유도가열 히팅롤 기술의 개발동향 및 응용

전 우 진* · 장 석 명**

(*(주)동원롤 R&D, **충남대 전기공학과)

1. 서 론

1831년에 발견된 파라데이법칙을 응용하는 전자기 유도가열 히팅롤은 섬유공업, 특수 칼라인쇄 등에 필수적으로 사용되는 장비이다. 그러나 아직은 국내외적으로 개발의 정도가 낮은 단계이나 산업분야에서의 특수 한 수요로 부가가치가 큰 기술분야이다. 그래서 국내의 개발제품을 중심으로 국내외 기술현황과, 기본원리, 설계, 제작공정, 응용사례에 관하여 소개하므로써 전기공학도들의 연구개발의 계기를 제공하고자 한다.

2. 유도발열 히팅롤

2.1 국내외 기술현황과 특징

히팅롤(Heating Roll)은 카렌더기(Calerder)의 품질을 좌우하는 핵심요소의 하나로서, 당사의 롤부문 생산량의 약 20%를 차지하고 있다. 카렌더기에 사용되는 히팅방식에는 전열식(電熱式), 열매순환식(熱媒循環式), 유도발열식(誘導發熱式), 초음파마찰식(超音波摩擦式) 등이 있다. 그중에서도 유도발열식은, 전열식에 비해 제작단가가 높고 열매순환식(오일, 스팀, 가스)에 비해 온도분포의 안정성에는 뒤떨어지나 예열시간이 빠른 관계로, 당사에서는 1991년부터 개발에 착수하여 매년 생산량을 조금씩 늘려오고 있다.

현재 국내외에는 십여 개의 유도발열롤의 생산업체가 난립하고 있으나, 이들 대부분이 비교적 기술적인 요구가 낮은 폭 1,000mm 미만의 소형롤에 집중되어 있다. 특히, 소형롤 분야에서는 대만과 중국업체가 가격면에서 강점을 갖고 있어서, 당사는 개발초기부터 상대적으로 부가가치가 높은 대형롤을 중심으로 투자를 하여왔다. 유도발열롤의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

1) 예열시간의 단축 및 에너지효율의 증가
2) 넓은 온도설정 범위와 온도분포의 균일성
3) 조작 및 유지보수의 편리성

3.2 원리와 구조

유도발열롤은 유도코일의 인가전류에 의해 발생한 자속(磁束)이 인접한 2차도체에 와전류(渦電流)를 유기(誘起)시킴으로서, 와전류와 도체의 전기저항에 의하여 열에너지가 발생된다. 즉, 솔레노이드 형상의 유도코일을 갖는 내부철심과 괴상(塊狀) 외부도체의 경계부에 공극(空隙)이 존재하기 때문에, 유도전동기(誘導電動機)와 유사한 구조를 갖는다. 또한, 도체의 내부에서 발생된 열을 고온부(高溫部)에서 저온부(低溫部)로 이동시킴으로서, 롤표면에 균일한 온도분포를 유지한다. 유도발열롤의 구조 및 외관은 그림 1, 그림 2와 같다.

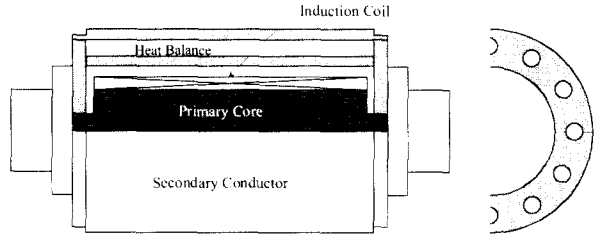

그림 1. 유도발열롤의 구조.

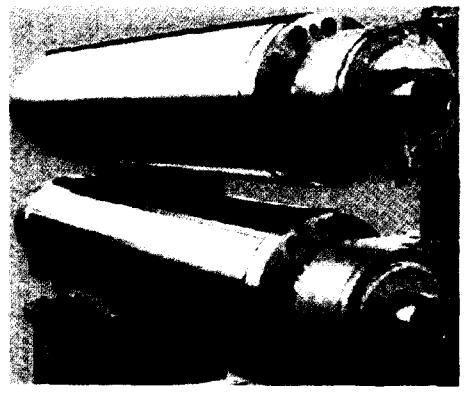

그림 2. 유도발열롤의 외관.

