

# 자동차/기계 설계프로젝트 최종 보고서

과제명 : SM45C 탄소강 열처리에 대한 연구

(2012년 3월 2일 ~ 11월 13일)

팀명: 3조

자동차/기계공학 설계프로젝트 최종보고서를 붙임과 같이  
제출합니다.

2012. 12. 5.

대구대학교 기계자동차공학부(자동차/기계전공)


# 제 출 문

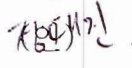
대구대학교 기계자동차공학부 학부장 귀하


본 보고서를 대구대학교 기계자동차공학부 설계프로젝트 과제  
'SM45C 탄소강 열처리에 대한 연구'의 결과보고서로 제출합니다.

(과제기간 : 12. 03. 02 ~ 12. 11. 13)

2012. 12. 5.

지도교수 : 김 봉 훈 

대표학생 : 정 대 진 

참여학생 : 장 준 호 

전 범 섭 

임 경 민 

# 목 차

최종보고 요약문 .....	4
제1장 과제내용 및 목표 .....	5
1-1. 목적 및 필요성 .....	5
1-2. 과제의 목표 .....	5
제2장 이론적 배경 .....	5
2-1. 이론적 배경 .....	5
2-2. 냉각에 따른 상 변태.....	6
2-3. TTT곡선.....	7
2-4. 마르텐사이트 변태.....	8
2-5. 베이나이트 변태.....	9
2-6. 어닐링.....	9
2-7. 노말라이징.....	10
2-8. 담금질.....	10
2-9. 템퍼링.....	12
2-10. 소둔처리.....	13
2-11. 인장시험.....	14
2-12. 연성.....	14
2-13. 경도시험.....	14
제3장 제작 .....	15
3-1. 예비실험 .....	15
3-2. 시편제작 .....	15
제4장 운용 및 시험 .....	16
4-1. 실험과정 .....	16
4-2. 인장실험 .....	17
4-3. 표면관찰 .....	20
4-4. 경도시험 .....	23
4-5. 결과분석 .....	23
제5장 결론 .....	25
[참고문헌] .....	26

# 최종보고 요약문

과제명	SM45C 탄소강 열처리에 대한 연구
팀명	3 조
팀원	정 대 진, 장 준 호, 전 범 섭, 임 경 민
과제기간	2012 년 3 월 2 일 ~ 2012 년 11 월 13 일

## 1. 연구내용

기계구조용 강재로 가장 많이 쓰이는 SM45C는 열처리방법에 따라 강도와 경도가 달라지는데 열처리 시간이 길 경우 침탄깊이가 깊어지고, 결정립 성장을 초래하며, 반대의 경우 침탄깊이가 얇아지고, 오스테나이트화 부족으로 경도 미달의 원인이 된다. 또한 열처리 온도가 높을 경우 침탄층이 깊어지고, 결정립이 성장하게 되며, 더많은 탄소의 고용이 가능해 지므로 표면 탄소 농도가 증가하게 되고, 반대의 경우 침탄층이 얇아지고, 고용가능한 탄소량이 부족해져 탄소농도가 낮아지거나 탄화물이 생기게 되며, 오스테나이트화 부족으로 경도미달등의 원인이 된다.

본 연구에서 기계구조용강의 적합한 경도 인성을 가지는 열처리 방법을 실험으로 공냉, 수냉, 로냉하여 담금질(Quenching), 불림(Normalizing), 풀림(Annealing) 으로 열처리 하여 조직과 경도 인장강도를 측정하여 분석하였음.

## 2. 목표

이번 실험은 SM45C를 가열 및 냉각하여 조직사진을 관찰하고 경도를 측정하여 열처리에 따른 조직의 변화와 경도 값과의 상관관계와 금속 조직의 변화를 관찰하고 경도와 인장강도에 대해 연구하는 것이 목표이다.

## 3. 제작

SM45C  $\varnothing 20$ ,  $\varnothing 30$ 의 탄소강을 KS B 0801 인장시편으로 각각 가공하여 전기로에 850℃로 승온 시간을 1시간으로 설정하였다.

이후 전기로에 전원을 끄고 서서히 냉각한 금속을 다시 재가열하여 실험변수에 따라 공냉, 수냉, 로냉하여 담금질(Quenching), 불림(Normalizing), 풀림(Annealing) 으로 열처리 함.

## 4. 운용 및 시험

sm45c 금속의 대한 경도, 인장강도를 실험하고 냉각성능에 대한 조직을 광학현미경으로 비교하고 경도를 측정한다.

## 제1장 과제내용 및 목표

### 1-1. 목적 및 필요성

동일재료도 열처리에 따라 그 적응성은 광범위하게 변할 수 있으며 열처리를 통해 얻고자 하는 것은 경도나 항장력을 확대시키고 조직의 연화 및 기계가공에 적합한 재료로 만들며 조직을 미세화 하여 방향성을 작게 하고 편석이 작고 균일한 상태로 하는 것이다. 또한 냉간가공의 영향을 제거하고, 변형방지, 응력제거, 조직의 안정화, 내식성 개선, 자성의 향상, 표면 경화를 위해 SM45C를 가열 및 냉각하여 조직사진을 관찰하고 경도를 측정하여 열처리에 따른 조직의 변화와 경도 값과의 상관관계와 금속 조직의 변화를 관찰하고 경도와 인장강도에 대한 분석을 목적으로 한다.

### 1-2. 과제의 목표

탄소강은 기계적 성질이 우수하고 열처리에 의해 성질을 개선시켜 사용하며, 강인성을 필요로 하는 기계부품, 자동차 후진 기어 등에 사용된다. 우리는 기계구조용 강재로 가장 많이 쓰이는 SM45C는 열처리를 하는 방법에 따라 쓰임새가 다르고 기계용 축재를 만들 때 열처리를 하여 SM45C 금속의 경우 열처리의 유무에 따라 강도와 경도가 달라지는 기계구조용강이기 때문에 가장 적합한 경도 인성을 가지는 열처리 방법을 연구하고 열처리 후 냉각방법에 따라 경도와 인장강도가 달라지며 조직의 형태가 어떻게 바뀌는지 이해하고 SM45C 금속의 조직을 변화 시키고 공냉, 수냉, 로냉 하였을 때 경도와 인장강도에 대해 연구하는 것이 목표이다.

## 제2장 이론적 배경

### 2-1. 이론적 배경

금속재료의 성질은 화학 조성에 기초를 두는데 여기에 열처리 및 가공방법에 의해서 금속의 조직을 바꿀 수 있고, 이 조직에 의해서 성질이 결정된다.

여러 가지 공업 재료 중에서 기계의 구성 재료인 금속재료는 각기 제품 또는 부품으로서의 기능을 충분히 발휘할 수 있어야 하는데, 이를 위해서는 경도(hardness), 강도(strength), 인성(toughness) 등의 기계적 성질이 요구되는 품질 수준을 만족시킬 수 있는 상태로 되어 있어야 한다. 또, 소재의 상태로서는 가공이 어렵거나 가공 중 차차 다음 가공이 힘들게 되거나 용접, 기계 가공 등에 의한 내부 응력이 남게 되는데, 이러한 경우에 필요한 기계적 성질 또는 화학적 성질을 부여하는 조작으로 열처리를 한다.

### 2-2. 냉각에 따른 상 변태

#### 2-2-1. 변태에 미치는 냉각속도의 영향

##### 1) 오스테나이트의 지연변태

오스테나이트 상태의 강을 냉각속도를 빠르게 하면,  $A_3$ ,  $A_{cm}$ ,  $A_1$  변태 등이 변태는 늦어지거나 낮은 온도에서 일어나거나 또는 불완전하게 끝나는 지연변태를 나타낸다. Fig 2.1은 공석강을 오스테나이트 상태에서 여러 가지 다른 속도로 냉각했을 때 나타나는 냉각변태곡선들을 비교한 것으로서, 냉각속도에 따라 변태온도가 변하는 것을 보여준다.<sup>1)</sup>

로냉 Ar 변태점에서 전부 펄라이트로 변태하며, 팽창하고 공냉, Ar<sub>1</sub>이 더욱 낮아진다. 유냉은 오스테나이트가 더욱 과냉되며 일부는 Ar'에서 변태한다. 다른 부분은 200°C 부근으로 과냉되어 Ar''에서 갑자기 팽창하여 수냉 Ar''만이 나타난다.

