

講演

열처리 변형*

황 능 문

한국 표준 연구소 재료연구실

1. 서 론

변형은 모든 열처리과정에서 일어나는 현상으로 열처리불량의 가장 큰 원인이 되고 있다. 변형은 담금질과정 중에만 일어난다고 생각하기 쉬우나 잔류응력이 존재하는 재료의 가열과정 중에, 유지할 때의 크립에 의해, 뜨임시 카아바이드 생성과 서브제로 처리시의 잔류오오스테나이트의 변태 등에 의한 변형이 있다. 여기서는 이러한 변형의 원인과 양상, 그리고 대책에 관하여 다루고자 한다.

먼저 변형은 치수변화와 형상변화의 두 종류로 나눌 수 있다. 치수변화는 열처리에 의하여 미세조직이 바뀌기 때문에 생기는 것이고 형상변화는 재료가 항복강도 이상의 응력을 받아 소성변형이 되어 생기는 것이다. 따라서 형상변화가 일어난 경우는 반드시 어떠한 응력이 작용하였음을 의미한다. 이러한 응력은 냉각시 재료의 각 부분의 온도차이에 의한 부피 차이에 따른 열응력과 상변태응력으로 인한 것이다. 이때 발생한 응력이 항복강도 이상이면 형상변화가 일어나고 인장강도 이상이면 균열이 발생한다.

2. 상변태가 강의 부피변화에 미치는 영향

가열과정에는 페라이트에서 오오스테나이트로 상변태가 일어나고 냉각과정에는 오오스테나이트에서 페라이트로 역변태가 일어난다. 이러한 상변태가 변형에 관여하는데 그 양상은 그림 1의 길이변화곡선을 통하여 알 수 있다. 여기서 각 곡선은 가열과 냉각 중 강의 길이의 변화를 온도에 따라 나타낸 것이다.

A_1 온도로 가열되는 과정에서 페라이트로 있던 강은 페라이트의 선팽창계수 $\mu = 0.00012$ 의 기울기로 팽창한다. A_1

과 A_3 온도사이에서는 페라이트에서 오오스테나이트로 변태가 일어나 수축한다(이 이유는 페라이트는 원자 충전율이 0.68인 BCC 구조이고 오오스테나이트는 원자 충전율이 0.74인 FCC 구조이기 때문이다). 일단 강이 A_3 이상에서 완전히 오오스테나이트가 되면 계속 팽창하게 되는데 이 때의 기울기는 오오스테나이트의 선 팽창계수 $\mu = 0.00026$ 으로 결정된다. 냉각이 되면 그 반대가 되어 온도강하에 따라 오오스테나이트 상태에서 수축하다가 변태시 팽창하고 변태가 끝나면 다시 페라이트 선팽창계수의 기울기로 상온까지 수축한다.

