

碩士學位論文

전해질 방전을 이용한 체외 충격파 쇄석기
성능 개선에 관한 연구



濟州大學校 大學院

醫工學

李 宗 洙

2002 年 12 月

碩士學位論文

전해질 방전을 이용한 체외 충격파 쇄석기
성능 개선에 관한 연구



濟州大學校 大學院

醫工學

李 宗 洙

2002 年 12 月

전해질 방전을 이용한 체외 충격과 쇄석기 성능 개선에 관한 연구

指導教授 崔 玟 柱

李 宗 洙

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2002 年 12 月

李宗洙의 工學 碩士學位 論文으로 認定함

審査委員長 김 경 연 印

委 員 정 동 원 印

委 員 최 민 주 印

濟州大學校 大學院

2002 年 12 月

A Study for Improving Performance of an
Extracorporeal Shock Wave Lithotripter
using Electrolyte Discharge

Jong-Soo Lee
(Supervised by Professor Min-Joo Choi)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of Science

2002 . 12 .

Interdisciplinary Postgraduate Program

in Biomedical Engineering

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목차	i
ABSTRACT	ii
I. 서론	1
1.1 체외충격파 쇄석술	1
1.2 연구 배경	5
1.3 연구 동기	9
1.4 연구의 중요성	9
1.5 연구 목표	11
1.6 연구 범위	11
II. 연구 방법 및 이론	12
2.1 전기 수력학적 충격파 발생 장치 구성	12
2.2 방전 저항	14
2.3 방전 전류의 측정	21
2.4 하이드로폰 충격파 측정 시스템 구성	21
2.5 결석 분쇄 효율 평가	25
2.6 전극의 마모 평가	25
2.7 결석 분쇄 과정에서 방출된 가청음 신호의 특성 평가	26
2.8 충격파 발생 과정에서 방출된 소음 수준 평가	26
2.9 요약	28
III. 결과 및 고찰	29
3.1 방전 전류	29
3.2 충격파 장	32
3.3 충격파 발생기의 소음 특성	38
3.4 결석 분쇄 효율 평가	41
3.5 결석 분쇄 과정의 음향 신호특성	45
3.6 전극의 마모	51
3.7 고찰	53
IV. 결론	56
참고 문헌	59
감사의 글	63

ABSTRACT

Extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) is a revolutionary treatment method that shock waves produced outside the body is focused at depth onto stones in the urinary system or biliary system to disintegrate. ESWL has been introduced to the clinical world in mid 1980, more than 90 % patients suffering from kidney stones are treated directly and indirectly by ESWL. Since a domestic lithotripter employing an electrohydraulic shock wave generator was developed in 1993, its market share has steadily been increased. The electrohydraulic shock wave generator makes use of the spark produced in water. This type generator gives shock wave widely variable in amplitude and the electrode wear is significant. Big acoustic noise level emitted during the shock production is painful to the patients.

The study was based on an idea that electrical discharge through electrolyte would be more stable than that through water. The project aimed at improving the stability of the electrohydraulic type shock wave production and dramatically increasing the performance of the domestic extracorporeal shock wave lithotripter.

An experimental shock wave generator for the study was constructed by modifying the domestic clinical lithotripter, SDS-5000, the latest model of the domestic manufacturer Komed Ltd. As discharging media, NaCl electrolyte was chosen whose concentration varies from 0 %, 1 % and 10 %. The 0 % NaCl electrolyte indicates tap water. We carried out the measurements of the electrical current through the discharging media, the shock waves produced and the acoustic noise levels during the shock wave production. We also evaluated the strength of the shock wave induced cavitation, the stone fragmentation efficiency and the electrode wear.

We observed that, for the NaCl discharge through the electrolyte, the electrical current flowed immediately when the switch was on, whereas the time delay always existed during the discharge through water. The discharge time delay

indicated the degree of difficulty of the discharge and cause the shock wave production to be unstable. Accordingly the shock waves and acoustic noise levels produced by the electrolyte discharge had the amplitudes (peak positive pressure P^+ , SPL) significantly reduced in variability. For instance, at the discharging voltage 17 kV, the variability of P^+ and SPL were 30 % and 10 % (relative to mean value), respectively, for the discharge through tap water, but, for the discharge through 10 % NaCl electrolyte, their variability decreased to within 5 % and 1 %, respectively. In addition, in the case of 10 % NaCl electrolyte, P^+ was increased to 2.5 times than the case of tap water. Shock wave induced bubble collapse time delay t_c which influenced the stone fragmentation and biological effect by shock waves was increased by 20 % in the case of 10 % NaCl electrolyte compared to the case of tap water. It was also observed that the fragmentation efficiency was significantly enhanced by the shock waves produced by the electrolyte discharge. The electrode wear for the discharge through the 0 % NaCl electrolyte at the discharging voltage of 15 kV decreased by 70 % compared to the case of tap water.

We showed that the discharge through electrolytes enabled the electrohydraulic type shock wave generator to be stable. In addition, the amplitudes of the shock waves produced by the electrolyte discharge increased (by upto 250 %) with significance, which resulted in the stone fragmentation efficiency improved. We also noticed that the electrode wear and the SPL during shock wave production decreased. In the case of the shock wave generator constructed in the study, it is estimated that the discharging resistance to get the optimal shock wave production would be in the range of 2 - 10 Ω which is equivalent to the concentration 5 - 50 % of NaCl electrolyte.

We expect that it should be possible the discharge through electrolytes proposed in the study ensures the stability of the domestic lithotripter based on employing the electrohydraulic type shock wave production and improves significantly its performance. It is required further studies related to clinical evaluation to the shock waves produced by the electrolyte discharge.

I. 서론

1.1 체외 충격파 쇄석술

1.1.1 체외 충격파 쇄석술

체외 충격파 쇄석술 (Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy: ESWL)은 인체 외부에서 발생된 충격파를 인체 내부에 집속 하여 얻은 높은 충격파 (high intensity shock wave)가 결석 또는 담석을 파쇄하도록 하여 치료 효과를 얻는 최신 치료술이다. 체외 충격파 쇄석술은 1980년 최초로 결석 환자를 성공적으로 치료한 이후 비침습적인 치료술로 결석 및 담석 치료의 일대 혁명을 일으킨 획기적인 방법이다 (Chaussy 1980). 그림 1-1은 최초의 상용 ESWL 모델인 Dornier HM3를 이용한 신장 결석 환자의 ESWL 치료술의 모식도를 보여 준다.



1.1.2 충격파에 의한 결석 분쇄 및 치료 효과

체외 쇄석술에 사용되는 충격파의 압력은 대기압의 1,000배 (100 MPa)를 상회한다 (Choi 1993). 크기가 10 mm 미만의 결석에 1 초당 1-2 개의 충격파를 3,000 번 정도 가격하면 결석은 미세하게 분쇄된다 (그림 1-2 참조). 분쇄된 미세한 결석 분말 (size ≤ 1 mm)은 자연스럽게 요도를 통해 소변으로 배출되어 치료 효과를 얻게 된다. 담석의 경우 분쇄된 부스러기는 담즙에 밀려 소화 기관을 통해 배출되기가 상대적으로 쉽지 않아 담석 용해제 (예. ursodeoxycholic, chenodeoxycholic acid)를 투약하여 미세한 담석을 추가로 용해하기도 한다.

1.1.3 혁신적인 결석 치료법

체외 충격파 쇄석술은 1980년 Chaussy가 최초로 상뇨관에 위치한 결석 (upper ureter stone) 환자를 대상으로 임상 실험에 성공하였다 (Chaussy et al 1980). ESWL은 1980년대 중반부터는 혁신적인 결석 치료법으로 임상에 도입되기 시작하

여 routine treatment로 처방되기 시작했다 (Choi 1992). 1980년대 말 서구 유럽은 이미 결석 치료의 90 % 이상이 직. 간접적으로 체외 쇄석술을 사용하는 것으로 보고되고 있다 (Chaussy and Fuchs 1989). Schulze et al (1986)에 의하면 구미 각국은 전체 환자의 70 %가 ESWL만을 이용하여 결석 환자를 치료하고 있으며, 타 시술법 (예, stent, drug etc ...)과 병행하는 경우를 합치면 전체 환자의 95 % 가량이 ESWL을 이용하여 치료 받고 있다. 최근 담석 및 타석 치료에도 적합한 쇄석기 출현 (예. Storz Lithotripter)으로 임상적 응용 범위가 더욱 확대되고 있는 추세이다.

1.1.4 충격파의 생물학적 효과

임상적인 활용도에 비해 상대적으로 충격파에 의한 분쇄 과정 및 충격파의 생물학적인 효과는 아직 명확히 규명되지 못한 상태이다. 따라서 ESWL이 임상적으로 광범위하게 사용되고 있는 것에 비해 아직도 최적의 치료 효과를 위한 충격파 노출 조건 설정에 대한 표준화된 기준이 없다. 일반 치료용 장비의 경우 반드시 요구되는 ESWL의 정기적인 장비의 안정성 점검에 대한 통일된 프로토콜이 아직도 개발되지 못한 상태이다. 그러나 최근에는 제주대학교 최민주 교수에 의해 충격파의 피폭량 (shock wave dose)을 평가하는 중요한 척도로 충격파에 의한 음향 공동 (acoustic cavitation) 현상에 기반한 기포 파열 지연 시간을 제안하고 있어 관심을 끌고 있다 (최민주 2002, Coleman et al 1996, Cleveland et al 2000).

1.1.5 체외 충격파 쇄석기 국내 보급 현황

국내의 체외 충격파 쇄석기 보유 수는 1997년 130여대를 초과하였고, 2000년 기준으로 전 세계적으로 환자당 가장 많은 장비를 보유하고 있는 나라 중의 하나에 속하는 것으로 알려져 있다. 1980년대 말 국내에서 ESWL이 시술되기 시작한 초기에는 독일, 불란서, 이스라엘 등에서 개발 제작된 수입 체외 충격파 쇄석기가 주류를 이루고 있었다. 그러나 국내의 한 벤처기업 (주)코메드에 의해 1990년 초반 국산 체외 충격파 쇄석기가 개발(그림 1-3 참조)되었고, 중형 병원을 중심으로, 중. 저가의 국산 쇄석기의 보급이 꾸준히 증가하고 있는 추세이다.

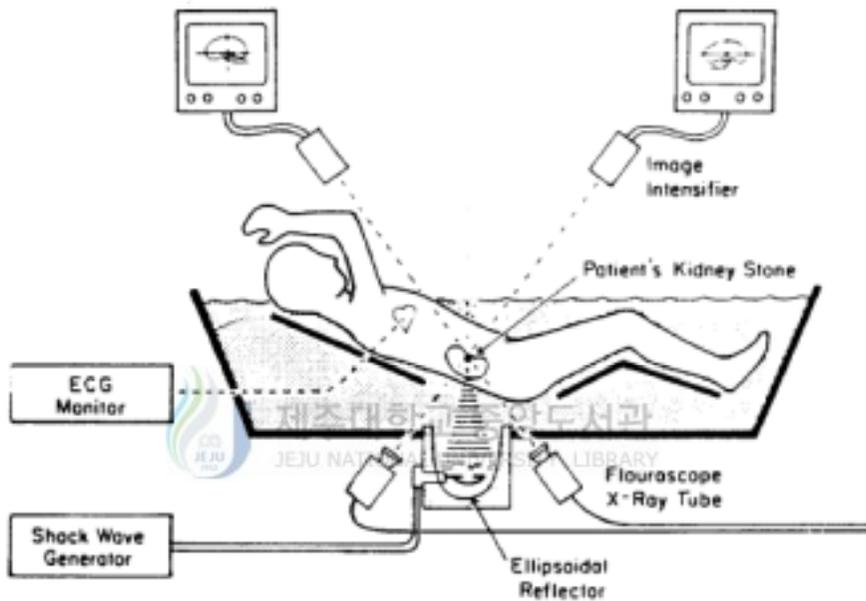


그림 1-1 체외 충격파 쇄석술의 기본 원리: 인체 외부에 위치한 충격파 발생기에서 생성된 충격파는 환자 내의 결석 부위로 집속되어 얻은 고강도 충격파에 의해 결석이 분쇄된다. 체내 결석은 엑스레이 영상으로 관찰하면서, 결석의 위치를 충격파가 집속되는 초점 부위로 환자를 위치시킨다. 초기의 체외 충격파 쇄석기는 충격파와 피부 사이의 coupling을 위해 수조 (water tank) 내에 환자를 위치시켰다 (Choi 1992).

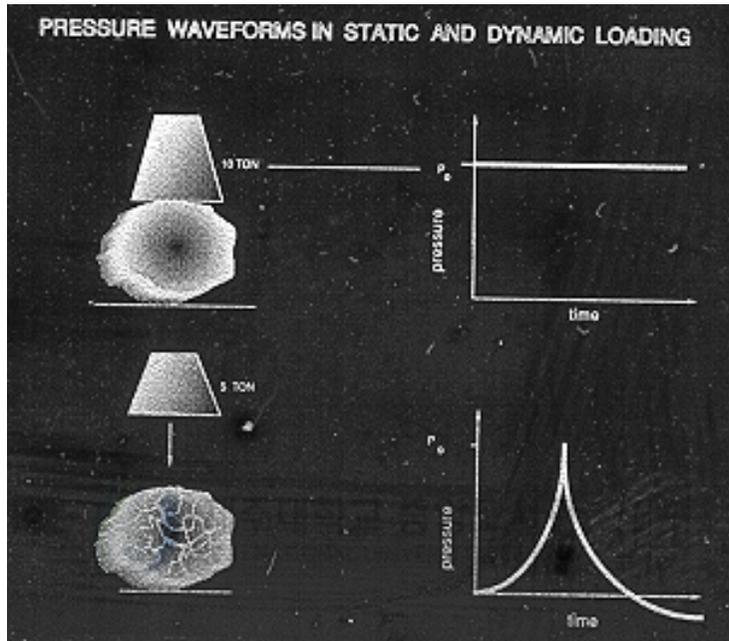


그림 1-2 체외 충격파 쇄석술에 사용되는 충격파 (shock wave, dynamic loading)에 의한 결석 분쇄의 개념도

1.2 연구 배경

1.2.1 전기 수력학적 충격파 발생 장치

국내는 물론 전 세계적으로 체외 충격파 쇄석기는, 최초의 임상용 ESWL 장비에서 사용한 방식인, 스파크 방전을 이용하는 전기수력학적인 (electrohydraulic type) 충격파 발생 방식을 가장 많이 채용하고 있다 (Choi 1992, Coleman et al 1992). 이 방식은 물 속에서 짧은 거리를 사이로 마주보고 있는 뿔쪽한 전극 (electrode)에 고압 (10-20 kV)을 순간적으로 걸어주면, 전극 사이에서 전기적인 스파크가 발생하며 이를 충격파 발생원 (shock wave source)으로 이용한다 (Coleman et al 1989). 수중에서 스파크 방전 현상은 본질적으로 불안정하기 때문에 전기수력학적인 방식으로 발생된 충격파는 매우 불안정할 수밖에 없다. 그러나 스파크갭 형 (spark gap type)으로 불리기도 하는, 전기수력학적 방식으로 발생된 충격파의 임상적인 효과가 여전히 우수하기 때문에 아직도 주된 ESWL 충격파 발생 방식으로 자리를 유지하고 있다.

1.2.2 전기 수력학적 방식 충격파 발생기의 문제점

○ poor spark reproducibility

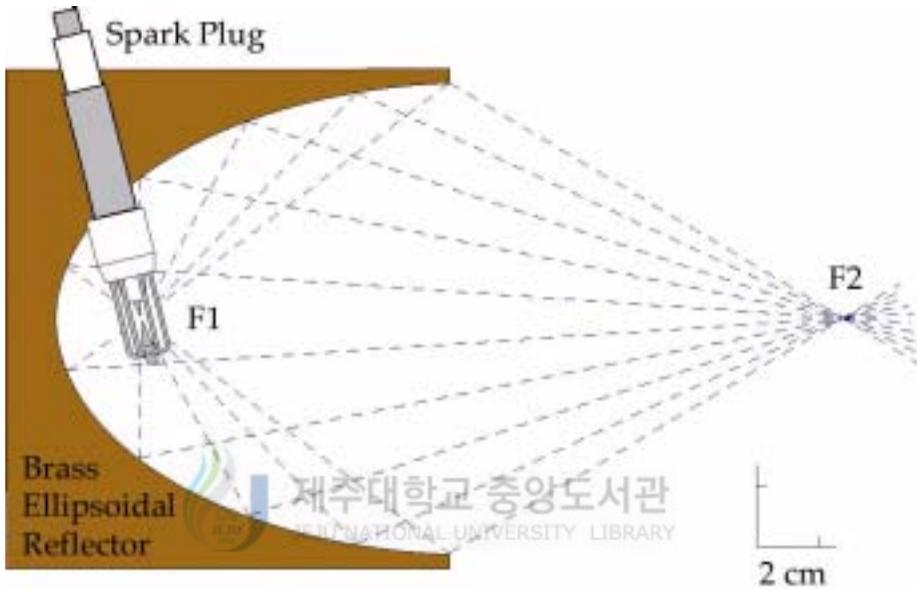
- 충격파 발생원인 물 속에서의 스파크 방전은 본질적으로 재현성이 없다.
- 충격파 압력 변화의 폭이 심하다 (shot to shot variation > 50 %. Coleman et al 1989).
- 스파크 방전의 미세한 변화는 충격파 초점 부위에서 큰 변화 (예. defocusing effect)를 야기한다 (그림 1-4 참조).