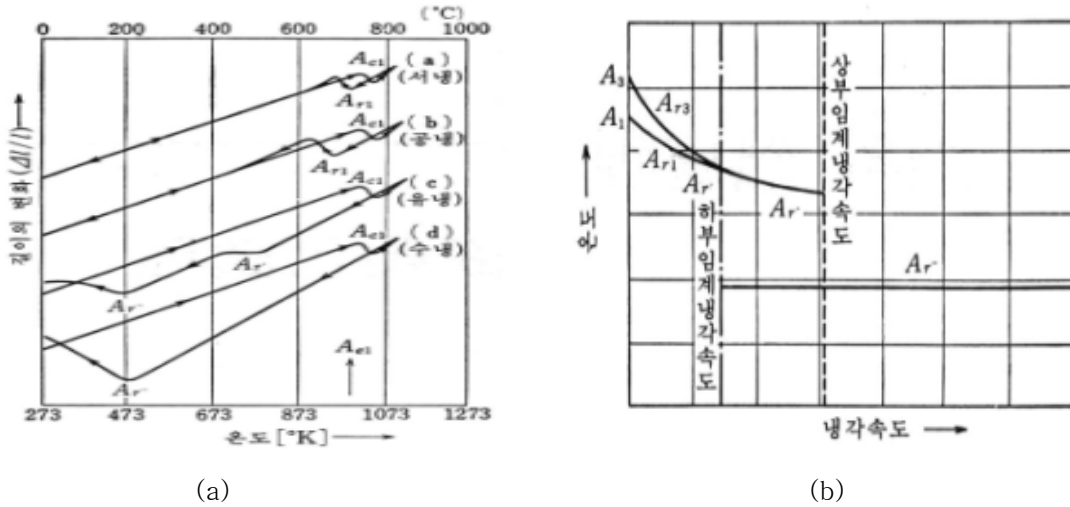


Fig 2.1 냉각 속도에 따른 공석강의 변태곡선(a)과 변태온도(b)

## 2) 냉각속도에 따른 미세조직 변화

하부임계속도 이하에서는 Ar<sub>3</sub>에서 펄라이트 변태가 시작되어 Ar<sub>1</sub>에서 변태가 종료되어, 결국 Fig 2.2(a)와 같은 미세펄라이트(sorbite) 조직이 나타난다. 상부, 하부 임계냉각속도 사이에서는 Ar'와 Ar''에서의 변태에 의해 Fig 2.2(b)와 같이 미세펄라이트(fine pearlite, troostite)와 마르텐사이트(martensite)가 나타난다. 상부임계냉각속도 이상의 냉각속도에서는 Ar''에서 시작되는 마르텐사이트 변태에 의해 Fig 2.2(c)와 같은 침상조직의 마르텐사이트 만이 나타난다.

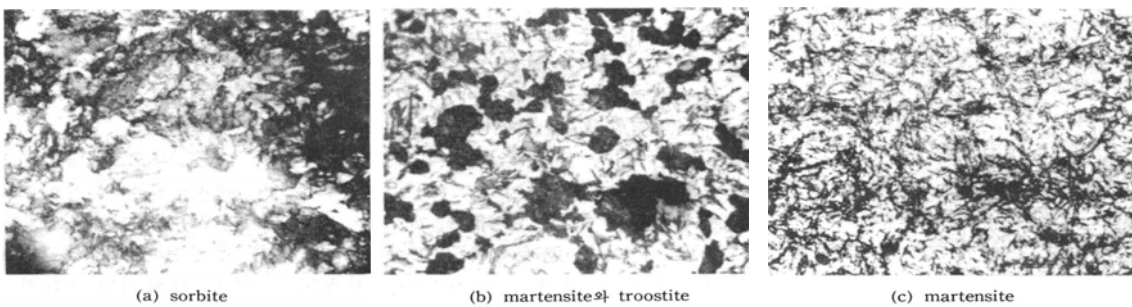


Fig 2.2 냉각속도에 따른 공석강의 미세조직

아공석강, 공석강, 과공석강에서 모두 A<sub>1</sub> 변태(펄라이트 변태)를 한다.

펄라이트 변태는 γ철이 α철로 변태하는 격자변태(lattice transformation)와 공석조성의 오스테나이트에서 Fe<sub>3</sub>C가 분리하는 확산변태(diffusion transformation)가 함께 일어난다.

- 격자변태 : FCC의 γ 고용체가 체심정방격자(BCT)를 거쳐 BCC의 α 고용체로 된다.
- 확산변태 : 1개의 C원자가 확산해서 3개의 Fe원자와 결합하여 Fe<sub>3</sub>C라는 탄화물을 만드는 것으로 원자확산이 일어날 시간이 필요하다.

위의 2가지 변태는 서냉할 때나 Ar'변태에서는 동시에 일어나나, 냉각속도가 더욱 빨라져서 상부임계냉각속도에 이르면, 격자변태에 의해 BCT 또는 BCC 구조까지 진행되나, 탄소원자는 확산할 시간적 여유가 없어 과포화상태로 잔류하는 마르텐사이트가 된다.<sup>1)</sup>

### 2-3-1. TTT 곡선

오스테나이트 상태의 강을 빠른 속도로 냉각시키면 페라이트, 세멘타이트 및 펄라이트 변태가 늦어지거나 낮은 온도에서 일어나거나 또는 불완전하게 끝나서 새로운 상변태를 나타내는 지연변태(delayed transformation)가 일어나게 된다.

각 온도에서 시간에 따른 상변태 거동을 알아 볼 수 있게 도식적으로 나타낸 곡선들을 시간-온도 변태곡선도(TTT곡선: Time-Temperature Transformation diagram)이라 한다.

TTT곡선에는 일정온도에서 변태시작 시간과 마침 시간을 나타내 주는 항온변태곡선도(IT Diagram; Isothermal Transformation diagram)와 일정속도로 냉각하였을 때 변태 시작과 마침 온도와 시간을 보여 주는 연속냉각변태곡선도(CCT곡선: Continuous Cooling Transformation diagram)가 있다.

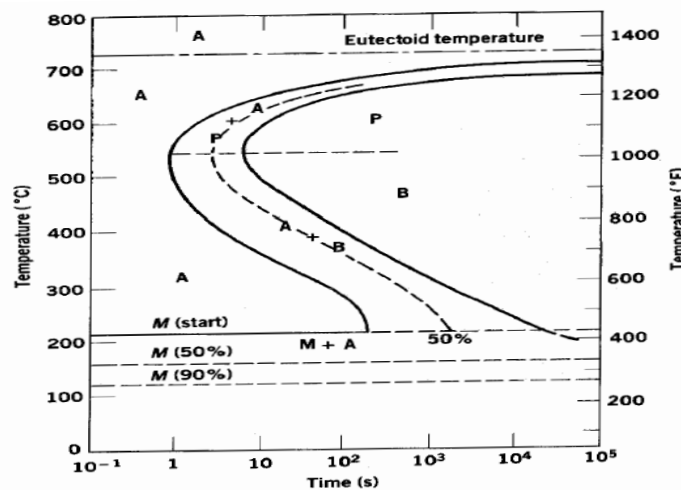


Fig 2.3 0.77%탄소강의 TTT선도

### 2-3-2. CCT(Continuous Cooling Transformation) 곡선

열처리 공정에서 강을 오스테나이트 온도에서부터 상온까지 연속냉각하면 오스테나이트는 넓은 온도범위에서 걸쳐서 일어난다.

일정한 속도로 연속냉각하여 변태의 개시점과 종료점을 측정해서 온도와 대수눈금의 시간관계로 연속냉각변태선도(Continuous Cooling Transformation diagram) CCT곡선이라 한다.

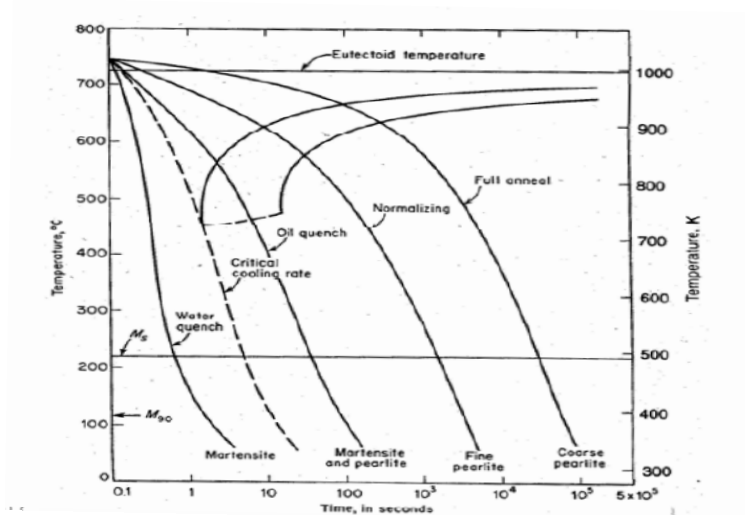


Fig 2.4 CCT선도(Continuous Cooling Transformation diagram)

## 2-4. 마르텐사이트 변태

오스테나이트 상태에 있는 탄소강이 임계냉각속도 이상으로 급냉되면, 즉 CCT곡선의 노즈를 지나는 속도보다 빠른 냉각속도로 냉각되면, 경도가 매우 큰 마르텐사이트(martensite)로 변태된다.

### 2-4-1. 마르텐사이트의 개요

#### 1) 마르텐사이트 변태의 특성

마르텐사이트 조직은 나무결(래스, lath) 또는 판(plate) 형태의 작은 결정립들로 이루어져 있고, 급냉 중에 원자의 확산없이 오스테나이트로부터 동소변태한 단일상이다.

저탄소강에서 마르텐사이트는 준 안정상으로서, BCC 또는 BCT(Body Centered Tetragonal) 구조의 과포화 침입형 탄소고용체로 이루어져 있다.

표면기복이 생기며 변태시 형상의 변화가 생기며, 원자 전체가 동시에 이동하는 협동적 원자운동을 한다. 결정 내에는 결함이 존재한다.

