

현장기술 초심자를 위한 열처리의 기초(제 3보) -퀸칭 변형과 퀸칭균열-

정병호 · 김무길
부경대학교 신소재공학부

Heat Treatment of Steel for Beginners(3) -Distortion and Quench Cracking-

B. H. Jung and M. G. Kim

Div. of Material Science & Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

4. 퀸칭변형과 퀸칭균열

4.1 열처리 결함의 종류

강 부재에 열처리를 실시하면 표 1[1]과 같은 여러 가지 열처리 결함이 생길 수 있다. 이러한 결함은 주로 ①열처리 설비의 고장이나 열처리 작업의 잘못, ②원래 부재에 존재한 결함(소재의 편석, 비금속 개재물, 미세 균열 등의 내부 결함 또는 부재 표면의 상처 등 외부 결함), ③제조 조건(강종, 부재 형상, 가공, 열처리 등)의 부적절한 선택 등에 기인하여 생긴다. 안정된 열처리 공정에서 돌발적으로 생기는 열처리 결함은 ①이나 ②가 원인이 되는 일이 많다. 이에 비해 특정한 부재에서 빈번히 발생하는 열처리 결함, 또는 부재 형상이나 제조 공정이 약간 변화될 때 자주 발생하는 열처리 결함은

③이 원인이 되는 경우가 많다. 이러한 경우는 발생한 열처리 결함과 제조 조건과의 관계를 충분히 파악하여 대처할 것이 필요하다. 본 기술 자료에서는 표 1의 열처리 결함 중 대표적인 열처리 결함인 퀸칭변형과 퀸칭균열에 대하여 정리하였다. 이들은 각각 퀸칭 · 템퍼링 처리에서 생긴 부재 형상의 변화와 균열이다. 퀸칭변형은 정밀부품에서는 중요한 결함[2~3]이며, 퀸칭균열은 재생이 불가능하기 때문에 가장 치명적인 열처리 결함[4]으로 알려져 있다.

4.2 퀸칭 변형

퀸칭변형은 퀸칭 · 템퍼링 처리에 따른 가열, 유지, 냉각의 각 단계에서 발생하는 스트레인(Strain)으로 다음 식[5]과 같이 중첩되어 있다.

표 1. 열처리 결함의 종류

열처리의 대분류		결함의 종류
통상적처리	퀸칭	퀸칭균열, 퀸칭변형, 경화 불충분, 퀸칭얼룩, 산화, 탈탄 시효균열, 가열, 연소, Fish 스케일
	템퍼링	템퍼링균열, 템퍼링취성, 연화
	어닐링	연화 불충분, 어닐링취화, 시멘타이트의 흑연화, 산화
	서브제로처리	탈탄, 과열, 연소, 서브제로균열
	후처리	Grinding burn, 연마균열, 연마퀸칭, 산세취성, 도금취성
표면 경화 처리	침탄퀸칭	과잉침탄, 이상조직, 침탄얼룩, 내부산화, 박리
	질화	백층, 박리
	고주파퀸칭	퀸칭균열, 이발소 마크, 과열

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^E + \epsilon_{ij}^{TH} + \epsilon_{ij}^{TR} + \epsilon_{ij}^P + \epsilon_{ij}^{TP} + \epsilon_{ij}^C$$

여기서,

ϵ_{ij} : 총 스트레인(스트레인의 총합) = 켈칭변형

ϵ_{ij}^E : 탄성 스트레인

ϵ_{ij}^{TH} : 열팽창 스트레인

ϵ_{ij}^{TR} : 변태 팽창 스트레인

ϵ_{ij}^P : 소성 스트레인

ϵ_{ij}^{TP} : 변태 소성 스트레인

ϵ_{ij}^C : 크리프(Creep) 스트레인이다.

이러한 스트레인에 의해 생긴 부재 형상의 변화는 치수변형과 형상변형의 2가지 형태가 있다. 치수변형은 주로 변태에 의한 팽창 또는 수축에 의해 생기는 부재의 치수변화로 이에 의해 부재는 연신 및 수축, 또는 비대해지거나 가늘어지는 등 주로 상대적인 형상의 변화를 한다. 한편, 형상변형은 자중(自重) 또는 켈칭·템퍼링 과정에서 부재 내부에 발생하는 열응력이나 변태응력 등에 의한 반대축 휨, 굽힘, 비틀림 등의 비상대적인 형상의 변화를 한다[1]. 여기서 열응력은 부재의 각 위치에서의 열팽창량 또는 열수축량이 다를 때 발생하는 응력이다. 변태응력은 부재의 각 위치에서의 변태에 의한 체적 변화량 또는 변태가 일어나는 온도가 다를 때 발생한 응력이다. 이러한 응력은 불균일한 내부 상태, 불균일한 부재의 형상, 또는 불균일한 온도분포에 기인하여 생긴다. 다음에 이러한 2가지 형태의 부재형상 변화에 미치는 여러 가지 인자의 영향에 대하여 설명한다.

