

전자기형 충격파 발생기의 전자기력 특성 해석

최민주* · 이승환** · 이종혁*** · 이헌주****

Numerical Analysis of Electromagnetic and Dynamic Properties of an Electromagnetic Type Shock Wave Source

Min-Joo Choi*, Seung-Hwan Lee**, Jong-Hyuk Lee*** and Heon-Ju Lee****

요 약

임상용 체외 충격파 쇄석술에서 최근 우수한 성능이 입증되고 있는 솔레노이드를 이용한 전자기학적 충격파 발생기의 전자기학 및 역학적인 특성을 분석하였다. 10 kV로 충전된 콘덴서(1 μ F)가 솔레노이드 (직경 40mm, 길이 110mm, 구리선의 직경 1mm)를 통하여 순간적으로 방전되면, 솔레노이드 주변을 감싸고 있는 금속판이 진동하여 원통형으로 방사하는 충격파가 발생한다. 소프트웨어 Flux2D를 사용하여 전류의 파형, 금속판 주변의 자속의 세기 및 금속판에 밀림을 야기시키는 전자기력을 계산하였다. 금속판의 두께, 코일의 저항 및 권선수가 금속판에 가하는 전자기력의 효과에 대해 분석하였다.

Key Words : 체외 충격파 쇄석술, 전자기학적 충격파 발생기, 전자기학 및 역학적 특성

1. 서론

체외 충격파 쇄석술 (Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy: ESWL)은 체외에서 발생한 충격파를 체

내에 위치한 결석/담석에 집중시켜 분쇄 효과를 얻는 방법이다.¹⁾ 그림 1은 ESWL에서 사용이 급격히 증가하고 있는 전자기식 충격파 발생기의 기본 구조를 보여준다. 솔레노이드 코일 주위에 절연 막을 사이에 두고 외부가 금속판 (동판)으로 싸여있다. 이 솔레노이드 코일에 고압 (10-20kV)으로 충전된 콘덴서가 방전하면 높은 전류 펄스파 (5-15kA)가 순간적으로 흐르게 된다. 펄스 전류가 흐르는 코일에 형성된 자장은 금속막과 상호 간섭 (렌즈의 법칙)을 일으킨다. 이 결과 금속막은 짧은 시간동안 미세하게 진동하게 된다. 금속막의 진동 (cylindrical oscillation)은 주위의 매질로 전달되어 초음파를 발생한다.²⁾ 발생된 초음파는 반사판에 의해 결석/담석이 위치한 체내의 초점 부위로 집중된다.²⁾ 금속막의 진동 특성은 코일에

* 제주대학교 의과대학 의학과/ 인공심장연구소
Department of Medicine/ Institute of Artificial Heart, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 의공학협동과정
Interdisciplinary Postgraduate Program in Biomedical Engineering,
Cheju Nat'l Univ.

*** (주) 재우기술
Jaewoo Technology Co., Ltd.

**** 제주대학교 에너지공학과, 첨단기술연구소
Department of Nuclear and Energy Engineering, Research Institute
of Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

의해 발생된 전자기력에 의해 결정된다. 전자기력은 금속막의 두께, 솔레노이드의 특성, 방전 전압과 전류 펄스에 따라 변화하게 된다.

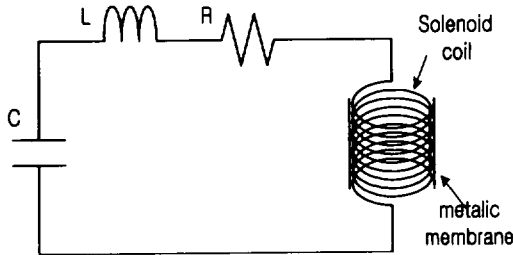


그림 1. 솔레노이드를 이용한 전자기식 충격파 발생기의 기본 구성도

본 연구에서는 솔레노이드를 이용한 전자기식 ESWL 충격파 발생기의 금속막 두께와 코일의 권선 수, 저항 특성에 따른 금속막에 가해지는 전자기력의 변화를 시뮬레이션을 통해 살펴보았다

