

유도가열 열처리용 코일의 최신 설계 방안

Advanced Design of Induction Heat Treating Coils*

정리 : 경북대학교 교수 정인상
R. S. Ruffini, R. T. Ruffini and V. S. Nemkov

1. 글머리

최근 유도가열용 전원, 제어 및 측정시스템과 기타 구성 부품에 혁신적인 개량이 계속되고 있으나 설비 중에서 가장 중요한 워킹코일에 관해서는 큰 진전이 보이지 않는다. 이 문제는 워킹코일이 완벽하기 때문에 더 이상 발전의 여지가 없다는 의미가 아니며, 도리어 설비 전체에서 볼 때 가장 신뢰성이 좋지 못한 요소이다. 코일설계는 유도가열 열처리에서 설비의 효율과 열처리 제품의 품질을 결정하는 가장 중요한 구성요소이다. 본 자료에서는 코일설계의 원리와 함께 출력을 집중시키고, 가열 패턴을 제어하며, 전자장(電磁場) 차단을 위한 자속제어 이론과 실제 예를 설명한다.

최근에 보급된 자속제어법을 잘 이용하면 코일의 효율뿐만 아니라 전력의 효율도 개선시킬 수가 있다. 즉 자속제어를 이용하면 정합(整合) 변압기, 부스터와 케이블에 필요한 코일 전류와 전원 kVA 및 전력손실을 크게 줄일 수가 있다. 특히 부분 가열(표면열처리, 브레이징 접합 등)의 경우에는 피가열재에 전달되는 전력 이용률을 개선시키기 때문에 에너지를 크게 절약할 수 있으며, 기술적인 면에서도 장점이 있다. 자속제어에 사용되는 적층판(규소강판), 자기유전재(磁氣誘電材) 및 페라이트의 특성과 이를 이용한 자속의 집중 및 제어에 관한 응용 방법을 설명하고, 미국 Fluxtrol사에서 개발한 자속집중자(Power Coil™)를 이용한 경우도 소개하기로 한다.

한편 유도가열 시스템에서 코일을 개량하는 과

정은 새로운 재료와 기술을 적용하여 그 결과를 수치적으로 시뮬레이션하는 방법과 프로그램을 개발하는 것은 기본적으로 필요하며, 워킹코일과 그 제조기술이 피처리물의 가열 품질과 설비의 효율성 및 신뢰성을 전부 대표한다고 해도 과언이 아니다. 단조나 예비 열처리에서처럼 단면 전체를 가열하는 경우의 코일설계는 퀘칭에 사용되는 코일처럼 어렵지는 않다. 전단면 가열에서는 코일이 적절하지 못하면 효율이 떨어지기는 하지만 추가 코일을 붙이던가 저항가열로를 이용하여 그것을 보상할 수가 있다. 그러나 고주파 퀘칭의 경우는 대부분 적절한 코일과 동작조건(주파수, 출력, 시간)을 설정하여 필요한 부분만 오스테나이트가 되도록 한 후, 급랭시켜 마르텐사이트 조직으로 변태시킨다. 이 경우에는 코일이 적절하지 못하면 제품의 특성을 발휘시키지 못할 뿐만 아니라 유도가열의 장점을 충분히 활용하지 못한 결과가 된다.

유도가열의 장점은 다음과 같다.

- 1) 내부에서부터 발열
- 2) 높은 전류 밀도
- 3) 깊이와 부분 가열 등 우수한 가열부위 선택성
- 4) 표면상태에 관계없이 표면전력을 임의로 설정가능

이와 같은 장점은 유도가열 이용자에게 다음과 같은 기술 및 경제적인 이점을 제공한다.

- 1) 짧은 열처리 사이클로 인한 높은 경제성
- 2) 유사한 금속학적 결과(경도, 강도, 연성) 도출
- 3) 우수한 제어성과 재현성

* 이 자료는 1st International Heat Treating Symposium USA, Indianapolis, September 16-18, 1997에서 발표된 것입니다.

- 4) 무시할 정도의 표면산화와 탈탄
- 5) 작은 변형
- 6) 에너지 절약과 낮은 생산비
- 7) 아주 짧은 시동 시간
- 8) 저급강과 저급 냉매를 가지고도 고급강의 특성 재현이 가능
- 9) 높은 환경친화성(배출가스나 물질이 거의 없고 자동화 가능)

그러나 유도가열은 처리품의 돌이기(장입)와 꺼내기(퇴출)를 포함하여 처리과정 중의 여러 변수(파라미터)의 영향을 많이 받기 때문에 개개 처리품에 대하여 세세한 조건까지 설정하여야 된다. 다시 말하면 부품의 종류가 달라지면 유도코일과 기타 설비의 구성 부품(정합 변압기, 전원)도 변경하지 않으면 안 된다. 때에 따라서는 0.1 mm의 공차 내에서 유도코일 내부에 피가열물을 정확하게 설치하여야 한다. 이러한 목적 때문에 자계나 와전류의 분포와 열의 확산제어에 관하여 특히 배려할 필요가 있다. 이처럼 코일에 의한 유도가열이 공정의 모든 인자에 대하여 민감한 까닭에 단순히 [코일설계]라고 부르기도는 [공정설계]라고 부르는 편이 더 정확한 표현일 것이다.

2. 코일의 설계 순서

2.1. 일반적인 사항

유도가열용 코일은 다음 사항을 만족하여야 한다.