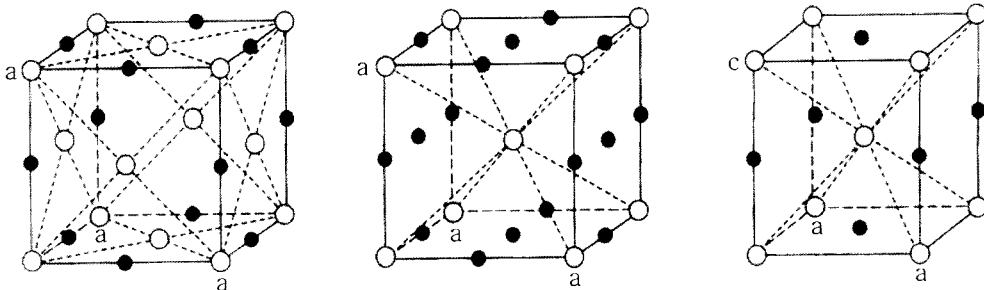


그림 2. 오스테나이트, 페라이트, 마르텐사이트의 결정구조 (○ : Fe 원자, ● : 원자가 들어가는 위치).

4.2.1 변태에 의한 체적변화와 치수변형

켈칭 처리의 기열에서 저온의 상(相)은 오스테나이트로 변태한다. 이 변태에 의한 체적변화를 순철의 예로 들어보자. 그림 1[6]은 순철의 열팽창곡선이다. 순철을 가열하면, 온도의 상승에 따라 팽창 한다. 그리고 온도가 상승하여 911°C의 A_3 변태점에 도달하면 순철은 체심입방구조(bcc 구조)의 α 페라이트로부터 면심입방구조(fcc 구조)의 오스테나이트로 결정구조가 변화한다. 면심입방구조는 가장 조밀한 구조이기 때문에 이 변태에 의해 순철은 수축한다. 여기서 어느 정도의 체적변화가 일어나는지 계산해보자 (이하 참고 문헌의 값을 그대로 이용하였다). 911°C에서 페라이트와 오스테나이트의 격자정수는 각각 2.899 Kx 및 3.639 Kx이다. 여기서 1Kx = 1.002Å이다. 따라서 각 격자의 체적은 24.364 Kx³ 및

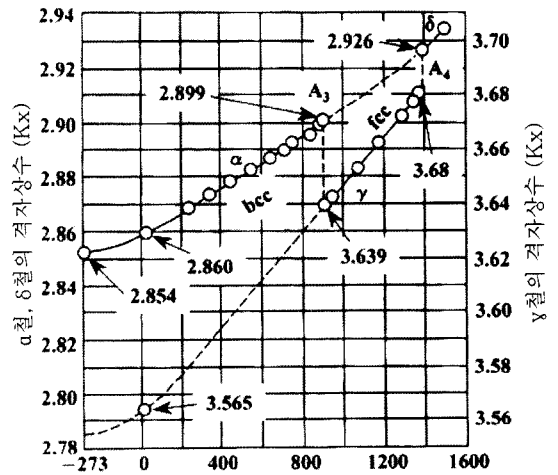


그림 1. 순철의 격자상수.

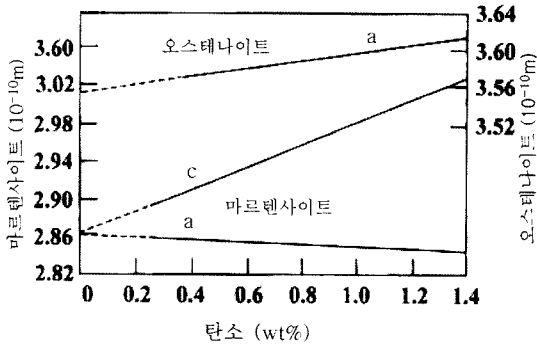
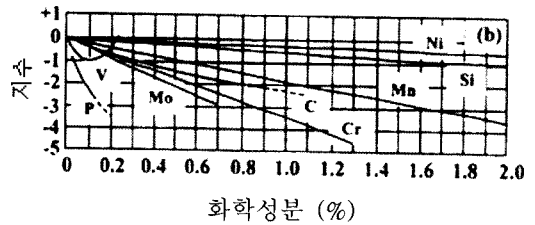
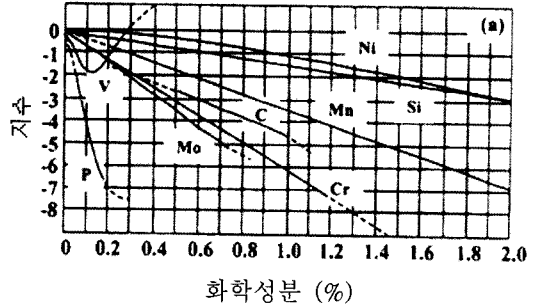


그림 3. 탄소강의 오스테나이트와 마르텐사이트의 격자상수.

48.189 Kx^3 이 된다. bcc 구조 및 fcc 구조의 결정 격자 1개에 포함된 원자 수는 각각 2개 및 4개로 동일 원자 수에 대한 체적을 비교하면 $24.364 \times 2 : 48.198$ 로 되며, 순철은 911°C 에서 페라이트로부터 오스테나이트로 변태하면 체적이 1.1% 수축하게 된다[7]. 연속 냉각하면 마르텐사이트 변태, 베이나이트 변태, 퍼얼라이트 변태, 미변태(잔류 오스테나이트) 등이 생긴다. 이러한 변태에 의한 체적변화를 탄소강의 예로 들어보자. 탄소강의 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 경우, 탄소량이 약 0.25% 이하에서는 bcc 구조, 이 이상의 탄소량에서는 체심정방 구조(bct 구조)로 된다. bct 마르텐사이트는 그림 2[8]와 같이 탄소 원자가 격자의 한 변 c 를 늘어나도록 배열하는 ● 위치를 점유하게 되는데, c 의 값은 탄소량에 따라 증가하며 a 의 값은 약간 감소한다.

