

전자기유도가열 및 그 응용

장 석 명 · 이 성 호 · 박 희 창

(충남대 전기공학과, **충남대 대학원 전기공학과, ***한국기계연구원 장비개발실)

1. 서 론

산업이 발달하면서 전기공학의 응용은 광범위한 분야로 확산되고 있다. 그 중에서도 특히 전자기현상을 응용한 가열분야는, 산업분야에서 양질의 제품을 효율적으로 생산하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다. 이 분야는 신소재, 금속재료, 용접공업, 기계부품가공, 인쇄섬유공업 등의 산업현장은 물론 가전기기 등의 인간생활에 있어서 없어서는 아니되는 필수분야임에도 불구하고 전기공학도들에게는 그간 별로 주목을 받지 못하여 전기공학의 범주에서 제외될 만큼 떨어져 있는 상황이다. 더구나 첨단기술, 첨단제품 일반도의 현시대인의 편향된 관심으로 전기공학이 시대에 뒤떨어진 더 이상의 비전이 없는 구식의 학문으로 여겨지는 상황에서, 첨단제품을 가공하고, 제작하는 유도가열시스템의 중요성은 절대적이다.

이러한 상황에서 전자기가열의 원리와 장점을 검토하고, 그 응용분야의 일부를 소개하므로써, 첨단분야에서 반드시 필요한 필수분야임에도 불구하고 전기공학도들에게 외면된 채 어려운 조건에서 지탱하며 발전해 가고 있는 현실을 상기하고 관심을 갖는 계기를 제공했으면 한다.

본래 전자기 유도현상은 1831년 11월 패러데이에 의해 발견된 것으로 철로 된 링에 2가닥의 코일을 감아 1가닥의 코일에 교류전류를 흘렸을 때 다른 코일에 전압이 유도되는 현상으로 변압기와 전동기, 발전기, 변압기의 기본원리가 되었다. 그런데 이러한 기기들은 와전류에 의한 열손실의 발생으로 인하여 효율 및 운전능력이 나빠지기 때문에 가능한 한 저감시키기 위하여 철심을 얇은 규소강판으로 적층하여 열손실을 최소로 줄이고자 한다.

그런데 가열분야에 응용을 하기 시작한 것은 19세기 후반부터인데 금속의 용융분야에 제일먼저 적용되었는데 그 후 Ferranti, Colby, Kjellin 등이 60Hz교류를 전원으로 하는 유도가열로를 개발하였다. 1900년대 초에는 Northrup등에서 원통형의 고주파유도 전기로를 개발하여, Baker가 플라티늄을, 미국황동회사에서 비자성체 합금을 용융시키는데 처음 사용한 이래로 1922년대에는 모터-발전기시스템에 의해 주파수 960Hz, 용량 수백kW급 이상의 전원이 공급되는 전기

로가 개발되어 사용되기 시작하였다. 그런데 최근에 전원공급장치로 사용되는 전력반도체 컨버터는 1960년대 들어 처음 개발되어 현재는 50kHz이상의 초고주파수영역의 전원으로 사용되고 있다.

전기를 열원으로 사용하는 경우의 장점들을 요약하면 다음과 같다.

- 석탄, 석유, 가스 등의 화석연료를 열원으로 하는 일반적인 연소인 경우 얻을 수 있는 온도는 공업적으로 1500℃ 정도가 한도이다. 그러나 아크에 의한 가열이나 피열물 자체에 직접 전류를 통하여 가열하는 경우에는 2000℃이상의 온도를 쉽게 얻을 수 있을 뿐만 아니라 플라즈마 가열의 경우에는 수 10,000℃ 이상의 초고온 발생도 가능하다.
- 화석연료 등에 의한 경우는 물체의 표면에서 만 가열되므로 열원과 피가열체의 사이에 열저항에 의한 온도차가 생겨 필요한 가열온도보다 높은 열원이 필요하므로 열효율이 나빠진다. 또한 피열물의 내부를 균일하게 가열하는 것이 불가능하다. 그러나 전자기가열에서는 전자기 유도가열을 통하여 피열물의 내부에 열을 발생시킬 수 있으므로 피열물 자체가 최고온도로 되며, 열절연도 용이하게 될 수 있으므로 열효율이 좋아지고 온도상승속도를 빠르게 할 수 있으며 균일 가열도 쉽게 할 수 있다.
- 일반연료에 의한 가열에서는 연소가스, 과잉공기로 인하여 빠져나가는 열, 미연소 가스의 함유열량이 많아서 열효율이 나쁘지만 전자기가열에서는 발생하는 가스가 없으며 밀폐, 보온이 좋으므로 열효율이 좋다.
- 일반연료를 사용하는 노에서는 노내의 온도를 균일하게 유지하기가 어렵다. 또한 온도 및 연소의 제어에서는 연료의 송입량, 공기량 등의 연소조건을 제어하면서 조절하므로 간단하지 않다. 그러나 전자기가열의 경우는 노내의 온도를 균일하게 유지하고자 하는 경우에는 발열체의 배치를 적당히 하면 된다. 또한 온도제어도 전력제어만으로 할 수 있으므로 원격제어 및 감시가 쉽다.
- 연료를 사용하는 노에서는 방사열을 아래쪽으로 집중

하기가 어렵지만 전기가열에서는 방사열을 임의 방향으로 향하게 하는 것이 매우 쉽다.