- 1) 목적하는 가열패턴과 급속학적인 최종결과를 얻을 수 있을 것.
 - 2) 효율이 좋을 것.
 - 3) 우수한(긴) 수명을 가질 것.
 - 4) 높은 임피던스로서 일률이 좋고, 전원을 효과적으로 사용할 수 있어야 할 것.
 - 5) 부품의 크기 변화와 장착시의 위치 조정에 허용도가 클 것.
 - 6) 특수한 요구사항(장치 구성으로 보아 냉각액의 공급, 분위기, 재료 취급 등)에 적합할 것.
- 다양한 코일설계도 주로 다음 세 가지 부류로 나

눌 수가 있다.

1) 현 유동품 코일의 설계변경 또는 새로운 코일의 제작

예를 들면 이동 퀘칭(제품 또는 코일이 이동하면서 퀘칭)용의 원통형 코일이다. 이 경우는 열처리 품질, 코일효율 및 내용 년수가 가장 중요한 특징이다. 코일의 기하학적 형상과 작업조건은 이미 알고 있는 경우이므로 코일설계자의 주요 임무는 새로운 기술과 고성능 재료를 사용하는 것이다. 예를 들면 성능향상을 위하여 기존의 코일에 자속집중자를 사용하는 것이다.

2) 형태가 같거나 크기가 제한되는 부품의 열처리용 코일설계

이 부류의 작업이 가장 전형적인 경우이다. 사용 가능한 설비(전원, 기계)에 따라 코일의 형태나 공정변수(주파수, 출력, 코일형식)의 선정에 일정한 제한이 따른다. 이 경우는 코일효율이나 신뢰성보다도 열처리 품질, 비용 줄이기 및 개발시간 단축 등이 더 중요하다.

3) 최신 기술과 공정을 목표로 하는 코일 설계

이 경우는 성능에 맞춘 최적의 코일 형태와 처리품의 흐름, 주파수의 범위를 포함한 공정변수를 선정하고 최적화 하는 등 설계자에게 많은 결정권이 주어지는 경우이다. 경우에 따라서는 부품 제조 기술의 규격도 변경할 수 있다. 개발에는 많은 노력이 필요하나 경제적인 결과는 가장 양호할 수가 있다. 설계자는 자본비용과 운전비용을 포함하여 여러 경우의 물리적, 기술적이며 경제적인 분석을 하여 가열 코일을 설계하여야만 한다.

간혹 전기효율이 우수한 코일을 사용한다고 해도 설비와 공정에 관련된 전체적인 효율은 전기효율이 나쁜 코일을 사용하는 경우보다 낮을 수도 있다. 따라서 코일의 최적설계는 설비 전체를 대상으로 한 최적화의 일부이며, 특정 조건에 맞춘 제한적인 공정으로 취급하지 않으면 아니 된다는 것을 의미한다. 이처럼 복수의 기준에 관련된 문제를 수식화하는 것은 아주 어렵기 때문에, 코일설계에 관한 보편적인 알고리즘은 존재하지 않는다. 때로

는 만족할만한 대책이 간단하게 보일 수도 있고, 반대로 철저하게 수많은 가정으로 많은 부분을 검토해야 할 필요도 있다.

2.2 코일 설계 순서

유도 코일의 개발은 다음과 같은 단계를 거친다.

제 1단계는 공정에 대한 요구조건의 철저한 분석이다. 가령 유도가열 기술의 특징을 파악하지 않고 초기 켈칭조건을 결정하여 버리면, 물리적 법칙이나 전력밀도에 관한 기술적인 한계나 그와 관련된 물성 때문에 발생하는 제약조건으로 요구사항을 실현하지 못하는 경우도 있다. 자속의 연속법칙($\text{div } B = 0$, 단 B 는 자속밀도 벡터)과 전류의 연속법칙($\text{div } J = 0$, J 는 전류밀도 벡터)은 유도 가열 적용에서 가장 귀찮고 힘든 법칙이다. 이 법칙에 따르면 상대적으로 위치이동이 없는 코일에서는 피가열물 표면의 한 점을 가열하는 데는 주변에서 집중적인 냉각으로 온도 영역을 제어하는 부가적인 수단을 강구할 필요가 있다. 정해진 부위에 유도된 와전류는 피가열물 표면층의 어딘가에 흘러 가야만 하므로 이 <전류가 되돌아 흘러가는 부분>도 가열되는 결과가 되기 때문이다.

그 한 예로서 그림 1에 나타난 팬케이크형 코일(평면 가열용 말이형 코일)에 의한 원판 표면의

유도가열을 들 수 있다. 줄(Joule)열은 원판의 중심부에서는 항상 영(0)이기 때문에 그 부분은 열화산만으로 가열된다. 그러나 자속집중자를 사용하면 완전하게 없앨 수는 없어도 그림 1에서 처럼 가열이 불충분한 중앙부의 크기를 꽤 줄일 수 있다.

때로는 열처리 요구조건을 다소 변경하는 것만으로 코일 설계가 극단으로 단순하게 되기도 하고, 반대로 복잡해질 수도 있다. 따라서 유도 가열의 특성을 잘 이해한 뒤에 요구조건에 맞는 타당한 방안을 찾아내지 않으면 아니 된다. 경화패턴, 결과의 허용범위, 부품의 취급방법, 기계가공과 열처리 순서 등을 포함하여 공정을 상세하게 검토하여야만 된다.

제 2단계는 가열방법과 코일 형식의 선정이다. 코일 형식을 바꾸어도 대부분의 경우 요구조건을 만족할 수 있다. 예컨대 직경이 다른 비교적 짧은 샤프트는 이동가열, 일발 켈칭 또는 고정가열에서도 그에 대응한 코일 설계를 하여 표면 켈칭을 할 수가 있다. 각 방법에는 장점과 단점이 있다. single shot style coil에서는 자연전류밀도가 집중하여 전력밀도를 높이는 것이며, 그림 2처럼 코너 부위를 비교적 간단하게 가열할 수가 있다. 전력밀도는 부품의 중심부로 열이 이동하는 뿌리부에서 최대가 되고, 균열화가 어려운 코너부위에서 최소가 된다. 자속제어를 이용하거

그림 1. 팬케이크형 코일에 의한 원판의 유도 가열. 위-집중자를 붙인 코일, 아래-코일만인 경우.

