

碩士學位論文

체외 충격파 치료용 전자기식
원통형 충격파 변환기의 최적화



濟州大學校 大學院

醫工學協同科程

趙 誠 贊

2008年 12月

체외 충격파 치료용 전자기식 원통형 충격파 변환기의 최적화

指導教授 崔 玟 柱

趙 誠 贊

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 12月



趙誠贊의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 팽 동 국 ①

委 員 김 경 연 ①

委 員 최 민 주 ①

濟州大學校 大學院

2008年 12月

초 록

체의 충격파 치료술(ESWT)에서 사용되는 전자기식 원통형 충격파 발생기는 고 전압 펄스 파워 발생기와 원통형 충격파 변환기로 구성된다. 충격파 변환기는 절연체를 사이에 두고 얇은 금속 막(foil)으로 둘러싸인 솔레노이드 코일을 이용한다. 충격파 변환기에 고 전압 임펄스 전류(수십 kA)가 흐르면 코일에서 발생된 자기력에 의해 금속 막이 임펄스 전류 파형과 유사한 형태로 미세하게 진동하여 충격파가 발생한다. 금속 막의 진동으로 발생된 충격파는 코일에 흐르는 임펄스 전류에 직접적인 영향을 받게 되는데, 임펄스 전류는 충격파 변환기의 인덕턴스 및 저항에 의해 변화한다. 충격파 변환기의 인덕턴스 및 저항은 솔레노이드 코일과 절연체 및 금속 막의 두께에 의해 결정된다. 본 연구에서는 충격파 변환기의 절연체 및 금속 막의 두께에 따른 인덕턴스 및 저항의 변화를 관찰하고, 솔레노이드 코일에 흐르는 임펄스 방전 전류 및 발생된 충격파를 측정하였다. 본 실험 결과를 이용하여 충격파 발생 효율을 최대화하는 전자기식 원통형 충격파 발생기의 절연체 및 금속 막 두께를 제안하였다.

(핵심 단어: 체외 충격파 치료술(ESWT), 충격파, 전자기식, 솔레노이드, 원통형, 절연체, 금속 막)

목 차

초 록	i
목 차	ii
제 1 장. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.1.1 체외 충격파 치료술	1
1.1.2 체외 충격파 치료술의 원리	1
1.1.3 체외 충격파 치료술의 효과 및 적응증	2
1.1.4 충격파의 발생 방식	4
1.2. 전자기식 충격파 발생 장치	8
1.2.1 임펄스 방전 시스템의 원리	8
1.2.2 전자기식 원통형 충격파 변환기	11
1.2.3 충격파 변환기의 최적화	18
1.3 연구 목적	20
제 2 장. 연구 내용 및 결과	21
2.1 연구 개요	21
2.1.1 전자기식 충격파 발생 장치의 회로 해석	21
2.1.2 연구 방법	26
2.2 실험 장치	27
2.2.1 임펄스 방전 시스템	27
2.2.2 충격파 변환기	27
2.3 측정 시스템	31
2.3.1 방전 전류 및 충격파	31
2.3.2 충격파 변환기의 인덕턴스 및 등가 저항의 측정	31

2.4 실험 결과	34
2.4.1 임펄스 방전 시스템의 인덕턴스 및 등가 저항	34
2.4.2 솔레노이드 코일의 인덕턴스 및 등가 저항	34
2.4.3 금속 막에 의한 솔레노이드 코일의 인덕턴스 감소 효과	37
2.4.4 충격과 변환기의 인덕턴스 및 등가 저항	41
2.4.5 방전 전류의 변화	44
2.4.6 충격과	46
제 3 장. 토의 및 결론	51
3.1 토의	51
3.2 결론	55
표 및 그림 목록	56
참고 문헌	59
Abstract	61
감사의 글	62



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

1.1.1 체외 충격파 치료술

최근 들어 충격파가 만성적인 근 관절 질환에 임상적인 효과가 입증되어 정형외과 영역에서 충격파 치료 (Extracorporeal Shock Wave Therapy: ESWT)가 큰 관심을 끌고 있다 (Ogden et al 2001).

ESWT은 간단히 ESWL(Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy)에서 진화된 치료술이다. ESWL 충격파 보다 상대적으로 낮은 에너지의 충격파를 조사할 경우 퇴행성 건염 (chronic tendonitis, eg, tennis elbow, golf elbow 등)의 증상이 개선 된다 (Eisenmenger et al 2002, Rompe et al 1996). 또한 충격파는 회복이 더딘 골절 (psduoathrosis) 치료에 효과가 입증되고 있다. 종종 ESWT는 orthopedic과 lithotripsy를 합성하여 'orthotripsy'로 명명된다. orthotripsy는 2000 미국 FDA 승인을 얻었으며, 상용 ESWT 치료기에 대한 사용이 허가되고 있다 (예, 2003년 OssaTron®, (USA)가 tennis elbow 및 heel spur 치료에 사용하도록 허가). ESWT는 충격파 에너지를 근골격계에 정밀하게 전달함으로써 물리 치료, 약물 등 보존적 요법으로 호전되지 않는 관절의 질환, 스포츠 손상에 대한 대체 치료술로 처방되기 시작하고 있다 (Rompe et al 1998).

1.1.2 체외 충격파 치료술의 원리

ESWT는 ESWL과 동일한 원리를 이용한다(Choi et al 2004). ESWT는 ESWL에서 사용하는 에너지보다 일반적으로 낮은 에너지의 충격파를 이용하여 연조직 손상을 치료한다(Rompe et al 1998). 치료 에너지 및 회수는 체외 충격파 쇄석기의 약 10% 정도를 사용하고 있다. ESWT는 근골격계의 퇴행성 병변, 힘줄의 파열, 관절 주위에 생긴 석회(돌)등을 충격파를 투사하여 증상이 호전되도록

록 한다. 충격파의 초점에 환자의 병변을 맞추어 일정한 시간 간격으로 충격파를 발생시켜 석회화된 조직을 없애준다. 아직 ESWT의 자세한 기전은 확실 밝혀지지 않고 있지만, 충격파에 의한 음향 공동현상이 매우 중요한 것으로 간주되고 있다 (Choi 2000).

1.1.3 체외 충격파 치료술의 효과 및 적응증

체외 충격파 치료는 근 골격계의 퇴행성 병변, 무리한 운동으로 인한 힘줄의 파열, 관절 주위에 생긴 석회(돌) 등에 생체 효과적인 충격파를 전달하여 줌으로써 손상된 조직의 재생을 자극하여 수술 없이 관절 통증의 원인을 회복시킨다 (Bachmann et al 2001). 가장 많이 적용하고 있는 석회화 건염은 근육이 석회화되어 통증을 유발하는 것으로 기본적으로 몸속에서 결석이 생기는 메카니즘과 비슷하여 근육에 결석이 생기는 것이라고 볼 수 있다. 따라서 체외 충격파 쇄석기와 동일한 치료 효과를 얻을 수 있게 되는 것이다.

충격파 치료는 부작용 및 수술 없이 손상을 치료하며 반복해도 안정성이 높은 치료법이다. 충격파 치료술의 적응증은 오십견 증상을 보이는 어깨의 힘줄 파열, 석회화 건염, 불유합(Martini L, et al 2003) 등을 포함하여 Table 1.1-1에 요약하고 있다 (Bachmann et al 2001).

Table 1.1-1. Application of ESWT

Osteoproximal Tissue	Bone	Urology
Shoulder Tendonitis Rotator fasciitis Epicondylitis (Tennis, Golfer's elbow) Patellar tip syndrome Achillodynia Fasciitis plantaris(heel spur)	Non-union Femoral head necrosis Pseudarthrosis	Induration penis plastid

1.1.4 충격파의 발생 방식

현재 임상적으로 사용되는 체외 충격파의 발생 방식에는 압전소자형, 전기수력학적, 전자기식의 3가지가 상용화되어 있다.

(1) 압전 소자 방식(piezoelectric type)

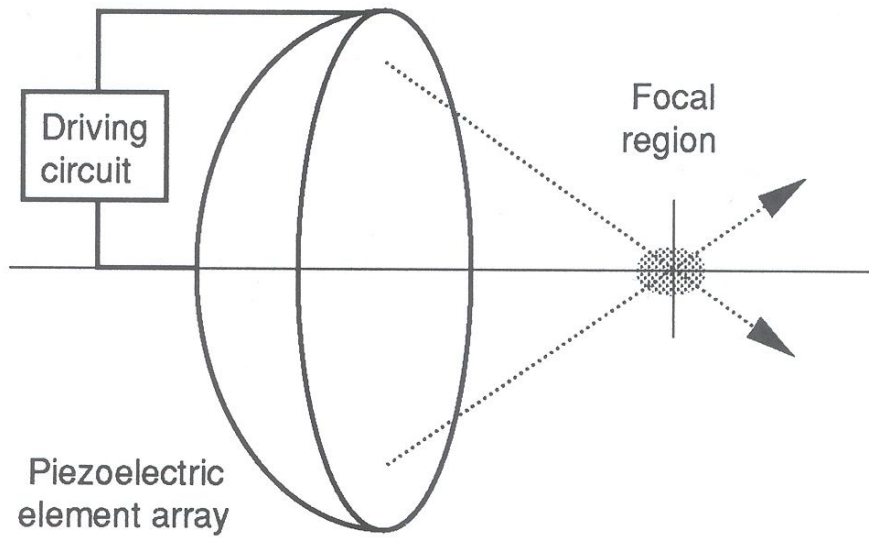
충격파를 발생하는 다수의 piezoelectric elements라는 소자를 조합하여 배열하고, 각 소자들의 개별적인 충격파를 집속시키거나, 단일 소자를 원형으로 가공하여 집속시켜 충격파 에너지를 얻는 방법이다 (Choi 1992). 이 방식은 충분한 충격파 에너지를 얻기 위해서는 크기가 커져야하는 단점이 있다 (Figure 1.1-1 참조).

(2) 전기수력학적 방식(electrichydraulic type)

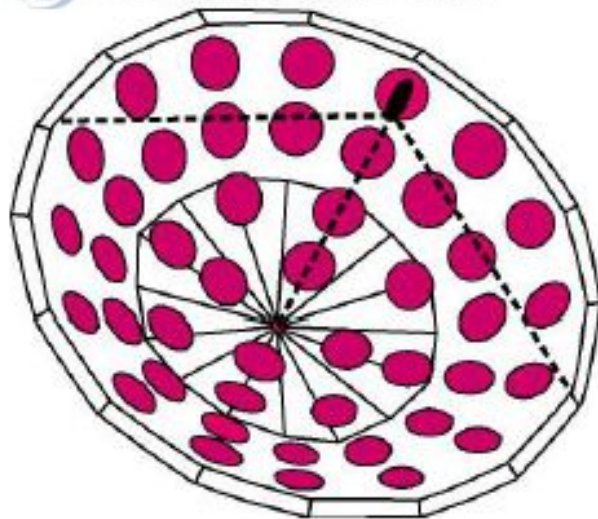
물 속에서 짧은 거리로 서로 마주보고 있는 뾰족한 전극에 고전압(10 ~ 20kV)을 순간적으로 가해주면 전극 사이에서 전기적인 스파크가 발생하고, 이때 발생된 스파크에 의해 충격파가 발생되는데 (Figure 1.1-2 참조), 이를 충격파 발생원으로 이용 한다(Choi 1992). 이 방식은 ‘스파크꺾형’으로 불리기도 하는데, 수중에서의 스파크 방전 현상은 본질적으로 불안정하기 때문에 발생된 충격파의 재현성은 낮다. 그러나 전기수력학적 충격파 발생 방식의 임상적인 치료 효과는 높게 나타나고 있으며, 국내에서도 동일한 방식을 이용한 제품이 개발되어 사용되고 있다(Cho et al 2007).

(3) 전자기 방식(electromagnetic type)

솔레노이드 코일과 코일 위를 둘러싼 얇은 금속 막(foil)으로 구성되어 있으며 코일에 강한 임펄스 전류를 흘려주면 코일에 유도된 자장에 의해 금속 막이 미세하게 진동하게 된다(Choi 2003). 이 진동은 실린더 형으로 방사되는 충격파원이 되며, 주변에 위치한 포물선형 집속기에 의해 음향 에너지가 초점으로 집속된다(Figure 1.1-3 참조). 국내에서는 Cho et al (2007)에 의해 전자기식 원통형 충격파 발생 장치가 개발되어 제품에 활용하고 있다.

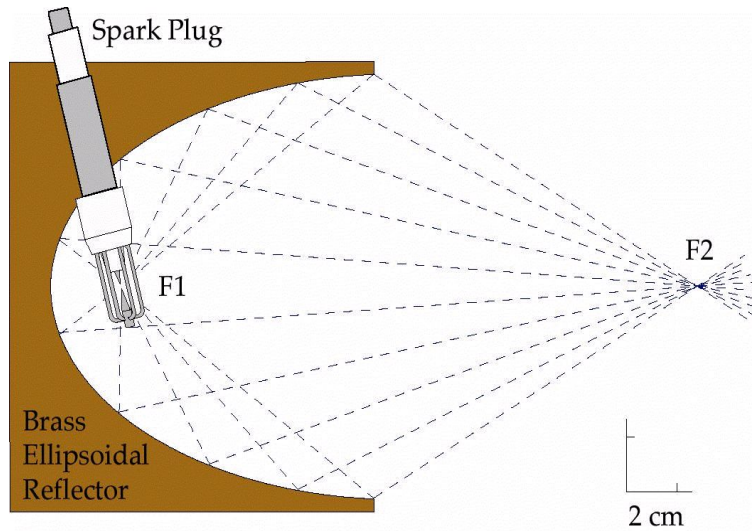


(a)



(b)

Figure 1.1-1. Piezoelectric type shockwave generator. (a) Principle, (b) Disposition of piezoelements

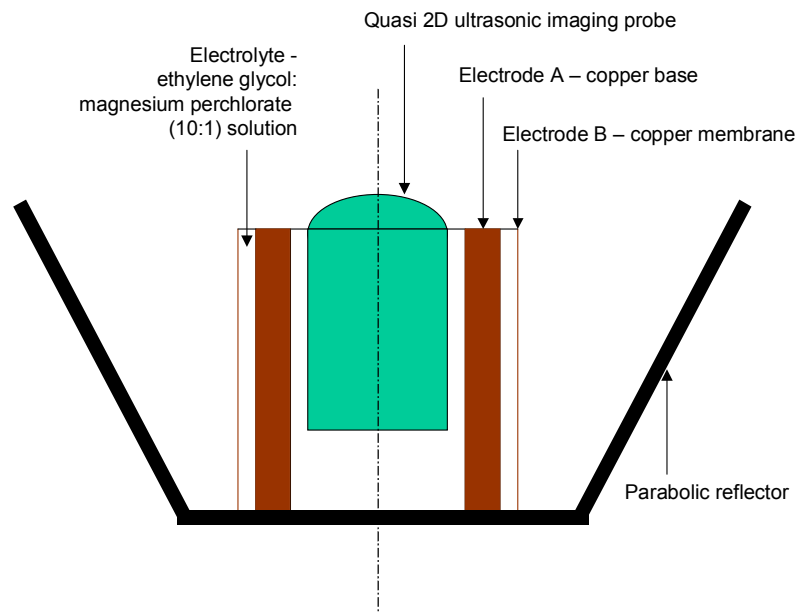


(a)

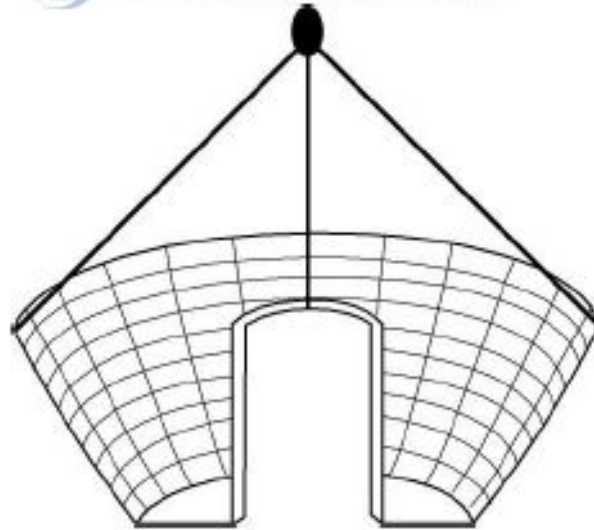


(b)

Figure 1.1-2. Electrohydraulic type shock wave generator. (a) Electrode and focusing principle, (b) 3D graphic of reflector.