○ electrode wear

- 전극의 마모가 심하다. 2,000-3,000회 충격파 발생 후 전극을 교체해야 한다.
- 전극의 마모로 전극간 거리가 증가하여 스파크 방전을 어렵게 (불안정하게) 한다.
- 전극의 마모는 스파크 방전의 위치를 변화시키고 초점 부위에서 충격파 압력을 저하한다 (defocusing effect, 그림 1-4 참조)
- 치료 도중 전극의 마모로 인한 충격파 특성이 변화하여, 치료 효과를 예측하기 어렵다.

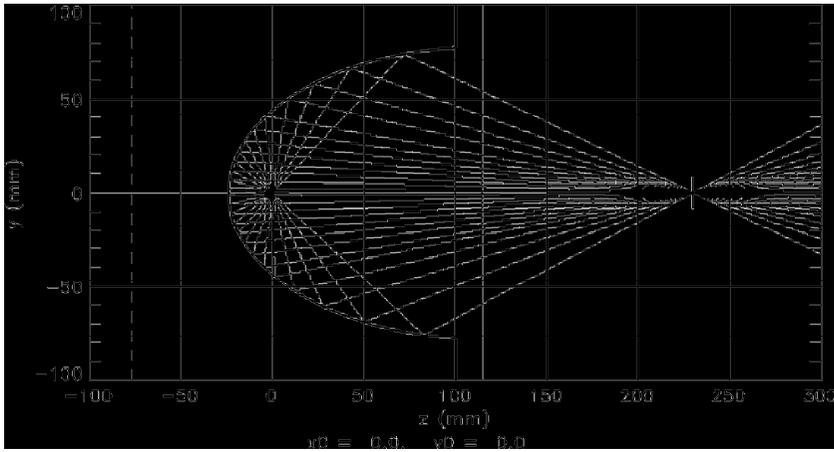


그림 1-3 국산 체외 충격파 쇄석기(모델명 : SDS-5000)

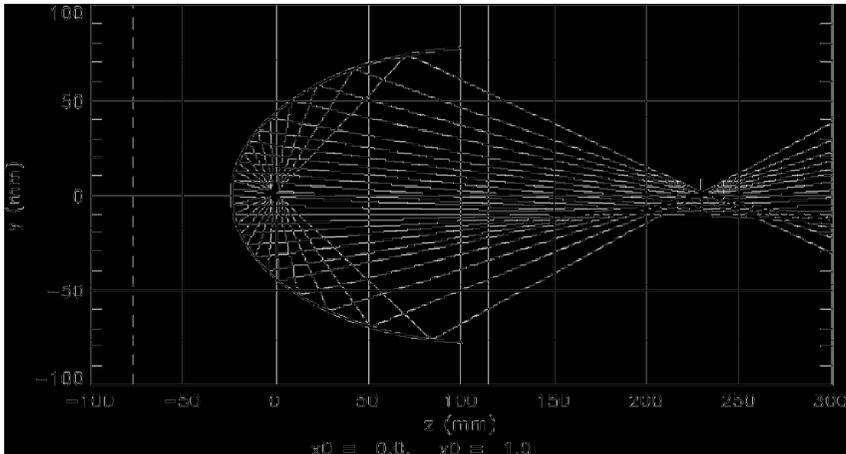


(a)

그림 1-4 타원형 충격파 집속기의 기하학 및 스파크 발생의 위치에 따른 defocusing effects 도시 (a) 스파크 발생 위치 F1 및 타원형 충격파 집속기의 기하학, (b) 스파크 발생이 F1 ($x=0, y=0$)에 정확히 위치할 때, (c) 전극의 위치 또는 스파크 발생이 F1에서 y 축으로 1 mm 상승한 경우 ($x=0, y=1$) (뒤면에 계속)



(b)



(c)

(앞면에서 계속)

그림 1-4 타원형 충격파 집속기의 기하학 및 스파크 발생의 위치에 따른 defocusing effects 도시 (a) 스파크 발생 위치 F1 및 타원형 충격파 집속기의 기하학, (b) 스파크 발생이 F1 ($x=0, y=0$)에 정확히 위치할 때, (c) 전극의 위치 또는 스파크 발생이 F1에서 y 축으로 1 mm 상승한 경우 ($x=0, y=1$)

○ large acoustical noise level

- 스파크 방전시 발생하는 소음은 환자에게 불안감과 공포감을 조성한다 (최대 100 dB 이상, Choi 2001).
- 시술자나 환자에게 방음 귀마개의 착용이 요구된다.

1.2.3 문제점 개선을 위한 선행 연구

전기 수력학적 방식 충격파 발생기의 문제점 개선을 위해 시도된 선행 연구 및 각각의 특성 및 효과를 표 1-1에서 요약하고 비교하였다.

1.3 연구 동기

- 스파크 방전형 체외 충격파 쇄석기의 성능 및 치료 효과 개선을 위해 안정적인 충격파 발생이 요구된다.
- 안정적인 전기 수력학적 충격파를 얻기 위한 방법으로 전해질 방전 (electrolyte spark) 방식의 가능성을 확인한다. 전해질 방전을 이용한 충격파 발생의 특성 및 우수성을 실험적으로 검증하고 활용한다.

1.4 연구의 중요성

- 본 연구는 전기 수력학적 방식 충격파 발생기를 채용한 체외 쇄석기 충격파 발생기의 성능 개선에 기여할 수 있다.
- 전기 수력학적 방식 충격파 발생기는 체외 충격파 쇄석기의 가장 많은 비율을 차지하기 때문에 연구 결과의 파급 효과가 크다.
- 임상적으로 가장 우수한 효과를 보이고 있는 전기 수력학적 방식 충격파의 의학적 활용을 증대할 수 있다.

표 1-1 전기 수력학적 충격과 발생기의 문제점 개선을 위한 방법의 특성 및 효과 비교

방법	spark reproducibility	electrode wear	acoustical noise	technical difficulty
<u>keeping electrode gaps narrow</u> electrode가 마모된 만큼 보상하여 좁게 유지	slightly reproducible (전기 에너지가 전극 주위의 매질인 물에 잘 전달되지 못하여 결석 분쇄에 필요한 충분한 압력의 충격파를 얻기가 어려움)	약간 감소	약간 감소	실제로 구현이 어려움
<u>exploding wire</u> 전극 사이에 exploding wire 설치 (Brossard 1970)	moderately reproducible (스파크 발생이 용이)	감소	감소	매 방전마다 설치하기가 기술적으로 난해
<u>third electrode</u> electrode 사이에 전기 방전을 도와주는 third electrode를 설치	moderately reproducible (스파크 발생이 용이)	약간 감소	약간 감소	추가적인 전원 공급 및 스위칭 장치 필요
<u>electrolyte electrode</u> 방전 매질로 electrolyte를 사용 (Choi & Cathignol 1991, Mestas & Cathignol 1994)	highly reproducible (스파크 방전이 용이)	현저히 감소	현저히 감소	기술적으로 실용화 용이

1.5 연구 목표

기존의 전기 수력학적 방식 충격파 발생기는 스파크의 비 재현성과 심한 전극의 마모로 인해 시술시 발생하는 충격파 특성 변화가 심하다. 본 연구는 전해질에서 전극이 방전할 때 스파크의 재현성과 충격파의 특성, 전극 마모가 획기적으로 개선될 수 있음을 보이고, 체외 충격파 쇄석기의 성능을 높이는데 활용하기 위함이다.

1.6 연구 범위

전해질 방전을 통해 발생한 충격파의 물리적인 특성을 측정하고, 안전성 및 성능을 평가하기 위한 실험을 수행한다. 전해질 방전과 기존의 수중 방전 방식을 비교하고 전해질 방전의 우수성을 구체적으로 확인한다.

실험 내용은, 전해질로 채워진 전극간의 방전 저항을 변화하면서 방전 전류의 특성, 발생한 충격파의 물리적인 변수를 측정한다. 측정 변수로 충격파형, 충격파 압력 (최대 양압 peak positive pressure P+, 최대 음압 peak negative pressure P-), 충격파 발생시 소음의 수준 (Sound Pressure Level: SPL)을 선정하였다. 충격파 발생기의 안정성 평가를 위해 SPL, 압력 변화 (shot to shot variability: STSV)를 관찰하였으며, 성능 평가를 위해 충격파 압력 (P+, P-), 결석 분쇄 효율, 전극의 마모, 소음 수준을 분석하였다.

II. 연구 방법 및 이론

2.1 전기 수력학적 충격파 발생 장치 구성

본 연구에서 사용된 전기 수력학적 충격파 발생기는 (주)코메드에서 제작한 체외 충격파 쇄석기의 최신 모델인 SDS-5000의 충격파 발생기 부분을 개조하여 구성하였다. 그림 2-1은 본 실험을 위해 구성한 충격파 발생 장치의 외관 사진이다. 충격파 발생기는 펄스 파워 발생 장치 (pulse power source), 전극 (electrode), 타원형 집속기 (ellipsoidal reflector)로 구분할 수 있다. 그림 2-1에서 전극은 타원형 집속기 내부에 위치하고 있어 보이지 않는다.

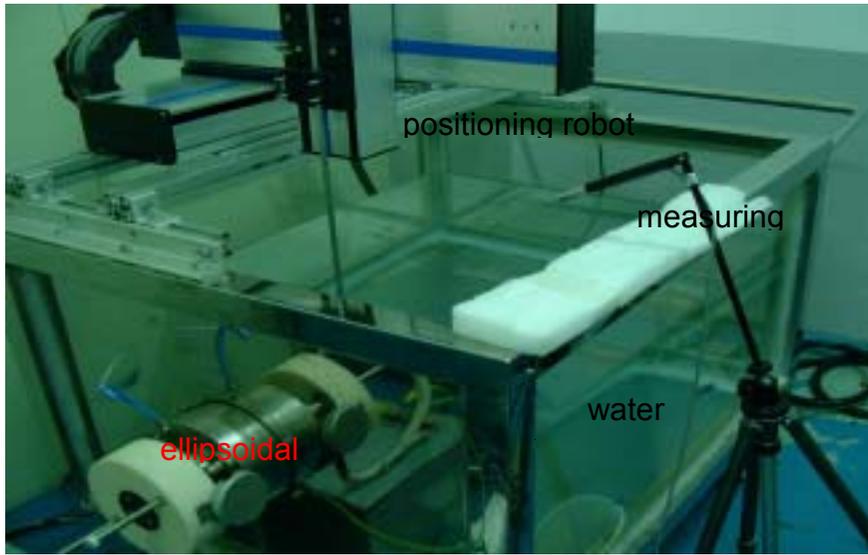
2.1.1 펄스 파워 발생 장치

펄스 파워 발생 장치 (pulse power source)는 기본적으로 RCL 직렬 회로로 구성된다. 본 실험에서 구성된 펄스 파워 발생 장치는 축전지 (Capacitor) 0.5 μF 를 기본으로 하고 있으며 필요시 0.2-1.0 μF 범위에서 변화시킬 수 있도록 하였다. 회로의 인덕턴스의 값은 1.8 μH 로 측정되었다. 별도의 인덕터를 구성하여 인덕턴스의 값을 10 μH 까지 순차적으로 증가할 수 있도록 하였다. 펄스 파워 발생 장치에서 발생된 공진 주파수는 식 (2-1)으로 부터 0.168 MHz의 값을 가진다.

$$(2-1) \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

여기서 f 는 공진 주파수 (Hz), L 은 회로의 인덕턴스 (H), C 는 축전지 용량 (F)을 의미한다.

Capacitor의 충전 전압은 20 kV 정도까지 상승하며, 본 실험에서는 방전 전압으로 9 - 17 kV 범위를 사용하였다.



(a)



(b)

그림 2-1 본 실험을 위해 구성한 전기 수력학적 충격파 발생기 외관 사진.

(a) 수조 및 전극이 설치된 타원형 집속기

(b) 전극과 연결된 펄스 파워 공급 장치

2.1.2 전극

직접 임상에 사용되는 것과 동일한 전극 (electrode)을 사용했다. 그림 2-2는 사용된 전극의 외관 사진을 보여주고 있다. 전극의 간격은 0.8 mm 범위의 값을 가진다. 그림에서 보여 주듯이 스파크 방전이 발생하는 전극 부분을 제외하고는 주변의 도선을 절연체로 코팅하였다. 스파크 방전이 전극이외의 주변의 도선 또는 도체와 발생하는 것을 방지하기 위함이다.

2.1.3 타원형 충격파 집속기

타원형 충격파 집속기 (ellipsoidal shock wave reflector)는 타원의 기하학적 특성을 이용한다. 타원의 궤적은 두 개의 초점과의 거리의 합이 일정하다는 조건을 만족한다. 전극은 타원의 한쪽 초점 (F1)에 위치한다. 타원의 기하학적 조건에 의해 전극에서 스파크 방전으로 발생한 충격파는 주변의 타원형 반사판에서 반사되어 반대편 초점(F2)으로 집속 된다. 결석은 충격파 에너지가 집속 되는 초점 부위에 위치하도록 한다. 본 실험에서 사용된 타원의 크기는 장축 (major axis) 340.26 mm, 단축 (minor axis) 219.48 mm 로 하였다. (그림 1-4, 2-1 참조)

2.2 방전 저항

본 연구의 핵심은 전해질을 통한 전극의 방전 저항 (discharging resistance)을 변화하면서 충격파 발생의 안전성을 평가하는 것이다. 방전 저항은 방전 전압이 걸리는 순간 방전 매질에 담겨 있는 전극 사이의 저항값이다. 방전 저항은 전극의 특성 (재질, 기하학적 구조, 간격)과 방전 매질의 전기적인 특성 (전기 전도도), 방전 전압에 의해 결정된다. 전극의 특성 중 재질과 기하학적인 구조에 대한 효과는 본 연구의 범위를 벗어나는 것으로 고려하지 않았다. 전극의 간격 (electrode gap)은 충격파 발생 횟수 (즉 방전 횟수)가 증가함에 따라 생긴 마모로 인해 커진다. 전극의 간격이 증가하면 방전 저항도 증가하게 된다. 본 실험에서 초기 전극의 간격은 0.8 mm로 고정하였다. 충격파 발생 후 전극의 마모를 관찰하여 방전 저항의 변화에 대한 효과를 추정하였다.



(a)

(b)

그림 2-2 본 실험에서 사용된 전극. (방전 전극의 간격: 0.8 mm)

(a) 전체 사진, (b) 방전 전극 부분 확대

본 연구에서 방전 저항은 전해질의 전기 전도도 (conductivity) 값을 변화하여 조절하였다. 사용한 전해질로 0 % (tap water), 1 %, 10 % NaCl electrolyte를 사용하였다.

전기 전도도는 용액이 전류를 운반할 수 있는 정도를 말하며, 용액중의 이온세기를 신속하게 평가할 수 있는 항목으로서 전기저항의 역수를 의미한다. 전통적으로 ohm^{-1} 또는 mho를 단위로 사용하나 SI 단위로 S(Siemens)로 표기한다. 일반적으로 전도체 저항 $R(\Omega)$ 은

$$(2-2) \quad R = (\rho \cdot \ell) / A$$

로 표시할 수 있다. 여기서 ρ 는 도체의 비저항 ($\Omega \cdot \text{m}$), ℓ 은 도체의 거리 (m), A 는 도체의 단면적 (m^2)을 의미한다. 따라서 전기전도도 L 은

$$(2-3) \quad L = 1/R = (A / \ell) \cdot K$$

가 된다. 여기서 $K(=1/\rho)$ 는 비전기전도도 (specific electrical conductivity, mho/m)이다. 전해질의 비 전기 전도도 측정시, 측정 장비 (conductivity meter)의 A 와 ℓ 은 고정되어 있으므로 전기 저항을 측정한 후 식 (2-3)을 이용하여 쉽게 계산할 수 있다.

표 2-1과 그림 2-3은 conductivity meter를 사용하여 NaCl electrolyte의 NaCl 농도에 따른 비전기전도도를 측정한 결과를 보여주고 있다.