- 전기가열에서는 온도분포가 양호하고 온도제어가 쉬우므로 제품의 품질이 균일화되고 불량품이 적어져 양품률이 좋아진다. 또한 연료를 사용하는 경우와 같이 노 내에서 발생하는 가스, 먼지 등에 의한 제품의 오손, 변질이 없으므로 품질이 향상된다.

그러나 변압기나 전동기의 경우와는 달리 와전류에 의한 열손실을 오히려 적극적으로 응용하는 것이 전자기 유도가열이다. 최근 유도가열은 산업현장의 여러 분야에서 양질의 제품을 효율적으로 생산하는데 매우 중요한 역할을 하므로 널리 활용되고 있다. 즉 화석연료에 의한 기존의 가열법에 비하여 장점이 커서 금속의 열처리, 용융 등은 물론, 금속 변형, 기계부품가공을 위한 가열 등에 많이 쓰여왔다. 현재는 특수 포장분야, 칼라인쇄공업, 섬유공업에서의 부직포 시험장치 등에 사용되는 히팅롤 등에서 전자기 유도가열법이 필수적으로 이용되고 있다. 그래서 최근 다양한 방법으로 확산되어 여러 산업에 응용개발이 되고 있다.

이렇게 전기가열, 특히 전자기현상을 응용하는 유도가열이 화석연료에 비하여 큰 장점을 갖고 있기 때문에 국내외적으로 광범하고 필수적으로 다량 사용되고는 있지만 국내에서는 생산은 물론, 개발수준이 아직은 낮은 단계로 부가가치가 큰 분야이다. 그래서 유도가열의 원리, 응용 등에 관하여 검토소개하기로 한다.

2. 유도가열의 원리

그림 1은 유도 가열의 원리를 보여준다. 유도코일이 피열물을 감고 있는 구조이다.

즉 유도코일에 교류를 공급해주면, 패러데이-렌츠의 전자기 유도현상에 의하여 피열물에 $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ 의 유기기전력이 발생되고, 이로 인하여 피열물에 와전류가 흐르게 된다. 이 와전류는 표피효과에 의하여 피열물에 분포하게 되며, 피열물에서는 이 와전류와 저항에 의하여 $P = I^2 R$ 의 전력크기만큼 열을 발생하게 된다. 따라서 피열물은 이 열에 의하여 가열이 된다. 그림 2는 유도가열의 내부 구조를 나타낸 그림이다.

3. 유도가열기술의 특징과 장점

전기가열 중에서도 특히 유도가열은 장점이 절대적으로 크다. 그러나 변압기나 전동기의 경우와는 달리 와전류에 의한 열손실을 오히려 적극적으로 응용하는 것이 전자기 유도가열이다. 최근 유도가열은 그 특별한 장점에 의해 산업현장의 여러 분야에서 양질의 제품을 효율적으로 생산하

WE WILL STUDY A 3-INCH LENGTH

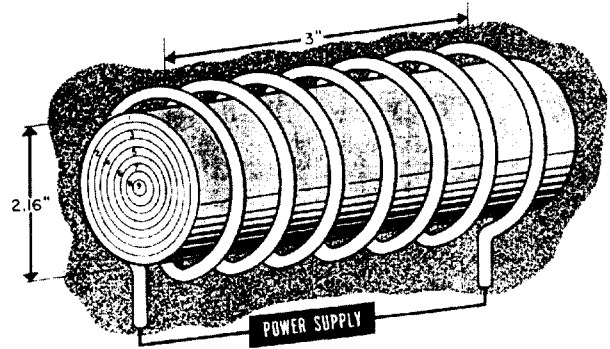


그림 1. 유도가열의 원리.

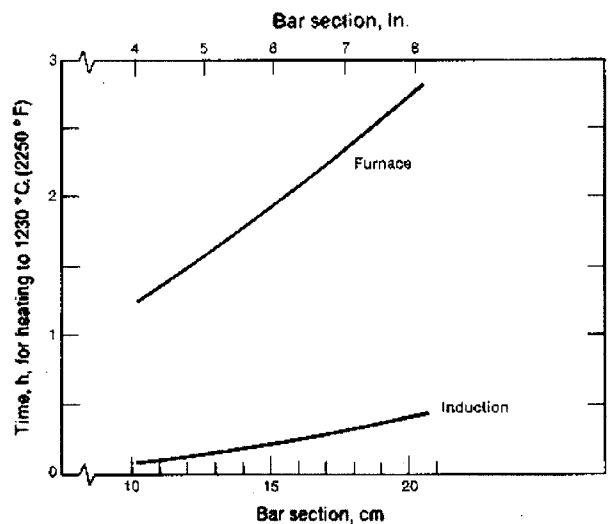


그림 2. 봉모양의 피가열체를 유도가열과 개스연소로로 각각 가열하는 경우에 소요되는 시간의 비교.

