

제세동기의 최적파형 발생을 위한 회로 파라미터에 관한 연구

김택수*, *박상희, **고한우

* 연세대학교 전기공학과, ** 한국표준과학연구원

A Study on the Circuit Parameter for the Optimum Waveform of Defibrillator

Taek-Soo Kim*, *Sang-Hui Park, **Han-Woo Go

* Dept. of Elec. Eng. Yonsei Univ., **Korea Research Institute of Standards and Science

=Abstract=

In designing defibrillator several points must be considered such as patient's transthoracic impedance, output energy level, peak current, time duration of current waveform. Patient's transthoracic impedance depends on patient respectively and the health condition of patient.

In this study, before the hardware implementation of defibrillator we determine the range of parameter values of circuit elements to derive optimal discharge waveform by predicting and analyzing the performance of designed circuit.

1. 서론

심장은 생체내에서 전기적으로 제어되는 기계적인 펌프이다. 심장마비가 진행되는 동안 심장의 근육운동은 정상적인 주기 수축운동에서 심실세동(ventricular fibrillation)으로 알려진 발작적인 필립으로 악화된다. 제세동(defibrillation)이란 이러한 심실세동을 제거할 목적으로 축적된 에너지를 고전압의 펄스로서 환자의 흉부위에서 심장에 간접적으로 또는 개흉(開胸)하여 노출시킨 심장에 직접 방전하는 것을 의미한다.

제세동기를 설계하는 데는 환자의 흉부저항, 출력 에너지 레벨, 피크전류의 크기, 전류파형의 시간폭(time duration)등 여러 가지 고려하여야 할 점들이 있다. 환자의 흉부저항은 환자 개인에 따라, 환자의 건강상태에 따라 가변적이므로 제세동기를 위하여 흉부에 전기적 자극을 가할 때 피크 전류에 결정하는 중요한 변수가 된다. 따라서 전기자극을 가하기 전에 흉부저항에 대한 정확한 측정이 요구된다. 또한 출력 에너지 레벨, 피크 전류, 전류의 시간폭은 제세동기의 성공을 결정 짓는 파라미터들이다. 따라서 제세동기를 위하여 필요한 최소의 출력 에너지, 피크 전류, 전류 시간폭 등에 대한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 제세동기의 하드웨어를 구현하기 이전에 심장의 세동을 제거하기 위하여 필요한 에너지 레벨, 전류의 크기 및 경흉부 저항과 이들과의 관계를 규정하고 설계된 회로의 성능을 예측하고 분석하여 최적의 방전파형을 얻기 위한 회로소자의 매개변수 값의 범위를 결정하고자 한다.

2. 제세동기의 세동제거 원리

제세동기에는 인덕터내에 저장된 에너지를 이용하는 전류형 제세동기와 커패시터에 충전된 전류의 흐름을 이용하는 전압형 제세동기로 구분할 수 있는데 본 연구에서는 주로 전압형 제세동기의 파라미터에 따른 성능분석을 하였다.

전압형 제세동기는 축전지에 충전된 전하의 방전으로부터 발생하는 감쇠형 사인파(damped sine wave)를 세동제거에 사용한다. 그림 1은 전압형 제세동기의 회로도이다.

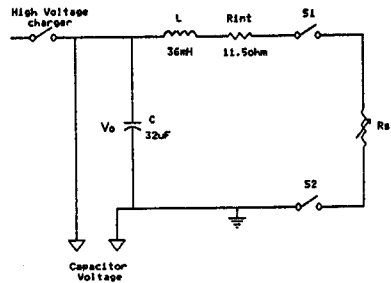


그림 1 전압형 제세동기의 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of Voltage-controlled Defibrillator

축전지에는 미리 설정된 에너지 E_S 가 저장된다. 방전파형은 제세동기 회로의 변수 즉, 정전용량 C, 인덕턴스 L 그리고 내부저항 R_{int} 과 제세동기의 폐쇄에 걸리는 외부저항 R_{ext} 에 의해 결정된다. 외부저항은 환자의 경흉부 임피던스(transthoracic impedance)에 해당한다. 환자의 경흉부 임피던스는 상당히 넓은 범위로 변하기 때문에 제세동기의 효율에 영향을 크게 끼치게 된다. 따라서 작동자는 세동제거를 위하여 전기적 충격을 환자에게 가하기 전에 경흉부 임피던스를 정확히 측정할 필요가 있다[1].