마르텐사이트의 a 및 c 는 그림 3[8~9]과 같이 오스테나이트와 비교하면 상당히 작지만 마르텐사이트 격자의 원자 밀도는 오스테나이트보다 작기 때문에 fcc 구조로부터 bct 구조로 변태하면 체적의 팽창이 일어난다. 여기서 공석강(0.8% C 강)의 경우 어느 정도 체적변화를 나타내는지 계산해 보자. 그림 3에서 오스테나이트의 격자정수 $a = 3.58 \times 10^{-10}\text{m}$, 마르텐



(a) 물냉칭, (b) 기름냉칭

그림 4. 화학성분과 치수변형.

사이트의 격자정수 $a = 2.86 \times 10^{-10}\text{m}$ 및 $c = 2.96 \times 10^{-10}\text{m}$ 이다. fcc 구조 및 bct 구조의 결정격자 1개에 포함된 원자 수는 각각 4개 및 2개이므로 동일 원자 수에 대한 체적을 비교하면 $3.58^3 : (2.86^2 \times 2.96) \times 2$ 가 되며, 이에 따라 공석강이 오스테나이트로부터 마르텐사이트로 변태하면 체적은 5.5% 팽창하게 된다[8]. 이 외의 변태에 대해서는 표 2[9~10]와 같다. 또 참고 문헌에 의하면 체적변화율에는 약간의 차이가 있다. 이 표에 따르면 공석강(0.8% C 강)이 오스테나이트로부터 마르텐사이트로 변태하면 4.3%의 팽창이 일어난다.

냉칭 처리의 냉각 과정에서 변태가 일어나지 않고 체적이 적은 오스테나이트가 실온까지 유지되면 냉칭 전과 비교하여 체적은 수축된 상태가 된다. 이 상과 같이 변태에 의한 체적변화는 강종에 따라 크게 다르다. 그림 4[1], [11]는 냉칭에 의한 치수변

표 2. 탄소강의 냉칭 · 템퍼링에 의한 체적변화

조직변화	체적변화 (%)
오스테나이트 → 마르텐사이트	$4.75 - 0.53 \times (\%C)$
오스테나이트 → 베이나이트	$4.75 - 1.47 \times (\%C)$
마르텐사이트 → 0.25% C 마르텐사이트 + ε 탄화물	$0.22 - 0.88 \times (\%C)$
페라이트 + 시멘타이트 → 오스테나이트	$-4.64 + 2.21 \times (\%C)$
페라이트 + 시멘타이트 → 마르텐사이트	$1.69 \times (\%C)$

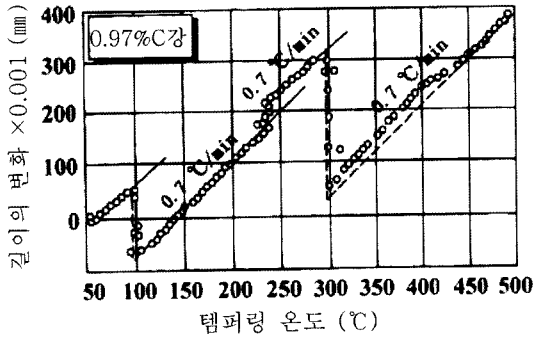


그림 5. 0.97% C강의 템퍼링에 의한 길이의 변화.

형과 화학성분의 관계를 나타낸 것이다.

치수변형에는 P, Mo, Cr, Mn이 크게 영향을 주며, Si와 Ni은 비교적 영향이 적다. 템퍼링 처리에서는 마르텐사이트와 잔류오스테나이트의 분해가 생긴다. 마르텐사이트는 템퍼링 온도가 70°C 이상이 되면 ϵ 탄화물(Fe_2C)이 석출하여 저탄소(약 0.25% C)의 마르텐사이트로 된다(탄소강의 템퍼링 제 1단계). 이 분해에서는 마르텐사이트의 탄소량이 저하되기 때문에 수축이 생긴다. 이 수축은 탄소량이 많을수록 크다. 잔류오스테나이트는 템퍼링 온도가 200°C 이상이 되면 약 0.25% C의 템퍼링된 마르텐사이트와 ϵ 탄화물로 분해한다(탄소강의 템퍼링 제 2단계). 이것에 의해 체적은 팽창한다. 또 온도가 상승하여 템퍼링 온도가 300°C 전후로 되면 ϵ 탄화물이 소실하고 θ 탄화물(Fe_3C , 시멘타이트)이 형성된다. 이것에 의해 기지 중의 탄소량은 현저히 저하하여 최종적으로 페라이트와 시멘타이트로 된다. 이 변화에서 2번의 수축이 생긴다(탄소강의 템퍼링 제 3단계)[9],[11]. 그림 5[9], [11]는 0.97% C 강에서 템퍼링시 발생한 길이의 변화를 나타낸 것이다.