는데 매우 중요한 역할을 하므로 널리 활용되고 있다.

그림 2에서는 봉모양의 피가열체를 1,230°C까지 유도가열과 개스로 연소되는 로에 의해 가열하기 위한 시간을 나타낸 것이다. 피가열체 봉의 20cm부분까지 가열하는데 걸리는 시간이 유도가열의 경우는 1시간이내, 가스연소로는 2시간 40분 정도로 유도가열에 비해 가열시간이 270% 정도가 더 소요됨을 알 수 있는데 이로써 급속한 속도로 가열하는 데는 유도가열이 매우 적합함을 알 수가 있다.

그림 3은 1917년대부터 1976년대까지 유도가열의 전력공급 장치의 변천과 효율변화를 나타낸 것으로 초기에 50%에서 94%로 188% 정도까지 고효율화되었음을 알 수가 있다.

그림 4는 1948년부터 1981년대까지 유도가열의 전력공급 장치의 종류와 비용의 변천을 보여준다. 초기에는 모터-발전기의 조합에 의한 전력공급장치가 적용되다가 1981년대부터는 반도체 전력변환장치로 대체되어 초기에 비해 비용이 30% 수준까지 저렴하게 되었음을 알 수가 있다.

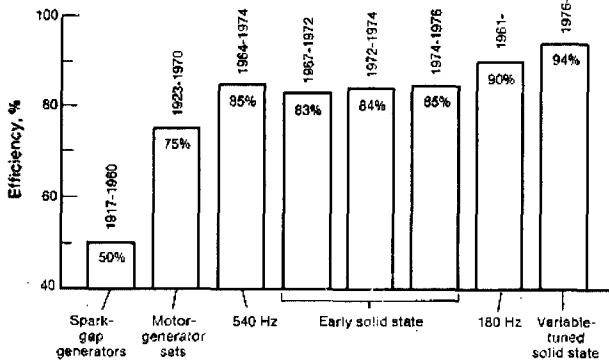


그림 3. 1917년부터 1976년대까지 유도가열의 전력공급 장치의 변천과 효율변화.

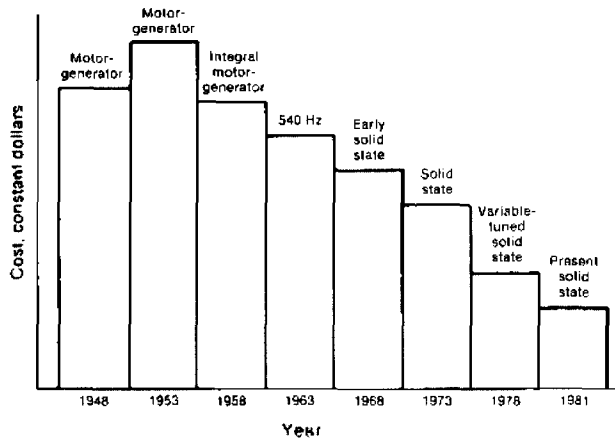


그림 4. 1948년부터 1981년대까지 유도가열의 전력공급 장치의 종류와 비용의 변천.

4. 유도가열의 응용분야

유도가열은 산업현장의 여러 분야에서 활용되고 있다. 즉 전기로에 의한 금속의 열처리, 용융 등은 물론, 금속변형을 위한 가열과 고강도 기계부품가공, 특수 포장분야, 칼라인 쇄공업, 섬유공업 등에서 유도 가열이 필수적으로 이용되고 있다.

4.1 유도가열 코일구조와 응용

유도가열을 위한 코일은 그림 5와 같이 응용분야에 적합하도록 다양한 모양으로 구성하게 된다. 즉 (a)와 (b), (c)는 원통형 또는 사각단면형의 표면가열용, (d)는 평판가열용, (f)는 실린더나 구멍등의 내면가열용에 이용하는 경우이다. 그림 6은 유도코일의 세부모양으로 냉각수, 유도코일, 와전류를 나타낸 것이다. 그림 7은 나선형 코일로 이루어진 가열기로 주방기구 등에도 응용되고 있다. 또한 그림 8은 유도코일에 의하여 피열물을 가열시키는 모습을 나타낸 사진이다. 이러한 가열장치는 금, 은 등의 세공을 위한 응용에

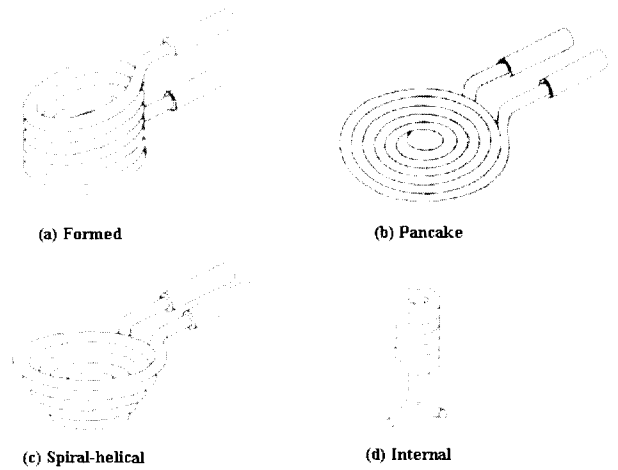


그림 5. 유도코일의 종류.

