

## 일반적인 열처리에서 변형과 저감대책

정병호 · 김한군

부경대학교 신소재공학부

### The Distortion and Its Minimizing Technique in Bulk Heat Treatment

B. H. Jung and H. G. Kim

Division of Materials Science & Engineering, Pukyong University, Pusan 608-739, Korea

#### 1. 서 언

열처리 가공업은 지역 밀착형이나 의존형의 산업이라는 이유로 가격이 낮고 고품질이며 또 빠른 납기일이 요구되고 있어 기술혁신이 필요하지만, 현재 기능계승의 공동화와 후계자난이 우려되고 있는 실정이다. 이와 같은 상황에서 열처리 가공업이 더욱 발전하기 위해서는 여러 가지 기술적 과제를 해결하지 않으면 안된다. 이 중에서 열처리 변형은 오래 전부터의 새로운 테마로 꼽을 수 없는 중요한 과제 하나이다. 변형은 정도의 차이는 있지만 열처리에서 필히 수반되는 것이므로 뒤에 이것을 제거하려고 고가의 연삭작업이나 귀찮은 교정작업이 필요하게 되는데, 때로는 이러한 작업이 원인이 되어 유해한 잔류응력을 생기게 하여 물품의 강도저하를 초래하는 일도 있고, 경우에 따라 이러한 작업을 실시하여도 제거되지 않을 때도 있다. 이와 같이 열처리 변형은 제조현장에서 가장 심각한 문제이기 때문에 오래전부

터 연구가 되어오고 있지만 이러한 현상이나 방법이 상당히 복잡하고 불규칙하므로 현장적인 치유책으로 해결하려는 노력은 많지만 체계적인 이해를 하는데는 아직도 불충분하여 현실적인 중요과제로 남아있다. 최근에는 컴퓨터의 발달에 따라 열처리 시뮬레이션(Simulation) 기술도 많이 발표되어 가까운 장래에 열처리 변형에 대하여 유효하게 활용될 것으로 생각되지만 가격이나 사용 효율면에서 검토의 여지가 남아 있어 열처리 현장에 충분히 보급된다는 것은 어렵다고 할 수 있다. 본 기술자료는 일반열처리에 있어서 변형에 대한 사고방법과 저감대책의 사례에 대하여 설명한다.

#### 2. 치수변화와 변형

열처리 변형이 발생하는 것은 여러 가지 요인이 있지만, 일반 열처리에 영향을 주는 요인은 그림 1과 같다.

변형이라는 말은 일반적으로 모든 종류의 미소한 치수변화 정도에 대해 사용하는 것이지만, 재료역학

\*이 글은 일본“熱處理”, 43(4) 2003년, P229~235에 게재된 내용을 번역한 것이다.

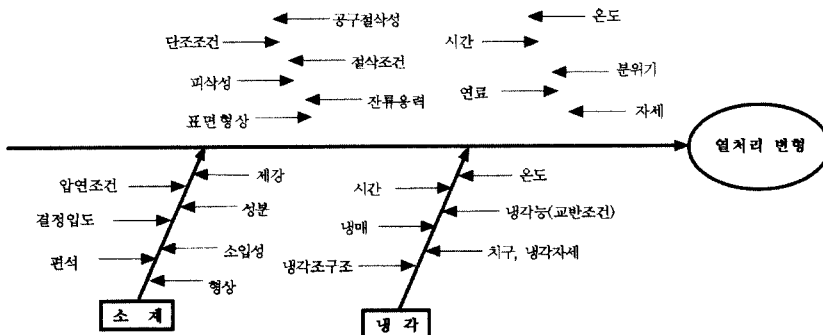


그림 1. 일반열처리에서 변형의 요인도.

등에서는 변형이 영어의 strain에 해당하는 말로 사용되고 있고, 열처리에서는 distortion의 의미로 사용하는 경우가 많다. 열처리 변형은 기본적으로 2가지로 분류하여 생각하는 것이 좋다. 하나는 치수변화(Dimension change)인데, 이것은 열처리의 결과로 생긴 체적의 팽창 또는 수축에 의한 치수변화이며 열처리시 퀴칭(Quenching)하면 피할수 없는 것이다. 또 하나는 변형(Shape change)인데, 물품의 기하학적 형상변화로 오래전부터 잘 알려져 있듯이 빨리 냉각되는 쪽이 볼록(凸)한 형태로 되는 것이기 때문에 가열이나 냉각방법의 연구에 의해 저감시킬 수 있는 가능성이 있다. 그림 2는 이러한 변형에 대한 2가지를 구별하여 그림으로 나타낸 것이다.