(Induction heating of a disc by a pancake coil. Above - a coil with a concentrator, below - bare coil)

그림 2. 시스템 구성과 가열 패턴. 주파수 20kHz에서 single shot 코일에 의한 가열.

(System layout and heat sources pattern. Heating with a single-shot style coil, Frequency-20 kHz)

나 피가열물과 코일의 간격을 바꾸거나 아니면 코일 소재의 폭을 바꾸어서 가열패턴의 보강하는 제어를 하면 직경이 바뀌는 부위에서도 원하는 경화패턴을 얻을 수가 있다.

그러나 이동 또는 고정코일(static style coil)에서의 가열은 상당히 어렵다. 그림 3에서처럼 가장 에너지를 필요로 하지 않는 코너부위가 전력밀도가 가장 크고, 에너지 많이 필요한 오목한 부분에서는 오히려 전력이 부족하다. 그러므로 허용 가능한 결과를 얻기 위해서는 특수한 코일 형상을 사용하여 간격을 최대한 바꾸는 등의 배려를 할 필요가 있다. 따라서 부품처리의 자동화에는 single shot 형식의 코일이 훨씬 더 적합하다. 그러나 이런 코일에서는 코일 소재가 덮은 부위가 가열표면의 극히 일부인 까닭에 부하가 많이 걸리게 되며, 때문에 강제의 과열이나 코일의 조기 파손이 발생하기 쉽다. 이를 방지하기 위한 고려가 설계에 반영되어야 한다.

코일 설계자가 제 1, 2단계를 이해하기 위해서는 유도가열, 금속재료(상변태 및 조직) 및 재료가공에 관한 경험이 있어야 한다. 이 단계에서 코일 형식, 주파수, 출력 및 생산성을 바르게 선택하기 위해 일정한 계산이 필요하다. 그러나 이를 식으로 만들어 수학적으로 해결하기는 무척 어렵다. 그러므로 자속제어를 응용함으로써 가열 패턴의 제어

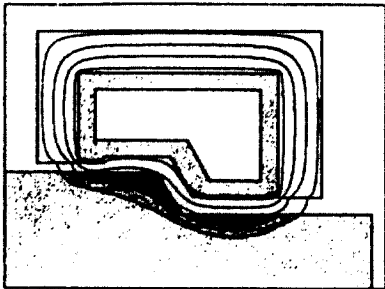


그림 3. 자기장 선과 가열패턴. 주파수 20kHz에서 static style 코일에 의한 가열. (Magnetic field lines and heat sources pattern. Heating with a static style coil, Frequency-20 kHz)

나 코일 성능을 개선시키는 대책이 필요하게 된다.¹⁾²⁾

제 3단계는 코일의 크기와 동작조건을 결정하는 일이다. 이 단계의 목적은 제품의 품질과 효율을 높이고 코일 설계와 동작조건(주파수, 전력밀도, 가열시간 또는 이동속도 등)을 최적 조합으로 맞추는 일이다. 코일 형태의 최적화는 매우 복잡한 문제이다. 코일은 효율이 높고, 적절한 가열 성능을 갖추고 있어야 함은 물론이거니와, 강도가 커서 신뢰성도 높아야만 한다. 강도를 확보하기 위해서 대다수 설계자는 예컨대 직경 방향으로 크기가 큰, 이동 퀘칭용 범용 코일(multiple integral quench, MIQ 코일)을 제작한다. 그러나 이런 코일은 피가열물에 전달되는 전력을 거의 사용하지 못하고, 공급 전력 회로의 손실이 크기 때문에 전류수요가 증대하여 효율이 떨어진다. 이를 해결하기 위해서 피가열물의 필요 부분에만 전력을 집중시키는 자속제어가 이용될 수 있다.

이러한 작업에는 컴퓨터 시뮬레이션이 아주 효과적이다. 통상 열처리 공정과 부품의 형상이 아주 다양하기 때문에 하나의 범용 프로그램이 다양한 요구를 만족시키기는 어렵다. 3차원 자속분포를 연결하는(전자기와 열) 3차원 프로그램이 이 작업의 가장 일반적이며 적절한 수법으로 생각된다. 그러나 코일 설계의 실용적인 면으로 보아 경비도 절약되는 단순한 1차원 또는 2차원 연결 또는 전자(電磁)프로그램도 활용할 수 있다. QuickField™ 프로그램(磁場解析 프로그램)을 이용한 2차원 컴퓨터 시뮬레이션에 관해서 설명한다.

이 단계의 코일 설계에서는 코일의 제조기술만이 아니라 유도가열 이론과 컴퓨터 시뮬레이션 지식 및 사용 경험이 필요하다. 이 과정에서 얻을 수 있는 사실은 코일 제조의 입력자료(구리 소재의 이론적 형상, 자속제어 소재의 종류와 형상 등)와 공정 변수(사이클 시간, 출력, 코일 전류, 전압, 효율, 힘율)이다.

제 4단계는 구체적인 코일 제조이다. 최종적인 코일 설계와 코일에 에너지를 공급하는 구성부품.

