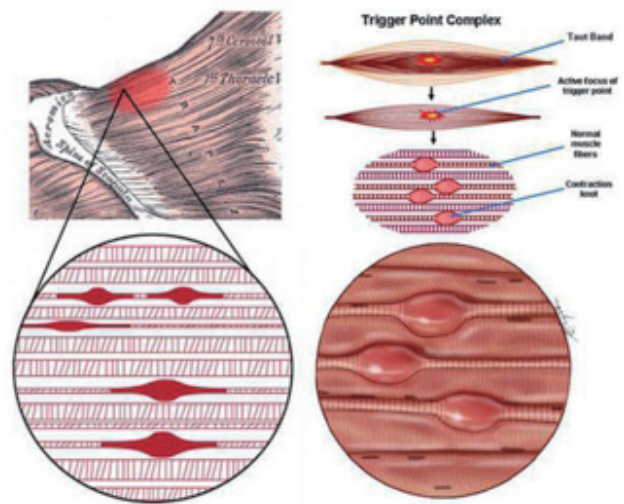


그림 1 Trigger point(통증 유발점) complex

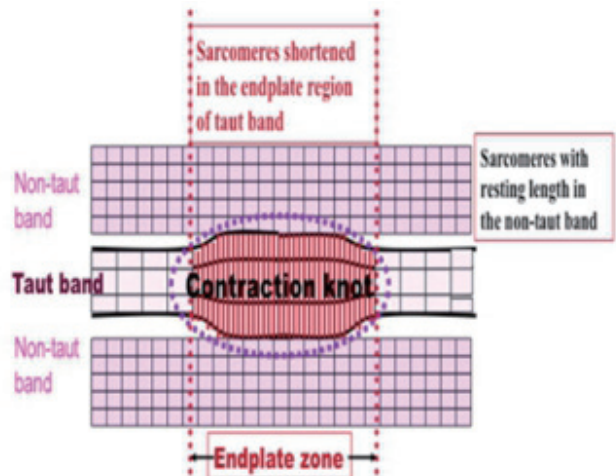


그림 2 근육띠(taut band)

료를 받는 환자들은 그 치료 과정에서 꽤 심한 통증을 견뎌야 한다는 문제가 생긴다. 필자의 병원에서 충격과 치료를 받은 환자들 중 어떤 사람은 이렇게까지 말하기도 했다. “일제시대 때 충격과 치료가 있었다면 우리나라는 해방 안 됐을 것 같아요. 잡아다가 충격과 치료로 고문하면서 물어보면 대답 안 하고 버티는 사람이 없었을 거예요!” 물론 치료가 목적이지만 환자를 괴롭히는 게 목적은 아니기 때문에, 환자가 견딜 수 있는 정도로 치료 강도를 조절한다든지, 치료가 필요한 환부에만 고정해서 집중적으로 치료를 실시하지 않고 그 주변부부터 선형 또는 원형으로 왔다갔다하면서 핵심 병소에 접근

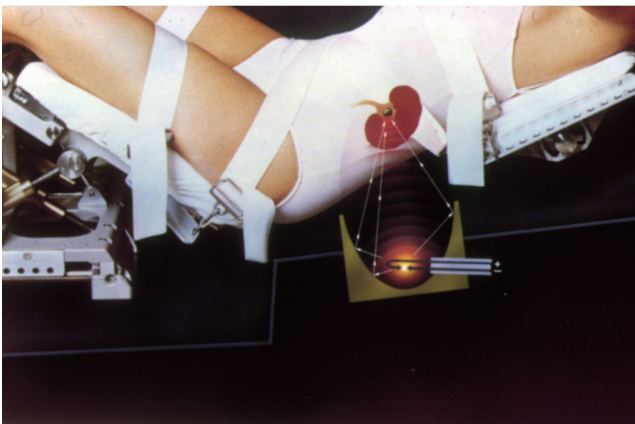
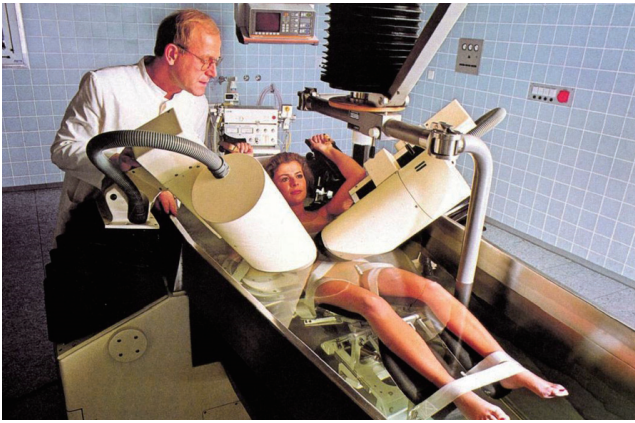


