

## 고주파 열처리 Induction Hardening

호시히데오(星秀夫) · 정인상\*  
Hoshi Hideo and In-Sang Chung

(전) 電氣興業(日本), 東京都技術아드바이서  
Technology Adviser, The City of Tokyo, Japan

\* 경북대학교 공과대학

\* Dept. of Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, Taegu 702-701 Korea

### 1. 서론

단시간 급속 가열이 특징인 고주파유도가열은 재료의 내마모성과 내피로성을 증대시키는 표면경화법 중에서도 가장 많이 이용되고 있는 방법중의 하나이다. 현재 다양한 분야에서 이용되고 있으나, 그 대부분이 자동차 부품의 열처리에 응용되고 있다. 현재 자동차 사용자의 요구는 다양하여 성능의 고급화, 선진성 등이, 사회적으로는 차체의 안정성, 제조 공정에서나 배기 가스의 지구환경보존이 강하게 요구되고 있다. 또한 자동차의 성능과 기능이 종래보다 더욱 향상되고 채용되는 기술이 엄격하게 요구되므로 고강도, 긴 수명을 위한 부품 및 재료의 개발, 사용한 재료의 recycling이 추구하고 있다. 이러한 요구때문에 기본적으로 필요한 부위에 적절한 특성과 기능을 실현시키는 열처리기술의 역할이 매우 크다. 이런 의미에서 고주파열처리는 부품의 기능향상이라는 중요한 과제를 해결하기 위한 주요한 기술에 해당된다.

### 2. 고주파유도가열의 원리

#### 2.1. 유도가열법

유도가열에서는 그림 1에 나타낸 것처럼 교류전원에 연결한 가열코일의 중심부에 막대모양의 금속을 삽입하면 코일과 금속은 떨어져 있음에도 불구하고 금속은 가열된다. 이것이 유도가열이다. 이 현상을 정리해보면 (a) 코일에 흐르는 전류에 의

해 자계(磁界)가 발생한다. (b) 자계는 막대 금속 내에도 생긴다. (c) 막대 금속 내에서는 이 자계를 상쇄하는 방향으로 전류가 흐른다(이것을 와전류라고 부름). 이 와전류는 표면에 가까울수록 많이 흐른다(표피효과라고 함). (d) 이 와전류에 의한 금속의 전기저항으로 열(Joule열이라고 함)이 발생한다. 당연히 막대의 표면 근처일수록 발열이 많다. (e) 그러므로 막대 금속은 표면에서 중심부를 향하여 가열이 진행된다. 그러나 동시에 방열도 시작된다. (f) 즉, 막대 금속의 중심부는 표면근처에서 먼저 발생한 열의 전도를 받아 표면보다 조금 늦게 가열된다.

#### 2.2. 전류의 침투깊이

막대 금속에 흐르는 전류분포를 단면으로 표시

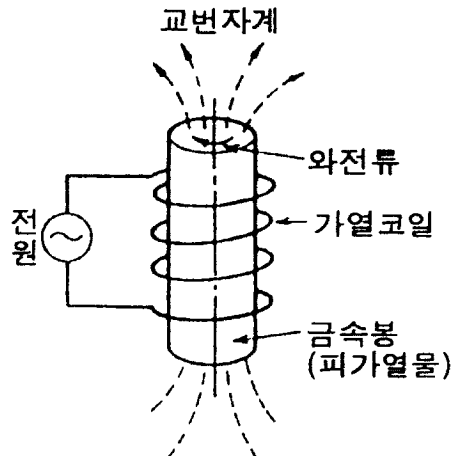


그림 1. 유도가열의 원리.

하여 그림 2(a)에 나타내었다. 가로축은 와전류의 밀도이다. 이 전류밀도는 내부로 갈수록 지수함수적으로 감소한다. 또한 그 경향은 주파수가 높을수록 급하다. 이러한 전류의 표피효과를 나타낼 때 동시에 전류와 발열의 전력계산을 용이하게 하기 위하여 그림 2(a)에 빗금으로 표시한 전체전류를, 그림 2(b)와 같이 원주상 표면에서의 전류밀도대로 전류분포를 나타낸다고 가정하여, 이것을 이론적으로 산출한 결과, 전류대(電流帶)의 폭  $\delta$ 는 다음 식(Steinmet의 식)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = 5.03\sqrt{\rho / \mu \cdot f} \text{ (cm)}$$

$\rho$  : 금속의 전기저항율 ( $\mu\Omega$ )  
 $\mu$  : 금속의 비투자율  
 $f$  : 주파수 (Hz)

전류대의 폭  $\delta$ 는 바로 전류의 침투깊이이며, 식에서 알 수 있는 대로 가열물의 크기에는 관계없고 금속고유의 물성치인  $\rho$ 나  $\mu$ 와 우리가 선택한 주파수( $f$ )만으로 결정된다. 주파수가 높게 되면  $\delta$ 값은 작게 되어 전류의 표피효과가 현저히 나타난다.

2.3. 적정 주파수의 선정

고주파 가열은 높은 주파수일수록 에너지를 쬐은 부분에 집중하기 쉽고, 주파수가 낮게 되면 에

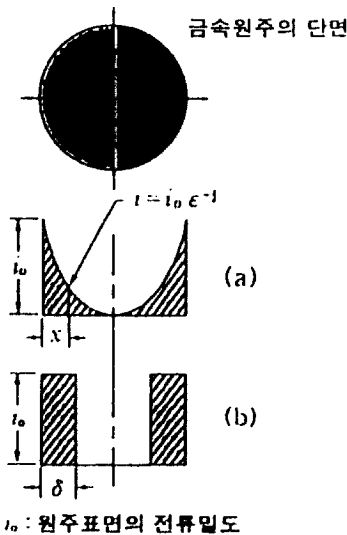


그림 2. 피가열재 원주 내의 전류분포.

너지는 널리 분포되는 성질이 있다. 따라서 에너지를 효율적으로 피가열물의 표면에만 흡수시키기 위해서는 피가열물이 작을수록 높은 주파수가 필요하게 된다. 피가열물이 큰 경우에는 비교적 낮은 주파수라도 효과적으로 흡수한다.

이상의 특성으로부터 피가열물 전체를 균일하게 가열하는 경우나 표면만을 가열하는 경우, 혹은 가열온도, 재질, 현상에 따라서 적절한 주파수를 선정, 이용하는 것이 높은 효율을 얻기 위한 포인트가 된다.

어떤 일정의 가열물을 주파수를 광범위하게 변화시켜 가열할 때 발생하는 전력은, 그림 3에 나타낸 것과 같이 주파수가 낮을 때는 주파수의 자승에 비례하고, 주파수가 높게되면 주파수의 평방근에 비례하게 된다. 양쪽 다 주파수가 높을수록 발열량이 커지지만, 이 특성의 분기점을 유도가열의 임계 주파수라고 한다. 임계 주파수를 상기의 전류의 침투깊이  $\delta$ 와 막대의 크기로 나타내면 다음과 같다.

$$f_c = 1.285 \times 10^6 \times \delta / \mu a^2$$

$a$  : 원주의 반경 (cm)  
 $\delta$  : 전류의 침투깊이 (cm)  
 $f_c$  : 임계주파수 (Hz)

철강재의 경우 이 임계주파수는 계산하면  $a/\delta = 2.25$ 가 된다. 각종 재료에 대한 임계주파수는 위

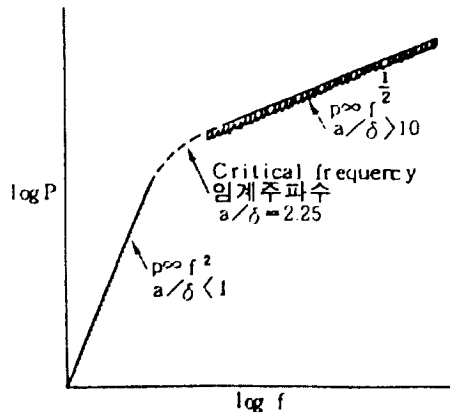


그림 3. 발생전력과 주파수와의 관계

표 1. 고주파가열에서의 전류의 침투깊이.

주파수(Hz)		전류의 침투깊이, $\delta$ (cm)						
		50	500	1000	3000	10000	200000	
탄소강	자성역	21 °C	0.64	0.14	0.084	0.042	0.019	0.0025
		300 °C	0.86	0.19	0.122	0.058	0.026	0.0035
		600 °C	1.30	0.29	0.180	0.090	0.040	0.0054
	비자성역	800 °C	7.46	2.37	1.67	0.96	0.53	0.12
		1250 °C	7.98	2.53	1.79	1.03	0.56	0.13
		1550 °C	9.00	2.85	2.01	1.16	0.64	0.14

식으로 계산할 수 있다. 주파수 선정할 때는 전류의 침투깊이(가열층에 상당)를 피가열물의 반경,  $a$ (cm)이내에 들어가도록 다음 식을 이용하여 선택한다.

(a) 원형 단면의 피가열물의 경우

$$\text{일반 선정조건} : 2a \geq (4 \sim 4.5)\delta$$

$$\text{전체균일가열} : 2a \geq 3.5\delta$$

(b) 판재의 경우

$$\text{일반 및 전체가열} : t \geq (2 \sim 2.5)\delta$$

여기서  $a$  : 반경(cm),  $t$  : 판두께(cm),  $\delta$  : 전류의 침투깊이(cm)이다.