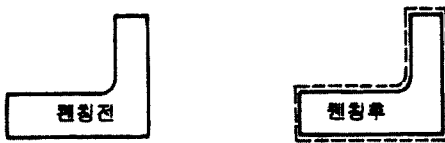
2.1 치수변화

열처리를 실시하면 변태가 일어나고 금속조직에 변화가 생긴다. 변태 전의 조직과 변태후의 조직은 이의 결정구조가 다르기 때문에 각각의 비용적(단위 중량당의 체적 : 비중의 역수)이 변한다. 이 변화에 의해서 체적이 변하고 치수변화가 일어난다. 강을 어닐링(Annealing) 또는 노르말라이징(Normalizing)상태에서 기계가공에 의해 소정의 형상치수로 마무리가공하고 요구되는 강도 및 내마모성 등의 특성을 얻기 위해 퀴칭, 템퍼링(Tempering) 등 일련의 열처리를 실시한다. 이러한 열처리 공정에서 열처리 조직에 따라 치수변화가 어떻게 생기나를 생각해 보자. 치수변화와 변형은 열처리에서 동시에 발생하지만

이의 발생원인은 다르기 때문에 별개로 생각하는 편이 대책 수립에 용이하다. 즉, 치수변화는 금속조직의 변화에 의해 생기므로 열처리를 실시하는 한 이의 발생은 피할 수 없다. 그러나 변형은 만일 열처리가 완전히 이상적으로 실시되면 원리적으로는 이의 발생을 억제할 수 있는 것으로 생각된다(현실적으로 "zero"가 되는 것은 불가능하지만).

(1)퀴칭(Quenching)

퀴칭전에 강은 어닐링 또는 노르말라이징 상태이다. 구조용강에서는 페라이트(Ferrite)와 퍼얼라이트(Pearlite)의 혼합조직이고, 공구강에서는 모두 미세한 시멘타이트(Cementite)가 페라이트중에 분포된 조직이다. 이것은 어떻게 하여도 페라이트와 탄화물의 2상 혼합조직이라는 점에서 변하지 않는다. 퀴칭을 위해 가열시  $A_{C3}$  점까지 온도를 올리면 페라이트는 오스테나이트(Austenite)로 변태하고 탄화물들은 오스테나이트에 고용된다. 오스테나이트에 고용하는 탄화물의 량은 퀴칭시의 유지온도 및 시간에 따라 다른데, 퀴칭온도가 높고 유지시간이 길수록 고용하는 탄소량은 많게되고, 고용탄소량이 많을수록 퀴칭에 의해 생기는 마르텐사이트(Martensite)의 팽창은 크게된다. 퀴칭온도에서 실온까지 냉각할 때, 냉각속도에 따라 마르텐사이트, 베이나이트(Bainite), 트루스타이트(Troostite) 등의 조직이 생긴다. 퀴칭의 목적인 마르텐사이트는 이 중에서 비용적이 최대이고, 하부베이나이트(Lower bainite)는 그 다음이다. 상부베이나이트(Upper bainite), 트루스타이트는 본질적으로 페라이트와 시멘타이트의 혼합조직으로 단순히 이의 혼합상태가 미세한 것에 지나지 않기 때문에 어닐링, 노르말라이징 상태와는 비용적에 대해서 기본적으로 변하지 않는다. 즉, 퀴칭의 상태를 기준으로 하면, 퀴칭에 의해 마르텐사이트나 하부베이나이트가 생길 때는 용적을 증가시키지만, 상부베이나이트나 트루스타이트로 될 때에는 치수변화가 일어나기 어렵다.



치수변화의 일례



변형의 일례

그림 2. 치수변화와 변형의 상이.

