

고주파열처리의 기술현황과 전망

박종덕 · 김성완

한국생산기술연구원 플라즈마응용팀

Current Status and Prospects of Induction Hardening Technology

J.D. Park and S. W. Kim

Div. of Plasma Technology R&D, KITECH, ChonAn 330-825, Korea

1. 서 론

1935년 항공기의 크랭크샤프트에 대한 고주파 유도 가열을 이용하여 열처리 실용화에 성공한 이후로, 고주파열처리가 가지는 많은 장점들로 인하여 각종 기계부품 제조에 급속히 확대되어, 지금은 핵융합 플라즈마 발생장치에까지 적용되어 사용되고 있다. 일반적으로 강 부품들의 열처리 목적은 기계가공 후 사용상 요구되는 항복강도나 경도 등의 기계적 성질을 부여하고 제품의 사용 중에 발생하는 취성과 피 등을 억제하기 위한 것이다. 즉 하나의 부품은 가열, 퀀칭, 템퍼링 등 일련의 열처리 공정을 거쳐 특정 기계적 성질을 가지게 되는 것이다. 그러나 이러한 공정들은 처리품 전체에 동일한 기계적 성질을 부여하기 때문에, 만약 부분에 따라 다른 기계적 성질이 요구된다면 이 요구를 충족시키지 못하고 결국 최적의 성능을 발휘할 수 없을 것이다. 이러한 이유로 국부적인 경화가 필요한 부품에는 고주파열처리가 많이 이용되고 있는 실정이다. 그러나 최근 급속한 전자기술의 발달에도 불구하고 국내의 고주파열처리에 대한 수준은 답보상태에 있다. 이에 현 고주파열처리의 문제점과 그 해결방안을 모색하고자 한다.

2. 고주파열처리의 원리 및 기기의 구성

고주파열처리는 크게 와전류손실과 표피효과를 이용한 방법으로 그림 1에서 알 수 있듯이 도체 내에 교번자속이 관통하면 도체 내에 유도기전력이 발생한다. 이 기전력에 의해 발생하는 전류를 와전류(Eddy-current)라 하는데, 이 와전류가 임의의 저항을 가진

도체 내를 흐르면 그 도체 내에 Joule열이 발생하게 되어, 도체 내에 교류전류가 흐를 때 도체의 중심부에는 쇠교 자속수가 많아져 인덕턴스가 커지면서 교류전류가 흐르기 어렵게 되고, 이로 인해 중심부의 전류밀도가 낮아 대부분의 전류는 표면에 집중되어 흐르는 표면효과(Skin effect)가 나타나게 된다.

그림 2에서 볼 수 있듯이 주파수가 낮을수록 경화 깊이가 높아지는 것을 알 수 있다. 결국 고주파 열처리에는 와전류와 표피효과를 통해 제품을 빠른속도로 가열할 수 있으며, 표면만을 급가열하기 때문에 급냉이 가능하고 따라서 경화깊이를 적절하게 제어할 수가 있다.

일반적으로 고주파 유도가열시 나타나는 현상 중 와전류손실과 표피효과에 의한 가열 효과가 크며, 히스테리시스 손실에 의한 영향은 상대적으로 작다. 따라서 사용하는 주파수의 대역과 유지시간에 따라 경화깊이가 결정된다. 일반적으로 요구되는 경화깊이를 얻기 위해서는 (a) 자기장을 형성시키는 유도 코일의 형태, (b) 코일이 감긴 횟수, (c) 사용 주파수, (d) 교류 전력량, (e) 처리품의 성질과 같은 요소에 의하

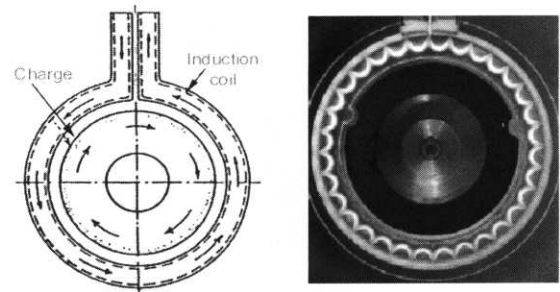


그림 1. Eddy-Current 현상 및 실제가열 모습.