예를 들어 원주(봉)재에서는 침투깊이  $\delta$ 가 반경의 약 반정도 들어가도록 주파수를 선택한다. 직경 5cm 강재를 상온으로부터 1250°C로 가열하는 경우를 예를 들면  $5\text{cm}/4 \sim 4.5 \geq \delta$ 가 조건이 된다. 표 1로부터 강재를 1250°C로 가열하는 경우의 침투깊이  $\delta$ 는 3000Hz에서 1.03cm이므로, 3000Hz 이상의 주파수라면 효율적인 가열이 된다. 표면 켈칭의 경우는 가열을 표면층에 집중시킬 필요가 있어, 경화층 깊이나 부품의 형상 등을 고려하여 일반적으로 약간 높은 주파수를 선택한다. 전체를 가열할 경우는 위 식의 범위에서 될 수 있는 한 약간 낮은 주파수를 이용한다.

#### 2.4. 필요한 에너지의 산정

가열에 필요한 전력량을 정확하게 계산하는 것은 매우 어렵다. 그 값을 산출한다고 해도 가정이

나 계수를 사용하기 때문에 꼭 일치하지는 않는다. 실험이나 시작품으로 얻은 데이터를 기본으로 하는 것이 제일 좋다.

경험적으로 피가열물이 흡수하는 전력량(소요가열 전력량)  $P$ 의 산정에는 다음 2가지 방법이 있다.

$$(a) P_a = K \cdot M \cdot 60(\text{min})/t \quad (\text{W})$$

$K$  : 소정온도의 수치(표 2) (Wh/kg)

$M$  : 피가열물의 중량 (kg)

$t$  : 가열시간 (min)

$$(b) P_a = 4.2 \times M \cdot C \cdot \Delta\theta/t \quad (\text{kW})$$

$M$  : 피가열물의 중량 (kg)

$C$  : 비열 (cal/g · °C)

$\Delta\theta$  : 소정온도 (°C)

$t$  : 가열시간 (sec)

여기서 비열은 온도에 따라 달라지므로, 임의 온도에서의 값으로 계산하는 것은 잘못이며, 비열곡선의 평균치를 구하여 비열로 한다. 철강에서 켈칭의 경우에는 0.14 정도로 하는 것이 좋다. 중량은 전체의 값이 아니라 켈칭 깊이까지의 중량이다.

또한, 이 밖에 방사, 대류, 열전도 손실 등이 있으므로 전체 소요전력은 이들의 합계치가 된다. 또 피가열물의 가열면적과 전력밀도로부터 산출하는 방법도 있다. 켈칭에는 일발켈칭(코일과 피가열물이 상대적으로 고정되어 가열 후 냉각)과 이동 켈칭이 있으며 다음에 나타낸 값을 전력산출의 기준으로 하고 있다.

· 일발켈칭의 경우 : 0.5~2kW/cm

· 이동퀀칭의 경우 : 2kW/cm 이상

이상의 전력량은 가열에 필요한 열량이며, 가열 장치의 소요출력은 아니다. 그러므로 출력을 결정 하는데는 이 열량에 가열장치로부터 가열부까지의 전송부(고주파트랜스, 가열코일, 전송배선 등)의 손실을 계산하고 더욱이 가열코일과 피가열부의 결합능률을 고려하지 않으면 안된다. 고주파발생 장치의 소요출력과 실제로 피가열물에 공급되는 전력과의 비율 전송효율이라고 하며, 외면 퀀칭에서 90%, 내면 퀀칭이나 단면 퀀칭에서 매우 떨어져 60% 또는 그 이하이다. 동시에 장비의 신뢰성(효율)과 공장(또는 고주파 장비)에 입력되는 전력의 전압변동 등도 별도로 고려할 필요가 있다.

2.5. 고주파가열의 특성 - 고효율과 급속가열

(a) 고주파가열은 자장을 이용하여 피가열물의

필요한 부분에 에너지를 집중시켜 그 부분에서 열을 발생시키기 때문에 에너지를 매우 효율적으로 전달할 수 있다. 또한 일반가열로와 같이 노벽재료의 열 손실도 없으며 에너지 전달과정에서의 손실을 최소한으로 억제할 수 있기 때문에 뛰어난 에너지 절감효과가 있다. (피가열물의 가열 부분)

(b) 고주파가열은 작용자계를 강하게 함으로서 고밀도의 에너지를 쉽게 전달할 수 있어 급속가열이 가능하다. (가열의 속도)

3. 고주파 가열장치

일본공업규격(JIS B6912)에는 고주파 칭 및 텀퍼링에 사용하는 가열장치로 전동발전기형, 진공관식, thyristor식, 트랜지스터식의 4종류가 있지만, 현재 공업적인 가열용 전원으로 사용되고 있는 것은

표 2. 급속의 열용량.

금속의 열용량 kWh/ton = Wh/kg American Society for Metal : "Metals HandBook"									
주파수(Hz)	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1500
알루미늄	24.5	50.8	79	109	172	344	404.5	-	-
탄소	24	52.6	86.3	126	214.5	312	145	520	687
동	10.8	21.8	33.4	44.8	69.2	94.3	120	66	78.3
금	3.6	8.2	10.9	14.8	23	29.9	39.6	66	78.3
그라파이트	53	42	68.5	99.2	175	280.5	385	490	699
철	12.7	26.4	41.9	60	97.3	147	192	227.5	288
납	3.6	7.35	11.2	21.8	29.4	34.7	44.9	-	-
망간	13	27.6	43.5	61.2	102	149	193	241	385
물리브덴	7	14.6	22.5	30.6	47.7	65.5	84.5	98.5	136
마그네슘	28.6	58.8	90.7	123.5	192.5	310	-	-	-
니켈	12.7	26.4	41.6	59.1	89.3	121.2	152.3	185	318.5
백금	3.73	7.6	11.4	15.2	23.5	31.8	40	49.7	63.7
은	6.6	13.2	20	27	41.6	51.2	102.8	120	-
강(0.3%C)	14.8	29.5	44	59	96.7	153	192	222.5	318(1550°C)
텅스텐	3.9	7.6	11.5	15.6	23.4	31.5	40.1	48.6	62.5
주석	6.6	12.3	37	43.5	56.5	69.8	82.7	-	-
아연	11	22.2	34.3	46.5	102.9	133	-	-	-

다음 3종류이다.

### 3.1. 진공관식 발진장치

진공관식 발진장치는 무선통신기를 공업적으로 응용하여 발전해왔다. 대전력 송신기의 발달은 대전력을 필요로 하는 유도가열장치를 발전시켜, 반도체 소자가 발달한 현재에도 30kHz이상의 고주파수를 필요로 하는 표면 켈칭이나, 강관의 용접 등에 많이 활용되고 있다. 진공관은 부하부 등의 이상에 대한 보호가 쉬우며, 열악한 환경에서 사용하더라도 고장에 강한 설비이다. 그러나 에너지 변환효율이 약 60~70%로 낮으며, 진공관의 수명이 짧고(약 100시간), 회로에 수 10kV의 고전압이 필요한 등 단점이 있다

최근 수년간 에너지절약과 유지 보수문제로 새로 설치되는 장비로서는 진공관식 발진기 대신에 트랜지스터가 채용되고 있기는 하지만, 열악한 환경과 물 등을 사용하는 지역이나, 발진주파수가 1MHz를 초과하는 유도가열 설비에는 현재도 반도체소자보다 진공관식이 널리 이용되고 있다.

### 3.2. Thyristor Inverter

고주파 대용의 inverter 소자로서의 thyristor는 주파수가 10kHz 이하로 대출력의 용도에 사용되며 깊은 경화층의 켈칭, 균일 가열용의 텀퍼링, 단조 가열용 등에 널리 사용되고 있다.

### 3.3. 트랜지스터 Inverter

현재 트랜지스터의 전력소자를 사용한 발진장치에는 다음과 같은 것이 있다.

(a) 전계효과 트랜지스터(약칭 MOSFET)

스위칭 속도가 매우 빨라, 높은 주파수를 필요로 하는 inverter 발진기에 적용되고 있다. 현재는 구동주파수가 30kHz이상의 가열장치에 사용되고 있다.

(b) 정전유도형 트랜지스터(약칭 SIT)

SIT를 사용한 인버터는 MOSFET에 비해 surge 전압·전류에 대한 저항성이 뛰어나다. 이들 특성을 살린 인버터의 구동주파수는 20kHz~1MHz까

지 가능하다.

(c) 절연 gate형 Bipolar 트랜지스터(약칭 IGBT)

IGBT를 사용한 inverter의 구동주파수는 50kHz까지이며, 출력은 1MW급까지 제품화되어 있다.

이상으로 고주파가열장치의 종류와 그 특성(그림 4 참조)에 대하여 설명하였지만, 앞으로의 동향을 보면 구동주파수는 높아지고 출력은 대출력화가 될 것으로 생각된다. 가까운 장래에는 트랜지스터의 전성시대가 될 것으로 생각되지만, 주파수 10kHz이하에서 출력이 MW급을 넘는 경우에는 사이리스터 인버터가 금후에도 여전히 크게 이용될 것으로 생각된다.

한편 고주파 가열설비에 관계되는 환경문제에는 업체·고객이 함께 진지하게 대처해 나가지 않으면 아니되며, 그것에는 다음과 같은 문제를 들 수 있다.

(a) 누전파(전파장애) : 전자기기나 통신장애

(b) 고주파 : 제어기기·통신기기 등의 오동작, 과열, 이상음의 발생

## 4. 고주파가열 및 켈칭장치의 제어기술

고주파가열은 다른 가열방식과 비교해 에너지 절약, in line화 등 많은 기술적 우위성이 있어, 그 이용은 급증하고 있다. 근년 반도체 생산기술의 발달로 장비도 대전력 고주파로 가는 추세이며 전력제어도 보다 고도화되고 있다.