#### 2) Ms 점에 미치는 각종요인

냉각시 오스테나이트로부터 마르텐사이트가 시작되는 온도를 마르텐사이트 변태개시온도, Ms라 하고, 변태가 끝나는 온도를 마르텐사이트 변태종료온도, Mf라 한다.

마르텐사이트의 변태에는 과냉도가 필요하며, 이로 인해 Ms가 결정된다.

Ms에 미치는 냉각속도의 영향 : 이론적으로는 냉각속도에 관계없이 Ms는 일정한 온도이나, 실제로 순철 및 탄소강에서는 냉각속도가 빠르면 Ms는 낮아진다.

Ms에 미치는 합금원소의 영향 : 탄소강에서 C, N, Mn, Ni, Cr, Mo, Cu 등이 첨가되면 Ms는 낮아지고, Al, Co 등이 첨가되면 Ms는 높아짐. 다음 식은 Ms에 미치는 합금원소의 영향을 나타낸 경험식 중의 하나이다.

$$Ms(^{\circ}C) = 561 - 474(\%C) - 33(\%Mn) - 17(\%Ni) - 17(\%Cr) - 21(\%Mo)$$



시료가 얇을수록 Ms는 높고, 결정립 크기가 작을수록 Ms는 낮다.

보통 탄소강의 탄소함량이 증가할수록 Ms 온도는 낮아지며, 이와 함께 마르텐사이트의 형태는 래스 마르텐사이트(lath martensite)에서 판상 마르텐사이트(plate martensite)로 변화된다.<sup>2)</sup>

## 2-5. 베이나이트 변태

펄라이트와 마르텐사이트의 중간 형태의 조직상 중 대표적인 것은 베이나이트(bainite)이다.

- 베이나이트는 등온열처리 또는 연속냉각에 의해 생성될 수 있다.
- 마르텐사이트와 같이 베이나이트 내의 펄라이트는 고밀도의 전위를 가진 래스(lath) 또는 판(plate)의 형태를 가지고 있으며, 따라서 베이나이트는 확산변태 및 마르텐사이트 변태의 중간 형태의 변태과정에 의해 생성된다고 할 수 있다.

## 2-6. 어닐링(annealing, 풀림)

일정한 온도로 가열한 다음 서서히 냉각시키는 열처리로서 풀림, 소둔이라고도 한다.

### 1) 완전어닐링(full annealing)

냉간가공이나 담금질 등의 영향을 완전히 없애기 위해 실시한다.

- 오스테나이트 상태로 가열한 후 서냉한다.
- 열처리 후 미세조직
  - 아공석강: (펄라이트 + 층상 펄라이트)
  - 과공석강: (층상 펄라이트 + 초석 Fe<sub>3</sub>C)

### 2) 확산어닐링(homogenizing, diffusion annealing)

강괴 내 원소의 편석(C, P, S 등)을 경감하기 위하여 고온으로 가열한 후 서냉하는 열처리이다.

- 단조, 압연 등의 전처리이며 결정립이 조대화되지 않는 온도(1050~1300℃)에서 장시간 가열한 후 서냉시킨다.

### 3) 구상화어닐링(spheroidizing annealing)

강 중의 탄화물을 구상화시킬 목적으로 행하는 열처리법이다.

- 소성가공을 용이하게 하고, 피로강도 향상이 목적이다.

### 4) 중간어닐링(process annealing)

강을 냉간가공(신선, deep drawing) 등의 심한 가공을 하면 경화되고 연성이 낮아져서 더 이상의 가공을 할 수 없는 데, 이때 작업 중간에 A<sub>1</sub>점 이하의 온도로 가열한다.

- 회복과 재결정이 일어나고, 응력제거뿐 아니라 완전히 연화된다.

### 5) 응력제거어닐링(stress relief annealing)

주조, 단조, 담금질, 냉간가공, 열간가공 및 용접 등에 잔류응력을 제거하기 위한 열처리

- 500~600℃의 저온으로 적당한 시간 유지한 후에 서냉시킨다.
- 재결정온도 이하이므로 회복에 의해 잔류응력이 제거된다.

## 2-7. 노말라이징 (normalizing, 불림)

일정한 온도로 가열한 다음 공기 중에서 냉각시키는 열처리로서 불림, 소둔 이라고도 한다. A<sub>c3</sub>, A<sub>cm</sub>보다 40~60℃ 높은 온도로 가열하여 균일한 오스테나이트 상으로 한 후 공냉한다.

## 1) 목적

조대조직의 미세화, 가공 또는 응고속도의 불 균일에 따른 조직의 불 균질성 및 내부응력의 감소, 구상화어닐링의 전처리 또는 망상  $Fe_3C$ 의 미세화 및 저탄소강의 피삭성 개선, 노말라이징 조직은 어닐링조직보다 균질하고 미세하므로 강인성이 어닐링 강보다 우수하고, 미세 펄라이트 또는 탄화물의 분포가 균일해짐에 따라 경화능은 향상된다. 대형주조품, 주강에서 나타나기 쉬운 조대결정조직도 미세 페라이트와 펄라이트로 되어 기계적 성질이 개선된다.

Fig 2.5은 0.3% 탄소강을 노말라이징 하였을 때 얻어지는 광학현미경 조직으로서, 다각형의 페라이트(그림에서 흰색 부분)와 펄라이트(그림에서 검은색 부분)가 균일한 형상으로 분포하고 있음을 알 수 있다.<sup>3)</sup>

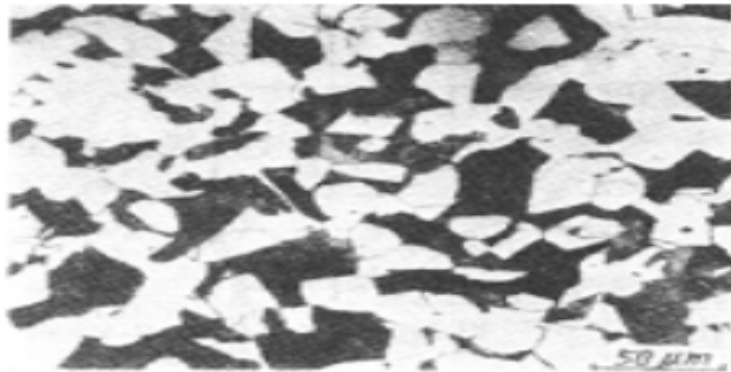


Fig 2.5 0.3% 탄소강의 노말라이징 미세조직(광학현미경)

## 2-8. 담금질(quenching)

강을 고강도화 하기위해 실시하는 열처리로서 열처리된 강의 미세조직은 주로 마르텐사이트로 이루어짐. 한자어로는 소입이라 불리기도 함.

즉, 강을 오스테나이트 영역으로 가열한 후 물이나 기름 등에 넣어 급냉 시키는 것을 말한다.

가열온도는 아공석강의 경우에는  $Ac_3$ 보다  $30 \sim 50^\circ C$  높은 온도이며, 과공석강의 경우에는  $Ac_1$ 보다  $30 \sim 50^\circ C$  높은 온도이다. 공업용 냉각제로는 물, 각종 기름, 염류의 수용액 등이 사용된다.

최고경도는 탄소량에 의해 결정되며 0.6%까지는 탄소 함량에 비례하나, 그 이상에서는 거의 일정한 정도이다. (Fig 2.6a 참조)

담금질작업은  $Ar'$  변태가 일어나는 구역은 급냉시키고, 균열이 생길 위험이 있는  $Ar''$  변태구역은 서냉한다. (Fig 2.6b 참조)

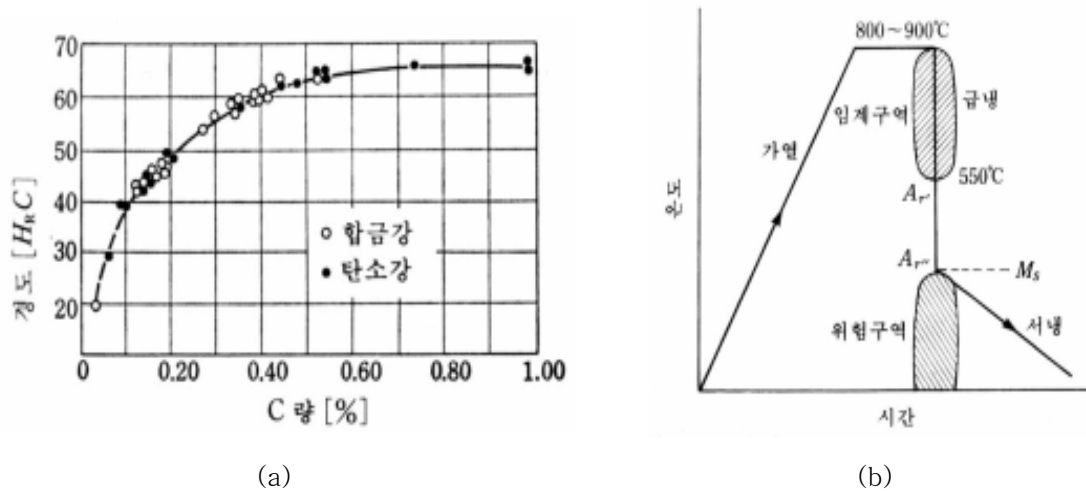


Fig 2.6 탄소함량에 따른 담금질 후의 강의 경도(a) 및 담금질 냉각작업(b)

### 1). 담금질의 종류

담금질의 종류로는 단계담금질, 마르켄칭, 오스템퍼링으로 나누어진다.