이동권칭 코일용 냉각액 공급부 등이 포함된다. 이 과정에서 요구되는 코일 제조기술은 재료의 선택, 기계가공, 연결작업, 전기 및 열의 절연처리 등이다. 보통 이 단계는 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하지 않고, 기존의 기술과 경험을 사용하지만 컴퓨터를 활용하는 것이 더욱 편리하고 유용할 수가 있다. 그림 4에 예를 든 것처럼 시뮬레이션에 의해 여러 냉각조건에서 강제와 자속제어제의 최고 온도 및 코일의 신뢰성을 확인하는 등 중요한 정보를 이로부터 얻을 수가 있기 때문이다.

처리 사이클 도중 강력한 수냉으로 강재의 평균 온도를 높게 유지하지 않는 경우에도 국부적으로는 과열부분이 발생하여 그로 인해 큰 응력을 야기하는 결함이 제품에 축적될 수도 있다. 또 코일 표면에 존재하는 미소균열 때문에 전력의 손실과 응력의 국부적 집중이 증대된다. 이러한 균열이 성장하면 코일은 결국 파손되고 만다. 전기적인 작용력과 가동 중에 발생하는 힘에 의해 코일의 파손은 촉진된다. 그러므로 피가열물과 코일의 구성부품에 미치는 전기적인 힘의 계산도 중요하다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 코일의 가열상황과 코일 단면의 최적화를 도모함으로써 집중적인 국부적 온도상승을 억제할 수가 있다.

이러한 검토가 끝나면 코일의 제조 도면과 제조 조건을 결정한다. 새로운 코일제작에 경비가 많이 든다고 하더라도 코일 성능이 개선되어 사용수명

이 길어지게 되면 코스트 면에서 더욱 유리한 경우가 많다는 사실은 경험이 증명하고 있다. 코일 설계는 이것으로 끝이 나지만 코일과 공정개발은 아직 끝난 것이 아니다.

다음 단계는 코일 제조이다. 이 제조기술과 제어 수준이 코일 설계와 마찬가지로 코일 품질로서 중요하다. 제조기술에서 가장 주목할 부분은 코일의 사용수명이다. 제조단계에서 주요한 기술적 대책이 확립되어야 하지만 제조과정을 수행하다보면 처음 방침을 변경해야할 경우도 있다. 자속제어를 하는 경우에 특히 주의해야하며, 적절한 지식과 경험을 바탕으로 새로운 자기유전재료와 그 기술을 활용할 때에 코일 설계의 혁신적인 발전이 이루어질 수 있을 것이다.

마지막 단계는 코일의 시험이다. 시험은 코일 성능과 열처리 후의 점검(조직과 특성 및 변형 등)이다. 만족할 만한 결과가 아닌 경우에는 코일의 개조나 작은 조정이 필요하며, 경우에 따라서는 이전의 몇 단계 전 사항부터 다시 검토할 필요도 있다. 코일 조정에 효과적인 방법의 하나로는 자속제어 부분의 수정이다. 코일의 형상을 바꾸려면 다시 제작하여야 하지만 자속제어 부분은 시험 중에도 간단히 바꿀 수가 있기 때문이다. 예를 들면 자속제어용 자기유전재료를 제거한 후 형상을 바꾸어 다시 장착하여 시험한다. 목적이 달성되면 그것을 브레이징 용접하거나 고정시켜 영구적으로 사용하도록 하면 된다.

새로운 공정을 위한 유도 코일개발에는 위 방법이 가장효율적이다. 작업이 비교적 단순하고 코일을 만들어 본 경험자는 지금까지의 사용한 설계와 제조방법이 유효하게 이용될 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션은 직접 실험에서 얻기 어려운 많은 정보를 얻을 수 있고, 가열 시스템의 현상과 의존성을 훨씬 명확하게 해 준다. 그렇지만 유도 열처리의 복잡한 시스템과 공정에 관한 깊은 지식이 없으면 문제설정이 불충분하거나 정확도가 떨어지는 경우도 있다. 이것은 주로 재료의 전자(電磁) 특성과 물리적 특성이 부정확하거나 열처리조건의 응

그림 4. 집중자통을 붙인 single-turn 코일의 구성도. 음영은 온도분포와 동온영역.
(Layout of a single-turn coil with concent rator. Gray scalemap of temperature and isotherms)

답성이 확실하지 못하기 때문이다. 앞으로 하드웨어뿐만 아니라 소프트웨어 개발이 진전되어 유도 가열 조건에서의 재료특성과 그 거동에 관한 연구가 진행되면 컴퓨터 시뮬레이션이 유도가열 코일 설계에 창조적이며 신뢰성 높은 수단이 될 것이다.

단순한 경우에는 위 단계 중에서 몇 개는 생략하거나 통합될 수 있으며, 반대로 복잡한 코일을 개발하는 경우에는 새로운 단계가 추가될 수도 있다.

3. 자속제어법을 이용한 유도코일과 공정의 개선

코일을 개량하기 위한 가장 효과적인 방법의 하나는 자속제어이다. 자속제어를 하지 않으면 코일이 충분한 역할을 할 수 없는 경우도 있다. 자속제어는 이용방법에 따라 그 역할이 달라지기 때문에 경우에 따라 집중자(concentrator), 분류기, 코어, 인피터, 산트, 씰(seal) 등 명칭이 각기 다르다. 여러 전자장치의 자장과 전류분포에 미치는 자속 집중자의 영향에 관해서 다수의 문헌이 있으나, 유도가

열 장치에 사용하는 경우에 종합적인 결과를 정리한 것은 거의 찾아보기 어렵다.