한편, 저장된 에너지 E_S 와 제세동기 회로 변수(정전용량 C, 인덕턴스 L, 그리고 내부저항 R_{int})를 안다면 환자의 경흉부 임피던스와 전달되는 에너지는 최대 방전전류 I_m 으로부터 직접 결정될 수 있다. 피크전류는 식 (1)과 같이 일반적인 형태로 표현할 수 있다.

$$I_m = f(E_S, R, L, C) \quad (1)$$

식 (1)에서 R은 회로의 전체저항 즉,

$$R = R_{int} + R_{ext} \quad (2)$$

이다.

피크전류 I_m 는 충전된 에너지 E_S 의 제곱근에 비례한다는 사실은 간단한 회로 방정식으로 부터 얻을 수 있다. 따라서 식 (1)은 식 (3)과 같이 입력 에너지와 피크전류의 관계식으로 쓸 수 있다.

$$I_m = (\sqrt{E_S}) * f \cdot [(R_{int} + R_{ext}), L, C] \quad (3)$$

따라서 피크전류의 크기는 입력 에너지와 R, L, C 파라미터에 따라 결정된다.

3. 최적파형을 위한 조건

3.1 입력 에너지

입력 에너지는 비록 세동제거의 성공을 위한 최적의 기준은 아니지만 세동제거에 있어서 필요한 조건을 규정하는 한 중요한 요소이다. 물리적인 관점에서 보면 최소한의 에너지를 이용하여 세동제거를 하는 편이 급격한 온도의 상승을 최소화하여 열로 인한 심근의 손상을 최소화할 수 있다. 전압형 제세동기에서 커패시터 방전에 의하여 전달되는 에너지($W-s$ 혹은 J)는 충전용량과 전압의 제곱의 곱의 반 즉, $0.5 \cdot CV^2$ 에 해당한다 [1].

3.2 피크전류

커패시터 방전형 제세동기에서 피크 전류값은 충전된 커패시터에 걸리는 전압과 비례하며 환자의 흉부저항과는 반비례한다. 여러 생리학적인 실험에 의해서 전류 지연시간이 줄어 들면 세동제거에 필요한 피크 전류의 값이 증가한다는 사실이 알려져 있다. 하지만 Kouwenhoven(1967), Pierce(1968)와 Tacker(1968, 1969)는 짧은 지연시간에 높은 피크전류를 가할 때는 비교적 적은 레벨의 에너지를 사용하더라도 심근의 수축이 불가능해지는 사태가 발생할 수 있다. 따라서 세동제거를 겨우 할 수 있을 정도의 전압으로 충전된 여러 범위의 커패시터를 이용하여 피크전류간의 관계를 규정하는 것이 필요하다.[1]

3.3 전류지연시간

L. A. Geddes 등은 시간지연이 짧은 전류(0.3-4 ms)에 대해서는 세동 제거를 위하여 필요한 에너지가 비교적 적은 반면 시간지연이 긴 전류 (5 ms 이상)는 세동제거를 위하여 필요한 에너지가 기하급수적으로 증가함을 보였다. 또한 최소한의 전류를 통과시켜 심근에 손상을 시키지 않고 세동제거의 효과를 얻기 위해서도 약 4 ms의 지연시간 이내가 최적임을 보였다 [2].

한편, Paul I. Bennett 과 Victor C. Jones는 세동제거 전류의 최적 조건은 50Ω 저항에서 전류가 임계감쇠(critically damping)하고 전류 펄스의 시간지연은 약 5 msec 정도로 최소가 되어야 한다고 주장한다[3]. 따라서 전류의 지연시간은 약 4-5 msec 이내의 것이 적당하다고 생각된다.