방전 전해질 NaCl electrolyte의 농도를 0.1 % - 10 % 로 변화하면서 전극의 저항을 RCL meter를 이용하여 측정하여 그 결과를 표 2-2와 그림 2-4에서 보여주고 있다. 측정된 저항값은 tap water (0 % NaCl electrolyte) 에서 5,000 Ω 이며, 1 %, 10 % NaCl electrolyte에서는 각각 37 Ω , 8 Ω 으로 나타났다.

전극에 높은 방전 전압 (최대 20 kV)이 걸리고 스파크가 발생하는 경우, 전극 사이의 저항값은 그림 2-4에서 보여주는 값과는 큰 차이를 보일 것으로 예상된다.

표 2-1 NaCl electrolyte의 NaCl 농도에 따른 비전기전도도

NaCl electrolyte concentration (%)	specific electrical conductivity ($\mu S/cm$)	temperature (°C)
0.00	0.56	22.2
0.01	6.48	22.2
0.02	8.71	21.9
0.05	18.32	21.9
0.10	36.80	22.8
0.20	74.10	22.1
0.50	172.80	22.1
1.00	340.00	22.2
2.00	638.00	22.5
5.00	1,472.00	22.0
10.00	2,680.00	21.7
20.00	4,320.00	21.8

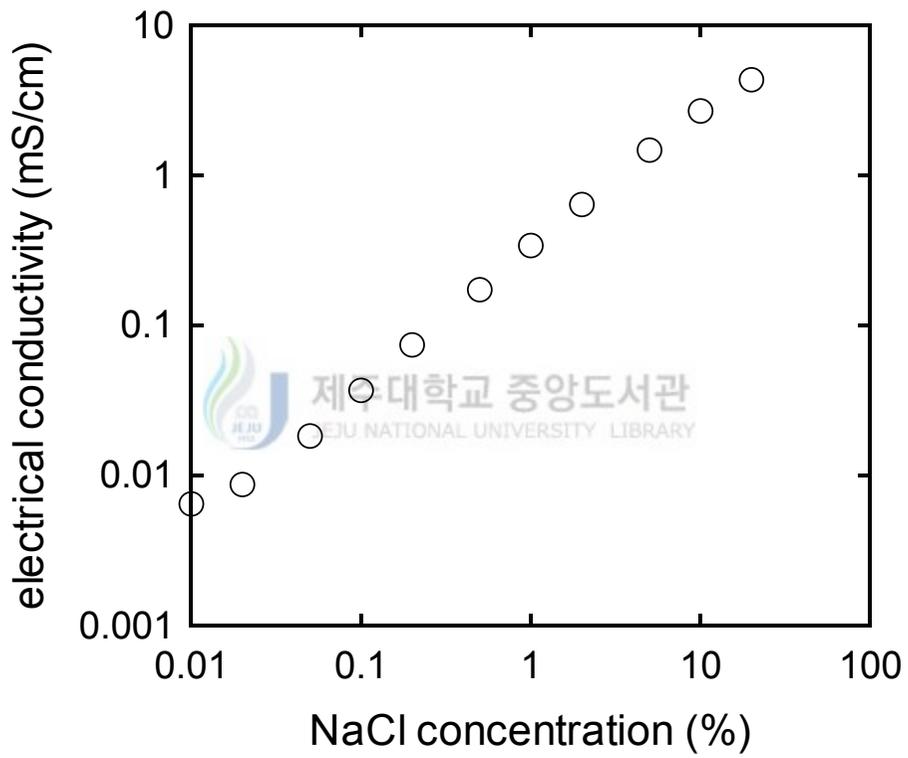


그림 2-3 NaCl electrolyte의 농도에 따른 전기 전도도

표 2-2 NaCl electrolyte 에서 LCR meter (1 kHz)로 3회 측정 한 전극 사이의 저항값

NaCl electrolyte concentration (%)	Resistance (Ω)	Impedance (Ω)
0 (pure water: 3차 증류수)	5,300.0	5,300.0
	5,100.0	5,100.0
	4,900.0	4,800.0
0.1	250.0	250.0
	230.0	230.0
	230.0	240.0
0.2	125.0	132.0
	123.0	132.0
	122.0	130.0
0.5	73.1	80.5
	73.9	82.2
	73.3	81.8
1	35.8	39.7
	36.7	41.5
	36.5	41.3
2	19.7	24.3
	19.3	24.4
	18.7	24.8
3	16.1	22.1
	16.4	22.0
	15.8	22.9
4	12.6	18.7
	12.9	19.3
	12.8	19.8
5	10.5	17.3
	10.7	17.5
	10.3	18.3
6	9.9	17.2
	9.6	17.7
	9.5	18.0
7	9.3	16.9
	9.2	16.3
	9.1	16.3
8	8.4	15.2
	8.7	15.6
	8.2	16.2
9	7.7	15.0
	7.8	15.5
	7.6	15.9
10	7.8	15.5
	7.8	15.5
	7.2	15.8
20	8.6	16.4
	7.8	16.7
	7.9	18.3

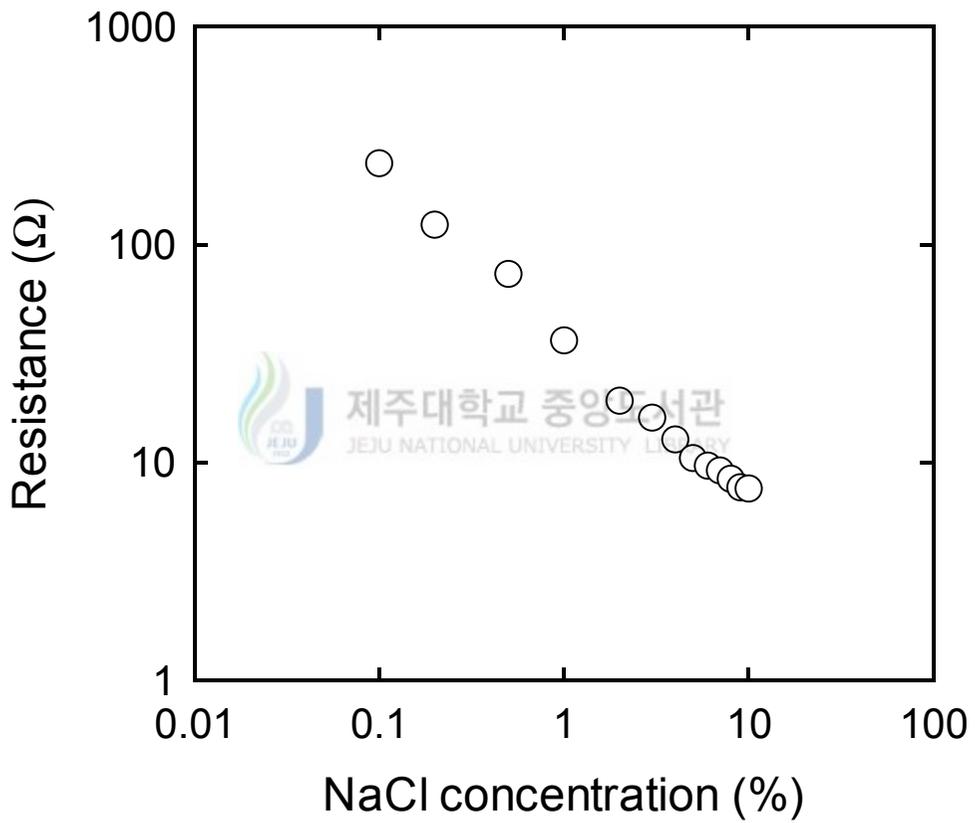


그림 2-4 방전 매질 NaCl electrolyte의 농도에 따른 전극 사이의 저항
(5,000 Ω · cm for 0 % NaCl electrolyte or tap water)

2.3 방전 전류의 측정

방전 저항 즉 방전 매질의 변화에 따라 전극을 통한 방전의 용이성을 평가하기 위해 축전지 전압의 변화 또는 전극 사이를 흐르는 전류를 관찰할 수 있다. 임피던스가 일정한 상태에서 전압과 전류의 상관성을 가지고 있으므로 두 가지 모두 측정할 필요는 없다. 본 실험에서는 전극 사이를 흐르는 전류만을 측정하였다. 측정 센서로 pearson current monitor (model 101, Pearson Electronics Ltd. Palo Alto, CA, USA)를 사용하였다.

2.4 하이드로폰 충격파 측정 시스템 구성

충격파 측정 시스템은 전기 수력학적 충격파 발생기, 수조, 하이드로폰, 3차원 위치 제어 시스템, 신호 입수/처리부로 구성된다. 그림 2-5는 하이드로폰을 이용한 충격파 측정 시스템의 구성도이다. 하이드로폰은 3차원 위치 제어 시스템에 의해 3차원 공간상의 압력 측정 위치에 놓여진다. 측정된 신호는 디지털 오실로스코우프에서 표시되며, 추가적인 신호 처리가 필요시, 최대 GHz 단계의 샘플링 주파수로 디지털 신호로 바뀌어 PC에 저장된다.

2.4.1 충격파 발생기

국산 체외충격파 쇄석기 (Komed SDS-5000) 모델과 동일한 특성을 가지는 충격파 발생장치를 구성하였다 (그림 1-3, 2-1 참조)

2.4.2 수조

크기 800mm(width) * 1000mm(length) * 600m(height)인 수조를 재질 아크릴을 이용하여 제작하였다 (그림 2-1 참조).

2.4.3 하이드로폰

충격과 파형을 감지하기 위한 수중 압력 센서이다. 본 실험에서는 바늘형 하이드로폰 (TNU100A Piezoceramic Needle Hydrophone, NTR System, Inc., 810 Northwest 45th St., Seattle, WA 98107, USA)을 사용하였다. 그림 2-6은 하이드로폰의 외부 모양 및 감지 주파수 반응 특성을 보여주고 있다.

본 실험에서는 바늘형 하이드로폰이 충격파에 의해 야기된 음향 공동 현상 (Coleman et al 1987, Coleman et al 1992)에 의해 손상되지 않도록 하기 위해, 하이드로폰의 압력 감지부에 기름 보호층을 설치하였다. 사용된 기름은 음향 공동 현상이 발생하기 어려운 유체인 카스터 오일 (castor oil)을 사용하였다.

2.4.4 3차원 위치 제어 시스템

하이드로폰을 3차원 공간에서 정밀하게 위치를 제어하기 위해 3 degree of freedom positioning robot system (Faraman RCM4-X174Z NC, Samsung Electronics, Suwon, Korea)을 사용하였다. 그림 2-1에서 외관 사진을 보여주고 있다.

2.4.5 신호 입수/처리부

하이드로폰에 의해 감지된 신호는 preamplifier를 통하여 증폭된 후 디지털 오실로스코프 (LeCroy LC584)에서 도시된다. 추가적인 신호 처리가 필요시, 신호는 최대 GHz 단계의 샘플링 주파수로 디지털 값으로 변환되어 PC에 기록된다.

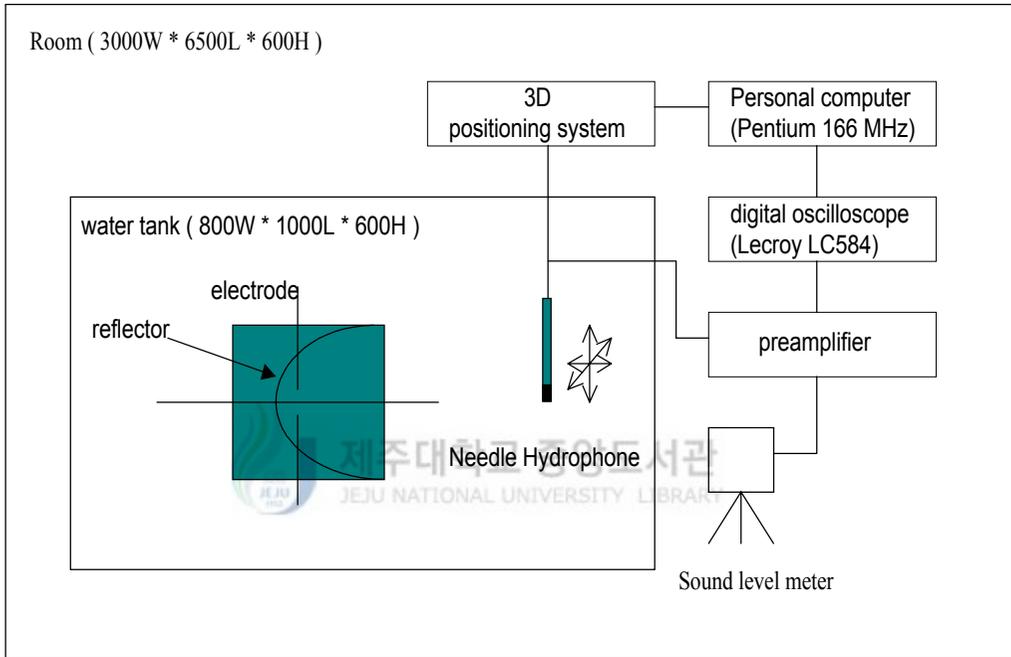


그림 2-5 하이드로폰을 이용한 충격과 측정 시스템

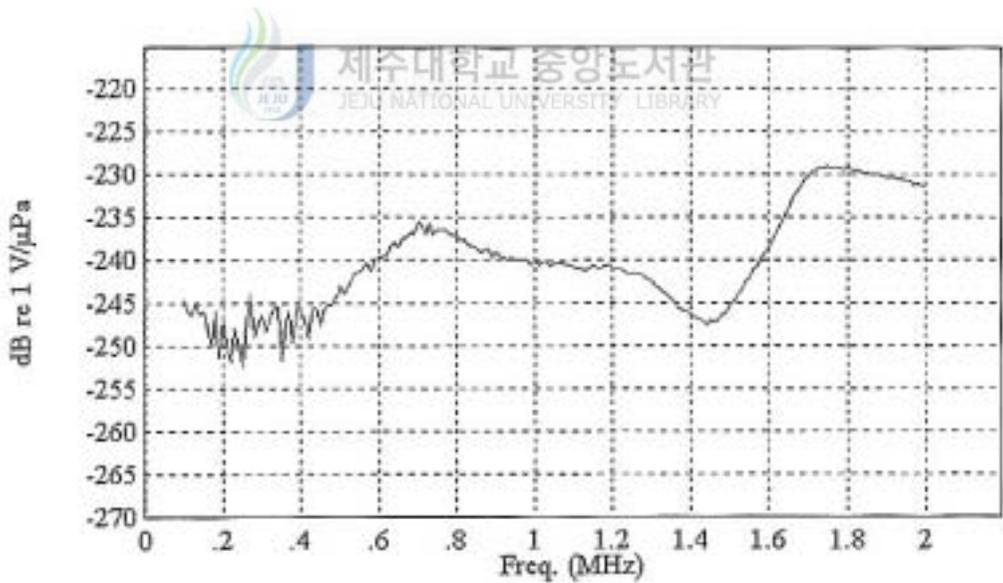
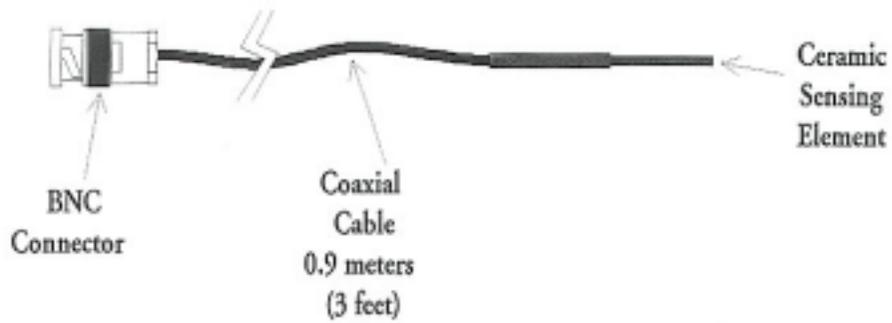


그림 2-6 NTR Ceramic Needle Hydrophone System (a) 구성도, (b) 전형적인 수신 주파수 반응 특성

2.5 결석 분쇄 효율 평가

발생된 충격파의 결석 분쇄 효율을 평가하기 위해 실험실에서 제작한 모의 결석을 이용하여 실험하였다.

2.5.1 모의 결석 제작

모의 결석은 plaster of paris (SamWoo Chemical IND. Co., LTD, Korea)를 물과 혼합 (plaster of paris : water = 1 : 1.5)하여 제작하였다. 모의 결석은 신장 결석과 역학적인 특성이 비슷하도록 제작하였다 (Chuong et al 1992). 제작된 모의 결석의 역학적인 값은 밀도가 1.478 g/cm^3 이며, 강도 (material failure strength)는 압축 강도 10 MPa (compression), 인장 강도 1.9 MPa (tension)이며, 경도는 14 kg/mm^2 이다. 모의 결석의 크기는 가로 30 mm 세로 30 mm 두께 15 mm 인 직육면체 모양으로 제작하였다.