(a)



(b)

Figure 1.1-3. Electromagnetic cylindrical type shockwave generator

(a)General structure, (b)Shockwave geometric beam focus

1.2 전자기식 충격과 발생 장치

체의 충격과 치료용으로 사용되는 전자기식 충격과 발생 장치는 임펄스 방전 시스템과 원통형 충격과 변환기로 구성되어 있다.

1.2.1 임펄스 방전 시스템의 원리

전자기식 충격과 발생 장치의 임펄스 방전 시스템은 고전압 발생 장치, 커패시터, 고전압 스위치 및 케이블 등으로 구성된다. 고전압 발생 장치에서 발생된 DC 고전압(~수십 kV)을 커패시터에 충전시켜 고전압 스위치를 이용하여 방전시키는 회로이다. Figure 1.2-1은 임펄스 방전 시스템을 간략화한 개요도이다. 이때 사용하는 고전압 스위치는 순간적으로 수 kA의 전류를 흘려야 함으로 일반적인 반도체 소자나 기계적인 스위치는 사용할 수 없다. 따라서 고 전압, 고 전류용으로 특수하게 제작된 스파크갭 스위치(Spark-gap switch)를 사용하는데 3극 진공관과 유사한 구조를 가지고 있으며, 두 극과 트리거를 위한 아크 발생기를(gate 극) 내장하고 있다. Figure 1.2-2는 스파크 갭 스위치의 구조도이다.

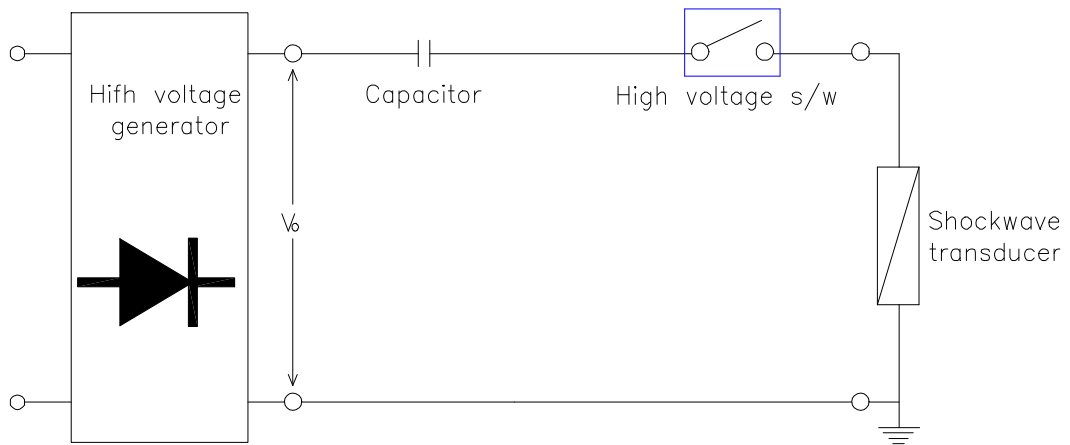


Figure 1.2-1. Outline of a high voltage discharging impulse current generator.

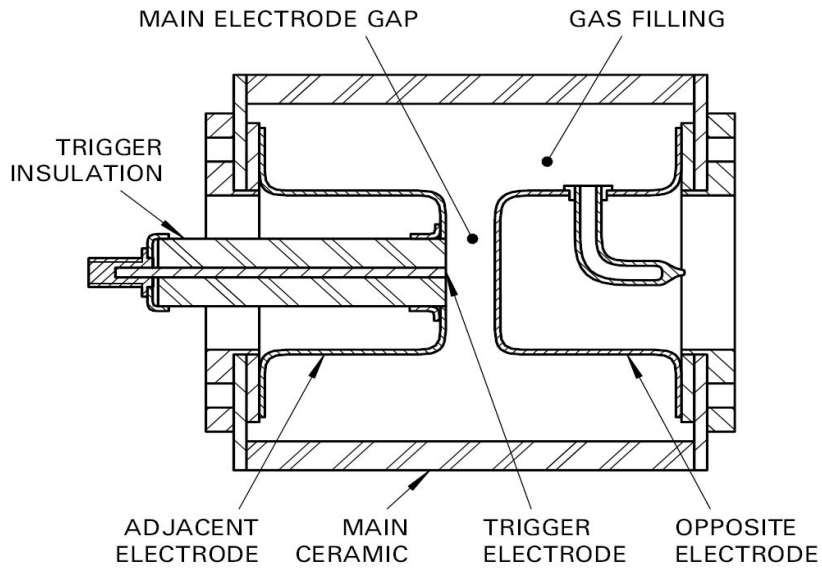


Figure 1.2-2. The structure of a spark-gap switch

1.2.2 전자기식 원통형 충격파 변환기

(1) 구조

임펄스 방전 전류를 충격파로 변환하는 원통형 충격파 변환기는 절연체의 보빈(Cylinder Body)에 솔레노이드 코일이 권선되어 있고, 코일 위에는 얇은 금속 막(foil)이 감겨 있다. 솔레노이드 코일과 금속 막 사이에는 얇은 절연체로 절연되어 있다. 절연체는 임펄스 방전 시스템에서 생성된 고전압 임펄스 방전 전류가 솔레노이드 코일에 흐를 때 금속 막 사이에 순간적으로 수십 kV 이상의 전위차가 발생하는데 이때 금속 막과의 절연을 위해 사용한다(Choi et al, 2004). 따라서 절연체는 고전압에 대한 절연 특성이 우수한 재질을 사용하게 된다. Figure 1.2-3은 전자기식 원통형 충격파 변환기의 구조도이다.

(2) 충격파 에너지의 발생 원리

Figure 1.2-4는 전자기식 원통형 충격파 변환기의 기본 원리를 도시한 것이다. 임펄스 방전 시스템에서 공급된 임펄스 방전 전류가 솔레노이드 코일에 흐르면 코일에는 자기력이 발생한다. 코일에서 발생된 자기력은 코일을 감싸고 있는 얇은 금속 막에 자속의 변화를 일으켜 유도 전류를 발생시키고, 유도 전류에 의해 금속 막 주위에 유도 자기장을 형성시키게 된다. 솔레노이드 코일과 금속 막에 발생된 자기장은 서로 반발력을 발생시켜, 금속 막이 미세한 변위를 일으키며 진동하게 된다. 금속 막의 미세한 진동은 주위에 채워진 물을 진동시키고, 이를 반사체에서 집속시켜 고강도의 충격파 에너지를 만들어낸다. 따라서 충격파 에너지는 코일에 흐르는 전류와 금속 막에 유도된 전류에 직접적인 영향을 받게 된다.

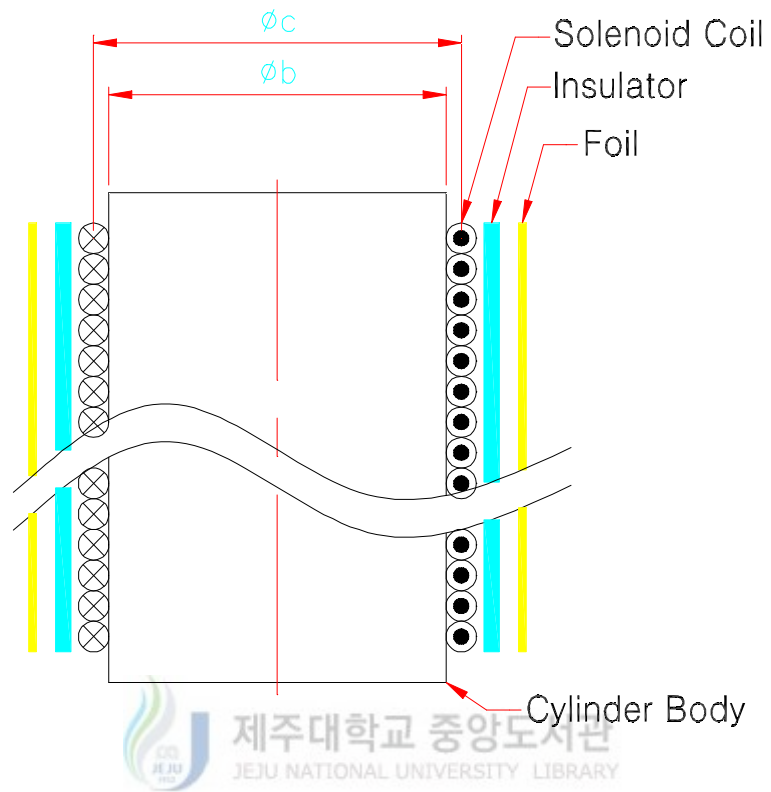


Figure 1.2-3. Structure of an electromagnetic cylindrical shock wave transducer

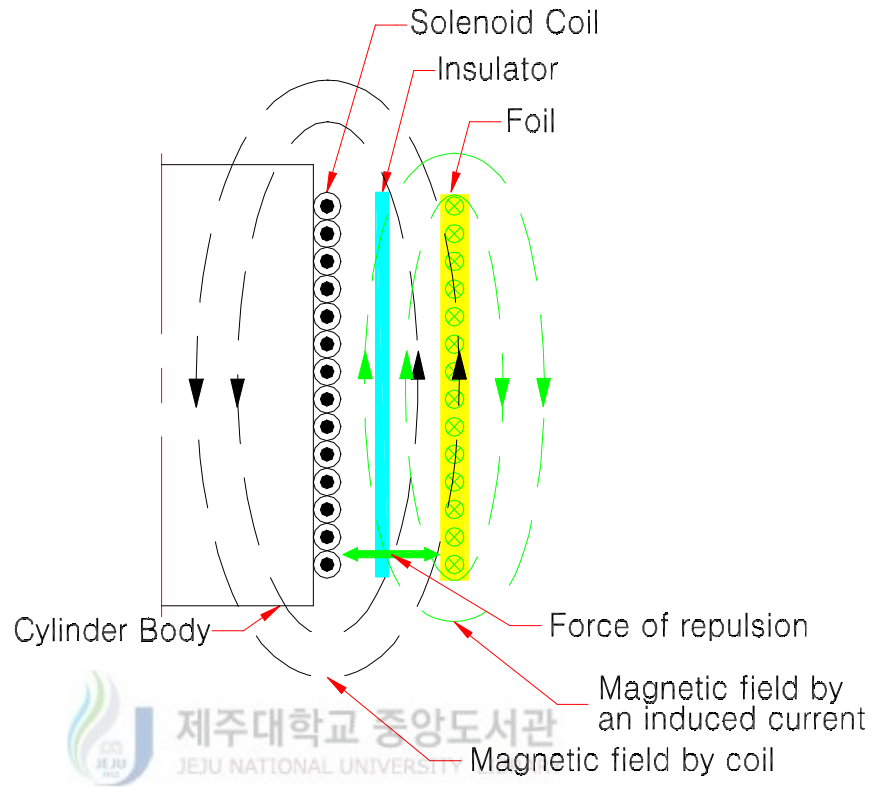


Figure 1.2-4. Principle of the electromagnetic cylindrical shock wave transducer

(3) 충격과 변환기의 특성

가. 솔레노이드 코일의 인덕턴스 및 저항

충격과 변환기를 구성하는 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 권선의 인덕턴스와 솔레노이드 코일의 인덕턴스의 합으로 주어진다. 즉 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 권선의 굵기 및 재질, 솔레노이드 코일의 권선수, 직경에 의해 결정된다. 권선과 솔레노이드 코일의 인덕턴스를 구하는 식은 다음과 같다.

$$L_{co} = L_d + L_{so} \quad (1.2-1)$$

여기서, L_{co} 는 총 인덕턴스, L_d 은 권선의 인덕턴스, L_{so} 는 솔레노이드 코일의 인덕턴스를 의미한다.

$$L_d = \frac{1}{2}(l_d * 10^{-7}) \quad (1.2-2)$$

여기서, L_d 은 권선의 인덕턴스, l_d 는 권선의 유효길이(m) 이다.

$$L_{so} = \frac{\mu n^2 S}{l} \quad (1.2-3)$$

여기서, L_{so} 솔레노이드 코일의 인덕턴스, μ 는 투자율, n 은 권선수, S 는 솔레노이드 코일의 단면적, l 은 솔레노이드 코일의 길이를 의미한다.

솔레노이드 코일의 권선이 가지는 저항은 다음과 같다.

$$R_{co} = \rho \frac{l}{A_{co}} \quad (1.2-4)$$

여기서, ρ 는 저항율, A_{co} 는 권선의 단면적, l 은 권선의 길이를 의미한다.

나. 절연체의 두께

솔레노이드 코일에 흐르는 전류와 금속 막에 유도되어 흐르는 전류는 Figure 1.2-5와 같이 두 도선에 흐르는 전류에 의한 두 도선 사이에 작용하는 힘으로 나타낼 수 있는데 식(1.2-5)와 같이 주어진다. 유도되는 전류의 크기는 식(1.2-6)와 같이 코일에 의해서 발생하는 자기장의 크기와 시간 변화에 비례한다.

$$F = \frac{\mu i_a i_b}{2\pi d} \quad (1.2-5)$$

여기서 μ 는 투자율, i_a 는 코일에 흐르는 전류, i_b 는 금속 막에 유도되는 전류, d 는 두 도선 사이의 거리를 의미한다.

$$i_b \propto \frac{\partial \Psi}{\partial t} \propto f \times |i_a| \quad (1.2-6)$$

여기서 Ψ 는 자속, t 는 시간, f 는 주파수를 의미한다.



식 (1.2-5)에서 보여 주듯이 두 도선 간의 거리 d 는 힘 F 와는 반비례 관계를 보인다. 두 도선 사이의 거리 d 는 절연체의 두께에 따라 결정된다.

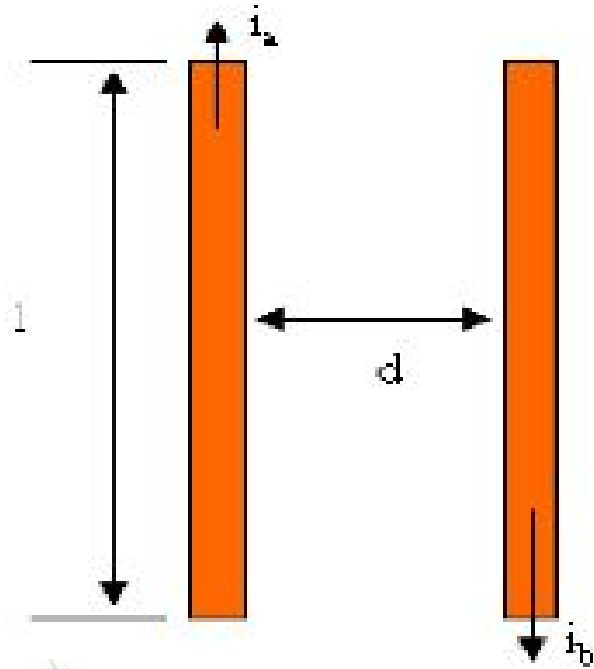


Figure 1.2-5. Current flows in the two wires arranged in parallel by the distance of d .