(1) 단계담금질은 중단담금질(interrupted quenching)이라고도 하며, S곡선의 nose 이하, Ms점 위의 온도까지 수냉한 후, 공기 중에 꺼내어 공냉하거나 유냉하여 마르텐사이트 생성구역은 서냉한다.

(2) 마르켄칭(Marquenching)은 Ms점 직상으로 가열된 염욕에 담금질(thermo-quenching)하고, 재료의 내외부가 같은 온도가 될 때까지 항온유지(equallization)하다가, 시편 각부의 온도차가 생기지 않도록 비교적 서냉하여 Ar''변태를 진행한다. 재료의 내외부가 동시에 서서히 마르텐사이트화하기 때문에 균열이나 비틀림이 생기지 않음. 목적에 따라 tempering하여 경도와 강도 조절 할 수 있다. Ms점 이하의 온도로 유지, 마르텐사이트의 self tempering효과를 얻을 수 있고, 잔류응력을 피할 수 있고 경도를 유지하면서 충격치를 높힐 수 있다.

(3) 오스템퍼링(Austempering 또는 bainite quenching) 철강에 강도와 인성을 주고, 또한 비틀림이나 균열을 방지하고, Ar'와 Ar''사이 온도의 염욕에 담금질하여 오스테나이트의 변태가 끝날 때까지 항온유지하여 Ar'점에 가까운 온도에서 실시: 연한 상부 베이나이트 Ar''점에 가까운 온도에서 실시하여 경한 하부 베이나이트 생성한다. 특징으로는 열처리 후 템퍼링(tempering)을 할 필요가 없다.

### 2) 담금질에 따른 부피변화

담금질에 의해 오스테나이트가 마르텐사이트로 바뀌면 각 상의 결정구조가 다르기 때문에 강의 부피가 바뀌게 된다.

#### (1) 부피변화의 크기 순서

martensite > fine pearlite > medium pearlite > rough pearlite > austenite

담금질에 따른 부피변화는 마르텐사이트가 생길 때의 부피팽창이 가장 큰 이유는 오스테나이트 상의 탄소가 그대로 페라이트에 고용하기 때문이다.

펄라이트 변태에 따라 페라이트로 변태하면 팽창하지만, 고용탄소가 유리되어 Fe<sub>3</sub>C를 만들 때 수축하므로 팽창량이 감한다.

(2) 마르텐사이트 변태시 균열이 생길 수 있는 이유

Fig 2.7에서와 같이 재료의 내부는 a선을 따라 냉각하여 페라이트와 펄라이트가 되면서 팽창한 후 냉각에 의해 수축하며, 재료의 외부는 b선을 따라 냉각되어 수축하다가 상온부근에서 Ar'' 변태에 의해 팽창하므로 이때 표면에 균열이 생기는 것이다.

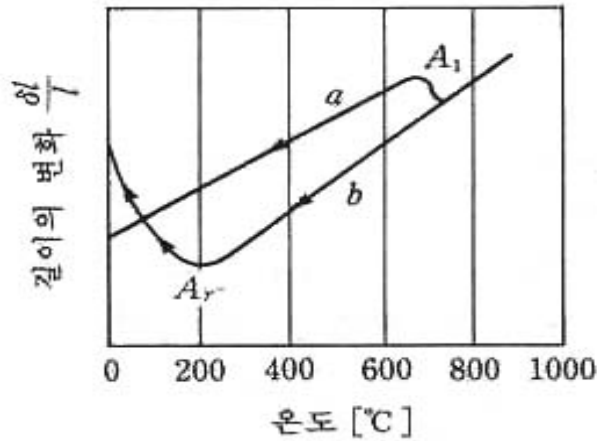


Fig 2.7 담금질 시의 부피변화

(3) 담금질 시 생기는 균열 및 비틀림 방지책

200°C 이하의 마르텐사이트에 의한 팽창이 서서히 일어나게 함. 즉, 상온까지 냉각시키지 않고, 100~200°C 부근을 서서히 냉각하여 마르텐사이트가 서서히 생기도록 하여야 한다.

- 부품의 뾰족한 부분을 둥글게 함.
- 급격한 단면형상의 변화를 피함.
- 필요 이상의 고탄소강을 쓰지 않음.
- 표면을 고탄소로 하여 변태의 시차를 작게(탄소량 증가할수록 Ms 저하)
- 담금질 후 가능한 한 빨리 템퍼링하여 잔류응력 제거.

## 2-9. 템퍼링(tempering, 뜨임)

담금질한 강은 경도는 매우 높으나 취약해서 사용할 수 없으므로 Fig 2.8와 같이 담금질한 후에 변태점 이하의 온도로 재가열하는 데, 이러한 열처리를 템퍼링(tempering)이라 하며, 우리말로 뜨임, 한자어로는 소려라고 부르기도 함

템퍼링의 목적은 조직 및 기계적 성질을 안정화하고, 잔류응력을 경감 또는 제거하며 탄성한, 항복강도를 향상시키는 것임. (템퍼링하면 경도는 낮아지나 인성이 좋아짐)

경도와 내마모성이 필요할 때에는 고탄소강을 써서 저온에서 템퍼링하고, 경도를 조금 희생하더라도 인성을 요할 때에는 저탄소강을 써서 고온에서 템퍼링함<sup>4)</sup>

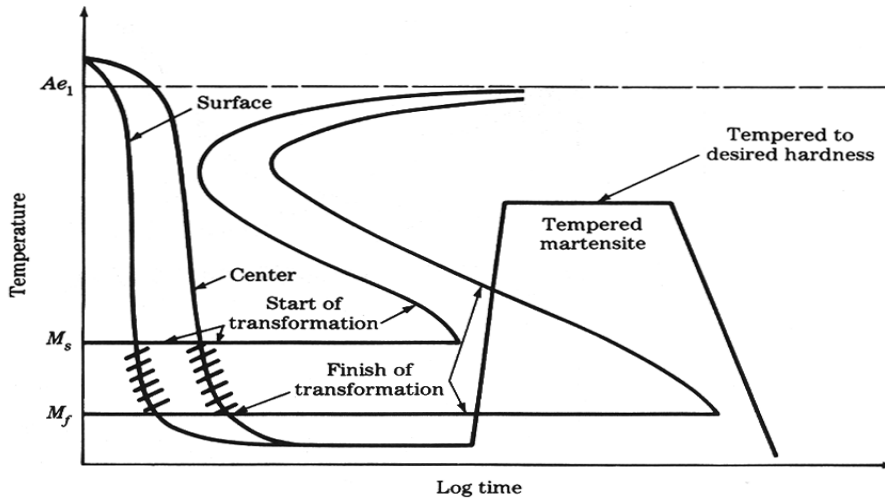


Fig 2.8 담금질과 템퍼링을 설명하는 도식적 그림

### 1) 템퍼링 시 조직변화

템퍼링 시 강에서 일어나는 주요 현상은 무 확산 변태로 생긴 마르텐사이트의 분해석출임. 즉, 탄소를 과포화하게 고용된 M이 페라이트와 탄화물로 분해하는 과정(3단계로 나뉨)

- (1) 제1단계: 80~200°C, 과포화 고용된 C가 ε탄화물(hcp, Fe<sub>2</sub>C에 가까운 과 탄화물)로 석출  
 ·마르텐사이트 중의 C는 약 0.25%로 감소하고, 정방성이 저하됨  
 ·이 마르텐사이트를 저탄소 마르텐사이트라 함  
 ·담금질 상태의 마르텐사이트보다 nital이나 picral에 의해서 부식하기 쉬움.
- (2) 제2단계: 200~300°C, 고탄소강에서 잔류 오스테나이트가 있을 때에만 일어나며,  
 잔류 오스테나이트가 저탄소 마르텐사이트와 ε탄화물로 분해.
- (3) 제3단계: 300~350°C, ε탄화물은 모상 중에 고용함과 동시에 새로 Fe<sub>3</sub>C가 석출하고 수축함.  
 저탄소 마르텐사이트는 더욱 저탄소로 되고 거의 페라이트로 되나 전위밀도는 높은 편임.  
 이때 생기는 조직은 fine pearlite(troostite)이며 가장 부식되기 쉬움.

### 2-10. 소둔처리(Annealing)

강의 표준조직(Standard Structure)은 어닐링 온도로부터 노멀라이징 하였을 때의 조직이다.

아공석강(C<0.8%)은 어닐링 온도와 노멀라이징 온도가 같기 때문에, A3변태점 이상 30~50°C로 일정시간 가열하여 미세한 오스테나이트 조직으로 재결정시킨 후 서서히 냉각한다. 즉 845°C까지 가열하고 650°C까지 시간당 28°C이하의 속도로 노냉한다.

승온 시간은 25mm당 30분이며 유지시간은 펄라이트계 이므로 제로타임(Zero time)이다. 그 이유는 A1 변태점에서 펄라이트가 순간적으로 오스테나이트로 변태하고, 그로부터 A3 변태점에서 페라이트가 완전히 고용되고, 다시 +50°C 가열하게 됨으로, 완전히 균일한 오스테나이트로 되면 그 즉시로 냉각처리 하여도 되기 때문이다.