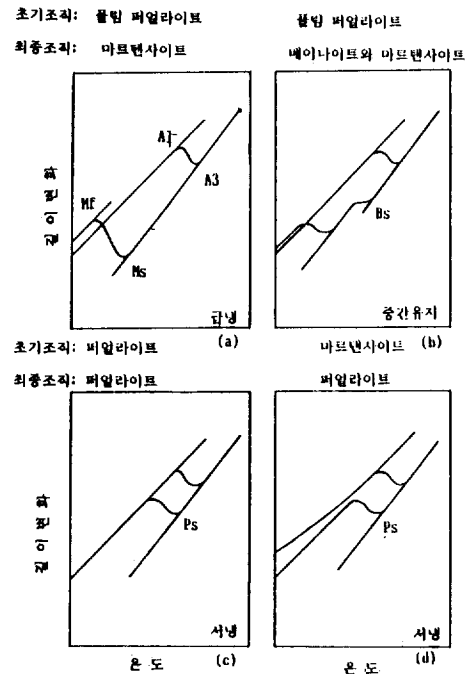


그림 1 가열과 냉각에 따른 길이변화 곡선

*1988. 3. 5. 창립총회에서

강이 불림과 풀림이 된 상태에서 즉 퍼얼라이트 상태에서 오오스테나이트로 가열된 후 담금질이 되어 완전히 마르텐사이트가 되면 그림 1(a)와 같이 부피증가가 일어난다. 이것은 마르텐사이트가 퍼얼라이트보다 비용적(단위 무게당 부피, 즉, 밀도의 역수이다)이 더 크기 때문이다(표 1 참조). 이때 부피는 대략 0.3~1.0%정도 커지고, 길이는 그 1/3인 0.1~0.33%정도 팽창한다. 냉각속도가 이보다 느려 퍼얼라이트나 베이나이트가 되면 재료의 팽창은 감소한다(그림 1(b)). 만일 최종미세조직이 초기미세조직과 정확히 같다면 전반적인 부피변화가 없을 것이다(그림 1(c)). 반면에 초기조직이 마르텐사이트인 재료를 A₃이상으로 가열한 후 서냉하여 최종조직이 퍼얼라이트가 되면 수축이 일어날 것이다(그림 1(d)).

열처리에 의하여 금속조직의 비용적이 V₁에서 V₂로 변화한 경우, 그때의 체적변화 ΔV/V는 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100(\%) \quad (1)$$

표 1에 강의 각 조직의 비용적에 관한 데이터가 나와 있다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 오오스테나이트에서 마르텐사이트로 변화하는 경우가 제일 칫수팽창이 크고 베이나이트로 변화하는 경우는 대략 그 1/3, 퍼얼라이트 변태인 경우는 그 1/4로 칫수팽창이 감소한다. 또 마르텐사이트와 베이나이트 변태에 따른 팽창은 표 2와 같이 강의 C%가 증가함에 따라 커진다. 표 1의 베이나이트는 편의상 페라이트와 ε-탄화물의 혼합상태로 생각한 것이다. 또 오오스테나이트, 마르텐사이트의 비용적을 구하는 %C는 이것들에 고용되어 있는 탄소량의 중량%이다. 즉, 0.5%C의 마르텐사이트의 비용적은 (0.1271 + 0.00265 × 0.5)cm³/g이 되고, 1.0%C의 오오스테나이트의 비용적은 (0.1212 + 0.0033 × 1.0)cm³/g이 된다. 따라서 이러한 %C는 강의 탄소함유량

표 1 강의 조직성분의 비용적

조직명	C %	비용적 cm ³ /g (20 °C)
오오스테나이트	0 ~ 2	0.1212 + 0.0033 × % C
마르텐사이트	0 ~ 2	0.1271 + 0.0025 × % C
페라이트	0 ~ 0.02	0.1271
세멘타이트	6.7 ± 0.2	0.130 ± 0.0001
ε-카아바이드	8.7 ± 0.7	0.140 ± 0.0002
그래파이트	100	0.451
페라이트+세멘타이트	0 ~ 2	0.1271 + 0.0005 × % C
0.25 % 마르텐사이트 + ε-카아바이드	0 ~ 2	0.12776 + 0.0015 × % C
페라이트 + ε-카아바이드	0 ~ 2	0.1271 + 0.0015 × % C

표 2 탄소강의 담금질에 따른 칫수 변화

반응 (조직변화)	용적 변화 (%)	길이변화 (in/in)
(1) 퍼얼라이트 → 마르텐사이트	1.69 × % C	0.0056 × % C
(2) 퍼얼라이트 → 오오스테나이트	-4.64 + 2.21 × % C	-0.0155 + 0.0074 × % C
(3) 마르텐사이트 → 오오스테나이트	0.22 - 0.88 × % C	
(4) 오오스테나이트 → 마르텐사이트	4.75 - 0.53 × % C	0.0155 - 0.0018 × % C
(5) 오오스테나이트 → 하부베이나이트	4.64 - 1.43 × % C	0.0155 - 0.0048 × % C
(6) 퍼얼라이트 → 하부베이나이트	0.78 × % C	0.0026 × % C
(7) 오오스테나이트 → 상부베이나이트	4.64 - 2.21 × % C	0.0155 - 0.0074 × % C

의 분석치(%Ct)와는 반드시 일치하지 않는다. 그 이유는 담금질 후 세멘타이트가 마르텐사이트 혹은 오오스테나이트와 공존하고 있다면, 탄소의 일부는 세멘타이트로 화합하고 있기 때문에, 마르텐사이트 혹은 오오스테나이트에 고용되어 있는 탄소량(%C)는 %Ct보다도 작은 값이 된다. 이러한 마르텐사이트 혹은 오오스테나이트와 공존하는 세멘타이트의 용적 %를 Vc로 하면, %C와 %Ct 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\%C = \frac{\%C_t - 0.067 V_c}{1 - 0.01 V_m} \quad (2)$$

페라이트와 세멘타이트의 혼합조직, 또는 베이나이트의 비용적을 구하는 경우의 %C는 그 강의 탄소함유량을 사용한다. 이것은 탄소함유량이 증가하면, 세멘타이트 혹은 베이나이트 중의 ε-탄화물의 양이 탄소량에 비례하여 증가한다고 생각되기 때문이다.