2.5.2 결석 분쇄 실험



모의 결석의 중심부를 집속기의 초점에 위치하도록 하였다. 충격파 조사시 모의 결석이 미세하게 움직일 수 있도록 실에 매달아 고정하였다. 생체 내에 위치한 결석은 실제로 호흡이나 충격파 조사 과정에서 미세하게 움직이고 있으며 이러한 현상을 반영하기 위함이다.

방전 전압을 고정된 상태에서 방전 전해질 NaCl electrolyte의 농도 즉 전해질의 전기적인 특성이 변화할 때 결석의 분쇄 효과를 평가하였다. 충격파 조사 횟수에 따른 결석 분쇄 과정을 사진으로 기록하여 관찰하였다. 모의 결석의 분쇄 형태로부터 충격파장의 특성 및 focal volume에 대한 평가를 하였다.

2.6 전극의 마모 평가

결석 분쇄 실험 후 전극의 마모 (electrode wear) 상태를 관찰하여 스파크 방전의 안정성 및 충격파 발생기의 내구성을 평가하였다. 동일한 설정 하에서 방전 매질에

따른 전극의 마모 상태를 비교하였다.

2.7 결석 분쇄 과정에서 방출된 가청음 신호의 특성 평가

오랫동안 ESWL을 시술한 경험자는 종종 ESWL 시술 과정 중에 발생한 소음의 특성으로부터 결석 분쇄 과정을 추정하기도 한다. 실제로 일부 연구자들에 의해 결석 분쇄 과정 중에 측정된 음향 신호의 주파수 스펙트럼의 변화가 결석 분쇄 정도를 추정하는데 유용하게 사용 될 수 있음이 밝혀졌다. 그러나 이 경우 특성 주파수의 영역은 결석의 크기에 의한 공진 주파수와 관련된 수 kHz 부근으로 가청 주파수 범위를 넘고 있다 (Kanai et al 1994).

본 실험에서는 충격파에 의해 결석이 분쇄되어 가는 과정 동안 측정용 마이크로폰을 이용하여 가청 음 영역의 음향 신호를 측정하였다. 음향 신호의 특성 스펙트럼은 AR Model을 이용하여 추정하였다. 결석의 분쇄가 진행되면서 스펙트럼의 특성을 관찰하여, 음향 신호와 결석 분쇄 상태의 연관성을 얻고자 시도하였다. 물 속에서 방전할 경우와 전해질 (NaCl electrolyte)에서 방전할 때를 비교하여 보았다.

음향 신호 측정을 위해 Sound Level Meter (LA215 Sound Level Meter, Ono Sokki, Japan)를 사용하였다 (그림 5.2-7 참조). Sound Level Meter의 마이크로폰 신호는 AC output 단자를 통해 디지털 오실로스코우프로 전송되어 파형이 표시된다. 스펙트럼 추정을 위한 신호 처리를 위해 디지털 신호로 변환된 후 PC에 저장하였다. AR 모델을 이용한 신호처리는 MatLab을 이용하여 수행하였다.

2.8 충격파 발생 과정에서 방출된 소음 수준 평가

전기 수력학적 충격파 발생기는 스파크 발생 과정에서는 상당히 큰 소음을 야기한다. 많은 경우, 스파크 방전 방식 ESWL의 시술자 및 치료를 받는 환자는 소음 차단용 귀마개를 착용한다. 본 연구에서는 SDS-5000 국산 충격파 발생기의 소음 수준을 평가하였고, 방전 전해질의 변화에 따른 소음 수준의 특성을 분석하였다.

본 실험에서 소음 수준 측정을 위해 그림 2-7에서 보여주고 있는 Sound Level Meter (LA215 Sound Level Meter, Ono Sokki, Japan)를 사용하였다.



그림 2-7 Sound Level Meter (LA215 Sound Level Meter, Ono Sokki, Japan)

2.9 요약

본 연구에서 수행한 실험은 충격파 발생기의 설정에 따른 발생된 충격파장의 물리적인 특성 변수를 측정하고 안정성 및 성능 평가를 하는 것으로 요약할 수 있다.

2.9.1 충격파 발생기의 설정 변수

- 방전 전압: 9 kV - 17 kV
- 방전 저항: 7 Ω - 5,300 Ω (10% NaCl electrolyte - tap water)

2.9.2 충격파 발생기의 측정 변수

- 방전 전류: 시간에 따른 전압 및 전류의 파형 ($i(t)$)
- 충격파장: 충격파형 ($P(t)$), 최대 양압 ($P+$), 최대 음압 ($P-$)
- 충격파 발생기 소음: 소음 수준 (Sound Pressure Level, SPL)

2.9.3 충격파 발생기의 안정성 및 성능 평가

- 안정성: shot to shot variability ($P+$, $P-$, SPL)
- 성능: 충격파 압력 ($P+$, $P-$), 결석 분쇄 효율, 전극의 마모, 소음 수준

2.9.4 측정값의 표시

본 연구에서 표시하고 있는 측정치들의 값은 5회를 평균한 값을 나타내고 있다.

2.9.5 재현성

본 연구에서 재현성이라 함은 성능과 신뢰성을 위하여 통상적으로 사용하는 $\pm 5\%$ 를 기준으로 하였다.

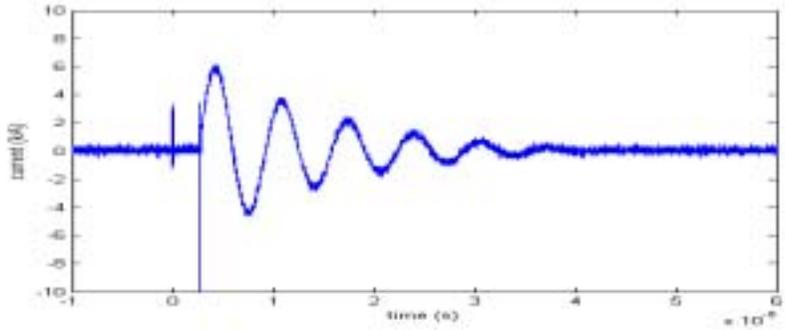
Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1 방전 전류

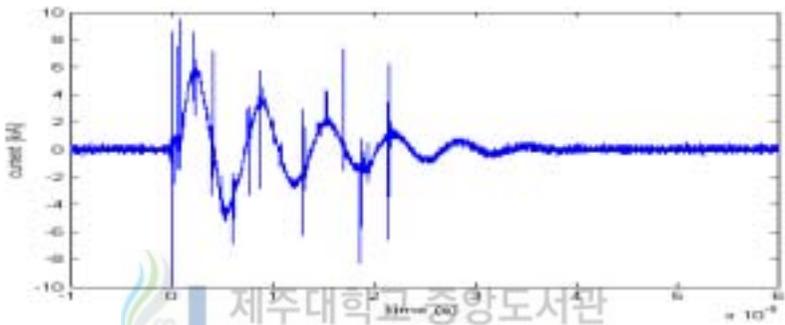
그림 3-1은 방전 전압이 13 kV인 경우, tap water 또는 NaCl electrolyte에서 방전할 때 전극을 통해 흐르는 전형적인 전류 파형을 비교하고 있다. 그림 3-1에서 $t=0$ 은 콘덴서 방전 스위치 trigger 신호 (그림 3-1a에서 화살표로 표기)가 가해진 시점을 표시한다. 그림 3-1a에서 보여 주듯이 tap water에서 방전하는 경우 방전 스위치 trigger 신호 후 3 μ s 가량 지나서 전류가 흐르고 있다. 이러한 시간 지연은 방전 매질인 tap water를 통한 전극의 방전 전기 저항 (5,000 Ω)이 매우 크기 때문이다. 반면 방전 매질 NaCl electrolyte에서는 전극간의 저항 값 (7 - 38 Ω)이 매우 낮기 때문에 그림 3-1b와 3-1c에서 보여주는 것처럼 스위치 트리거 신호와 동시에 전류가 흐르고 있다.

방전 매질이 tap water인 경우, 스위치 트리거 신호 후 스파크 방전까지 시간 지연은 방전 전압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 그림 3-2는 방전 전압에 따른 방전 지연 시간의 평균값을 보여주고 있다. (그림에서는 표기되지 않았지만) 동일한 방전 전압 하에서 시간 지연의 폭은 최대 50 % 이상 변화하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 동일한 설정 하에서 발생된 충격파간의 변화의 폭이 매우 커지는 현상과 연관되며, 발생된 충격파의 안정성과 관련되는 사항이라 할 수 있다.

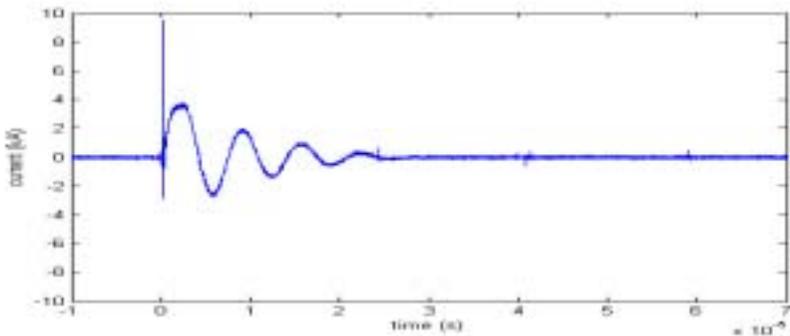
NaCl electrolyte의 농도가 1 % 인 경우 (그림 3-1b), 전류 파형은 기본적으로 tap water에서의 경우와 유사하다. 즉 NaCl electrolyte의 농도가 1 % 인 경우 전극간의 전기적인 특성은 방전 전류의 특성을 변화시킬 정도가 아님을 보여 준다. 특기할 사항은 NaCl electrolyte 농도가 1 % 인 경우 스파이크 누설 전류가 연속적으로 발생하고 있으며, 반복적으로 측정되고 있다는 점이다. 이에 대한 원인은 현 시점에서 정확히 알 수는 없지만, 방전 시스템의 불안정성에 기인하는 것으로 추정하고 있다. 통전 시간 즉 전류 파형의 life time은 NaCl electrolyte의 농도가 1 % 인 경우 tap water에서의 경우와 유사하지만, NaCl electrolyte의 농도가 10 % 로 상승할 경우, 40 % 이상 감소하는 것으로 나타났다.



↑ (a)



(b)



(c)

그림 3-1 전극을 통해 흐르는 전류 파형 (방전 전압 13 kV).

(a) 0 % NaCl electrolyte(tap water),

(b) 1 % NaCl electrolyte, (c) 10 % NaCl electrolyte.

그림 (a)에서 화살표는 discharge switch on ($t=0$)을 지시한다.

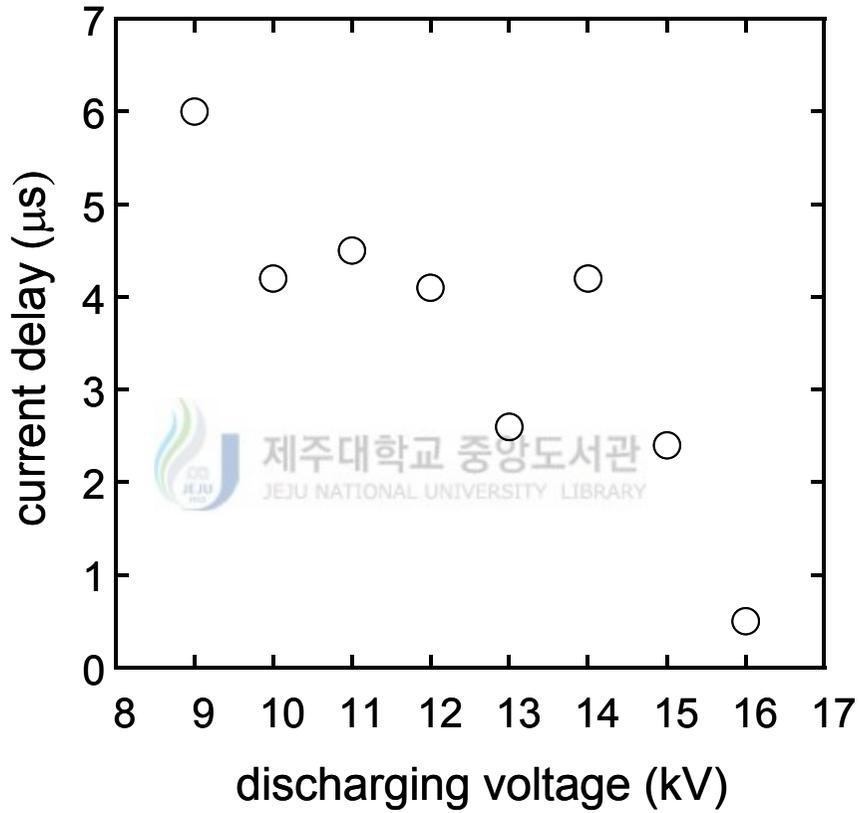


그림 3-2 방전 매질 tap water에서 방전 전압의 증가에 따른 방전 전류 지연 시간

방전 전압에 따른 전류값의 변화는 그림 3-3에서 보여주고 있다. 모든 방전 전해질에 대해서 방전 전압이 증가함에 따라 전류의 최대값은 증가하고 있다. NaCl electrolyte의 농도가 1 % 인 경우 전류 값은 tap water의 경우와 거의 유사한 (약간 작은) 것으로 나타났다. 그러나 NaCl electrolyte의 농도가 10 % 로 상승할 경우 전류값은 약 50 % 가량 감소하는 것으로 나타났다. NaCl electrolyte의 농도가 10 %에서는 RCL meter로 측정된 전극간의 저항이 tap water에 비해 현저히 감소함에도 불구하고 (그림 2-4 참조), 전류가 오히려 감소하고 있다는 점은 흥미 있는 사실이다. 수 kV의 높은 방전 전압에서의 전류의 흐름은 선형적인 전기 회로 이론을 따르지 않고 있음을 보여준다.

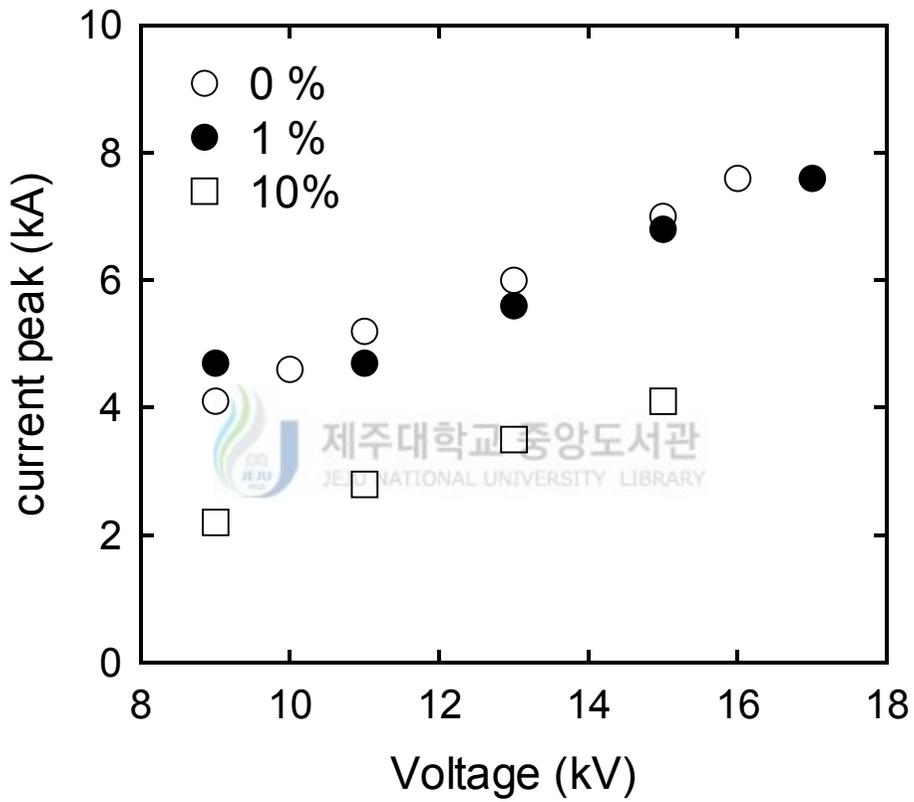
3.2 충격파 장

3.2.1 충격파 파형

그림 3-4는 방전 전압 13 kV에서, 방전 매질에 따른 초점 위치에서의 압력의 변화를 하이드로폰을 이용하여 측정된 신호를 보여 주고 있다. 그림에서 수직축의 충격파의 압력은 하이드로폰 출력 전압으로 표현하였다. 수평축은 시간 축 ($100\mu\text{s}/\text{div}$)을 표시하며, 1 ms 시간 동안 측정된 신호를 도시하였다.

