

유도가열 시스템의 설계 및 구현

서은숙, 정경수, 임세현, 금동민, 양준혁, 정인환
 경북대학교 전자전기 컴퓨터학부

Design and Implementation of an Induction Heating System

Eunsook Seo, Kyeungsoo Jeong, Sehyun Im, Dongmin Keum, Junhyeok Yang, and Inhwan Jung
 Kyungpook National University

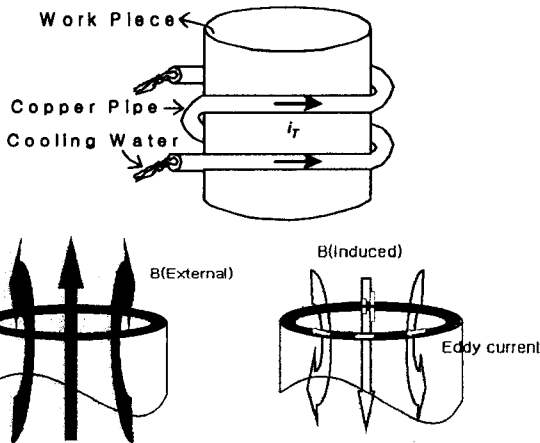
Abstract - 본 논문에서는 Half Bridge Series Resonant Inverter 를 이용한 유도가열 시스템 설계를 하고 제작하여 구현하였다. 이러한 유도가열 시스템의 제작을 위해서는 공진탱크와 매칭 트랜스포머의 설계가 필수적이다. 따라서 이런 설계를 위해 PSpice 를 이용하여 공진탱크의 입력 임피던스 Bode Plot 을 그려 분석하고 이를 바탕으로 탱크회로를 설계 하였다. 매칭 트랜스포머의 설계는 출력 Power 와 1.2 차 회로 조건에 의해 설계 되어졌다. 이렇게 설계한 유도가열 시스템을 PSpice 를 이용해서 Simulation 함으로써 주파수때론 출력 Power 의 변화를 볼수 있었으며, 유도가열 시스템을 실제 제작하여 구현함으로써 확인하였다.

1. 서 론

유도가열은 신속한 가열을 통하여 소비되는 손실을 줄일수가 있고 가열효율이 높으므로 경제적이며 출력 및 온도의 제어가 다른 가열에 비하여 쉽고 안전성이 우수하다. 또한, 유해배출가스등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이므로 청결하다는 장점이 있다. 이러한 특징으로 인하여 유도가열 기술은 금속의 열처리 응용, 가정용 조리기등과 같은 산업용, 가정용 등으로 폭 넓게 사용되어지고 있으며 이에 대한 많은 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세이다. 이러한 유도가열시스템을 구현하기 위해서는 공진탱크와 매칭 트랜스포머의 분석과 구현이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 PSpice 를 이용하여 직렬공진탱크를 분석하고 이를 바탕으로 공진탱크를 구현 하였고, 이렇게 제작된 유도가열 시스템을 Open-Loop로 제어하여 실험을 통해 확인 하였다.

2. 본 론

2.1 유도가열 시스템의 원리



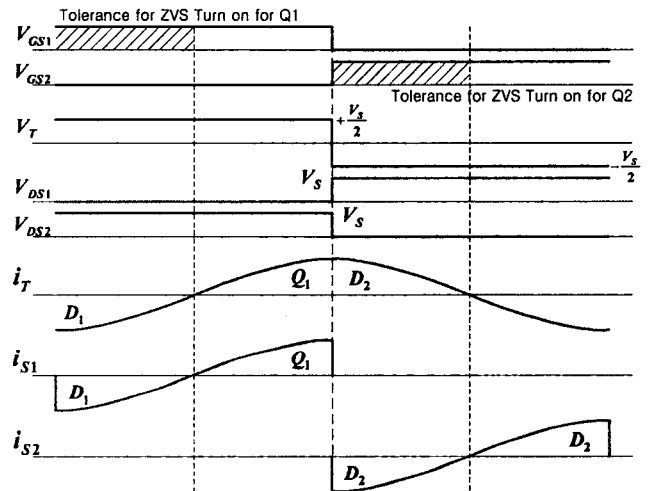
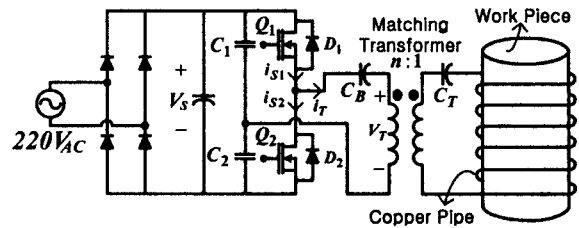
〈그림 1〉 Work Piece 에 인가된 전류와 유도된 Eddy Current