다. 금속 막의 두께

충격과 변환기의 금속 막은 솔레노이드 코일에 흐르는 전류에 의한 자기장에 영향을 받으면서 동시에 코일의 인덕턴스에 영향을 미치게 된다. 코일에 흐르는 시간적으로 변하는 전류에 의해 발생된 자기장이 금속 막에 미치는 영향으로 고주파 전류의 표피 효과가 있다. 표피 효과는 주파수가 높을수록 전류가 금속 표면으로 흐르는 현상으로 주파수 및 도전율, 투자율에 따라 변하게 되고, 식(1.2-7)과 같이 정의된다.

$$S = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (1.2-7)$$

여기서, S 는 전계가 $1/e$ (~37%)로 감소하는 깊이, f 는 주파수, σ 는 도전율, μ 는 투자율을 의미한다.

예를 들어 금속 막의 재질을 구리로 사용하고 임펄스 전류의 주기가 $2\mu\text{s}$ 의 방전인 경우 $40\mu\text{m}$ 에서 37%로 그 크기가 줄어든다. 따라서, $1\mu\text{m}$ 의 금속 막을 사용하는 경우는 대부분의 자기장이 도체를 통과해 버리므로 반발력의 발생을 기대하기 어렵다. 한편, 금속 막의 도체가 지나치게 두꺼우면 발생한 힘에 의해서 변위되기 어려워 충격과 발생이 미약해 질수도 있다.

솔레노이드 코일에 금속 막이 접근하면 금속에 의해 코일의 인덕턴스가 감소한다. 이러한 현상은 코일과 금속의 거리에 따라서 달라지는데 가까우면 가까울수록 그 영향은 증가하여 인덕턴스는 더욱 감소하게 되고, 만약 코일과 금속 막이 붙었다면 이론적으로는 코일에 의한 인덕턴스는 없어지고 코일 길이만큼의 도선에 해당하는 인덕턴스로 변환된다. 전자기식 충격과 변환기에서는 코일과 금속 막의 거리는 절연체의 두께에 의해 결정되기 때문에 절연체의 두께에 의해서 인덕턴스의 감소 효과가 달라진다. 또한 금속 막도 저항 성분을 가지고 있는데, 식(1.2-8)과 식(1.2-9)로 계산된다.

$$R_e = \rho \frac{l}{A_f} \quad (1.2-8)$$

여기서 A_f 는 금속 막의 단면적, l 은 권선의 길이를 의미한다.

A_f 는 금속 막의 두께와 권선의 굵기를 단면적으로 볼 수 있는데 아래 식으로 표기 된다.

$$A_f = t_f * \Phi_{\omega} \quad (1.2-9)$$

여기서 t_f 는 금속 막의 두께, Φ_{ω} 는 권선의 굵기를 의미한다.

1.2.3 충격파 변환기의 최적화

(1) 최적화 연구의 필요성

전자기식 충격파 변환기는 효율이 매우 낮은 시스템으로서, 공급되는 에너지에 비해 충격파로 전환되는 에너지가 극히 낮다. 때문에 높은 충격파를 얻기 위해서는 커패시터 용량 또는 충전 전압을 높이는 방법이 가장 효과적이다. 하지만, 공급 에너지를 높이는 것은 고전압의 절연 및 열 발생 등 시스템 전체에 많은 문제를 발생시킨다. 따라서 최소의 에너지를 이용하여 최대의 충격파를 발생시키기 위한 최적화 연구는 필수적이다. 특히 최근에는 충격파가 여러 임상 분야에 적용되면서 각각의 특성에 맞는 다양한 형태의 전자기식 충격파 변환기가 요구되고 있는데, 변환기의 형태별로 상황에 맞추어, 설계자들의 직감에 의존하거나, 시행착오를 되풀이하면서 최적화에 대한 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 고전압을 사용하는 시스템의 특성과, 충격파 측정의 어려움 등으로 최적화에 대한 연구가 쉽지 않은 상황이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 충격파 변환기의 성능에 영향을 미치는 다양한 변수들을 고려하여 최적의 충격파 변환기를 설계할 수 있는 수치 계산 모델의 개발이 필요하다.

(2) 선행 연구과제

전자기식 충격파 변환기에서 발생하는 충격파는 앞서 살펴본 바와 같이 솔레노이드 코일에 흐르는 방전 전류의 크기에 직접적인 영향을 받게 된다 식(1.2-5). 방전 전류에 영향을 미치는 요소로 임펄스 방전 시스템의 충전 전압과(V_0), 커패시터 용량(C), 인덕턴스(L), 회로 저항(R) 등이 있을 것이다. 따라서 충격파 발생 장치의 최적화를 위해서는 이러한 변수들을 최적화시켜 방전 전류를 극대화시키는 연구가 우선적으로 이루어져야 한다.

방전 전류에 영향을 미치는 여러 요인 중에서 충격파 변환기의 인덕턴스 및 등가 저항의 결정은 가장 핵심적인 선결 연구 과제이면서 매우 어려운 부분이다. 왜냐하면, 충격파 변환기의 인덕턴스 및 등가 저항은 동일한 솔레노이드 코일이라 하더라도, 절연체 및 금속 막의 두께에 따라 비선형적으로 변하기 때문이다.

이러한 문제들은 수치 계산을 통한 최적화 연구에 있어서 매우 큰 장애로 작용하고 있다. 따라서 전자기식 충격파 변환기의 최적화를 위해서는 절연체 및 금속 막의 두께가 솔레노이드 코일에 미치는 영향에 대한 연구가 필수적이다. 우선 현재 국내에서 생산되고 있는 전자기식 원통형 충격파 변환기의 절연체 및 금속 막의 두께에 따른 특성들을 관찰하고 이때 발생하는 충격파를 측정할 것은 전자기식 원통형 충격파 변환기의 최적화 설계를 위한 시발점이 될 수 있다.

1.3 연구 목적

본 연구는 체외 충격파 치료용으로 사용되는 전자기식 원통형 충격파 변환기의 절연체 및 금속 막의 두께에 따른 방전 임펄스 전류의 특성을 관찰하고, 발생된 충격파를 측정하고 평가하기 위함이다. 이를 바탕으로 충격파 변환 효율을 최적화하는 충격파 변환기를 구현하기 위함이다.



제 2 장 연구 내용 및 결과

2.1 연구 개요

2.1.1 전자기식 충격과 발생 장치의 회로 해석

(1) 방전 전류

전자기식 충격과 발생 장치는 고전압 발생 장치, 커패시터, 고전압 스위치, 충격과 변환기, 시스템 및 충격과 변환기의 인덕턴스 및 저항 성분 등으로 구성된다. Figure 2.1-1은 전자기식 충격과 발생 장치의 회로 해석을 위해 모델링한 전기 회로도도를 도시한 것이다.(Cho et al 2007)

Figure 2-1에서 도시된 전기 회로는 수학적으로 Kirchhoff의 법칙을 이용하여 식(2.1-1)과 같이 미분 및 적분을 포함하는 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$-V_0 + \frac{1}{C} \int i(t) dt + L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R = 0 \quad (2.1-1)$$

여기서 인덕턴스 L 은 시스템 인덕턴스 L_S 및 충격과 변환기의 인덕턴스 L_{co} 를 합한 것이고, R 은 시스템 저항 R_S 및 충격과 변환기의 저항 R_{co} 를 포함한다. C 는 커패시턴스를 나타내고 V_0 는 초기의 충전 전압을 나타낸다. 편의상 시간 $t=0$ 에서 방전 스위치가 오프 상태에서 온 상태로 전환되는 것으로 가정한다.

식(2.1-1)의 방정식을 풀기 위해서 Laplace 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{sC} I(s) + sLI(s) + RI(s) = \frac{V_0}{s} \quad (2.1-2)$$

여기서 식(2.1-2)를 $I(s)$ 에 대하여 전개하여 정리하면 다음과 같다.

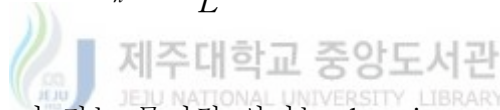
$$I(s) = \frac{V_0}{L} \frac{1}{s^2 + (R/L)s + 1/LC} \quad (2.1-3)$$

식(2.1-3)을 역 변환하여 시간에 대한 전류의 함수를 구하고 식(2.1-4)와 같은 형태로 변환하기 위하여 식(2.1-5)와 같이 다시 정리하여 쓸 수 있다.

$$e^{-\alpha t} \sin \omega t \Leftrightarrow \frac{\omega}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} \quad (2.1-4)$$

$$I(s) = V_0 \sqrt{C/L} \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \frac{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}{(s + \zeta \omega_n)^2 + (\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2})^2} \quad (2.1-5)$$

여기서 $\omega_n^2 = \frac{1}{LC}$, $2\zeta\omega_n = \frac{R}{L}$ 이다.



식(2.1-5)에서 ζ 가 갖는 물리적 의미는 damping ratio로서 부하의 저항 값과 회로의 특성 임피던스의 비로서 $\zeta = \frac{R}{2\sqrt{L/C}}$ 로 정의되고 시스템의 응답을 결정하는 중요한 요소로서 그 조건에 따라서 다음과 같이 변환된다.

i) $1 > \zeta^2$ 인 경우에 대해서, 즉 under damped 시스템으로, 식(2.1-4)를 이용하여 식(2.1-5)를 변환하면 다음과 같다.

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega_n L \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t) \quad (2.1-6)$$

ii) $1 < \zeta^2$ 인 경우에 대해서, 즉 over damped 시스템에 대해서는 식(2.1-7)로 표현 된다. 이 경우는 전류가 진동 없이 감소하는 형태를 갖는다.

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega_n L \sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-\zeta \omega_n t} \sinh(\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} t) \quad (2.1-7)$$

iii) $\zeta = 1$ 인 경우는 critically damped 시스템으로서 식(2.1-8)로 표현된다.

$$i(t) = \frac{V_0}{L} t e^{-\omega_n t} \quad (2.1-8)$$

전자기식 충격과 발생 장치의 경우 i)의 조건에 해당하여 회로를 흐르는 전류는 감소하면서 진동하는 형태로 방전한다. 이런 조건을 통하여 큰 방전 전류와 시간 변화율을 얻을 수 있고, 코일 주변의 금속 막을 진동하기 위한 충분한 자기력이 얻어질 수 있다.

또한 최대 전류는 식(2.1-6)에서 $\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t = \pi/2$ 로 놓으면 다음과 같이 된다.

$$I_{peak} = \frac{V_0}{\omega_n L \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n \left(\frac{\pi}{2 \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \right)} \quad (2.1-9)$$

만약 회로의 저항이 아주 작은 경우($R \ll 1$)의 최대 전류는 식(2.1-6)에서 $\zeta = 0$, $\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t = \pi/2$ 로 놓으면 다음과 같이 된다.

$$i(t) = \sqrt{\frac{C V_0^2}{L}} \quad (2.1-10)$$

식(2.1-9)와 식(2.1-10)에서 전류의 상승을 빠르게 하여 금속 막에 유도되는 자기력을 크게 하기 위해서는 콘덴서의 용량 또는 충전 전압을 높이거나 회로의 인덕턴스 및 저항을 줄이는 방법이 있음을 알 수 있다.

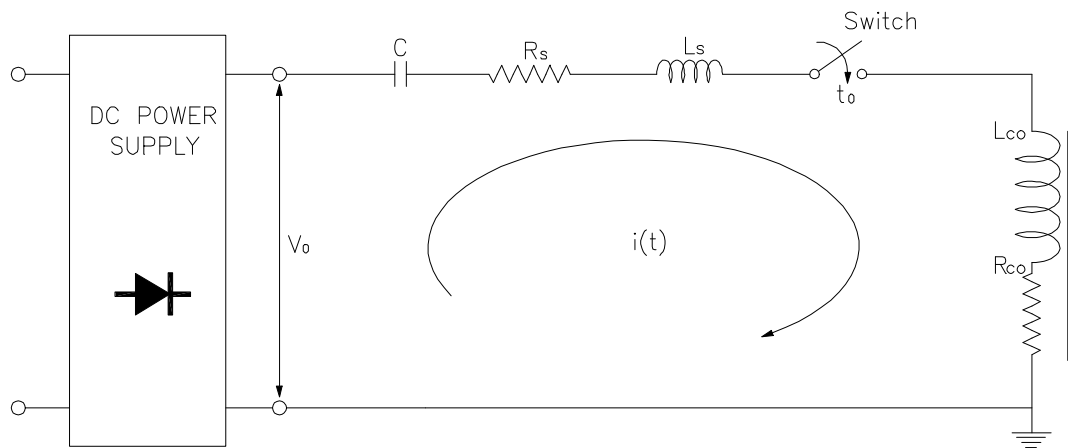


Figure 2.1-1. An equivalent circuit diagram of the electromagnetic shock wave generator

(2) 방전 전류의 주요 파라메타

가. 충전 전압 및 커패시턴스

식(2.1-6)에서 보는바와 같이 초기 충전 전압과 커패시턴스는 방전 전류의 크기를 결정하는데 매우 중요한 요소이다. 하지만, 본 연구에서는 충격과 변환기의 절연체 및 금속 막의 특성 연구를 위해 커패시턴스 및 초기 충전 전압은 고정하였다.

나. 인덕턴스

전자기식 원통형 충격과 발생 장치의 인덕턴스는 식(1.2-1)에서 보는 바와 같이 임펄스 방전 시스템의 인덕턴스와 충격과 변환기의 인덕턴스의 합이다. 충격과 변환기의 인덕턴스는 권선의 인덕턴스 및 솔레노이드 코일의 인덕턴스의 합으로 나타낼 수 있는데, 금속 막에 의한 효과를 산정하기 위해 유효 결합 계수 M_L 을 반영하였다.

$$L_{co} = L_d + (L_{so} * M_L) \quad (2.1-11)$$



여기서 L_d 은 권선의 인덕턴스, L_{so} 는 솔레노이드 코일의 인덕턴스, M_L 은 유효 결합 계수이다.

다. 등가 저항

방전 회로 전체의 저항 성분은 임펄스 방전 시스템 및 솔레노이드 코일의 저항 성분의 합이다.

$$R = R_s + R_{co} \quad (2.1-12)$$

여기서 R_s 는 임펄스 방전 시스템의 총 저항 성분, R_{co} 는 권선의 저항 성분이다.

또한 충격과 변환기의 저항 R_{ω} 는 솔레노이드 코일의 등가 저항 성분과 금속 막의 등가 저항 성분으로 구성되어 있다.

$$R_{\omega} = R_{cl} + R_e \quad (2.1-13)$$

여기서 R_{cl} 은 권선의 등가 저항, R_e 는 금속 막의 등가 저항이다.

금속 막의 등가 저항은 솔레노이드 코일의 권선의 굵기와 금속 막의 두께를 단면적으로 하는 코일로 등가시켜 계산하고, 이것이 시스템에 미치는 영향을 반영하기 위하여 유효 결합 계수 M_L 및 유효 저항 결합 계수 M_R 을 적용하여 계산하였다. 식(2.1-14)은 금속 막의 등가 저항을 표현하는 식이다

$$R_e = \rho \frac{l}{A_f * M_R} * M_L \quad (2.1-14)$$

여기서 A_f 는 금속 막의 단면적, M_R 은 유효 저항 결합 계수, l 은 권선의 길이이다.