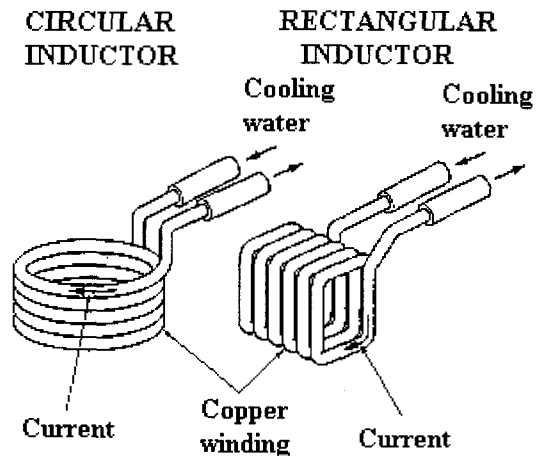


그림 6. 유도코일의 구조(유도코일, 냉각수통로, 유도전류).

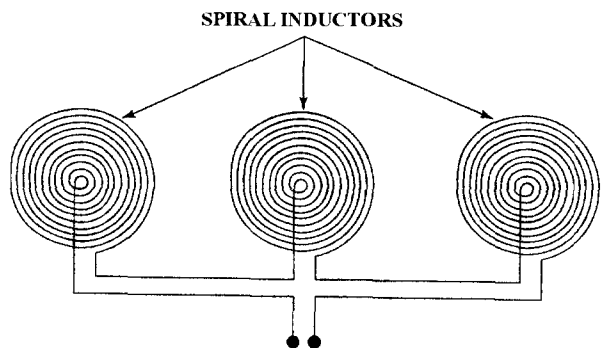
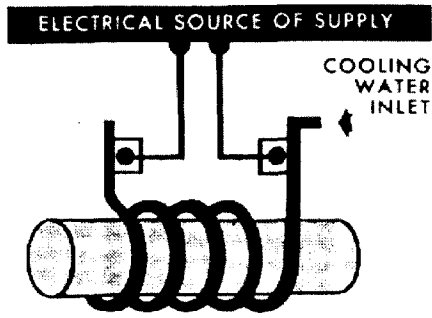


그림 7. 조리기구 등에 응용되는 나선형 유도코일.

도 유용하게 사용된다.

유도가열이 철판표면의 가열에 사용된 것은 1927년 Midvale Steel이 rolling mill의 표면가열용으로, 1930년대 중반에 Ohio Crankshaft회사에서 디젤-엔진의 크랭크샤프트의 연마용으로 사용된 이래로 2차대전을 거치며 큰 발전

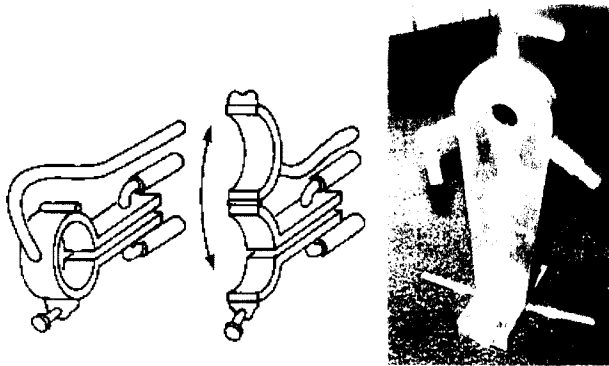


(a) 유도코일, 냉각수통로, 피열물



(b) 유도코일과 가열된 피열물 모습

그림 8. 유도코일에 의한 피열물을 가열.



(a) (b)

그림 9. 조립형 유도코일의 예.

을 하였다.

그림 4의 경우는 전자석모양의 자기회로를 구성하고, 교류전압을 인가하면 공극안을 통과하는 평판모양의 슬랩 모서리에 와전류가 유기되며 모서리부분이 가열되도록 한 장치이다.

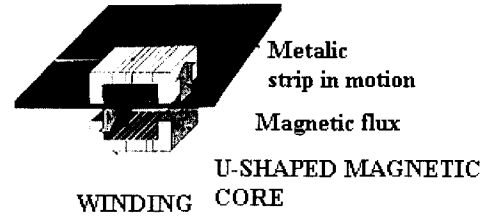


그림 10. 교류전자석에 의해 평판의 부분을 가열하는 모습.