## 2-11. 인장시험

일반적으로 단면이 원형 또는 사각형인 평행부를 갖는, 규정된 형상과 치수의 시험편을 그 축의 방향으로 파단이 일어날 때까지 서서히 인장하중을 가하며 하중과 변형을 측정 하는 시험.<sup>5)</sup>

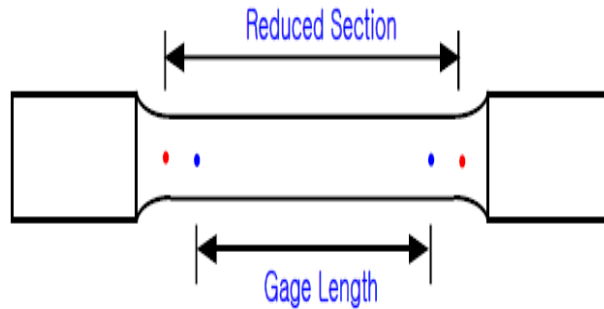


Fig 2.9 인장시험 표점거리

**표점거리** - 평행부에 표시된 두 표점간의 거리로, 연신률 측정의 기준이 되는 거리를 말한다.

## 2-12. 연성 (Ductility)

탄성한계를 넘는 힘을 가하여도 재료가 파괴되지 않고 늘어나는 성질을 말한다. 전성과 함께 물체를 가공하는 데 있어 아주 중요한 성질이며, 같은 재료라도 온도나 습도 등에 크게 영향을 받는다.

## 2-13 경도시험

### 1) 로크웰 경도 <sup>6)</sup>

다이아몬드 누르개 또는 강구 누르개를 사용하여, 먼저 기준하중을 가하고, 다음에 시험하중을 가한 후 다시 기준하중으로 되돌렸을 때, 전후 2회의 기준하중에 있어서의 누르개 침입깊이의 차 h로부터 구한 경도. 그 경도는 표-1의 경도(HR)의 정의식에 따른다.

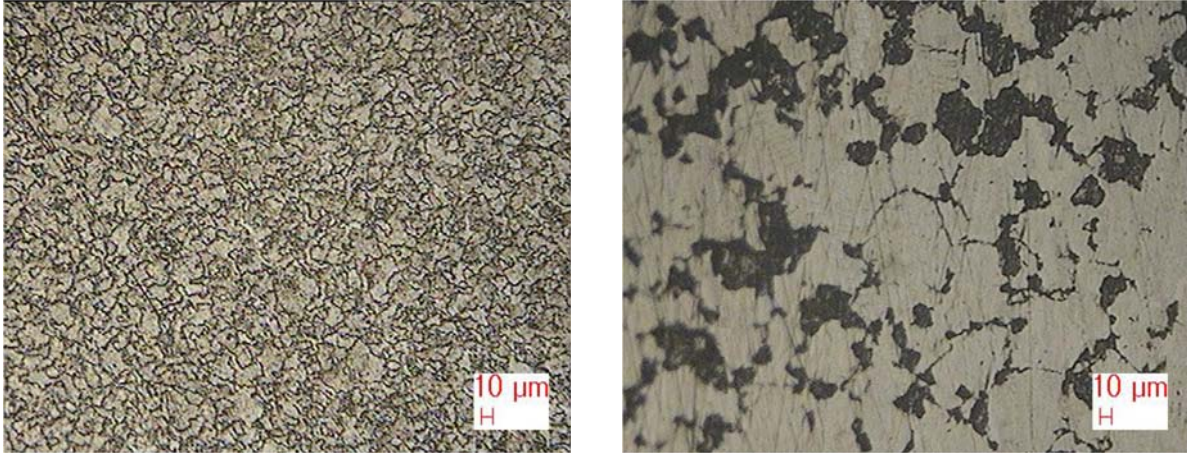
또한, 기준하중이 98.07N일 때를 로크웰 경도라 하고, 기준하중이 29.42N일 때를 로크웰 슈퍼피셜 경도라 한다.

로크웰 경도 및 로크웰 슈퍼피셜 경도를 표시하는 영어 대문자 HR에 스케일을 부기한 기호.

### 제3장. 제작

#### 3-1. 예비실험

Fig 3.1 (a)는 시편 제작에 앞서 소재구입 후 SM45C 소재를 정확성을 확인한 결과 열처리과정(어닐링)후 경도를 비교 SM45C의 경도(HB160-220)와 측정경도(HB190)확인 할 수 있었다. Fig 3.1 (b)의 조직은 실험에 정확도를 위해 실험에 앞서 수냉하여 본 결과 참고논문과 같은 조직을 확인 하였다.



(a)

(b)

Fig 3.1 열처리 전과 850℃ 온도에서 공냉한 사진

#### 3-2. 시편제작

KS B 0801-금속 재료 인장 시험편을 기준으로 가공업체에 의뢰하여 제작.<sup>7,8)</sup>

인장 시험편을 기준으로 가공업체에 의뢰를 위해 KS B 0801-금속 재료 도면

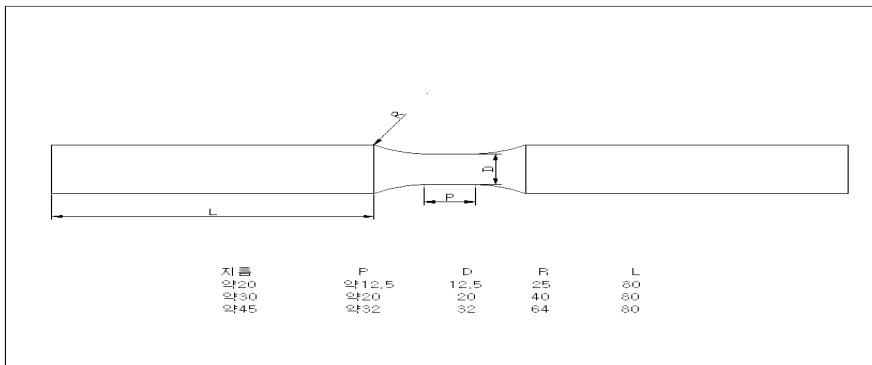


Fig 3.2 시험편 가공 도면 (∅20, ∅30, 각 16EA)



Fig 3.3 시험편 가공 사진 (∅20, ∅30, 각 16EA)

## 제4장 운용 및 시험

### 4-1. 실험과정

#### 4-1-1. 열처리

시편 32EA를 동일한 조직으로 만들기 위해 소둔처리 그다음  $\varnothing 20, \varnothing 30$ 의 시편을 각각 퀴칭(수냉), 노멀라이징(공냉), 어닐링(로냉) 으로 실험한다. 실험 방법은 세가지 모두 동일하게  $850^{\circ}\text{C}$ 까지 가열한다. 그 후 퀴칭(수냉)은 열전대를 설치 후 가열한 다음 바로 물만에 담겨 열을 식히는 방법인데 이 과정을 열전대를 통해서 보면 온도가 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 노멀라이징(공냉)은 가열 후로 안에서 꺼내 식히는 과정인데 퀴칭보다 시간이 좀 더 걸린다. 마지막으로 어닐링(로냉)은  $850^{\circ}\text{C}$ 까지 가열된 로를 끈 다음 로 안에서 식히는 과정인데 시간이 가장 많이 걸리는 작업이다. 가열시 시편을 세워서 가열한다.<sup>9)</sup>



(a)



(b)

Fig 4.1 시편에 열전대를 설치한 사진(a)과 열처리 후 공냉하는 사진(b)



Fig 4.2 시편 열처리 후



#### 4-1-2. 실험방법

SM 45C 탄소강의 20 $\phi$ 와 30 $\phi$ 의 시편을 두께와 냉각방법 두 가지 변수로 실험을 하였다.

Table 4.1 두께에 따른 냉각 실험방법

두께	냉각방법
20mm	공냉
20mm	수냉
20mm	로냉
30mm	공냉
30mm	수냉
30mm	로냉

열공학 내연기관실험 실습실에 전기로를 사용하여 800 $^{\circ}$ C까지 승온 시간은 1시간 30분으로 설정하고 열전대를 이용하여 시편의 온도가 870 $^{\circ}$ C 임을 확인한 후 전기로를 정지시켜 공냉과 수냉을 위해 시편을 로에서 꺼내고 로냉 시편을 로안에서 서서히냉각하여 실험.

#### 4-2. 인장실험

##### 1) 인장 시험편 KS B 0801 : 8호 시험편 20 $\phi$ /30 $\phi$

실험편의 재질 : SM45C

- ① 실험편 A :  $\phi$ 20
- ② 실험편 B :  $\phi$ 30

##### 2) 실험방법

인장실험기 소프트웨어 KStester에서 시험방법을 인장시험설정 선택한 후시험 관련 데이터 입력 한다. 하중 영역을 설정하고 인장 시험기에 시편을 상단  $\rightarrow$  하단 순으로 장착한다.

영점 조정 후 인장 시작 버튼을 누르고 인장시험을 시작한다.