켈칭 경화층의 깊이 및 경도의 불균일도 재료개

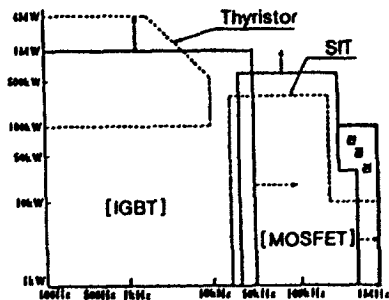


그림 4. 전력용량과 주파수

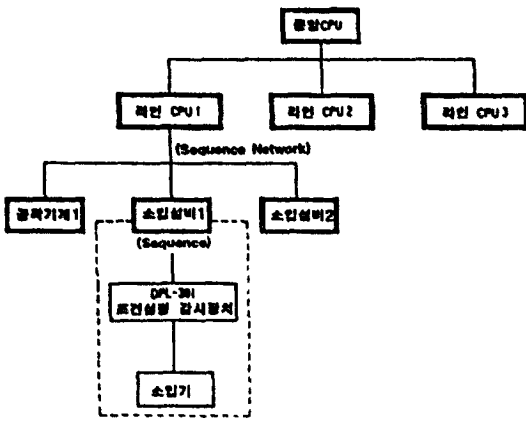


그림 5. 공장내의 네트워크.

발 기술과 더불어 점차 줄어들고 있다. 고주파전력의 제어도 가열장치로부터 공급되는 입력 전력량을 가열개시와 동시에 빠른 속도와 높은 정도로 가열 기준전력과 비교 연산하여, 항상 일정한 전력

량을 공급할 수 있는 기술이 확보되어 있다. 또한 시간 제약도 응답속도가 빠른 전자회로에 의해 가능해졌다.

고주파 퀘칭의 종합적인 조건감시 시스템(그림 5참조 DPL-301)에 관해서는, 퀘칭 장치의 제어 중칭 텀퍼링부의 설정, 이동과 정지, 가열전용의 조건감시, FMS화 공장에서의 사용을 전제로한 중앙 CPU의 지령, 코일자동교환기구(그림 6참조) 등이 개발되어 고도의 제어가 가능하게 되었다.

퀘칭장치의 자동화기술은 생산성의 향상과 다품종 생산에 대응하기 위한 생산기술이어서 준비시간의 단축에 중점을 두고 있다. 구동제어에는 AC Servomotor방식이 채택되어 위치 제어의 정확도가 확보되고 있다.

등속 ball joint의 퀘칭을 예로 들면 위치결정 유니트의 사용, 코일 자동교환 기구 등이 설치되어 있고, 축이동에는 고속에 전달 수 있는 servomotor가 사용되고 있다. 앞으로는 보다 고도의 제어기술

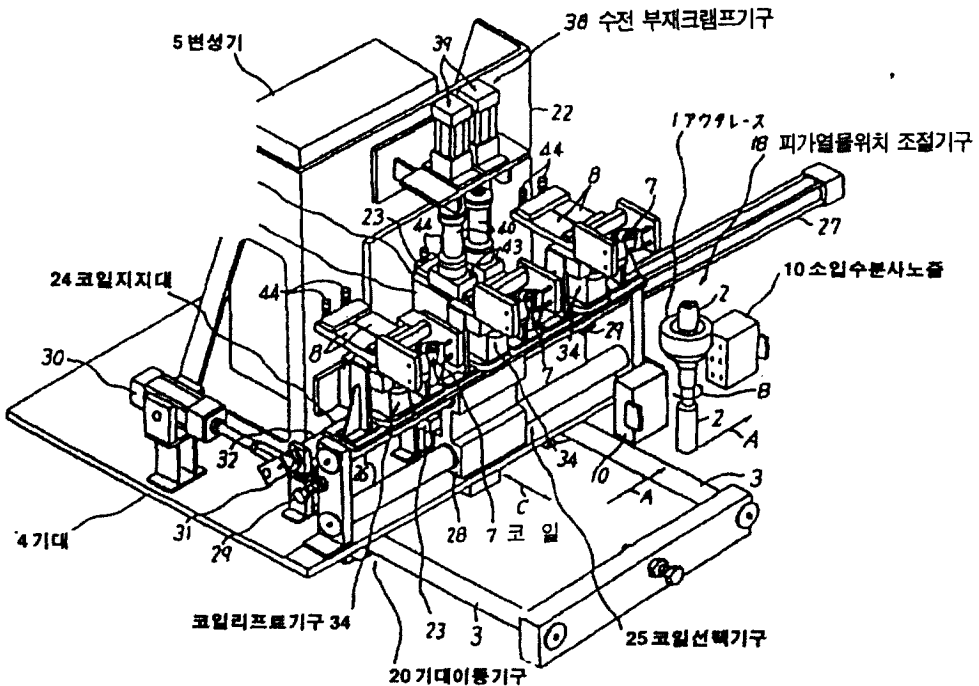


그림 6. 코일 자동교환장치의 개략도

의 발달로 생산성의 향상, 높은 품질이 확보될 것이다.

### 5. 가열 코일

고주파가열에 의한 열처리장치의 구성요소 중에서 가열코일은 인간에 비유한다면 심장부에 해당되는 매우 중요한 요소 중 하나이다. 고주파열처리의 승부를 결정하는 열쇠는 가열코일의 설계에 있다. 코일의 설계는 열처리 조건설정의 주요한 작업이며, 여기에는 오랜 기술축적이 필요하다.

#### 5.1. 가열코일 일반

웬칭의 대상이 되는 피열처리품은 다종다양하여 그 형상, 치수, 처리범위, 요구품질 등이 각각 다르기 때문에 가열코일은 그 부품에 적합하도록 설계 제작되어야 한다. 웬칭에는 가열과 냉각 공정이 있어 기대대로의 웬칭을 위해서는 가열공정에서

웬칭깊이까지 소정의 온도로 가열할 필요가 있다. 이를 위해서는 적절한 주파수(임계주파수보다 높은 주파수)의 전력을 일정시간 가열코일에 공급함으로써 달성된다. 웬칭용 코일에는 가열과 냉각을 모두 갖춘 구조(이것을 일체형이라고 함)와 양자를 분할한 구조(분리 혹은 분할형이라고 함)가 있다.(그림 7a, 그림 7b)

가열면에서 코일을 고찰하면

(a) 먼저 전력효율이 높아야 한다. 이를 위해서는 교류 전류가 만드는 자속(磁氣의 다발)을 될 수 있는 한 많이 피가열물에 관통하도록 하는 배치(될 수 있는 한 접근시킨다)와 구조(코일의 형상과 피가열물을 관통하는 자속을 부분적으로 조절하는 자성재료의 부착)가 되어야 한다.

(b) 가열코일에 흐르는 전압은 비교적 낮아 수 100V이하의 경우가 많지만, 전류는 현저하게 큰 값으로 수 1000A에 달하는 것도 있다. 따라서 코일도체로는 비저항이 작은 전기동(구리)을 사용하

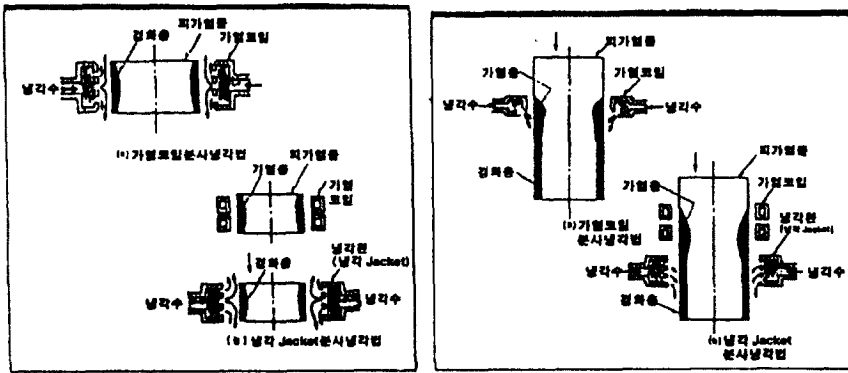


그림 7. (a)일반웬칭의 경우와 (b)이동웬칭의 경우

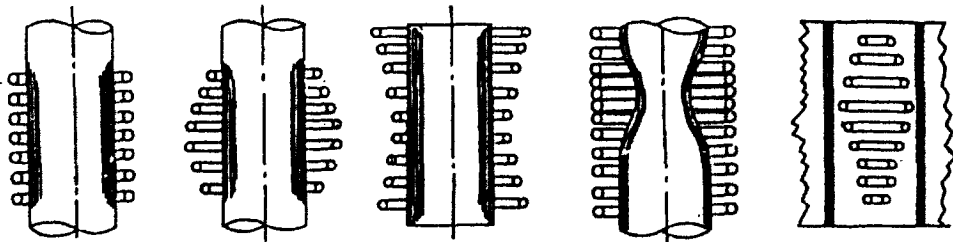


그림 8. 코일과 피가열물의 간격을 부분적으로 변화시킨 경우.

며, 도체의 접합에는 은이나 동을 사용하여 전력손실이 낮아지도록 노력하여야 한다.