3.4 흉부저항

흉부저항이 높은 경우에는 낮은 레벨의 에너지로는 적절한 크기의 전류가 흐르지 않아 세동제거에 실패하는 경우가 발생한다. 따라서 정확히 흉부의 저항을 예측하여 적절한 레벨의 에너지를 갖는 전류를 흘려 보내 주어야 하는데, 일반적으로 첫번째 세동제거 시도에는 100 J의 에너지를 사용하고 실패할 경우에는 한 단계 씩 증가시켜 200 J, 300 J, 400 J로 에너지 레벨을 올려 시도한다.

흉부저항이 낮은 경우(97Ω)에는 100 J 이하의 에너지에도 성공하는 확률이 높고, 저항이 높은 경우(97Ω 이상)에는 200 J 이상의 에너지를 필요로 한다[4].

4. 실험결과

본 연구에서는 그림 1의 전압형 제세동기를 기준으로 최로의 각 파라미터에 의한 영향을 분석하였다. 환자의 흉부 저항은 통상의 흉부 부하저항 범위 즉, 평균 50Ω , 최저 25Ω , 최고 100Ω 의 값을 취한다고 가정하고 각 파라미터에 대한 영향을 분석하였다.

4.1 환자의 흉부부 저항에 따른 파형의 변화

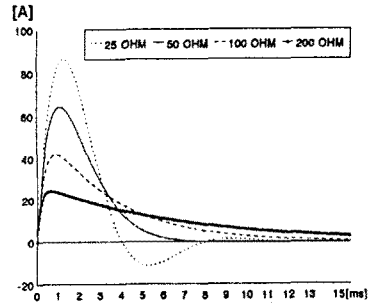


그림 2 환자의 흉부부 저항에 따른 파형
Fig. 2 Waveform with patient's transthoracic impedance

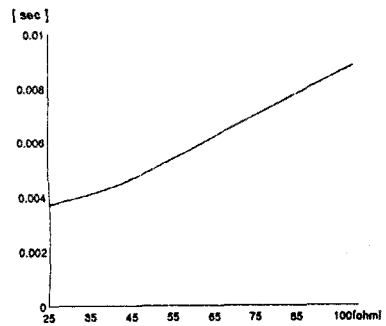


그림 3 환자의 흉부부 저항에 따른 지연시간
Fig. 3 Time duration with patient's transthoracic impedance

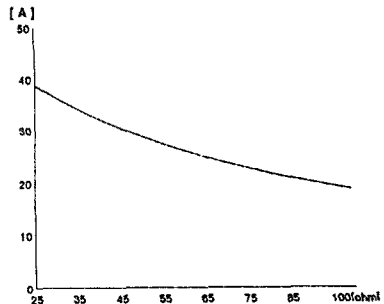


그림 4 환자의 흉부부 저항에 따른 피크전류
Fig. 4 Peak current with patient's transthoracic impedance