자속제어는 다음 역할을 수행한다.²⁾

- ① 코일의 효율을 높인다.
- ② 코일의 힘을 높인다.
- ③ 부품에 열원의 분포를 제어함으로써 가열 패턴을 개선한다.
- ④ 피가열체에 전달되는 전력의 사용효율을 개선시킨다.
- ⑤ 가열하고 싶지 않는 피가열체의 어떤 부분이나 가열장치의 구성부품을 보호한다.
- ⑥ 전원에 대한 코일의 정합성과 공급 전기회로의 효율을 개선시킨다.
- ⑦ 코일에 근접한 외부 전자계를 제거한다.

각 효과가 나타내는 기술적 및 경제적 의미는 구체적인 유도가열 조건에 따라 달라진다. 보통의 경우 전부는 아니더라도 공정에 큰 공헌을 하기 때문에 자속제어를 사용하여 얻을 수 있는 이점을 활용하려는 의지를 가져야 한다.

3.1. 코일 효율

코일 효율은 전기효율에 한정되는 것이 아니라 자속제어를 하면 대부분의 코일 변수가 바뀐다. 코일의 주요 3종류의 정량 변수인 전기효율, 힘율,

표 1. 집중자를 사용할 때 코일의 전기적 인자의 개선. (Improvement of the coil electrical parameters due to application of concentrator.)

코 일 형 식	전기효율	힘 율	소요 전류량
1. 내면 켈칭코일	L	L	XL
2. 평면 코일			
헤어 핀형	M-L	M	M-L
분리/복귀형	M-L	M-L	L
팬케이크형	M	M	M-L
3. 외면 켈칭코일	S	S-M	S-M

S: 소 M: 중 L: 대 XL:극대

그림 5. 동 파이프와 집중자 재료의 손실 및 피가열물로 부터의 열방사를 고려할 때, 그림 4 원 쪽 아래 모서리 부분의 온도 분포. 1은 집중자, 2는 접착제, 3은 동 파이프 단면, 4는 냉각수.

(Temperature distribution in a left lower corner of a system of Fig.4 under the influence of losses in copper tube and concentrator material plus radiation from the hot workpiece.)

소요 전류량은 코일을 전력의 수용체 및 변환기로 나타낸다.

피가열물에 전달되는 전력의 이용과 열처리의 품질, 그리고 코일과 주변매체와의 상호작용은 자속에 따라 달라지며, 전류 패턴과 전력패턴도 자속 제어에 크게 의존된다. 따라서 "자속제어는 유도 코일의 효율을 어느 정도 개선시킬 수 있는가"라는 의문에 대한 대답은 간단하지 않기 때문에 복잡하고 혼란스러운 경우도 있다. 수많은 종류의 코일의 용도와 형식, 동작조건을 검토하기 위해 유도 기술센터(미국 Fluxtrol Mfg.의 Center for Induction Technology)에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 실험 데이터를 사용하여 많은 연구를 하고 있다. 자속제어를 제대로만 하면 항상 공정에 이점이 있다는 결과를 보여주고 있다.

관계적인 전기효율이란 코일의 출력 전력과 입력 전력의 비로써 정의된다. 자속 집중자를 이용하면 효율이 현저히 향상되는 경우도 있으나 비슷하거나 도리어 약간 낮아지는 경우도 있다. 표 1을 보면 내면 켄칭 코일(ID), 평면 코일, 등에서 현저하게 전기효율이 개선되는 것을 알 수 있다.

표면 켄칭에 널리 사용되고 있는 길이가 짧은 single-turn, 또는 multi-turn 외면 켄칭(OD) 코일의 경우도 전기효율은 향상되거나 비슷하거나 저하되는 경우가 있다.

시스템 거동은 코일의 디자인, 부품의 재질 및 형상과 간격거리 및 주파수에 따라 달라진다. 제어와는 무관하게 전류가 같다고 가정하면 자속제어에 의해 코일의 자속이 증가하고, 코일 전압과 피가열물에 전달되는 전류가 증가한다. 그렇지만 코일인 구리 파이프 주위의 전류가 다시 분포하기 때문에 코일의 구리손실과 그에 대응한 감은 선의 저항이 동시에 증가한다.

이 경향은 단면이 한정되어 코일의 내부공간을 자속이 통과해야만 되는 내면 켄칭 코일에서 특히 심하다. 자기저항이 심한 이 구역을 자속이 통과하기 위해서는 코일의 압패어 턴의 주요 부분을 사용하지 않으면 아니된다. 이 [자화전류]는 코일

의 내표면을 흐르는 까닭에 피가열물을 가열하는 데는 아무런 역할을 하지 못한다.

예 1 : 내면 가열 코일

▷ 코일 : 5회 감음(turn), 내경은 24 cm, 외경은 38 cm, 동파이프는 7 x 12 x 0.1 cm이고 길이는 72 cm.

▷ 피가열물 : 큐리 온도 이상의 강, 내경은 44 cm, 외경은 64 cm, 저항은 100 mk Ohm cm,

▷ 집중자 : 자기유전재료 Fluxtrol A, 투자율 $\mu = 60$, 주파수는 10kHz, 코일 전류는 4000A이다.

그림 6은 시스템을 나타낸 것으로, 집중자(코어)를 사용함으로써 자속이 어느 정도 증가하는 가를 자속선으로 표시하였고, 그 결과 발생된 열 강도를 피가열물에 나타내었다. 코일의 머리 부분만의 결과이기 때문에 코일 다리 부분은 영향은 별도로 검토해야 될 것이다.

▷ 분석 결과 : 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 표 2에 나타내었다. Power Coil™(Fluxtrol 자기 유전재료로 만든 집중자를 붙인 코일)을 사용하면 코일 전류의 85 %가 부품의 가열에 사용되고, 그 뒤쪽에는 15 % 만의 자속이 흐르게 되어 효율이 증대된다. 특히 집중자 재질의 투자율이 높으면 그 효과는 더 크다.