템퍼링에서는 이와 같이 퀴칭에서 생긴 체적변화가 작게 되는 변화가 일어난다. 이상은 변태에 의해 생기는 결정격자의 변화에 근거를 둔 체적변화에 대하여 설명하였다. 실제에는 아래와 같은 여러 가지 영향을 받아 치수의 변화에 방향성이 나타나 후술한 변형이 다소 많이 수반된다. 이 때문에 부재의 치수 변화는 단순한 격자 변화에서 추정된 것과는 약간 다르게 된다. 부재에 섬유상 조직의 호상편석(繡狀偏析)이 있는 경우에는 이 편석이 있는 방향(길이

방향)으로는 치수변형이 크고, 이의 수직 방향(횡 방향)으로는 치수변형이 작다[1]. 또 마르텐사이트 변태에서 마르텐사이트는 오스테나이트 내부에서 생기는데, 이의 주변은 오스테나이트로 둘러 싸여 있으므로 체적변화(팽창)가 억제된다. 이 결과, 슬립변형과 쌍정변형이 동시에 일어나 스트레인이 적어진다[8]. 이상 영역(페라이트 + 오스테나이트 영역)이나 오스테나이트 + 시멘타이트 영역)으로 가열시의 퀴칭에서도 동일하게 각 상이 서로 영향을 미치게 된다. 또 큰 부재에서는 내부가 늦게 냉각되기 때문에 내부와 외부에서의 변태에 시간적인 차이가 생기며, 이에 의해 내부의 상과 외부의 상이 서로 영향을 미친다. 이와 같이 부재의 치수변화는 변태에 의한 체적변화에 각종 영향이 부가되어 생긴다. 부재 형상의 변화가 주로 변태에 의한 것이기 때문에 치수적인 변화(연신, 수축, 비대 또는 가늘어지는 것 등)를 하는 형태를 치수변형이라 부르고 있다.

4.2.2 형상변형에 미치는 여러 인자의 영향

부재 형상의 변화는 주로 자중, 열응력, 변태응력에 의한 것이기 때문에 형상적으로 변화(반대측 휨, 굽힘, 비틀림 등) 되는 형태가 형상변형이다. 여기서는 형상변형에 미치는 여러 인자의 영향에 대하여 정리한다. 부재에는 승온시와 유지시 적지 않은 자중에 의해 크리프 변형(현상적으로 늘어지는 것으로 불려짐)이 생긴다. 봉상의 부재를 길이 방향으로 매달아 처리하는 경우에는 늘어나기 때문에 부재 형상의 변화 형태로서는 치수변형이 되지만, 세우거나 횡 방향으로 매달아 처리하는 경우에는 자중에 의한 굽힘이 생긴다. 이와 같이 자중에 의한 크리프 변형은 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에 처리시의 하역 형태나 치구의 형상에 충분히 주의할 필요가 있다. 자중에 의한 크리프 변형은 가열온도가 높을수록, 승온 시간 및 유지시간이 길수록 크게 나타난다[1]. 열간 단조 등의 고온성형에 의해 부재 표면에 탈탄조직이 형성되거나, 침탄 등의 표면개질처리에 의해 부재 내외의 조직이 불균일하게 되면 가열이나 냉각이 균일하게 실시되어도 각 조직에 대한 열팽창과 수축량 및 변태 생성 온도가 다르기 때문에 열응력이나 변태응력이 발생하여 형상변형이 생기기 쉽게 된다. 특히 급속가열이나 급속냉각이 실시되면 부재 내외에

서 가열속도나 냉각속도에 차이가 생겨 형상변형이 한층 크게 된다. 이와 같이 불균일한 조직 분포에 의한 형상변형은 편석이나 호상편석에 의해서도 생긴다. 또 실온에서의 기계가공이나 소성가공으로 부재에 잔류응력이 있게 되면 이 부분의 연화온도가 저하되기 때문에 가열이 균일하게 실시되어도 잔류응력이 큰 부분에는 약간의 응력에도 형상변형이 생길 수 있다. 일반적으로 잔류응력은 바깥 부분이 크기 때문에 가열이 외부로부터 실시될 때에는 형상변형이 바깥의 외주부에 크게 나타난다. 특히 급속가열을 실시하면, 연화된 표층부는 온도가 낮은 내부에 잔존하는 응력에 의해 힘을 받게 되어 외주부의 형상변형이 크게 나타난다. 또 잔류응력에 의한 형상변형은 가열시에만 생긴다. 이상과 같이 불균일한 내부 상태에 기인하는 형상변형을 줄이기 위해서는 가열과 냉각의 속도를 작게 하는 것이 유효하다. 잔류응력에 대해서는 퀴칭 처리 전에 응력제거어닐링을 실시하는 것이 특히 유효하다[1]. 부재에 예리한 코너부나 갈라진 틈, 단면(살 두께)이 급변하는 부위 또는 개구부나 구멍이 있는 모서리부 등은 변형저항이 크다. 이와 같이 응력집중이 생기는 기하학적 형상 인자는 부재 전체의 형상변형을 크게 한다. 또 부재 형상이 비대칭으로 복잡하면 부재의 각 부위에서 열팽창과 수축 량 및 변태에 의한 체적 변화량에 차이가 생겨 형상변형이 증대한다. 또한 이와 같은 기하학적 형상 인자는 후술하는 부재의 냉각 얼룩을 생기게 하는 효과가 합쳐진 것도 있다. 이상과 같이 불균일한 부재 형상에 따른 형상변형을 줄이기 위해서는 부재의 살 두께를 균일화하거나 두께 조정용 빈 구멍을 가공하는 등의 형상적인 대책을 실시함에 의해 부재 내부에 발생하는 열응력이나 변태응력을 적게 하는 것이 유효하다[1], [5]. 또 이와 같은 열처리 효과에 미치는 부재 형상의 영향을 형상효과(Shape effect)라 부른다. 부재의 형상변형은 가열, 냉각시의 불균일한 온도분포(가열, 냉각의 방법 또는 부재의 크기나 형상에 의해 생기는 가열, 냉각의 얼룩)에 의해서도 크게 생긴다. 특히 냉각 얼룩은 형상변형을 크게 하기 때문에 이하 냉각 얼룩에 대한 영향을 중심으로 설명한다.