표 1과 식 (1)로 부터 금속조직의 변화에 의한 체적변화를 구한 결과가 표 2이다. 표 2는, 뜨임상태의 1%C 강이 담금질에 의하여 마르텐사이트 만의 조직이 되면 1.69%의 체적팽창이 일어나고, 담금질에 의하여 오오스테나이트 만의 조직이 되었다고 한다면 $-4.64 + 2.21 = -2.43$, 즉 2.43%의 체적수축이 일어나는 것을 나타내고 있다. 또 탄소가 1% 고용된 마르텐사이트를 뜨임하여, 0.25%C 마르텐사이트와 ε-탄화물의 혼합조직 상태로 만든 경우에는, 0.66%의 체적수축이 일어나는 것도 알 수 있다.

표 2를 사용하여, 탄소함유량 1%의 탄소강을 담금질과 뜨임 할 때의 체적변화의 예를 구하면 다음과 같다.

(i) 마르텐사이트 87.5%, 잔류 오오스테나이트 10%, 미고용 세멘타이트 2.5%의 담금질조직이 얻어진 경우 :

1%의 강으로 2.5%의 세멘타이트가 잔류하므로, 마르텐사이트 및 오오스테나이트에 고용되어 있는 탄소량(%C)은 식 (2)에 의하여

$$\%C = \frac{1.0 - 0.067 \times 2.5}{1 - 0.01 \times 5} = 0.85\% \quad (2)$$

으로 된다. 따라서 이와 같은 담금질조직일 때의 체적변화 ($\Delta V/V$)는, 표 2의 (1)의 변화와 (2)의 변화의 합으로 표시되어,

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{87.5}{100} (1.69 \times 0.85) +$$

$$\frac{10}{100} (-4.64 + 2.21 \times 0.85) \\ = 1.257 - 0.276 \approx 0.98\%$$

즉 이 경우는 0.98% 팽창되는 것을 알 수 있다.

(ii) 상기의 담금질조직의 강이, 뜨임처리에 의하여 저탄소 마르텐사이트와 ε-탄화물의 혼합조직이 된 과 동시에, 잔류 오오스테나이트가 5%로 감소한 경우 :

이때의 체적변화($\Delta V/V$)는 (a) 마르텐사이트가 표 2의 (3)의 변화를 한 것의 ($\Delta V/V$)_M과 (b) 오오스테나이트가 표 2의 (4)의 변화를 하고 또 (3)의 변화를 한 것의 ($\Delta V/V$)_A의 합으로 표시된다. 따라서

$$\frac{\Delta V}{V_M} = (0.22 - 0.88 \times 0.85) \times \frac{87.5}{100} \\ = -0.462(\%) \\ \frac{\Delta V}{V_A} = [(4.75 - 0.53 \times 0.85) + (0.22 - 0.88 \times 0.85)] \times \frac{5}{100} = 0.215\% - 0.0264\%$$

따라서, 뜨임에 의한 체적변화($\Delta V/V$)는,

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta V}{V_M} + \frac{\Delta V}{V_A} \\ = -0.462 + (0.215 - 0.0264) = -0.273\%$$

즉, 이 강은 뜨임에 의하여 0.273% 수축하는 것이 된다. 만일 (i)과 (ii)의 담금질과 뜨임을 연속으로 행하였다면, 이 강은 $0.98 - 0.27 = 0.71\%$ 의 체적팽창을 하는 것이 되어, 길이변화로서는 그 1/3인 0.24% 정도의 팽창이 일어나게 된다.