(c) 가열은 필요한 부분만 균일가열이 요구된다. 따라서 피가열물의 굴곡, 형상, 치수 등이 불균일한 경우에는 열전도에도 차이가 발생함으로써 부분적인 공급전력의 조정이 필요하게 된다. 부분적인 공급전력의 조정에는 가열코일과 피가열물의 간격(gap 또는 clearance라고도 함)을 부분적으로 변화시키든가(그림 8 참조), 자성재료(그림 9 참조)를 코일의 일부에 부착하여, 피가열물을 관통하는 자속밀도를 부분적으로 조절하는 방법 등이 있다. 이 작업은 코일 설계상 매우 중요하다. 간격을 크게 하면 가열효율이 떨어지는 것을 알면서도, 때로는 균일하게 열을 가하기 위하여 일부러 실시하는 경우도 있다

5.2. 코일설계의 기초

(a) 코일용 반도체 재료의 두께

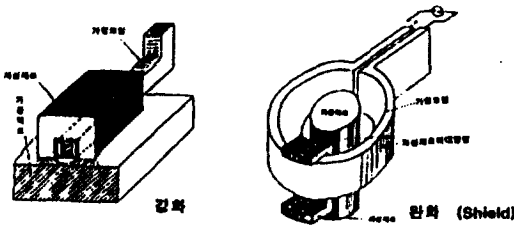


그림 9. 자성재료로 자속밀도를 조절하기 위한 배치도.

표 3. 용접재 및 용접온도.

용접재	선경 $\phi$ (mm)	용접온도 (°C)	용 재
동용접	1~3	max. 1200	봉산
은용접	1~2	750~850	↑
황동용접	1~3	900~950	↑
인동용접	1~3	700~800	
납땜	선, 봉	150~270	염화주석

코일에는 대전류가 흐르기 때문에 도체의 전기저항에 의한 전력손실을 적게 하고 코일의 효율을 높일 필요가 있다. 따라서 도체재료에는 고순도의 동파이프 혹은 동판을 사용한다. 코일도체에 흐르는 교류전류의 통로는 주파수에 따라 다르고, 표면에 가까운 부분일수록 크며 중심부로 갈수록 지수함수적으로 감소하며, 그 감소의 정도는 주파수가 클수록 현저하다. 이 현상을 표피효과라고 부른다. 표면 전류밀도의 약 37%가 되는 깊이를 전류의 침투깊이라고 부르고 있다. 따라서 이 깊이 내에서 소비되는 전력은 전체의 약 90%가 된다. 도체의 두께는 전류 침투깊이의 2.2배가 최적으로, 동의 경우 최적두께를  $t$ (mm)라고 하면,

$$t = 115.4/\sqrt{f} \text{ (mm)}$$

$f$  : 주파수(Hz), 로 구할 수 있다. (표 4참조)

(b) 동파이프의 형상

코일에 흐르는 전류와 피가열물에 흐르는 전류는 반대방향이기 때문에, 양전류의 통로간을 관통하는 자속이 적은 쪽이 전류는 흐르기 쉽다. 따라서 전류는 서로 접근한 곳에서 많이 흐른다. 이 현상을 근접효과(그림 10 참조)라고 부르고 있다. 특

표 4. 동 도체의 적정 두께

주파수, $f$ (Hz)	최적두께, $t$ (mm)	최적두께 (mm)
50	16.4	16
60	15.0	16
150	9.4	10
500	5.1	6
1000	3.6	4
3000	2.1	3
5000	1.6	2
10000	1.2	1.5
30000	0.66	1.0
100000	0.36	1.0
300000	0.21	1.0



히 solenoid 모양 코일에서 코일 간격이 좁으면 도체중의 전류통로는 피가열물과 근접한 부분에 집중하기 때문에, 동파이프는 둥근형보다 사각형으로 가공하여 사용하는 쪽이 전류통로의 유효단면적을 크게 할 수 있어 유리하다. (그림 11 참조)

(c) 코일의 강제화

코일에는 많은 전류가 흐르기 때문에 기계적인 동이 발생하거나 취급중에 변형이 일어날 수 있다. 이를 방지하기 위하여 동파이프만을 사용하는 것은 될 수 있는 한 피하고, 동 소재를 기계가공하여 강성을 높이는 것이 좋다. 나아가 요소를 내열 절연재로 코일도체를 보강하는 것도 좋은 방법의 하나이다.

(d) 코일리드부의 낮은 임피던스(impedance)

코일은 정합장치의 정합트랜스(고주파변성기라고도 함)의 2차단자에 접속하여 사용한다. 따라서 코일본체와 트랜스의 두 단자를 접속하는 리드부가 필요하다. 코일의 임피던스는 가열 중에도 그 값은 작기 때문에, 리드부의 임피던스가 크면, 리드부에서 전압강하가 크게 되어 저항도 커지며 가열전력의 전달이 나빠져 효율이 저하된다.

리드부의 임피던스를 낮게 하기 위해서는 리드부위의 길이(코일과 변압기간의 길이)를 될 수 있는 한 짧게 하고, 폭이 넓은 동대(銅帶)를 사용하여 얇은 절연판(테프론 등)을 왕복노선간에 끼워 넣어, 왕복리드 도체로 둘러 쌓이는 단면적을 작게

한다.

(e) 자성재료의 이용

앞에서 일부 자성재료의 이용에 대하여 설명했지만, 가열을 효율적으로 하기 위해서는 중요한 요소이기 때문에 좀더 상세히 설명한다. 코일이 만드는 자계밀도가 클수록 유도가열효과는 크게 된다. 이 자계밀도의 크기는 코일에 흐르는 전류와 감은 코일선(線) 수의 곱인 기자력(起磁力)에 비례하고, 자기저항(磁氣抵抗)에는 반비례한다. 따라서 코일이 비어 있는 경우(空心)보다는 코일의 일부에 자성재료를 부착하여 자기저항을 감소시키면, 같은 기자력에서 코일이 만드는 전자속량(合計 磁束量)은 증가한다. 그 결과 피가열물을 관통하는 자속량이 증가함에 따라 가열능력도 증가하여, 전력을 효율적으로 이용할 수 있다.

자성재료의 이용은 표면가열은 물론이고 특히 내면가열이나 평면가열과 같이 효율이 나쁜 경우에 그 효과가 현저하다. 또 자성재료는 다른 부분보다 자속이 통과하기 쉽기 때문에 코일의 적당한 위치에 부분적으로 부착하여 피가열물을 관통하는 자속분포를 조절할 수 있다. 그러므로 이형의 피가열물에 대해서도 자성재료의 이용으로 균일 가열을 할 수 있다. 그림 12-a, b에 자성재료의 이용 예를 들었다. 오른쪽 그림에서 알 수 있듯이 자성재료를 코일에 부착함으로써 불필요한 부분까지 가열되어 경화되는 것을 피하고 필요한 부분에만 가열을 집중시킬 수가 있다.

(f) 코일의 수명

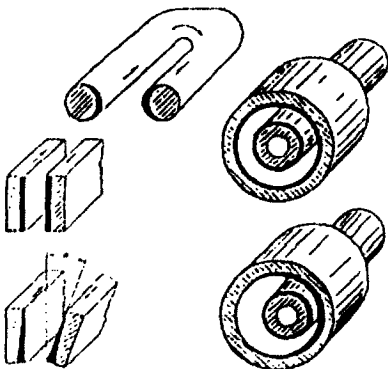


그림 10. 근접효과와 모양

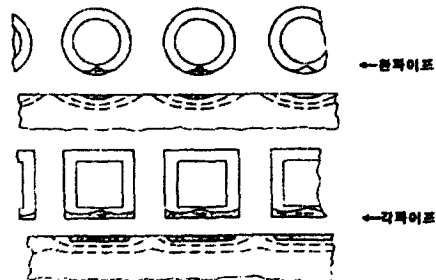


그림 11. 동파이프의 형상과 전류분포

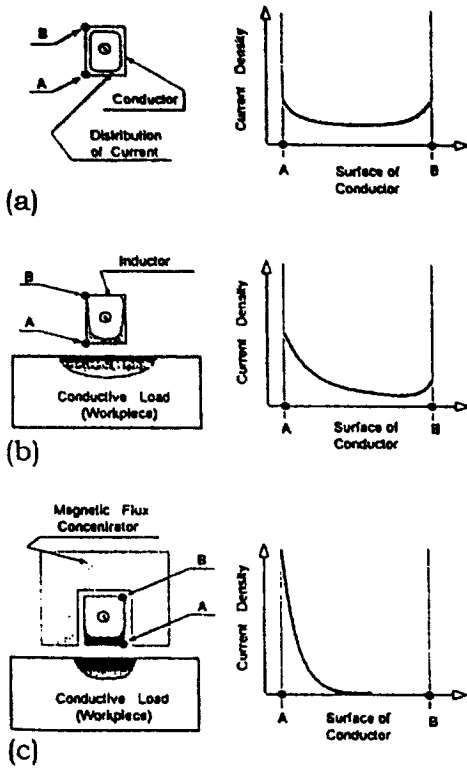


그림 12. 자성재료의 이용 예

(f) 코일의 수명

가열코일은 소모하는 것이 아니라서 특별한 사고가 일어나지 않는 한 반영구적으로 사용할 수 있다고 생각해도 좋다. 문제가 발생하는 원인으로 는 다음의 경우를 들 수 있다.

① 코일자체의 냉각 부족

통전(通電) 중에 코일의 온도가 높아지면 동파이프의 저항치가 증가하여 손상의 원인이 된다. 이 때문에 냉각을 충분히 하여야 한다. 코일은 효율을 떨어뜨리지 않는 범위내에서 냉각수가 흐르기 쉬운 구조로 설계하는 것이 이상적이지만, 피가열물의 형상에 따라서는 복잡한 구조로 되는 경우가 있다.