II. 시뮬레이션 방법

전자기식 충격파 발생기의 기본 구조는 RLC 직렬회로($R=1\Omega$, $L=1\mu H$, $C=1\mu F$)와 솔레노이드 코일로 구성된다 (그림 1). 솔레노이드는 외경 78mm, 내경 72mm, 길이 110mm의 크기를 가지는 아세탈 플라스틱 원통 위에 직경 1mm의 동선을 감아 만들었다. 솔레노이드 코일 주위는 금속막 (동판)이 둘러 쌓여 있다. 솔레노이드 코일과 금속막 사이에는 얇은 절연체 (두께 0.2mm)가 있어 전기적으로 절연시킨다(그림 2). 콘덴서의 용량은 $1\mu F$ 이며, 10kV로 초기 충전되어 있고 스위치(그림 1에서 표기하지 않았음)가 연결되면 회로는 순간적으로 방전하게 된다.

금속막의 두께에 대한 금속판에 가해지는 전자기력을 시뮬레이션하기 위해서 솔레노이드 코일을 단선으로 감고 금속막의 두께 (metallic membrane thickness: mmt)를 0.1mm로 고정하였다. 2차원적인 전자기장 해석 및 전자기력 계산은 유한 요소법에 기반을 둔 Flux2D를 이용하여 계산하였다. 그림 2는 해석 영역

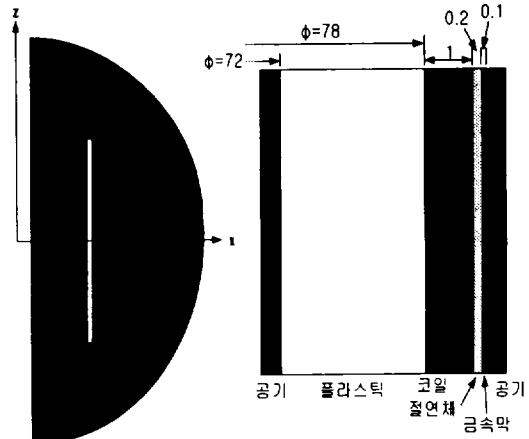


그림 2. 해석 영역의 모델링 상세도

의 기하학적인 상세도를 보여 주고 있다. 금속막의 두께 (mmt)를 0.05-0.22mm 사이를 변화하면서 금속판에 가해지는 전자기력을 계산하였다.

표 1. 계산에 사용된 각 영역의 물질 상수

재질	플라스틱 (아세탈)	코일 (동선)	절연체 (종이)	금속막 (동판)
비투자율	1	1	(1)	1
저항율 [$\Omega \cdot m$]	(1e10)	1.72e-8	(1e10)	1.72e-8

(주 : 절연체 및 플라스틱은 Flux2D에서 변수값을 입력하지 않고 전기적으로 진공 상태로 가정하여 계산하였음)

표 2. 병렬 코일수에 따른 저항 및 턴수 변화

PN	1	2	3	4
R [Ω]	0.4759	0.1190	0.0529	0.0297
L^* [μH]	533.55	66.69	19.76	8.34
turns	110	55	33.67	27.5

* : 정상상태전류가 흐를때의 경우 식 $L=(NR)^2/(9R+10H)$ 을 사용하여 계산. 여기서, L=inductance of coil in microhenrys (μH), N=number of turns, R=radius of coil in inches, H=height of coil in inches (<http://home.earthlink.net/~electronxl>)

계산에서 사용된 각 영역의 물리적인 상수 값은 표 1에 요약되어 있다.

코일의 저항과 권선수의 효과를 살펴보기 위해서 동일한 솔레노이드 원통에 대해 코일을 복선 (PN=2-4선) 병렬로 감은 솔레노이드에 대하여 고려하였다. 복선으로 감은 경우 솔레노이드 코일의 저항 및 권선수의 변화는 표 2에 정리되어 있다.

표 2에서 PN=1은 단선으로 감은 솔레노이드에 해당한다.