인장시편이 파단되면 인장시험 종료버튼을 누르고, 그래프 확인 화면 로딩하여, 시험 그래프 선택한다. 이후 데이터 수치 보고 하중-변위 데이터를 응력-변형률 데이터로 변환하여 데이터 저장 하고 응력-변형률 데이터를 엑셀의 차트 기능 이용하여 그래프로 나타낸다.<sup>10)</sup>

Table 4.2 실험 테이블

실험편	P	D	R	L
실험편 A	12.5	12.5	25	80
실험편 B	20	20	40	80

(단위 : mm)



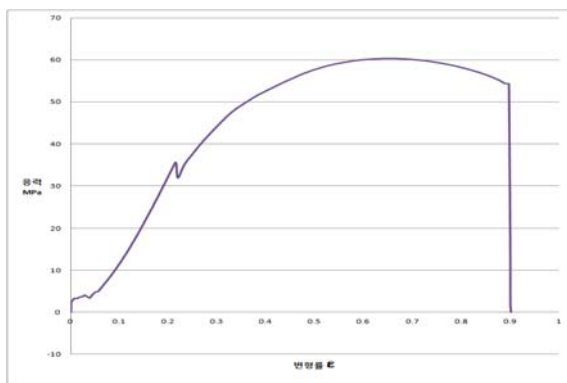
Fig 4.3 인장기에 시편을 물린 사진

인장실험은 Annealing ( $\varnothing 30$ ,  $\varnothing 20$ ), Normalising ( $\varnothing 30$ ,  $\varnothing 20$ ), Quenching ( $\varnothing 30$ ,  $\varnothing 20$ ) 순으로 열처리된 시편으로 실험 하였다.

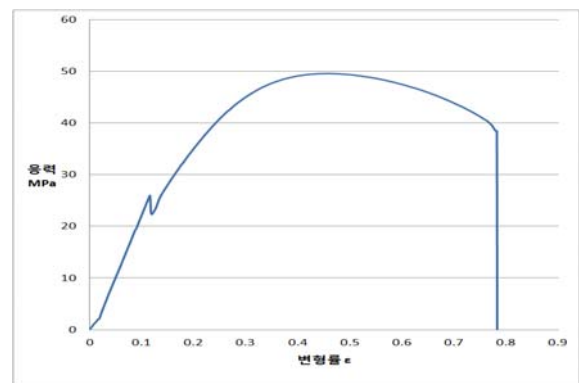
#### 4-2-1. 실험결과 그래프

##### 1) Steel (S45C) Annealing

인장실험 하중-변위 데이터를 응력-변형률 데이터로 변환하여 데이터 저장 하고 응력-변형률 데이터를 엑셀의 차트 기능 이용하여 그래프를 그려 본 결과 실험편  $\varnothing 20$  Annealing은 인장강도 49.5Mpa 연신율 93.1% 확인 하였다. 실험편  $\varnothing 30$  Annealing은 인장강도 60.3Mpa 연신율은 90.0%임을 확인하였다. Annealing은 강을 연하게 하는 목적으로 Normalising보다 연성이 우수한 것을 확인 하였다.



(a)



(b)

Fig 4.4  $\varnothing 30$ (a)와  $\varnothing 20$ (b) 어닐링 인장 그래프

## 2) Steel (S45C) Normalising

인장실험 하중-변위 데이터를 응력-변형률 데이터로 변환하여 데이터 저장 하고 응력-변형률 데이터를 엑셀의 차트 기능 이용하여 그래프를 그려 본 결과 실험편  $\varnothing 20$  Normalising은 인장강도 56.2Mpa 연신율 83.0% 확인 하였다. 실험편  $\varnothing 30$  Normalising은 인장강도 63.2Mpa 연신율은 80.0%임을 확인하였다. Normalising의 경우 Annealing보다 인장강도는 높으나 연신율은 저하되는 것을 알 수 있었다.

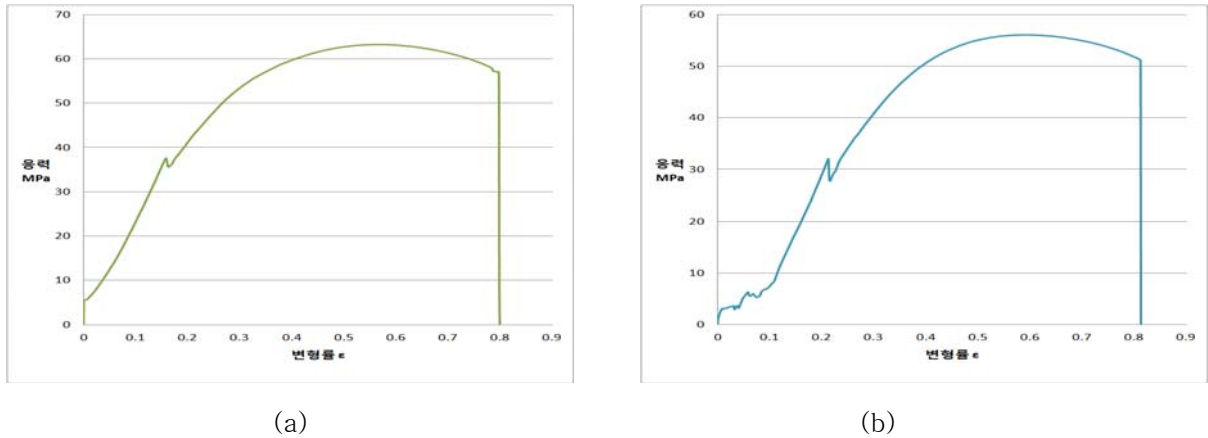


Fig 4.5  $\varnothing 30$ (a)와  $\varnothing 20$ (b) 노말라이징 인장 그래프

## 3) Steel (S45C) Quenching

인장실험 하중-변위 데이터를 응력-변형률 데이터로 변환하여 데이터 저장 하고 응력-변형률 데이터를 엑셀의 차트 기능 이용하여 그래프를 그려 본 결과 실험편  $\varnothing 20$  Quenching은 인장강도 99.0Mpa 연신율 27.9% 확인 하였다. 실험편  $\varnothing 30$  Quenching은 인장강도 110.0Mpa 연신율은 33.6%임을 확인하였다. Quenching의 경우 Annealing, Normalising보다 인장강도는 높으나 연신율은 저하되는 것을 알 수 있었다. Quenching의 경우 연성이 낮아 취성재료임을 확인 하였다.

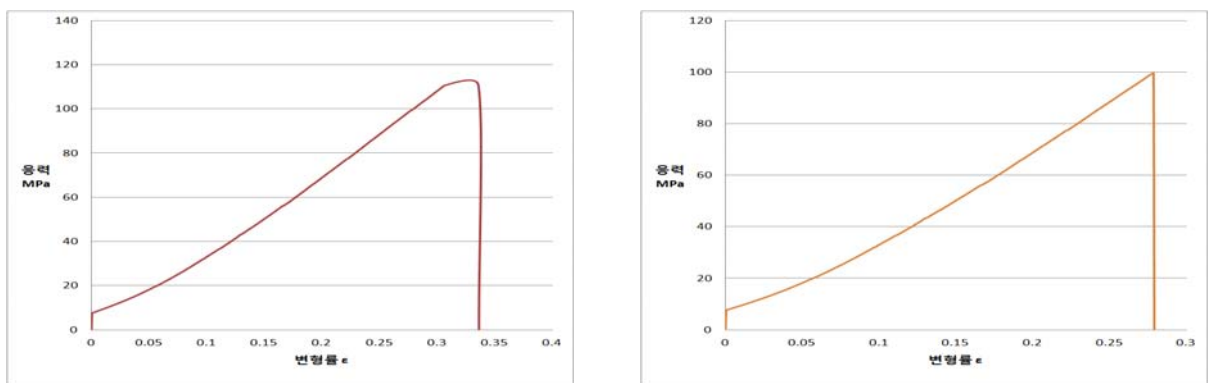


Fig 4.6  $\varnothing 30$ (a)와  $\varnothing 20$ (b) 퀴칭 인장 그래프

### 4-3. 표면관찰

인장실험이 끝난 시편을 열처리 부위에 영향이 없도록 습식절단기를 이용하여 시편을 작게 잘라서 폴리싱을 한 후 부식을 하고 I-solution을 이용하여 표면을 관찰하였다. 습식절단기를 이용하여 시편을 자른 후 현미경으로 조직을 관찰하기 위해 폴리싱을 한 후 광학현미경을 이용하여 조직을 확인하였다. 연마된 표면은 조직을 나타내지 않고 그 곳에 빛이 다다르면 거의 균일하게 반사된다. 그래서 에칭을 시켜 표면의 변화를 일으킨다. 모든 금속은 용해될 때 이온화 경향에 따라 양이온이 되려는 경향이 있고, 원소에 따라 그 세기가 변하므로 이를 이용하여 시편을 선택 부식시키는 것이다. 부식은 시계접시에 담긴 부식액 속에 시편을 침적시키거나, 부식액을 묻힌 탈지면으로 시편의 표면을 적셔서 실시하며 연마 면에 흠이 가지 않도록 주의한다.



Fig 4.7 폴리싱 하기 전 습식절단기를 이용하는 사진(a)과 폴리싱 작업하는 사진(b)

#### 4-3-1. 조직사진 열처리 후

##### 1) Steel (S45C) Annealing

A3 변태점 이상 30~50℃로 일정 시간 가열 유지한 다음 노 안에서 서냉하여 어닐링의 3단계를 거쳐 풀림(Annealing)을 하면 아공석강에서는 페라이트와 층상 펄라이트의 혼합조직이 된다.