통전 중에 코일의 냉각수가 어떤 원인으로 유량이 감소하여 냉각이 불충분하게 되면, 동이 용점까지 온도가 올라가게 되고, 그 부분에서 격렬한 빛과 소리를 내며 파손된다. 그 파면은 퓨즈의 파손

과 비슷하며 그림 14와 같다. 물에 의한 냉각효과는 흐르는 물이 접하는 면적과 그 조건에 따라 변한다. 통상 유속은 1~15m/sec, 통과시의 수온은 20~30°C, 출구온도는 65°C 이하가 바람직하다.

통수압력은 0.7~30kg/cm<sup>2</sup>의 범위에서 조정하면 되지만 대전력을 공급하는 경우에는 6~9kg/cm<sup>2</sup>의 고압이 요구되는 경우도 있다.

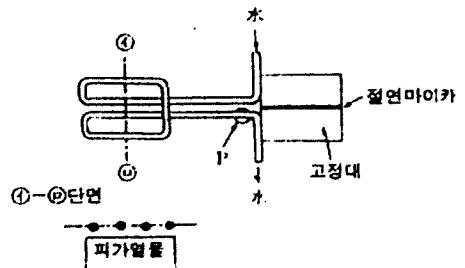


그림 13. 코일의 손상되기 쉬운 부분

② 피가열물과의 접촉

코일과 피가열물이 가열 중 직접 접촉되는 경우와 피가열물의 flush 등의 도전체가 끼어 들어 접촉되는 경우가 있다. 접촉의 정도, 그때의 가열전력 등으로 피해 상황은 다르지만, 심하면 코일 표면이 녹아 떨어져 나가며 통전이 불가능한 경우도 있다. 이 현상은 피가열물에 부착된 부착물의 제거도 필요하지만, 코일의 표면에 내열 절연피막을 만들어 방지할 수도 있다.

③ 가열냉각의 반복에 의한 코일의 변형 및 결정립 조대화에 의한 취화

아주 짧은 시간, 예를 들어 2초 정도의 일발퀀칭에서는 코일자체의 냉각을 생략하고 퀀칭을 위한 냉각수를 가열정지 후에 코일로부터 흘려, 이것으로 코일의 냉각을 겸하는 경우도 있다. 이 경우 코일은 전류의 저항열로 약 400°C 정도까지 가열되어 있기 때문에 퀀칭이 반복될 때마다 가열냉각이 반복된다. 그 결과 조금씩 변형되며, 수천내지 수만회 가열과 냉각이 반복되면 코일의 결정립이 조대화하여 균열이 발생하는 경우도 있다. 반개방향 코일이라도 같은 현상이 일어난다

④ 자성재료의 노후화

규소강판을 적층하여 납땜한 것(자성재료로서 사용)은 퀀칭에 사용하는 물로 인해 장기적으로는 녹이 슬게 된다. 방수도료를 사용하여도 반영구적으로는 사용하지 못하므로 교환하여야 한다.

⑤ 진동에 의한 피로파괴

그림 13에 실제의 예로 평면가열용 코일을 나타내었다. 이 코일은 직경 8mm의 동파이프를 굽혀

만들었다. 성형에는 동파이프에 규사의 미분을 충전하여, 버너로 약 700°C 정도로 가열하며 가공한 후에 규사를 꺼낸 다음 용접하였다. 이 코일을 사용하여 퀀칭하는 중 몇 번인가 반드시 그림 13의 P에서 파단되는 현상을 경험하였다. 코일 냉각수에 이상은 없었으며, 조사 과정에서 적열 상태에서 급냉된 동은 매우 부드러우며 강도가 낮았다. 일정 시간 방치하면 재결정하여 20kgf/mm<sup>2</sup> 정도의 인장강도를 나타내었다. 코일의 파단면은 그림 14와 같은 상태였다. 냉각이 불충분하여 녹아 끊어진 부분은 그림 14의 ①과 같이 파면 대부분이 용융된 동으로 덮혀 있다. 한편 ②에는 동 의 파단면(정벽면)이 확실하게 남아 있다. 결론적으로 먼저 ②부분에서 피로로 인한 피로 균열이 발생하여, 이 때문에 냉각수가 새게 되고, 냉각능력이 부족하여 온도가 올라가서 나머지 부분이 녹아 끊어지는 현상이 순식간에 일어난다.

통전 중에 코일 속에 절연(絶緣) 막대를 집어 넣어 보면, 무거운 느낌의 진동이 느껴지는데, 이 진동은 주파수와 꼭 일치하는 것은 아니다. 이 진동은 근접하고 있는 코일의 도체에 흐르는 전류의 상호작용에 의해 발생한다.

이 전류의 상호작용은 다음과 같다. 그림 15에 나타낸 것 같이, 근접하는 2개의 동파이프 각각에 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>(A)의 전류가 흐르며 동파이프의 중심간의 거리를 r(m)이라고 하자. 전류의 방향이 같을 때는 플레밍의 왼손법칙으로부터 서로 근접하는 방향으로, 다를 때에는 반대방향으로 힘이 작용한다. 그 힘 F는

$$F = (I_1 \cdot I_2 / r) \times 2 \times 10^{-7} \times 1/9.8 \text{ (kg/m)}$$

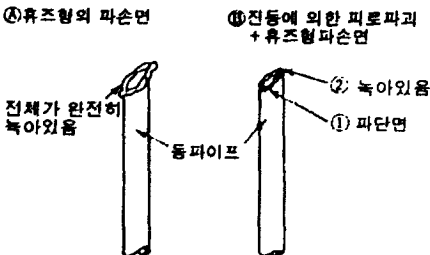


그림 14. 코일의 손상상황

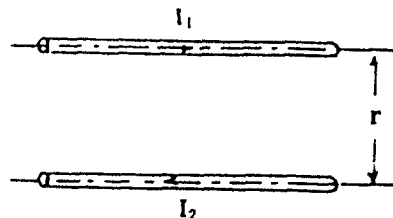


그림 15. 인접코일간의 진동

로 계산할 수 있다.

교류전류이기 때문에 그 값은 시간과 함께 +, -로 변화한다. 어느 순간에 1000A가 흐르고, 그때의 거리 r이 1cm라고 하면

$$F = (1000 \times 1000) \div 0.01 \times 2 \times 10^{-7} \times 1/9.8$$

$$\approx 2 \text{ (kg/m)}$$

이 된다. 이 값은 코일도체 1m당 2kg의 하중이 걸림을 나타내며, 이로 인해 진동하게 된다. 그림 13에 나타낸 코일이 파르파파 되었을 때의 조건은 출력 50kW, 주파수 5kHz이었다. 경험적으로는 주파수가 낮은 경우에 절연물을 통하여 손에 느끼는 진동을 잘 알 수 있다. 이 진동은 코일자신의 강도를 크게 하던지 보강재를 사용함으로써 쉽게 방지할 수 있다.

(g) 코일의 보호대책

① 코일에는 큰 전류가 흐르기 때문에 보호대책으로서 발열과 절연대책이 필요하다.

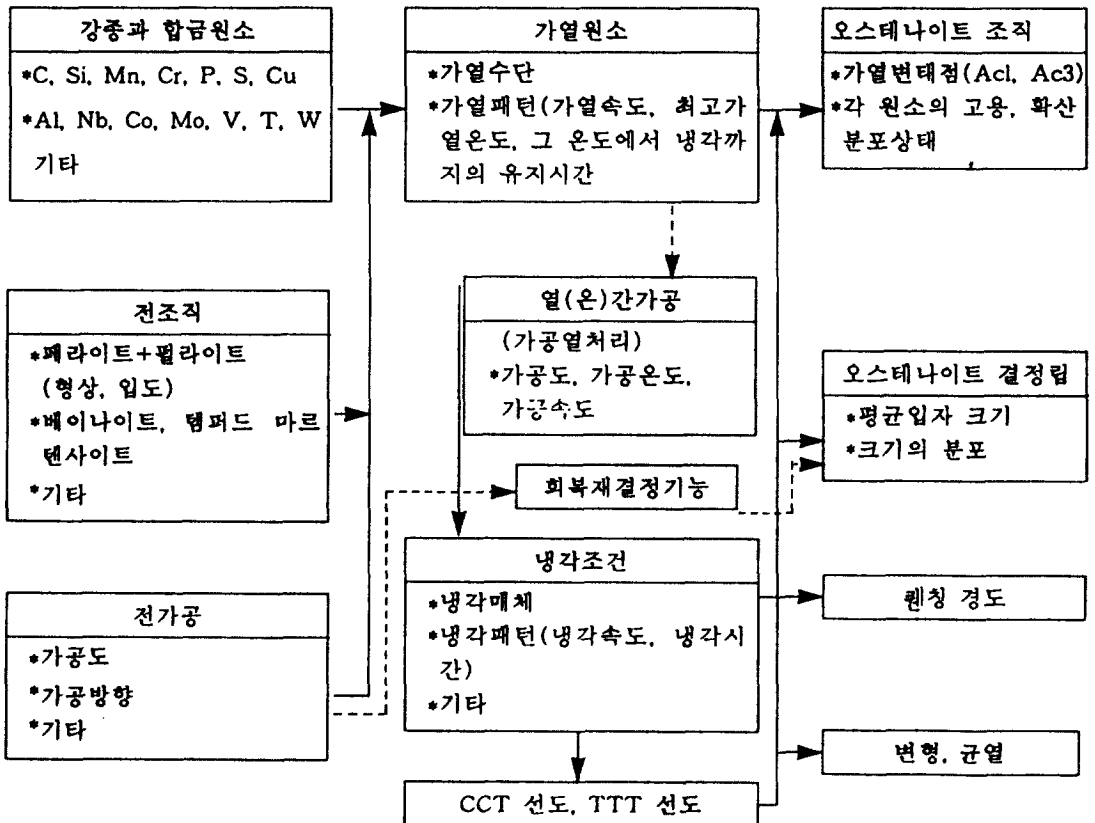
발열대책으로 코일에는 20°C 이하의 냉각수를 충분히 흘리고, 수압을 2kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 한다.