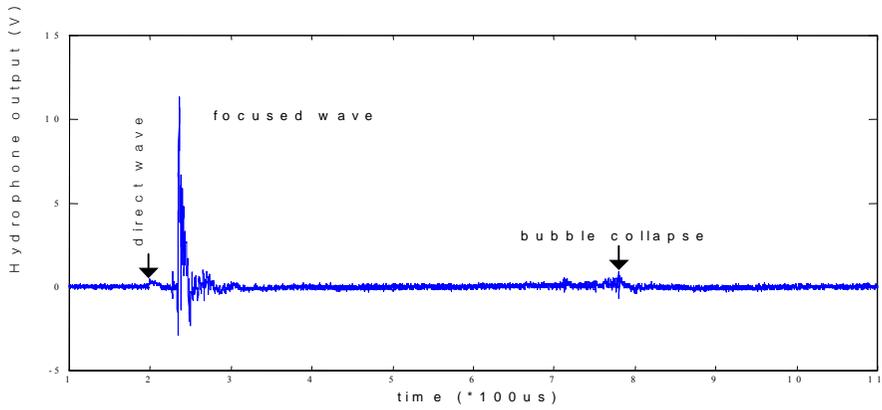
그림 3-4의 하이드로폰 신호로부터, 집중된 고강도 충격파 (focused wave)가 기록되기 40 μs 전, 1차 압력파 (direct wave)를 볼 수 있다. 이것은 방전 전극이 위치한 집속기 타원의 초점 (F1)에서 스파크 방전으로 발생한 spherically diverging wave가 후면의 타원형 반사판에서 반사되지 않고 바로 충격파 초점 위치 (F2)로 도착한 신호이다. direct wave의 크기는 focused wave의 10 % 미만 정도이다.

집속된 고강도 충격파 (focused wave)는 10 μs 정도 기간 동안 지속된다. 전형적으로 고강도 충격파는 매우 짧은 시간동안 (1 μs 이내) 높은 양압 (positive acoustic pressure) 상태를 보낸 후 상대적으로 오랜 시간 동안 음압 (negative acoustic pressure) 상태를 유지한다. 충격파의 중심 주파수는 0.2 MHz 정도이며, 예상할 수 있듯이 이 값은 펄스 파워 공급기 회로의 공진 주파수 (0.168 MHz)와 유사한 값으로 나타났다 (식 2-1 참조).

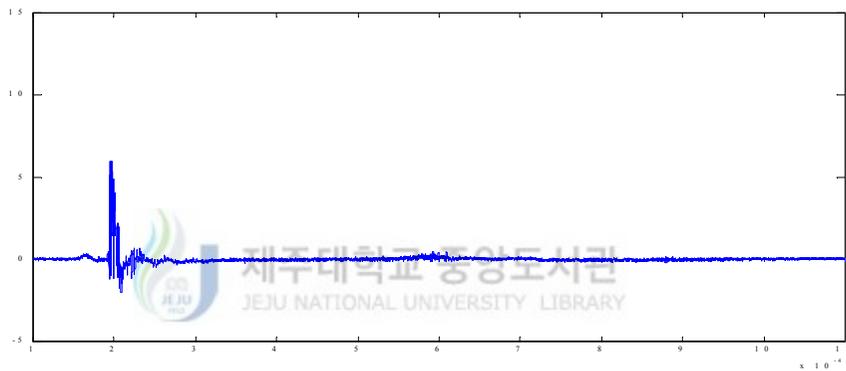


림 3-3 방전 매질에 따른 방전 전압과 방전 전류의 상관성.

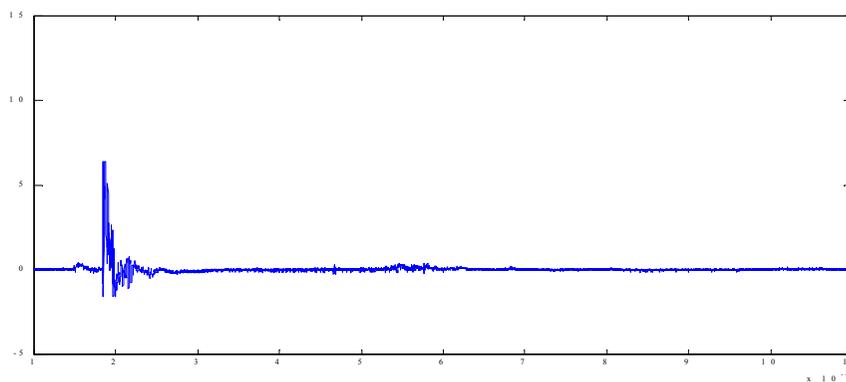
○ 0 % NaCl electrolyte (tap water), ● 1 % NaCl electrolyte,
□ 10 % NaCl electrolyte.



(a)



(b)



(c)

그림 3-4 초점 위치에서 하이드로폰으로 기록한 충격파 파형 (방전 전압 13 kV).

(a) 0 % NaCl electrolyte (tap water), (b) 1 % NaCl electrolyte,

(c) 10 % NaCl electrolyte.

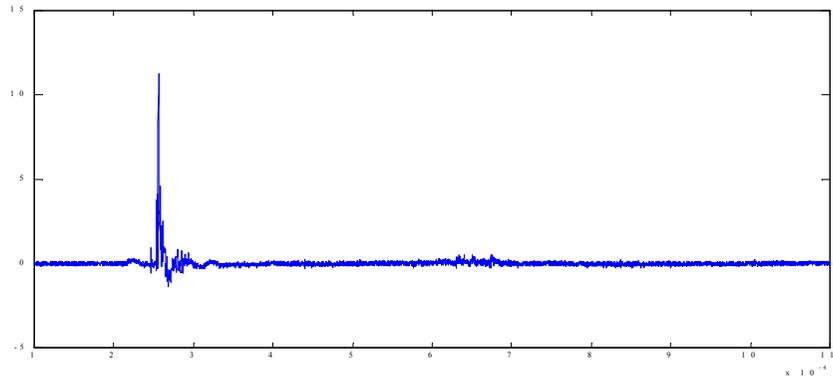
고강도 충격파가 기록된 후 수백 μs 이상의 시간이 지난 후 일련의 추가적인 충격파가 기록이 되고 있는데 이는 충격파에 의해 야기된 기포군이 파열하면서 방출하는 음향 신호라 할 수 있다 (Choi et al 2001).

방전 전압에 따른 충격파 파형의 변화는, 방전 매질이 tap water에 대해, 그림 3-5에서 보여 주고 있다. 방전 전압의 크기가 커질수록 충격파의 최대 압력 (P_+ , P_-)은 상승하고 있으며, 기포군 파열 지연 시간 (t_c)이 길어지고 있음을 볼 수 있다. 충격파의 최대 압력 P_+ 는 방전 전압 13 kV에서 50 MPa (대기압의 500 배)를 상회하는 것으로 나타났다. 참고로 그림 3-4a 와 그림 3-5b는 동일한 경우에 대한 신호이다.

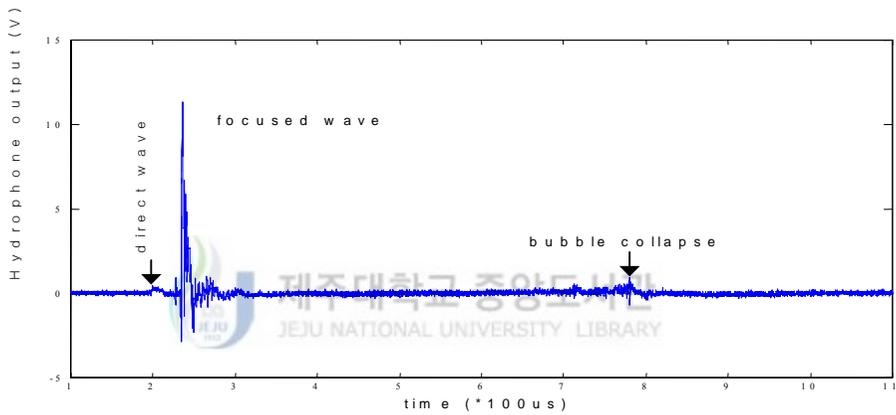
3.2.2 충격파 압력 (P_+ , P_-)

방전 전압이 증가함에 따라, 충격파 초점 부위에서 측정된 충격파의 압력 (P_+ , P_-)은 그림 3-6에서 보여 주고 있다. 일반적으로 충격파의 압력은 방전 전압이 증가함에 따라 증가하고 있다. 방전 전압이 낮을 경우 (9 kV) 충격파의 최대 양압 (peak positive pressure P_+)은 tap water (0 % NaCl 전해질) 방전에서 가장 높고, 1 % NaCl 전해질, 10 % NaCl 전해질 방전 순으로 낮아지지만, 방전 전압이 높아짐에 따라 10 %, 1 %, 0 % 순으로 P_+ 가 급격히 높아지고 있다. tap water에서 방전할 경우 P_+ 는 방전 전압이 증가하면 증가하다가, 방전 전압 13 kV이후에는 오히려 감소하고 있다.

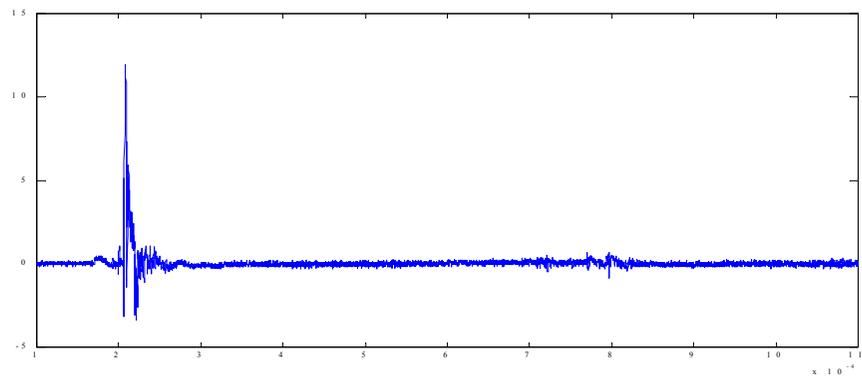
충격파의 최대 음압 (peak negative pressure P_-)은 10 % NaCl electrolyte에서 방전 전압이 증가함에 따라 증가하고 있지만, 0 %와 1 % NaCl electrolyte인 경우 방전 전압 13 kV까지는 감소하다가 다시 증가하는 형태를 보이고 있다. 동일한 설정 하에서 충격파간의 P_+ 와 P_- 값의 변화는 tap water에서 방전할 때 매우 크며 (평균치의 30 % 정도), NaCl electrolyte에서 방전할 때는 매우 작아지고 있음을 볼 수 있다 (10 % NaCl electrolyte인 경우 평균치의 5 % 이내).



(a)



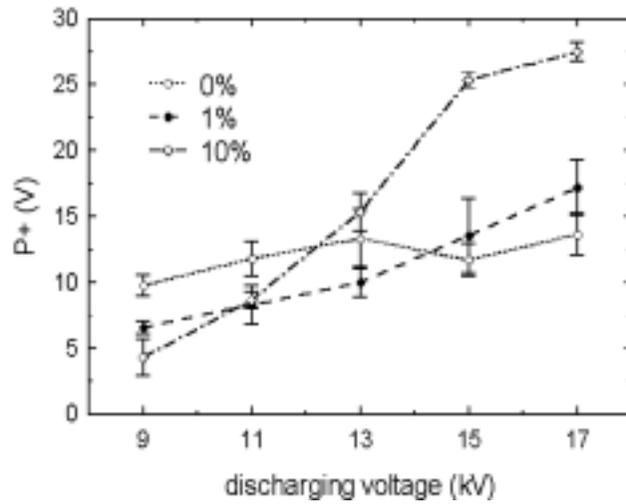
(b)



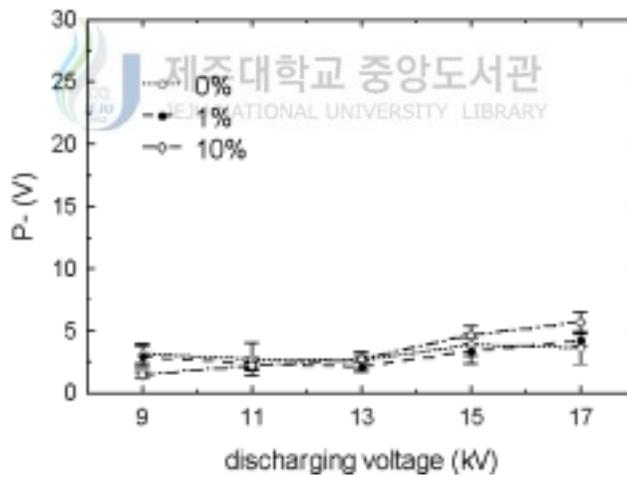
(c)

그림 3-5 방전 전압에 따른 하이드로폰으로 측정된 초점 위치에서 충격파 파형의 변화 (방전 매질: tap water).

(a) 방전 전압 11 kV, (b) 방전 전압 13 kV, (c) 방전 전압 15 kV



(a)



(b)

그림 3-6 방전 전압에 따른 충격과 압력의 변화. 방전 매질:

○ 0 % (tap water), ● 1 % NaCl electrolyte,

◇ 10 % NaCl electrolyte.

(a) 최대 양압 P+, (b) 최대 음압 P-.

3.3 충격파 발생기의 소음 특성

3.3.1 음압 수준

그림 3-7은 방전 전압에 따른 음압 수준 (Sound Pressure Level : SPL) 값의 변화를 보여 주고 있다. 일반적으로 음압 수준은 방전 전압이 증가함에 따라 증가하고 있다. 증가율은 tap water와 1 % NaCl electrolyte 에서 방전할 때는 서로 유사하지만, 10 % NaCl electrolyte 경우에는 상대적으로 더 높게 나타났다. 동일한 설정에서, SPL 변화의 폭은, NaCl electrolyte 경우 tap water 보다 작으며 (평균값의 5 % 이내), 10 % NaCl electrolyte 에서 가장 좁은 것 (평균값의 1 % 이내)으로 나타났다.

3.3.2 음압 수준과 충격파 압력의 상관성

그림 3-8은 충격파 압력 P_+ 와 충격파 발생시 음압 수준 SPL과의 관계를 보여 주고 있다. 그림 3-8a는 tap water (0 % NaCl electrolyte)에서 방전할 때이고, 그림 3-8b는 1 % NaCl electrolyte, 그림 3-8c는 10 % NaCl electrolyte에서 방전할 때이다. P_+ 와 SPL의 상관성은 10 % NaCl 전해질에서 가장 높으며, 1 % NaCl 전해질, tap water 순으로 낮아지고 있다.

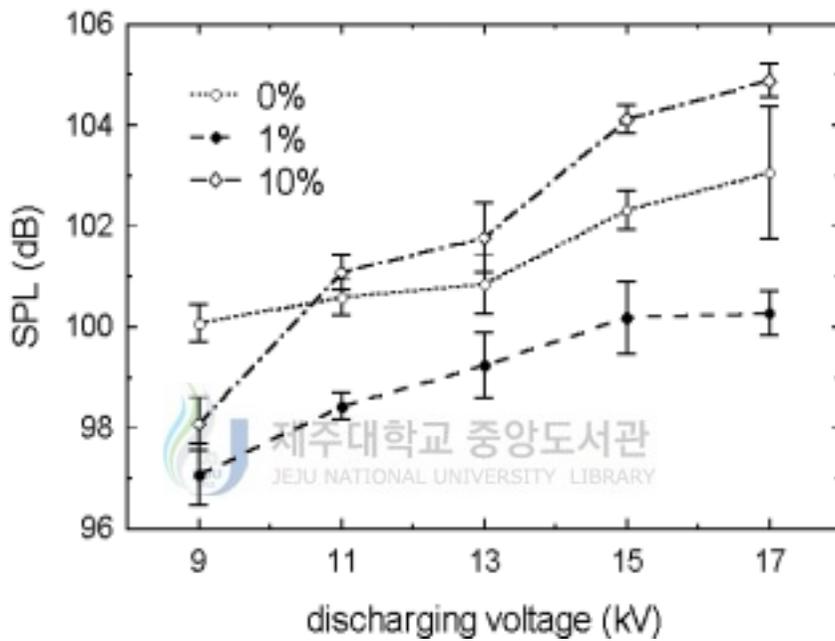
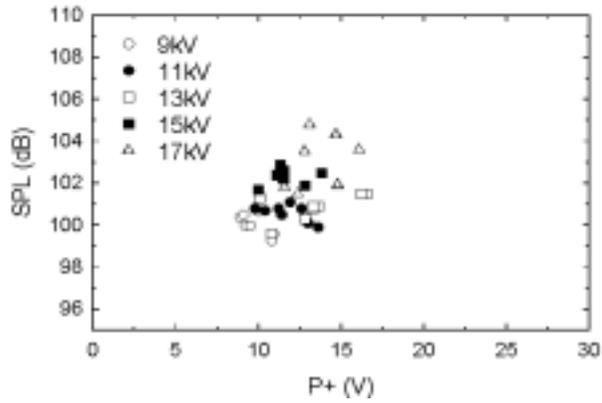
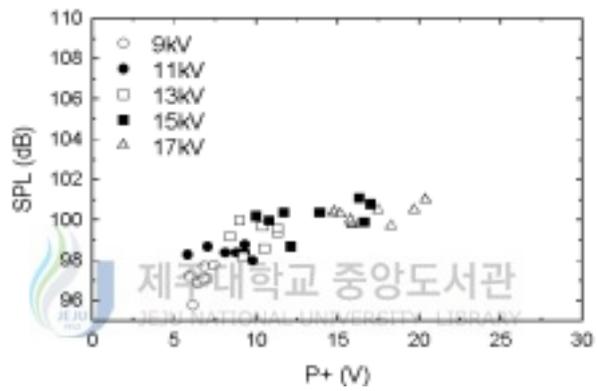


그림 3-7 방전 전압과 충격파 발생시 소음 수준 SPL의 관계

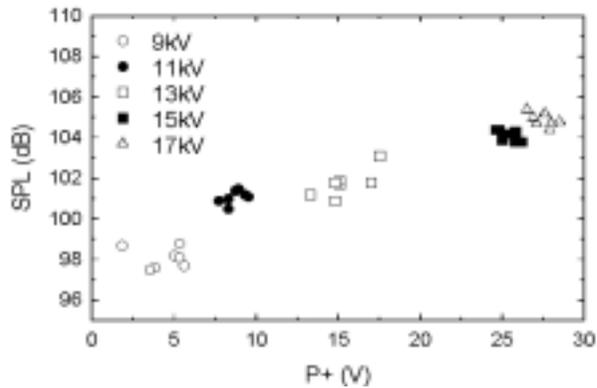
- 0 % NaCl electrolyte (tap water),
- 1 % NaCl electrolyte,
- ◇ 10% NaCl electrolyte).