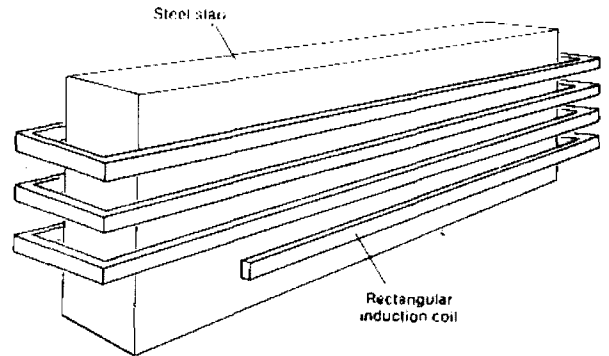
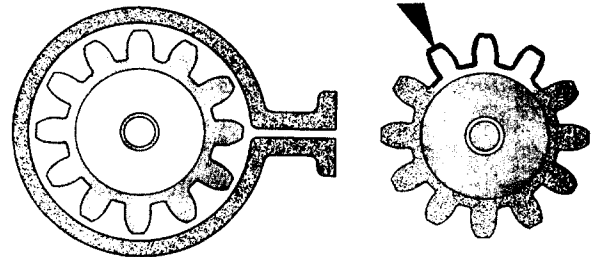


그림 11. 4각단면 유도코일로 철판의 표면을 가열하는 예.



GEAR IN TYPICAL HEATING COIL [ONE TURN]

그림 12. 기계요소부품 기어를 유도코일로 가열하여 가공한다.

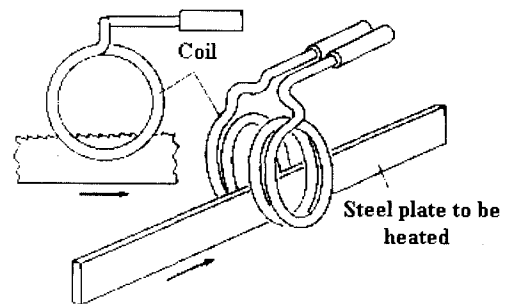


그림 13. 유도코일로 철판과 톱날을 가열하는 예. (톱날에 와전류를 유도시켜 가열시킴)

그림 12와 그림 13은 기계부품의 표면경화 및 고강도화에 유도 가열현상을 응용하는 예이다. 즉 그림 12는 치차의 표면을, 그림 13은 톱날의 표면을 硬化시키기 위하여 유도코일을 전체 또는 일부를 설치하면 표면에 와전류가 유도되어 흐르며 가열하게 되는 예이다.

4.2 용접에의 응용

그림 14에서 (a)는 틱새가 있는 금속을, 유도코일로 감고 교류전류를 흘리면 금속에 와전류가 유도되며 틱새부분에 열이 발생하게 된다. 이를 외부에서 힘을 가하면 틱새부분에 발생한 열에 의하여 두 금속이 용접이 되는 것이다. 그 과정은 (b), (c)와 같다. 이 경우 외부에서 불꽃을 가하지 않고도 용접이 되므로 피열물의 용접작업이 손쉽고, 청결한 상태에서 높은 열로 신속하게 작업을 할 수 있다는 장점을 갖는다. 그림 15는 용접부위 근처에 유도코일을 설치하고 유도된 와전류에 의해 가열을 한 다음 롤러로 압력을 가하여 용접을 하는 seam-용접의 경우를 나타내고 있다.

4.3 히팅롤

유도가열법 중에서도 히팅롤은 널리 확산되어 다양한 방법으로 여러 산업에 광범하게 쓰이고 있다. 그림 16 (a), (b)에 의해 그 원리를 설명할 수가 있다. 즉 그림 16에서 금속슬리브에 감은 유도코일에 교류전류를 흘리면 슬레노이드 형태가 되므로 자속이 발생하고, 피열물인 슬리브에는 와전류가 유도되어 흘러 열이 발생하여 가열이 된다.

그림 17은 유도히팅롤의 단면구조에서 본 유도코일, 차로, 자계를 함께 그려놓은 것이다. 보빈에 설치한 유도코일에

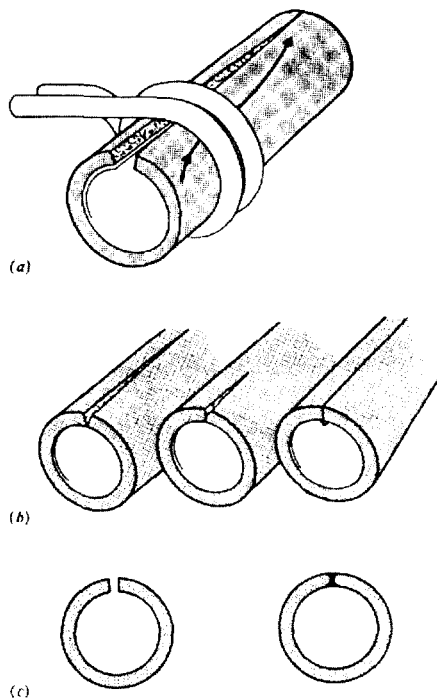


그림 14. 유도가열에 의한 용접원리 및 과정.