그림 3 최초의 충격파 치료

한다든지 하는 방법으로 환자의 고통을 경감시키고 치료를 하는 방법을 사용하고 있다.

충격파 치료의 태동기에 충격파쇄석기(ESWL: Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy)를 근골격계 치료에 직접 적용했을 때에는 그 강도가 지금의 근골격계 치료 장비보다 훨씬 더 세기도 했고, 또 손에 들고 움직이면서 하는 것이 아니라 거대한 치료 장비에



그림 4 최신 충격파 치료 장비

환자의 환부를 고정하고 한 부분만 집중적으로 치료하는 방식이었기에 상기한 방법으로 환자의 통증을 경감시킬 수가 없었다(그림 3). 따라서 그 시기에 충격파 치료를 받는 환자들은 그 통증이 상상을 초월할 정도로 엄청났을 것이어서, 당시에는 충격파 치료를 하기 전에 마취를 하고서 실시했다고 한다. 다행히 충격파 치료에 대한 연구가 지속되면서, 근골격계 질환 치료에는 충격파쇄석기와 같이 높은 에너지의 치료는 필요하지 않으며, 오히려 과도한 높은 에너지의 충격파 자극은 조직 손상을 유발할 수도 있다는 사실이 밝혀져, 현재 근골격계 치료에 사용되고 있는 충격파 치료 장비들은 충격파쇄석기의 1/10~1/3 정도 수준의 충격파 에너지를 낸다. 또 장비가 소형화되고, 매질로 물을 사용하지 않고 초음파 젤을 사용하게 되면서 환자도, 또 치료자도 편안하고 다양한 자세로 보다 편리하게, 치료 받는 환자의 고통을 경감시키면서 치료할 수 있게 되었다.(그림 4)

충격파 치료(3)

김 세 현 린클리닉 원장(가정의학과 전문의)/대한충격파치료학회 부회장 | e-mail : lyhnstory@naver.com

3. 메카노트랜스덕션과 텐세그리티

지난 이용범 교수와 이호원 교수의 칼럼(충격파 치료의 역사와 원리)에서 국제체외충격파치료학회(ISMST)가 정리한 9가지 충격파의 인체 내 치료 메커니즘이 소개된 바 있다. 강한 에너지의 충격파로 직접적인 물리적 파괴 효과를 이용하는 결석 파쇄술을 제외하곤 현재 가장 널리 사용되고 있는 저강도의 체외 충격파를 이용한 근골격계 치료 분야에서는 아직도 치료 메커니즘이 완전하게 밝혀져 있지 않다. 하지만 기본적인 질문은 ‘어떻게 충격파라는 물리적 자극이 체내에 가해졌을 때 생체조직에서 조직의 복구와 관련된 생체 활동이 시작되는가?’라고 할 수 있다. 이에 대해 현재 가장 타당한 설명을 제공하는 이론은 메카노트랜스덕션(Mechanotransduction)이다. 메카노트랜스덕션이란, 세포가 주변의 물리적 신호(자극)를 감지하여 세포가 전기적, 화학적 활동을 하게 되는 것을 말한다. 세포에 가해진 물리적 혹은 기계적(mechano) 자극이 전기적 화학적 활동으로 전환(transduction)된다는 관점에서 붙여진 이름이다.

