

부유대역 결정정제를 위한 고주파유도로의 효율에 관한 연구

고 승 국 · 한 성 홍

물 리 학 과

(1983. 4. 27 접수)

〈요 약〉

부유대역방법에 의한 결정정제를 위해서 4MHz 고주파유도로의 발전회로의 가열코일의 효율을 조사하였다. 발전회로의 쿨턴은 냉각수의 온도상승을 이용하여 측정된 결과 시료로 전달할 수 있는 효율은 60% 정도이고 최대출력은 5kW였다. 또 가열코일의 모형실험에서는 solenoid 형태가 spiral 형태보다 열집중성이 좋은 것으로 나타났다.

Study on the Efficiency of the Radio-Frequency Induction Furnace for Refining the Crystal by Floating Zone Method

Seung Kook Ko · Sung Hong Hahn

Dept. of Physics

(Received April 27, 1983)

〈Abstract〉

The efficiencies of the oscillating circuit and the work coil in the 4MHz radio-frequency induction furnace are investigated for refining the crystal by the floating zone method. Maximum output transferred to sample is 5kW and efficiency is measured about 60% with the calorimetry of the coolant in oscillating circuit. It is concluded that the solenoid type is preferable to the spiral type in the experiment of energy concentration.

I. 서 론

유도가열 장치에 대한 연구는 1900년경 저주파유도로를 Rohn 등이 개발하였으며, 1916년 미국의 Northrup 등에 의해 실용화된 이래로 전동발전기식, 진공관발전기식 및 thyristor inverter 식 등이 고안 되었다.

수십 KHz 에서 1MHz 까지의 유도가열로는 공업적으로 재료의 용융, annealing, hardening, normalizing 등에 널리 사용되며, 부유대역 방법에 의한 단결정 정제에 있어서는 수 MHz 의 주파수가 적합한 것으로 알려지고 있다.⁽¹⁾

본 실험에서는 결정정제 장치의 열원으로 8T20A

진공관발전기를 사용한 4MHz, 15kW 급(동경고주파 SRF-315W) 고주파 유도로의 특성과 시료로의 전력 전송효율을 조사함으로써 부유대역방법에 의

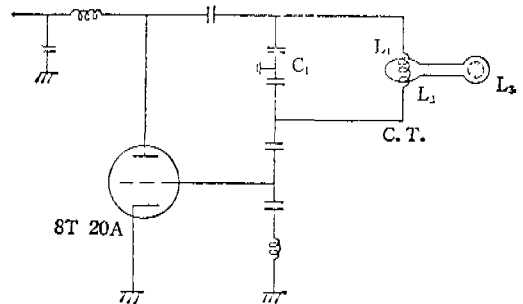


그림 1. 유도가열 장치의 발전부 회로도

한 결정정제실험에서 능률적인 방안을 연구하였다. 발진기부분의 회로도는 그림 1과 같으며 여기에서 발생한 출력은 전류변성기(current transformer)와 가열코일(work coil)을 통해 시료로 전달되는데 KHz 영역의 낮은 주파수에 대해서는 정합회로를 사용하여 능률적으로 에너지를 전송할 수 있지만 MHz 영역의 높은 주파수에서는 용이하지 않다. 따라서 가열코일과 시료자체의 적절한 설계가 필요하므로 에너지가 전달되는 과정과 효율을 조사하였다.

II. 가열코일의 설계

부유대역방법(floating zone method)에 의한 난 결정 정제과정에서 가장 중요한 몫을 차지하는 부분은 가열코일(work coil)이다. 결정시료에 유도가 열을 일으키게 하는 것은 hysteresis loss에 의한 에너지와 와전류(eddy current)손실에 의한 에너지로 구별되는데 수 십 KHz 이상의 높은 주파수에서는 와전류에 의한 열 손실은 주파수의 제곱에 비례하는 반면 hysteresis loss에 의한 열 손실은 주파수에 비례하고 Curie temperature 이상에서는 소멸하므로 무시할 수 있다.⁽²⁾

따라서 가열코일의 에너지가 시료에 능률적으로 전달되려면 유도되는 와전류가 집중성과 안정성이 있어야 하며 또 가열코일 내부의 자장분포가 공간

적으로 대칭성을 가져야 한다. 이런 기능과 특성을 만족시키는 것으로는 일반적으로 원형코일이 사용되는데 실험에 사용한 고주파 발진기에서는 전류변성기의 2차측과 impedance matching이 가장 적합한 것은 실험적으로 직경 3cm의 2회 감은 것이었다. 따라서 여기서는 두번 감은 링대의 solenoid형, spiral형 및 이들에 대한 빈칭의 미소한 키이를 조사하기 위하여 코일내부의 자장과 자속은 계산하였다.