Fig 4.8은 탄소량 0.45% 강을 870℃로 가열한 뒤 로내에서 서서히 냉각하여 nital 용액으로 부식하여 조직을 관찰하였다. 고온에서 오랜 시간 단련된 금속재료는 오스테나이트의 결정 입자가 조대해지며, 기계적 성질이 나빠진다. 어닐링은 기계가공성 및 인성을 향상을 목적으로 한다.

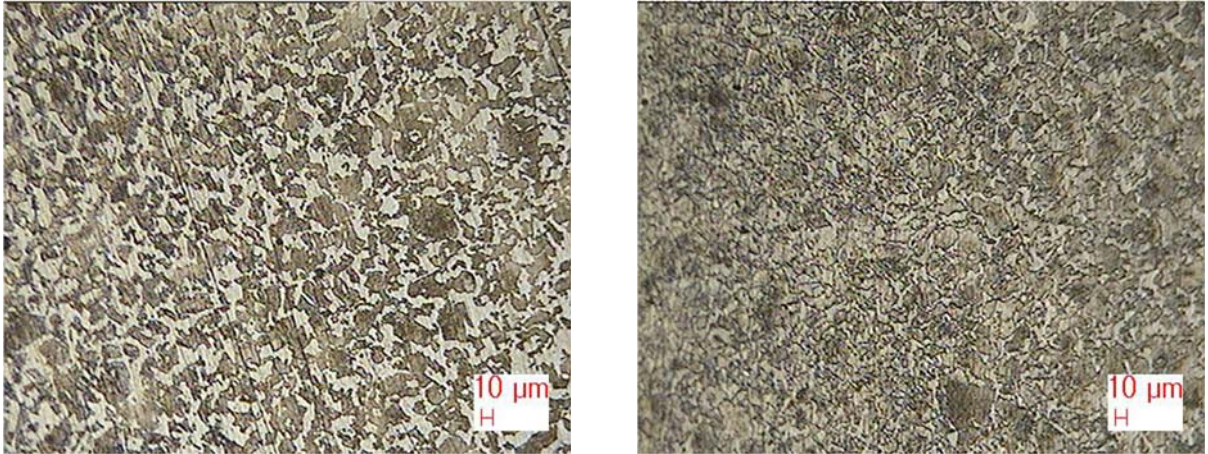


Fig 4.8  $\varnothing 30$ 와  $\varnothing 20$  어닐링 (100배율)

### 어닐링의 3단계

(1)회복(Recovery): 내부의 잔류응력 제거, 전위소멸 재배열

(2)재결정(recrystallization): 내부에 새로운 결정립의 핵이 생기고 이것이 성장해서 새로운 결정립을 만드는 단계

(3)결정립 성장(grain growth): 고온에서 열처리하면 회복, 재결정이 일어나 조직이 미세하게 되고 결정립계(grain boundary) 면적이 커지고 이때의 높은 에너지는 고온에서 불안정하기 때문에 이 에너지를 낮추기 위해 결정립이 성장한다.

## 2) Steel (S45C) Normalizing

Fig 4.9는 탄소량 0.45% 강을 870°C로 가열한 뒤 공기중에서 서냉(늦은속도)하여 nital 용액으로 부식하여 조직을 관찰하였다. 노말라이징은 재료를 표준화 하는 열처리로서 조직이나 기계적 성질을 균일하게 해주는 역할을 한다.

### 펠라이트(검은부분)+ 페라이트(흰부분)

흰부분은 알파철(순철)=페라이트 조직으로서 순철이며, 검은부분은 페라이트+시멘타이트 조직이 공석반응을 일으켜 생긴 층상조직인 펠라이트 조직으로 냉각속도에 따라 펠라이트의 층상간격이 틀러지며 일반적으로 냉각을 빠르게 하면 층상간격이 좁아지고 느리게 하면 층상간격이 넓어진다.

A3 변태점 이상 30~50°C로 일정 시간 가열한 다음, 일정한 시간을 유지하면 균일한 오스테나이트조직이 된다. 그 다음 안정된 공기 중에서 냉각시키면 미세하고 균일한 표준화된 조직을 얻을 수 있다. 강을 표준화 처리하면 취성이 저하되고 연성, 인성 등의 기계적 성질이 현저하게 개선된다.



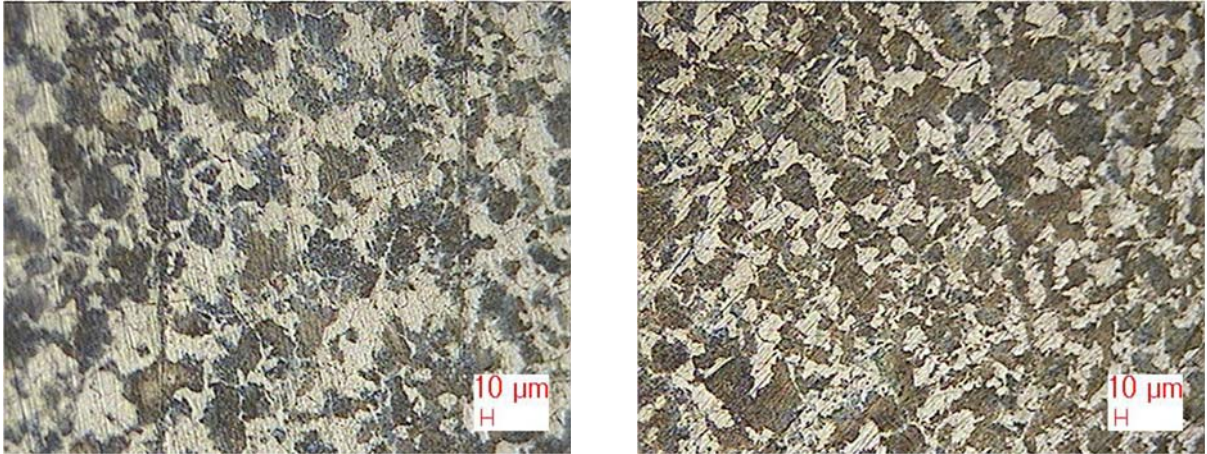


Fig 4.9  $\varnothing 30$ 와  $\varnothing 20$  노말라이징 (100배율)

### 3) Steel (S45C) Quenching

Fig. 4.10은 탄소강을 850°C에서 담금질한 후 수냉한 조직을 나타낸 것으로서, 검은 부분이 침상의 마르텐사이트이고 흰 부분이 잔류 오스테나이트이다.

이 조직은 강을 물속에서 담금질할 때 흔히 얻어지며, 상온에서는 준안정 상태로서 100°C~150°C로 가열하면 체심 입방 정계의 마르텐사이트로 된다.

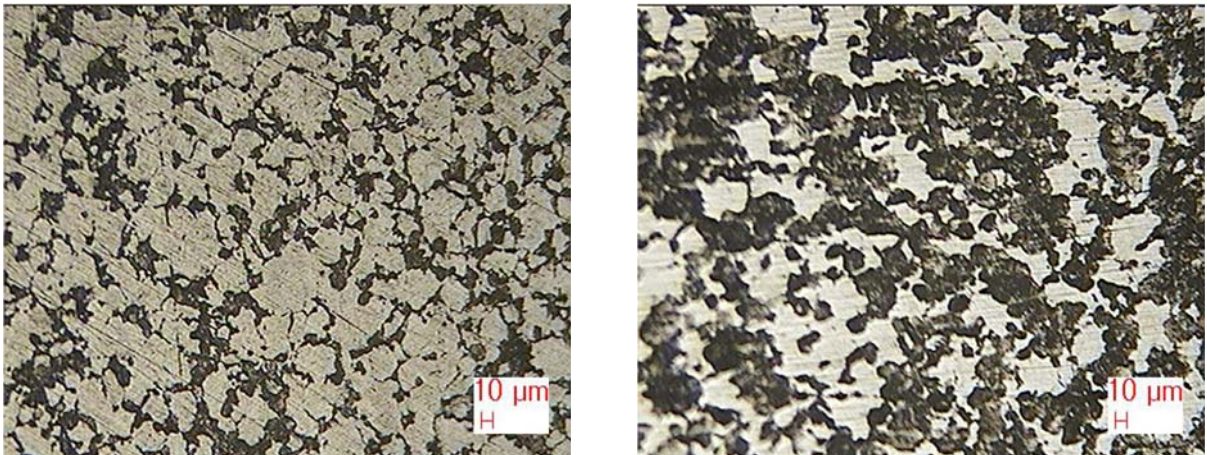


Fig 4.10  $\varnothing 30$ 와  $\varnothing 20$  퀴칭 (100배율)

#### 4-4. 경도실험

표면관찰이 끝나고 마지막으로 로크웰 경도기를 이용하여 바깥쪽부터 안쪽으로 일정간격으로 경도 실험.