그림 6[1]과 같이 가열한 봉상의 부재를 측면으로부터 급냉시키면 처음에는 냉각된 층이 수축하여

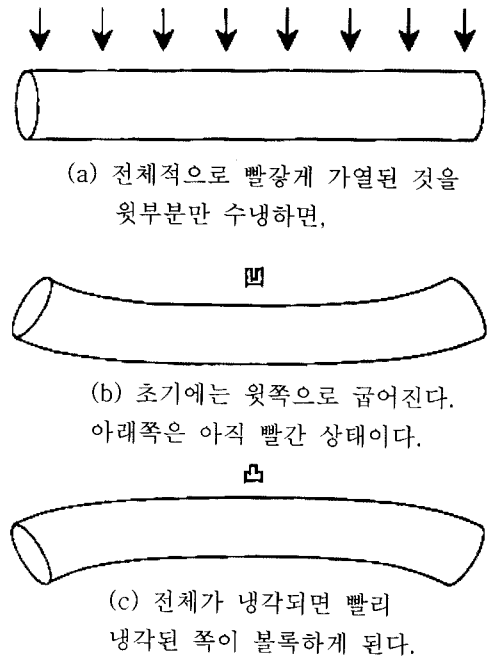


그림 6. 불균일 냉각에 의해 퀴칭 굽힘이 나타나는 방법.

오목하게 되지만 전체가 냉각되면 냉각된 층이 볼록하게 되는 굽힘이 생긴다(냉각되는 층과 반대 층과의 온도 차이가 생기지 않는 살 두께가 매우 얇은 부품에서는 먼저 냉각된 층이 오목하게 된다). 이와 같이 부재를 불균일하게 냉각하면 부재의 각 부위에서 냉각속도가 불균일하게 되고 이에 의해 열응력이나 변태응력이 발생한다. 냉각 얼룩은 이와 같은 냉각 방법 외에 부재의 크기나 형상에 의해서도 생긴다. 큰 부재를 냉각하면, 외부로부터 균일하게 냉각시키도 내부가 늦게 냉각된다. 이 부재의 내외에서 생긴 냉각 얼룩을 체적(Body) 얼룩이라 부르고 있다(이에 비해 부재의 표면층에 생기는 냉각 얼룩은 표면(Surface) 얼룩이라 부른다). 체적 얼룩은 질량효과(Mass effect)의 영향을 강하게 받는다. 여기서 질량 효과는 열처리 효과에 미치는 부재 질량의 영향으로, 일반적으로 부재의 질량에 따른 열처리, 특히 퀴칭 되는 방법이 다른 것을 말한다. 동일한 강종(퀴칭성이 동일)의 경우, 부재가 클수록 내부의 온도강하가 늦어지기 때문에 퀴칭이 악화 된다. 퀴칭성이 나쁜 강일수록 질량효과가 크고 이러한 경향이 강하게 된다. 또 질량효과는 부재의 크기로 볼 때의 퀴칭이고, 퀴칭성은 강의 재질로부터 볼 때의 퀴칭이다.

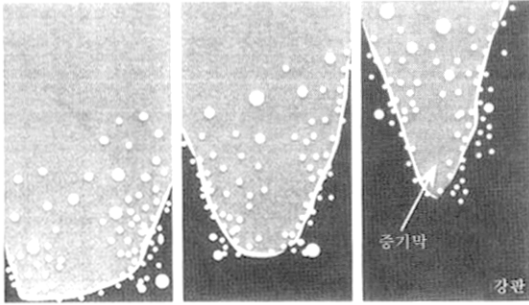


그림 7. 물 켄칭시의 증기막 붕괴 거동.

체적 열폭은 부재가 매우 작은 경우나 공기 중에서 켄칭되는 강을 공냉에 의하여 켄칭 하는 등의 특수한 경우를 제외하고는 필연적으로 발생하는 것으로 피할 수 없다. 특히 급냉의 정도가 커질수록, 그리고 부재 치수가 커질수록 체적 열폭은 크게 된다 [1], [5]. 한편 부재 형상이 복잡해지면 각 부위의 냉각에 시간적인 차이가 생기고 또 부품 주위의 냉각액 흐름이 변화되기 때문에 표면 열폭이 생기기 쉽게 된다. 물이나 기름 등의 증발성 냉각제로 냉각할 때에는 켄칭 직후에 거의 전 표면이 냉각액의 증기막으로 덮히게 된다(증기막 단계). 이 증기막은 안정성이 적고 그림 7[5]과 같이 부재의 모서리부나 살 두께가 얇은 부위 등으로부터 전파되어 붕괴한다. 이 때문에 먼저 붕괴된 부분은 열전달량이 많은 핵비등 단계로 빠르게 들어간다. 증기막으로 덮혀져 있는 부분의 열전달량은 매우 적기 때문에 부재 표면에는 증기막으로 덮혀져 있는 부분과 먼저 붕괴된 부분 사이에는 불균일한 냉각이 생긴다(천이비등 단계). 이와 같은 증기막 형성에 의한 표면 불균일을 적게 하기 위해서는 적당한 교반을 실시, 증기막 형성을 억제하여 증기막 단계를 없애는 것이 유효하다. 또한 용융염이나 용융 금속 등의 증기막 발생이 적은 냉각제나 증기막이 일제히 붕괴하는 고분자 수용액에 의한 냉각을 실시하면 증기막 형성에 의한 표면 열폭이 적어진다. 각종 가스에 의한 냉각에는 증기막이 생기지 않기 때문에 증기막 형성에 의한 표면 열폭은 생기지 않는다[5], [12~13]. 이상은 형상 변형에 미치는 여러 인자의 영향에 대하여 설명하였다. 실제로 영향을 미치는 인자들은 서로 밀접한 관계가 있기 때문에 형상변형을 적게 하는데에 여러