한개의 원형코일(\vec{r}_1)에 의해 공간(\vec{r}_2)에 깃속하는 자장 $B(\vec{r}_2)$ 는 Biot-Savart 법칙에 따라 다음식으로 표현된다.⁽³⁾

$$B(\vec{r}_2) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l} \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3}$$

여기서 원형코일의 반경은 a 로 잡으면 $\vec{r}_1 = a \cos\theta \hat{i} + a \sin\theta \hat{j} + z_0 \hat{k}$ 이고, $\vec{r}_2 = x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k}$ 이며 길이요소(line element)는 $d\vec{l} = a d\theta (-\sin\theta \hat{i} + \cos\theta \hat{j})$ 로 된다.

x, y 방향의 자장성분은 미소하므로, yz 평면 상에서 z 방향의 자장성분만 쓰면

$$B_z(y, z) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(a - y \sin\theta) a d\theta}{\{a^2 + y^2 + (z - z_0)^2 - 2ay \sin\theta\}^{3/2}}$$

이 된다. 이는 한개의 코일에 의한 자장성분이므로 복권(復卷)에 대해서는 z_0 를 설정하여 합하면 된다. yz 평면상의 1상한에 해당하는 영역에서 B_z 값을 programming하여 IBM370으로 계산한 결과는 그림 2와 같다. 여기서 solenoid형의 빈칭은 15mm,

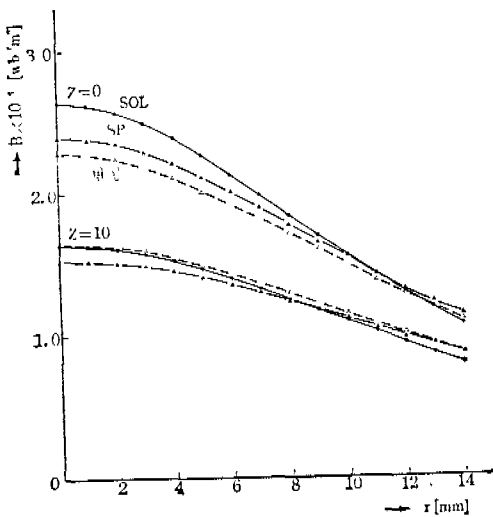


그림 2. 가열코일 내부에서의 자장의 세기

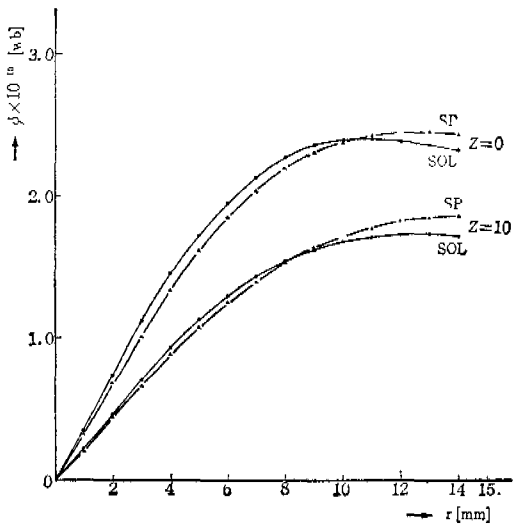


그림 3. 가열코일 내부에서의 자속

두코일의 중앙선 간격은 3mm, spiral 형태의 빈경은 각각 15mm, 21mm로 수평선상에 위치하며, 이들의 변형은 그 반경은 spiral 형태의 같고 두 코일의 간격은 solenoid 형과 같다. 또 전류는 1ampere로 잡았다. 시료에 와전류가 발생하는 것은 자계의 크기에 비례하므로 이 폭을 줄이고 zone을 인정하게 보존시키려면 $z=0$ 에서 강도가 크고 z 가 증가함에 따라 가급적 빨리 감소하는 경향을 갖는 형태가 좋는데 그림에서 나타나듯이 solenoid가 다소 유리하다고 할 수 있다. 또 내부의 자속은 $\phi_z(r_2) - 2\pi \int_0^{r_2} rB_r dr$ 로 부터 계산하였으며, 그 결과는 그림 3과 같은 일상을 나타낸다.