III. 결과

그림 3-8은 단선 코일 (PN=1)로 만든 솔레노이드의 경우를 보여 주고 있다. 콘덴서에 충전된 전압이 순간적으로 방전할 때 전압의 변화는 그림 3에 도시되어 있다. 방전시 RLC 회로에 흐르는 전압과 전류 파형은 그림 4와 같다. 그림 5는 특정 시간($t=4.5\mu s$)에 솔레노이드 코일 주변의 자속 분포를 보여준다. 솔레노이드 코일과 금속막에 집중적으로 자속이 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 특정 시간($t=4.5\mu s$)에 금속막의 길이 방향 (솔레노이드 축 방향, z축)을 따라 자속 밀도의 변화를 보여주고 있다. 금속 판 주변의 자속 밀도는 솔레노이드의 양쪽 가장 자리에서 급격히 감소하며 금속막 표면 대부분 영역에서는 균일하다.

그림 7은 금속막의 두께가 변할 때 금속판에 가해지는 전자기력의 파형을 보여주고 있다. 전자기력의 최대치(P+)는 금속판의 두께가 0.05mm일 때 가장 큰 것을 볼 수 있으며, 0.13mm 일 때가 가장 작은 값을 가지는 것으로 나타났다.

그림 8은 금속막의 두께에 따른 금속막에 가해지는 전자기력의 최대값 (P+)과 최소값 (P-)을 도시하였다. 그림에서 점선은 4차 비선형 Fitting curve이다. 금속막의 두께가 얇을수록 P+는 크며, 금속막이 두꺼워 질수록 P+는 작아짐을 볼 수 있다. 금속판 두께에 따른 P-에 대한 효과는 무시할 수 있는 정도로 나타났다.

그림 9는 복선 (1-4선) 솔레노이드 코일을 흐르는 인덕턴스의 동적 변화를 보여 주고 있다.

그림 10은 복선 코일로 만든 솔레노이드에 의해 금속판에 가해지는 전자기력 파형을 도시하고 있다. 2

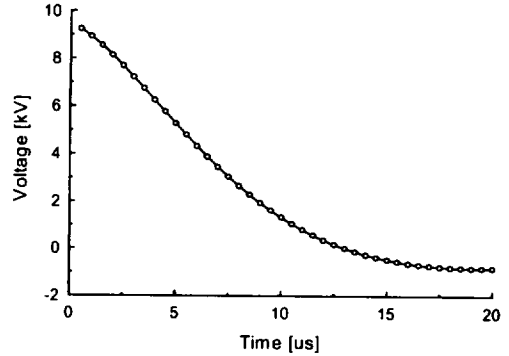


그림 3. 콘덴서에서 시간에 따라 방전하는 전압 파형 (mmt=0.1mm, PN=1)

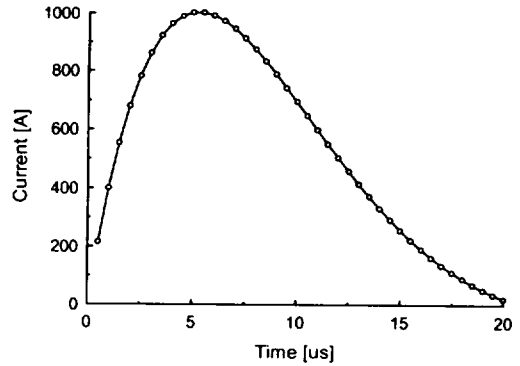


그림 4. 솔레노이드 코일에 흐르는 전류 파형 (mmt=0.1mm, PN=1)

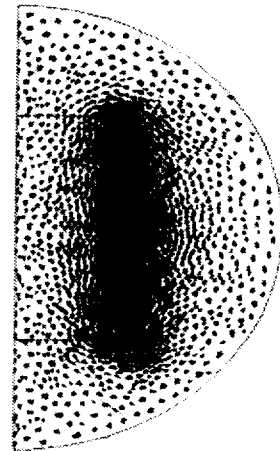


그림 5. 솔레노이드 코일과 금속막 주변의 자속 분포 ($t=4.5\mu s$, mmt=0.1mm, PN=1)

