

특집 : 유도가열기술의 최신동향

고주파 표면경화 열처리를 위한 유도가열 전원장치

성 병 기*, 이 재 택**, 성 환 호***

((주)피에스텍, *차장, **연구소장, ***대표이사)

1. 서론

금속의 표면 경도를 높여서 내마모성을 증가시키는 표면처리에는 침탄, 질화, 고주파 표면경화 열처리, 플라즈마를 이용한 코팅 등 다양한 방법이 있다. 그 중에서 고주파 표면경화 열처리는 응용범위가 넓으면서도 가격, 생산성, 환경 문제 등에서 강점을 가지고 있어 산업계에서 폭넓게 이용되고 있다. 이러한 고주파 표면경화 열처리에 이용되는 유도가열 전원장치는 초기에는 진공관 발진기를 이용한 제품이 거의 대부분을 차지했었고 현재 현장에서 생산에 이용되고 있는 설비의 절대다수도 아직까지는 진공관을 이용한 전원장치이다. 전원장치의 핵심이 되는 반도체 스위칭 소자의 발전에 맞추어 유도가열 전원장치도 발전을 거듭하고 있고 최근 들어서는 PC와 인터넷을 필두로 한 혁명에 가까운 디지털 기기의 발달로 인해 유도가열 전원장치도 점차 지능화 되고 있다. 본 논문에서는 진보하고 있는 고주파 표면경화 열처리용 유도가열 전원장치의 최신 동향을 산업계를 중심으로 살펴보려 한다.

2. 고주파 표면경화 열처리

기계 부품은 표면이 매우 중요하다. 마모, 녹, 피로균열 등은 모두가 표면에서 일어나는 현상이다. 즉 내부는 상대적으로 부드러운 상태인 채로 표면은 단단하고, 강하고 잘 닳지 않도록 처리하는 것이 부품의 성능과 수명에 유리한 것이다. 표면 경화 처리는 제품의 표면층을 경화시켜 내마모성과 내피로

성을 향상시키기 위한 표면개질 기술이다. 표면경화 처리에는 화학적 표면경화법과 물리적 표면경화법의 두 가지가 있다. 화학적 표면경화법은 표면층의 화학적 성분을 변화시켜 경화시키는 방법이며, 물리적 표면경화법은 표면층만을 담금질에 의해 물리적인 방법으로 경화시키는 방법이다. 위 두 가지 방법은 어느 것이나 표면경화라 하는 점에서는 유사하지만, 침탄이나 질화와 같은 화학적 표면경화의 경우는 표면층의 화학 성분이 변화하는 것으로서 모체와는 이질로 되어, 내마모성이나 내피로성이 향상되는 것이다. 이에 반해서 고주파 경화나 화염 경화와 같은 물리적 표면경화의 경우는 담금질에 의해 표면층이 오스테나이트 조직에서 마르텐사이트 조직으로 변화하는 것이기 때문에 내마모성도 좋아지지만 내피로성에 더욱 유효하게 된다^[1].

고주파 표면경화 열처리는 담금질, 소입(Quenching, Hardening)이라고 하는 것으로 철을 900℃ 전후로 가열한 후 급랭시키면 철의 조직이 오스테나이트에서 마르텐사이트로 바뀌면서 경도가 높아지는 것을 말한다. 이렇게 소입을 하고 나면 철의 조직에 응력이 남아 변형이 될 수도 있기 때문에 응력을 풀어 주어야 한다. 이것을 소려(Tempering)라고 한다. 소려는 400℃ 전후로 가열하여 급랭하거나 100~200℃ 정도를 몇 시간 정도 유지하는 두 가지 방법이 쓰인다.

고주파 표면경화 열처리의 장점은 고주파 전류로 인한 표피효과(Skin Effect)를 이용하여 표면만을 선택적으로 가열하여 경화층의 깊이를 조절할 수 있다는 것이다. 경화층에 따른 주파수가 표 1에 있다. 같은 주파수에서도 가열전력이나 가열 시간을 조절하여 경화층을 다르게 할 수도 있다.