Ⅲ. 에너지 전달 효율

그림 1에 나타난 발진회로의 LC 진동자에서 전기용량 C_1 은 667.5PF이며, 인덕턴스 L_1 은 2.4 μ H로써 4MHz의 주파수를 갖는다. 이 때 발생한 고전압을 낮은 전압으로 바꾸어지 안전성은 확보하고 인덕턴스와 가열시료와의 간격을 줄이기 위해 전류변성기를 사용하였다. 전류변성기의 2차측 인덕턴스 L_2 는 Yokogawa-Hewlett Packard 4332A형의 ICR meter를 사용한 결과 0.5 μ H로 측정되었다. 2차측에서 나온 전류가 가열코일로 전달되는 과정에서 열손실을 최소화 할 수 있도록 전선은 외경이 4.4mm이고 두께가 1mm인 구리파이프를 사용했으며 내부에는 냉각수를 흘려서 효율을 높일 수 있도록 하였다.

그런데 고주파 발생부에서는 낮은 전류밀도가 전송되기 때문에 회로 자체의 코일뿐만 아니라 콘덴서에서의 전력손실이 상당한 폭을 차지한다. 따라서 최종적으로 가열시료에 전달되는 에너지는 발진회로의 진공관 출력에서 회로 및 콘덴서에서의 손

실에너지, 전류변성기에서의 열손실 및 가열코일에서 가열시료로 전달될 때 손실된 에너지를 뺀 값이 된다. 손실에너지 중에서 회로도선과 콘덴서에서 열로써 방출된 에너지는 도선 내부와 콘덴서 인접 도선 부분에 구리파이프를 사용하고 여기에 냉각수를 통과시켜 온도의 상승을 측정하면 회로의 전체적인 손실에너지를 알 수 있다. 즉 냉각수 파이프로 전달되는 손실 출력 P 는

$$P = 4.2(T_2 - T_1)v \text{ (kW)}$$

이다. 여기서 T_1, T_2 는 냉각수 입구와 출구에서의 온도이며 v 는 냉각수의 속도(l/sec)이다.

발진관의 출력은 변파시켜 가면서 0.06l/sec로 들은 흘리고 냉각수의 입구온도와 출구온도를 측정하여 회로자체의 열손실은 측정된 결과는 표 1과 같다. 측정시 고형 가열시료로는 시경 22mm인 흑인 붕을 사용하였고, 가열코일은 직경 30mm인 복원 solenoid 형을 사용하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 회로자체에서의 손실이 40%경도로 많은 부분을 차지하며 이 실험치는 전류변성기 부분에도 냉각수를 흘렸기 때문에 전류변성기에서의 열손실도 포함되었다. 일반적으로 전류변성기의 효율은 기하학적인 모형이 좌우되는데 $h = (0.7 \sim 1.2)d$ 인 영역에서는 거의 1에 가까운 것으로 보고되고 있다.⁽⁴⁾ 여기서 d 는 1차측 코일의 직경이며, h 는 2차측 경선 코일의 높이인데 사용한 전류변성기의 1차측 코일은 3 turn으로 d 는 11cm, h 는 11.7cm여 이 효율저하에는 영향을 미치지 않는다. 구리파이프의 두께는 고주파의 표피효과 때문에 침투깊이(skin depth)의 2배이상이면 열손실에 큰 영향을 주지 않는데 실험에 사용한 파이프의 두께는 1mm로써 4MHz의 구리도선에 대한 침투 깊이가 0.03mm에 비하면 충분한 두께가 된다.⁽⁵⁾ 가열코일내부의 자계형성에 의해 시료에 와전류가 발생하는 최종과정에서는 시료