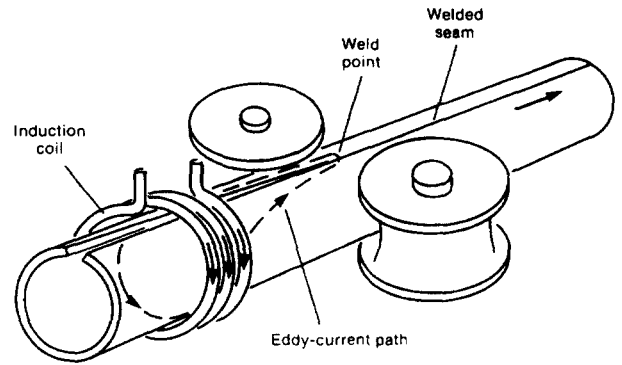
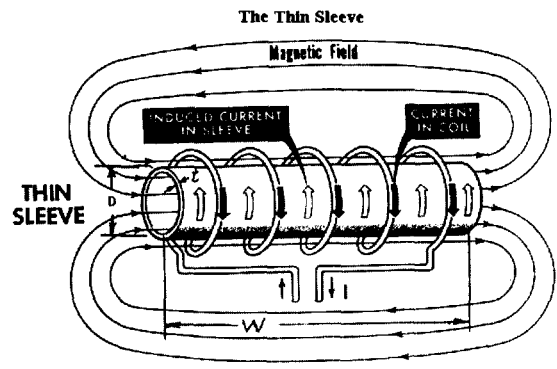
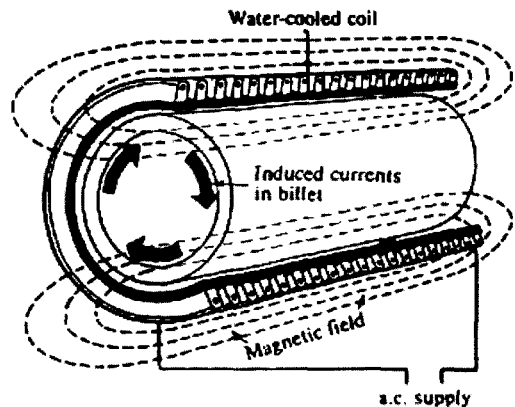


그림 15. 유도코일에 의한 심용접 구조.



(a) 정면도



(b) 단면도

그림 16. 유도가열 히팅롤의 유도코일, 자계발생, 피열물 가열원리.

의하여 발생한 자속이 안쪽자성체-공극-측면의 자성체를 통하여 바깥쪽 자성체인 피열물에 도달하여, 와전류를 유도하므로써 열을 발생시키는 구조이다. 이러한 구조에서 바깥쪽의 피열물에 온도를 균일하게 분포시키기 위하여 개발회사 나름대로의 독자적인 know-how가 필요하다.

그림 18은 그림 17과 같은 구조로 만든 원통형 히팅롤을 칼라 인쇄에 사용하기 위하여 시스템을 구성한 대형 유도가열기를 나타내고 있다. 이 경우는 각종 제품의 포장용 비닐이나 알미늄박, 종이에 칼라인쇄를 하는 경우에는 색깔별

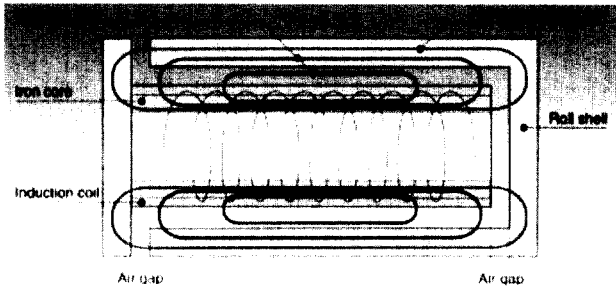


그림 17. 히팅롤의 단면구조에서 본 유도코일, 자로, 자계.

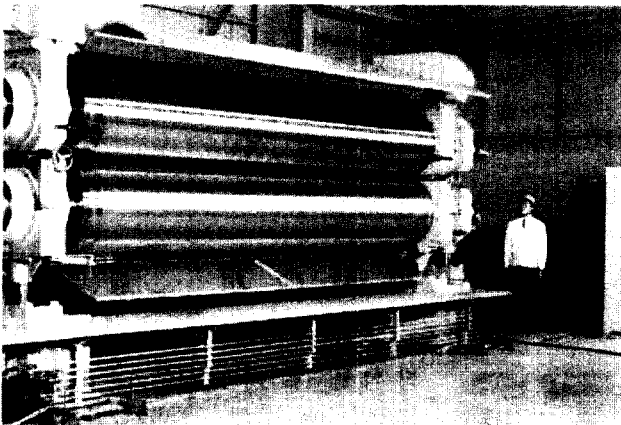


그림 18. 칼라 인쇄용 유도가열 히팅롤.