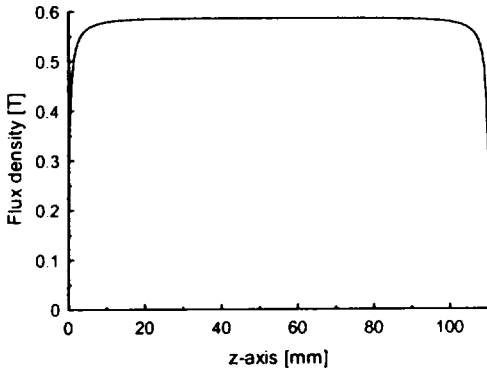


그림 6. 금속막의 길이방향(z축)에 따른 자속밀도 변화 ($t=4.5\mu s$, $mmt=0.1mm$, $PN=1$)

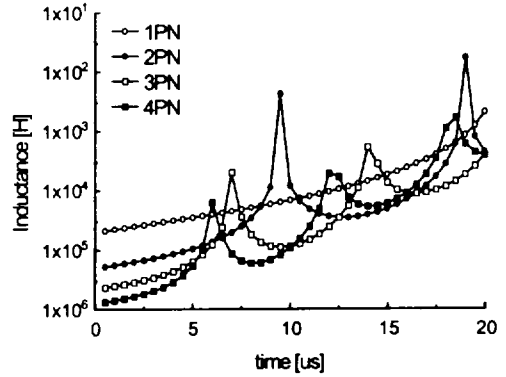


그림 9. 솔레노이드의 PN 값에 따른 솔레노이드 코일의 동적 인덕턴스 파형

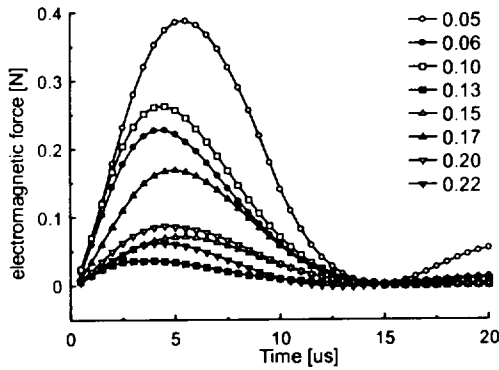


그림 7. 금속막의 두께에 따른 금속막에 가해지는 전자기력의 파형 ($PN=1$)

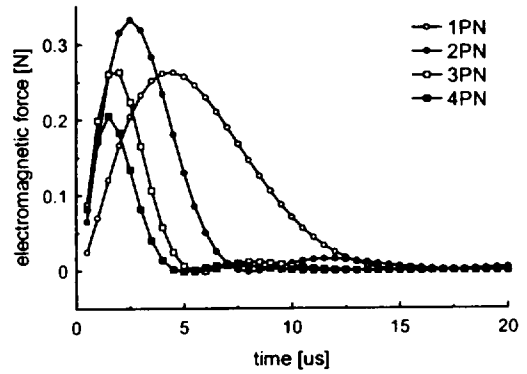


그림 10. 솔레노이드 코일의 PN값에 따른 금속막에 가해지는 전자기력 파형 ($mmt=0.1mm$)

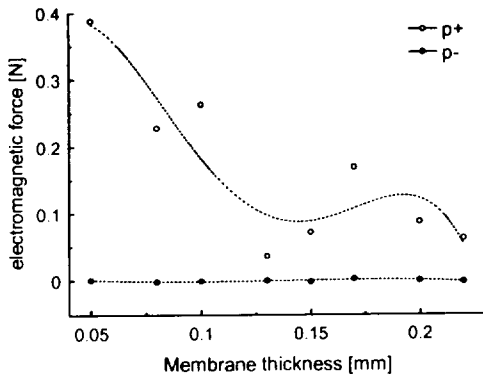


그림 8. 금속막의 두께에 따른 금속막에 가해지는 전자기력의 최대값($P+$)과 최소값($P-$) 변화 ($PN=1$)

