

# 열처리에 따른 저탄소강의 미세조직과 물성 변화 분석

학번: 6013\*\*\*\* 성명 : 송\*준

## 1. Intro

산업이 발전함에 따라서 산업계가 원하는 재료의 물성을 제어하기 위해 재료의 연구 또한 수행되고 있다. 그 중에서 산업계가 원하는 물성을 제어하기 위한 방법으로는 재료의 특정한 원소를 첨가하여 화학적인 성분을 변화시키거나, 재료의 미세조직을 변화 시키는 등의 방법으로 물성을 제어할 수가 있다. 하지만 화학적 성분을 변화시키는 방법은 재료의 가격을 비싸게 만들 수 있어, 값싼 재료를 이용하여 우수한 성질을 만들어 값비싼 고급재료에 상응하는 기능을 발휘하기 위해 재료의 미세구조를 바꿈으로써 물성을 향상시킬 수가 있다.

이러한 금속의 미세구조를 제어하는 방법으로는 대표적으로 가열과 냉각을 통한 열처리를 통해서 금속의 미세구조를 제어할 수가 있는데, 이러한 열처리는 재료에 열을 가해줌으로써 재결정, 원자의 확산, 상변태를 통해 금속의 미세구조가 제어되게 된다. 특히 금속의 물성은 미세구조의 상의 크기에 따라서 재료의 물성은 크게 영향을 받는다고 알려져 있다.

구조재료는 사용목적에 따라 여러 기계적 물성치를 요구하게 되는데 이러한 기계적 물성치는 대표적으로 연신율, 인장강도, 항복강도, 인성, 탄성계수 등이 존재를 하고 이는 재료의 인장시험을 통해 Stress-Strain Curve를 그림으로써 확인할 수가 있다.

본 실험에서는 SM20C 탄소강을 사용하여 900-950°C로 용체화 처리를 가한 이후 노냉, 수냉, 공냉, 수냉 이후 500°C의 Tempering을 통한 열처리를 가함에 따라 미세구조의 변화를 관찰하고 인장 실험을 통해 물성을 측정함으로써 미세조직의 변화와 물성의 변화를 통해 미세조직이 물성에 끼치는 영향에 대해 고찰하는 실험을 진

행하였다. 특히 본 실험에서는 금속의 미세구조를 제어하여 금속의 물성 중 인성을 높이는데 주안점을 두고 실험을 진행하였다.

## 2. theoretical background

### 2.1 Fe-C 상태도(Fe-C diagram)

재료의 상(phase)은 조성 및 구조가 주변 영역과 다른 영역을 말한다. 상태도(phase diagrams)는 여러 온도, 압력, 조성에서 재료 내에 어떤 상이 존재하는 가를 도식적으로 나타낸 그림으로 대부분의 상태도는 평형상태에서 작성되며 이것을 이용해서 우리는 재료의 여러 성질과 거동을 예측하고 이해할 수 있게 된다.<sup>[1]</sup>

즉, 상태도는 여러 온도, 압력 조성에서 몇 개의 상이 상평형을 이루고 있을 때 각 상을 이루는 각 성분의 화학 퍼텐셜이 같아 공존하는 점을 이어서 그린 그림이라고 할 수가 있다.<sup>[2]</sup>

본 실험에서는 표준대기압상에서 탄소강의 탄소 조성에 따른 상태도(phase diagram)를 이용해서 온도에 따라서 시편에 존재하는 상의 종류를 예측할 수 있는데 Fe-C Diagram은 아래와 같다.

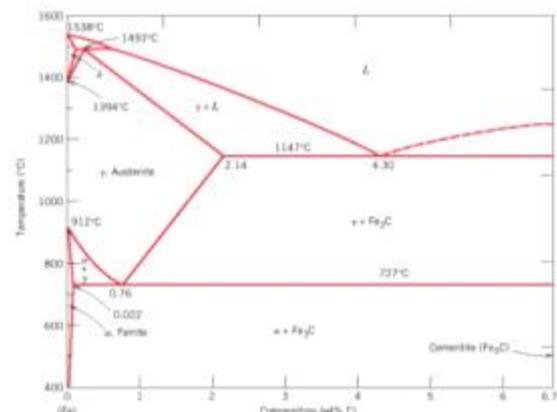


Fig. 1. Fe-C diagram<sup>[3]</sup>

본 실험에서는 SM20C의 탄소강을 사용하게 되는데 이 상태도를 이용해서 시편의 상을 예측해 보면 약 900°C의 온도에서 시편의 모든 상이 Austenite상으로 변태가 되고 온도를 서냉 시켜 727°C보다 온도가 낮아지게 되면 Austenite의 상이 Fe<sub>3</sub>C(Cementite)와 Fe(α-Ferrite)상으로 모두 변태되는 것을 예측할 수가 있게 된다.