표 1 경화층에 따른 주파수의 선정

경화층(mm)	주파수
0.5~1	400 kHz이상
1~2	50~400 kHz
2~4	10~30 kHz
4~8	3 kHz
8~10	1 kHz
10~12	500 Hz
12~15	150~180 Hz
15~20	50~60 Hz

3. 진공관에서 반도체로

진공관을 이용한 고주파 발전기는 기본적으로 진공관이 스위칭이 아닌 리니어 영역에서 동작하므로 MOSFET나 IGBT를 이용한 스위칭 방식의 전원장치에 비해 효율이 나쁘다. 반도체 소자가 등장하기 전까지는 진공관 인버터는 수십 kHz 이상의 고주파 영역에서는 거의 유일한 대안이었었지만 MOSFET과 IGBT가 등장한 70~90년대 이후로 반도체를 이용한 인버터로 급격히 대체되기 시작하였다. 수 kHz 이하의 저주파 영역에서는 SCR이 발명되면서 M/G 세트 등의 대체가 이루어지기 시작해 저주파 영역에서는 SCR 인버터가 거의 대부분이라고 해도 무장하다. 이제는 IGBT의 발달로 저주파 영역에서도 IGBT가 SCR을 대체하기 시작하고 있다.

유도가열의 특성상 반드시 코일이 존재하고 코일의 $Q (= \omega L / R)$ 가 작게는 3에서 크게는 수십 이상이 되므로 역을개선을 위해 공진회로를 이용하는 것이 가장 효과적이다. 직렬공진이나 병렬공진을 이용한 인버터는 FET의 경우 100 kHz~2.65 MHz에 천 kW급의 인버터의 제작이 몇 년 전보다 훨씬 싼 가격에 제작이 가능해지게 되었다. 이는 단위 면적당 전류용량이 증가하여 하나의 칩으로 제작할 수 있는 FET의 전압, 전류용량이 획기적으로 증가하고 있기 때문에 가능한 일이다. 가격 때문에 진공관 인버터를 이용하는 것도 줄어들기 시작한 것이다. IGBT의 경우에도 스위칭 특성의 개선으로 인해서 100 kHz까지 동작하는 대용량 인버터가 공급되기 시작했다. 현재의 추세로 발전된다면 10년 내로 현재의 MOSFET 영역인 200 kHz 대역까지도 IGBT가 대체할 것으로 예상된다. 용량 면에서도 대용량화가 진행되어 수천 kW급의 고주파 IGBT 인버터가 이미 제작되고 있다. 또한 IGBT는 저주파수 영역의 인버터에서도 SCR을 대체하여 수 kHz 이하의 수천 kW급의 전원장치도 출시되고 있다. 낮은 주파수의 대용량 인버터에서는 SCR 인버터와의 제작단가의 격차가 줄어들고 있는 중이다.

진공관 인버터와 반도체 인버터의 통상적인 효율차이는 60% 정도이다. 예를 들어 400 kW급의 진공관 인버터와 250 kW급의 MOSFET 인버터가 동일한 성능을 발휘한다. 이 예도 진공관 인버터를 최적의 조건으로 설계했을 경우이고 실제 현장에서는 MOSFET 인버터는 진공관 인버터의 절반 정도의 출력이면 대체 가능하다. 이와 같은 반도체 인버터의 상대적 고효율로 고유가로 인한 전력요금 상승, 도쿄의 정서의 발효로 인한 CO₂ 저감 문제 등과 맞물려 향후 반도체 인버터로의 전환을 가속화할 것으로 예상된다.

이상과 같이 반도체 기술의 발달로 인한 단위출력 당 제작 단가 감소, 진공관에 비해서 갖는 월등한 효율로 인해 진공관 인버터는 반도체 인버터로 급속히 대체될 것으로 예상된다.