(a)



(b)



(c)

그림 3-8 충격파 압력 (P_+)과 음압 수준 SPL의 상관성

(a) 0 % NaCl electrolyte (tap water),

(b) 1 % NaCl electrolyte, (c) 10 % NaCl electrolyte.

3.4 결석 분쇄 효율 평가

3.4.1 충격파에 의한 결석 분쇄 과정

그림 3-9는 초점에 위치한 모의 결석 (30W*30L*15D in mm)에 충격파를 조사하면서 분쇄 과정을 사진으로 보여 주고 있다. 그림은 방전 매질을 tap water로, 방전 전압은 13 kV로 설정한 경우이다. 충격파에 가해진 결석의 표면에서 음향 공동 현상으로 야기된 수많은 표면 손상 (pit erosion)을 쉽게 관찰 할 수 있다. 초점에 위치한 부위는 움푹 패인 정도가 주변과 확실히 대비되어 보여주고 있다.

충격파 조사 횟수가 증가할수록 모의 결석의 분쇄 깊이가 커지고 있으며, 그림에서 충격파가 1,700회 이상 조사 될 경우 모의 결석에 구멍이 나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 충격파 조사 횟수가 증가하더라도 결석이 분쇄되는 표면의 영역의 크기는 크게 변화하지 않고 있다. 그림 3-10에서 볼 수 있듯이 충격파 조사 횟수가 500회 이상에서는 충격파 조사 횟수가 증가해도 표면의 분쇄 영역 크기는 거의 증가하지 않고 있다. 표면의 분쇄 영역의 크기는 충격파장의 focal volume의 cross-sectional area에 의해 결정된다. 그림 3-10으로부터 focal volume cross sectional area는 직경이 15 mm 정도의 범위를 가지는 것으로 추정할 수 있다.

3.4.2 방전 매질의 효과

그림 3-10은 방전 매질을 변화하면서, 동일한 설정 (방전 전압 15 kV, 충격파 500회 조사)하에서 결석 분쇄 형태를 비교하고 있다. 1 % NaCl electrolyte에서 방전하는 경우 tap water 경우 보다 결석의 분쇄 면적이 넓고 분쇄 정도가 크게 나타났다. 10 % NaCl electrolyte의 경우에는 분쇄 면적은 tap water와 1 % NaCl 전해질 경우의 중간 정도이나, 분쇄 깊이는 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 그림 3-6에서 보여주고 있는 것처럼, 충격파 압력이 10 % NaCl electrolyte의 경우 가장 큰 값을 보이는 것과 밀접한 관련성을 가지는 것으로 해석될 수 있다.

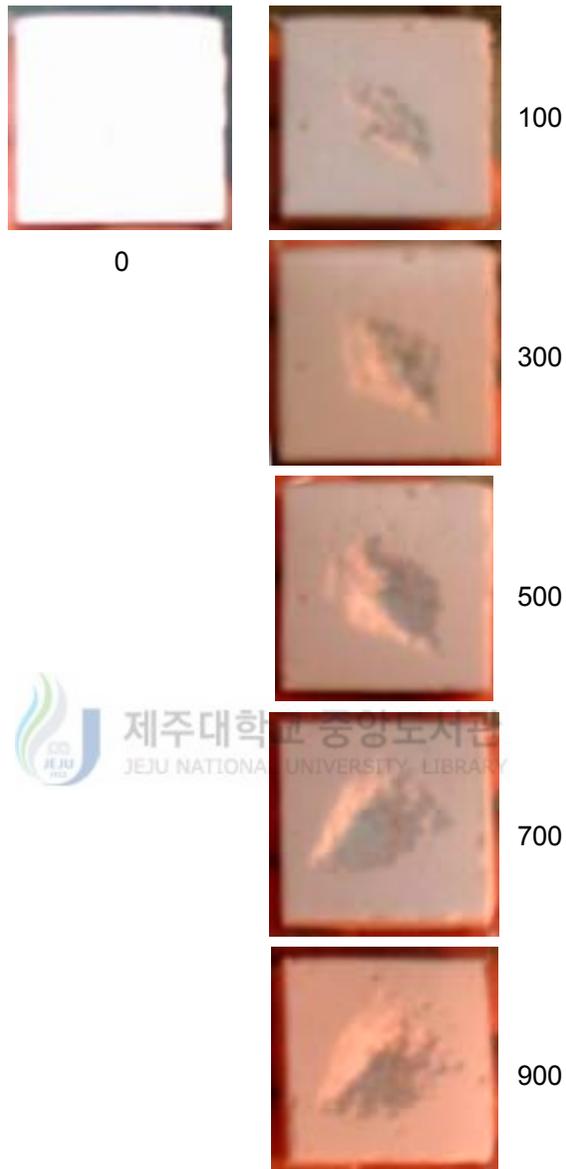


그림 3-9 충격파 조사 횟수 (0 - 900회)에 따른 모의 결석 (30W*30L*15D in mm)의 분쇄 과정 (방진 전압 13 kV, 방진 매질: tap water).

(뒤로 계속)



(앞면에서 계속)

그림 3-9 충격과 조사 횟수 (0 - 900회)에 따른 모의 결석 (30W*30L*15D in mm)의 분쇄 과정 (방전 전압 13 kV, 방전 매질: tap water). back: 1,900번 충격과 가격 후 파괴된 모의 결석의 후면.



(a)



(b)



(c)

그림 3-10 방전 매질에 따른 모의 결석 (30W*30L*15D in mm) 표면의 파쇄 형태
(방전 전압 15 kV, 충격파 500회 조사).

(a) tap water, (b) 1% NaCl electrolyte, (c) 10% NaCl electrolyte

3.5 결석 분쇄 과정의 음향 신호 특성

그림 3-11은 모의 결석에 충격파를 조사할 때 마이크로폰으로 측정된 음향 신호의 예를 보여주고 있다 (방전 매질 1 % NaCl electrolyte, 방전 전압 13 kV). 그림에서 볼 수 있듯이 시간 영역에서는 신호는 서로 비슷하며 각각의 차이점 및 특성을 분석하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 신호의 주파수 특성을 분석하기 위해 AR 모델을 이용하여 신호의 주파수 스펙트럼을 추정하였다.

그림 3-12는 방전 매질 tap water를 사용하는 경우, 모의 결석에 충격파를 조사하면서 일정한 시간 간격으로 측정된 음향 신호 및 주파수 특성을 보여 주고 있다. 그림 3-11a는 결석이 없는 경우이며, 그림 3-11b는 초점 위치에 놓여있는 결석에 충격파를 최초로 조사할 때, 그림 3-11c는 충격파를 700번째 조사할 때 측정된 음향 신호이다. 각각에 대해 AR model (order 30)을 이용하여 추정된 음향 신호의 주파수 특성은 그림 3-11에서 보여 주고 있다. 700번째 충격파가 조사될 때 방출된 음향 신호는 500 Hz 부근에서의 피크는 낮은 주파수 쪽으로 이동하였으며, 에너지도 감소하고 있다. 2,000 Hz 이상의 주파수 영역에서도 피크 주파수는 낮은 쪽으로 이동하고 있으며, 그 에너지도 감소하고 있다.

방전 전압 13 kV에서, 방전 매질에 따른 결석 분쇄 과정에서 방출된 음향 신호의 주파수 특성의 변화는 그림 3-13에 도시되어 있다. 그림 3-13a는 방전 매질 tap water의 경우, 그림 3-13b 와 3-13c는 각각 방전 매질 1 %와 10 % NaCl electrolyte의 경우를 보여준다. 주파수 추정은 AR model (order 20)을 이용하여 수행했다. 예상할 수 있듯이 충격파를 최초로 조사할 때의 신호는 매질에 따라 크게 다르지 않았다. 특히 1st and 2nd spectral peak frequency (500 Hz, 2200Hz)는 거의 동일한 것으로 나타났다. 충격파 조사량이 증가하면서 일반적으로 1st, 2nd and 3rd spectral peak의 크기는 상승하다가 감소하고 있으며 (충격파 300회 조사시 크기가 최대), 주파수는 감소하고 있다. 10 % NaCl electrolyte의 경우, 충격파 조사 횟수가 증가할수록 1st, 2nd spectral peak 성분의 변화가 가장 크게 나타났다. 이는 그림 3-10에서 보여주고 있는 것처럼 결석 분쇄 효과가 가장 크기 때문이라 추정된다. 충격파 조사가 증가하면, tap water의 경우 500 Hz 주파수 성분이, 1 % NaCl 전해질의 경우, 2,200 Hz 주파수 성분의 변화가 가장 크게 나타났다.

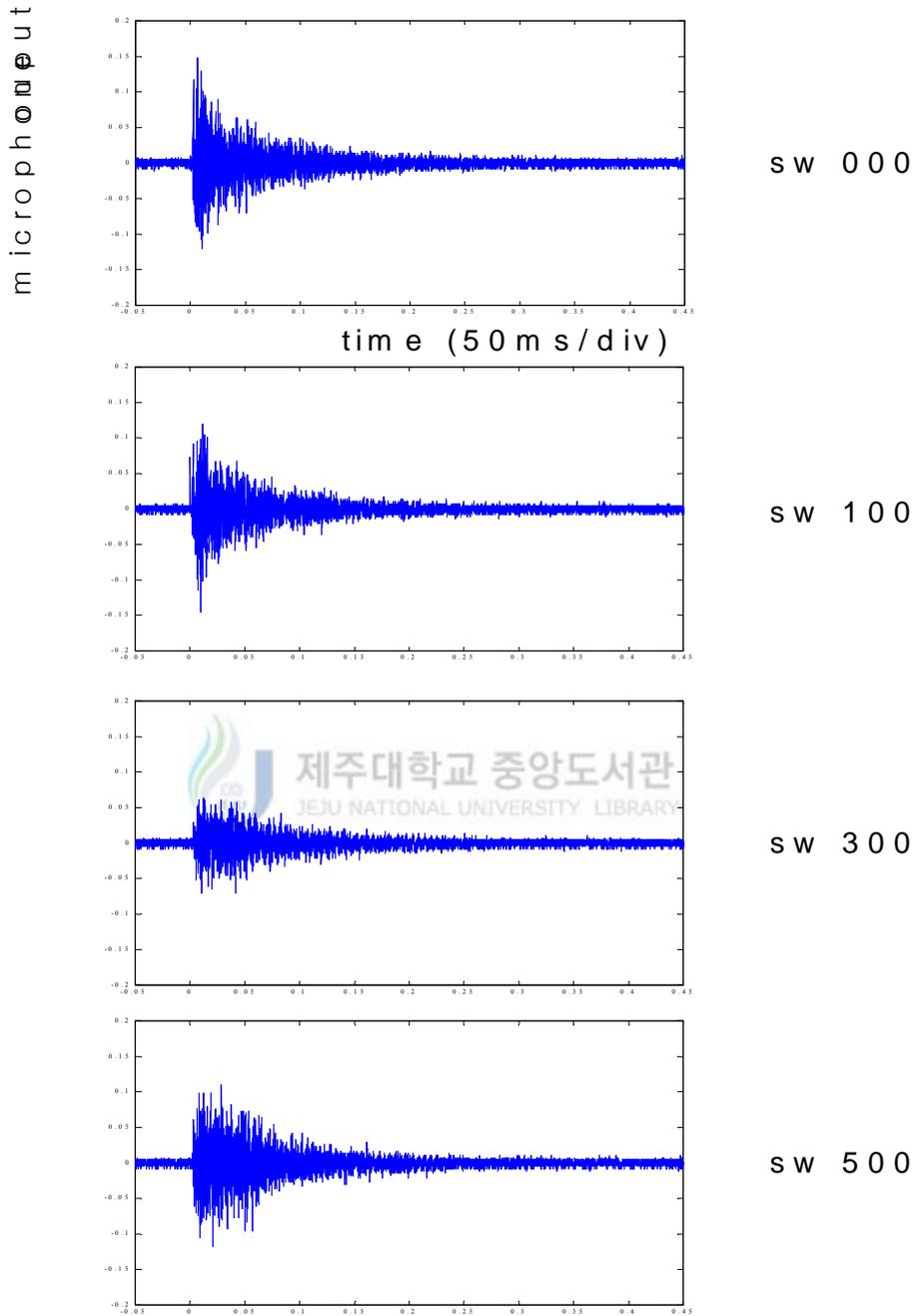
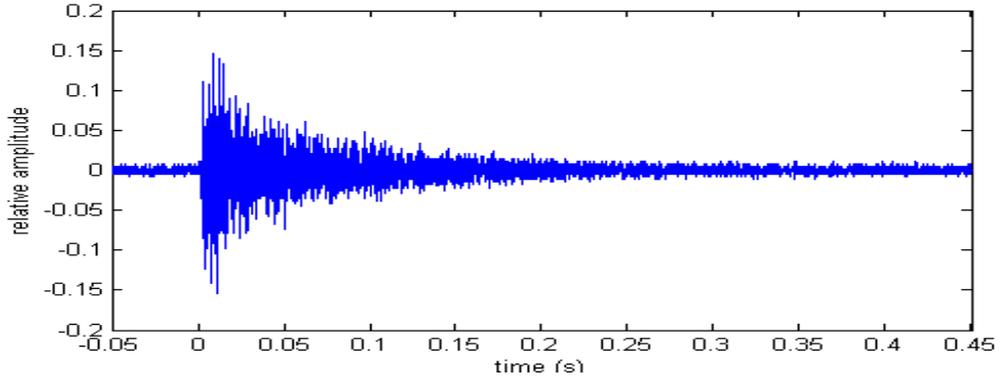
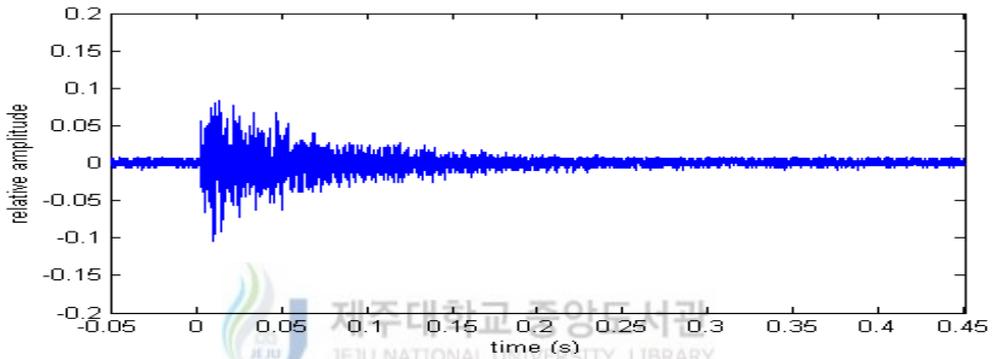