(2)템퍼링(Tempering)

퀴칭하여 마르텐사이트로된 강을 템퍼링하면 수축이 일어난다. 템퍼링 온도 180°C 근방에서 마르텐사이트는 과포화로 고용된 탄소가  $\epsilon$ 탄화물을 생성시키고 약 0.25%의 탄소를 함유한 저탄소 마르텐사이트로 된다. 이것이 템퍼드마르텐사이트(Tempered

martensite)이다. 이러한 반응에 따라 수축이 일어나지만 이 수축량은 마르텐사이트 중에 과포화로 고용된 탄소량에 비례한다. 이것을 템퍼링의 제 1단계라 한다. 다음에 퀴칭상태에서 존재하는 잔류오스테나이트의 일부가 실온에서 200°C 사이로 가열되면 마르텐사이트로 변한다. 이것이 템퍼링의 제 2단계이며 이 때 팽창을 동반한다. 이 팽창은 200°C 근방에서 마르텐사이트의 분해가 일어나기 때문이나 외관상 명확히 나타나지 않는다. 200°C 이상의 온도에서 템퍼링을 실시하면 제 1단계에서 생겼던 저탄소 마르텐사이트와 ε탄화물은 페라이트와 시멘타이트로 변한다. 이 변화는 템퍼링의 제 3단계이며 수축을 동반한다. 이의 수축률은 탄소량이 낮을수록 크게 된다. 즉, 퀴칭하여 마르텐사이트로 된 것을 200°C 이상의 온도로 가열하면, 제 1, 제 2, 제 3단계의 템퍼링이 동시에 일어나므로 조직은 페라이트와 시멘타이트의 혼합상태가 된다. 이 경우 퀴칭상태를 기준으로 하면 치수변화는 수축이지만, 퀴칭 전의 어닐링, 노르말라이징 상태에서 보면 원래대로 돌아가게 되어 치수변화는 “zero”이다.

이와 같이 템퍼링에서는 제 1단계, 제 3단계는 수축, 제 2단계에서는 팽창이 일어난다. 덧붙여 마르텐사이트의 템퍼링 조직에서 이전에는 투르스타이트, 소르바이트(Sorbite) 등의 명칭이 사용되었지만, 현재는 거의 사용하지 않고 있다.

## 2.2 변형

변형은 치수변화와 달라 여러 가지 원인으로 일어나는데, 특히 중요한 것은 열처리의 가열시와 퀴칭시 발생하는 열응력 및 변태응력에 의한 것이다. 또 퀴칭온도에 유지될 때 가공 때문에 생긴 잔류응력의 완화에 의해 생기는 변형도 중요하다.

### (1) 퀴칭온도로의 가열과 유지

물품을 로 중에서 가열할 때 가열속도가 빠르거나 로에 비해 물품이 크게되면 물품의 각 부분에 온도가 다른 여러 부분에서 팽창차이가 생기는 소위 열응력(Thermal stress)이 발생한다. 이러한 열응력이 강의 온도에 대한 항복점보다 크게되면 그 부분에서 소성변형이 일어나고 열변형(Thermal strain)이 생기게 된다. 단, 물품은 열처리 전의 가공에 의해 잔류응력이 존재하고 있지만 가열유지시 이러한 잔류응

력은 크리프(Creep)에 의해 완화된다. 이 때문에 물품은 변형이 생기게 되는데, 예를 들어 미리 연신, 압축된 강을 변태점 이상의 온도로 가열, 서냉시켜 치수를 측정해보면 가공에 의하여 늘어난 방향으로 수축되고, 또 가공에 의하여 압축된 방향으로 늘어난다. 한편, 오스테나이트화 온도에 가열 유지시 굽힘(Bending)변형이 생기는 일이 있다. 이것은 자중(自重)에 의하여 크리프 변형을 일으키기 때문인 것으로, 특히 긴 물건을 가열할 때나, 로상(爐床)이 평활하지 않을 때, 또 물품이 걸쳐있는 상태로 놓여 있을 때 생기기 쉽다. 이러한 경우는 가열온도가 높을수록, 유지시간이 길수록 변형은 크게된다.