2.1.2 연구 방법

충격과 변환기의 최적화 연구를 위해서는 절연체 및 금속 막의 영향에 의한 인덕턴스 및 등가 저항의 변화를 관찰하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유효 결합 계수 및 금속 막의 유효 저항 결합 계수를 도입하였으나, 수학적 방법으로 이를 확인하는 것은 매우 난해하다. 본 연구에서는 유효 결합 계수 및 유효 저항 결합 계수의 도출을 위해 절연체 및 금속 막의 두께를 달리한 충격과 변환기를 제작하여, 실험을 통해 각각의 방전 전류를 관찰하고, 이를 이용하여 실험적인 방법으로 도출하였으며, 이때 발생하는 충격파를 측정하여 그 결과를 확인하였다. 다만, 절연체 및 금속 막은 재질은 각각 동일한 것으로 제작하여 재질에 따른 특성은 고려하지 않았다.

2.2 실험 장치

2.2.1 임펄스 방전 시스템

본 연구를 위해 (주)에이치엔티메디칼(대한민국)에서 제작한 임펄스 방전 시스템(shine-wave, (주)HnT medical, Korea)을 사용하였다(Figure 2.2-1). 임펄스 방전 시스템은 인버터형 고전압 발생 장치, 커패시터, 고전압 스위치, 제어 장치로 구성되어 있다. 그 중 고전압 스위치는 스파크갭 스위치를 사용하였으며, 커패시터의 용량은 $97\text{nF} \pm 10\%$ 이다. 실험에서 충전을 위한 초기 전압은 15kV로 설정하였으며, 초기 조건을 확인하기 위해 임펄스 방전 시스템 자체의 인덕턴스 및 저항은 실험을 통해 측정하여 실험 결과에 반영하였다.

2.2.2 충격파 변환기

전자기식 원통형 충격파 변환기는 직경 15.5mm, 슬레노이드 코일의 길이 27mm, 권선의 굵기 0.5mm, 권선수 50회로, 절연체의 실린더 보빈에 권선하여 제작하였다. Figure 2.2-2는 본 연구에서 제작된 충격파 변환기의 모양이다. 실린더 보빈과 절연체 그리고 금속 막의 재질에 따른 특성 변화는 본 연구에서는 고려하지 않으며, 절연체 및 금속 막의 길이는 모두 동일하게 제작하였다. Table 2.2-1은 본 연구에서 설정된 충격파 변환기의 절연체 및 금속 막의 두께를 제시한다.

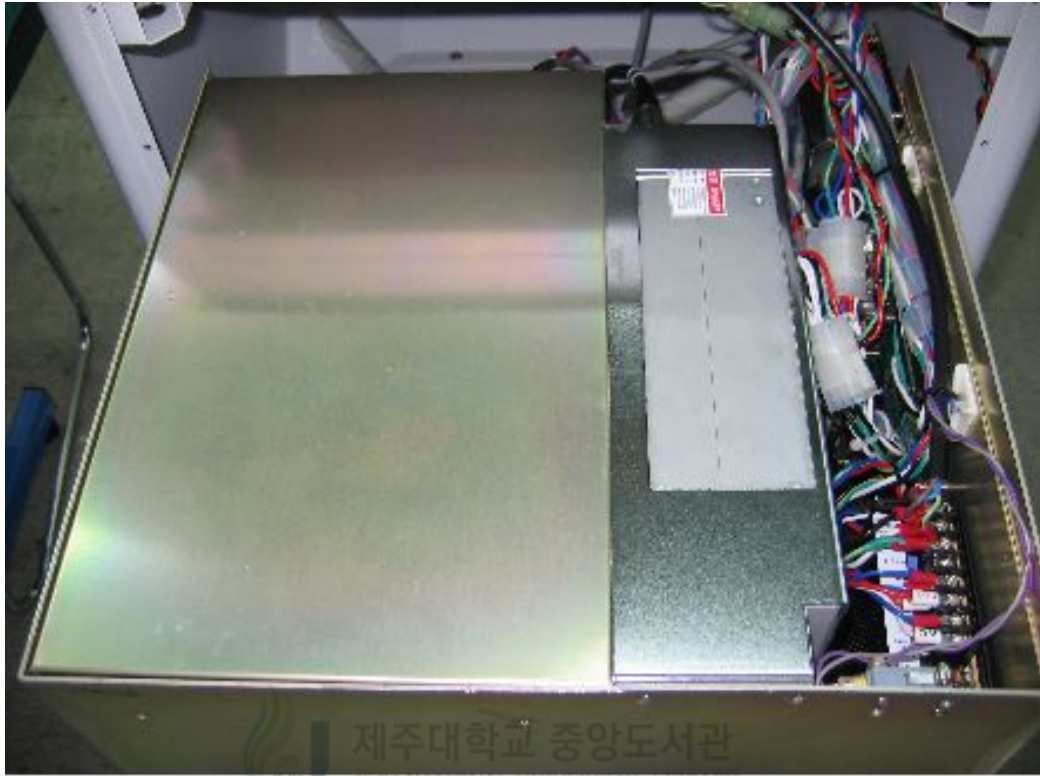


Figure 2.2-1. High voltage impulse discharge system used in the present experiment (Shinewave, HnT medical, Korea)

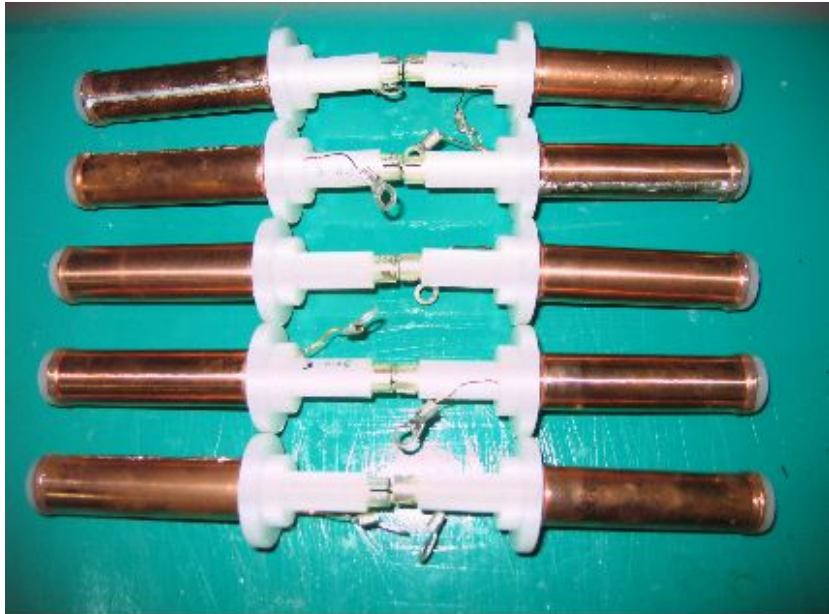


Figure 2.2-2. Electromagnetic cylindrical shock wave transducers constructed to be tested in the present study

Table 2.2-1. Ranges of the thickness of the insulator and iron foil of the electromagnetic cylindrical shock wave transducers tested in the present study

Material	Thickness
Insulator	50 μm , 100 μm , 150 μm , 200 μm , 300 μm , 500 μm
Iron foil	30 μm , 50 μm , 100 μm , 150 μm , 200 μm

2.3 측정 시스템

2.3.1 방전 전류 및 충격파

본 연구에서 방전 전류 파형은 홀(Hall)-CT(pearson 100:1)를 이용하여 측정하였으며, 각 16회 측정한 후 평균값을 사용하였다. 기본적으로 임펄스 방전 시스템의 경우 식(2.1-6)에서 보는 바와 같이 전류는 진동하면서 감소하게 된다. 하지만 충격파 에너지의 경우 최초로 발생하는 충격파를 제외하고 진동에 의해 발생하는 충격파는 제거하는 것이 효율적이기 때문에 최초 반주기 이후의 전류를 차단하기 위해 방전 회로에 역전류 차단 장치를 설치하였다.

충격파는 30x30x20(cm) 수조에 Degassing water를 채운 후 Fiber optic hydrophone(FOPH-2000)를 이용하여 측정하였다. FOPH-2000의 Setting 주파수는 2-20MHz, $U_0=660\text{mV}$ 였으며, 16회 측정하여 평균값을 사용하였고, 측정 장치의 노이즈를 제거하기 위해 2MHz low pass filter를 사용하였다. Figure 2.2-3은 측정 시스템의 개요도이다.

일반적으로 체외 충격파 치료술에 이용되는 충격파는 변환기에서 발생된 충격파를 집속 장치에서 반사시켜 초점에 집속된 고에너지의 집속 충격파를 사용한다. 본 연구에서는 충격파 집속 장치 및 전달 매질 등에 의한 충격파 특성의 변화를 배제하고, 초점에서의 충격파 측정의 어려움 등으로 인해 충격파 변환기의 표면 부근에서 집속되지 않은 충격파를 측정하였다. 충격파 측정 위치는 센서와 충격파 변환기 사이의 거리를 30mm로 고정하였다.

실제 초점에서의 충격파의 크기는 충격파 변환기의 표면에서 측정된 충격파와 충격파 변환기의 표면적에 비례할 것으로 예상되며, 추후 추가 연구를 통해 표면에서 측정된 충격파를 통해 초점에서의 충격파를 추정할 예정이다.

2.3.2 충격파 변환기의 인덕턴스 및 등가 저항의 측정

일반적으로 인덕턴스 및 저항의 측정을 위해서는 LCR meter를 사용한다. 그러나, 고전압 임펄스 방전 전류에 의한 인덕턴스 및 등가 저항을 측정할 수 있는 보편화된 LCR meter는 없다. 그래서, 본 연구에서는 각각의 충격파 변환기의 슬

레노이드 코일에 흐르는 전류 파형을 측정하고, 식(2.1-6)을 이용하여 인덕턴스 및 등가 저항을 추정하여 도출하였다. 따라서 측정 및 추정 과정에서 오차가 발생할 개연성은 상존하고 있으나, 그 오차 범위는 크지 않을 것으로 예상된다.



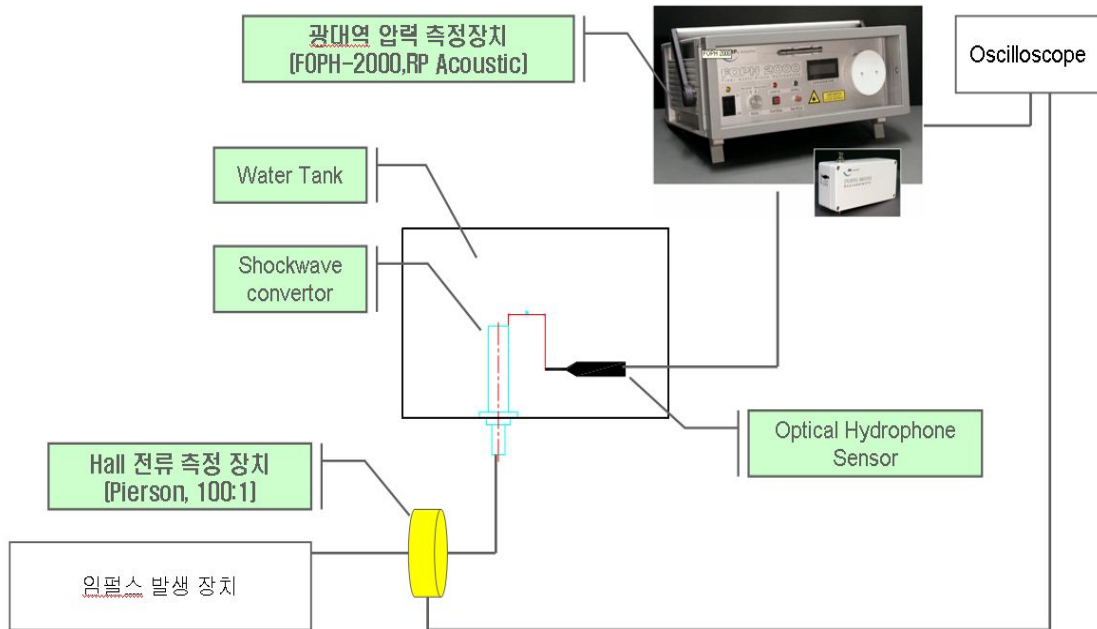


Figure 2.2-3. Outline of a shock wave measurement system using an optical hydrophone FOPH-2000 (RP Acoustics, Germany)

2.4. 실험 결과

2.4.1 임펄스 방전 시스템의 인덕턴스 및 등가 저항

임펄스 방전 시스템은 방전 회로와 충격과 변환기를 연결하는 케이블로 구성되어 있다. Figure 2.4-1은 케이블을 포함한 임펄스 방전 시스템의 방전 전류를 측정된 그래프이다. 임펄스 방전 시스템의 방전 전류는 최대 약 2.95 KA, 반주기는 약 $1.13\mu\text{s}$ 이다. 이를 근거로 추정된 인덕턴스는 $1.35\mu\text{H}$, 등가 저항은 0.6Ω 이다.

2.4.2 솔레노이드 코일의 인덕턴스 및 등가 저항

Figure 2.4-2는 임펄스 방전 시스템에 절연체 및 금속 막을 제거하고, 솔레노이드 코일만 감겨져 있는 충격과 변환기를 연결하여 측정된 방전 전류 파형이다. 솔레노이드 코일의 인덕턴스가 매우 커서 Figure 2.4-1에 비해 전류의 크기가 급격히 줄어들었고, 주기는 매우 늘어난 결과를 볼 수 있다. 최대 전류치는 0.98KA 이며 반주기는 약 $4.3\mu\text{s}$ 이고, 방전 전류를 통해 추정된 솔레노이드 코일 자체의 인덕턴스는 $18.65\mu\text{H}$, 등가 저항은 0.22Ω 이다. 식(1.2-2), 식(1.2-3) 과 식(1.2-4)를 이용하여 이론적으로 계산한 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 $22.1\mu\text{H}$, 저항은 0.28Ω 으로 인덕턴스의 경우 방전 전류를 통해 추정된 값과 차이가 있고, 등가 저항은 유사한 것으로 나타났다. 이것은 고 전압, 대 전류 방전 전류의 경우 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 감소되고, 저항은 추정치의 오차를 고려할 경우, 거의 동일한 것을 알 수 있다.