이상과 같이, 탄소강의 열처리변형 특히 담금질과 뜨임에 의한 변형은, 그 금속조직의 상태가 판명되면 거의 추정할 수 있다. 금속조직의 상태는 현미경에 의하여 대개 알 수 있고, 경우에 따라서는 X-선시험을 사용하여 판정한다.

일반의 강의 담금질조직에는 마르텐사이트 이외에 오오스테나이트, 탄화물이 공존하고 있고, 이들의 존재량의 비율은 냉각조건에 따라 현저히 변화한다. 표 3 및 표 4는 고탄소강 및 베어링강의 담금질조직을 나타낸 예이다. 즉, 동일한 강에서도 담금질온도가 정해지면 미용해 탄화물의 양은 정해지지만, 냉각방법에 의하여 잔류 오오스테나이트의 양, 마르텐사이트의 양은 상당히 차이가 난다. 또 서브세포

처리에 의하여, 잔류 오오스테나이트는 완전히 소실되지는 않지만, 현저하게 감소된다. 담금질온도, 냉각조건이 동일 하여도, 강의 화학성분이 다르면 담금질조직은 크게 변화하며, 그 양상은 표 4에 의하여 명확하게 알 수 있다.

이와 같은 담금질조건에 따라 담금질변형이 어떻게 변화하는가를, 다시 표 2의 수치를 사용하여 검토하여 보면 다음과 같다. 표 5는 1.0% C의 탄소강에 대하여, 담금질변형에 미치는 잔류 세멘타이트양의 영향을 계산한 것이다. 담금질조직에 미용해 세멘타이트가 잔류하는가 안하는가는 담금질온도가 높을가 낮을가에 따라 좌우된다. 표 5에 의하면 잔류 세멘타이트양이 2.5%일때와 5.0%일 때는, 마르텐사이트에 고용된 탄소량은 각각 0.85%와 0.70%로 되고, 이 정도에서는 마르텐사이트의 경도에는 거의 영향이 없다. 그리고 어떠한 경우에도 H_RC 64~65 정도의 경도가 얻어진다. 그러나 담금질변형에는, 양자사이

에 커다란 차이가 있는 것에 주의하여야 한다.

표 6은 1.0%의 탄소강의 담금질 변형량에 미치는 잔류 오오스테나이트 양의 영향을 계산한 것이다. 이 예에서는 잔류 세멘타이트의 양이 일정하고, 잔류 오오스테나이트의 양만이 변화하였지만, 표 6에 나타난 바와 같이 잔류 오오스테나이트가 5%정도 감소하거나 증가하거나 하면, 체적은 약 20%의 차이가 난다.

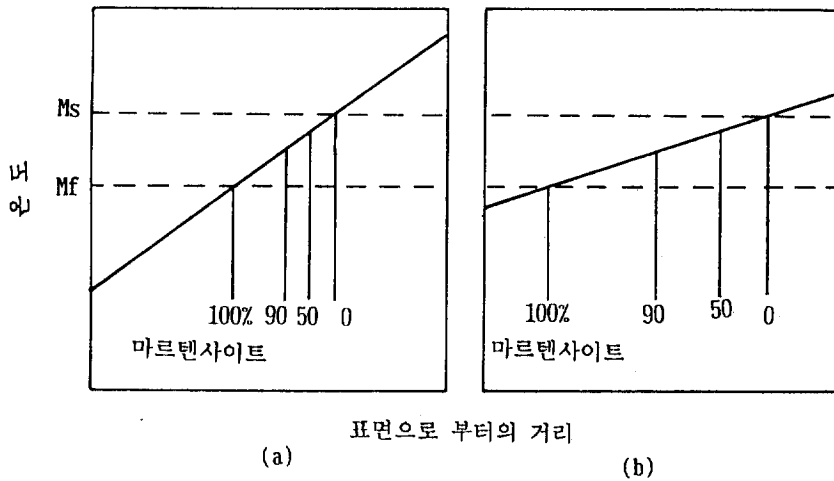
표 3의 실험결과로부터 알 수 있듯이, 1.07% C 강에서는 53℃의 물에 담금질할 때와 20℃의 물에 담금질할 때는, 같은 담금질온도라도 잔류 오오스테나이트의 양이 약 5% 차이가 난다. 냉각수의 근소한 온도차이로 금속조직에 현저한 차이가 일어나고, 이것이 담금질시의 변형에 크게 영향을 미친다는 사실은, 앞에서 설명한 담금질온도의 고저로 잔류 세멘타이트의 양의 차이에 의한 담금질변형량이 달라진다는 사실과 함께 실제 조업시 반드시 염두에 두어야 한다.