로 각각 별도의 인쇄기로 인쇄를 하게 되는 데, 이때 각각의 인쇄기를 통과하여 인쇄되어 나온 글자를 건조시켜서 다음공정의 인쇄기로 들어가야 만 인쇄된 글자나 형상이 망가지지 않도록 하기 위한 시스템이다. 따라서 이를 신속하고 편하게 건조가 되도록 하기 위해서는 표면의 온도가 균일한 고온의 히팅롤이 필수적이다. 이때 유도가열을 응용하게 되면 롤표면에서 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 정도의 균일도를 유지하여 우수한 품질의 포장인쇄물을 제조할 수 있다.

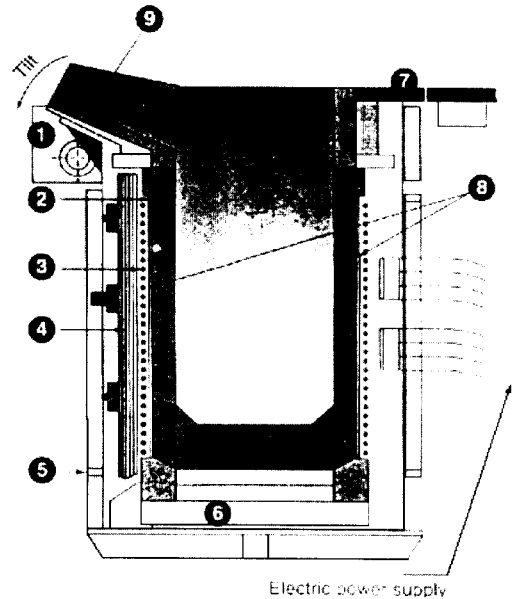
유도가열을 이용한 또 다른 예로는 각종 유리병의 제작 공정, 표면 열처리를 통하여 병마개를 밀봉시키는 공정등에 유도가열이 응용되기도 한다.

4.4 유도로와 유도교반

전기로는 전기에너지에 의한 발열을 공업용으로 사용한 대표적인 것으로서 대규모, 대용량의 것이 많고, 특히 금속 정제에 널리 사용된다. 발열방식에 따라 분류하면 저항로(抵抗爐)·아크로·유도로(誘導爐)로 나눈다.

유도로의 원리도 히팅롤과 마찬가지로이다. 즉 패러데이의 전자기 유도법칙을 응용하여 외부 코일에서 가하는 교류 전자기장이 금속 내부에 와전류를 유도시켜, 피열체인 금속에서 I^2R 의 주열이 발생하게 하여 금속을 가열·용해하는 장치이다. 유도로는 일반 화석연료를 이용하여 가열하는 일반로와는 달리 유해가스가 발생하지 않고, 금속가열이 가능하다.

즉 그림 19는 유도로의 일반적인 형태로 교류자계를 피가열물에 가하여 와전류를 발생시켜 피가열물 속으로 전류가 흐르게 하므로써 금속을 용융시키고 정제하는 데 사용되는 시스템이다. 따라서 그림 19와 같이 유도로를 둘러싸는 유도코일이 있게 된다. 이때의 주파수에 따라 50~60Hz 인 경우는 저주파 유도로, 10 kHz 이상인 경우는 초고주파 유도로, 10 kHz 이하인 경우는 고주파 유도로라고 한다. 고주파 및 초고주파 유도로의 전원은 10kHz까지는 고주파 발전기, 주파수가 그 이상인 것은 불꽃발전기·진공관발전기 등에 의한다. 발전기의 용량은 수kW에서 큰 것은 2,000kW 급의 것도 있다. 또한 제철공장등의 대형로에서부터 실험실용, 금 또는 은등의 세공용 소규모 유도로도 활용되고 있다. 유도로는 무철심 유도호와 채널 유도호로 나눌 수 있는데 무철심 유도호는 금속의 재용해에 주로 사용하며 채널유도호는 음탕을 보존·유지하는데 사용한다.



- 1 - Tilting axis
- 2 - Protective lining
- 3 - Induction coil
- 4 - Magnetic laminations
- 5 - Frame
- 6 - Tamping-clay support
- 7 - Work floor
- 8 - Tamping-clay lining
- 9 - Pouring spout

그림 19. 유도로의 일반적인 구조.

또한 그림 20과 같이 유도로의 바깥에 이동장계를 만들어 주는 코일을 설치하면 유도호내의 용융금속내에 와전류가 유도되어 자속과 전류에 의한 로렌츠력 $F=I \times B$ 의 전자기력이 발생한다. 이 힘에 의하여 용융금속이 자동으로 교반이 되어 균일한 조성의 잉곳(ingot)을 만들 수도 있다. 이 경우 다른 시스템의 stirrer에 비하여 설치비나 운용비용이 매우 저렴하고 편리한 장점을 갖는다.