### (2) 퀴칭

오스테나이트화 온도로부터 실온까지 급냉하는 퀴칭작업에서 냉각속도가 물품의 각 부분에서 불균일해지면 앞서의 가열시와 같이 열응력이 발생한다. 냉각속도가 균일하여도 물품은 수(水) 중 또는 유(油) 중에서 표면으로부터 냉각되므로 냉각은 표면에서 빠르고 중심부 측이 늦게된다. 또 두께의 차이가 있는 물품에서는 두께가 얇은 부분이 두꺼운 부분보다 빠르게 냉각되므로 소위 물품의 형상이나 모서리부의 효과(Shape and corner effect)를 고려하지 않으면 안된다. 이와 같은 냉각속도의 불균일은 변형의 원인이 된다. 퀴칭에 의한 냉각은 강의 화학조성이나 오스테나이트 입도 등으로 결정되는 일정온도(Ms점)에서 마르텐사이트 변태가 시작되기 때문에 변태의 발생에 의한 응력이 다시 부가된다. 마르텐사이트 변태는 냉각속도가 빠른 표면에서부터 시작되어 연속적으로 중심부를 향해 진행되기 때문에 가열된 표면이 가열되지 않은 중심부를 소성변형 시키게 된다. 합금성분의 편석이나 표면에 탈탄이 있으면 변태응력의 불균일은 더욱 심하게 되고 그 결과 물품의 변형으로 나타나게 된다.

## 3. 일반 열처리의 변형과 저감책의 일례

### 3.1 저변형 · 저응력 환봉강의 열처리

최근, 특히 기계구성부품의 정밀도 향상 및 가공기술의 발달과 극단적인 효율화에 따라 종래의 중간재로 사용하던 고강도 환봉강은 그 다음의 가공공정을 줄여 간소화시키는 등, 저가공변형의 요구가 일반화

되고 있어 이미 완성품에 가까운 위치를 굳히고 있다. 예를 들면 가공기계의 볼(Ball)나사나 스티어링(Steering)용의 락바(Rack-bar)등은 제공 후, 사용자 측에서 소재에 실시하는 가공이나 표면경화처리에 의해 변형이 발생되어 효율이나 품질이 저하한다. 따라서 이에 대처하기 위해서는 저변형과 저잔류응력을 가지는 균질의 환봉강으로 퀸칭·템퍼링 열처리를 실시할 필요가 있기 때문에 이러한 기술을 개발한 것에 대한 개요를 설명한다.

3.1.1 개요

원래, 열처리는 저급의 재료를 보다 고품위로 변화시키는 것이다. 특히 강에서는 가장 현저한 특성이 있는 마르텐사이트 변태를 일으키는 기술이다. 즉 변태점 이상으로 가열하는 기술과 마르텐사이트 변태를 일으키는 냉각기술이 필요하다. 그러나 가장 기본적인 부분에서 매우 큰 문제가 되는 것은 최근의 소재에 대한 요구가 강도는 물론이고 나이가 변형, 균열, 표면 거칠기 등의 칫수나 외관이 중요시되기 때문이다. 가열단계에서는 이 온도에서 항복이 일어나고, 냉각에서는 열수축과 변태의 시간적, 부분적인 차이에 의해 변형이나 균열이 발생한다. 이상의 내용을 그림 3과 4에 개념적으로 나타낸다.

3.1.2 퀸칭냉각

퀸칭을 위한 냉각은 여러가지이나 일반적으로 물이나 퀸칭유를 사용하는 경우가 많다. 물에 의한 급속 냉각은 균일하여 퀸칭에 의한 경화의 영향이 심하게 되지만, 표면상태(특히 가열시의 산화스케일)에 따라 냉각 얼룩이 생겨 변태의 차이가 크게되고 굽힘이나 균열이 발생하기 쉽다. 한편 균열이나 변형의 발생은 어느 냉각속도 이상이 되면 이의 확률이 낮아지기 때문에 보다 빨리 냉각할 필요가 있지만 냉각을 늦게 하는 방법에 비해 역시 균열의 확률이 높고 또

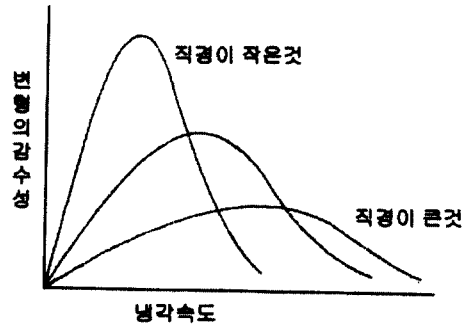


그림 3. 변형의 발생상황.