3.3 설계

유도코일의 사양 및 권선수는 외부도체의 단면적과 발열부위의 길이, 그리고 필요 자속량에 의하여 결정된다. 표 1은 외부도체로서 철(S45C)를 사용할 경우의, 도체의 단면적과 사용주파수와의 관계를 나타낸 것이다. 하기의 표로부터 대형롤에는 저주파인 상용전원의 채택이 유리함을 알수있다.

표 1. 주파수의 선택

주파수 [Hz]	50	1K	3K	6K	10K
면적 [cm^2]	314	25.5	9.6	4.15	2.54

※ (주)보성고주파설비 제공

유도발열롤의 설계 및 평가수법으로 전자장수치해석(電磁場數値解析)의 일종인 유한요소법(有限要素法, FEM)을 채용함으로서, 기기의 성능향상을 도모하게 된다. 본 해석의 목적은 내부철심의 포화방지, 외부철심의 형상 최적화, 그리고 용량에 맞는 적절한 인가전원의 공급 등이다. 특히, 자속이 내부철심에서 외부철심으로 전달되는 경계면의 공극부(空隙部)에서의 안정된 자로(磁路)의 형성에 초점을 맞추어, 기기 설계의 최적화를 시도하고 있다.

유도발열롤은 구조상 3차원해석이 바람직하나, 컴퓨터의 용량 및 계산시간의 한계로인해 롤 전체의 해석에는 무리가 있다. 당사에서는 유도발열롤의 회전대칭성에 착목하여 원주좌표계(圓柱座標系)를 이용한 2차원해석을 도입함으로서, 비교적 높은 정도(精度)의 결과를 산출하고 있다. 또한, 철심간(鐵心間)의 공극부와 같이 복잡한 자속의 변화가 야기되는 부분에는 3차원해석을 채택함으로서, 2차원해석결과의 보정(補正)을 시도하고 있다. 원주좌표계의 지배방정식 및 해석모델은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\nu_z}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_r\frac{A_\theta}{\partial z}\right)=-J_{0\theta}+\sigma\left(\frac{A_\theta}{\partial t}+grad\,\phi\right)$$

상기의 식에서, z은 축방향, r은 원주의 바깥방향, 그리고 θ는 좌표축방향을 의미하며, 그림4는 자력분포의 해석예(解析例)이고, 그림 3은 해석을 위한 모델이다.

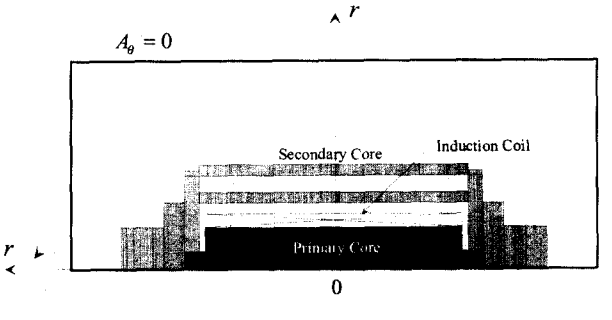

그림 3. 해석모델.

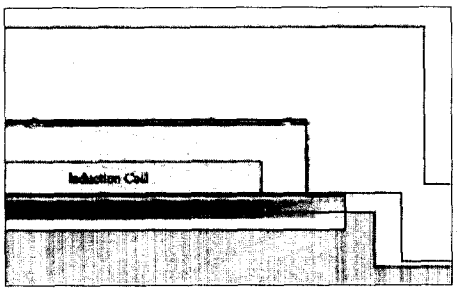

그림 4. 공극부의 자력분포(解析例).

3.4 제작공정

3.3절에서의 전자장수치해석 결과를 토대로, 유도발열롤의 제작은 크게 내부철심, 외부철심, 공극부, 제어판의 4부분으로 나누어진다. 각 부분의 제작에 따른 기술적인 요구사항을 간단히 설명하면 다음과 같다.

1) 내부철심과 유도코일

내부철심은 외부철심에 비해 단면적이 작아서, 자속의 포화로 인한 발열량을 억제하기 위한 재료의 선택과 철심구조의 최적화가 강구되어야 한다. 내부철심구조의 최적설계는 3차원의 유한요소해석에 의하여 산출이 가능하다. 또한, 유도코일을 장시간 고온의 밀폐된 공간에서 여자(勵磁)할 경우의 절연파괴(絶緣破壞)를 방지할수 있는 절연기술과 대형롤에 사용되는 코일의 하중과 변형을 고려한 재료의 선택이 뒤따라야 한다.