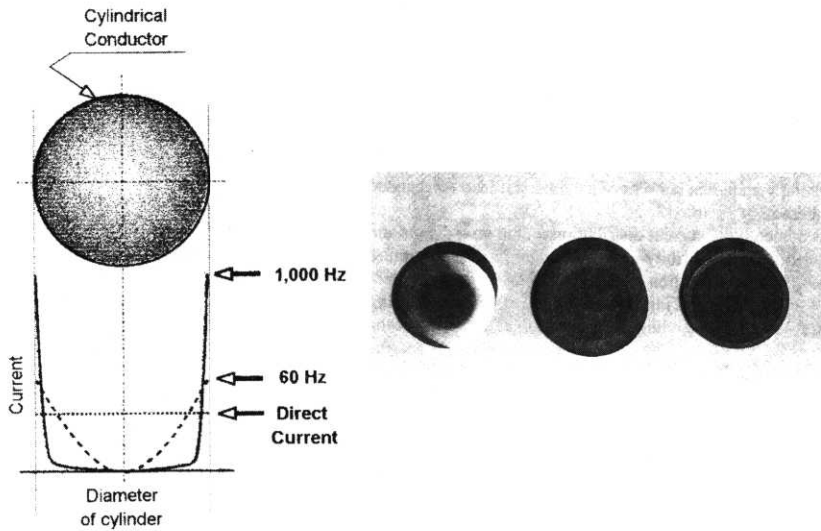


그림 2. 주파수에 따른 경화깊이.

여 결정된다. 가열속도는 부품이 노출되어 있는 자기의 강도에 의해 좌우된다. 처리품에 있어서는 이것은 유도전류와 그 흐름에 대한 저항사이의 함수관계로 설명 될 수 있다. 대체로 표면경화처리를 할 경우에는 표면 부위만으로 가열을 제한하기 위해 전력 밀도가 상대적으로 높아야 하고, 가열사이클이 짧아야 한다. 단위 면적 당 인가되는 전력밀도는 가열온도, 가열시간, 재질 및 경화깊이에 의하여 아래의 식을 통하여 구할 수 있다.

$$P_0 = \frac{\text{변환계수}(4.186) \times M \times C \times \Delta T}{\text{가열시간(sec)}}$$

고주파 열처리시스템은 크게 전원장치, 이송장치, 제어장치로 구성되어 있다. 전원장치는 고주파 전원을 공급하는 장치로서 구성장치 중의 핵심으로 주 드라이브 소자 및 방식에 따라 아래와 같이 나눌 수 있다. 그림 3은 고주파 유도가열의 일반적인 전원부의 계통도로서 입력전원에서부터 가열코일까지의 과정을 보여주고 있다. 이때 교류전원을 직류로 직류전원을 다시 교류로 변환하는데 사용되는 핵심소자에 따라 변환효율 및 실제 사용효율이 결정된다. 1950년대의 SCR에서부터 1980년대의 IGBT까지 고주파 유도가열의 기술적인 발전은 주로 반도체관련기술의 발달과 밀접한 관계를 가지고 있다. 표 1에서 보여 지듯이 기 소자에 대한 자세한 내용은 부록 I에 소

자의 특징에 대하여 기술하였다. 근래에까지 국내 고주파열처리 업체에서는 진공관 타입의 고주파 열처리 시스템이 많이 사용되어 왔다. 진공관의 수명이 타 소자에 비하여 짧고, 사용 중에 성능저하로 인하여 처리품에 대한 균일한 품질확보에 다소 어려움을 겪고 있는 상황이다. 또한 변환 효율적인 측면에서도 효율이 매우 나빠 처리요구 전력에 비하여 다소 높게 장비를 제작해야 하는 낭비적인 요소도 가지고 있었다. 그러나, 최근 스위치 매칭기술의 발달로 인하여 전원장치의 공정효율의 경우 100kW급의 경우 60% 정도의 효율이 90%이상까지 가능하게 되었고, 장비 자체가 간소화되어 공간효율도 증가하게 되었다.