표 3 강의 냉각조건과 조직

강 재 가열조건	냉 각 조 건	담금질경도 (HRC)	조직성분 (Vol. %)		
			잔류오스테나이트	마르텐사이트	미용해탄화물
1.07% C 강 790°C × 30 min	53°C의 물에 담금질	65.9	14.1	83.3	2.6
	20°C의 물에 담금질	67.0	9.0	88.4	2.6
	동상, -196°C 서브제로	68.0	2.9	94.5	2.6
1.0% C 1.5% Cr 0.2% V 베어링강 843°C × 30 min	230°C의 염욕에 담금질	64.0	10.6	85.4	4.0
	120°C의 기름에 담금질	64.4	9.5	87.0	4.0
	52°C의 기름에 담금질	64.9	9.0	87.0	4.0
	20°C의 기름에 담금질	66.5	7.0	89.0	4.0
	동상, -196°C 서브제로	67.0	2.0	94.0	4.0

표 4 1.1% C 강의 가열온도와 담금질조직

크롬함유량 (%)	조직성분 (Vol. %)					
	845°C	물담금질	925°C	물담금질	1040°C	물담금질
	오스테나이트	탄화물	오스테나이트	탄화물	오스테나이트	탄화물
0	16	0.5	20	0	20	0
1.5	7	4.5	22	1.6	31	0
2.8	2	6.9	21	3.5	51	1.1



표면으로 부터의 거리
(a) 큰 온도구배와 (b) 작은 온도구배에 따른 미세조직의 분포
그림 2 (a) 큰 온도구배와 (b) 작은 온도구배에 따른 미세조직의 분포

기체부품의 담금질시에 항상 일정량의 변형이 일어나면, 이것을 예측하여 공작척수가 정하여지고, 열처리 후의 연마 마무리를 최소로 할 수 있다. 그러나 실제 작업에서 이것이 순조로이 되지 않는 것은 열처리 전의 강의 금속조직성분의 상대적인 양이 민감하게 변화하고, 그에 따라 체적변화도 함께 증감하는 것이 주된 원인이라 볼 수 있다.

3. 변형

앞에서의 강의 각 조직이 각기 다른 비용적을 갖고 있기 때문에 생기는 재료의 열처리 후의 부피변화를 논하였다. 이러한 부피변화가 재료에 일정하게 일어난다면 척수변화는 일어나지만 형상변화는 일어나지 않는다. 실제 공정에서 문제되는 것은 척수변화보다는 형상변화이다. 앞에서 설명한 바와 같이 이러한 형상변화는 주어진 온도에서의 재료의 항복강도 이상의 응력이 작용하였음을 의미한다. 이러한 응력

발생의 원인은 가열과 냉각시 재료의 각 부분의 온도차이다.

온도구배에 의하여 재료의 각 부분에 부피구배가 생기게 된다. 이러한 부피구배에 의한 응력은 재료가 그 온도에서의 탄성영역으로 극복할 수 있으면 형상변화를 야기하는 소성변형은 일어나지 않을 것이다. 따라서 부피구배가 작으면 그 응력이 탄성영역 안에 포함되어 소성변형이 일어나지 않는다. 모든 부피구배에 의한 응력이 완전히 탄성영역 안에 들어갈 때 잔류응력도 발생하지 않는다. 그러나 온도구배가 크면 부피구배가 크게 되어 탄성영역을 벗어나 소성변형이 일어난다. 이때 탄성영역이 좁고 항복강도가 작은 고온에서는 쉽게 소성변형이 일어나고 탄성영역이 넓고 항복강도가 큰 저온에서는 소성변형이 일어나지 않고 고온의 소성변형의 응력과 부호가 반대인 잔류응력이 발생한다.