Fig 4.11 로크웰 경도기

#### 4-5. 결과분석

##### 4-5-1. 시편 인장실험 결과

Table 4.3 인장강도와 연신율

노말라이징 30 $\phi$		퀸칭 30 $\phi$		어닐링 30 $\phi$	
인장강도	63.2MPa	인장강도	110MPa	인장강도	60.3MPa
연신률	83.04%	연신률	33.65%	연신률	90%

노말라이징 20 $\phi$		퀸칭 20 $\phi$		어닐링 20 $\phi$	
인장강도	56.2MPa	인장강도	99MPa	인장강도	49.5MPa
연신률	83.04%	연신률	27.9%	연신률	93.14%

인장강도는 퀸칭, 노말라이징, 어닐링 순으로 우수하며 연신율은 반대로 어닐링, 노말라이징, 퀸칭 순으로 우수한 성질을 나타낸다.

퀸칭과 달리 노말라이징, 어닐링은 Fig 4.12을 보면 알 수 있듯이 (a)는 연성, (b)는 취성의 성질을 가지고 있다는 것을 확인 할 수 있다.



(a) (b)

Fig 4.12 인장시험 후 시편의 단면

4-5-2. 열전대를 이용한 CCT 곡선

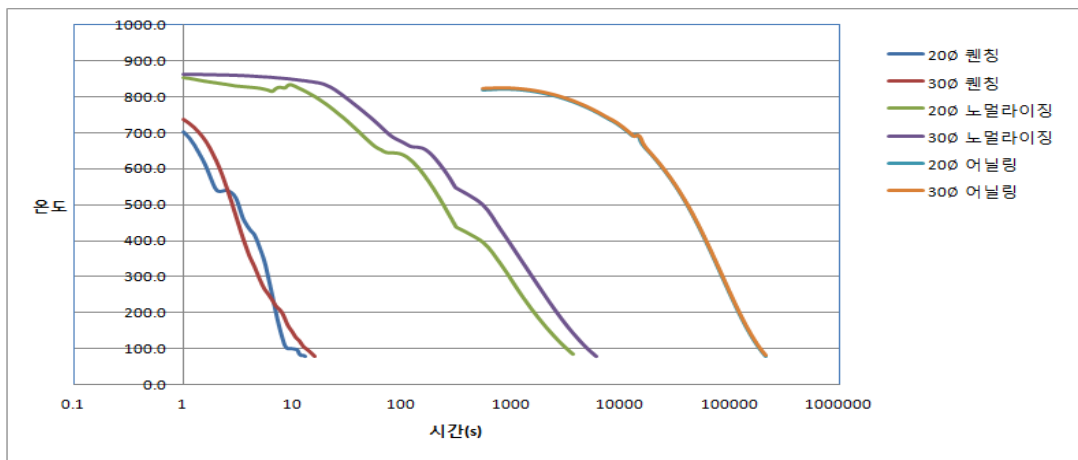


Fig 4.13 시편 열처리 후 온도 변화

열전대를 이용하여 CCT 선도 데이터를 수집하여 엑셀로 그래프 하였다.

SM 45C 탄소강의 20φ와 30φ의 시편을 각 각 수냉, 공냉, 로냉을 하였을 때 온도 변화를 알아보기 위해 열처리를 하기 전 온도를 측정하기 위해서 시편에 열전대를 설치하였다. 모든 시편을 850℃이상 가열 한 후 교반하지 않은 물 사용하여 수냉의 경우 완전히 식는 데 10초 정도 소요되었고, 공냉은 약 2시간 10분에서 2시간 40분, 로냉은 약 30시간 정도의 시간이 소요되었다.



### 4-5-3. 시편 경도측정 결과

Table 4.4 열처리에 따른 경도비교(HRC)

	로냉	공냉	수냉
1	4	18	45
2	5	17.5	46
3	4	16.5	44
4	4.5	17	46.5
5	5	18.5	45
6	6.5	8	41
7	5	10	43
8	7.5	17	44.5
9	3.5	16.5	43
10	5	17	42
평균	4.9	16.2	44.1

표면관찰이 끝나고 마지막으로 로크웰 경도기를 이용하여 바깥쪽부터 안쪽으로 일정간격으로 경도실험을 한 결과 냉각 순서에 따라 수냉 > 공냉 > 로냉 순서로 나왔고 수냉을 제외하고는 Grain Size가 작을수록 경도 값이 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 그리고 열처리를 하면 Grain Size도 커지는 것을 알 수 있었다.

## 제5장 결론

강에서 얻을 수 있는 다양한 성질은 탄소량의 변화와 열처리 및 가공열처리에 의해서 얻어지는 여러 가지의 미세조직에 직접적으로 기인한다. 이러한 여러 가지 인자들을 결정하는 방법들은 나름대로의 특정한 응용범위가 있고, 때로는 미세조직을 완전히 특정지우기 위하여 사용된다. 그러나 가장 중요한 방법은 광학현미경에 의한 방법인데, 이것은 거의 모든 금속학자들에게 사용되며, 실제로 작은 실험실에서 일하는 사람들이 사용하는 유일한 방법이다. 금속조직검사는 시편을 절단하여 반사도가 좋도록 표면을 준비하고 표면을 부식시켜 조직을 나타내었다.

오스테나이트는 어떤 임계온도 이상에서만 안정하고, 오스테나이트를 서냉시키면 페라이트와 시멘타이트로 변태하며, 급랭시키면 이 분해가 일어나지 못하여 마르텐사이트를 형성시킨다.

강에서의 현미경 조직검사는 우선 미세조직에 있는 여러 가지 상들을 확인하는 것이고, 둘째로는 그상들의 비율, 분산 및 분포 등을 특정지우기 위한 것이다. 이러한 점으로부터 미세조직의 원인이 조성, 처리방법, 성질 및 잠재적인 응용에 관련되어서 평가된다.<sup>11)</sup>

이러한 방법으로 미세조직을 설명하기 위해서는 상태도와 적절한 변태도를 알아야 한다. 이번 실험은 SM45C를 가열 및 냉각하여 조직사진을 관찰하고 경도를 측정하여 열처리에 따른 조직 변화와 경도 값과의 상관관계를 아는 것을 목적으로 하는 실험이다.

이번실험에서 경도는 냉각 순서에 따라 수냉 > 공냉 > 로냉 순서로 나왔고 수냉의 조직사진이 조금 이상하게 찍혔는데, 수냉을 제외하고는 Grain Size가 작을수록 경도 값이 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 그리고 열처리를 하면 Grain Size도 커지는 것을 알 수 있었다.

수냉 사진을 보게 되면 Grain Size가 예상과는 다르게 크게 나온 것을 볼 수 있다. 이 부분은 여러 원인이 있는 것 같다. 에칭을 여러 번 하게 되어 그 Grain Boundary 부분이 심하게 에칭이 되

어 멀리서 보게 되면 그 부분이 하천같이 깊게 패인 것처럼 보이지만 자세히 보면 조직사진에 근데균데 말텐사이트가 형성된 것이 보이고, 미세하게 점같이 Grain을 이루고 있는 게 보인다. Grain Size가 커질수록 경도 값이 작아지는 이유는 dislocation 영향이 있기 때문이다.

변형이 일어날 때 전위의 움직임으로 나타나기 때문에 당연히 전위가 많아야 하고, 전위가 이동하다가 grain boundary에 부딪치게 되면 멈추는데, slip system의 수가 많으면 전위의 이동이 grain boundary를 타고 넘어 가기가 쉬워지니까 변형이 쉽고, 당연히 전위이동의 걸림돌이 되는 grain이 적으면 좋고, 입자가 크면 그만큼 grain boundary가 멀어지게 되니까 변형이 쉬워진다.<sup>12,13)</sup>

## [참고문헌]

1. 위명용 김경식 김학운, 1999년 2월 20일, 열처리 요점, 원창출판사, 제 90-1호, p.201-210
2. 박근웅 문만빈 오현운, 2009년, 자동차부품용 SM45C 강의 상자소둔 열처리 최적화 연구, 현대하이스코(주) 기술연구소
3. Jae-Woong Youn, Hong-Seok Kim, The Korean Society of Machine Tool Engineers "A Study on the Effectiveness of Finite Element Method in Orthogonal Cutting" Vol.19 No.1 2010.2 pp 43-46
4. 산업자원부 기술표준원, 금속재료 인장시험편, KS B 0801, 2007년 11월 26일
5. 지식경제부 기술표준원, 금속 재료 인장 시험 방법, KS B 0802, 2003년 10월 08일
6. 박용호, 2007년 2월 20일, 기계금속 재료학, 선학출판사, 제 2000-1호, p.10-12
7. 신미정, 2007년 2월 SM45C 강의 인장변형과 음향방출에 대한 연구, 인천대학교 교육대학원
8. Serope Kalpakjian, Steven R.Schmid, 2008년 10월 30일, 공업재료가공학 (제5판), (주)피어슨에듀케이션코리아, 제 13-579호, p.34-38
9. Willam F. Smith, 2009년 2월 25일, 금속재료 개정판, (주)교보문고, 제 406-2008-000090호, p.127-131
10. 한국표준협회, 금속 재료의 브리넬 경도 시험방법, KS B 0805, 2005년
11. 홍영환 박정웅 이대용 이병엽, 1997년 1월 15일 탄소강열처리, 원창출판사 90-1호 p.5-21
12. A. E. White, Metall Progress, 1947년 52 (2), p.371
13. S. Chattopadhyay and C. M. Sellars, Metallography, 1997년 10월 p.89