고주파 유도가열 시 균일한 경화깊이를 얻기 위해서는 동일한 패턴으로 처리품이 가열되어야 하는데, 이때 정확한 제어신호에 따른 정확한 이송이 필요하게 된다. 이송장치는 고주파 유도가열시 회전이나 수직수평의 이송을 하는 장치이다. AC Servo 제어 방식이 비교적 정확한 제어가 가능하여 현재 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 중량물의 경우 금속간의 마찰로 인한 마모를 피할 수 없기 때문에 사용시간이 증가함에 따라 위치제어상의 에러 또한 증가하게 된다. 일정 사용시간 이후에는 부품의 교체를 통해 유지보수할 수 있다. 유압 서보 제어 방식을 이용한 시스템의 경우 AC 서보 제어 방식에 비하여 사용시간의 증가에 따른 부품의 교체없이 주기적인 위치

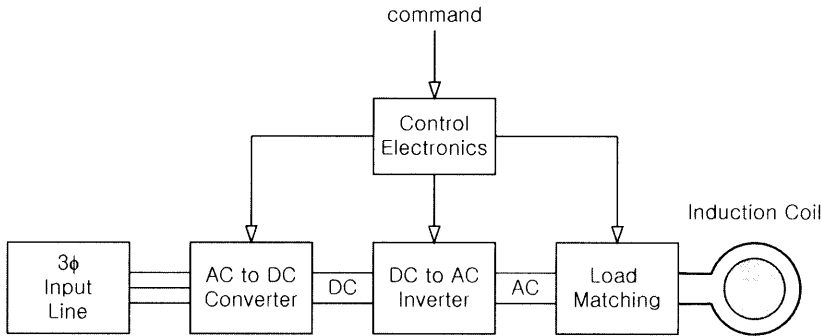


그림 3. 고주파 유도가열의 전원장치 계통도.

표 1. 반도체 소자 특징

소자	최대용량	적정주파수	최대주파수	특징
SCR	수십 MW	수백 Hz	수 kHz	· 1950년대 상용화 · OFF 불가
GTO	수십 MW	수백 Hz	수 kHz	· 1960년대 상용화
BJT	수백 kW	수 KHz	수십 kHz	· 1970년대 전기 상용화
IGBT	수 MW	수십 kHz	100kHz	· 1980년대 상용화
MOSFET	수십 kW	수백 kHz	수 MHz	· 1970년대 후기 상용화
진공관	수백 kW	수 MHz	수 GHz	· 1970년대 상용화, 효율이 나쁨

보정만으로 정확한 제어가 가능하며 유압기기의 특성 상 중량물의 취급이 가능하다는 장점이 있다.

마지막으로 제어장치의 경우 현재 대부분의 자동화에 사용되는 PLC 기술을 적용하여 사용하고 있으나, PC 기반으로 하는 기술이 점차 신뢰성을 얻어감으로써 향후 모든 시스템에서 적용될 것으로 예측된다. PC 기반의 제어장치의 경우 모뎀을 통한 네트워크가 가능하기 때문에 설비를 직접보지 않고도 사무실에서 공정제어가 가능하다. 이러한 장점에도 불구하고 기존의 PLC에 비하여 신뢰도가 높지 않았기 때문에 보급이 되지 않고 있는 실정이다. 이에 대한 원인은 작업장 내에서 발생하는 습도 및 분진자체가 PC에 치명적이기 때문에 잦은 오류를 일으킬 수 있다는 것이다. 그러나 최근의 산업용 PC의 경우에는 완전 밀폐형 시스템을 사용하기 때문에 이러한 문제가 해결되었다. 고주파 열처리시스템의 경우 처리품의 형상, 재질, 경화깊이에 따라 인가되는 주파수 및 공급전력, 이송 및 회전속도가 결정된다. 모든 제품에 대한 정확한 표준공정이 데이터베이스화된다면 공정

중에 처리품이 변경되더라도 생산성 저하 및 불필요한 시간의 지연을 막을 수 있을 것이다.