상변태에 의한 변형도 마찬가지이다. 즉 온도구배에 의하여 상변태가 일어난 부분과 상변태가 일어나지 않은 부분은

표 5 1.0%C 강의 담금질조직과 담금질변형(I)

담금질조직 (Vol. %)		마르텐사이트에 고용하는 탄소량 (% C)	담금질변형(%)	
마르텐사이트	잔류오스테나이트		체적	길이
100	0	1.0	1.69	0.56
97.5	2.5	0.85	1.40	0.47
95	5.0	0.70	1.12	0.37
92.5	7.5	0.54	0.84	0.28

표 6 1.0%C 강의 담금질조직과 담금질변형(II)

담금질조직 (Vol. %)			담금질변형(%)	
마르텐사이트	잔류오스테나이트	잔류세멘타이트	체적	길이
97.5	0	2.5	1.40	0.47
92.5	5	2.5	1.19	0.40
87.5	10	2.5	0.98	0.33
82.5	15	2.5	0.77	0.26

부피구배가 생기고 이 부피구배가 탄성영역을 벗어나면 소성변형이 일어난다. 그림 2는 이러한 온도구배에 따른 상변태의 구배를 나타내고 있다. 상변태 구배로 인한 부피 차이는 대개 항복 강도를 초과하는 크기의 상변태 응력을 야기하기에 충분하다. 이러한 응력은 소성변형에 의하여 흡수되므로 결국 변형이 일어난다.

한편 상변태과정에는 재료의 항복강도 자체가 변태에 의하여 생성되는 상의 핵을 둘러싸고 존재하는 미세응력에 의하여 감소된다. 예를 들어, 오오스테나이트 핵을 둘러싼 정수압 압력은 약 370 N/nm^2 정도 된다고 알려져 있는데 오오스테나이트의 항복강도는 상변태 중에는 약 7 N/nm^2 으로 떨어진다는 보고가 있고 마르텐사이트 변태과정에서 재료가 급격히 변화된다는 보고도 있다. 가열이나 냉각 중 상변태에 의한 변형은 비교적 쉽게 발생하고 이 때 응력은 상변태응력과 열응력의 큰 응력일 수도 있고 새로운 상 둘레의 응력과 같이 미세응력일 수도 있다.

치수변화를 예측하기 위해서는 각 상의 비용적을 알고 있으므로 열처리 후의 미세조직을 예측하면 된다. 따라서 CCT 곡선과 미용해 탄화물 및 잔류 오오스테나이트 등을 고려하면 어느정도 정량적인 예측이 가능하다. 그러나 형상변화를 예측하려면 냉각시 재료의 각 부분의 시간에 따른 온도분포를 알아야 한다. 이 때 각 부분의 온도차이로 인하여 발생하는 열응력과 상변태응력이 그 온도에서의 재료의 항복강도보다 크면 형상변화가 일어난다. 따라서 형상변화를 조절하는 것이 치수변화를 조절하는 것보다 훨씬 어려운 일이다. 그러나 치수변화가 작을 경우, 형상변화도 작으므로 치수변화에 대한 지식도 형상변화를 조절하는데 중요한 변수가 된다.

4. 변형의 제어

4.1 가열시

첫째, 기계가공이나 전 열처리에 의하여 발생한 잔류응력은 응력제거 풀림으로 제거하여야 한다. 둘째, 가열은 천천히 그리고 균일하게 하여야 한다. 발열체에 가까운 부분은 복사열을 받게 되어 반대편보다 가열속도가 빠르게 된다. 따라서 적당한 가리개를 설치하여 복사에 의한 가열을 피하고 대류에 의한 가열이 되도록 한다. 셋째, 재료의 두께가 균일하지 않으면 얇은 부분은 열용량이 작아 빨리 가열되고 두꺼운 부분은 열용량이 커서 서서히 가열되어 온도구배가 생기게 되므로 다른 디자인으로 개선하거나 진흙 등

을 발라 열용량이 비슷하게 된다. 이러한 불균일한 형상 문제는 냉각시도 크게 문제가 된다.

4.2 유지시

용체화처리 온도에서 크립은 상온의 항복강도의 1/100 정도에서도 일어나므로 자중에 의한 모멘트에 의하여 변형이 일어난다. 따라서 자중에 의한 크립 방지를 위하여 수직 방향으로 매달고 수평으로 놓을시에는 적당하게 지지하여 자체 모멘트를 최소화 하여야 한다.