유도가열은 Faraday의 전자유도작용을 기본적으로 이용한다. 그림1에서 보는 바와 같이 Copper Pipe에 고주파 교류전류가 흐르게 되면 암페어의 법칙에 의해서 자속(B:external)이 발생한다. 이 자속은 전도성 금속물질을 통과하면서 렌츠의 법칙에 의해서 반대방향으로 자속(B:induced)이 유도된다. 이 자속이 시간에 따라 변화하므로 Faraday의 법칙에 의하여 전압이 양단에 걸리게 된다. 옴의법칙에 의해 이 전압을 Work Piece의 고유저항으로 나눈 만큼의 와전류(Eddy Current)가 흐르게 된다. 이렇게 발생한 와전류는 다음과 같이 Joule 열로 발생하게 된다.

$$P_e = i_{rms}^2 \cdot R_{path} \quad (1)$$

위 (1) 식에서 P_e 는 Work Piece에서 발생한 Eddy Current Loss 이고, i_{rms} 는 Eddy Current의 실효치이며 R_{path} 는 Eddy Current Path 상의 저항이다.

2.2 Half-Bridge Resonant Inverter 의 동작원리



〈그림 2〉 Half-Bridge Resonant Inverter 와 파형

구현한 유도가열 시스템은 그림2와 같은 Half-Bridge Resonant Inverter를 사용하였다. 유도가열 시스템은 공진현상을 기본적으로 이용한다. 2차측의 C_T 와 Work Piece에 감긴 Copper Pipe 인덕터, 그리고 Copper Pipe의 고유저항에 의하여 직렬 RLC 공진이 일어나게 되는데 이 공진으로 인하여 스위칭 주파수가 공진탱크의 공진주파수에 가까울때는 공진탱크에 흐르는 전류모양은 사인파에 가깝게 된다. 이때, 유도가열시 효과적인 가열을 시키기 위해서는 전도성 금속물질 표면에 집중적으로 열을 가하여야 하는데 이것은 고주파에서 동작을 시킴으로써 가능하다. 그런데, MOSFET를 고주파에서 동작을 시키기 위해서는 스위칭 손실을 줄여야 하는데 이것은 공진 주파수보다 높은 곳에서 스위칭 주파수를 정하면 Inductive Load에서 동작을 함으로써 ZVS 턴온조건을 하여 턴온시 스위칭 손실이 줄어들어 MOSFET를 고주파에서 동작을 시키는것이 가능하게 한다. ZVS 조건은 위 그림2에서 보는 것처럼 주 스위치 Q_1 이 턴온하면 매칭 트랜스포머의 일차측에는 $V_s/2$ 의 전압이 걸리게 되고 이때, 전류는 D_1 을 통해서 흐르고 있는 중이므로 주 스위치 Q_1 의 양단전압은 다이오드 턴온전압을 무시한다면, '0'이 된다. 이때, 스위치가 턴온을 함으로써 ZVS 턴온을 하는 것이다. 또한, MOSFET의 body diode D_1, D_2 로 흐르는 전류는 자동적으로 '0'이 되어 꺼지게 되어서 Reverse Recovery 문제를 없애는 장점이 있다. 위 그림2에서 빗금친 영역은 각 주 스위치가 ZVS로 동작할수 있는 영역이며 이러한 장점들이 생기는 근본적 원인은 공진을 이용하기 때문이다. C_1, C_2 는 V_s 를 $V_s/2$ 씩 분압하는 역할을 하며 C_B 는 매칭 트랜스포머로 유입되는 DC 성분을 막기위해 넣었다. 이때, 공진주파수를 결정하는 C_T 값에 영향을 주지 않기 위해 다음과 같이 C_1, C_2 그리고 C_B 는 매칭트랜스포머 turns ratio : n에 의하여 다음의 조건을 만족하여야 된다.

$$(C_1 + C_2) \gg \frac{C_T}{n^2}, \quad C_B \gg \frac{C_T}{n^2} \quad (2)$$

위의 조건에 의해 C_1, C_2 와 C_B 는 225 630V 마이러커패시터를 사용하였다.