오랜 기간 동안 현대 의학의 생리학은 세포의 활동을 생화학적 반응으로만 설명해 왔다. 세포에 특정한 화학물질(receptor)을 감지하는 수용기가 있고, 이를 감지하여 특정한 활동을 시작한다는 것이다. 그러나 세포에 기계적 혹은 물리적 자극(압축 혹은 인장력의 변화)에



그림 1 체외 충격파를 이용해 치료하는 모습. 환자 피부에 충격파 발생기를 접촉하여 체외 충격파를 체내 조직으로 전달한다.

대한 수용기가 있고, 이를 통해 특정 활동이 촉발된다는 것이 밝혀진 것은 비교적 최근의 일이다. 이와 같은 활동을 연구하는 분야를 생물물리학(biophysics)이나 메카노바이올로지(mechanobiology)라고 하는데, 아직 이 분야는 걸음마 단계이다. 그도 그럴 것이 세포로 전달되는 물리적 자극은 세포 간 물리적 연결을 이루고 있는 구조 체계를 통해 전달되는데, 이러한 구조 체계인 세포 외 기질(ECM: Extra Cellular Matrix)에 대한 연구가 진행된 것이 불과 40년이 되지 않았기 때문이

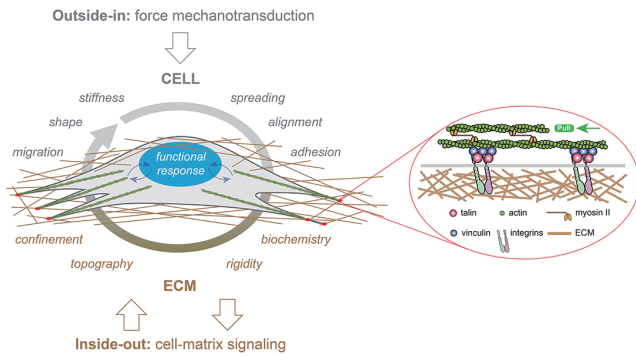


그림 2 세포에서의 메카노트랜스덕션(출처: D. Mohammed et al., <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00162>)

다. 그리고 메카노트랜스덕션에 대한 연구가 진행된 지는 20년도 되지 않았다.

근골격계 질환 등에서 조직 복구를 목표로 하는 체외 충격과 치료의 메커니즘을 메카노트랜스덕션으로 설명하자면 비교적 약한 충격과를 몸밖(체외)에서 인체 조직 내에 전달하여, 충격과의 물리적 자극이 세포의 특정 활동(조직 복구 등)을 촉발시키는 것이라고 할 수 있다. 물론 메카노트랜스덕션의 이론을 바탕으로 체외 충격과 치료가 시도되고, 시작된 것은 아니다. 메카노트랜스덕션에 대한 연구가 시작된 시점은 인체의 근육이나 건 등 연부 조직에 체외 충격과 치료를 적용해보기 시작한 시점(1990년대)보다 늦다. 그러나 메카노트랜스덕션의 발견은 임상적으로 치료 효과가 있는 것은 밝혀졌지만 그 치료 메커니즘을 온전히 설명할 수 없었던 체외 충격과 치료에 훌륭한 이론적 배경을 제공하게 되었다.