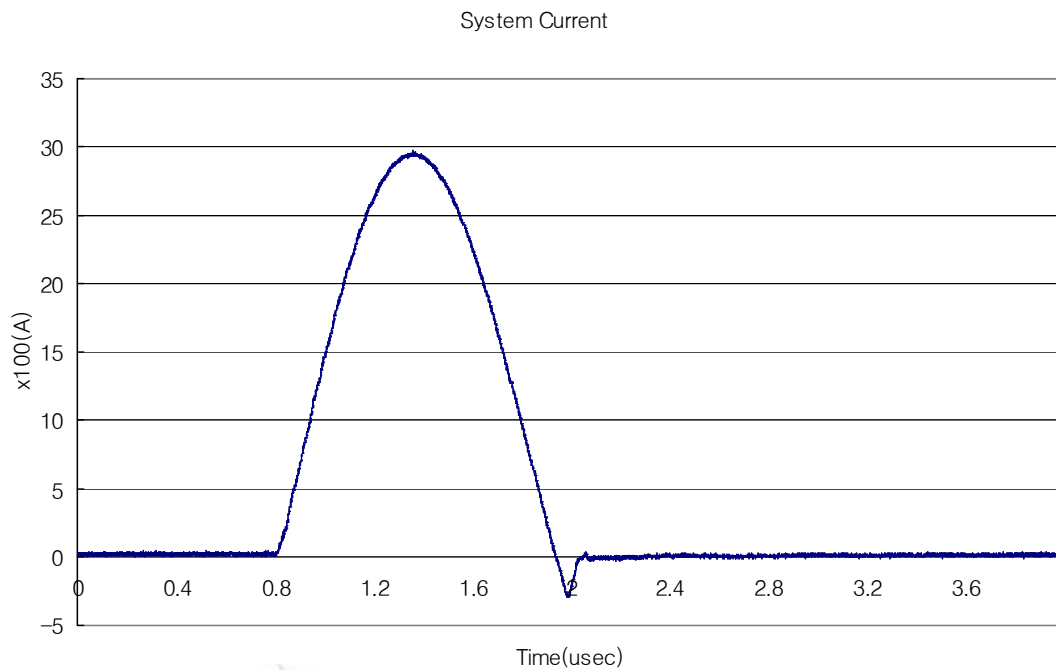


Figure 2.4-1. A typical waveform of the discharge current pulse measured in the high voltage pulse power generator not connected with the shock wave transducer

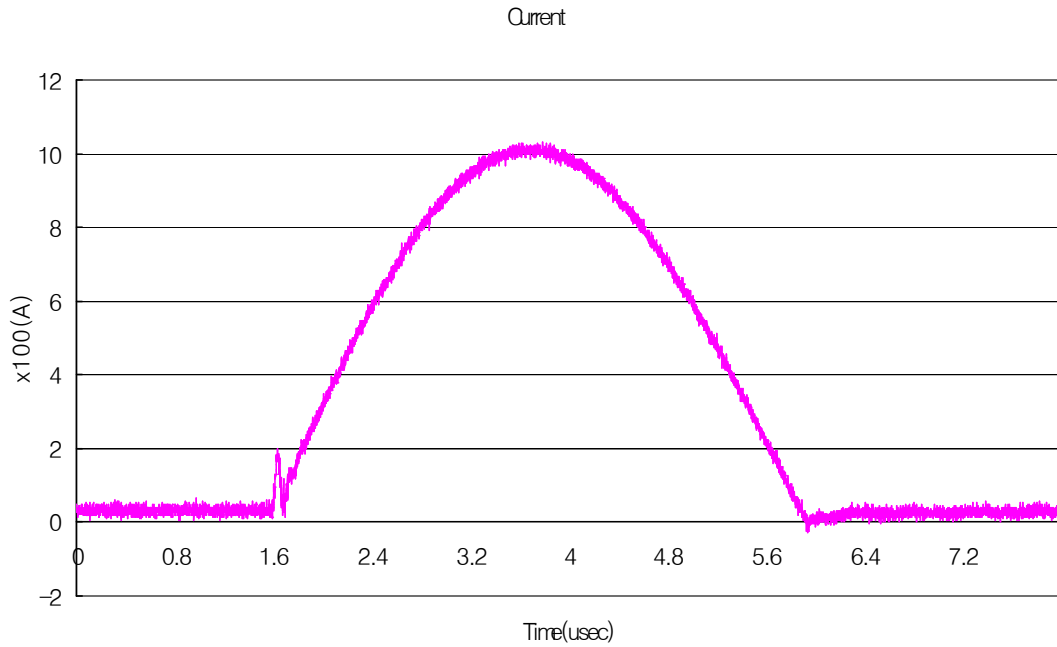


Figure 2.4-2. A typical measured waveform of the discharge current pulse which flows through the solenoid coil without the insulator and iron foil.

2.4.3 금속 막에 의한 솔레노이드 코일의 인덕턴스 감소 효과

솔레노이드 코일에 금속 막을 부착하면 인덕턴스가 감소되는데, 절연체 및 금속 막의 두께에 따라 감소되는 정도는 달라진다. Figure 2.4-3은 절연체의 두께를 $200\mu\text{m}$, 금속 막의 두께를 $100\mu\text{m}$ 로 설정한 솔레노이드 코일에 흐르는 방전 전류 파형과 절연체 및 금속 막을 부착하기 전의 방전 전류 파형을 비교한 그래프이다. 그림과 같이 금속 막에 의해 코일의 인덕턴스가 감소되어 전류가 증가하였으며, 주기도 짧아진 것을 볼 수 있다. 전류 파형을 통해 추정한 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 $2.55\ \mu\text{H}$ 로 금속 막을 부착하기 전에 비해 약 86%가 감소되었으며, 저항은 약 $1.3\ \Omega$ 으로 $1.1\ \Omega$ 이 증가하였다. 금속 막에 의해 충격파 변환기 전체의 인덕턴스는 감소하고, 저항 성분은 증가한 것을 알 수 있다.

Table 2.4-1은 절연체 및 금속 막의 두께별 유효 결합 계수를 나타내고 있다. 절연체가 두꺼워 질수록 증가하고 있으며, 금속 막의 두께에 따라서는 감소 후 증가하는 패턴을 보이고 있다. Table 2.4-2는 유효 저항 결합 계수를 나타내고 있다. 유효 결합 계수와 비슷한 양상을 보이고 있으나, 금속 막의 두께에 따라서는 지속적으로 증가하는 형태를 나타내고 있다.



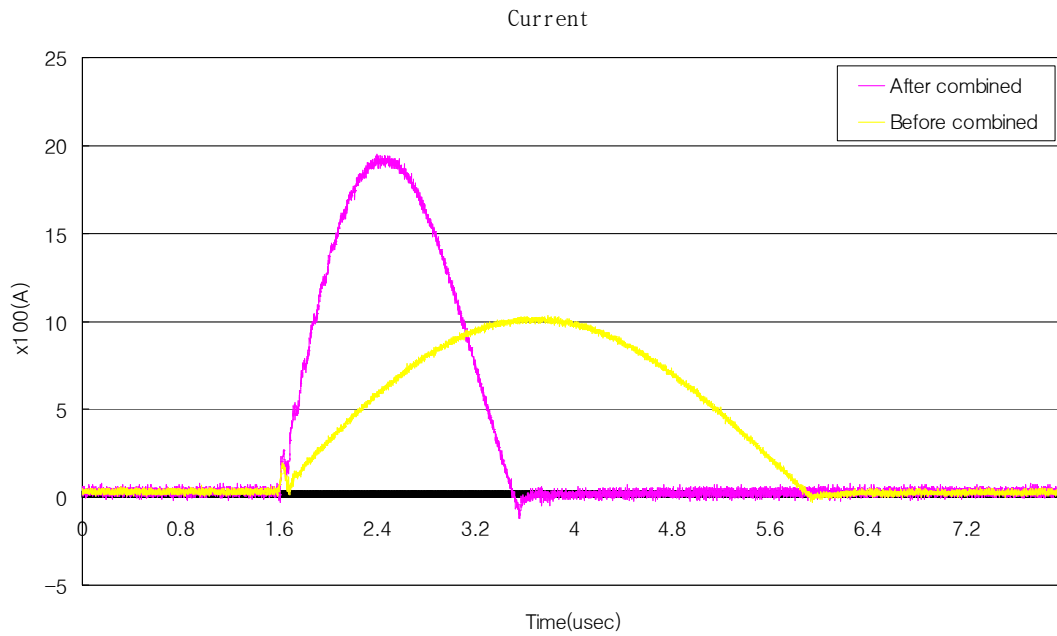


Figure 2.4-3. A typical measured waveform of the discharge current pulse which flows through the solenoid coil combined with the insulator and iron foil, contrasting to that in the solenoid coil only, ie, Figure 2.4-2.

Table 2.4-1. An effective matching coefficients

Insulator(μm) Iron foil(μm)	50	100	150	200	300	500
30	0.12	0.12	0.13	0.14	0.16	0.21
50	0.09	0.1	0.12	0.12	0.15	0.21
100	0.09	0.1	0.12	0.13	0.16	0.21
150	0.1	0.11	0.13	0.14	0.16	0.22
200	0.13	0.13	0.15	0.16	0.18	0.24

Table 2.4-2. An effective resistance matching coefficients

Insulator(μm) Iron foil(μm)	50	100	150	200	300	500
30	0.048	0.046	0.05	0.054	0.065	0.089
50	0.043	0.041	0.06	0.058	0.073	0.116
100	0.056	0.07	0.09	0.101	0.149	0.22
150	0.089	0.077	0.12	0.134	0.186	0.271
200	0.107	0.101	0.16	0.174	0.244	0.298

2.4.4 충격과 변환기의 인덕턴스 및 등가 저항

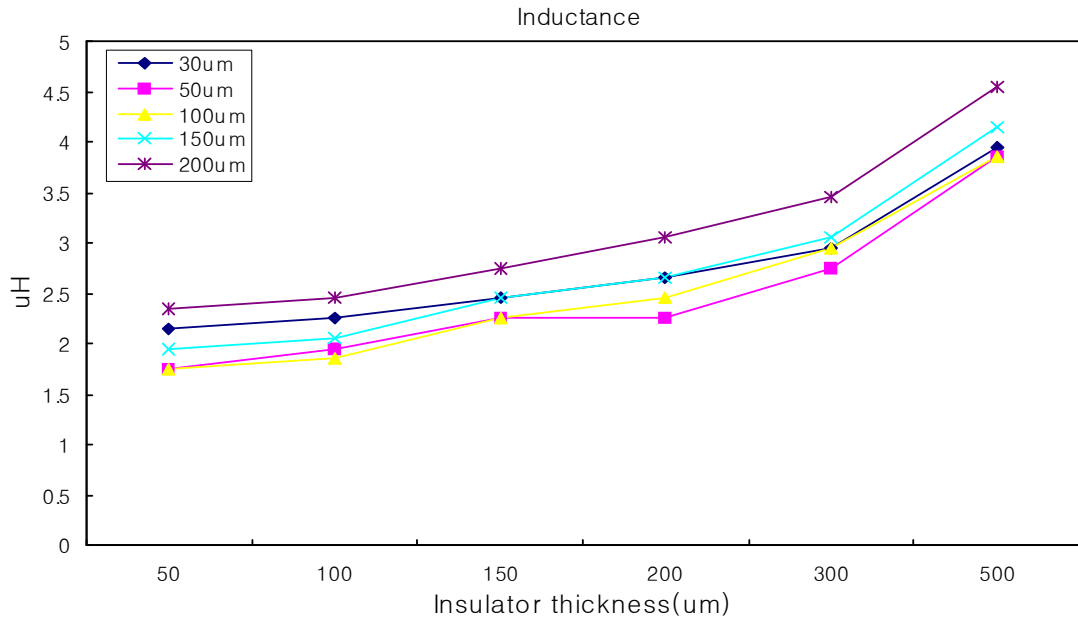
Figure 2.4-4는 방전 전류 파형을 이용하여 추정된 시험용 충격과 변환기의 인덕턴스의 변화를 보여준다. 인덕턴스는 절연체가 두꺼울수록 증가 한다(Figure 2.4-4a). 절연체가 두꺼울수록 금속 막과 솔레노이드 코일의 거리가 멀어져 인덕턴스의 감소 효과가 줄어들었기 때문이다. 따라서 절연체가 두꺼울수록 충격과 변환기에 흐르는 전류의 크기는 감소할 것으로 예상된다.

금속 막의 두께에 따른 인덕턴스는 금속 막의 두께가 $30\mu\text{m}$ 에서 높게 나타나고 이후 낮아졌다가 다시 높아지고 있다(Figure 2.4-4b). 금속 막의 두께가 $30\mu\text{m}$ 에서 인덕턴스가 높은 것은 고주파 전류의 표피 효과에 의한 것으로 추정된다. 그러나, 금속 막의 두께가 $100\mu\text{m}$ 이상에서 인덕턴스가 증가하는 것은 표피 효과로는 설명할 수 없다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

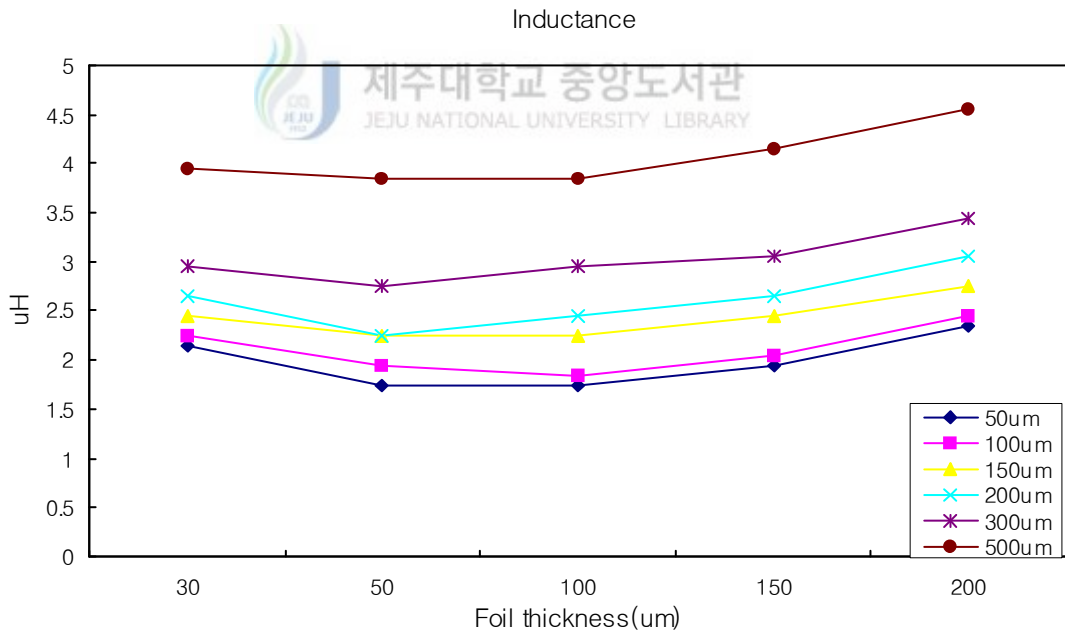
Figure 2.4-5는 방전 전류 파형을 이용하여 추정된 충격과 변환기의 등가 저항이다. 절연체 두께별 등가 저항(Figure 2.4-5a)은 절연체 두께에 따라서 일부 차이가 있지만, 대체적으로 절연체의 두께가 50, $100\mu\text{m}$ 일 때 저항이 가장 높게 나타나고 이후 감소하는 형태를 보이고 있다. 하지만, 고전압 회로에서 작은 저항이라도 전류에는 상당히 큰 차이를 발생시키는 것을 감안하면 미세한 차이라도 무시하기는 어려운 수준이다.

금속 막의 두께별 등가 저항(Figure 2.4-5b)은 전체적으로 두께가 두꺼울수록 낮아지는 것이 확연히 나타난다. 그 이유로는 도체의 저항은 단면적에 반비례하기 때문에 금속 막이 두꺼울수록 단면적이 증가하여 저항이 낮아지는 요인으로 추정된다. 하지만, 방전 전류의 주파수 변화로 인해 발생하는 다양한 요소의 저항 성분들의 변화들이 영향을 끼칠 개연성도 존재할 수 있을 것이다.

결론적으로 절연체가 두꺼워 질수록 인덕턴스는 증가하고, 등가 저항은 미세하지만, 증가 후 감소하는 패턴을 보이고, 금속 막의 두께가 두꺼워 질수록 인덕턴스는 감소 후 증가하지만, 등가 저항은 감소한다. 절연체와 금속 막, 그리고 인덕턴스와 등가 저항이 서로 대칭적인 변화 패턴을 보이는 것은 흥미로운 부분이다.

