

전기 수술용 모노폴라 전극의 코팅 구조에 따른 절단 메커니즘 특성 연구

허준호¹, 최보환², 이은수¹
 한양대학교 ERICA¹, CRESEN²

A Study on the Cutting Mechanism Characteristics of Monopolar Electrosurgical Electrode Based on Coating Structures

Junho Heo¹, Bohwan Choi² and Eunsoo Lee¹
 Hanyang University ERICA¹, CRESEN²

ABSTRACT

본 연구에서는 전기 수술용 모노폴라 전극의 코팅 구조에 따른 절삭력, 조직 들러붙음, 및 열 손상 특성을 분석하였다. 전기 수술용 전극의 에너지 전달 방식은 유전 가열, 스파크 가열, 전도 가열로 구분되며, 2종의 Advanced Energy Blade 제품의 가열 방식에 따른 전자기 특성을 비교하였다. FEM 모델링 및 시뮬레이션을 통해 코팅 구조가 다른 두 전극의 조직 가열 특성을 검증하였으며, 그 결과 인선부가 절연된 전극은 수술 후 절개 조직의 빠른 회복을 위해 낮은 열 손상과 높은 절삭력 특성 간의 Trade-off 설계를 취하였으나, 인선부가 노출된 전극은 절삭력을 높이기 위하여 조직의 높은 열 손상을 감수하는 것을 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다.

는 돼지 등심을 실험 조직으로 선정하였다. 또한 400kHz 주파수의 제너레이터와 10~50W의 전력 설정을 사용하여 돼지고기를 여러 차례 절단하였고, 그 결과는 그림 2에 나타나 있다. Photonblade는 우수한 절삭 성능을 보였으나, 20W 이상의 전력을 사용할 경우 조직이 손상되고 연기가 많이 발생하였다. 반면, Duoblade는 저전력 구간에서 Photonblade 보다 낮은 절삭력을 가지나 50W 절개 시에도 육안으로 확인할 수 있는 조직 열 손상이 거의 없었다.

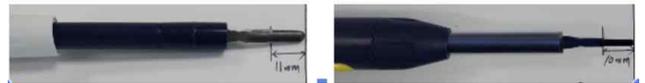


그림 1 Duoblade (좌) 및 Photonblade (우)
 Fig. 1 Duoblade (left) and Photonblade (right)

1. 서 론

전기수술기는 고주파 전류를 사용하여 조직을 절개(Cutting)하거나 응고(Coagulation)하는 동안 짧은 스파크나 고온을 생성함으로써 출혈 없이 수술을 수행할 수 있는 핵심적인 의료 도구로, 전 세계 의료 분야에서 널리 활용되고 있다 [1]-[2]. 그러나 전기수술기 사용으로 인해 발생하는 몇 가지 주요 단점이 있는데 대표적으로, 열적 손상, 조직 들러붙음, 그리고 절개 부위에서 발생하는 연기가 그 문제로 지적된다. 기존 연구에 따르면, Teflon, Glass, Nanostructured Coating과 같은 절연 물질을 전극 표면에 코팅할 경우, 이러한 단점들이 크게 개선될 수 있으며, 특히 조직 들러붙음과 열적 손상이 현저히 줄어드는 효과가 있다 [3]. 이에 따라 현재 상용화된 Monopolar 제품 중 Advanced Energy Blade 전극 제품군은 각자 고유의 형상 및 코팅 구조로 설계되어 있다. 본 연구에서는 코팅 구조가 서로 다른 두 종류의 Advanced Energy Blade 전극을 대상으로 실험과 FEM 기반 모델링 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 각 전극의 전자기적 특성을 검증하고, 코팅 구조에 따른 전극의 절삭 메커니즘을 분석하였다.

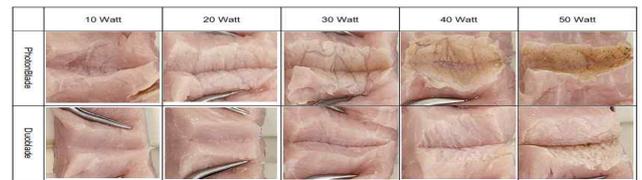


그림 2 Duoblade와 Photonblade를 사용한 등심 절단의 예
 Fig. 2 Pork cutting results by two different blades

2.2 전극 코팅 구조에 따른 전자기적 특성 비교

전기수술기의 절삭 메커니즘은 전도 전류를 통해 조직에 직접 전류를 전달해 발생한 저항열로 절단하거나, 고주파를 이용한 변위 전류로 전기장을 형성해 비접촉 상태에서 절단과 지혈을 동시에 수행하는 방식으로 구분된다 [4]. Duoblade의 경우 인선부에도 절연 코팅 처리가 되어있으므로 변위 전류를 통한 절삭법을, Photonblade의 경우는 코팅이 없는 인선부를 사용하여 전도 전류를 통한 절삭을 수행한다.