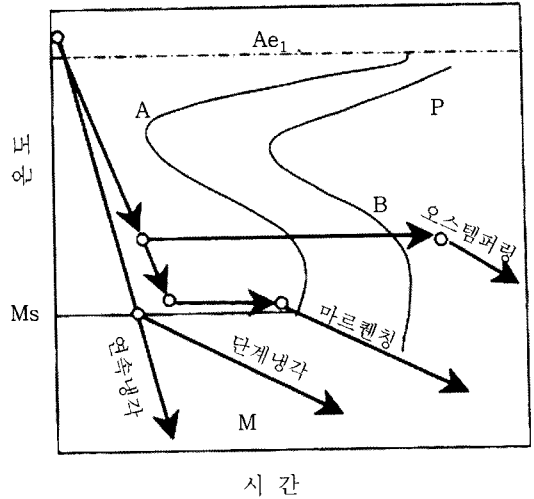


그림 8. 켄칭시의 냉각경로.

운 경우가 있다. 형상변형을 방지하는 유효한 대책으로 아래와 같은 방법이 실시되고 있다. ①가열을 서서히 하고 또 균일하게 하기 위해 예열을 실시한다. 가열 열폭은 가열할 때 변형을 생기게 할 뿐 아니라 냉각이 시작될 때 부재의 온도분포가 불균일하게 되므로 이것이 그 후의 냉각 열폭을 크게 한다. 예열은 제 1단 예열이 400°C 정도의 온도이고, 제 2단 예열은 변태점 직하의 온도에서 실시한다. ②오스테퍼링(Austempering)나 마르켄칭(Marquenching) 등의 열폭 켄칭을 실시 한다. 여기서 오스테퍼링은 그림 8[5]과 같이 400~500°C의 열욕(급속 또는 염)에 켄칭하고, 이 온도에서 비교적 장시간 유지시켜 항온변태를 완료 후 공냉하는 처리이다.

이 처리에 의해 부재의 조직은 베이나이트(Bainite)로 되어 변태응력이 적게 된다. 베이나이트는 그 상태 그대로 강인하다. 또 마르켄칭은 Ms 점에 해당하는 열욕 중에 켄칭하여 부재 내외부의 온도를 균일하게 하고 항온변태가 개시되지 않는 도중에 인상시켜 공냉하는 처리이다. 이에 의해 「균열과 굽힘이 없고 경한」 켄칭을 할 수 있다. 마르켄칭 후에는 템퍼링을 실시한다. ③프레스 켄칭(Press quenching) 또는 형틀 켄칭(Die quenching) 등을 실시한다. 형틀 켄칭은 쇼트 다이 켄칭(Shot die quenching), 프리 스트레스 포밍(Pre-stress forming), 핫트 포 오밍(Hot forming) 등이 있다. ④미리 역변형을 주

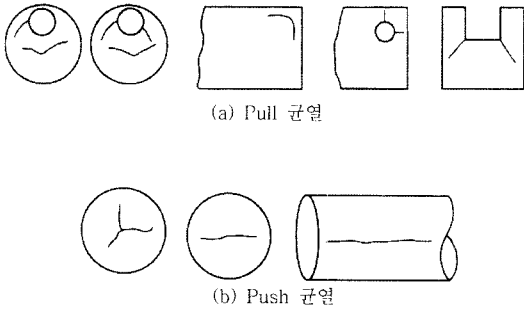


그림 9. 켈칭균열의 2가지 형태.

고 켈칭한다. ⑤열처리 급힘이 생기는 부위는 단단한 치구 등으로 결박하여 켈칭한다. ⑥공 처리(Blank treatment)를 실시한다. 즉, 어느 정도 가공이 진행된 단계에서 본래의 열처리와 유사한 열처리를 실시하여 형상변형을 생기게 하며, 그 후 마무리가공을 하여 열처리를 실시하면 이를 하지 않은 경우보다 형상변형을 적게 한다[1], [10~11].

4.3 켈칭균열

켈칭균열의 대부분은 켈칭에 의해 마르텐사이트(Martensite) 조직으로 된 부재의 노치(응력 집중부)에 켈칭 냉각의 불균일에 의해 발생한 변태응력이 작용하여 이 응력이 노치의 파괴응력을 초과할 경우에 생기는 취성파괴이다[5]. 켈칭균열은 그림9[5], [14~16]와 같이 표면 얼룩에 의해 생기는 Pull 균열과 체적 얼룩에 의해 생기는 Push 균열의 2가지 형태가 있다. 또 열처리 균열의 방아쇠가 되는 노치(Notch)에는 형상적 노치와 재질적 노치가 있다. 여기서 형상적 노치는 갈라진 틈, 개구부, 둥근 구멍, 각진 구멍, 예리한 모서리부, 두께가 급변하는 부위 등의 응력집중부가 되는 부재 형상, 표면의 상처 흔적 등의 외부결함, 가공으로 부재 표면에 형성된 바이트(Bite) 결 등이 있다. 재질적인 노치는 탄화물의 편석, 비금속 개재물, 주조 수축공, 미세균열, 입계결함 등이 있다[5], [14~16]. 다음에 Pull 균열과 Push 균열의 발생기구 및 켈칭균열의 발생에 미치는 여러 가지 인자의 영향에 대하여 설명한다.