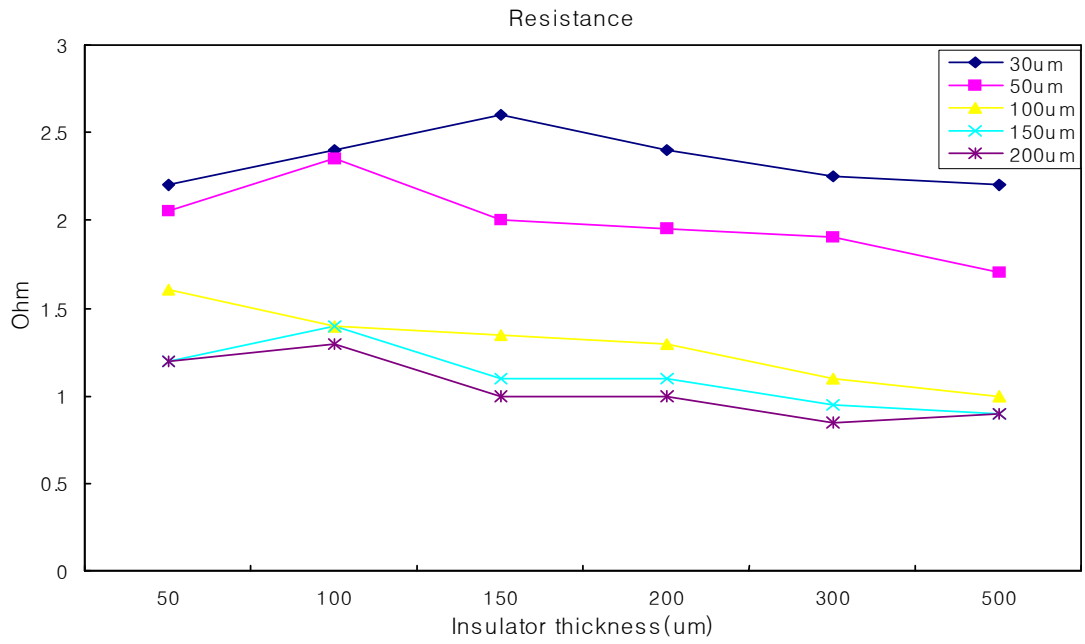


(a)

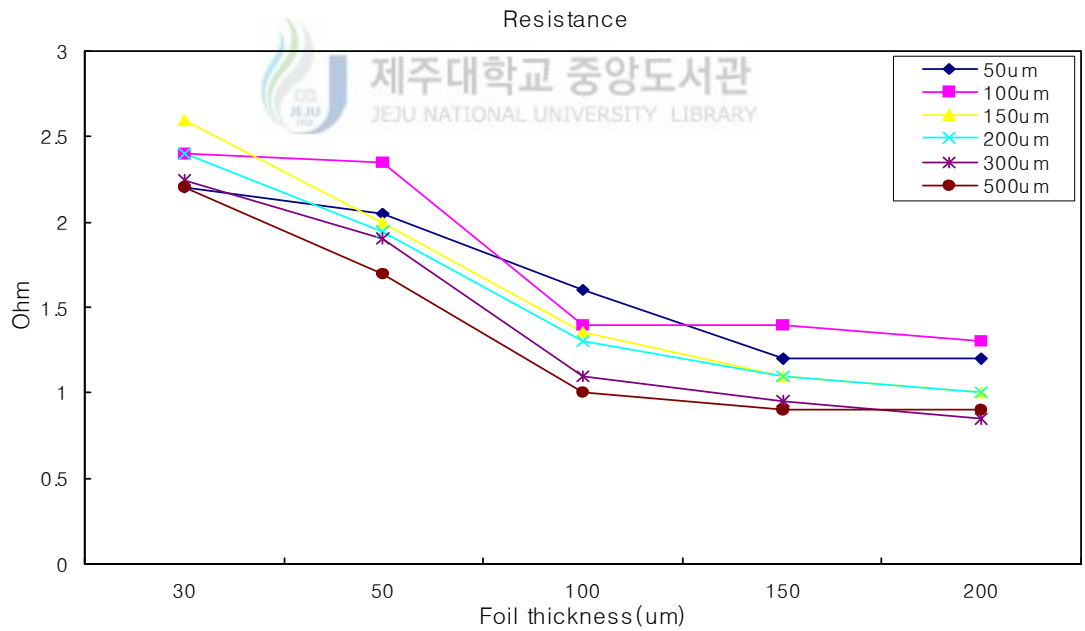


(b)

Figure 2.4-4. Inductance of the shockwave transducers against (a) the insulator thickness for 5 different iron foil thickness and (b) the iron foil for thickness for 6 different insulator thickness.



(a)



(b)

Figure 2.4-5. An equal value resistance of shockwave transducer (a) the insulator thickness for 5 different iron foil thickness and (b) the iron foil for thickness for 6 different insulator thickness.

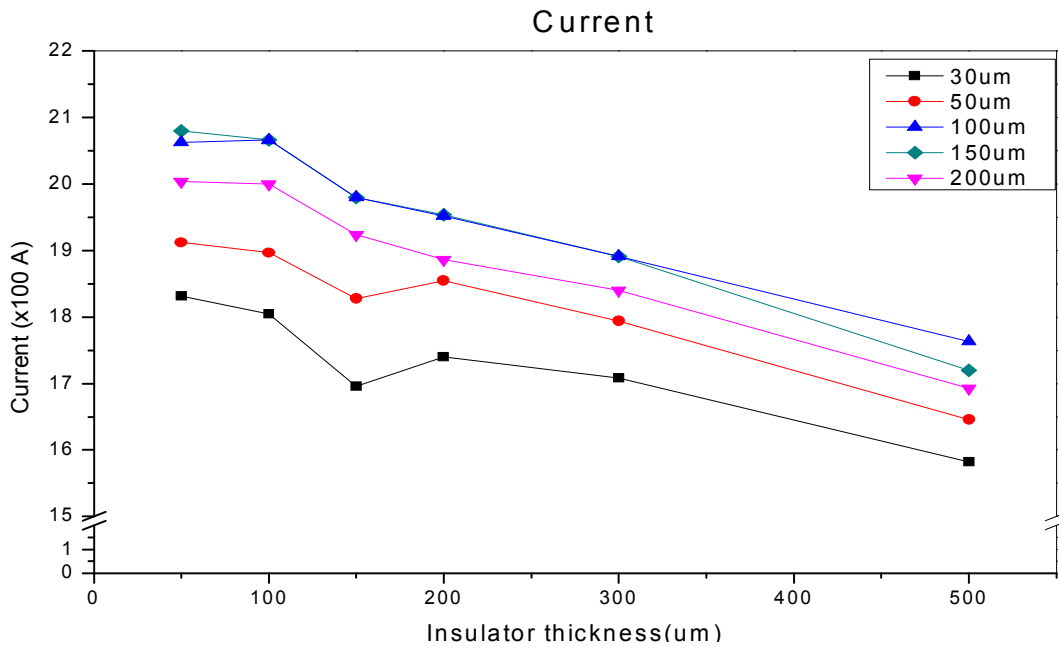
2.4.5 방전 전류의 변화

Figure 2.4-6a는 절연체의 두께에 따라 코일에 흐르는 방전 전류의 최대치를 나타낸 그래프이다. 충격파 변환기의 솔레노이드 코일과 막의 절연을 위해 사용하는 절연체의 두께는 금속 막과 코일 사이의 거리를 결정한다. 따라서 절연체 두께가 두꺼울수록 금속 막에 의한 인덕턴스의 감소는 작아져 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 증가하게 되고, 이로 인해 코일에 흐르는 전류는 감소한다. 금속 막 두께에 따라 차이는 있지만, 전체적으로 절연체가 두꺼울수록 전류가 작게 흐르는 것을 알 수 있다. Figure 2.4-4a에서 살펴 본 바와 같이 코일의 인덕턴스의 변화와 당연하게 방향은 반대이지만, 패턴은 비슷한 형태를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

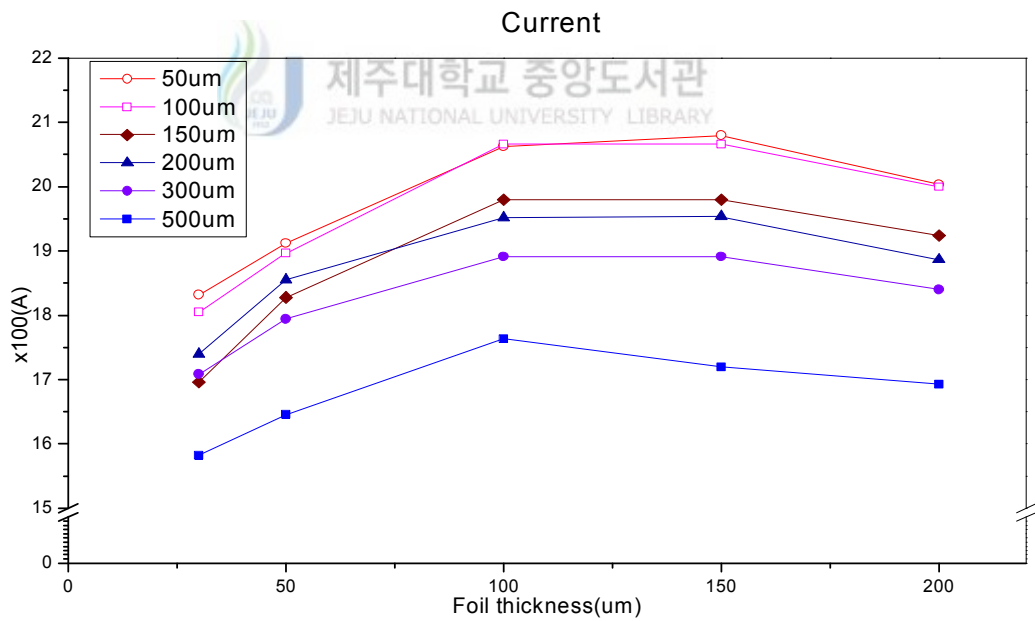
Figure 2.4-6b는 금속 막의 두께별 코일의 최대 전류치를 나타낸 그래프이다. 금속 막의 두께가 가장 얇은 $30\mu\text{m}$ 에서 전류가 가장 낮게 흐르고, 금속 막의 두께가 증가할수록 전류도 증가하여 $100, 150\mu\text{m}$ 에서 가장 높은 전류가 관찰되었다.

이러한 원인은 고주파 전류의 표피 효과에 의한 영향으로 인덕턴스가 감소되지 못하여 전류가 낮게 흐른 것으로 추정할 수 있는데, Figure 2.4-4b에서 살펴 본 바와 같이 코일의 인덕턴스 그래프와는 반대로 나타나는 것을 알 수 있다.

하지만, Figure 2.4-4b에서 $30\mu\text{m}$ 에서의 인덕턴스가 $100\mu\text{m}$ 에 비해서는 높지만, $200\mu\text{m}$ 에 비해서는 낮게 나타나고 있다. 따라서 인덕턴스의 효과만을 고려한다면 최대 방전 전류는 $200\mu\text{m}$ 에 비해서 $30\mu\text{m}$ 에서 높게 흐르는 것이 정상적이다. 하지만, 실제로는 전체적으로 $30\mu\text{m}$ 에 비해 $200\mu\text{m}$ 에서 높게 나타나고 있다. 이러한 현상에 대한 원인은 Figure 2-9b에서 추측할 수 있는데 금속 막의 두께가 얇을수록 등가 저항이 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 방전 전류가 솔레노이드 코일의 인덕턴스와 함께 금속 막으로 인한 저항 성분의 증가에도 많은 영향을 받는다는 것을 시사한다.



(a)



(b)

Figure 2.4-6. Peak amplitudes of the current pulse flowing through the solenoid coil against (a) the insulator thickness for 5 different iron foil thickness and (b) the iron foil thickness for 6 different insulator thickness.

2.4.6 충격파

(1) 충격파형

Figure 2.4-7은 본 연구에서 측정된 충격파 파형이다. 측정된 충격파형은 충격파 변환기의 근처(표면에서 30mm)에서 측정된 것으로 집속 장치에 의해 집속되지 않았기 때문에 일반적으로 초점에서 측정되는 충격파(수십 MPa 이상)에 비해 그 크기가 매우 낮다.

Figure 2.4-8은 절연체의 두께가 50 μ m인 충격파 변환기의 금속 막의 두께별로 측정된 충격파의 최대치로 16회 측정 평균값을 총 5회 측정하여 충격파의 변동성을 도시한 것이다. 그래프에서 보여주는 바와 같이 측정값에 오차가 있는 것을 알 수 있다. 이것은 충격파 측정에 사용한 측정 장치(FOPH-2000)와 충격파 발생 장치의 재현성에 의해 발생하는 것으로 예상된다. 본 연구에서는 충격파의 절대적인 크기보다는 절연체 및 금속 막의 두께에 따른 상대적인 변화를 관찰하기 때문에 이러한 오차에 의해 크게 영향을 받지 않는다.



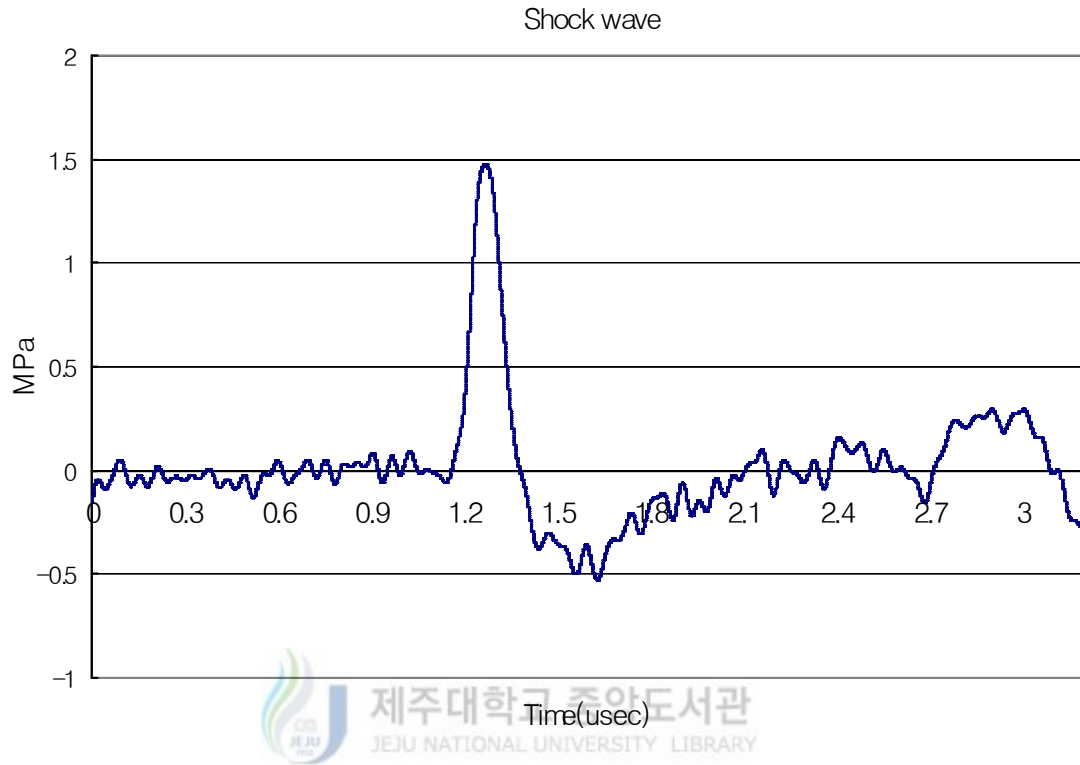


Figure 2.4-7. Typical shock waveform measured in the near from the cylindrical surface of the shockwave transducer (Insulator: 300 μ m, Iron foil: 30 μ m)