집중자 없이 코일만 사용하는 경우에는 피가열

그림 6. 집중자를 붙인(아래) 내면 가열 코일과 붙이지 않은(위) 것의 자기장 선과 가열 패턴.

(Magnetic field lines and heat density pattern for I.D. coil with a concentrator(below) and without (above))

물에 공급되는 에너지는 코일 전류의 경우 29 % 만이고, 71 %는 코일의 뒤쪽을 통과하는 자속에 소비된다. 그 결과 코일 머리부의 전압, 효율, 힘율, 특히 피가열물의 가열효율은 현저히 떨어진다. 그러나 전기효율은 예상한 것보다 떨어지지 않는다. 그 이유는 코일 감은 선의 등가저항(等價抵抗)이 1/26로 낮아지기 때문이다.

동일한 가열효율을 얻기 위해서는 코일만의 경우 전류를 11400A(2.85배)까지 올려야만 된다. 이때(표 2의 bare Coil*)의 입력 전력은 100kW 이상(Power Coil™ 보다 28 % 크다)이며, 걸보기 전력은 350 kVA가 아니라 약 1000kVA가 된다. 이처럼 걸보기 전력이 높아지는 것이 코일만 사용하는 것의 결점이다. 다시 말하면 피가열물 전력이 같다면 집중자를 붙인 코일의 소요 전류량이 훨씬 작아지게 된다.

3.2 고주파 전기 공급 회로의 효율 개선

코일에 소요되는 전류량을 작게 하면, 모든 공급회로와 정합변압기의 감는 수, 부스 바 및 케이블 손실량을 줄일 수 있다.^{2), 4)} 이러한 모든 손실량은 전류의 자속에 비례한다. 위 예에서 소요 전류량이 2.85배 떨어지면, 손실량은 1/8로 줄어든다. 피가열물의 전력이 일정하면 집중자(concentrator)는 코일의 전압을 크게 바꾸지 않으며, 변압기 자기회로 손실량도 거의 비슷하다. 정합변압기의 주요 손실 부분은 동(구리)에서 일어나며, 변압기 효율은 비교적 작은 까닭에 코일의 힘율도 낮다. 그러므로 코일에 소요 전류량을 낮추는 것은 전기공급회로에 현저한 에너지 절감으로 연결되는 것이므로 동

일한 용도에서 더 작은 용량의 변압기를 선정할 수가 있다. 탱크 콘덴서의 무효 전력치와 그 손실량은 코일의 걸보기 전력에 비례한다.(위 예에서는 1/2.85 로 저하)

최근의 주파수 변환기의 효율은 대단히 높아서(가열 시스템 제외하고 85-93%), 집중자 적용으로 인한 손실량 줄이기는 다른 구성부품 만큼 크지는 않다. 그러나 코일에 집중자를 붙임으로 해서 변환기의 정격 전력은 크게 내려간다.

3.3 피가열물에 전달되는 전력 이용율의 개선

의면 퀘칭용 코일의 전기효율은 집중자를 사용하여도 큰 차이는 발생하지 않는다. 그러나 고정 및 이동퀘칭 또는 접합을 위한 가열의 경우 집중

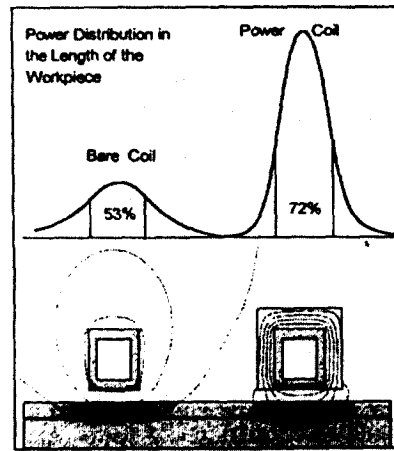


그림 7. 예 2의 유도가열 시스템(아래)과 그때의 전력 분포(위).

(Induction system of example 2 (below) and corresponding power distribution (above))

표 2. 내면 가열 코일의 변수. (**은 자속집중자를 사용했을 때와 동일한 전력을 받는 경우).

(Parameter of I.D. coils, ** : bare coil with the same workpiece power as the Power Coil™)

	코일전압	피가열물전력	코일손실	코일효율	환 율	걸보기전력
Power Coil	86.6	68.0	10.4	87	0.22	354
Bare Coil	30.6	8.4	4.0	68	0.10	122
Bare Coil**	87.0	68.0	32.4	68	0.10	992

자의 적용은 생산성을 50% 정도 향상시킨다. 같은 생산성으로 비교하자면 소요 전력을 크게 절감시킨다는 사실이 경험으로 알려져 있다. 이것은 피가열물에 전달되는 전력 사용율과 전기공급회로의 효율 개선으로 설명될 수 있다. 일반적으로 전력사용율은 용도와 시스템에 의존하는 인자가 너무 많기 때문에 일반적인 분석이 어려우나 출력이 집중되는 것의 의한 가장 큰 이점은 퀘칭, 브레이징, 굽힘, 접합과 같은 고정식 부분 가열 공정에서 얻어진다. 그림 7에 나타낸 것처럼 원통형으로 코일만인 것과 집중자를 붙인 것을 비교하면 집중자를 붙이면 얼마나 유도 가열장치의 효율이 높아지는가를 알 수 있는 좋은 예이다.