2) 외부철심과 온도균형

철심 표면에서의 온도편차를 없애기 위해서는 정도(精度) 높은 철심제작 기술과 지속적인 열의 이동 및 분산이 필요하다. 그래서 외부철심의 가공시 「절삭(切削) ⇒ 연마(硏磨) ⇒ 초경면 가공(超鏡面加工)」의 절차를 거치고 있으며, 온도편차를 줄이기 위해 열매의 순환식과 주입식을 병행하고 있다. 특히, 초경면 가공을 통해 롤표면에 일정량의 조도(照度)를 유지해 주어야 한다. 그림 5는 당사의 외부철심의 연마와 초경면 가공 공정이다.

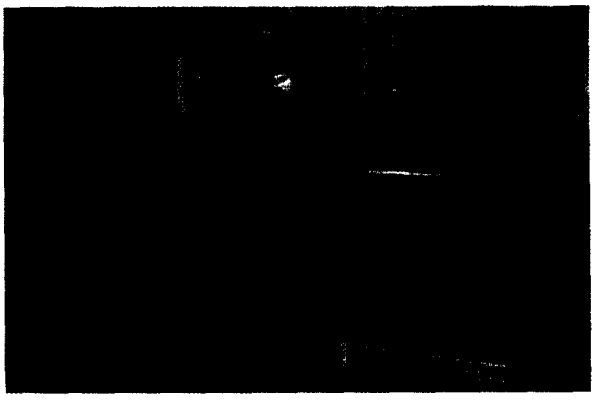

그림 5. 외부철심의 연마공정.

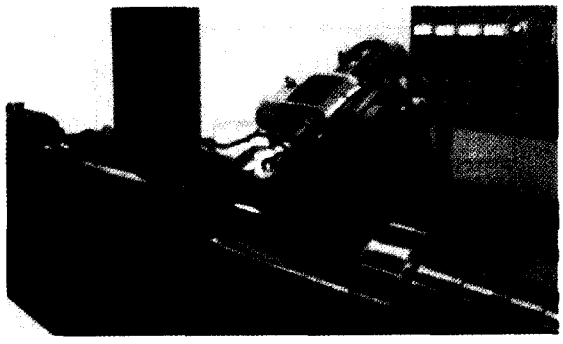

그림 6. 외부철심의 초경면가공.

3) 공극부의 자로(磁路)설계

내부철심과 외부철심간의 자로(磁路)의 역할을 하는 공극부의 설계는 유도발열롤의 성능 및 에너지효율과 직결되는 중요한 기술이다. 따라서 유한요소법에 의한 해석결과와 시작기(試作機)를 이용한 검증을 통하여, 기기의 성능향상을 도모하고 있다. 하기의 그림 7은 당사의 히팅롤의 실험기이다.

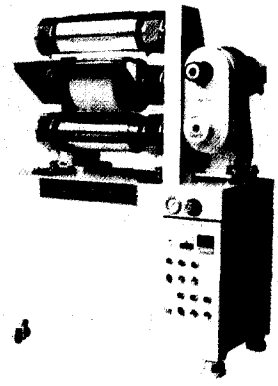

그림 7. 유도발열용 실험기.

4) 단상(單相) 및 3상(三相) 전원제어판

일정온도를 유지하기 위해 ON-OFF방식과 PID제어방식을 채용하고 있다. 또한, 대용량의 전원을 사용할 경우는 전원의 불균형을 방지하기 위해 유도코일에 3상권선을 사용한다. 이 경우, 각 권선간에는 여자전류(勵磁電流)의 불균형이 발생하므로, 전원측에서 이상기(移相器) 등을 사용하여 부족한 기자력(起磁力)을 보상해 주어야 한다. 그림 8은 무게 1.6[ton], 길이 2,000[mm]의 외부철심을 180℃로 발열시킬 경우의 온도 및 전기용량의 시간특성을 나타낸 일례(一例)이다.

3.5 응용 사례

유도발열롤은 제지, 섬유, 부직포,수지(樹脂), 필름, 금속박(金屬箔) 등 넓은 분야에서 다양한 용도로 이용되고 있다. 당사의 유도발열롤은 주로 예열용, 카렌더용, 라미네이트용 등으로 사용되고 있으며, 설치된 기계는 그림 9, 그림 10과 같다.