4.2 커패시턴스에 따른 파형의 변화

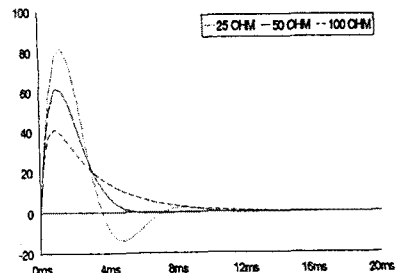


그림 5 커패시턴스에 따른 파형
Fig.5 Waveform with capacitance

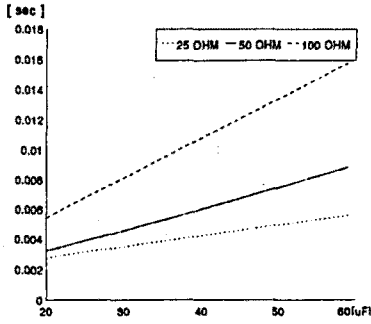


그림 6 커패시턴스에 따른 지연시간
Fig. 6 Time duration with capacitance

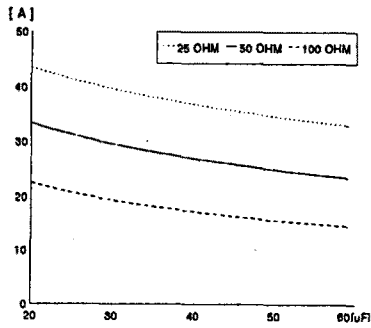


그림 7 커패시턴스에 따른 피크전류
Fig. 7 Peak current with capacitance

4.3 인덕턴스에 따른 파형의 변화

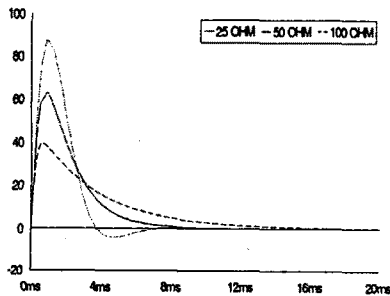


그림 8 인덕턴스에 따른 파형
Fig. 8 Waveform with inductance

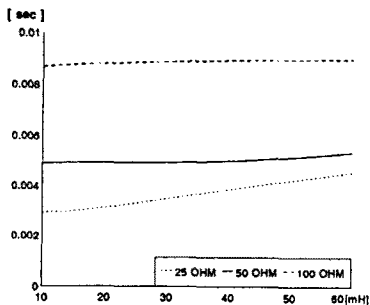


그림 9 인덕턴스에 따른 지연시간
Fig. 9 Time duration with inductance

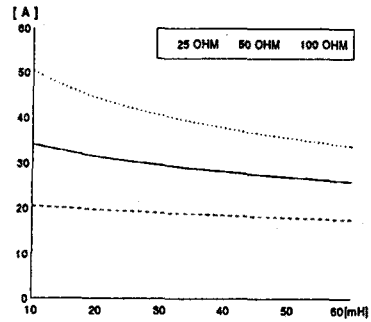


그림 10 인덕턴스에 따른 피크전류
Fig. 10 Peak current with inductance

5. 결론

본 연구에서 얻은 제세동기회로의 최적 파라미터에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 커패시턴스

커패시터의 커패시턴스는 출력 에너지에는 영향을 주지 않지만 전류지연시간 및 피크전류값에 영향을 미친다. 따라서 적절한 전류의 지연시간(4-5msec)로 하였을 때 $27 \mu F$ - $33 \mu F$ 사이의 값이 적절하다.

2. 인덕턴스

인덕터의 인덕턴스는 전류의 지연시간 및 출력 에너지에는 영향을 크게 미치지 않는으나 용부저항이 작은 경우 전류의 피크치를 떨어 뜨리며 인덕턴스가 증가하면 기기의 무게가 증가하므로 큰 인덕턴스는 바람직하지 않다. 따라서 30 mH-40 mH 사이의 값이 적절하다. 한편, 인덕터의 내부저항은 에너지 효율을 떨어 뜨리고 전류 지연시간을 증가시키므로 10Ω 이내에서 작을 수록 좋다.

3. 입력 에너지

출력 에너지 및 제곱근에 비례하는 전류의 피크치를 결정짓는다. 따라서 필요한 에너지를 결정짓는 중요한 변수인 용부저항의 정확한 예측을 통한 적절한 레벨의 조정이 필수적이다.

참고문헌

1. L. A. Geddes and W. A. Tacker, *Engineering and Physiological Considerations of Direct Capacitor -Discharge Ventricular Defibrillation*, Med. and Biol. Eng. Vol. 9, pp. 185-199, 1971
2. J. N. Patton, J. F. Pantridge, *Current Required for Ventricular Defibrillation*, British Medical Journal, pp. 513-514, 1979
3. Paul I. Bennett and Vicro C. Jones, *Portable Defibrillator -Monitor for Cardiac Resuscitation*, Hewlett-Packard Journal, pp. 22-27, Feb. 1982
4. Richard E. Kerber et al., *Advance Prediction of Transthoracic Impedance in Human Defibrillation and Cardioversion : Importance of Impedance in Determining the Success of Low-energy Shock*, Circulation, Vol. 70, No. 2, pp. 303-308, 1979

본 연구는 1993년 한국표준과학연구원 특정연구개발사업의 연구비 지원에 의한 결과임.