예 2 : 외면 가열용 코일

- ▷ 코일 내경 : 46 cm
- ▷ 동 파이프 : 1.5 x 2.0 x 0.24 cm
- ▷ 유도 코일 중심간 간격 : 45 cm
- ▷ 피가열물 : 길이는 10 cm, 외경 40 cm, 내경 3.1 cm, 투자율 $\mu = 1$, 저항 100 mk Ohm cm, O.D. 3.1 cm, I.D. 1.0 cm
- ▷ 집중자 : 자기유전재료 Fluxtrol A, 투자율 60, 두께 0.64 cm, 주파수 3000H코일, 코일 전류 : $\pm 7000A$ 이 장치는 표면이 큐리온도 이상이고, 중심부는 자성을 가지고 있는 상태에서 표면 퀘칭의 전형적인 예이다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과에서는 이 형상에서 집중자를 사용하면 관계적으로 정의되는 전기효율은 83%에서 80%로 떨어지고, 힘

율은 0.46에서 0.51로 증가한다는 것을 보여주고 있다. 이 경우 집중자의 적용은 그다지 개선효과가 없다. 그러나 고정 퀘칭과 같은 부분 가열의 경우에는 상황은 전혀 반편이 된다.

▷ 분석결과 : 전류가 같은 경우에는 집중자를 이용한 경우가 1.85배의 큰 전력을 피가열물에 전달한다. 그러나 코일의 손실률은 2.25배 크게 되어 전기효율은 코일만을 이용하는 경우보다 약간 작게 된다. 피가열물 전력의 72%가 코일 아랫부분에 집중됨으로 코일만을 사용한 경우의 53%보다 크다는 것은 중요한 결과이다. 동일한 가열효율을 발생시키기 위해서 코일만을 사용하는 경우에는 +30%의 유효전력, 즉 겉보기로 +44%의 전력과 +58%의 전류를 소비하지 않으면 아니 된다. 코일만의 헤드 전압은 같은 코일의 합계전압보다도 9% 낮다. 소요전력이 증가하는데 따라 코일의 다리 부위, 변압기 및 부스바의 손실률이 2.5배 증가한다. 직선모양이나 헤어핀 모양 등 편편한 형상을 가진 코일이나 반경의 크기가 큰 코일에서는 소요전력량과 겉보기 전력의 저하가 더욱 크게 되는 수가 있다. 예 2에서 계산한 크기의 직선상의 코일에 집중자를 적용하면 소요 전류량은 약 1/2로 된다. 변환기의 전력이 일정한 경우(그림 8에서는 100 kW)에 집중자를 사용하면 유효 전력이 50%증가하므로 이에 따라 생산성도 증가한다. 이로써 자속 집중자를 사용하면 효율이 증대된다는 이론적 근거가 이해될 것으로 믿는다.

표 3. 외면 가열 코일의 변수. (**은 자속집중자를 사용했을 때와 동일한 전력을 받는 경우).
(Parameter of O.D. coil, ** : bare coil with the same workpiece power under the coil face as the Power Coil™)

	U _c (V)	P _w (kW)	P _c (kW)	P _{wc} (kW)	P _i (kW)	E _a (%)	S (kVA)
Power Coil	10.4	68.0	10.4	87	0.22	354	354
Bare Coil	6.0	8.4	4.0	68	0.10	122	122
Bare Coil**	9.5	68.0	32.4	68	0.10	992	992

U_c : 코일 머리부 전압, P_w : 피가열물에 전달되는 합계 전력, P_c : 코일 머리부의 전력손실량, P_{wc} : 코일면 아래 피가열물의 전력, P_i : 코일 입력 전력, E_a : 코일 머리부 전기효율, S : 코일의 겉보기 전력.

3.4 자계, 전력 및 가열 패턴의 제어

표면 퀘칭의 경우에는 가열패턴의 제어와 공정의 재현성 및 코일의 신뢰성이 에너지 절감보다 훨씬 중요하다. 동속조인트의 컵이나 베어링 궤도면과 같은 복잡한 기하학적 형상을 가진 많은 부품에서는 자속 집중자를 사용하지 않으면 원하는 경화패턴이 불가능한 경우도 있다.

코일 또는 코일의 부품이 직렬로 접속되어 있는 경우에는 집중자는 자속을 현저하게 증대시켜 대상이 되는 부분에 전력을 증가시킨다. 그림 7은 이러한 출력증가의 좋은 예이다. 코일의 전력밀도는 원통형의 경우에는 2.6배, 편편한 경우에는 3.6배까지 상승한다. 전류회로를 병렬로 한 코일에 집중자를 사용하면 단면 내에서 전류가 재 분포하게 되어 온도분포를 효과적으로 제어할 수가 있게 된다.

또한 자성재료를 적절하게 사용함으로써 장치의 구성부품 중에서 원하지 않는 부분의 가열을 피할 수가 있다. 그림 7에서 보면 집중자를 사용한 경우 발생하는 자계가 강해도 주위에도 퍼지는 것을 방지할 수 있으나, 코일만을 사용한 경우에는 멀리

퍼지는 것을 알 수 있다. 자속 차폐를 사용하면 인접 장치의 구성부품에 불필요한 가열을 방지하고, 생산라인의 좁은 공간에 손쉽게 유도 코일을 채용할 수 있다. 또한 피가열물의 원하지 않는 부분에도 자속 차폐를 이용하여 가열되지 않도록 보호할 수 있다.⁹⁾

균일한 가열 패턴을 얻기 위해서 코일은 복잡한 형상을 하고 있다. 이 경우에도 자속 집중자는 코일 가열패턴의 개선과 코일의 전기적 인자(효율, 힘율, 소요 전류량)를 개선시키며, 프랜지 부분의 가열을 차단시킴으로써 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그 한 예로서 그림 9의 자성재료를 사용한 경우와 그림 10의 사용하지 않는 경우를 비교해 보면 잘 알 수 있다.