이러한 물리적 자극이 세포로 전달되는 과정은 세포의 내외로 물리적으로 연결된 구조를 통해 이루어진다. 인체 조직의 세포는 인테그린이라는 수용기를 통해 연결한 세포끼리 직접 부착되거나 그렇지 않은 경우 세포 밖의 콜라겐 섬유들과 부착된다. 세포 안에서는 세포 골격을 이루는 단백질들이 인테그린에 연결되어 세포 내외로 단백질 섬유들이 연결된 형태를 갖는다. 이와 같은 단백질 섬유소들의 연결을 통해 세포 밖의 물리적 자극(잡아당김, 압박, 진동)은 여러 세포에 걸쳐 세포 안으로 전달된다. 이와 같은 세포와 생체조직의 물리적 구조가 밝혀진 것은 비교적 최근으로, 불과 수십 년 전

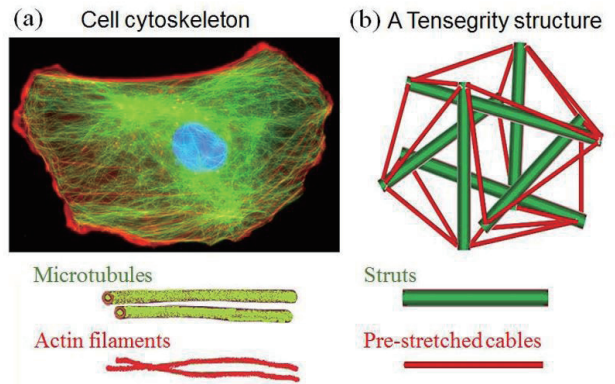


그림 3 세포 골격의 텐세그리티

까지만 해도 의학 교과서에서는 전혀 다른 모습을 상상한 그림이 등장해 있었다. 세포의 모습은 세포액이 가득찬 자루이고, 세포핵과 세포 소기관이 그 안에 둥둥 떠 있는 모습으로 상상되었고, 세포 밖에는 세포 외 기질을 이루는 콜라겐 섬유들이 세포와는 연결되지 않은 채 존재하는 것으로 묘사되었다.

세포 내 소기관, 그리고 세포들은 단순히 단백질 섬유에 의해 서로 연결된 것이 아니라 이 섬유소들이 일정한 인장력을 유지하고 있는 상태, 즉 텐세그리티(tensegrity) 구조를 이룬다. 세포 내외의 구조가 텐세그리티 구조로 되어 있다는 것은 1998년 메카노트랜스덕션 연구의 선구자인 도널드 잉그버(Donald Ingber)가 제시한 개념이다. 텐세그리티는 본래 1950년대 건축구조공학자 버킨스터 풀러(Buckminster Fuller)가 정립한 건축 구조 개념으로서, 모든 부재를 압축력과 휨 모멘트에 저항할 수 있는 압축재, 그리고 인장력에 저항하는 인장재로 나누고, 불연속적인 압축재를 연속적인 인장재 네트워크로 연결하여 지지하는 구조를 말한다. 모든 요소들이 인장력에 의해 팽팽하게 연결되어 있으므로, 한 요소에 가해진 힘은 모든 요소로 전달되어 영향을 미치는 것이 특징이며, 지엽적인 손상이나 불균형은 곧바로 전체 구조의 손상이나 변형의 결과를 가져온다. 텐세그리티에서 중요한 점은 모든 요소가 '팽팽하게 당겨진 상태로 연결'되어 있어야 한다는 점이다. 이 같은 연결 상태에서 물리적 힘은 각 요소에서 요소로 바로 전달된다.

잉그버는 ECM의 콜라겐을 비롯한 단백질들이 세포막의 인테그린(focal adhesion)을 통해 세포 내 세포골격과 연결되고 이것이 다시 핵막을 거쳐 세포핵 안으로 연결되어 있는 모습을 텐세그리티 모델로 설명한 것이다. (참고로 우리 몸을 거시적으로 보았을 때에도 텐세그리티 구조로 설명할 수 있다. 뼈가 압축재 역할을 하고 근육과 힘줄, 근막 등 결합 조직이 인장재 역할을 하는 텐세그리티 구조이다.) 텐세그리티의 인장력 네트워크를 통해 세포 밖에서 발생한 물리적 힘이 세포 내 여러 곳으로 전달되고, 또 여러 세포에 걸쳐 전달되는 것이다. 메카노트랜스덕션을 통해 세포는 물리적인 자극을 생화학적 변화나 RNA 전사로 변환시킬 수 있다. 이 신호 변환 과정은 ECM의 단백질 분자, 세포막, 세포골격, 핵막을 거쳐 종국에는 핵 염색질의 유전적, 후성적 레벨에 영향을 미친다. 실제로 세포는 인테그린을 통해 주변의 ECM 섬유들과 연결되어 적당한 인장력을 감지하지 못하면 정상적인 활동을 하지 못하는 것으로 밝혀졌으며 세포의 부착, 이동, 변환, 사멸 등에 이와 같은 인장력 감지는 중요한 역할을 한다.