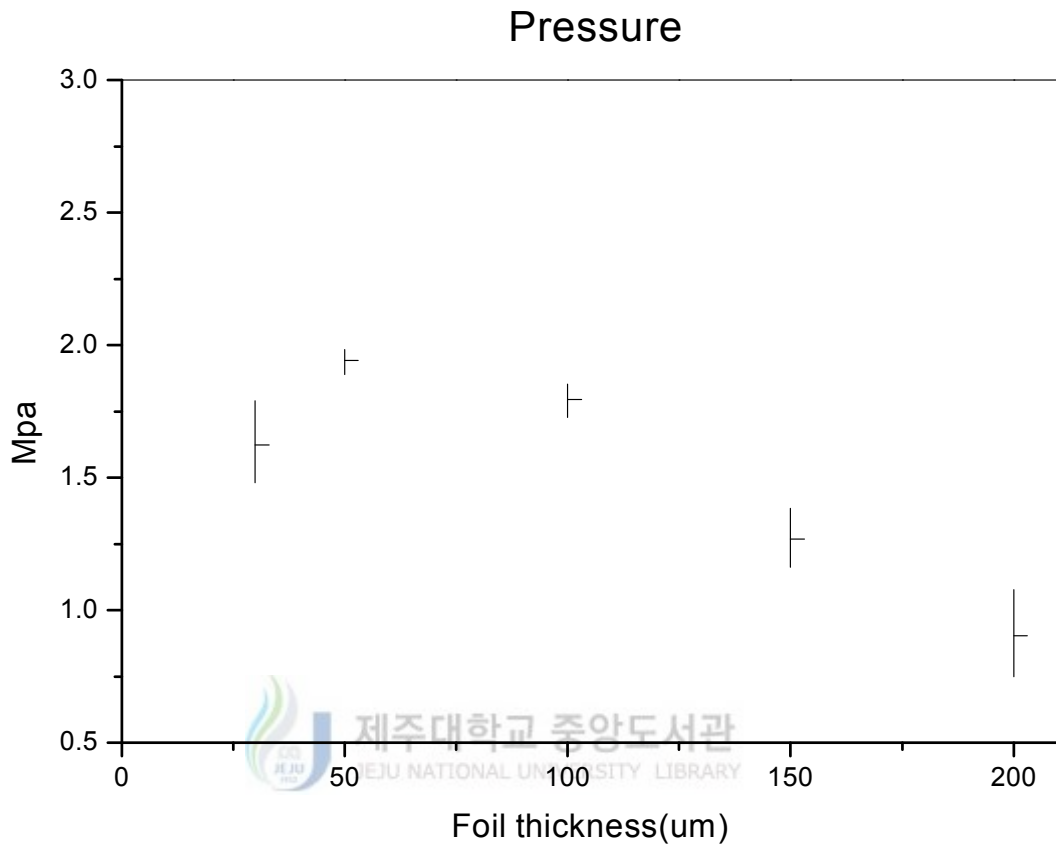
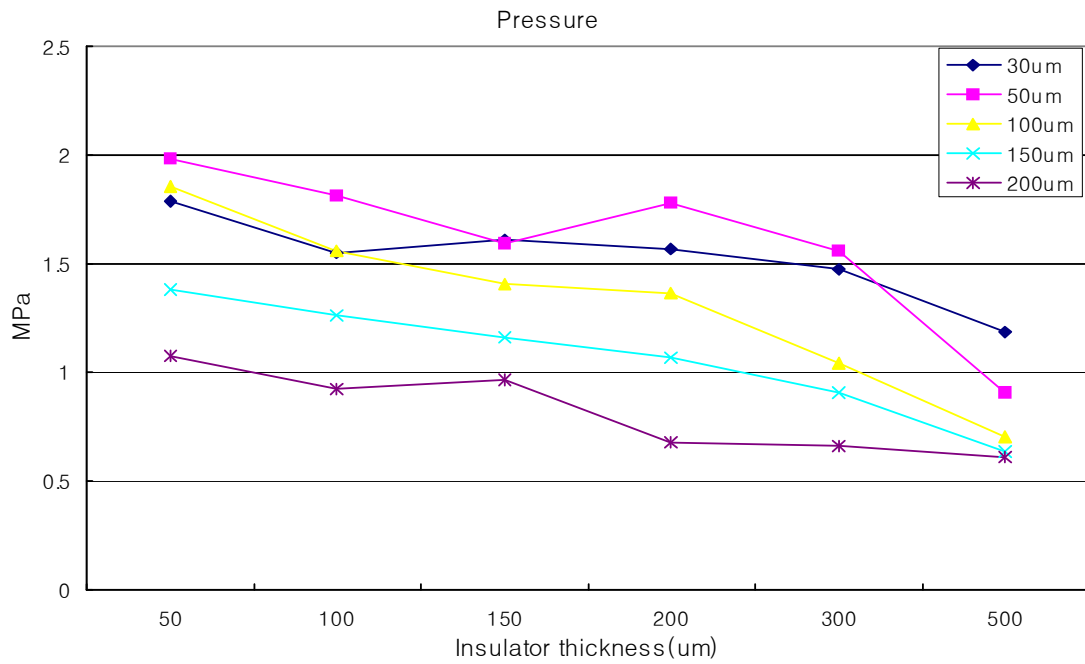


Figure 2.4-8. Variability of the peak amplitudes of the measured shock waves against the iron foil thickness at the insulator thickness of $50\mu\text{m}$.

(2) 충격파의 변화

Figure 2.4-9a는 절연체 두께가 변화할 때 측정된 충격파의 크기(P+)를 보여준다. 충격파의 크기는 절연체가 얇을수록 높게 나타나고 두꺼워질수록 감소하는 경향을 보여준다. 이것은 방전 전류의 변화(Figure 2.4-6a)에서 관찰한 내용과 유사한 특성이며, 충격파의 크기는 방전 전류의 크기와 비례하여 변화하는 것을 알 수 있다.

금속 막의 두께에 따른 충격파의 크기는 절연체 두께가 500 μm 인 경우를 제외하면, 금속 막의 두께가 50 μm 일 때 절연체 두께와 상관없이 높게 나타났다(Figure 2.4-9b). 이것은 앞서 언급한 충격파가 방전 전류의 크기에 영향을 받는다는 것과는 상치되는 결과이다. 실제 방전 전류는 금속 막의 두께가 100, 150 μm 에서 가장 높게 관찰되었다(Figure 2.4-6b). 충격파도 100, 150 μm 에서 높게 나타나야 하지만 충격파의 크기는 50 μm 에서 가장 높다. 이것은 금속 막의 두께에 비례하는 관성의 효과로 설명할 수 있다. 즉 방전 전류에 의한 금속 막의 반발력은 100, 150 μm 에서 높다. 그러나 동일한 힘이 금속 막에 유발하는 진동의 크기는 금속 막이 두꺼울수록(즉 관성이 클수록) 작게 된다. 비록 금속 막 100, 150 μm 보다 상대적으로 반발력은 작더라도 관성의 감소가 상대적으로 큰 50 μm 의 금속 막에서 역학적인 진동이 크게 발생하여, 충격파의 크기가 높아진 것으로 추정된다.



(a)

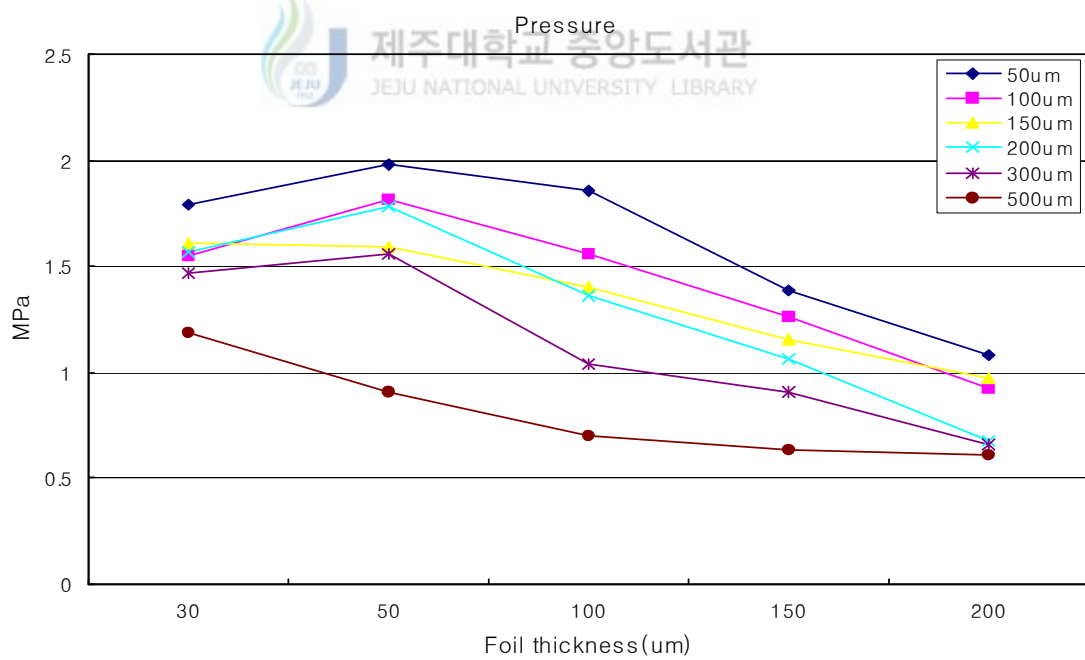


Figure 2.4-9. Peak amplitudes of the measured shock waves against (a) the insulator thickness for 5 different iron foil thickness and (b) the iron foil for thickness for 6 different insulator thickness.

제 3 장 토 의 및 결 론

3.1 토 의

본 연구에서는 전자기식 원통형 충격파 변환기의 절연체와 금속 막의 두께에 따른 솔레노이드 코일의 방전 전류 및 충격파의 변화를 관찰하여 두께에 따른 인덕턴스 및 등가 저항을 추정하였다. 실험 결과 두께별 인덕턴스의 변화는 약 75~91%의 감소율을 보였으며, 등가 저항은 약 1.2~2.6 Ω 이 증가하였다.

실험 결과를 살펴보면, 절연체의 두께는 얇을수록 솔레노이드 코일의 전류가 높게 나타났으며(Figure 2.4-6a), 이것은 솔레노이드 코일과 금속 막의 간격이 가까워 금속 막에 의한 코일 인덕턴스의 감소 효과가 증가하여 인덕턴스가 낮아졌기 때문이다.(Figure 2.4-4a)

금속 막의 두께별 방전 전류는 30 μm 에서 전류가 가장 낮았으며, 두께가 증가할수록 전류가 증가하여 150 μm 이후부터 다시 감소하였다. 그 이유는 금속 막의 두께가 일정한 값 이하일 경우 고주파 전류의 표피 효과로 인해 코일의 인덕턴스가 감소되지 못한 것과 금속 막이 얇을수록 충격파 변환기의 등가 저항이 증가한 원인이 복합적으로 작용한 것으로 추정된다. Figure 2.4-4b를 보면, 금속 막의 두께가 30 μm 에 비해 200 μm 일 때 인덕턴스가 높지만, 실제 최대 방전 전류는 200 μm 에서 높게 나타나고 있는데 이것은 Figure 2.4-5b에서 보는 바와 같이 등가 저항이 30 μm 에 비해 200 μm 일 때가 낮기 때문에 나타나는 현상이다.

본 연구에서는 절연체와 금속 막이 솔레노이드 코일의 인덕턴스 및 등가 저항에 미치는 영향을 보정하기 위해 실험적으로 유효 결합 계수를 도출하였다. 도출된 유효 결합 계수 M_L 은 0.09~0.24(Table 2.4-1)였으며, 유효 저항 결합 계수 M_R 은 0.04~0.3(Table 2.4-2)이었다.

본 연구를 통해 도출된 유효 결합 계수가 일반적으로 모든 전자기식 원통형 충격파 변환기에 대해 적용되기 위해서는 충전 전압, 커패시턴스, 솔레노이드 코

일의 직경, 권선의 굵기, 절연체 및 금속 막의 재질 등 모든 변수들과의 상관관계에 대해서 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다. 다만, 그에 대한 가능성을 검토하기 위해 솔레노이드 코일의 권선수별 유효 결합 계수의 변화에 대한 실험이 이루어졌다.

Figure 3.1-1은 절연체 두께가 $200\mu\text{m}$, 금속 막의 두께가 $50\mu\text{m}$ 로 동일한 상태에서 솔레노이드 코일의 권선수별 인덕턴스가 금속 막에 의해 감소된 감소율(유효 결합 계수)을 나타낸 그래프이다. 본 연구에서 기준으로 설정한 권선수 50회의 충격과 변환기와, 권선수를 25회, 75회, 100회로 변경한 충격과 변환기의 방전 전류에 대해서 관찰한 결과, 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 권선수가 증가할수록 제곱에 비례하여 증가(식 1.2-3)하기 때문에 권선수가 증가할수록 솔레노이드 코일 자체의 인덕턴스는 증가하였으며, 등가 저항 성분도 증가하였다. 그러나, 인덕턴스의 감소율은 4종류 모두 약 84 ~ 88%, 유효 결합 계수는 0.16 ~ 0.12로 나타났다. 이것은 금속 막에 의한 인덕턴스 감소 효과가 솔레노이드 코일의 권선수의 변화에 따라 크게 달라지지 않는 것을 나타내는 것으로 향후 충격과 변환기의 형상 변경에 따른 방전 전류의 예측이 가능할 수 있음을 보여주고 있다.

그러나, 본 연구에서는 솔레노이드 코일의 권선수 외 다양한 변수들(솔레노이드 코일의 직경, 권선의 굵기, 절연체 및 금속 막의 재질 등)에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 이러한 변수들의 경우 수학적으로는 선형적인 상관관계를 가지고 있어, 수치 계산이 가능할 것으로 기대하지만, 검증은 위해서는 절연체 및 금속 막의 두께에 따른 각각의 변수들에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 다행히 변수들의 변화에 대해 선형적으로 결과들이 나타난다면, 충격과 변환기의 형상에 대한 수학적 계산이 가능해져서 충격과의 최적화에 대한 수치 예측 모델의 구현도 가능할 것으로 기대된다.

충격과는 전류의 크기와 직접적으로 비례한다. 따라서 전류의 크기가 클수록 충격과가 증가할 것으로 예상할 수 있다. 하지만, 측정 결과는 이와 다르게 나타났다. 코일에 흐르는 전류는 절연체의 두께가 $50\mu\text{m}$ 이고 금속 막의 두께가 100, $150\mu\text{m}$ 일 때 방전 전류가 가장 높은 것으로 나타났지만, 충격과는 절연체 두께 $50\mu\text{m}$ 와 금속 막 $50\mu\text{m}$ 에서 가장 높은 것으로 관찰되었다. 이것은 금속 막의 두께가 100, $150\mu\text{m}$ 일 때 전류가 가장 높게 흐르지만, 전류에 의한 반발력으로 금속

막이 진동할 때 금속 막의 두께가 두꺼울수록 힘에 의한 변위가 어렵기 때문에 추정된다.