4.3.1 Pull 균열의 발생기구와 이의 영향인자

그림 10(a)[5], [14~16]과 같이 켈칭시의 급냉에 의하여 오스테나이트 구역 내에서 표면 얼룩이 생기

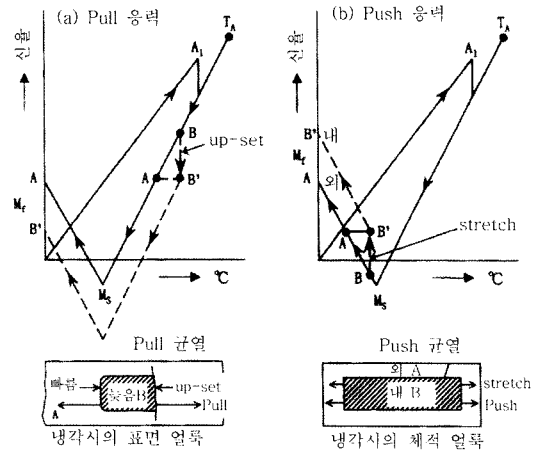


그림 10. Pull 균열 및 Push 균열의 발생기구.

면 냉각이 늦은 부분이 빨리 냉각된 부분의 열 수축에 의해 어긋나게 된다(B점에서 B' 점 까지 늘려져 압축된다). 이 후 Ms 점에 도달하여 각각 마르텐사이트 변태에 의해 팽창하여도 어긋난 부분이 남게 된다. 이 때문에 늦게 냉각된 부분이 빨리 냉각된 부분으로부터 Pull 응력을 받게 되며, 이것이 노치부에 작용하면 Pull 균열이 생긴다. Pull 균열을 생기지 않게 하기 위해서는 오스테나이트 구역 내를 균일하게 급냉 하는 것이 유효하다. Pull 균열은 늦게 냉각된 부위가 균열이 되기 때문에 적극적으로 균열이 발생하는 부위를 빠르게 냉각하는 것도 유효하다. 또 균열이 발생하는 부위를 늦게 냉각함에 의해 켈칭이 안되도록 하는 소극적인 방법도 있다. 복잡한 형상의 부재는 표면 얼룩이 생기게 됨에 따라 노치가 되는 부위를 가지고 있는 경우가 많아져 버리기 때문에 켈칭균열을 방지하기가 어려운 경우가 있다. 이와 같은 경우에는 그림 11[1], [10~11]에 나타난 바와 같은 형상적 대책이 유효하다.

4.3.2 Push 균열의 발생기구와 이의 영향인자

그림 10(b)와 같이 마르텐사이트 구역 내에서 체적 얼룩이 생기면 내부의 비교적 유연한 과냉 오스테나이트가 먼저 Ms 점에 도달한 표층부의 마르텐사이트 변태에 의한 팽창에 의해 잡아 당겨진다(B 점에서 B' 점 까지 당겨져 늘어났다). 이 후 내부도 Ms 점에 도달하여 마르텐사이트 변태에 의한 팽창이 일어난다. 이 때문에 빨리 냉각된 표층부는 내부로부

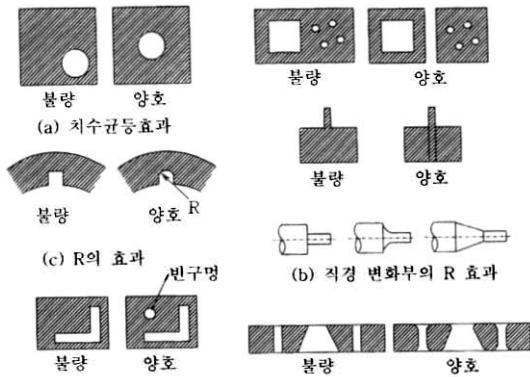


그림 11. 켄칭균열 방지를 위한 형상효과.

터 Push 응력을 받고 이것이 노치부에 작용하여 Push 균열이 생긴다(표층부가 내부의 팽창에 의해 눌러져 균열이 된다). 이러한 Push 균열은 Ms 점에 도달할 때까지의 오스테나이트 구역 내에 대한 체적 열룩의 영향을 강하게 받는다. 오스테나이트 구역 내에서 냉각속도가 클수록 체적 열룩에 의한 큰 열응력이 발생한다. 이것에 의하여 표층부에 압축응력이 생긴다. Push 균열은 표층부에 생기는 인장응력에 의해 생기기 때문에 체적 열룩에 의하여 생기는 열응력은 켄칭균열 방지에 유효한 역할을 한다. 그런데 그대로 급냉을 실시하면 마르텐사이트 구역 내에 큰 변태응력이 발생하며, 이에 의해 표면에 인장응력이 높아진다. 그림 12[1]와 같이 Push 균열은 변태응력 > 열응력이 되는 속도 구역에서 발생하며, 이보다 빠르거나 늦은 냉각을 실시하면 생기지 않는다.