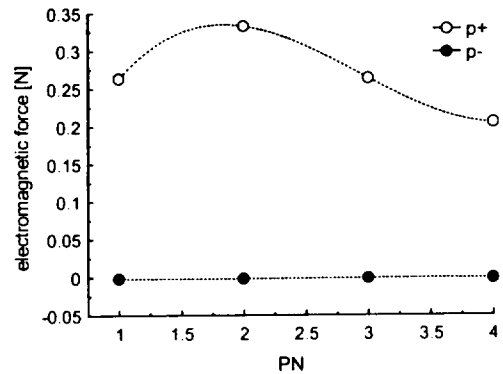


그림 11. 솔레노이드 코일의 PN 값에 따른 금속판에 가해지는 전자기력의 최대값($P+$)과 최소값($P-$)의 변화 ($mmt=0.1mm$)

개의 동선을 병렬로 55번 감았을 때 P+의 크기가 최대가 볼 수 있다.

그림 11은 솔레노이드 PN 값에 따라 변화하는 전자기력 파형의 P+와 P-의 변화를 보여 주고 있다. 점선은 3차 fitting curve를 보여 준다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 솔레노이드를 이용한 전자기식 충격파 발생기에 대한 전자기학 및 역학적 해석을 수행하였다. 발생된 충격파의 특성은 솔레노이드 코일과 금속막사이에서 발생한 전자기력에 밀접한 관련이 있다. 따라서 초음파를 발생하는 금속막의 두께 변화와 솔레노이드 코일의 저항 및 권선수를 변화시켰을 때 금속막에 가해지는 전자기력에 대한 해석은 충격파 발생기 최적화 설계를 위해 매우 중요하다.

시뮬레이션 결과, 금속막의 두께에 대한 전자기력의 변화는, 금속막의 두께가 얇을수록 전자기력이 커지고 있는 것으로 나타났다. 물론 금속판의 두께가 얇을수록 동일한 금속판의 관성이 작아지기 때문에 예측할 수 있는 결과이다. 그러나 실험적으로 너무 얇아졌을 때 오히려 금속판의 진동을 주변의 유체(물)로 전달하는 역학적 효율이 저하할 수 있기 때문에 이를 고려한 최적 두께를 결정해야 한다.

솔레노이드 코일을 복선 병렬로 제작하여 코일의 인덕턴스를 감소시키면 예견할 수 있듯이 금속판에 가해지는 전자기력 파형의 기본 주파수가 증가함을 알 수 있다. 이 경우 코일의 권선수가 함께 감소하며 금속판에 가해지는 전자기력을 감소하는 방향으로 작용한다. 본 연구의 경우, PN의 값이 2일 때 즉 2개의 동선을 55번 감았을 때 P+의 값이 가장 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 금속판에 가해지는 전자기력만을 고려했지만, 향후 금속판의 진동으로 주변 매질에 발생된 초음파의 특성을 해석하는 모델을 개발할 예정이다. 본 연구는 최근 ESWL에서 가장 우수한 성능을 발휘하고 있는 솔레노이드를 이용한 충격파 발생기의 최적 설계를 위해 매우 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구의 일부 내용은 원자력기초 연구 사업비 및 산업기술부(산업기반기술개발사업) 지원 연구비로 수행되었다. 본 연구를 위해 Flux2D를 제공해주신(주)재우기술에 감사드린다.

참고문헌

- 1) C. G. Chaussy, W. Brendel and E. Schmied E. 1980. Extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves. Lancet, vol. 13, pp. 1265-1268.
- 2) M. J. Choi, 2000. Acoustic properties of an electromagnetic type shock wave generator employing a solenoid coil. Proceedings of the Acoustical Society of Korea, vol. 19(2s), pp. 319-322
- 3) M. T. Carnell, R. D. Alcock and D. C. Emmony, 1993. Optical imaging of shock waves produced by a high-energy electromagnetic transducer. Phys. Med. Biol. vol. 38, 1575-1588.