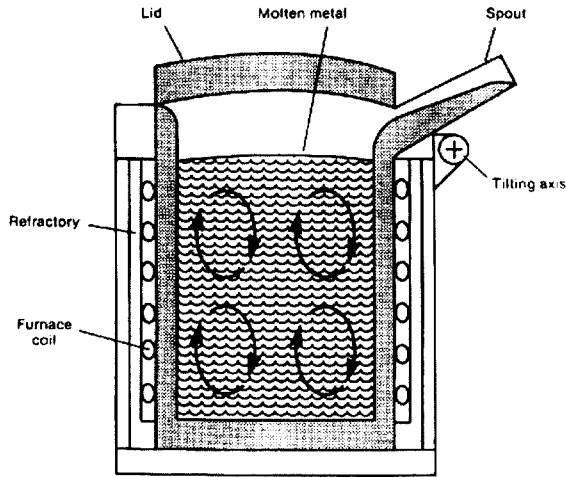


그림 20. 유도로에서의 유도교변현상.

5. 결 론

신소재, 금속 및 재료, 용접공업, 고강도 기계부품가공, 특수인쇄, 특수섬유공업 등과 같이 고도의 기술과 양질의 제품을 생산하기 위한 산업현장은 물론이고 주방용 가전기기 등의 현대인의 생활에까지 전자기 유도가열은 이미 없어서는 아니되는 필수분야로 자리잡고 있다. 그럼에도 불구하고 전기공학도들에게는 그간 별로 주목을 받지 못하였기 때문에 하는 수없이 각 분야에서의 실수요자들에 의하여 명맥을 유지하는 정도로 볼 수가 있다. 따라서 국내에서는 부가가치가 매우 큰 이 분야의 큰 발전이 없어서 수 개의 소규모 회사만 있을 뿐 거의 외국기술에 의존하고 있는 형편으로 외화 유출이 막대하다. 또한 외국회사들도 기술유출을 막기 위하여 유지보수를 위한 수리까지도 自國으로 옮겨하는 정도이다.

작금에는 전기인들에게 까지도 이젠 전기공학이 시대에 뒤떨어진 더 이상의 비전이 없는 구식의 학문으로 여겨지는 상황이다. 그래서 전기공학 중에서도 자그마한 특수분야 중의 하나인 전자기 유도가열을 예로 들어 그 원리와 장점을 검토하고, 그 응용분야의 일부를 소개하므로써, 첨단분야에서 반드시 필요한 부가가치가 무한한 필수분야임에도 불구하고 전기공학도들에게 외면된 채 어려운 여건에서 지탱하며 어렵게 발전해가고 있는 현실을 상기하여 보았다. 전기공학안에는 고도의 신기술들에 응용 발전시켜야 할 분야는 매우 많다. 이제 전기공학의 범주를 다시 한번 생각하며 미래기술의 세계에서 우리의 역할을 정립하고 넓혀 나가야만 할 때라고 생각한다.

참고문헌

- [1] 박희창, 장석명의 7인 “유도가열방식 히팅롤 개발” 과학기술부 특정연구개발사업 연구보고서, 1992. 12.
- [2] 장석명 “열피로 시험용 유도가열 해석기술개발” 기계연구원 위탁연구보고서, 2000. 12. 31.
- [3] 박희창, 장석명 외 “대용량 유도가열방식 히팅롤 개발” 에너지·자원기술개발사업 1차년도 중간보고서, 2000. 12.
- [4] Jean Lucas, “Electromagnetic Induction and Electric Conduction in Industry,” Centre Francais de l’Electricite, 1997.
- [5] S. Zinn, S. L. Semiatin, “Elements of Induction Heating-Design, Control, and Application,” ASM International (4th printing), 1995.

저 자 소개



장석명 (張錫明)

1949년 7월 3일생. 1976년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 1978년 2월, 1986년 2월 한양대학교 대학원 석사과정 및 박사과정 졸업(공학박사). 1978. 3~현재 충남대학교 전기공학과 교수. 1989. 1~1990. 1 미국 Univ. of Kentucky 방문연구. 1990. 1~현재 전기학회 평의원. 1999. 1~2000. 12 전기학회 편집이사. 1999. 1~1999. 12 전기학회 전기기기연구회 간사장. 2001. 1~현재 전기학회 편집이사, 편집위원장, 전기가 및 에너지변환시스템 부문회 부회장.



이성호 (李成浩)

1971년 11월 1일생. 1997년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 석사과정 졸업. 1999년~현재 동 대학원 박사과정.



박희창 (朴喜昌)

1956년 6월 5일생. 1988년 동국대학교 대학원 박사과정 졸업(공학박사). 현재 한국기계연구원 장비개발실 책임연구원.