4. 변류기의 고효율화

전력전자에 있어서 변류기(Current Transformer, C/T)라는 용어는 AC 전류를 감지하기 위한 부품으로 받아들여진다. 그러나 고주파 열처리에서의 변류기는 조금 다른 의미를 갖는다. 전압과 전류를 권선비에 따라 변환시켜주며 전기적인 절연이 가능하다는 점에서 변압기(Transformer)와 변류기는 동일한 것이지만 고주파 열처리에서는 다음과 같이 분류하여 부른다. 그림 1의 회로도에는 직렬공진형 인버터에 위치한 변압기와 변류기를 나타낸 예이다. 변압기는 공진회로의 전단에 위치하고 변류기는 공진 캐패시터와 가열코일 사이에 위치하는 차이가 있는 것이다. 회로도상에서 직렬 연결되어 비슷해 보이지만 이는 공진회로의 $Q (= \omega L / R)$ 가 큰 경우에는 매우 큰 차이를 유발한다. 편의상 권선비가 1:1이고 공진형 인버터가 공진주파수에서 동작하고 있다고 가정하고 해석을 해

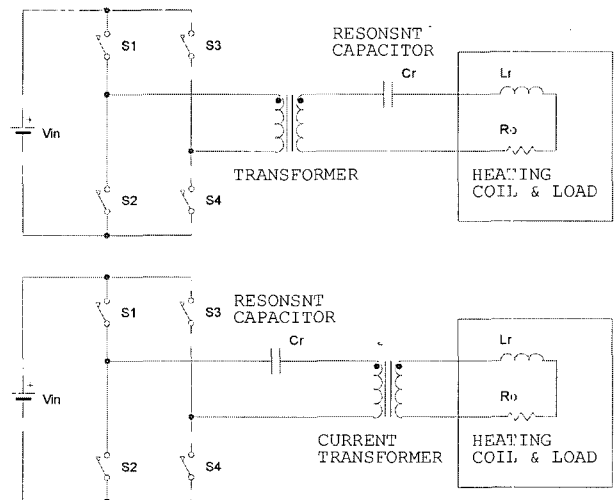


그림 1 변압기와 변류기

보면 위쪽의 변압기의 이차전압은 공진 캐패시터와 공진 인덕터의 전압이 서로 상쇄되어 R_o 의 전압과 같아지지만 변류기의 이차전압은 L_r 과 R_o 의 전압의 합과 같아진다. 변압기와 변류기의 일차 전류는 동일하므로 변류기의 전압용량은 변압기에 비해 $\sqrt{Q^2 + 1}$ 배 커지는 것이다. 예를 들어 Q 가 5인 300 kW의 출력을 갖는 고주파 열처리 장치에서 변압기의 용량은 300 kVA면 되지만 변류기의 용량은 1529 kVA가 되어야 한다. 실로 큰 차이가 아닐 수 없다. 따라서 고주파 열처리에서 임피던스 정합은 최대한 공진회로 전단에서 변압기를 이용하려 한다. 그러나 가열 코일의 크기가 작고 인버터와 가열코일이 구조적으로 가까이 위치할 수 없다면 변류기는 필수적이다. 불행하게도 대부분의 고주파 열처리 장치가 이 경우에 해당한다. 대부분의 고주파 열처리 장치는 전력용량의 $\sqrt{Q^2 + 1}$ 배의 변류기를 필요로 하는 것이다.

변류기는 실효전력과 무효전력을 동시에 전달하기 때문에 변류기의 효율은 고주파 열처리 장치 전체 효율에 절대적인 영향을 미친다. 변류기의 효율이 η 일 때 변류기를 통과하는 실효 입출력의 비(실제 효율)는 아래 식과 같다^[2]. Q 가 5이고 변류기의 효율이 80%, 90%, 95%인 경우의 실제 효율은 49.5%, 66.2%, 79.7%이다. 큰 무효전력으로 인해 변류기의 손실이 증폭되어 보이는 것이다.