고주파 열처리시 관리해야 할 요인으로는 그림 4에서 볼 수 있듯이 코일의 종류, 적용주파수, 가열출력 및 시간, 냉각제의 적절한 선정을 통하여 원하는 깊이의 경화층을 얻을 수 있다. 종전 가장 많이 쓰였던 침탄법에서는 처리전에 표면의 산화물 제거 및 부분경화시에는 동으로 마스킹 하는 등 전처리가 매우 번거롭다. 또 침탄처리시간도 1mm의 침탄층을 얻으려면 3~4시간 정도 필요하다. 장시간의 가열시간으로 인한 내부조직이 균일하지 못하여 2~3차례 담금질을 실시하기도 한다. 그러나 고주파 열처리시에는 단시간 내에 이루어지기 때문에 퀘칭 후 템퍼링한 부품과 같이 탄화물이 균일하게 분포되어 있는 조직을 갖는다. 즉 매우 빠른 가열로 인해 오스테나이트화가 빠르게 진행되어 표면경도는 최고로 높고 경화깊이는 최소한으로 얇은 조직이 얻어지는 것이다. 탄소강이나 합금강을 고주파 열처리할 경우에는 경화깊이가 너무 깊으면 표면층에 높은 인장응력이

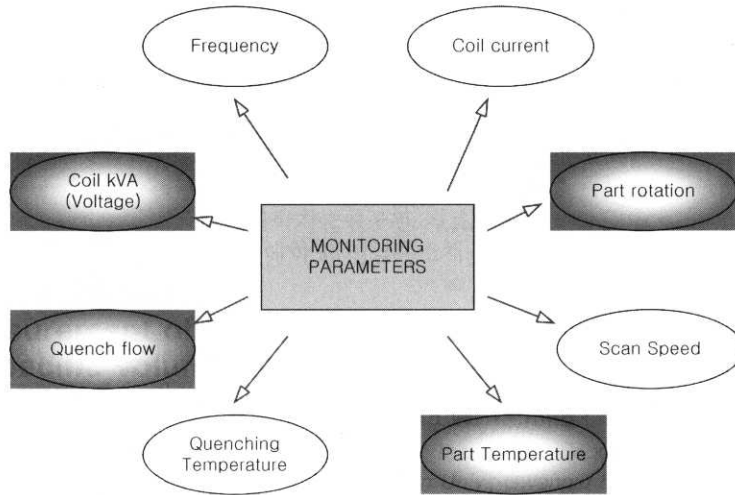


그림 4. 고주파 열처리 시 공정관리 포인트.

표 2. 유도가열의 응용과 처리품 예

소성가공전의 예비가열	열처리	용접	용해
단조	표면경화 템퍼링	심 (seam) 용접	강의 대기 용해
Gears	Gears	Oil-country	Ingots
Shafts	Shafts	tubular	Billets
Hand Tools	Valves	products	Castings
압출	Machine tools	Refrigeration	진공유도 용해
Structural members	Hand tools	tubing	Melting
Shafts	내부경화 템퍼링	Line pipe	Ingots
헤딩 (Headding)	Structural members	브레이징	Billets
Bolts	Spring steel	전자기 구조	Castings
Other fasteners	Chain links	교반법	"Clean" steels
압연	Annealing	부유법	Nikel-base superalloys
Slab	Aluminum strip	결정성장	Titanium alloys
Sheet	Steel strip		

형성되어 크랙이 발생할 염려가 있다. 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 변태가 일어나는 동안 퀴칭이 너무 급격하게 진행된다면 경화깊이가 지나치게 깊어진다. 온도가 너무 높아 표면에 과도한 스케일과 피팅 현상이 발생한다. 따라서 주파수와 전력밀도, 시간 등도 경화깊이에 영향을 미치므로 이런 요소들도 정확하게 선정해야 한다.

3. 고주파열처리의 응용

고주파 유도가열의 응용분야는 표면경화, 가열, 템

퍼링 및 응력제거를 위한 어닐링, 노말라이징, 용접 심 어닐링, 분말금속의 소결 등에 쓰이고 있다. 이러한 응용분야의 대부분에서 고주파 유도가열은 부분가열의 열처리에 이용되고 있다. 공정자체가 매우 짧은 시간에 이루어지며, 에너지가 경화가 요구되는 부위에만 쓰여지기 때문에 배치타입 방식과 비교해 볼 때 높은 생산성, 적은 변형, 깨끗한 조업환경 등과 같은 요인 때문에 많이 선택되어 지고 있다. 아래 그림 5에서도 볼 수 있듯이 국부적인 경화층을 형성하기 위하여 고주파 열처리가 현재 이용되고 있다. 일반적인 배치타입 형태의 열처리한 경우에는 부품전

체에 균일한 경화층을 형성하여 경제성 면에서 고주파 열처리에 비하여 많이 뒤떨어지는게 사실이다.