충격파 변환기의 최적화를 위해서 필히 수행해야 하는 연구가 충격파의 측정이지만, 실제 충격파를 측정하는 것은 매우 어려운 과정이다. 본 연구에서는 기존 계측기의 단점을 보완한 가장 최신 기기인 광학 하이드로폰을 이용하여 충격파를 측정하였으나, 측정 위치에 따른 영향(Nearfield effect 등)과 계측기의 특성으로 인해 반복적으로 충격파를 측정하기가 쉽지 않았다. 따라서 충격파 센서를 이용한 측정 방식의 대안으로 금속 막의 변위량을 직접 검출하여 그 값을 비교, 분석하는 측정 방법도 좋은 대안이 될 수 있을 것이다. 다만, 측정된 금속 막의 변위량에 대응하는 충격파로의 환산을 위한 연구가 선행되어야 하지만, 이런 방법으로 충격파 측정이 이루어진다면 보다 정확하고, 정밀한 실험 데이터의 확보는 물론, 실험 과정도 수월해질 것으로 기대된다.

최근 충격파의 활용 분야가 확대되고 있는 추세를 고려하면(충격파 피부 치료기, 지방 분해기, 심장 치료기, 충격파 쇄석기 등) 향후 각 적용 분야에 최적화된 충격파 변환기에 대한 연구가 필요하다. 하지만, 충격파 측정의 어려움, 연구 설비 및 기초 자료의 부족으로 연구의 진입 장벽이 높다. 본 연구는 전자기식 원통형 충격파 변환기의 절연체 및 금속 막의 두께의 효과만을 고려한 제한된 분야이지만, 본 연구에 사용된 실험 도구 및 연구 방법은 임상적 효과를 최대화하는 최적화된 충격파 변환기 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

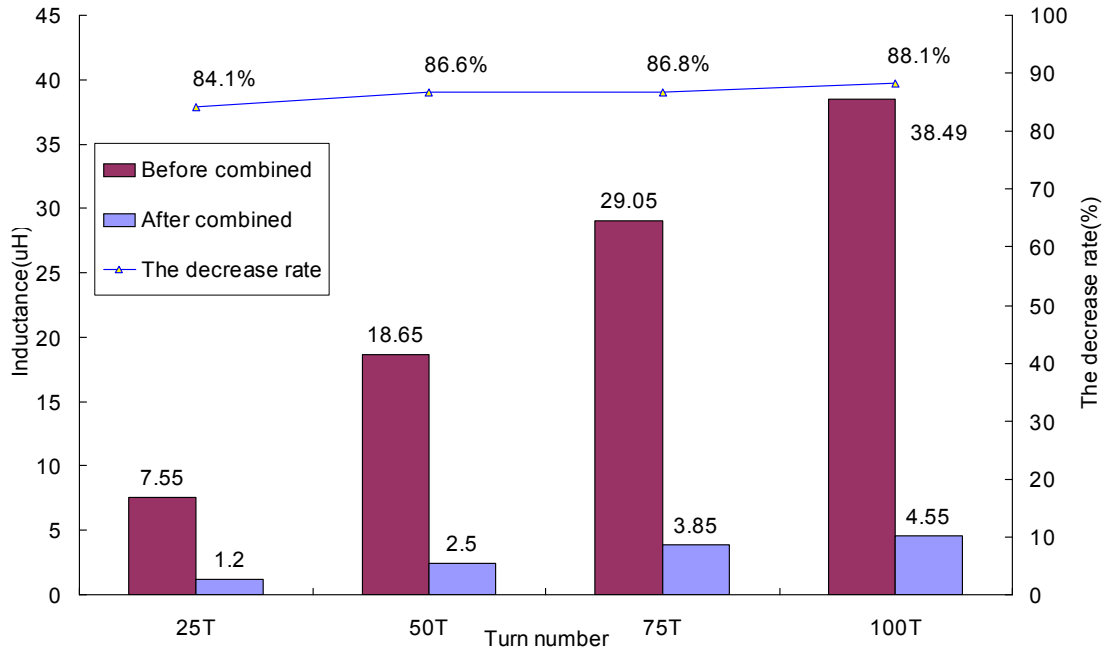


Figure 3.1-1. Inductance of the shockwave transducers (iron foil of $50\mu\text{m}$ in thickness and insulator of $200\mu\text{m}$ in thickness) against the number of turn of the solenoid coil: comparison before and after combining the iron foil and insulator to the solenoid.

3.2 결 론

본 연구에서는 체외 충격과 치료에서 사용하는 전자기식 원통형 충격과 변환기의 절연체 및 금속 막의 두께에 따른 방전 전류를 관찰하고 발생된 충격과 파형을 측정하였다. 실험 결과 절연체의 두께 및 금속 막의 두께가 모두 $50\mu\text{m}$ 일 때 충격과 발생 효율이 최대임을 확인하였다. 본 연구에 사용된 실험 도구 및 연구 방법은 임상적 효과를 최대화하는 최적화된 충격과 변환기 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

표 및 그림 목록

<표>

Table 1.1-1. Application of ESWT	3
Table 2.2.-1. Ranges of the thickness of the insulator and iron foil of the electromagnetic cylindrical hock wave transducers tested in the present study	30
Table 2.4-1. An effective matching coefficients	39
Table 2.4-2. An effective resistance matching coefficient	40

<그림>

Figure 1.1-1. Piezoelectric type shockwave generator. (a) Principle, (b) Disposition of piezoelement	5
Figure 1.1-2. Electrohydraulic type shock wave generator. (a) Electrode and focusing principle, (b) 3D graphic of reflector.	6
Figure 1.1-3. Electromagnetic cylindrical type shock wave generator. (a) General structure, (b) Shock wave geometric beam focus ...	7
Figure 1.2-1. Outline of high voltage discharging current generator	9
Figure 1.2-2. The structure of spark-gap switch	10
Figure 1.2-3. Structure of an electromagnetic cylindrical shock wave transducer	12
Figure 1.2-4. Principle of the electromagnetic cylindrical shock wave transducer	13
Figure 1.2-5. Current flows in the two wires arranged in parallel by the distance of d.	16
Figure 2.1-1. An equivalent circuit diagram of the electromagnetic shockwave generator	24

Figure 2.2-1. High voltage impulse discharge system used in the present experiment(Shinewave, HnT medical, Korea)	28
Figure 2.2-2. Electromagnetic cylindrical shock wave transducers constructed to be tested in the present study	29
Figure 2.2-3. Outline of a shock wave measurement system using an optical hydrophone FOPH-2000(RP Acoustics, Germany)	33
Figure 2.4-1. A typical waveform of the discharge current pulse measured in the high voltage pulse power generator not connected with the shock wave transducer	35
Figure 2.4-2. A typical measured waveform of the discharge current pulse which flows through the solenoid coil without the insulator and iron foil.	36
Figure 2.4-3. A typical measured waveform of the discharge current pulse which flows through the solenoid coil combined with the insulator and iron foil, contrasting to that in the solenoid coil only, ie, Figure 2.4-2.	38
Figure 2.4-4. Inductance of the shockwave transducers against (a) the insulator thickness for 5 different iron foil thickness and (b) the iron foil for thickness for 6 different insulator thickness.	42
Figure 2.4-5. An equal value resistance of shockwave transducer (a) the insulator thickness for 5 different iron foil thickness and (b) the iron foil for thickness for 6 different insulator thickness.	43
Figure 2.4-6. Peak amplitudes of the current pulse flowing through the solenoid coil against (a) the insulator thickness for 5 different iron foil thickness and (b) the iron foil for thickness for 6 different insulator thickness.	45
Figure 2.4-7. Typical shock waveform measured in the near from the cylindrical surface of the shockwave transducer(Insulator: 300 μ m, Iron foil: 30 μ m)	47

Figure 2.4-8. Variability of the peak amplitudes of the measured shock waves against the iron foil thickness at the Insulator thickness of $50\mu\text{m}$ 48

Figure 2.4-9. Peak amplitudes of the measured shock waves against (a) the insulator thickness for 5 different iron foil thickness and (b) the iron foil for thickness for 6 different insulator thickness. 50

Figure 3.1-1. Inductance of the shockwave transducers (iron foil of $50\mu\text{m}$ in thickness and insulator of $200\mu\text{m}$ in thickness) against the number of turn of the solenoid coil: comparison before and after combining the iron foil and insulator to the solenoid. 54



참고 문헌

Ogden J A, Alvarez R G, Levitt R and Marlow M. (2001). Shock wave therapy: Orthotripsy in Musculoskeletal disorders. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, 387, 22-40.

Eisenmenger W, Du X X, Tang C, Zhao S, Wang Y, Rong F, Dai D, Guan M and Qi A. (2002). The first clinical results of wide focus and low pressure ESWL. *UMB*, 28(6), 769-774.

Chinf-Jen Wang, MD, Han-Shiang Chen, MD, Chin-een Chen, MD, and Kuender D. Yang, MD, PhD, 2001, "Treatment of Nonunions of Long Bone Fractures With Shock Waves", *Clinical Orthopaedics and related reserch*, Number 387 pp. 95-101

Rompe, J.D., Hopf, C., Kullmer, K., Heine, J., Burger, R., Nafe, B. (1996). Low-energy extracorporeal shock-wave therapy for persistent tennis elbow. *International Orthopaedics (SICOT)*, 20, 23-27.

Choi M. J., Cho S. C., Kang K. S, Paeng, D. G. and Lee, J. S., (2004). Preliminary evaluation of a tapered cylindrical shock wave source. *Proc. Conference of ASK*, 23(1s), 379-38

Rompe, J. D., Kirkpatrick, C. J., Kullmer, K., Schwitalle, M., Kirschek, O. (1998). Dose-related effects of shock waves on rabbit tendon Achilles. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 80(3), 546-555.

Choi M. J. (2000). Application of ultrasound in Medicine: Therapeutic ultrasound and ultrasound contrast agent. *Journal of the Korean Society for*

Noise & Vibration Engineering. 10(4), 743-759.

C.E. Bachmann, G. Gruber W., Konermann A., Arnold G.M., Gruber F. Ueberle (2001). ESWT and ultrasound imaging of the musculoskeletal system. Steinkopff Verlag Darmstadt: Germany.

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

Cho, S. C., Jung, W. G., Kim, S. H., Kang, G. S., Lee, G. I. and Choi, M. J. (2004). "Properties of acoustic fields of a domestic electromagnetic extracorporeal shock wave therapy system", Acoustical society of korea, pp.237-238

Chaussy C G, Brendel W and Schmiedt E. (1988). ESWL: Past, Present, and future. J. Endourol., 2(2), 97-105.

Choi M. J. (2000), Application of ultrasound in Medicine: Therapeutic ultrasound and ultrasound contrast agent. Journal of the Korean Society for Noise & Vibration Engineering. 10(4), 743-759.

조 성찬, 최 민주, 조 주현, 강 학성, 정 우근, 강 관석, 강 충일, 이 재준, 전 준수, 정 창균, (2008), 테이퍼형 전자기식 이동용 체외 충격파 치료기 기술 개발 연구 보고서. 지식 경제부.

Abstract

Electromagnetic cylindrical shock wave generator employed in extracorporeal shock wave therapy (ESWT) consists of a high voltage (up to several times of 10 kV) pulse power generation part and a cylindrical shock wave transducer. The shock wave transducer is a solenoid coil wrapped with iron foil with an insulator between them. As a high voltage discharging impulse current flows through the shock wave transducer, the iron foil vibrates in a similar pattern with the impulse current by the magnetic force which occurs in the solenoid coil, and is transformed to shock waves. The Shock produced resulting from the foil vibration is influenced by the impulse current that flows through the coil and this discharging current varies with the inductance or resistance of the shock wave transducer. These inductance and resistance are determined by the thickness of the coil and insulator. The present study has investigated changes of the inductance and resistance of the shock wave transducer in relation to the thickness of the iron foil and the insulator, and also measured discharging current impulses flowing through the solenoid and shock waves produced under different thickness combinations of the iron foil and the insulator. Based on the results observed, the optimized thickness of the iron foil and the insulator of the electromagnetic cylindrical shock wave transducer was suggested.

(Key word: ESWT, shock wave, electromagnetic, solenoid coil, cylindrical, insulator, iron foil)

감사의 글

어떻게 보면 늦은 나이지만, 우리 학과의 기준으로 보면 아주 어린 나이에 학업이라는 걸 시작하면서 많은 두려움과 포기하고 싶은 생각이 들 때도 많았습니다. 하지만, 그럴 때마다 이런 생각을 했었습니다.

“이 언덕만 넘으면 정상이다!”

하지만, 그 언덕 말고도 언덕은 많더군요. 그런데 거짓말처럼 방금 힘겹게 넘어왔던 언덕 앞에 이른 봄 들판에 허드레지게 피는 새싹이 이제 막 연하고 약한 속살을 비치듯이 졸업이라는 아주 야트막한 봉우리가 뒤쪽에 펼쳐진 높고 웅장한 산맥들을 배경으로 살짝 놓여 있었습니다. 그 순간, 그 봉우리가 너무나 반가워 감개가 무량하고, 눈물이 앞을 가리고, 하늘은 왜 이렇게 푸르른지! 요즘처럼 어려운 시기에 세상이 밝아 보이기도 할 만큼 너무나 기분 좋고 행복한 순간이었습니다. 그렇지만, 짧은 환희의 순간이 지나가고, 봉우리 뒤에 펼쳐진 웅장한 산맥들에 압도된 나머지, 이제는 오히려 예전에 올랐던 언덕을 그리워하며, 그 낮은 언덕길에서 힘겨워 무심히 지나쳐 버렸던 내 주위를 찬찬히 둘러보게 됩니다.

돌이켜보면, 저의 오늘 이 자리는 최 민주 교수님이 아니었으면 불가능한 자리였습니다. 학부 과정에서부터 아무런 능력도 없는 저를 오늘 이 자리까지 이끌어 주신 교수님의 은혜에, 베풀어 주신 것에 비하면 아주 작은 마음이지만 저의 진심을 담아 깊은 감사의 마음을 드립니다. 아울러 부족한 학생을 이끌어 주신 박전홍 교수님, 이 광만 교수님, 김 경연 교수님, 팽 동국 교수님, 그 외 의공학과정의 모든 교수님께도 깊은 감사의 마음을 드립니다.

또한 이 강일 교수님, 홍 인실 박사님, 이 경성 교수님, 박 경규 선생님, 문 상돈 선생님, 김 영석 선생님, 양 정화 선생님, 김 선식 선생님, 오랫동안 뵙지 못하고 있는 이 종수 선생님, 이국땅에서 열심히 공부중인 안지레디 선생님 등 우리 학과의 모든 선배님들과, 특히 불철주야 선, 후배들을 챙겨주시느라 고생하시는 강 관석 선생님, 비록 짧은 인연이었지만 복 태훈 선생님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고, 우리나라 충격과 분야에 일대 이정표를 세우기 위해 불철주야

노력하고 있는 (주)에이치엔티메디칼 임직원들과 보이지 않게 많은 도움을 주신 한국전기연구원 조 주현 박사님께도 감사의 마음을 전합니다.

특히, 비록 나이로 보면 저의 이모, 삼촌뻘 되시지만, 훌륭한 나의 동기생 김 상희, 강 학성 선생님들과는 나이는 어리지만, 동기의 정을 듬뿍 담아 감사의 마음을 나누고자 합니다.

마지막으로 한산섬 한적한 어촌 마을에서 자식들 공부시키시느라 한겨울 세찬 바닷길을 마다하지 않으셨던, 고인이 되신 아버님과 그 고생을 다하시고도 아직까지 자식 걱정애 밤잠을 이루지 못하시는 어머님께 이 영광을 고스란히 바치며, 두 분의 누님과 동생 그리고 올망졸망한 우리 조카들 인열, 윤경, 익수, 인경, 채원, 그리고 아직 태어나지 않은 막내 조카를 포함한 모든 가족들과 저를 위해 늘 격려를 아끼지 않으셨던 주변의 모든 분들과 함께 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

감사합니다.