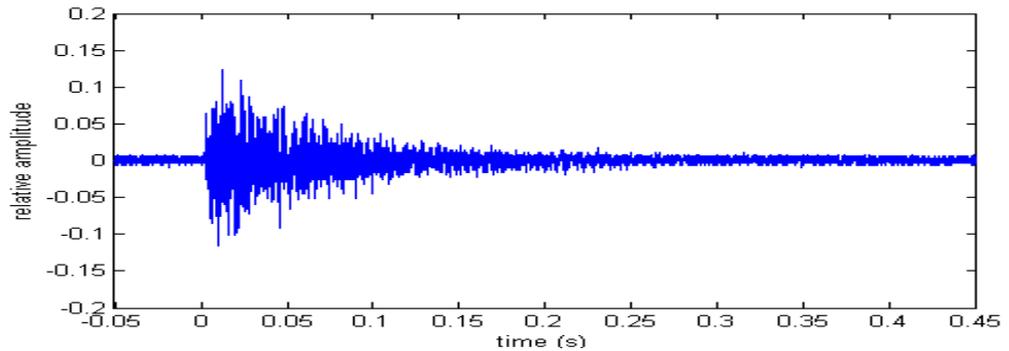
그림 3-11 모의 결석에 충격파를 조사할 때 마이크로폰으로 측정된 음향 신호의 예
(방전 매질 1% NaCl 전해질, 방전 전압 13 kV)



(a)



(b)



(c)

그림 3-12 모의 결석에 충격파를 조사할 때 측정된 음향 신호

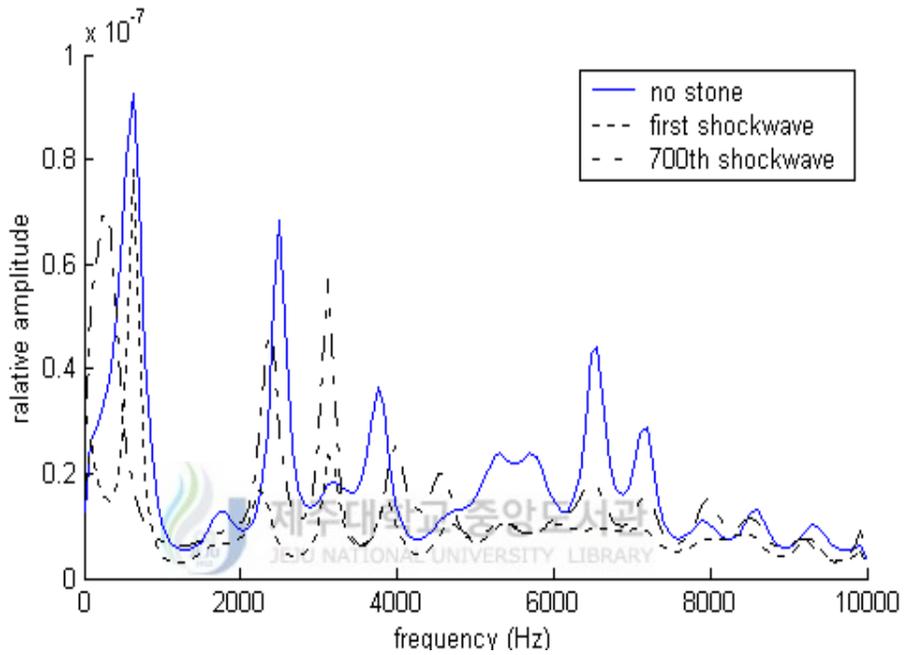
(방전 매질: tap water, 방전 전압: 13 kV).

(a) 결석이 없을 때, (b) 결석에 첫 번째 충격파를 조사할 때,

(c) 결석에 700번째 충격파를 조사할 때.

(d) AR 모델 (차수 30)을 이용한 추정된 스펙트럼 비교

(뒷면에 계속)



(d)

(앞면에서 계속)

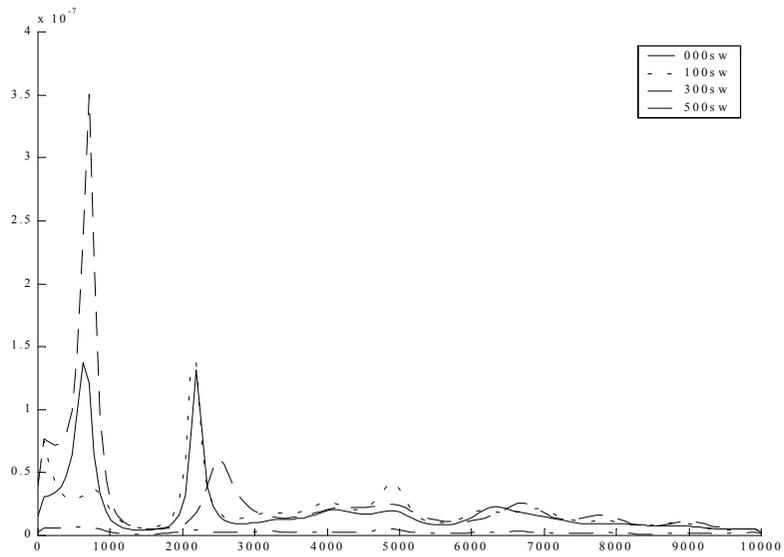
그림 3-12 모의 결석에 충격파를 조사할 때 측정된 음향 신호

(방전 매질: tap water, 방전 전압: 13 kV).

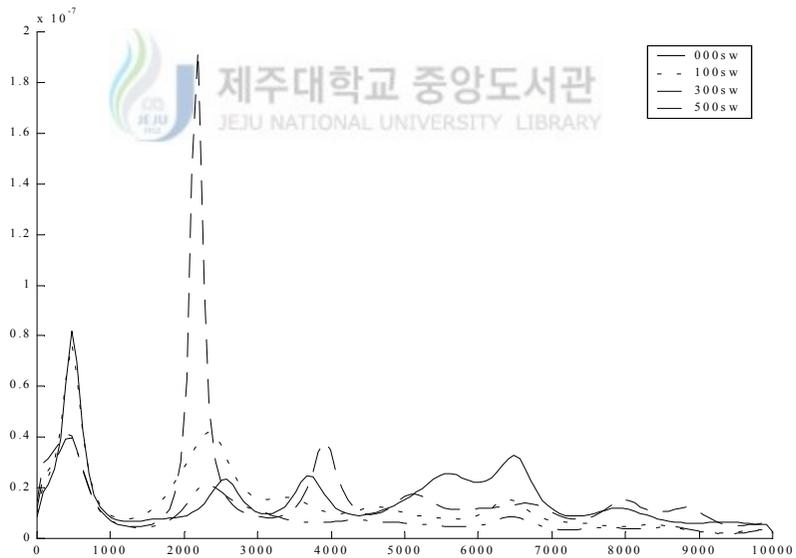
(a) 결석이 없을 때, (b) 결석에 첫 번째 충격파를 조사할 때,

(c) 결석에 700번째 충격파를 조사할 때.

(d) AR 모델 (차수 30)을 이용한 추정된 스펙트럼 비교



(a)

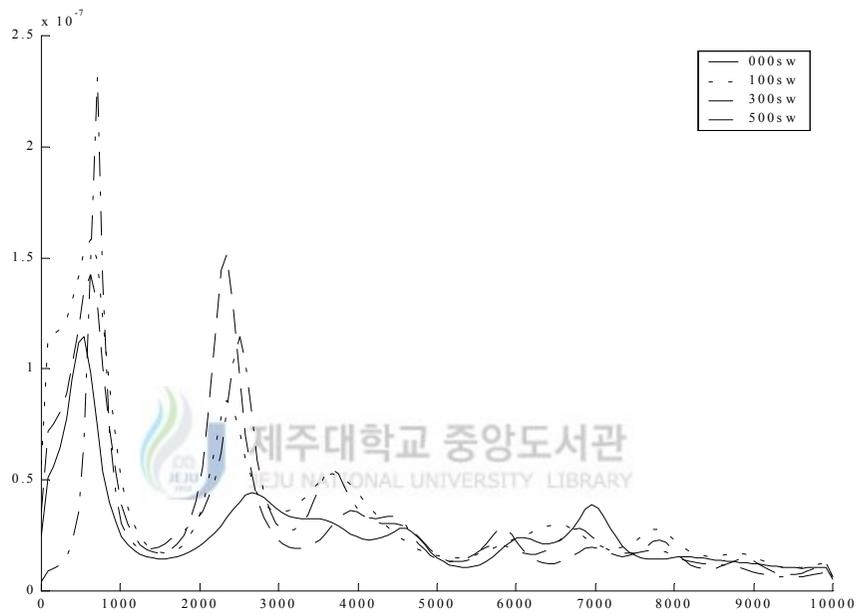


(b)

그림 3-13 모의 결석에 충격파를 조사할 때 방출된 음향 신호를 AR 모델 (차수: 20)을 이용하여 추정한 특성 스펙트럼.

(a) 0 % NaCl electrolyte (tap water), (b) 1 % NaCl electrolyte,

(뒷면에 계속)



(c)

(앞면에서 계속)

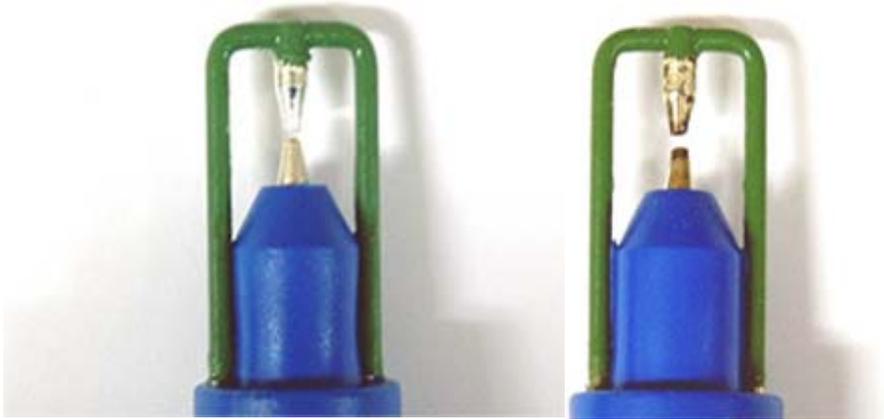
그림 3-13 모의 결석에 충격파를 조사할 때 방출된 음향 신호를 AR 모델
(차수: 20)을 이용하여 추정한 특성 스펙트럼.

(c) 10 % NaCl electrolyte

3.6 전극의 마모

그림 3-14는 방전 전압 13 kV에서, 방전 매질 변화에 따른 충격과 발생 후 전극의 마모 상태를 비교하고 있다. 충격과 발생전의 전극 (intact) 간격은 0.8 mm 이었다. 방전 매질 tap water에서 700회 충격과 발생 후, 전극의 간격은 1.4 mm, 1 % NaCl electrolyte에서 613회 충격과 발생 후에는 1.1 mm, 10 % NaCl electrolyte에서 600회 충격과 발생 후에는 1 mm 로 나타났다. 방전 매질 tap water에서 전극의 마모가 가장 크게 발생했으며, NaCl electrolyte에서 마모는 상대적으로 매우 작은 것을 확인할 수 있었다.





intact

Water sw 700



1% NaCl sw 613

10% NaCl sw 600

그림 3-14 방전 매질에 따른 충격과 발생 후 전극의 마모 상태 비교
(방전 전압 13 kV)

3.7 고찰

방전 매질 tap water에서는 방전 스위칭 시점과 스파크 발생 사이에 시간 지연이 존재하는 것으로 확인되었다. 방전시간 지연은 tap water에 잠겨있는 전극 사이의 저항이 매우 크기 때문이다. 시간 지연의 크기는 방전 전압이 클수록 작아지기는 하지만, 변화의 폭은 매우 크게 나타났다. 이는 tap water에서 스파크 발생이 매우 불안정하다는 것으로 이해할 수 있다. tap water에서는 스파크 방전의 불안정성으로 인해 충격파의 shot to shot variation (STSV)은 매우 크게 나타났다 (30 % 정도, 그림 3-6 참조). 스파크 방전의 세기 및 위치의 미세한 변화는 충격파가 집중되는 초점 부위에 매우 크게 증폭되어 영향을 주기 때문에, 초점 부위에서의 충격파의 STSV는 매우 크게 변하게 된다.

방전 매질 tap water 대신 NaCl electrolyte를 사용할 경우 (예를 들어 농도 1 % 이상에서) 방전 스위칭과 스파크 방전은 동시에 발생한다 (그림 3-1 참조). NaCl electrolyte 농도가 1 % 경우에는 전류의 파형이 tap water의 경우와는 크게 다르지 않지만, 스파크 방전은 tap water에서 보다는 안정적이라 할 수 있다. NaCl electrolyte 농도가 10 % 경우에는 전류의 크기와 life time이 현저히 짧아지고 있으나, 발생된 충격파의 크기는 tap water나 1 % NaCl electrolyte에서 보다 오히려 증가하고 있는 것으로 나타났다 (그림 3-6 참조). 충격파 압력의 STSV는 NaCl electrolyte 방전에서 현저히 낮아지고 있음을 확인했고, NaCl electrolyte의 농도가 증가함에 따라 낮아지는 것으로 나타났다. 선형 회로 이론으로는 최적의 방전 저항은 충격파 발생기 RCL 회로의 공진 조건을 만족하는 저항값 (실험에서 사용된 충격파 발생기의 경우 2 Ω)이라 할 수 있다. NaCl electrolyte로 전극간의 저항을 2 Ω으로 하기 위해서는 (그림 2-4를 외삽 하면) 농도가 50 % 이상 되어야 하고, 이러한 농도를 실험적으로 만들기 어렵기 때문에, 본 실험에는 포함하지 않았다. 또한 충격파 발생기는 고 전압을 사용하는 경우이므로 선형 회로 이론이 그대로 적용되지 않으며, 이에 대한 상세한 해석은 본 연구의 범위를 벗어나는 것으로 포함하지 않았다. 본 실험의 결과로부터 충격파 발생의 안정성을 유지하면서 최대의 충격파 압력을 얻기 위한 최적 전극 저항은 대략적으로 2-10 Ω 부근일 것으로 추정된다. NaCl electrolyte를 사용할 경우 농도 5 - 50 % 부근의 값이라 할 수 있다 (그림 2-4 참조) 측정된 충격파의 shock front는 하이드로폰의 수신 주파수 반응 특성의 제약 때문에 평활화 되어 있음에 주의해야 한다. 이상적인 하이드로폰의 주파수 반응 특성은 모든 주파수 대역에서 일정한 감도를 가져야 한다. 고가의 막형 하이드로

폰 (Sonic Technology Ltd. 가격: 1천만원 정도)은 주파수 반응 특성이 바늘형 보다 광범위하기 때문에 (upto 50 MHz) 충격파 파형을 좀더 정확히 기록할 수 있다. 막형 하이드로 폰을 이용한 초기 실험에서 충격파에 의해 야기된 공동 현상으로 손상되고 말았다. 따라서 본 실험에서는 주파수 특성은 제한되어 있지만 (그림 2-6 참조), 상대적으로 저가형 (300 백만원 정도)인 바늘형 하이드로폰으로 대체하였다.

충격파 측정에 사용된 바늘형 하이드로폰은 상당히 제한된 주파수 영역 (10 MHz 이하)을 가지고 있으므로 (그림 2-6) 하이드로폰을 통해 측정된 충격파는 실제 충격파와 상당한 오차를 보이게 된다 (Harris 1990). 충격파의 shock front는 높은 주파수 성분 (수십 - 수백 MHz)의 에너지가 집중되어 있는 곳이기 때문에 충분한 고주파 성분을 감지하지 못하는 하이드로폰에서는 날카로운 충격파형 (shock wave with a well developed shock front)을 얻을 수가 없다. shock front가 평활화 되어 있는 충격파로부터 측정된 P+의 값은 실제 값보다 작은 값 (underestimated value)이다. 따라서 그림 3-6에서 보여주는 P+ 값은 실제값보다 낮은 값이라 할 수 있다.

반면, P- 값은 낮은 주파수 (충격파의 중심 주파수 0.2 MHz 정도 부근) 성분에 의해 영향을 받기 때문에, 이 주파수 영역에서 하이드로폰의 주파수 반응 특성은 상대적으로 좋지 때문에 측정 오차가 P+ 값 보다는 훨씬 낮다고 할 수 있다.