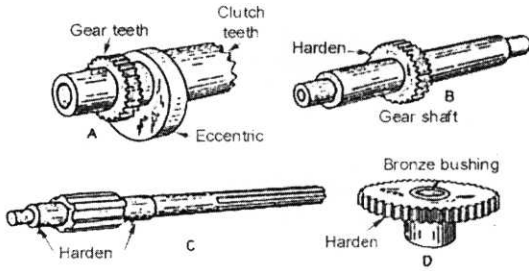


그림 5. 고주파 유도가열의 응용 사례.

고주파 열처리는 유도가열의 한 분야로 이러한 유도가열을 이용한 분야는 표 2를 통해 알 수 있듯이 가공공정에 앞서 가열을 하거나, 열처리, 용접, 용해 등에 이용되고 있다.

그림 6에서 보여 주듯이 다른 침탄과 같은 열처리 공정과 비교하여 고주파 유도가열은 단일 처리 제품에 대한 처리시간이 짧고 요구되는 부위에만 열처리가 가능할 뿐만 아니라 타 생산공정의 한 모듈로서 전체 생산시스템과의 적응성이 우수하기 때문에 현재 점차 생산자 입장에서 적용이 확대되는 추세이다.

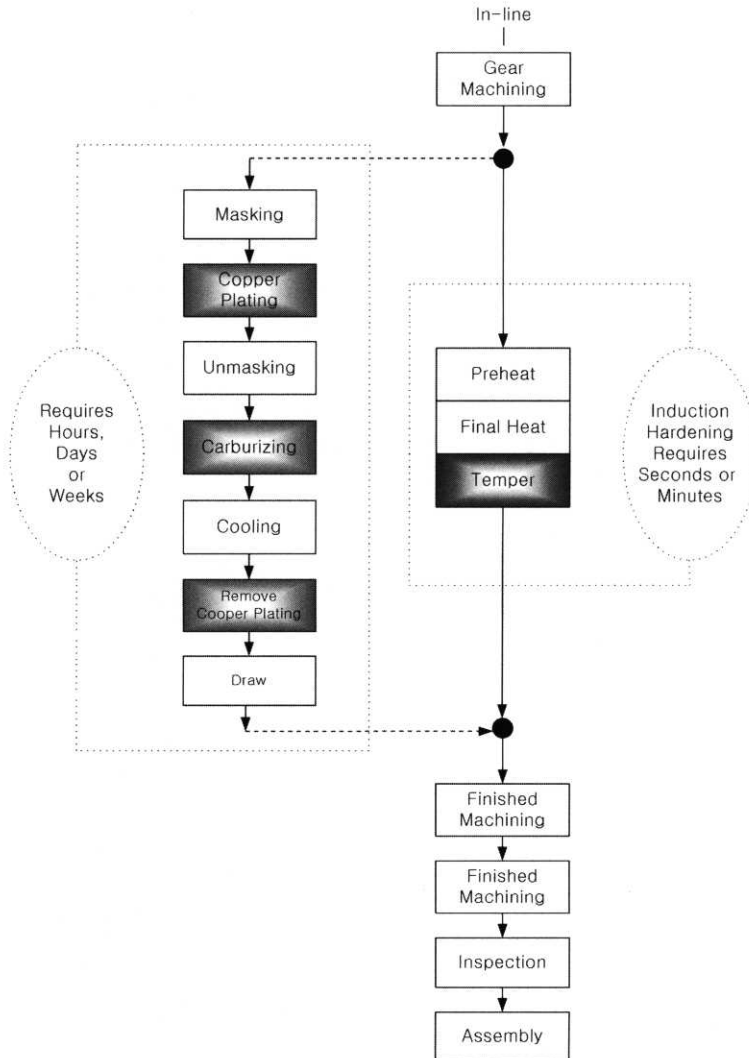


그림 6. 침탄과 고주파 공정의 비교.