2. 코팅 구조에 따른 Monopolar 전극 특성 분석

2.1 전극 코팅 구조에 따른 성능 비교

본 실험에서 사용된 2종의 전극은 그림 1에 나타나 있다. CRESEN사의 Duoblade 및 Stryker사의 Photonblade는 범용 제너레이터와 호환 가능한 Advanced Energy Blade 제품으로, 각 제품 모두 약 10μm 수준의 인선부 두께를 가지는 금속 전극 및 절연체로 구성되어 있다. 절삭 성능 검증을 위해 인체 근육의 상대 유전율(50)과 유사한 55 수준의 상대 유전율을 갖

Energy delivery mechanism	Operation principle	Effect	Duoblade	Photonblade
Dielectric Heating	Vibration of polar molecules (water) inside tissues due to high-frequency AC electric fields causes friction loss.	Heating occurs only while the tissue contains polar molecules, and since heating stops once intracellular liquid evaporates (causing the cell membrane to rupture), max temperature is maintained within 100°C.	⊙	⊙
Electronic avalanche	Sparks (light), sound (ticking), and heat (over several hundred degrees) are generated as a result of insulation breakdown (causing Plasma) which occurs when a high voltage conductor approaches tissue.	Very high but localized energy heats up tissue at uncontrollable spots (over several hundreds °C).	⊙	⊙
Resistive Heating	Ohmic loss (square of current x contact resistance) that occurs at the contact surface when a conductor makes direct contact with tissue.	Excessive temperature rise at both tissue and blade where they share a contact surface which leads thermal damage to the tissue at incision.	-	⊙

표 1 전기수술용 전극의 절삭 메커니즘
 Table 1 The cutting mechanism of electrosurgical electrode.

이를 검증하기 위해, 간 조직에 전기수술기 전극을 5mm 삽

입한 상황을 가정하여 2D FEM 모델링을 표 2의 조건에 따라 수행하였다. 결과는 그림 3과 4에 제시된 전기장(E-field), 전류 밀도(J), 전기 변위 벡터(D)의 그래프와 분포도를 통해 확인할 수 있다. 인선부가 절연된 Duoblade의 전기 변위 벡터(D) 그래프는 E-field 결과와 유사하게 나타났으며, 이는 이 블레이드가 주로 변위 전류를 이용해 절삭을 수행함을 시사한다. 반면, 코팅되지 않은 Photonblade는 E-field, 전류 밀도(J), 전기 변위 벡터(D) 그래프에서 모두 유사한 패턴을 보였으며, 이는 이 블레이드가 변위 전류와 전도 전류를 모두 활용하는 절삭 메커니즘을 갖고 있음을 보여준다. 추가로, Duoblade는 측면에 비해 인선부에서 E-field가 약 2배 더 강하게 나타난 반면, Photonblade는 약 4배의 차이를 보였다. 이러한 결과는 절삭 성능 측면에서 Photonblade가 더 우수하지만, 낮은 절개 온도 및 측면부 혈관의 지혈 측면에서는 Duoblade가 더 유리할 수 있음을 시사하며, 이는 그림 2의 실험 결과와도 일치한다.

Material	Relative permittivity	Bulk conductivity
Carboned-skin	10.0	1.00E-01
Liver	3288.8	1.36E-01
Blood	4445.2	7.34E-01

표 2 2D 시뮬레이션에 사용된 인체 조직의 상대 유전율 및 체적 전도도 (400 kHz에서 측정)
Table 2 Relative permittivity and bulk conductivity of materials used in 2D simulations (measured at 400 kHz)

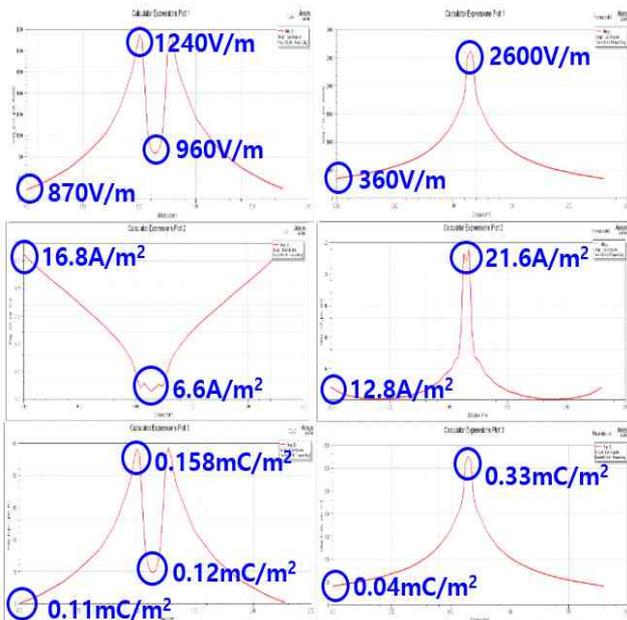
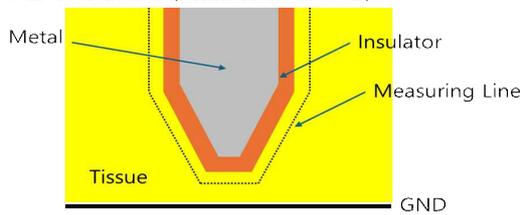