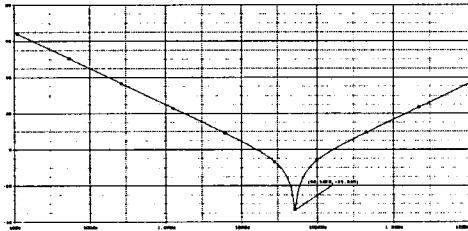
2.3 공진탱크의 분석 및 설계

부하는 그림1에서 보이는 것처럼 Copper Pipe 를 스텐레스 용기에 감았다. 이때, 인덕터인 Copper Pipe 에도 열이 나므로 냉각을 위해 Copper Pipe 에는 물을 사용하였다. Skin Effect 효과로 인해 정확한 L_{eq} 와 R_{eq} 는 부하의 모양과 길이, 동작 주파수, 동작온도에 따라 변화하게 된다. 따라서 정확한 값을 측정하기가 어려우므로 설계의 간편성을 위하여 위의 요소를 무시하고 제작된 부하를 HP4194A 를 이용하여 상온에서 측정하면 그 값은 $L_{eq} = 1.1\mu H$, $R_{eq} = 0.02\Omega$ 와 같다. 이때, 식 (3)과(4)에 의하여 공진주파수와 Quality Factor:Q 가 결정이 된다.

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} \cdot C_T}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{R_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_T}} \quad (4)$$

공진주파수는 50kHz 로 설계 하기 위하여 (3) 식에 의해 C_T 는 9uF 으로 정해졌다. 이렇게 정한 공진탱크의 값들을 이용하여 직렬 RLC 탱크의 입력 임피던스를 PSpice 를 사용하여 Bode Plot 로 그려보면 그림3과 같게 된다.

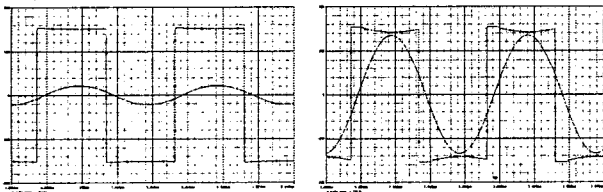


〈그림 3〉 공진탱크의 입력 임피던스

공진주파수에서의 Q 를 (4) 식을 이용하여 계산하면 17.48 이 된다. Q 의 값이 아주 크므로 High Q approximation 을 적용할 수가 있다. 위 그림3에서 High Q approximation 에 의하여 공진주파수에서 멀어질수록 임피던스는 급격히 증가하게 된다. 즉, 직렬공진탱크 회로는 하나의 Band Pass Filter 로 볼 수 있으며 공진주파수에 가까울수록 다른 고조파성분들은 감쇠가 쉽게 되어 기본파 성분만 남게 되므로 공진탱크의 전류는 사인파가 된다고 가정 할 수 있다. 이것은 공진주파수에서 임피던스는 R 성분만 남고 다른 리액턴스 성분들은 상쇄됨을 뜻한다. 이때, 공진탱크의 임피던스가 가장 작으므로 발생하는 전류또한 최대가 되어 Power 는 최대가 된다. 즉, 공진 주파수에서 멀어질수록 Power 는 감소됨을 뜻한다. 이때, Power 의 선형적인 감소를 하고 싶다면 Q의 값을 3~5정도로 해주어야 하며 이것은 R_{eq} 의 값을 크게 하거나 L_{eq} 의 값을 작게 그리고 C_T 를 크게 해야 함을 뜻한다.

2.4 매칭 트랜스포머의 설계와 구현

매칭 트랜스포머의 모델링시에는 누설인덕턴스는 아주작으므로 무시할 수 있고 자화 인덕턴스 또한 동작주파수가 커서 자화인덕턴스의 임피던스가 아주 크므로 무시가능하다. 결국 간단한 형태로 모델링이 가능하며 이렇게 간단화 한 트랜스포머의 모델을 이용하여 공진주파수에 가깝게 스위칭 주파수를 51kHz로 하여서 PSpice 를 이용하여 트랜스포머의 turns ratio에 따른 탱크전류의 변화를 살펴보면 그림4와 같다.

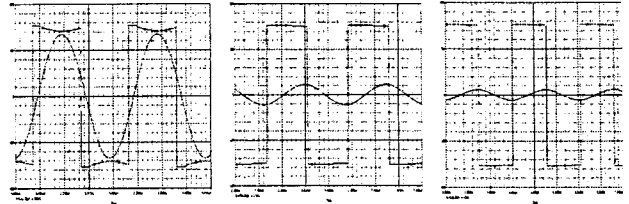


〈그림 4〉 Turns Ratio 가 20:1 과 10:1 인 경우

위의 그림4에서 square wave 는 매칭 트랜스포머의 1차측 전압이며, 사인파 모양의 파형은 매칭 트랜스포머의 1차측 전류이다. 즉, 매칭 트랜스포머의 turns ratio 가 작아질수록 탱크전류가 점점 더 커진다는 것을 위의 Simulation 으로부터 알 수가 있는데 이것은 turns ratio 가 작아질수록 2차측에 걸리는 전압은 점점 더 커지게 되고 따라서 더 큰 탱크전류가 흐르기 때문이다. 발생하는 Eddy Current 는 탱크전류와 비례관계에 있으므로 (1)식에 의하여 탱크전류의 변화는 Power 의 변화를 뜻한다. 즉, 매칭트랜스포머의 turns ratio 의 가변으로 Power 의 가변이 가능함을 의미한다. 구현한 매칭 트랜스포머는 출력 Power 와 1,2차 회로조건을 고려하여 10:1의 turns ratio 로 하여 PQ5050코어에 1차측은 ritz wire 로 10번 감았으며, 2차측은 0.3T 두께의 Copper Poil 로 1번 감았는데 이때, 누설을 줄이기 위하여 샌드위치 권선법을 적용하여서 제작하였다.