4. 고주파열처리의 최근기술동향 및 전망

전술한 바와 같이 고주파 열처리의 장점은 제품의 국부적 경화층 형성으로 인한 생산성, 효율성 향상 및 공해 오염물질 배출의 억제로 인한 청결한 작업 환경, 또한 제품에 대한 균일한 품질 확보 등을 들 수 있다. 그러나 고주파 열처리 시스템에도 해결해야 할 문제들이 있다. 자장을 이용한 가열을 이용하기

때문에 모서리 부분이나 형상이 복잡한 제품에는 균일한 경화층을 얻기가 쉽지 않아 이에 대한 연구가 진행중이며, 보다 구체적인 아금학적 분석 및 전자기적인 해석이 뒷받침되어야 한다. 현재 형상이 복잡한 기어의 경우 두 개의 주파수(고주파, 저주파)를 사용하여 처리하고 있다. 아래 그림 7(a)에서 고주파의 경우 자장의 침투깊이가 얇고, 그림 7(b)처럼 중주파의 경우 침투깊이가 고주파에 비하여 깊기 때문에,

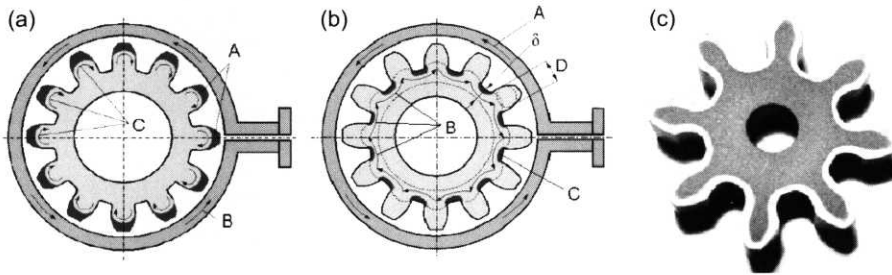


그림 7. 이중 고주파 열처리 원리 및 처리제품.

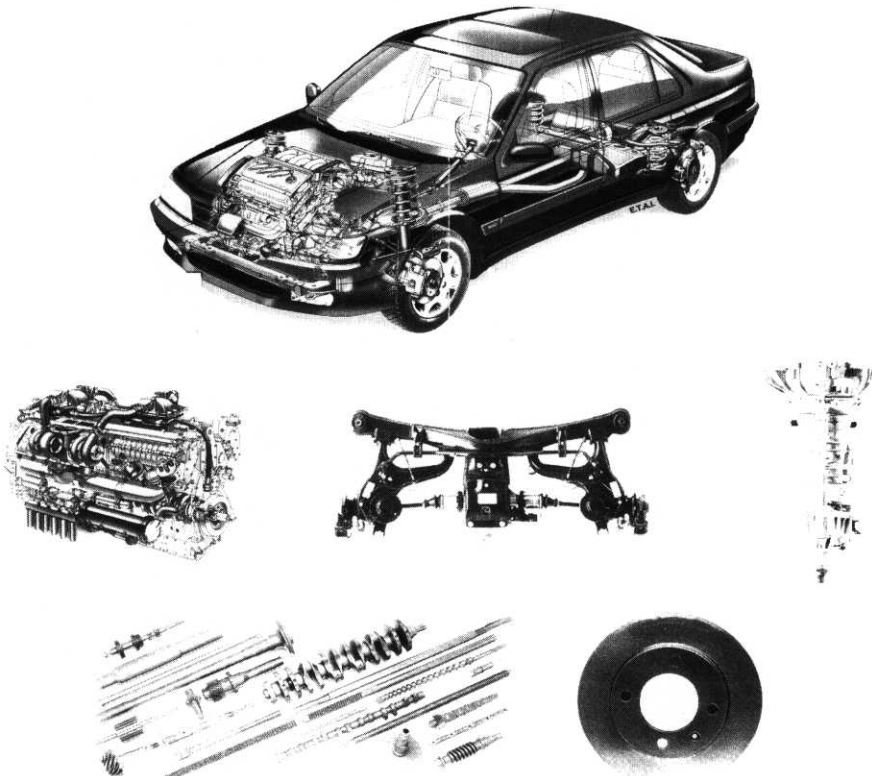


그림 8. 고주파 열처리를 이용한 자동차 부품.