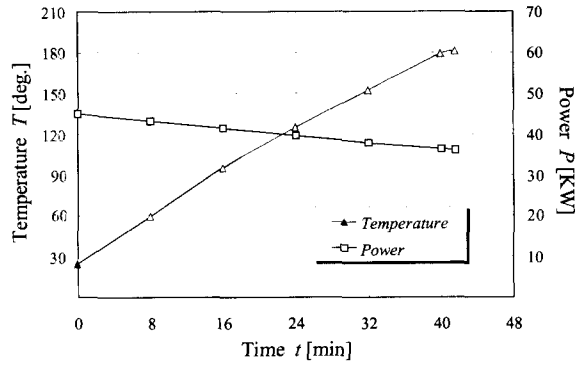

그림 8. 온도 및 전기용량의 시간특성.

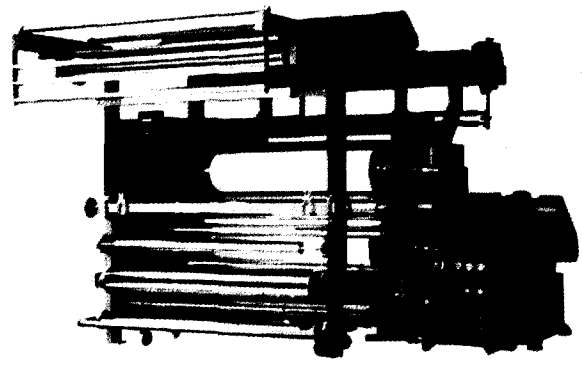

그림 9. 섬유용 카렌더기.

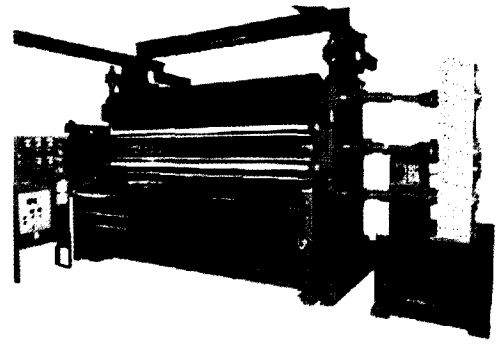

그림 10. 부직포용 라미네이트기.

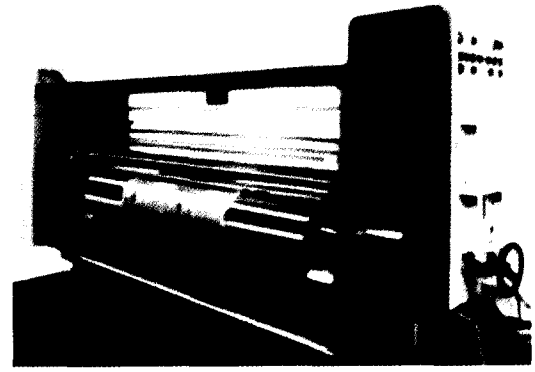

그림 11. 인쇄용 필름 라미네이트기.

4. 결 론

섬유공업, 칼라인쇄 공정에서 없어서는 않되는 유도가열 히팅롤의 국내외 현황과 특징, 원리와 구조, 설계, 제작공정, 응용사례등에 관하여 현장의 제품중심으로 소개하였다. 이를 바탕으로 전기공학도들에게 깊은 관심을 불러 일으켜 이 분야의 기술발전을 할 수 있는 계기가 되었으면 하는 바램이다.

참고문헌

[1] リニア電磁驅動裝置解析の現狀, 日本電氣學會技術報告, 第797號, pp. 27-30, 2000.

[2] 電磁界解析手法技術と最適化手法の高度化, .日本電氣學會技術報告, 第759號, pp. 49-51, 1999.

[3] 竹內壽太郎, 電機設計學, オーム社, 1995.

저 자 소 개

전 우 진 (田 宇 鎭)

1967년 3월 3일 생. 1991년 2월 건국대 전기공학과 졸업. 1998년 3월 와세다대학 전기공학과 대학원 졸업(공박). 1998년 4월~2000년 3월 동 대학 교원(전임). 현재, (주)동원룰 R&D실장, 와세다대학 이공학총합연구센터 객원연구원, 건국대 전력전자신기술연구소 위촉연구원. 관심분야: 전자장수치해석, 특수전동기, 유도가열, 초음파기기, 복합재료 등.

장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일생. 1976년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 1978년 2월 한양대학교 대학원 석사과정 졸업. 1986년 2월 한양대학교 대학원 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. 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 부회장.