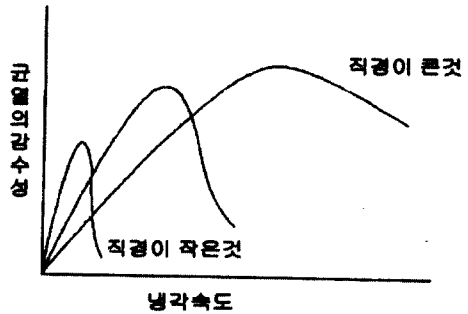


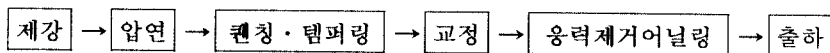
그림 4. 균열의 발생상황.

치명적인 결함이 된다. 열처리 가공에서는 어떤 형태라도 균열은 치명적이므로 이를 방지하기 위해 최대한의 노력이 필요하다.

3.1.3 템퍼링

환봉강의 굽힘은 템퍼링 가열시의 항복현상에 의한 것이 많다. 그림 5에 나타낸 새로운 처리에서는 퀸칭을 마친 재료를 빠르게 세워 구속시킴에 의해 템퍼링시의 굽힘과 열간에서의 크리프에 의한 굽힘, 그리고 잔류응력을 감소시키는 것이다. 그림 6에 나타낸 것과 같이 굽힘은 1 m 당 1.0 mm 이하로 가능하다. 종래의 방법에서는 퀸칭·템퍼링 후에 굽

종래의 공정



신공정

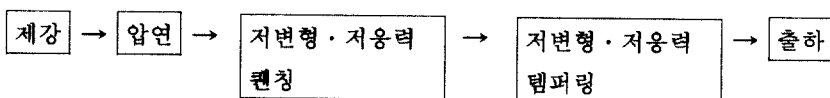


그림 5. 제조공정의 비교.

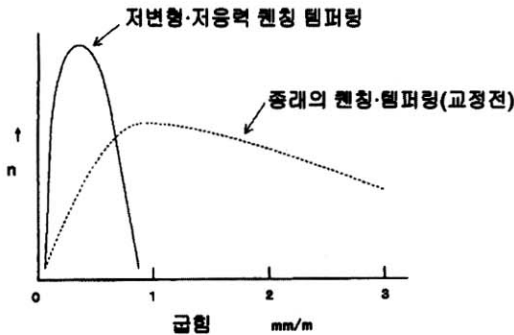


그림 6. 신공법에서 환봉강의 굽힘.

힘을 교정하기 때문에 외견상 바르게 보이지만 내부에는 소성 가공시의 응력이 남아 있어 이것이 후가공이나 사용시에 여러 가지 폐해를 나타내게 된다. 그러나 이 방법은 자연적으로 이루어지기 때문에 무리 없이 굽힘과 잔류응력을 없게 하고 후가공시의 문제를 없앨 수 있다.

3.1.4 제조공정의 비교

종래의 환봉강에 대한 켄칭·템퍼링에서는 그림 6과 같이 가열, 냉각시에 얼룩이나 응력에 의한 굽힘이 발생한다. 이 때문에 그 후의 교정에서 굽힘을 바로 잡고 이때 부가된 응력을 제거하는 어닐링 처리를 실시한다. 이때는 잔류한 응력이 후가공의 기계가공이나 열처리시, 또는 사용시에 여러가지 문제를 일으킨다. 신공법에서는 켄칭·템퍼링시의 모든 공정에서 재료를 회전시키므로 균일한 가열과 냉각을 할 수 있다. 또 종래의 실적을 기초로 하여 켄칭능이 큰 재료는 연하게, 또 낮은 것은 경하게 재료에 대응한 열처리를 할 수 있어 재료가 가진 특성을 충분히 활용할 수 있게되므로 국부적인 편차가 적은 켄칭·템퍼링을 할 수 있다.

다음에 이의 특징을 요약한다.