$$\frac{P_o}{P_{IN}} = \frac{1}{(1-\eta)\sqrt{Q^2 + 1}}$$

이와 같은 이유로 인해 변류기의 효율은 고주파 열처리 장치에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 돈을 들여 고주파 열처리 장치를 개선하려 한다면 그 돈을 변류기에 투입하는 것이 가장 효과적이라고 할 수 있다. 수십 kHz 이상의 고주파에서는 대형 웨라이트 코아의 개발과 적층형 웨라이트 코아의 채택으로 수천 kVA의 고효율 변류기의 제작이 가능해졌고 수 kHz 이하의 영역에서는 기존의 수냉 규소강판 코아를 대체할 아몰퍼스 코아의 상용화로 고효율의 변류기가 상용화되고 있다. 국내에서는 이미 10 MVA급의 고효율 고주파 변류기가 개발되어 시판되고 있는데 이는 외국에서 수입되는 변류기에 비해 훨씬 고효율형으로 제작된 것들이다. 변류기의 고효율화는 국내에서 먼저 시작되었다고 해도 무방할 정도이다.

5. 이중주파수 인버터의 등장

고주파 표면경화 열처리의 큰 분야를 형성하고 있는 것 중의 하나가 기어와 스포라켓 등의 기어류이다. 기계 부품에서 빼놓을 수 없는 기어류의 고주파 열처리에는 다른 부품과 다른 점이 있다. 기어의 윤곽선을 따라 균일한 경화층을 형성하는 것이 기어의 품질에 가장 좋은 방법인데 이를 윤곽소입

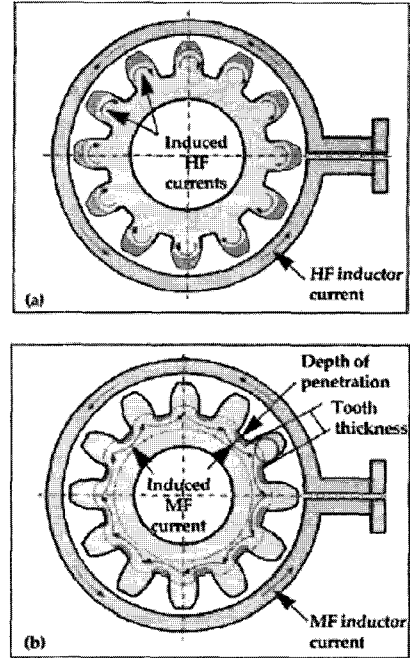


그림 2 (a)고주파 소입 (b)저주파 소입

(Contour Hardening)이라고 한다. 기어를 고주파로 소입하면 그림 2(a)(그림 출처는 참고문헌[3], 저자의 동의를 구하지 못한 것에 대해 양해를 구함)처럼 기어의 치고(산)에 경화층이 형성되고 저주파로 소입하면 치저(골짜기)에 경화층이 형성된다. 따라서 윤곽소입은 한가지의 주파수로는 불가능하다고 할 수 있다. 기존에 기어를 고주파 열처리하는 방법은 두 대의 인버터와 코일을 두고 두 번에 걸쳐 이동하며 가열하는 방법이었다. 큰 기어는 그나마 이런 방법을 이용할 수 있었지만 작은 기어에서는 빠른 열전도로 인해 윤곽소입이 힘들었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 개발된 기술이 이중주파수 인버터이다.

이중주파수 인버터란 하나의 코일에 동시에 두 가지 주파수 성분을 갖는 전류를 공급할 수 있는 컨버터를 말한다. 이중주파수를 내는 방법은 그림 3(a)처럼 두 주파수를 동시에 합성하는 방법(Add)과 그림 3(b)처럼 두 주파수를 시분할(Time Divided)로 나누어 공급하는 방법이다. 주파수 합성법은 짧은 시간의 가열도 가능하여 중대형뿐만 아니라 소형기어에도 적용 가능하고 시분할 법은 주파수 전환에 시간이 소요될 수도 있어 중대형 기어류에 적합하다고 할 수 있다. 이 두 가지 방식의 이중주파수 인버터는 최근 들어 유럽과 일본 제작사들이 공급을 시작하고 있는데 향후 고급형 기어의 열처리를 시작으로 수년 내로 일반화될 것으로 예상된다. 국내 업체도 시분할형 이중주파수 인버터는 개발이 완료되어 올해 내로 공급이 가능할 것으로 예상된다.