Push 균열을 생기지 않게 하기 위해서는 Ms 점이 하를 천천히 냉각하는 것이 특히 유효하다 [1],[14~16]. Push 균열은 부재의 크기가 크게 영향을 미친다. 큰 부재는 중심부까지 켄칭되지 않는 유심(有芯) 켄칭이 되기 때문에 Push 균열이 생기기 곤란하다. 한편, 매우 작은 부재나 가는 부재는 내부와 표층부의 마르텐사이트 변태에 시간적인 차이가 거의 없기 때문에 Push 균열이 생기기 곤란하나 그 중간의 크기를 가진 부재는 생기기 쉽다[1], [5]. 이러한 부재가 켄칭될 때에는 합금성분의 영향을 강하게 받는다. 합금성분은 켄칭성 외에 변태팽창량이나 변형특성을 좌우한다. 일반적으로 탄소함유량이 많은 강종일수록 켄칭균열이 생기기 쉽다. 이것

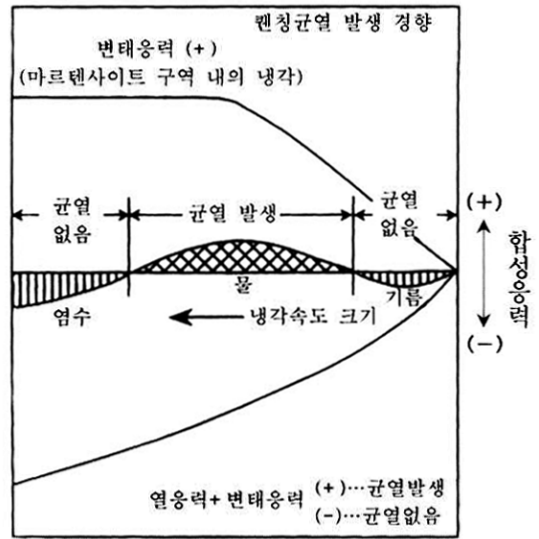


그림 12. 냉각속도와 켄칭균열의 관계.

은 탄소함유량이 많을수록 마르텐사이트 변태시의 팽창량과 켄칭성(켄칭 경화 깊이)이 크게 되고 변태응력이 크게 되기 때문이다. 또 탄소량이 낮은 경우에는 Ms 점이 높기 때문에 마르텐사이트 변태가 생기는 즉시 템퍼링이 이루어지기(자기 템퍼링 효과) 때문에 켄칭균열이 발생하기 어렵게 된다. 이러한 자기 템퍼링 효과는 탄소강에서는 탄소량이 0.4% 이하(Ms 점이 320°C 이상)이고, 합금강에서는 탄소당량이 0.55% 정도 이하(Ms 점이 360°C 이상)에서 현저히 나타난다[5]. 이상 켄칭균열의 형태와 이의 영향인자에 대하여 설명하였다. 켄칭균열의 방지에 대하여 총괄해보면 아래와 같다. ①부재 표면의 오목 볼록부나 구멍난 곳이 없게 표면을 평활하게 하여 형상적인 노치를 없게 하거나 또는 부재의 노치부를 R(라운드)로 가공하거나 부재를 분할하는 등의 형상적 대책을 실시한다. ②비급속 개재물, 편석 등의 재질적 노치를 없게 한다. ③오스테나이트 구역은 표면 각 부분을 균일하게 급냉하고, 마르텐사이트 구역은 부재 내·외부를 서냉하는 것이 유효하다. 또 켄칭균열은 Pull 균열과 Push 균열의 어느 경우에도 마르텐사이트 구역 내에서 발생하는 변태응력이 야기되기 때문에 마르텐사이트 구역을 특히 위험 구간이라 부르고 있다. 또한 시효균열의 방지를 위해서 켄칭 후 즉시 템퍼링을 실시하는 것도 중요하다.

* 이 글은 日本 熱處理 45(1), 2005년, pp. 16~23에 게재된 내용을 번역한 것 임.

참고문헌

1. 大和久重雄 : 熱處理のトラブルと對策 150問(初版 1刷), 日刊工業新聞社 (1982).
2. 澤 繁樹, 西村富隆, 多田光一郎 : 日特技報, **11**, (1976) 13.
3. 西村富隆 : 熱處理, **35**, (1995) 330.
4. 石田茂樹, 徳増まりこ, 藤原將伸 : 住友重機械技報, **38**, 114, (1990) 53.
5. 奈良崎道治 : 平成14年度第2回熱處理技術セミナー-テキスト, 日本熱處理技術協會, (2002) 8-1.
6. 金屬便覽(改訂3版), 日本金屬學會, 丸善 (1971).
7. 守谷英明, 長井 壽 : バウンダリ-, **15**, **10**, (1999) 36.
8. 渡邊慈朗, 齊藤安俊 : 基礎金屬材料(初版4刷), 共立 出版 (1984).
9. 門間改三, 須藤 一 : 構成金屬材料とその熱處理(初 版 제6刷), 日本金屬學會 (1988).
10. 熱處理技術便覽(初版1刷), 日本熱處理技術協會 (2000).
11. 橋本宇一, 大和久中雄 : 熱處理技術と材料および 試驗 (第13版), 地人書館 (1987).
12. 奈良崎道治, 淵澤定克, 小河原稔 : 熱處理, **33**, (1993) 56.
13. 奈良崎道治 : 열처리, **35**, (1995) 221.
14. 大和久重雄 : 열처리, **29**, (1989) 239.
15. 大和久重雄 : 열처리, **30**, (1990) 63.
16. 大和久重雄 : 열처리, **35**, (1995) 227.