동시에 고주파와 중주파를 인가하면 제품의 전체에 균일하게 가열되어 외형의 따라 균일한 깊이의 경화층이 형성되며, 또한 모서리 부분에서 과열되는 것을 방지할 수 있다. 그림 7(c)와 같은 형상을 따라 균일한 경화 깊이를 갖는 제품을 얻을 수 있다. 최근 유럽 및 미국, 일본에서는 이러한 고주파 윤곽소입기술을 개발하여 실용화 단계에 있는 실정이다.

5. 맺음말

그림 8을 통해 알 수 있듯이 최근 유럽의 자동차 부품업체의 경우 고품질 양산 및 원가절감이라는 두 가지 과제를 해결하기 위하여 기존의 열처리 방법에 대한 공정개선 및 고주파 열처리로의 생산시스템을 변경해 나아가고 있는 실정이다. 이에 국내에서도 국제경쟁력을 갖추기 위해서는 고주파 열처리 시스템으로의 전환을 모색해야 할 시기가 다가오고 있다. 기계가공을 마친 자동차 부품의 대부분이 현재 고주파 열처리를 이용하여 처리되고 있고, 가까운 미래에는 고주파 열처리 시스템 자체가 자동차 생산라인의 한 부분으로 대체될 전망이다.

참고문헌

1. Y. Favennec, V. Labbe, F. Bay., Induction heating process optimization a general optimal control approach, Journal of Computer Physics 187 (2003) 68-94.
2. Schwenk. W., Applications of Simultaneous Dual Frequency Method for Inductive Surface Hardening, Elektrowarme International, 1/2002, S. 13-18.
4. George E. Totten., Maurice A. H. Howes., Steel Heat Treatment Handbook 11A (765-911)
5. 고주파열처리기술자료(백마열처리).
6. (주) 공업저널 뉴스, 월간(메탈넷 코리아).

부록 I. 고주파 열처리의 장점

고주파 유도가열은 무공해, 에너지 절약을 기본으로 하는 전기 가열의 한 방법으로 에너지 절약과 환경보호, 품질의 균일화, 3D 기피현상으로 자동화가 요구되는 현대사회에 제품손상 및 주변오염이 전혀 없이 제품에 단시간 국부적으로 열을 가할 수 있고 아래와 같은 여러 가지 잇점을 가지고 있다.

① 월등한 경제성

피가열체 자신에 의해 직접 가열됨으로 효율이 높아 설비 제작비용이 보다 비싸도 총 생산비용은 오히려 타 연료장치의 반 이하로 낮출 수 있다.

② 고품위의 품질확보

피가열체의 재질과 크기에 따른 적절한 주파수를 선택한다면 균일한 온도와 속도 등을 임의적으로 제어할 수가 있어 대량 생산에 따른 개별 부품의 제품 생산이 가능하다(특히 국부가열이나 표면 소입처럼 선택가열이 가능한 점은 경제성 뿐만 아니라 열처리 기술에는 절대적인 필수 요건이다).

③ 비접촉 가열

피가열체를 가열원으로부터 완벽한 분리, 차단이 가능하여 각종 오염을 방지할 수 있다. 반도체 웨이퍼용 실리콘 제조공정에 응용하고 있다(이 방법은 3,000°C 이상 초고온의 가열과 각종 가스 분위기나 진공상태에서의 가열도 가능하며 최근 첨단기술의 응용분야 활용되고 있다).

④ 초단위의 신속한 작업처리

열처리, 금속접합, 건조 등 고주파 가열은 대부분 초단위의 작업처리가 가능하다. 이와 같은 신속한 처리는 재료의 재질 변화를 방지함과 함께 자동화 부품과 같은 대량생산이 요구될 때 앞뒤공정(프레스와 열처리)과의 생산속도를 맞출 수 있는 택(Tack) 시스템의 도입이 가능하게 된다. 이는 타 연료장치에 의한 가열에서는 상상도 할 수 없는 큰 장점인 것이다.