③ 절연대책은 실제로는 일장일단이 있어 확실한 것은 없지만 글라스테이프, 알루미늄 코팅, epoxy 수지 및 테프론 코팅이 있다.

④ 피가열물과의 접촉대책에는 coil touch sensor가 있다.

열처리부품의 다양화와 고품질의 요구, 생산성 향상을 배경으로 한 코스트 절감의 대응에도 코일의 역할은 중요하다. 특히, 가열기능에서는 균일 가열을 위한 자성재료의 적용기술 축적도 중요하다.

표 5. 단시간 급속가열에 따른 오스테나이트화에 미치는 인자.



## 6. 단시간 가열에 의한 강의 오스테나이트화

### 6.1. 금속학적 인자

단시간 가열에 의한 강의 오스테나이트화에서 고려하여야 할 사항은 (a) 탄소를 비롯한 합금원소가 충분히 균일확산 분포하여 고용할 것.

(b) 미세한 오스테나이트 결정립이 얻어질 것.

(c) 가열중의 온도변화와 (a), (b)의 거동이 가열이 필요한 부분에서 균일하게 이루어 질 것.

하지만, 공업적으로 병립시키는 것은 쉽지 않다. 따라서 가열사이클중의 가열속도, 최고가열온도, 가열종료 후 냉각까지의 유지시간의 설정을 보다 신중하게 할 필요가 있다.

한편, 이들 여러 조건의 영향을 받아 실제로 오스테나이트화의 거동을 좌우하는 합금원소, 전조직, 전가공(여기에 동반되는 회복, 재결정거동) 등의 금속학적 제 인자의 영향에 대해서 충분한 고려가 필요하다. 표 5는 이들 제 인자의 관계를 정리한 것이다.

유도가열과 같은 단시간 가열로 강을 오스테나

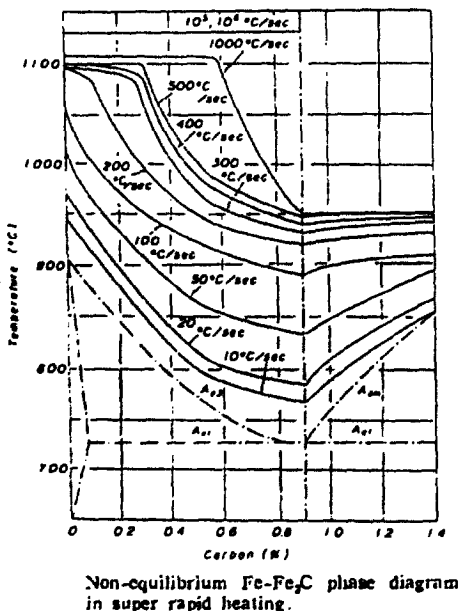


그림 16. 급속가열의 경우에 Fe-Fe<sub>3</sub>C의 비평형 상태도.

이트화하는 경우, 평형상태도를 기초로 한 오스테나이트화에 관한 자료를 그대로 사용할 수는 없다.

그것은 가열변태점 (Ac<sub>1</sub>, Ac<sub>3</sub>)이 가열속도의 증가와 함께 상승(그림 16, 17참조)하는 것을 고려하여야 하며, 오스테나이트화는 마르텐사이트변태와는 다른 확산변태이고, 오스테나이트 입경도 온도와 시간에 좌우되기 때문이다.

### 6.2. TTA(Time -Temperature - Austenitizing) 선도

단시간 가열에 의한 강의 오스테나이트화 거동을 해석하는데는 표 5에 나타낸 제 인자를 유기적으로 연결하면 좋지만, 실제의 해석은 복잡하며 쉽지 않다. 여기서 현실적으로 단시간 가열에 의한 오스테나이트화를 수행할 때 사용할 자료로서 작성된 것이 TTA선도이다.

그림 18, 19는 SM45C 강의 전조직(강재를 제조하기 까지 조건에 따름)이 다른 경우의 TTA선도이다. 두 그림을 비교하면 조직제의 하한선이 약간

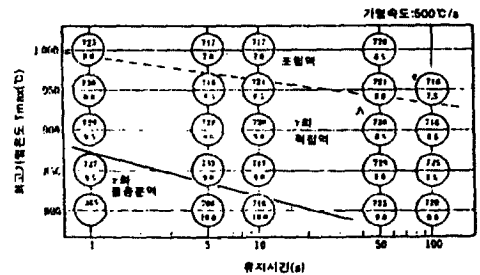


그림 18. 압연상태 SM45C강재의 TTA선도.

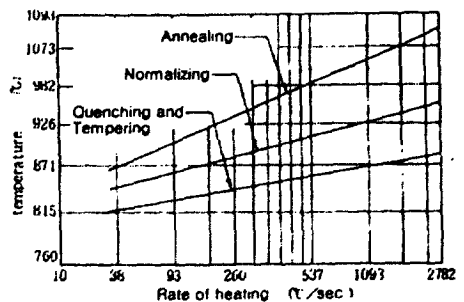


그림 17. 탄소강의 전조직과 Ac<sub>3</sub>이상의 변태를 일으키기 위한 온도와 가열속도.

낮게 되어, 탄소를 비롯한 합금원소가 균일분산하기 위한 이동거리가 짧은 조질재의 오스테나이트화가 빨리 완료하는 것을 알 수 있다.

6.3. 전조직의 영향(탄화물의 고용)

고주파퀀칭은 통상의 노가열 퀀칭과는 달리 가열시간이 매우 짧아 겨우 수 초(秒)정도이다. 이 때문에 탄화물의 고용과 탄소의 확산이 불충분하기 쉽다.  $Ac_3$  및  $Ac_1$  (특히  $Ac_3$ ) 변태점이 통상의 가열에 비해 고온쪽으로 이동하여 페라이트가 잔류하기 쉽다. 또한 가열유지시간이 짧은 것도 탄화물의 고용, 탄소의 확산에는 불리한 상태가 된다.

고주파 퀀칭 전조직에서 탄화물의 석출상태(양, 분포, 크기)에 따라 고주파 가열시 탄화물 고용도에 차이가 발생하며, 탄화물이 크고 고용이 불완전한 경우에는 오스테나이트 중으로의 고용탄소량이 감소한다. 불완전변태에 의해 페라이트가 잔류하면, 페라이트 부분의 침투깊이가 얇아져 경화층 깊이도 알아진다. (그림 20참조)

6.4. 퀀칭조직의 특징

단시간 급속가열에 의한 오스테나이트화로 미세조직이 얻어지는 것은, 가열변태점이 보다 고온측으로 이행하여 변태개시 직후의 오스테나이트의 핵생성 속도가 크게 되며, 급속가열 시간도 포함해 가열시간이 짧기 때문에 결정립이 성장 못한 때문이라고 생각된다. 상변태를 통하여 형성되는 새로운 상의 결정립 크기는 핵생성속도, 성장속도, 모

상의 조직과 입경의 영향을 받아, 핵생성속도와 성장속도의 비가 클수록 미세하게 된다.

7. 고주파 가열에 의한 템퍼링

고주파 퀀칭후의 템퍼링은 주로 가열로에서 하는 일이 많지만, 고주파가열 템퍼링의 in line화는 꽤 많이 보급되어 있다. 고주파가열은 표면가열만이 아니고 기본적으로는 표면부터 중심으로 향하여 온도구배가 발생하여, 거기에 따라 표면근방에서는 경도나 잔류응력이 저하하고, 강도(내마모성, 내피로성)가 저하한다.

이러한 기계적성질의 저하는 템퍼링조건에 따라 달라지지만 그렇게 크지는 않다. 실용적으로는 1~

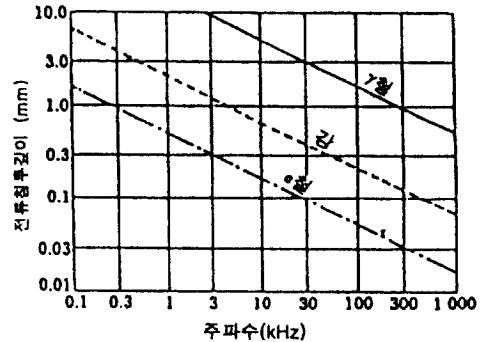


그림 20. 주파수와 침투깊이와의 관계

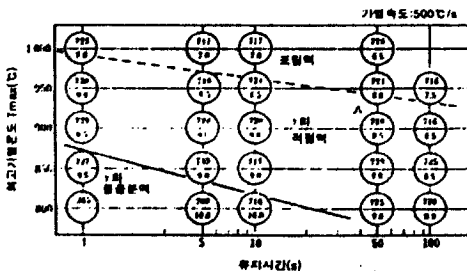


그림 19. 조질상태 SM45C강재의 TTA선도.