충격파를 측정하기 위해 사용한 바늘형 하이드로폰에 카스터 기름을 이용한 보호층을 설치하였다. 카스터 기름에서는 공동 현상이 잘 발생하지 못하므로 공동 효과에 의한 하이드로폰의 손상을 최소화 할 수 있다. 카스터 기름의 보호층을 사용할 경우 하이드로폰 수명을 수십 배 가량 늘릴 수 있을 것으로 예상하고 있다. 실제로 본 실험에서 천번 이상의 충격파를 측정하였지만 아직도 하이드로폰 센서는 손상되지 않은 상태이다. 부가적으로 카스터 기름에서는 매우 낮은 음압(P-)에도 파열하지 않고 견딜 수 있으므로 물에서 측정할 때 보다 카스터 기름 층을 가진 하이드로폰에서는 더 낮은 음압 (P-)의 측정이 가능하다. 일반적으로 물 속에서 측정할 수 있는 최대 P- 값은 -10 MPa 정도로 알려져 있다

충격파 발생시 방출되는 소음 수준 SPL은 방전 매질 tap water에서는 100 - 106 dB정도의 범위를 가지는 것으로 나타났다. NaCl electrolyte에서는 SPL의 크기가 감소하고 있었으며, 1 % NaCl 전해질의 경우 대부분 100 dB 이하의 값을 보였다 (그림 3-8 참조). 흥미 있는 사실은 tap water 방전에서는 SPL의 값과 충격파 압력 (P+)의 상관성이 거의 없으나, 10 % NaCl electrolyte 방전에서는 SPL과 P+와 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다.

모의 결석 분쇄 실험을 통해 충격파에 의한 파쇄 형태를 관찰할 수 있었다. 방전 매질 tap water에서 충격파에 1,700회 정도 노출되면 두께 15 mm의 모의 결석에 구멍이 뚫리는 것을 볼 수 있었다. 방전 매질이 10 % NaCl electrolyte인 경우 동일한 충격파 조사량에 대해 분쇄 깊이가 현저하게 증가하는 것으로 나타났다 (그림 3-9, 10 참조). 방전 매질이 NaCl electrolyte인 경우 (특히 1%인 경우) 결석 분쇄 면적이 tap water인 경우보다 넓어지고 있는데 (그림 3-10 참조), 이는 방전의 불안정성, 전극의 dislocation 등의 이유로 인한 defocusing effects에 의해 focal area가 확장된 것으로 추정된다. 분쇄 면적 크기는 10 % NaCl electrolyte와 tap water에서 큰 차이를 보이지 않고 있기 때문에, 1 % NaCl electrolyte에서 결석 분쇄 면적이 넓어진 것은, 실험상의 오차일 가능성도 배제 할 수는 없다.

결석 분쇄 실험을 진행하면서 충격파가 결석을 가격할 때 발생한 가청 음 대역 (2 kHz 이하) 음향 신호를 측정하였다. 결석 분쇄가 진행됨에 따라 측정한 음향 신호의 주파수 스펙트럼은 1st and 2nd spectral peak frequency 에서 유의한 변화를 관찰할 수 있었다 (그림 3-13 참조). 결석 분쇄 상태와 방출되는 음향학적 특성을 상세히 파악하기 위해서는 추후 다양한 형태의 결석 분쇄 과정에 대한 음향 신호의 측정을 통해 충분한 자료의 확보가 요구된다.

일정량의 충격파 발생 후 관찰한 전극의 마모 상태는, 방전 매질 tap water에서 심하게 나타났으며, NaCl electrolyte 방전에서는 미미한 것으로 관찰되었다. 전극의 마모는 전극의 수명을 단축시키는 한편, 스파크 방전 위치의 변화를 초래하게 되어 충격파의 집속 효율을 크게 저하 (defocusing effects) 시킨다. (그림 1-4 참조). 따라서 전해질에서의 방전은 전극의 수명을 연장할 뿐 아니라 defocusing effect를 방지하는데 기여하게 된다.

IV. 결론

체의 충격과 쇄석술에 사용되고 있는 전기 수력학적 충격과 발생기는 발생된 충격과 안정성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 이는 수중 방전 저항이 너무 크기 때문에 (5,000 Ω 정도), 스파크 발생이 어려우며, 불안정하고, 반복성이 떨어지기 때문이다. 본 연구에서는 전해질을 방전 매질로 사용하여 스파크 방전의 안정성을 유지하면서 충격과 발생 효율을 높이는 방안을 제안하였다.

실험에서는 0 % (tap water), 1 %, 10 % NaCl electrolyte를 방전 전해질로 사용하여 발생된 충격과의 특성을 평가하였다. 방전 매질 tap water에서는 스파크 발생이 방전 스위치 신호와 시간 지연을 두고 발생하지만, 방전 매질 NaCl electrolyte에서는 스위치 신호와 동시에 스파크가 발생되었다. 방전의 용이성으로 인해 스파크 발생의 안정성이 현저히 개선되었음을 확인할 수 있었다. 발생된 충격과 안정성 지표인 STSV (shot to shot variation, relative to mean value)은 tap water 방전에서 30 % 정도로 가장 높고 1%, 10 % NaCl electrolyte에서는 각각 20%, 5%로 낮아졌다.

전해질 방전에서 발생된 충격과 압력은 tap water 방전에서 보다 상승하고 있는 것으로 나타났다. 방전 전압이 높아질수록, NaCl의 농도가 높을수록 더욱 크게 상승하고 있다. 예를 들어, 10 % NaCl electrolyte 에서, 방전 전압 17 kV 일 때, 충격과의 압력 P+는 tap water 경우 보다 250 % 가량 상승하였다. 결석 분쇄 및 충격과의 생물학적 효과에 중요한 역할을 하는 기포군 파열 강도 (tc) 역시 tap water 경우보다 20 % 가량 상승하고 있다. 결석 분쇄 효율도 현저히 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

전해질에서의 방전은 충격과 안정성 및 특성을 개선할 뿐 아니라 전극의 마모를 줄이는 것으로 나타났다. 이는 전극의 수명을 연장하는 효과 이외에도 전극의 간격의 변화로 인한 defocusing effect를 최소화한다.

충격과 발생 과정에 방출되는 소음 수준 SPL의 값은 tap water 방전의 경우 최소 100 dB 이상으로 나타났다. 그러나 1 % NaCl electrolyte 방전에서는 최대 100 dB 이하로 감소하였다. 특히 사항으로, 전해질 10% NaCl electrolyte 방전에서는 충격과 압력과 소음 수준의 상관성이 매우 높게 나타났다.

요약하면, 전해질 방전을 통하여 전기 수력학적 충격과 발생기의 안정성을 획기적

으로 개선할 수 있음을 보였다. 아울러 전해질 방전으로 충격파의 압력이 획기적으로 증가하였으며 (최대 250%), 결석의 분쇄 효율이 상승했고, 전극의 마모가 감소했으며, 발생기 소음은 전해질의 농도에 따라 약간 상이하게 나타났다. 본 실험에서 구성한 충격파 발생 장치의 경우, 방전 저항이 7Ω 인 10% NaCl electrolyte (통상 2-10 Ω 사이에서 50- 5 % NaCl electrolyte)에서 최적 충격파 발생 조건을 찾을 수 있는 것으로 추정되었다.

기존의 tap water와 방전 전해질 (10% NaCl electrolyte) 방전을 통해 발생된 충격파의 안정성 및 성능과 관련된 중요 항목을 요약하여 비교하면 표 4-1과 같다.

본 연구에서 제안하는 전해질 방전을 통한 충격파 발생을 통해 전기 수력학적 충격파 발생기를 채용하고 있는 체외 충격파 쇄석기의 안정성 확보 및 획기적인 성능 개선이 가능할 것으로 기대된다. 전해질 방전을 통해 발생된 충격파의 임상적인 효과를 검증하는 추가적인 연구와 전해질의 농도를 좀더 세밀하게 하여 충격파형의 최적조건을 찾는 연구가 요구되고 충격파의 압력을 측정하는 연구도 있어야 할 것으로 사료된다.



표 4-1 물 (tap water)과 전해질 (10 % NaCl electrolyte) 방전 매질에서 발생된 충격파의 안정성 및 성능 비교

factors	discharging through water (present)	discharging through electrolyte (proposed)	property
spark medium	tap water	10 % NaCl electrolyte	-
discharging resistance	5,000 ohm	7 ohm	stability
shot to shot variation (P+)	30 %	≤ 5 %	stability
focal pressure	-	upto 250 % increased	performance
fragmentation rate	-	50 % increased	performance
acoustic noise level	> 102 dB	> 104 dB	performance
electrode wear	-	60 % decreased	performance

참고 문헌

Brossard, J. 1970. Ondes de choc spheriques divergentes produites par L'explosion d'un filmetallique dans l'air. Journal de Mecanique. 9(3). 403-428.

Chaussy, C. G. and Fuchs, G.J. 1989. Current state and future developments of noninvasive treatment of human urinary stones with extracorporeal shock wave lithotripsy. The Journal of Urology. 141. 782-788.

Chaussy, C. G., Brendel, W. and Schmiedt, E. 1980. Extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves. Lancet. 13. 1265-1268.

Choi, M. J., Lee J. S., Kim, S. S., Cho, S. C., Yang, H. S., Son, J. S and Chun, W. G. 2001. Acoustic properties of a domestic extracorporeal shock wave lithotripter. J. Research Institute of Advanced Technology. 12(2). 55-60.

Choi, M. J. 2001. Precise determination of the cavitation activity caused by a lithotripsy field using a wavelet transformation. Proceedings of the Physics and Technology of Medical Ultrasound. 26-28 March 2001. York. UK

Choi, M. J. 1999. Cavitation suppression effects by the modification of the spectral characteristics of high intensity focused ultrasound. Journal of the Acoustical Society of Korea. 18(5). 68-77.

Choi, M. J. and Park, K. C. 1996. private communication.

Choi, M. J. and Coleman, A. J. 1995. A non-invasive measurement of acoustic emission from cavitation in human tissue undergoing extracorporeal shock wave lithotripsy. Proceedings of the Acoustical Society of Korea. 14(1s). 19-23.

Choi, M. J. 1993. Physical characteristics of the acoustic fields used in extracorporeal shock wave lithotripter. KOFST. 1991-1997.

Choi, M. J. 1993a. Theoretical aspects of high amplitude pulsed ultrasound used in lithotripsy. Technical notes and research briefs. J. Acoustical Society America. 93(4). Pt.1. 2244.

Choi, M. J., Coleman, A. J. and Saunders, J. E. 1993. The influence of fluid properties and pulse amplitude on bubble dynamics in the field of a shock wave lithotripter. Physics in Medicine & Biology. 38(11). 1561-1573.

Choi, M. J. 1992. Physical aspects of high amplitude pulsed ultrasound used in lithotripsy. PhD Thesis. University of Bath. Bath. England.

Choi, M. J. and Cathignol, D. 1991. private communication.

Chuong, C. J. C., Zhong, P. and Preminger, G. M. 1992. A comparison of stone damage caused by different modes of shock wave generation. The Journal of Urology. 148. 200-205.

Cleveland, R. O., Sapozhnikov, O. A., Bailey, M. R. and Crum, L. A. 2000. A dual passive cavitation detector for localized detection of lithotripsy-induced cavitation in vitro. J. Acoustic. Soc. Am. 107(3). 1745-1758.

Coleman, A. J., Choi, M. J. and Saunders, J. E. 1996. Detection of acoustic emission from cavitation in tissue during clinical extracorporeal lithotripsy. Ultrasound in Medicine & Biology. 22(8). 1079-1087

Coleman, A. J., Choi, M. J., Saunders, J. E. and Leighton, T. G. 1992. Acoustic emission and sonoluminescence due to cavitation at the beam focus of an electrohydraulic shock wave lithotripter. Ultrasound in Medicine & Biology.

18(3). 267-281.

Coleman, A. J., Choi, M. J. and Saunders, J. E. 1991. Theoretical predictions of the acoustic pressure generated by a shock wave lithotripter. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 17(3). 245-255.

Coleman, A. J., Saunders, J. E. and Choi, M. J. 1989. An experimental shock wave generator for lithotripsy studies. *Physics in Medicine & Biology*. 34(11). 1733-1742.

Coleman, A. J., Saunders, J. E., Crum, L. A. and Dyson, M. 1987. Acoustic cavitation generated by an extracorporeal shock wave lithotripter. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 13. 69-76.

Cornel, E. B., Smits, G. A. H. J., Debryne, F. M. J., Heerschap, A., Schalken, J.A. and Oosterhof, G. O. N. 1995. The effects of successive high-energy shock wave tumor administration on tumor blood flow. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 21(2). 243-248.

Harris, G. R. 1990. Lithotripsy pulse measurement errors due to non-ideal hydrophone and amplifier frequency response. 1990 Ultrasonic Symposium. 1393-1398.

Holmes, R. P., Yeaman, L. I., Li, W. J., Hart, L. J., Wallen, C. A., Woodruff, R. D. and McCullough, D. L. 1990. The combined effects of shock waves and Cisplatin therapy on rat prostate tumors. *J. Urology*. 144. 159-163.

Kanai, H., Jang, Y. S., Chubachi, N. and Tanahashi, Y. 1994. Power difference in spectrum of sound radiation before and after break of phantom by piezoelectric extracorporeal shock wave lithotripter. *Jpn. J Appl. Phys.* 33. 3159-3161.

Loew, M., Daecke, W., Kusnierczak, D., Rahmzadeh, M. and Ewerbeck, V. 1999. Shock-wave therapy is effective for chronic calcifying tendinitis of the shoulder. *J. Bone Joint Surg.* 81B. 863-967.

Mestas, J. L. and Cathignol, D. 1994. Design and characterization of a shock wave generator using canalized electrical discharge: Application to lithotripsy. *Rev. Sci. Instrum.* 65(7). 2356-2363.

Oosterhof, G. O., Smidt, G. A., de Ruyter, J. E., Schalken, J. A. and Debruyne, F. M. J. 1990. in vivo effects of high energy shock waves on urological tumors: an evaluation of treatment modalities. *J. Urology.* 144. 785-789.

Rao, R. M. and Bopardikar, A. S. 1998. *Wavelet Transform - Introduction to Theory and Applications.* Addison-Wesley: Reading. Massachusetts.

Russo, P., Stephenson, R. A., Mies, C., Huryk, R., Heston, W. D. W., Melamed, M. R. and Fair, W. R. 1986. High energy shock waves suppress tumor growth in vitro and in vivo. *The Journal of Urology.* 135. 626-628.

Sass, W., Braunlich, M., Dreyer, H. P., Matura, E., Folberth, W., Priesmeyer, H. G., and Seifer, J. 1991. The mechanism of stone disintegration by shock waves. *Ultrasound in Medicine and Biology.* 17(3). 239-243.

Schulze, H., Hertle, L., Graff, J., Funke, P.J., and Senge, T. 1986. Combined treatment of branched calculi by percutaneous nephrolithotomy and extracorporeal shock wave lithotripsy. *J. Urology.* 135. 1138-1141.

최민주. 2002. Development of the first real time shock wave radiation dosimeter. 산업자원부 UNITEF 대학보유기술이전사업 연구비 (2000-31400-001-1) 최종 결과 보고서.

감사의 글

배움이란 참으로 끝이 없는 것 같습니다. 대학을 졸업한지 십 수년이 지난 후에 다시 학업의 길로 들어와 보니 새삼 힘들고 여간 어렵지 않습니다. 조금이라도 젊을 때 학업을 마칠 수 있다는 것이 얼마나 다행한 일인지 새삼 확인을 합니다. 지금은 계시지 않지만 부모님께서 어렸을 때 공부하라는 말씀이 귓가를 맴돌고 있습니다. 늦게나마 공부하느라 애쓰는 저의 모습을 보시면 하늘에서 부모님께서는 대견해 하시리라 생각됩니다.

멀리 떨어져 있는 회사와 학교를 오가며 어찌면 변변히 하지도 못한 공부인데도 논문으로 만들어 발표하고 제출하니 부끄러운 마음이 앞섭니다. 이 논문이 이 분야에 도전하는 후학에게 조금이나마 도움이 되기를 바라고 있습니다.

재학 기간 중에 물심 양면으로 지원을 아끼지 않으시고, 부족한 저를 이끌어 논문을 완성할 수 있도록 해 주신 최민주 교수님께 무어라 형언할 수 없는 깊은 감사를 드립니다. 실험을 도와준 (주)코메드 직원들과 자료 정리에 많은 시간을 할애해 준 (주)코메드 조성찬 과장에게 큰 빛을 졌습니다. 논문의 심사와 조언을 아끼지 않으신 김경연 교수님, 정동원 교수님께도 심심한 감사의 마음을 전합니다. 제주대학교 대학원 의공학 협동과정의 학우들과 특히 손종수 조교에게 감사를 드립니다.

그동안 묵묵히 저의 모자란 부분을 채겨준 사랑하는 아내이자 나의 가장 큰 후원자인 변재선 여사와 항상 가정에 기쁨을 선사하는 하나님의 선물 아들 성민가 있어 힘든 학위 과정을 잘 마칠 수 있었음을 고백합니다.

항상 나를 선한 길로 인도하시는 하나님께, 감사드리고 이 부족한 논문을 바치고자 합니다.