3.5 자속제어용 재료

대부분의 경우 유도 가열용으로 사용되는 자기재료에 대한 요구사항은 아주 엄격하다.¹⁰⁾ 이러한 재료는 아주 넓은 주파수 영역에서 기능을 발휘해야 하고, 투자율과 포화자속 밀도가 높아야 하며, 기계적 특성이 안정되어야 하고, 제어하는 자신의 자기손실과 피가열물에서 전달되는 온도 저항력이 커야하는 특징을 갖추어야 한다. 열처리나 브레이징에서는 뜨거운 물과 퀘칭액, 용제 등에 견

그림 8. 집중자를 붙인(오른쪽) 경우와 붙이지 않은 경우(왼쪽), 외면 가열 코일의 전력 분배.

(Power balance for O.D. coils with a concentrator (right) and without (left))

그림 9. 자속집중자를 사용할 때의 자기장 선과 전력 밀도분포.

(Magnetic field lines and power sources density map produced by Power Coil™)

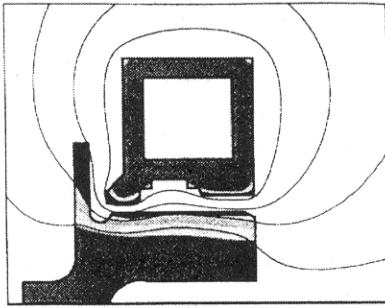


그림 10. 자속집중자를 사용하지 않을 때의 자기장 선과 전력 밀도분포.
(Magnetic field lines and power sources density map produced by bare coil)

달만한 재료이어야 한다. 자속제어 이용을 성공하기 위해서는 기계가공성도 또한 우수해야 한다. 즉 가공성이 좋아야 아주 복잡한 모양도 쉽게 만들 수 있으므로 성과를 올릴 수 있게 된다. 자속집중 또는 자속제어에는 세 종류의 적층판, 페라이트와 자기유전재료가 사용될 수 있다.

규소강판을 이용한 적층판은 저/중주파 코일과 전기설비의 구성부품으로 오래 전부터 사용되어 왔다. 주로 10kHz 이하의 주파수 영역에 사용되나, 자속밀도가 낮거나 강한 냉매를 활용하면 50kHz까지도 사용할 수 있다. 적층판은 투자율이 높고, 포화자속밀도가 높다. 그러나 주파수가 제한되고, 손실량이 크며, 특히 복잡한 형상을 만들기 어렵기 때문에, 3차원 형상에 적용하기 어려운 것이 결점이다. 반면 페라이트는 약한 자장에서는 투자율이 높아 손실량이 작기 때문에 적절하게 선정하여 사용하면 아주 넓은 주파수 영역에서 사용할 수 있다. 그러나 포화자속밀도와 큐리온도가 비교적 낮고, 열충격과 기계적 충격에 약하며, 다이아몬드 공구를 사용하지 않으면 연마나 절단과 같은 기계가공이 불가능한 결점이 있기 때문에 자속 집중자로서의 사용에는 한계가 있다. 한편 자기유전재료(MDM)는 결합제, 절연체로서 사용하는 연자성(軟磁性)입자와 유전체재료로 만든다.^{1, 3, 6)}

현재 4종류의 Fluxtrol™(Fluxtrol사 제품)와 2종

류의 Fluxtron™(Fluxtron사 제품)이 세계 유도가열 시장에서 자기유전재료 수요의 거의 전부를 담당하고 있다. 이 재료는 자성입자와 결합제를 프레스한 후, 특수 열처리하여 생산된다. Fluxtrol A는 저주파용으로, 최대 500 kHz까지 사용되며, 초기투자율 65, 최대투자율 120, 포화자속밀도 $B_s=1.5T$ 이다.

Fluxtrol B는 초기투자율 25이고, 포화자속밀도는 $B_s=1.1T$ 이며 30 kHz - 200 kHz용이지만, 실용적으로는 10kHz - 450 kHz까지 폭 넓게 효과적으로 사용될 수 있다. 고주파용인 Fluxtrol F는 초기투자율 13, $B_s=1.0T$ 이며 5 MHz까지 사용이 가능하다. Fluxtrol C는 유도 가열용의 어떤 주파수 예를 들면 13 MHz에서도 효과를 발휘한다. 투자율은 18 - 20이고 B_s 는 0.3T이다. 이들 재료는 모두 기계가공성이 우수하며 내열성도 300°C까지 견디므로 퀘칭액이나 용제와 전혀 반응하지 않는다.

기계 가공한 집중자는 동 파이프에 연결 브레이징하든가, 코일에 기계적으로 고정시키던가 아니면 접착시킨다. 도전성(導電性) 접착제는 제어부품에서 열을 제거할 수 있으므로 유리하다. multi-turn 코일인 경우 집중자는 통상 코일과는 절연되어야 하며, 필요하면 그것만 단독으로 냉각시킬 수도 있다.

참고문헌

1. R. S. Ruffini : Industrial Heating, Nov.(1994) 41-45
2. R. S. Ruffini, R. T. Ruffini and V. S. Nemkov : Int. Congress on "Electromagnetic Processing of Materials", Paris, France, May(1997) 26-29
3. V. S. Nemkov and R. S. Ruffini : Industrial Heating, Nov.(1996) 34-39
4. R. S. Ruffini : Industrial Heating, Sept.(1995) 67-71
5. V. Rudnev, R. Cook and D. Loveless : MAN, Nov.(1995) 10-14
6. V. S. Nemkov and R. S. Ruffini : 8th Int. Congress on Electricity Application, Birmingham, UK, 16-20, June(1996)