- ①봉강 전체의 굽힘 발생과 내부의 잔류응력이 매

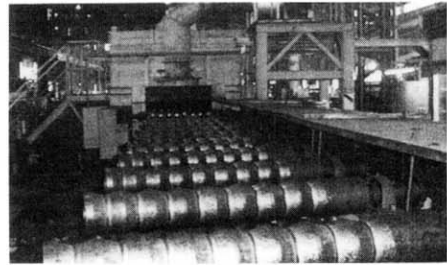


사진 1. 신공법의 템퍼링로.

우 적어지기 때문에 긴 칫수 그대로 가공이 가능하다.(긴 길이의 샤프트, 나사 등의 부품, 칫수절단 후 가공공수 삭감)

②고주파소입에 의한 굽힘의 발생 등 변태에 의한 체적수축이 적고, 또 국부적인 미소굽힘(기복)의 발생이 없다.

③재료에 적합한 열처리이므로 균열의 위험성이 없고 회수성이 좋다. 그림 7에 굽힘, 표 1에 잔류응력을 비교하여 나타내었다.

3.2 도물(刀物)의 열처리

공업용 도물의 열처리에서는 이의 성질상 표면경도를 높게 유지하고 편차를 최소화시키는 것은 물론이고 열처리 후의 마무리 연마비용을 최소로 할 것 등이 요구된다.

즉, 열처리에 의한 변형을 최소로 억제시키지 않으면 안 된다. 비교적 작은 크기의 도물이나 슬릿(Slit)형 칼은 최근 진공로를 이용하여 질소가스로 냉각하는 켄칭의 경우가 많아지고 있다. 그러나 긴 길이의 전단용 칼은 이의 형상 때문에 분위기 제어를 하지 않고 횡형(橫型)의 공기로 가열하고 오일 켄칭 및 템퍼링을 하는 경우가 많아 열처리 변형저감을 위해서는 종래의 방법을 취하고 있다. 일반적으로

표 1. 잔류응력의 비교

강종 AISI 4150 (X 선 측정, 표면 L 방향) (N/mm<sup>2</sup>)

종래의 제품 켄칭·템퍼링후 교정·응력제거어닐링		저변형·저응력열처리	
흑피 (黑皮)	Peeling 후	흑피 (黑皮)	Peeling 후
-35.3~ -44.1	-55.9~ -61.8	-31.4~ -41.2	-35.3- -62.8

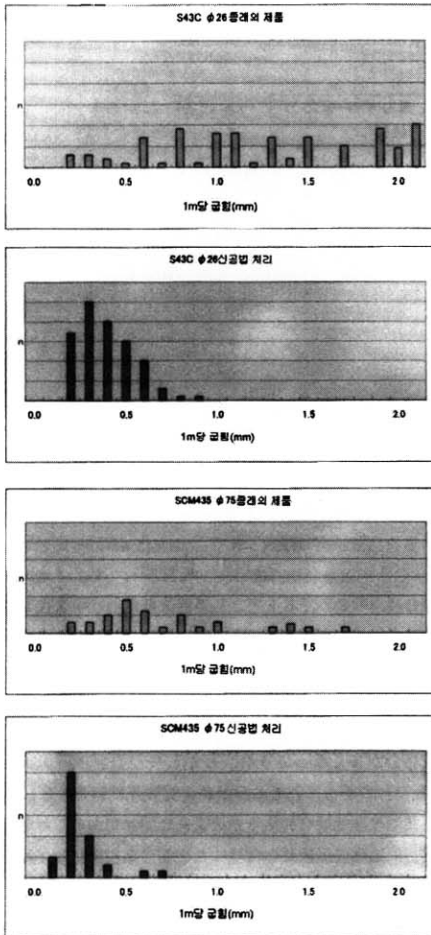


그림 7. 종래의 제품과 굽힘 비교.

로 직선형의 도물에 대한 제조공정을 나타내면 다음과 같다.

소재절단→단조→어닐링→절삭→켄칭·템퍼링→연삭.

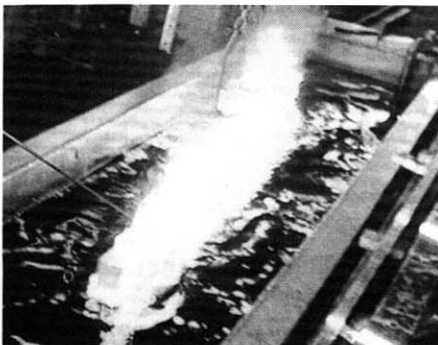


사진 2. 직선도물의 오일켄칭.