특히 상처 복구 과정에서 중요한 역할을 하는 섬유모세포는 이와 같은 인장력 네트워크를 통해 주변 상황을 파악하고 활동한다. 주변 섬유가 섬유모세포를 과하게 잡아당기면 저항해야 할 압력이 신체에 가해지고 있다는 신호로 간주하고, 반대로 잡아당기는 인장력이 상실되면 상처의 발생, 즉 조직이 파괴되었다는 신호로 보는 것이다. 상처 치유에서 핵심적인 단계는 섬유모세포가 근섬유모세포로 활성화되는 것이다. 이 표현형 변환을 FMT(Fibroblast-to-Myofibroblast Transition)라고 한다. 근섬유모세포로 변환되면 세포 내에 인장력을 발생시키는 액틴 섬유들이 활성화되어 세포 주변 섬유들을 잡아당긴다. 이러한 세포의 움직임들이 모여 열려진 상처가 아물게 되는 것이다. FMT를 유도하는 것들로는 체액적(humoral) 자극, 특히 성장 인자인 TGF- β 가 섬유모세포의 표현형 변환에 있어서 핵심적인 역할을 한다고 믿어져 왔다. 최근에는 물리적인 자

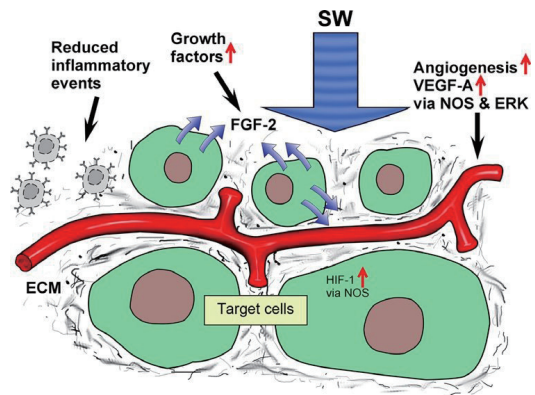


그림 4 체외 충격파가 메카노트랜스덕션을 통해 세포와 ECM에 작용한 결과(출처: T. Hausner and A. Nogradi, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420045-6.00003-1>)

극 또한 FMT에 있어서 핵심적인 역할을 하고 있음이 밝혀졌다. 몇몇 생체외(in-vitro) 연구는 콜라겐 젤의 서로 다른 물리적 성질에 의해 만들어진 세포 주위의 물리적 스트레스가 섬유모세포의 표현형 변환과 세포의 운명을 조정하는 요소임을 보여주었다.

몸의 힘줄을 이루는 건세포도 세포에 가해진 물리적(기계적) 자극에 대해 TGF- β 와 같은 성장 인자의 발현을 증가시킬 수 있다. 체외 충격파 치료가 상처 복구에 핵심적인 TGF- β 나 IGF-I과 같은 성장 인자의 증가를 가져온다는 연구 결과가 있다. 아직 체외 충격파가 왜 이 같은 성장 인자 발현의 증가를 가져오는지에 대해서 확정적으로 이야기하기에는 과학적 연구 결과가 미흡하지만, 신체 조직에 가해진 체외 충격파의 물리적 충격이 ECM의 섬유소들에 전달되고 다시 텐세그리티 구조를 통해 세포로 전달되어 세포의 활동을 촉발하는 것이라는 추론에 무게를 두는 것에는 충분한 근거가 있는 것이다.