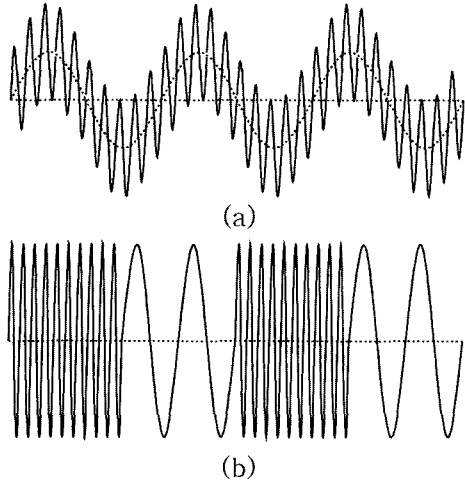


그림 3 이중주파수

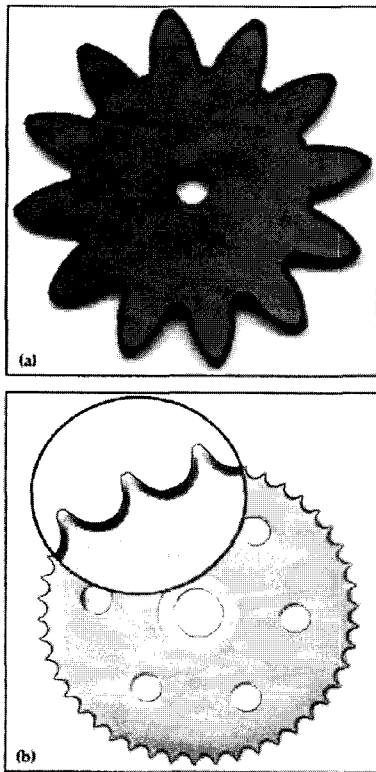


그림 4 이중주파수 윤곽소입의 예
(a) 기어 (b) 스프라켓

이중주파수로 고주파 열처리를 한 예가 그림 4(사진 출처는 참고문헌[3], 저자의 동의를 구하지 못한 것에 대해 양해를 구함)에 있다. 사진의 검은 부분이 열처리로 형성된 경화층이

다. 윤곽선을 따라 일정한 깊이로 경화층이 형성된 것을 알 수 있다.

6. PC와 인터넷의 응용

컴퓨터의 강력한 데이터 처리 능력과 저장 능력에도 불구하고 오랫동안 산업용 설비의 제어는 PLC의 전유물이다시피 했다. 그 이유는 시스템의 안정성이었다고 할 수 있다. 그러나 PC의 OS가 마이크로소프트의 Windows 2000과 Windows XP로 변화해오면서 안정성 문제는 급속히 개선되어 이제는 중요한 산업용 설비의 제어에 PC가 이용되기 시작하였다. 공정 관리에 있어서 세계적인 수준이라 할 수 있는 POSCO에서 설비사이의 통신은 LAN상에서 TCP/IP 프로토콜을 채택하고 있는데 매우 안정적으로 운용되고 있다는 것이 이러한 추세를 대변해 준다. PC를 이용해 제어를 한다는 것은 제어 프로그램을 쉽게 개발할 수 있고 무한에 가까운 저장 공간을 이용할 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 대량 생산 체제를 갖춘 PC의 하드웨어 가격은 비슷한 성능을 낼 수 있는 PLC와 비교할 수 없다. 어떠한 PLC도 PC와 같은 대량생산 체제를 구축할 수 없기 때문이다. 인터넷을 기반으로 한 통신을 한다는 것은 LAN이 설치된 곳이면 장소에 구애받지 않고, 간단한 결선으로, 다대다 통신이, 빠른 속도로 가능하다는 것이다. 물론 통신을 위한 하드웨어의 비용도 기존의 시스템과 비교할 수 없을 정도로 싸다.