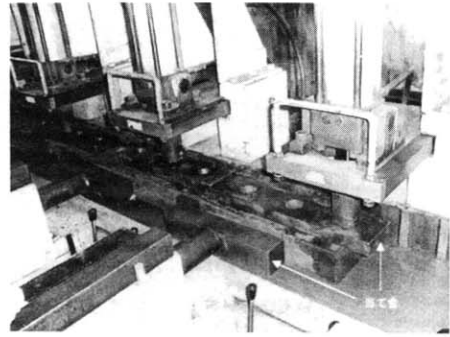


사진 3. 변태중의 프레스 교정.

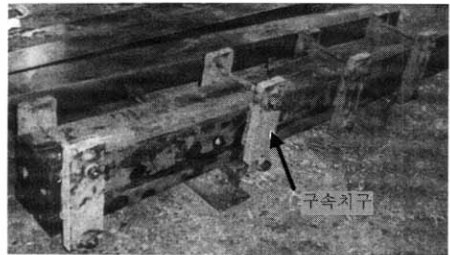


사진 4. 템퍼링전의 치구구속.

사진 2는 94 mm×210 mm×2500 mm인 열간 다이스강의 전단용 칼을 켄칭시키는 것을 보여준다. 1020°C에서 오스테나이트화시켜 60°C의 오일에 켄칭, Ms점 직하의 250°C 근방(실제 작업에서는 표면 부착된 오일이 즉시 건조되는 정도의 온도)에서 인상하고, 즉시 전용의 정반에 이동시켜 수평, 수직의 두 가지 방향으로 치구를 붙여가면서 유압프레스로 눌러 상온까지 공냉한다.

오일로부터 인상시킨 직후, 눈으로 본 것이지만 통상 5~10 mm 정도의 변형이 확인되었고, 프레스를 제거한 후는 1 mm 전후의 변형으로 나타났다. 이것은 강의 변태시 소성변형을 일으키는 마르텐사이트 변태유기소성(TRIP : Transformation-Induced Plasticity)을 이용, 변태시 프레스 교정(사진 3)을 실시함에 의해 내부응력을 최소화시키면 변형이 적고, 또 동시에 균열의 위험성도 피할수 있는 열처리가 될 수 있기 때문이다. 사진 4는 상온에서 프레스를 제거한 후 변형을 적게 하기 위해 템퍼링 전에 치구로 구속한 것을 나타낸다. 이러한 구속치구가 있는 상태에서 그대로 템퍼링함에 의해 최종적으로 0.5 mm 이하의 변형으로 나타날 수 있다. 또 변형을 적게

하기 위해서 햄머로 두드리는 예전의 방법도 있다. 일반적인 생각으로 굽힘을 바로 펴는 경우는 볼록(△)부를 두드린다는 생각이지만, 도물을 햄머로 교정하는 경우는 오목(▽)부를 두드려 늘려서 교정하는 것이다. 두드리는 곳이나 힘의 가감은 경험을 기초로 한 장인의 기술이라 할 수 있다.

### 3.3 단조품의 열처리

형단조한 열간단조품의 경우는 대량생산품이 많고 또 이의 형상이 여러 가지라서 열처리 변형의 발생 방법도 같지 않다. 일반적으로서 열처리의 가열시 변형이 작은 조정자세를 아래에 나타낸다.

①구멍(Hole), 목(Neck)을 이용하거나, 또는 틈 볼트 등을 이용, 수직으로 건다.

②중심의 밸런스(Balance)가 맞도록 수직으로 세운다.

③두 점에서 수평으로 지지한다.(지지점의 위치는 전체 길이에 대해 1/3 또는 1/4 사이로 한다)

④평활하고 열간강도가 큰 내열성의 치구에 바르게 설치한다.

실제 작업에서는 로의 크기와 유효가열대, 손작업 치구의 범위 내에서 설치작업이 이루어지지만 변형이 최소로 되면서 냉각이 균일하고, 또 적재량을 최대로 할 수 있도록 연구하는 것이 열처리 작업자의 지혜이다. 여기서는 판모양의 건설기계 부품(이하 플레이트트라 부름)에 열처리 공정을 추가함에 의해 변형을 저감시킬 수 있기 때문에 이의 사례를 나타낸다.