체외 충격파 치료의 시작은 우연한 발견을 통해 시작된 것이지만 그 치료 메커니즘을 설명하는 것은 메카노트랜스덕션, ECM, 텐세그리티 등 가장 최선의 생리학적, 해부학적 개념이 동원되어야 가능한, 어찌 보면 가장 첨단 치료 방법이라고도 할 수 있겠다.

충격파 치료(4)

조윤수 한림대학교 한강성심병원 재활의학과 조교수 | e-mail : hamays@hanmail.net

4. 화상 흉터 후유증에 충격파 치료의 적용

1) 화상 흉터의 비후성 증식

화상 흉터의 비후성 증식은 화상 수상 후 흔한 합병증 중 하나로서 정확한 기전은 알려져 있지 않으나, 상처 치유와 반흔 성숙 과정이 비정상적으로 지속됨으로써 야기되는 흉터 조직의 병리학적인 증식으로 정의된다. 과도한 세포 외 기질 침착을 동반하여 흉터 두께 증가와 흉터 피부 탄력을 감소시킬 뿐 아니라 화상 환자들의 지속적인 흉터 통증 및 소양감의 원인이 되고 있다. 또한, 관절 부위의 비후성 흉터는 관절 운동 범위를 감소시켜 재활 치료 과정에서 일상생활 동작 및 보행에 어려움을 초래하는 중요한 요인이 된다(그림 1). 화상 환자들의 비후성 반흔을 치료하기 위해 압박옷, 실리콘 겔, 흉터 마사지, 레이저 치료, 병변 내 주사, 수술적 제거 등 다양한 치료 방법들이 복합적으로 임상에서 함께 시행되고 있다. 하지만 이런 다양한 방법들을 시행하고 있음에도 불구하고 흉터 증식이 지속적으로 진행될 뿐 아니라, 흉터 두께 감소와 증식 억제를 목적으로 병변 내 주사 치료에 사용되는 스테로이드는 전신 부작용을 동반할 위험이 있어 국소적 흉터에 제한적으로만 사용되고 있다.

2012년 Fioramonit에 의해 화상 흉터에 초점형 체외 충격파 치료를 적용하여 비후성 증식 억제에 효과가



그림 1 화상 흉터의 비후성 증식 과정

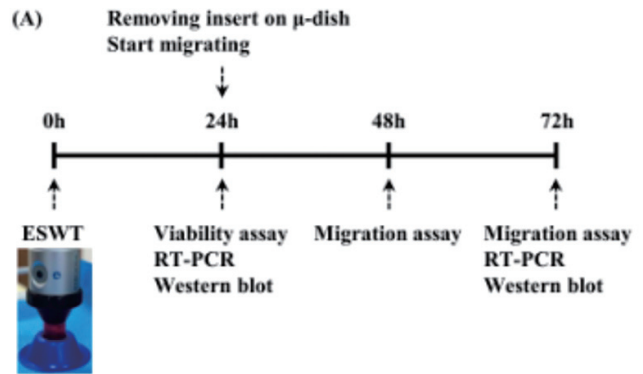


그림 2 초점형 체외 충격파의 화상 흉터 유래 섬유 아세포 적용 실험 개략도

보였음이 처음 보고된 후, 화상 환자의 흉터에 체외 충격파 치료가 흉터 두께 감소와 성상의 호전을 보였다는 연구 발표가 이어지고 있다. 한림대 한강성심병원 화상 연구소에서는 비후성 화상 흉터 유래 섬유 아세포에 초점형 체외 충격파를 적용하여 흉터 증식에 관여하는 배