그림 3 Duoblade (좌) 및 Photonblade (우)의 전기장(E-field), 전류 밀도(J), 전기변위벡터(D) 특성 결과
Fig. 3 Results of Electric Field(E-field), Current Density(J) and Electric Displacement Vector(D) for Duoblade (left) and Photonblade (right)

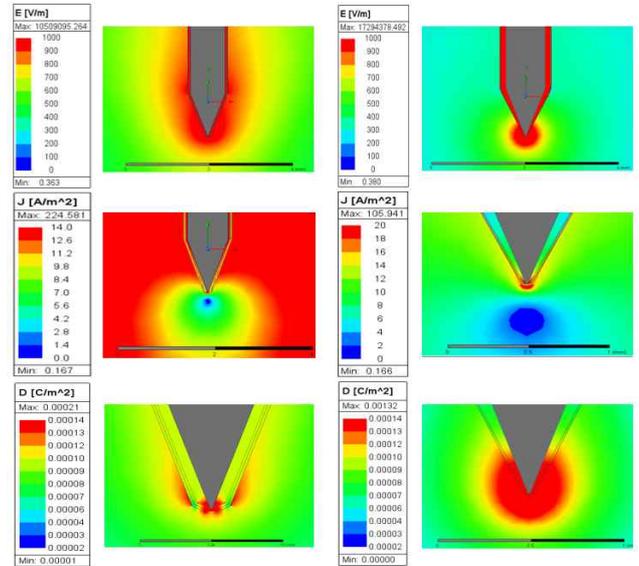


그림 4 Duoblade (좌) 및 Photonblade (우)의 전기장(E-field), 전류 밀도(J), 전기변위벡터(D) 분포도
Fig. 4 Distribution of electric field (E-field), current density (J), and electric displacement vector(D) of Duoblade (left) and Photonblade (right)

3. 결론

본 연구에서는 전기수술용 모노폴라 전극의 코팅 구조가 절삭 메커니즘과 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 실험과 FEM 모델링 결과를 통해, 인선부가 절연된 Duoblade는 주로 변위 전류를 통한 절삭이 이루어졌으며, 열 손상이 적고 조직 들러붙음이 감소하여 봉합 속도 개선에 유리함을 확인하였다. 반면, 인선부가 노출된 Photonblade는 전도 전류에 의한 절삭을 주로 수행하였으며, 우수한 절삭력을 가지나 저출력에서도 열 손상과 조직 손상, 연기 발생 현상이 나타나는 특성을 보였다. 이는 전극의 절연 구조가 수술 특성 및 이후 회복에 중대한 영향을 미친다는 것을 보여준다. Duoblade는 정밀한 절개와 조직 보호가 필요한 수술에 적합하며, Photonblade는 빠른 절삭이 요구되는 상황에서 유리할 수 있다. 따라서 수술의 목적에 따라 적절한 절연 구조의 전극을 선택하는 것이 중요하다. 향후 수술 목적 및 지향점에 따른 전극의 코팅 재료와 형상을 최적화 하는 방안에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] Liang Zheng et al., "Effect of high-frequency electric field on the tissue sticking of minimally invasive electrosurgical devices," Royal Society Open Science, vol. 5, no. 7, pp. 1-12, July 2018.
- [2] Caiying Zhou et al., "Adhesion Behavior of Textured Electrosurgical Electrode in an Electric Cutting Process," Coatings, vol. 10, no. 6, pp. 1-13, June 2020.
- [3] Keng-Liang Ou et al., "Biomedical nanostructured coating for minimally invasive surgery devices applications: characterization, cell cytotoxicity evaluation and an animal study in rat," Surg Endosc vol. 28, no. 7, pp. 2174-2188, July 2014.
- [4] W Karaki et al., "Waveform-dependent electrosurgical effects on soft hydrated tissues", Journal of Biomechanical Engineering, vol. 141, Issue 5, May 2019.