산업용 PC와 인터넷에 기반을 둔 고주파 열처리 시스템을 구축하면 제품 하나하나의 열처리 과정의 데이터를 고유한 일련번호로 저장하여 품질관리와 사후 역추적에 이용할 수 있고 공장의 전 설비의 동작 상태와 생산량 등 생산과 관련된 데이터를 어디에서든지 제어와 모니터링이 가능해진다.

실제로 고주파 열처리된 기계 부품을 가장 많이 사용하는 자동차 산업의 경우에 있어서는 생산되는 자동차의 내구성과 안전에 관련되는 핵심 부품의 경우에 전수 검사 및 역추적 가능성을 요구하고 있어서 자동차 관련 부품업계에서는 이미 이러한 PC와 인터넷에 기반을 둔 고주파 열처리 시스템이 보급되기 시작하였다. 수년 내로는 이러한 시스템의 보급이 대세를 이룰 것으로 예상된다. 자동차 공업을 시작으로 다른 기계 산업용 부품의 고주파 열처리 시스템으로의 파급도 당연할 것으로 예상된다.


7. 결론

이상의 논의를 바탕으로 고주파 표면경화 열처리를 위한 유도가열 전원장치의 최신동향은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 반도체 스위칭 소자의 발달로 진공관 인버터가 반도체 인버터로 급속히 대체되고 있으며 저주파에서는 IGBT

인버터가 SCR인버터를 대체하고 있다.

- 자성체의 발달로 고효율의 대용량 변류기가 공급되기 시작했다.
- 이중주파수 인버터가 등장하여 중소형 기어류의 윤곽소입이 가능해 졌다.
- PC와 인터넷에 기반을 둔 고주파 열처리 시스템 보급되기 시작하여 전수검사, 역추적관리, 원격 제어 및 모니터링이 쉬워 졌다.

이상과 같은 반도체 기술의 발달, PC와 인터넷의 기능향상, 새로운 기술의 등장 등의 추세는 공학발달의 특성상 앞으로도 꾸준히 계속되리라고 결론 내릴 수 있겠다. 전력전자에 관계하는 많은 분들이 앞으로도 유도가열에 관련한 전력전자의 학문적, 기술적 발전에 많은 관심을 가져주시어 국내의 유도가열 산업이 세계 시장을 선도하여 나갈 수 있기를 기대한다. 

참 고 문 헌

- [1] 김경식, "표면경화열처리", 동방도서주식회사, 1991.
- [2] 성환호, 이재택, 성병기, 김갑환, 박종덕, 김성완, "고주파 유도가열 열처리장치 가열효율 분석", 한국열처리 공학회 추계학술 발표대회 발표논문집 pp. 92-97, 2003.
- [3] Wolfgang R. Schwenk, "Simultaneous Dual-frequency Induction Hardening", Heating Treating Progress pp35-38, APRIL/MAY, 2003.
- [4] John Davies and Peter Simpson, "Induction Heating Handbook", McGraw-Hill, 1979.
- [5] S. L. Semiatin and D. E. Stutz, "Induction Heat Treatment of Steel", American Society for Metals, 1986.
- [6] S. Zinn and S. L. Semiatin, "Elements of Induction Heating", ASM International, 1988.

〈 저 자 소 개 〉



성병기(成炳奇)

1970년 6월 5일생. 1997년 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1999년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 (주)피에스텍 차장.



이재택(李在澤)

1967년 8월 15일생. 1989년 한양대 전자공학과 졸업(학사). 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년~2001년 LG산전 연구소 선임연구원. 2001년~현재 (주)피에스텍 연구소장.



성환호(成煥浩)

1964년 3월 13일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1991년~1998년 삼성전자 반도체 전력전자사업부 선임연구원. 1998년~현재 (주)피에스텍 대표이사.