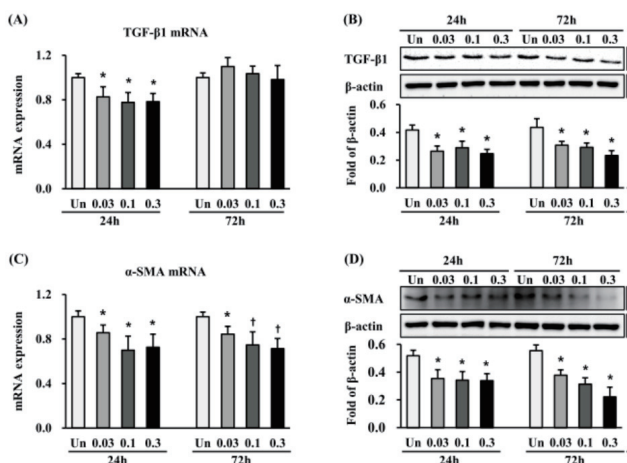


그림 3 화상 흉터 유리 섬유 아세포에서 TGF-1과 SMA의 발현 감소를 야기하는 체외 충격파 치료



그림 4 아래팔의 화상 흉터 통증에 초점형 충격파 치료 적용

타1 전환 성장 인자(transforming growth factor; TGF-β1)와 알파 평활근 액틴(α-smooth muscle actin)의 유전자 발현 감소를 통해 화상 흉터의 비후성 증식 억제 작용을 하고 있음을 보여 주었다. (그림 2, 3)

2) 화상 흉터 통증 및 가려움증

많은 화상 환자들이 상처가 나 후 재활 치료 기간 중에도 지속되는 흉터 통증과 가려움증으로 고통을 받고 있으며 적절히 조절되지 못한 통증 및 가려움증은 1년 이상 지속되어 만성 통증과 가려움증을 야기하게 된다. 화상 환자의 82%에서 찌르는 듯한 통증을 호소한다고 알려져 있으며, 1년 이상 경과한 화상 환자의 36.5%에서 통증을 호소하였다. 또한, 화상 상처가 나 온 환자의 87%에서 가려움증 발생이 보고되었고 만성 가려움증은 최대 2년 동안 지속될 수 있다고 알려져 있다. 통증과 가려움증 조절을 위해 현재 마약성 진통제, 항히스타민제, 항정신병 약물 등의 약물 복용법이 가장 흔히 사용되고 있으나, 약물 치료는 과잉, 의존, 부작용 등의 합병증을 야기할 수 있어 비약물적인 보조 요법들의 병용 치료가 권장되고 있다.

본원에서 시행한 화상 흉터 통증을 대상으로 한 체외 충격파 치료 효과에 대한 환자 대조군 연구에서 초점형

충격파 치료를 시행받은 환자군에서 숫자 통증 점수, 통증 역치의 유의한 감소를 보여 주었다(그림 4). 또한, 동일한 연구 디자인으로 화상 흉터 가려움증 환자에게 초점형 충격파 치료를 시행하여 가려움 숫자 평가 점수, 5D 가려움 점수, Leuven 가려움 점수의 유의한 감소가 관찰되었다.

충격파 치료는 말초 피부 반흔의 통각 수용기를 억제하여 통증에 대한 중심성 민감화를 막고 후근 신경절에서의 물질 P의 합성을 감소시켜 신경 세포의 과흥분을 억제하여 화상 환자의 흉터 통증을 감소시켰을 것으로 여겨진다. 또한 만성 염증을 일으키는 히스타민, 프로스타글라딘, 아세틸콜린, 인터루킨과 같은 물질의 유리를 감소시키고 흉터 주위 혈류를 증가시켜 가려움증을 감소시킬 수 있다.

3) 화상 흉터 후유증에 충격파 치료 적용의 의미

초점형 체외 충격파 치료는 화상 상처가 다 나 온 후 야기되는 흉터의 비후성 증식, 흉터 통증, 가려움증 치료를 위한 비침습적이며 효과적인 새로운 치료 방법으로서 임상적 유용성을 가진다. 향후 수술이나 타박상 등 다양한 흉터에 적용해볼 수 있을 것으로 기대된다.