4.3 냉각

4.3.1 재료선택

요구되는 경도와 강도에 따라 재료마다 요구되는 냉각속도가 달라진다. 예를 들어 최후의 표면경도가 $40 \sim 50 \text{ HRC}$ 가 요구되는 부품이 있다고 할 때, SAE 1045 강을 사용하면 수냉이나 염수냉각 등을 하여야 요구되는 경도가 얻어진다. 이러한 경우 냉각속도가 너무 빨라 반드시 변형이 수반된다. 따라서 변형을 막으려면 프레스냉각을 하여야 한다. 만약 8645 H 강을 사용하였다면 같은 경도치를 얻기 위하여 유냉을 할 수 있어 변형이 감소된다. D-6 강을 사용하면 오스텝퍼링을 할 수 있어 변형을 더욱 줄일 수 있다. 또한 크기가 작은 탄소강이나 9% 니켈강과 같이 경화능이 좋은 것은 가스나 공기에 의한 냉각에 의하여도 경화가 되므로 거의 변형을 야기시키지 않을 수 있다.

4.3.2 부품의 형상

부품의 각 부분의 두께가 일정하더라도 비대칭이면 변형이 생긴다. 기하학적 모양이 대칭이어야 할 뿐만 아니라 열이 대칭적으로 제거되어야 한다. 예를 들어 기하학적으로 대칭인 파이프모양의 강을 담금질할 경우 파이프 내부의 냉각수는 유동이 잘되지 않으므로 파이프의 내부가 외부보다 냉각속도가 느리게 된다.

또한, 부품의 두께가 일정하고 모양이 대칭적인데도 변형을 피할 수 없는 경우가 있다. 첫째, 단면적은 작고 길이가 긴 봉의 경우 길이를 L , 직경을 d 라 할 때, $L > 5d$ 이면 수냉, $L > 8d$ 이면 유냉, $L > 10d$ 이면 오스텝퍼링에 의하여 각각 변형이 생긴다. 둘째, 두께에 비하여 단면적이 큰 경우로 단면적을 A , 두께를 t 라 할 때, $A > 50t$ 이면 변형이 생긴다.

한편, 부품의 표면상태가 변형에 중요한 영향을 미치게 되는데 스케일과 탈탄이 주된 인자이다. 표면에 스케일이 있으면, 그 부분에서 공기가 빠져나오지 못하여 냉각속도를 현저하게 감소시킨다. 이것은 특히 니켈 함유 강에서 문제가 된다. 또한 탈탄이 되면 그 부분이 내부보다 고온에서 변

태가 되고 경화능이 낮아진다.

4.3.3 냉각제

냉각제로는 물이 가장 널리 사용되지만 물은 온도가 올라가면 냉각능이 떨어지는 단점이 있다. 20℃의 물의 냉각능을 1이라 하고 다른 냉각제의 냉각능을 비교하면 다음과 같다.

0℃물 → 1.06

25℃물 → 0.72

50℃물 → 0.17

파라핀 오일 → 0.18

물과 10% 수용성기름 → 0.11

따라서 물에 의한 냉각은 교반이 매우 중요하다. 다량의 작은 부품은 분무냉각이 바람직하다. 염수에 의한 냉각으로 교반이 잘 안되는 수냉보다 더 일정한 냉각조건을 얻을 수

있다. 기어와 같은 대부분의 정밀가공부품은 유냉을 한다.

4.3.4 오스템퍼링

오스템퍼링은 M_s 바로 위의 온도로 유지되는 염욕에 급냉하는 방법으로 하부 베이나이트조직을 얻는 것이 목적이다. 이러한 조직은 인성도 좋고 뜨임된 마르텐사이트와 거의 같은 경도가 얻어진다. 또한 오스템퍼링은 냉각속도를 줄이고 베이나이트 변태의 부피변화가 작기 때문에 변형이 적다.

이 처리의 단점은 잔류 오오스테나이트가 많이 생긴다는 것이다. 잔류 오오스테나이트는 사용 중에 변태되어 뜨임되지 않은 마르텐사이트가 생성되기 때문에 취성을 야기하므로 피하는 것이 좋다. 따라서 오스템퍼링은 탄소강이나 Cr, Mo 합금강에는 적합하지만, Mn이나 Ni이 주된 합금원소로 들어간 강은 잔류 오오스테나이트 생성이 잘 되는 관계로 부적합하다.