그림 8은 플레이트(Plate)의 개략도이다. 강종은 탄소량이 0.32%정도인 Mn-B강이며 가열온도는 850°C로 물켄칭한 것이다. 원래 사다리모양의 치구에 위의 ②에서 설명한 세우는 방식으로 설치하였지

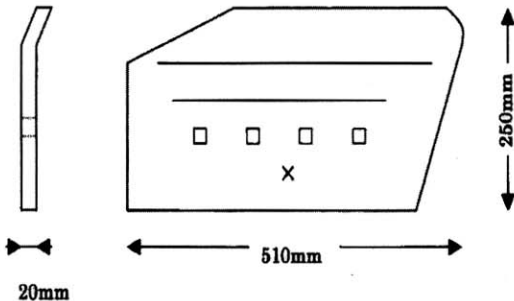


그림 8. 플레이트의 모식도.

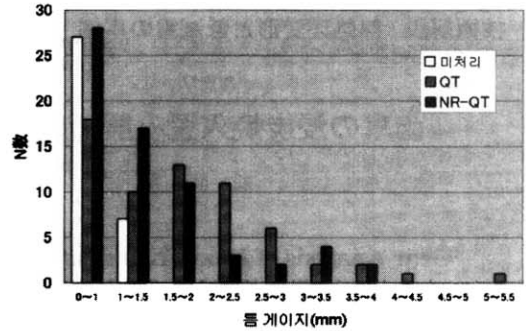


그림 9. 플레이트의 변형량.

만 변형은 컷었다. 여기서 설치에는 일손이 다소 들지만 그림 8에서와 같이 가장 좌측에 붙어있는 구멍에 20φ의 스테인리스제 환봉을 통하여 밑으로 늘어뜨려 설치함에 의해 상당히 변형을 적게 할 수 있었지만, 변형이 큰 것도 있어 회수율을 나쁘게 하였다.

여기서 플레이트의 제조공정을 조사한 결과, 압연된 환봉강에서 판모양의 형상으로 열간단조된 것임이 판명되어(단조비; 6~7) 이에 따른 상당한 내부응력이 변형에 나쁜 영향을 준 것으로 추정되었다. 한편, 내부응력을 저감시키기 위한 전처리로서 노르말라이징(NR)을 실시하고, 켄칭·템퍼링(Q.T)을 하여 변형을 적게할 수 있었다. 이러한 결과는 그림 9에 나타낸다. 또 변형은 플레이트에 스트레처(Stretcher)를 붙여서 그림 8의 X표 부분을 틈 게이지(Gauge)로 측정하였다.

## 4. 결 언

서언에서 설명한 바와 같이 최근 열처리 시뮬레이션 기술이 각 단계에 걸쳐 진행되어가고 있지만, 일반 열처리 작업현장에서의 변형대책에 대해서는 여러 가지 대중적인 방법이 많다. 본 기술자료에서는 3개의 사례를 소개하였지만 대책이 없는 사례도 많다. 최근은 일반열처리라도 잡아 거는 부분이 적어지고 거의 완성품에 가까운 물품이 많아지고 있다. 반면, 일반열처리의 수주단가는 20년 전 보다도 낮은 현상이라 가격이 걸려있는 대책은 실시하기 곤란하다. 따라서 현장 기술자의 지혜와 연구가 필요하지만, 보다 현장에서 사용하기 쉬운 열처리 시뮬레이션의 개발도 기대된다.

### 참고문헌

- (1) 熱處理特集号 ; 最近の低変形熱處理技術 : 変形シミュレーション技術の動向と課題, 熱處理, 42, 5, (2002).
- (2) 大和久重雄 : 熱處理のおはなし, (財)日本規格協會, p.67 (1992).
- (3) 大和久重雄 : 熱處理のおはなし, (財)日本規格協會, p.87 (1992).
- (4) 大和久重雄 : 熱處理のおはなし, (財)日本規格協會, p.88 (1992).
- (5) I. Tamura : Met. Sci., 16, p.245 (1982).