⑤ 무공해

매연과 발열발산이 적고 화염으로부터의 직접적인

노출이 없기 때문에 안정성이 우수하다.

⑥ 가동효율 증가

예열시 냉동 예비시간이 필요없어 설비의 가동율이 증가하게 된다.

⑦ 설치장소

다른 열처리장비에 비하여 출력에 비하여 설치면적이 좁다.

부록 II. 전원장치 소자 특성

① 불꽃거리 발전기 장치

불꽃거리 발전기는 고주파 전류를 발생하는 가장 초기의 방법 중의 하나이다. 이러한 형태의 장비는 5~50 kW 정도이며 출력주파수는 25,000~250,000 KHz에 운전된다. 또한 크기가 고정적이지 않고 입력 전력비에 따라 대략 50% 정도의 효율을 가지고 있어서 다른 장비의 50%에서 25% 정도의 효율과 비교가 된다. 정확한 효율을 얻기 위해서는 연속적인 불꽃거리가 알맞아야 되며 준비기간 동안에 전력소비는 모터 발전기에 비해 낮다. 현재는 거의 사용하지 않고 있다.

② 모터 발전기 장치

모터 발전기는 2,000~96,000 Hz 저주파에서 열을 발생하며 5~500 kW의 출력에서 이용할 수 있다. 이러한 장비는 거의 모든 주파수에서 깊은 통과 깊이의 가열이 일어난다. 따라서 이러한 장비들은 단조를 요구하거나, 봉 전체를 가열하는 단조 등에서 매우 폭넓게 사용하고 있다. 작동할 때 모터 발전기는 3,600 RPM에서 운용하나 현재에는 거의 사용하지 않고 있다.

③ DC 전원방식

DC 전원을 이용하여 금속을 유도가열하는 방법으로 예를 들면 DC 모터나 발전기에서 아마추어 대신에 실린더 형상의 금속을 넣고 자장 내에서 회전시키면 전자기력이 발생한다. 여기에서 발생된 전류는 회

전하는 금속 내에서 축방향으로 흐르게 되며 발열원이 된다. 이러한 전압은 금속코어를 정지시켜 놓고 양극을 회전시켜도 발생시킬 수 있다. 특한 용도에 국한하여 사용되고 있다.

④ 진공관(Vacuum Type)

진공관은 히터를 가열하여 열전자를 발생, 제어하는 관으로서 수명은 2,000~5,000시간 정도이며, 예열이 필요하고 시간이 지남에 따라 성능저하가 일어난다. 수 kHz~10 kHz 대의 주파수 영역에 적합하고, 비교적 대용량에서 많이 사용된다. 현재 국내의 많은 고주파열처리 업체들이 진공관 타입의 발전장치를 사용하고 있다.

⑤ SCR(Silicon Controlled Rectifier)

일명 사이리스터(Thyristor)라 불리는 실리콘 소자를 말한다. 특징은 고전압 대전류의 제어가 용이하며, 수명은 반영구적으로 사용이 가능하다. 진공관 타입보다 신뢰성이 높다. 기존 소자에 비해 소형 경량이며, 주파수 특성은 좋지 않으나 대전류 제어가 비교적 용이하기 때문에 수백 kHz~10 kHz 대의 주파수 영역에 적합한 소자이며, 비교적 대용량에 많이 사용된다.

⑥ IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)

Power MOS FET의 고속 스위칭 성능과 바이폴라 트랜지스터의 고전압, 대전류 처리 능력을 함께 가진 소자이다. 특징으로는 전압제어 소자이므로 저전력으로 드라이브와 고속제어가 가능하다. 수명은 반영구적이며 대전력 고주파에 사용된다. 수kHz~수십kHz 영역에 적합한 소자이며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 소자이다.

⑦ FET(Field Effect Transistor)

IGBT와 같은 전압제어 소자이므로 gate drive를 IGBT와 병용할 수 있다. 고주파 특성은 IGBT가 좋으나 대전류의 소자가 IGBT 만큼 준비되어 있지 못해 소용량에 많이 사용되고 있다. 사용범위는 수십 kHz에서 수백 kHz 영역에 적합한 소자이다.