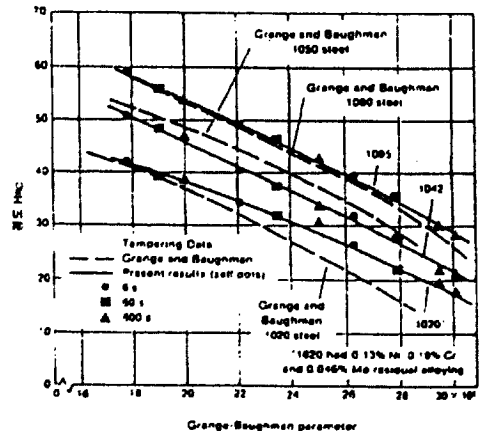


그림 21. 템퍼링변수 P와 경도와와의 관계

3kHz 정도의 낮은 주파수가 고주파 템퍼링에 사용되고 있다.

7.1. 고주파 가열 템퍼링 조건

같은 경도를 얻기 위한 고주파가열 템퍼링온도는 노가열의 가열온도보다 약 100℃정도 높게 한다. 또한 이들 고주파 가열템퍼링, 노가열템퍼링 조건 및 다음에 나타낸 식으로부터 템퍼링변수 P와 경도와의 관계를 구하면, 하나의 템퍼링 곡선으로 정리할 수 있다.

$$P = T(\log t + C)$$

여기서 T는 온도(K), t는 시간(sec), C는 정수이다. 그림 21에 한 예로서 템퍼링변수 P와 경도와의 관계도를 나타내었다.

7.2. 조직의 특징

같은 경도(HRC 53)의 고주파가열과 노가열재의 탄화물의 분포상태와 크기를 측정, 관찰한 결과, 고주파 템퍼링재의 탄화물은 노가열 템퍼링재와

비교하면 입계에서의 석출량이 적고 미세하다.

7.3. 기계적성질의 특징

같은 고주파 퀴칭재를 고주파 템퍼링 혹은 노가열 템퍼링과 비교하면 그림 22에 나타낸 것 같이, 고주파 템퍼링한 것이 보다 뛰어난 연성, Spinning인성, 파괴인성, 내지체파괴성, 내피로성의 경향을 나타낸다.

7.4. 상온에서의 충격특성

그림 23에 나타낸 것 같이 충격치는 경도치가 높아짐에 따라 저하하는 경향은 모두 같지만, 전반적으로 고주파로 처리한 것이 높은 값을 나타낸다. 충격파면의 주사전자현미경상을 보면, 노템퍼링재에서는 이미 HRC 50급에서 입계 파괴가 나타나는 것에 비해, 고주파 템퍼링재에서는 HRC 55급을 넘는 높은 경도에서도 dimple파면을 보여주며 연성파괴를 나타내어 취성의 정도가 다르다.

8. 고주파열처리에서의 변형

근년, 각종 기계부품의 제조공정에서 공정 및 에

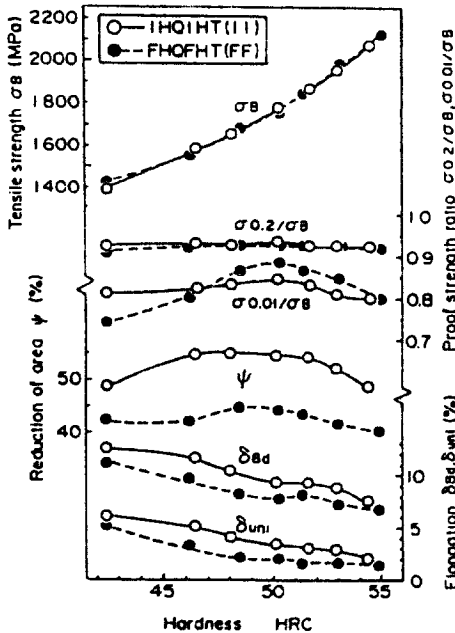


그림 22. 고주파가열과 노가열템퍼링의 기계적성질 비교.

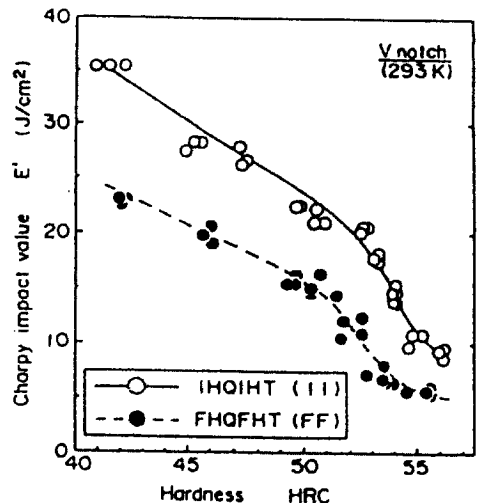


그림 23. 충격치의 비교.

너지 절약, 코스트 절감을 위해서 정밀도 높이기, 품질의 안정화, 열처리 변형 낮추기에 대한 요구가 증가하고 있다. 그 중에도 고주파열처리는 비교적 변형이 작은 것과 보다 더 줄일 수 있다는 기대가 크다. 열처리 변형이라는 것은 고주파 열처리만이 아니고, 물리적 변화에 의해 발생하는 것으로 기본적으로 피할 수 없다. 열처리 변형은 균열, 경도불량 등과 함께 대표적 문제점으로 변형에는 많은 인자가 복잡하게 작용하기 때문에 그 원인 규명을 일반화하기는 어렵다.

8.1. 열처리 변형의 형태

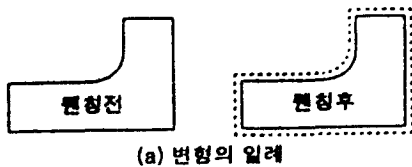
열처리 변형은 그림 24에 나타낸 것과 같이 치수변화와 형상변화로 나눌 수 있다.

- (a) 치수변화는 가열냉각의 열이력·변태(조직변화)에 따른 팽창, 수축에 의해 나타나는 치수변화를 나타낸다
- (b) 변형은 전가공에서 도입된 내부응력의 제거, 고온에서 자체중량이나 외력, 가열냉각시의 온도변화에 따른 내부응력 등에 의해 발생하는 비정상적인 형상변화를 나타낸다.

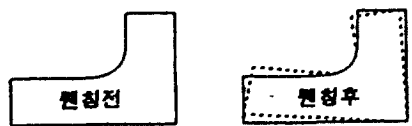
8.2. 치수변화

(a) 퀴칭에 의한 변화

일반적으로 강의 오스테나이트화 가열과정에서는 Aci변태점을 넘으면 조금 수축하지만 전체로는 팽창한다. 그 후의 급냉퀴칭 과정에서는 Ms점까지는 열수축하지만 마르텐사이트 변태에 의해 약간



(a) 변형의 일례



(b) 변형의 일례

그림 24. 퀴칭변형의 모식도.

팽창한다.

(b) 템퍼링에 의한 변화

일반적으로 강의 템퍼링과정에서, 가열온도의 상승과 함께 템퍼링 제1단계에서는 수축하고 제2단계에서는 팽창하며 제3단계에서는 다시 수축한다.

(c) 시효에 의한 변화

탄소량이 많고 퀴칭후에 다량의 오스테나이트가 잔류할경우, 잔류오스테나이트의 마르텐사이트 변태 등에 의해 시효변화를 일으키는 경우가 있다. 잔류오스테나이트를 감소 또는 소멸시켜 변형을 방지하기 위해서는 sub-zero처리 및 다단 템퍼링을 한다.

8.3. 형상변화

(a) 전처리(가공, 열처리)의 영향

퀴칭가열 전의 가공이나 열처리공정에서 피가열물에 내부응력이 가해진 경우 이 응력이 퀴칭가열시에 제거됨으로써 생각하지 못한 변형이 발생하는 경우가 있다. 이것을 제어하기 위해서는 전처리시에 내부응력이 발생되지 않도록 한다. 만약 발생되면, 퀴칭가열의 교정을 동반한 응력제거 어닐링이나 퀴칭가열 중의 응력제거 대책이 필요하게 된다.

(b) 가열의 영향

퀴칭가열의 영향에 대해서는 온도가 불균일함에 따라 가열부위에서의 열변형의 차이, 자체중량에 의한 creep변형에 주의할 필요가 있다. 또한 가열온도가 높게 되면 변형저항이 작아지기 때문에, 고온가열이 필요한 경우 한층 더 주의가 필요하다.

템퍼링가열의 경우도 가열온도는 낮지만 같은 주의가 필요하다.

(c) 냉각의 영향

균일한 가열냉각이 되면 치수변형만을 주의하면 되지만, 현실적으로는 특히 균일냉각이 어려우며, 균열도 주로 불균일 냉각이 원인으로 일어난다.

이상은 열처리변형 전반에 관한 개론이지만, 이하에 고주파열처리변형에 대하여 설명한다.

고주파열처리는 표면가열, 부분가열, 급속단시간가열이기 때문에 일반적으로는 열처리변형이 비교



	가열 냉각시 외주부에서 시공형의 수축한다고 생각되는 외주부의 팽창도	내부의 구속력 에 의한 팽창하는 외주부의 팽창	팽창하는 정도에 대하여
가열			
냉각			
마르텐사이트 변태			

그림 25. 고주파 퀘칭시의 열응력과 변태응력 발생상황.

적 적다. 그러나 열처리변형은 전술한 바와 같이 논리적으로 해석할 수 없기 때문에 변형저감을 위해 나름대로의 해석과 연구가 필요하다.