표 1. 발진관 출력에 따른 열손실율

발진관출력 (kW)	양극전류 I_p (A)	양극전압 V_p (kV)	그리드전류 I_c (mA)	T_1 ($^{\circ}$ C)	T_2 ($^{\circ}$ C)	ΔT ($^{\circ}$ C)	열손실 (kW)	손실율 (%)
0.3	0.2	1.5	25	21.3	21.9	0.6	0.14	46.7
1.1	0.4	2.8	55	21.3	23.5	2.2	0.53	48.2
2.4	0.6	4.0	80	21.5	26.0	4.5	1.1	45.8
4.2	0.8	5.3	112	21.7	29.0	7.3	1.8	42.9
6.5	1.0	6.5	140	21.8	32.0	10.2	2.5	38.5
8.3	1.1	7.5	155	22.0	35.0	13.0	3.1	37.6

의 저항과 인덕턴스를 이용하면 용이하게 효율을 계산할 수 있다. 가열코일과 시료와의 관계물 그림 4와 같이 등가회로로 표시하여 회로방정식을 만들면 일반적인 가열효율은 조사할 수 있다.

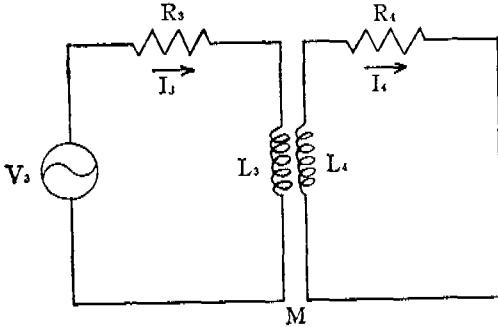


그림 4. 가열코일과 시료의 등가회로

$$V_3 = (R_3 + j\omega L_3)I_3 - j\omega M I_4$$

$$0 = -j\omega M I_3 + (R_4 + j\omega L_4)I_4$$

여기서

$$\frac{V_3}{I_3} = (R_3 + A^2 R_4) + j\omega(L_3 - A^2 L_4)$$

이 성립하며, $A = \omega M / \sqrt{R_4^2 + (\omega L_4)^2}$ 이다. 즉 시료를 가열하는 전력은 $I_4^2 R_4 = A^2 I_3^2 R_4$ 이므로 1차 측에서의 열손실 $I_3^2 R_3$ 를 이용하여 가열효율 η 는

$$\eta = \frac{A^2 I_3^2 R_4}{A^2 I_3^2 R_4 + I_3^2 R_3} = \frac{1}{1 + \frac{R_3}{A^2 R_4}}$$

이다. 따라서 설계시 가열효율을 높이려면 1차 코일의 저항을 작게하고 A의 값을 크게 하도록 해야 한다.

Ⅳ. 결 론

무유대역방법에 의한 결정정제를 위해서는 시료

의 좁은 폭에 에너지를 집중적으로 투입시켜야 하므로 가열코일의 설계가 중요한 몫을 차지한다. 즉 발전회로에서의 출력력을 최대한 효율적으로 전달하기 위해서 회로자체의 손실이 적어야 하는데 실험에 사용한 고주파로에서 회로의 전달효율은 60%정도로 다분히 나타난 값과 비슷한 범주의 수치이며 최대 출력은 5kW 까지 전달될 수 있다. 시료로의 가열효율은 가열코일과 시료의 유형 및 기하학적 모형에 좌우되는데 가열코일의 형상에 따른 자장 분포 계산에 따르면 solenoid type 가 나은 편이고 zone의 폭이 좁아질 수 있도록 방향의 길이는 가능한 작은 편이 유리하다. 또 시료에서 와전류물 발생시키는 효율은 결합인수 A에 좌우되는데 도체인 경우는 시료의 비저항이 시이서 용이하게 가열되지만 비저항이 큰 물질은 결합인수가 너무 작아서 예비가열이 필요하게 된다.

참 고 문 헌

- 1) Keller, W., Mühlbauer, A., "Floating-Zone Silicon", Marcel Dekker, New York (1981)
- 2) 高橋勸次郎外 3人, "高周波の工業への應用", 東京電機大學出版局 (1979)
- 3) John R. Reitz et al, "Foundation of Electromagnetic Theory", p.169, Addison-Wesley publishing Co. (1979)
- 4) M.G. Lozinskii, "Industrial Applications of Induction Heating", p.257, Pergamon Press (1969)
- 5) B.R. Pamplin, "Crystal Growth", p.112, Pergamon Press (1980)