2.5 주파수 가변을 이용한 출력 제어

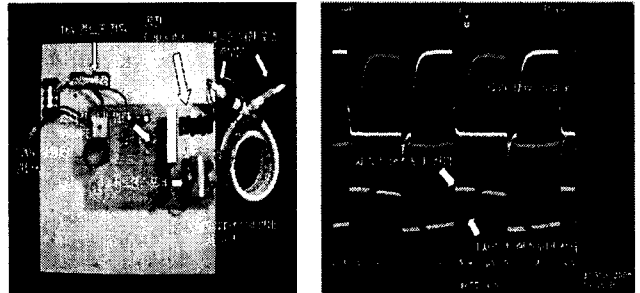
앞의 2.3 공진탱크의 분석 및 설계에서 언급한 것 과 같이 Power 의 가변은 주파수의 조절로 가능함을 알 수가 있다. 아래의 그림5 는 매칭 트랜스포머의 turns ratio를 10:1 로 고정하고 주파수를 51kHz, 57kHz , 65kHz로 바꾸어 가며 PSpice 로 Simulation 한 결과이다.



〈그림 5〉 주파수가변으로 인한 출력제어

위의그림 5에서 square wave 는 매칭 트랜스포머의 1차측 전압이며, 사인파 모양의 파형은 매칭 트랜스포머의 1차측에 흐르는 전류이다. 주파수가 올라갈수록 급격히 전류가 작아지는 것은 Q가 아주 크기 때문인데 이것은 그림3에서의 입력 임피던스의 급격한 증가와 관계가 있다. 공진탱크전류와 매칭 트랜스포머의 1차측 전류는 비례관계이므로 주파수 가변시 탱크에 흐르는 전류가 주파수를 올릴수록 점점 감소함을 그림5를 통해 알 수가 있다. 즉, 주파수 가변으로 Power 의 가변이 가능함을 알 수 있다.

2.6 실험 결과



〈그림 6〉구현한 유도가열 시스템과 57.3kHz 에서의 실험 파형

실험 조건		주요 부품	
입력전압 실효치	단상220V	MOSFET	IXFK48N50Q
입력전류 실효치	7.5A	공진 커패시터	105 630V 마이러9개 (병렬)
입력Apparent Power	1.65kVA	공진 인덕터	직경5mm 동파이프 6턴
출력Power	약1kW	PWM IC	UC3825
공진 주파수	50.3kHz	High Side Gate Driver	IR2110
동작 주파수	57.3kHz	매칭 트랜스포머	10:1 PQ5050

〈표 1〉 인버터의 실험 조건 및 주요 부품

실험은 피가열체를 그림6의 구현한 유도가열 시스템의 Copper Pipe 안에 넣고 진행 하였다. 그리고 실험시 주파수 가변을 함으로써 전류의 크기변화를 통해 Power 의 변화를 관찰할 수 있었다. 이것은 제어IC(UC3825)의 주파수 제어단자에 가변저항을 이용함으로써 쉽게 주파수를 가변 할 수가 있다.

3. 결 론

유도가열 시스템은 직렬공진회로의 장점을 이용한 시스템이다. 이러한 시스템을 구현하기 위해서는 공진탱크의 특성 분석이 중요하며 분석을 위해 PSpice 를 이용한 Simulation 이 유용하게 사용이 되어졌다. 이러한 Simulation 과 실험 결과를 통해 Power 의 가변을 주파수 가변을 통하여 할 수가 있음을 앞에서 알 수가 있다. 이렇게 구현한 유도가열 시스템을 Open-Loop 로 제어하여 실험을 함으로써 유도가열이 효과적으로 됨을 알 수 있었다.

NURI
국립중앙과학관

“본 논문은 2006년도 경북대학교 초일류 모바일-디스플레이산업 인력양성사업단에 의하여 지원되었음.”

〈참 고 문 헌〉

- [1] Robert W. Erickson, etc“Fundamentals of Power Electronics, Second Edition”, Chapter 19, 1999.
- [2] Yongmin Chae, etc“Development of Hybrid Induction Heating System for Laser Printer”, KIPE Trans., Vol. 6, No. 2, pp. 178-185, April 2006