기본적으로는 가열냉각과정에서의 열팽창수축에 의한 열응력과 조직변화에 의한 변태응력에 의해 유기된다. 그림25에 고주파 퀘칭을 상징하고, 원주의 외주부를 급열급냉한 경우의 열응력과 변태응력 및 그로부터 발생하는 퀘칭변형을 모식적으로 나타내었다.

- ① 열응력형 가열에서는 외주가열부는 팽창, 비가열부는 변형저항이 작은 외주부의 팽창을 구속하여 소성변형시킨 인장형의 열응력.
- ② 열응력형 냉각에서는 고온시에 팽창 억제되는 방향으로 소성변형, 압축응력의 가열부가 비가열부보다 수축, 외주에는 인장, 내부는 압축형의 열응력.
- ③ 변태응력형의 급냉으로 가열부가 마르텐사이트 변태하여 팽창하려고 하지만 비가열부의 구속으로 팽창할 수 없어, 외주에서 압축, 내부에서는 인장형의 열응력이 발생하는 변형의 경향은 그림 25와 같이 된다. 이 외주부의 압축응력은 고주파 퀘칭의 특징이다.

## 9. 열처리변형대책

### 9.1. 강재의 영향

변형은 부하응력이 재료의 소성변형한계(탄성한)를 넘는 경우에 발생하기 때문에, 기본적으로는

탄소강보다 탄성한계가 높은 합금강이 변형이 적다. 또한 같은 강종에서는 탄성한계가 높은 소재조직, 예를 들어 구상 시멘타이트보다 페라이트면적이 작은 페라이트+펄라이트 조직이나 조질(템퍼링마르텐사이트)하는 편이 변형은 적다

### 9.2. 전처리의 영향

#### (a) 전가공의 영향

표 6은 축류의 구부러짐에 미치는 전가공의 영향을 나타낸 것으로, 압연재, 퀘칭템퍼링재, 교정가공한 것에 대해 조사한 자료이다. 압연재, 조질재의 굽은 변형은 매우 작은 것에 비해, 교정가공한 것은 매우 크다. 이것은 압연시, 템퍼링시의 가열에 의해 내부응력이 거의 제거된 것에 비해, 교정재에는 내부응력이 잔류하고 있어 퀘칭시에 굽는 것으로 나타났기 때문이라고 생각된다. 전가공에 기인한 변형 줄이기에는 교정에 따른 응력 제거 어닐링이나 가열중의 교정이 유효하다.

#### (b) 전조직의 영향

급속 단시간 가열 오스테나이트화 퀘칭에서는 같은 강종이라도 전조직(시멘타이트의 형태나 페라이트의 형태, 면적율 등)이 다르게 되면 가열조건을 달리하여야 최적의 오스테나이트화가 가능하다. 또한 그에 따른 변형도 달라진다. 우선 전조직을 같게 한 후 오스테나이트화 조건을 일정하게 하면 변형도 안정하게 된다.

### 9.3. 가열공정의 영향

변형을 줄이기 위해서는 균일 가열이 기본이고, 요구되는 성질을 만족하는 범위에서 저온 단시간 가열로 오스테나이트화를 시도하는 것이 바람직하다.

#### (a) 퀘칭 방법의 영향

일발 또는 이동 퀘칭 중에서 어느 쪽이 변형을 줄이는가는 부품의 형상, 요구되는 성질, 가열부위, 부품의 크기와 장치의 출력 등 종합적인 판단이 필요하므로 한마디로 결론지을 수가 없다.

표 6. 재료의 이력이 변형에 미치는 영향.

화학성분	C	Si	Mn	F	S	Ni	Cr	Cu
	0.47	0.32	0.70	0.015	0.015	0.08	0.26	0.18
전 가 공	기호	크기						
	N	28 $\phi$ × 300						
	H	켈칭 : 850 × 15min. 수냉 템퍼링 : 500 × 1.0 hr 경도 : HBN Dia. 3.7-3.8						
	B	굽힘가공 : 지지점 간격 : 175mm 굽힘경도 : +10/300mm 교정 : -1/300mm 켈칭 : 850 × 15min. 수냉 템퍼링 : 500 × 1.0 hr 경도 : HBN Dia. 3.7-3.8						
고주파 켈칭	출력 : 65kW 이동속도 : 5mm/sec 회전 : 200rpm 단면의 경화층 깊이 : 표면에서 3.3mm (Hv 450)							
열 처 리  변 형		기계가공 후 중앙부 휨 (1/100)	고주파 켈칭 후 중앙부 휨 (1/100)	템퍼링 후 중앙부 휨 (1/100)				
	H	3.6	2.7	5.7				
	N	2.0	5.0	6.0				
	B	2.2	188.2	188.8				
B는 굽힘 가공 후 조절처리한 것으로, 고주파 켈칭으로 인해 조절 전에 굽은 방향으로 다시 더 굽은 결과이다.								

(b) 축류의 변형

직경이 작고 길이가 긴 부품의 이동 켈칭에는 수직형의 변형이 생기기 쉬우므로, 보통은 수평형이 이용되는데, 이 경우에도 피가열물이 코일 및 냉각 jacket과 축의 중심을 정확하게 맞추거나 물러의 적절한 배치에 의해 자중 크립을 억제하고, 이 송속도를 일정하게 하는 등, 가열조건의 안정대책이 필요하다. 그림 26은 수평형 이동 켈칭에서 물러의 효과를 나타내는 데이터로서, 굽은 정도가 켈칭 전보다 감소하고 있으며, 자중 크립만이 아니라 프레스 켈칭과 동등한 굽힘억제 효과가 있는 것을 알 수 있다.

(c) 가열시간의 영향

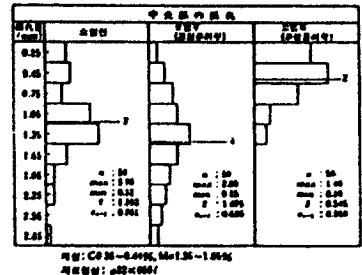
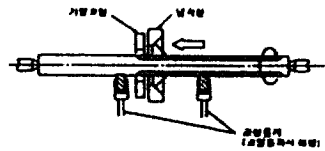


그림 26. 평형 이동 켈칭에서 물러의 변형방지효과.

변형이 문제가 되는 부품에는 가능한 단시간의 급속가열이 바람직하므로, 그만큼 출력의 고주파 가열장치가 필요하게 되어 설비면이나 코스트 및 설치면적 등을 고려할 때 쉽지는 않다.

(d) 가열범위, 순서의 영향

표면가열, 부분가열을 이용하여 비대칭 퀘칭을 할 경우, 변형되기 쉬운 일이 있다. 그림 27에 각주(SM45C,  $\phi 15\text{mm}$ , L500mm)의 평면을 고주파퀘칭한 경우의 경화층 깊이와 굽힘과의 관계를 나타내었다. 굽힘은 퀘칭면에 발생하여, 경화층 깊이가 깊으면 증가하여, 이 굽힘을 저감시키기 위해서는 동시에 반대면을 퀘칭하면 효과적이다. 또한 크랭크 샤프트에서는 핀부나 저널부를 단순히 한쪽부터 순서대로 퀘칭하지 않고 변형이 최소가 되도록

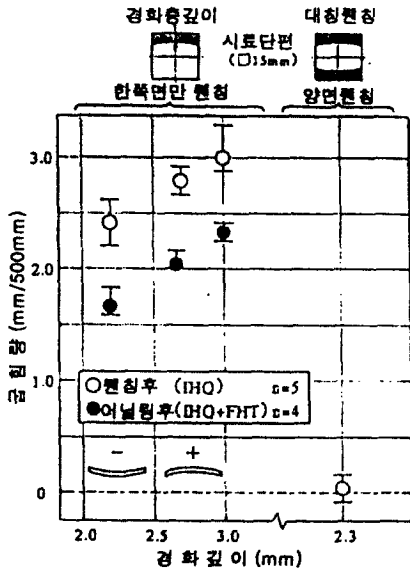


그림 27. 각주(사각봉)에서 경화깊이와 굽힘량.

퀘칭순서를 바꾸고 있다

(e) 냉각공정의 영향

균일냉각이 기본으로 냉각제, 냉각방법을 잘 생각하여 분사 냉각용 자켓을 사용하는 경우와 그 분사공의 장소, 크기, 수, 각도 등을 냉각제의 출구 방향과 냉각후의 흐르는 방향을 예측하여 설계할 필요가 있다.

고분자(polymer) 퀘칭 냉각제를 사용하는 경우 그 종류, 농도에 따라 변형에 미묘한 영향을 미치므로 냉각능의 확실한 관리가 필요하다.

한편 냉각제의 농도가 높아지면, 예를 들어 봉상에서는 직경이 약간 커지는 경향이 있기 때문에 이것을 이용하여 직경을 조금 크게 하고 싶을 때는 냉각제의 농도를 약간 높게(경도저하에 주의) 하고, 작게 하고 싶을 때는 조금 낮게(균열주의) 하는 경우도 있다.

(f) 템퍼링 가열의 영향

고주파 퀘칭제를 노가열 또는 고주파(저주파) 템퍼링하는 경우도 전술한 바와 같은 기본적인 템퍼링 변형은 발생하지만 절대치는 퀘칭변형에 비해 작다.

참고문헌

- 1) 東京電力株式會社 電氣 加熱技術協會 : 誘導加熱, 1982
- 2) 電氣興業株式會社 : 電興技報, No. 25 - 29, 1991-5
- 3) 川崎 : 工業加熱, 33(1), 1996
- 4) 小泉 : 工業加熱, 25(6), 1988
- 5) 星 : 熱處理大學講座, 日本熱處理技術協會, 1996