## 2.2 등온 변태 곡선 (Isothermal Transformation)

등온 변태란 강을 Austenite 상태에서 A<sub>1</sub> 변태점 이하 여러 가지 온도까지 급랭하여 그 온도로 지속하는 경우(온도-일정, 시간-변화)에 생기는 변태를 등온 변태라고 하고, 이 등온 변태에 따라 상의 변태를 그림으로 나타낸 것을 등온 변태 곡선이라고 불린다.

이 같은 등온 변태는 1930년 E. S. Davenport와 E. C. Batin에 의해서 최초로 연구 발표 되었음에 따라 Austenite로부터 담금질의 중간 조직으로 변화하는 상대가 명확해졌다.

보통 위와 같은 등온 변태는 염욕 담금질을 통해 수행하게 된다.

이 같은 등온 변태 곡선은 일정한 온도 (Temperature)에서의 시간(Time)의 변화에 따른 상 변태(Transformation)을 나타낸 그림으로 이들의 앞 글자를 따 Time-Temperature-Transformation Curve로 요약하여 TTT diagram이라고도 불린다.<sup>[4]</sup>

본 실험에서 사용하는 SM20C 탄소강의 TTT diagram은 아래와 같다.

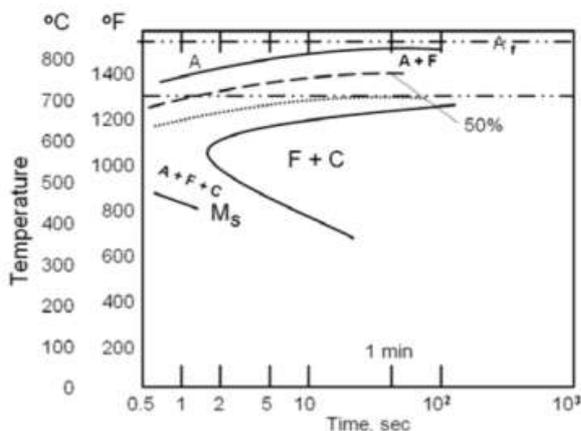


Fig. 2. AISI 1020 TTT diagram<sup>[5]</sup>

본 실험에서는 수냉 처리한 SM20C 시편을 50 0°C로 Tempering 할 때 등온변태를 사용하게 되는데 TTT diagram을 통해 Martensite가 Fe<sub>3</sub>C (Cementite)상과 Fe(α-Ferrite)상으로 변태됨을 예측할 수가 있다.

## 2.3 연속 냉각 곡선 (Continuous Cooling Transformation Curve, CCT Curve)

열처리 작업에서는 항온 변태에 의해서 강을 열처리 할 수도 있지만 실제 열처리 시에는 아무리 느린 냉각인 노냉을 시킨다 해도 평형냉각보다는 매우 빠른 냉각이 되기 때문에 실제 열처리에서는 사용하기 힘들다. 따라서 Austenite 온도영역에서 상온까지 연속적으로 냉각 변태시켜서 열처리하는 경우가 많아 항온 변태 곡선을 연속 냉각 변태 곡선으로 전환시켜 사용해야한다.<sup>[6]</sup>

이 같은 연속냉각 변태를 도식화 시킨 것을 연속냉각 곡선(Continuous Cooling Transformation Curve)이라고 하며, 앞 글자를 따 CCT diagram이라고도 불린다.

본 실험에서 사용하는 SM20C 탄소강의 CCT diagram은 아래와 같다.

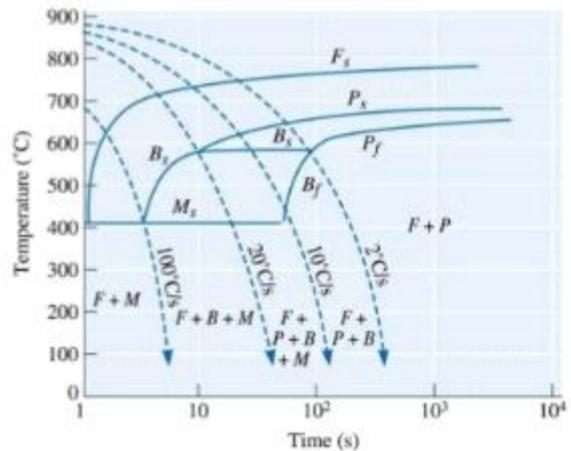


Fig. 3. AISI 1020의 CCT diagram<sup>[7]</sup>

위의 그래프와 같이 연속 냉각 시 냉각 속도에 따라 생성되는 상이 다르게 나타남을 알 수 있다.

본 실험에서는 900°C로 가열되어 Austenite화가 완료된 3개의 시편을 노냉 1개, 공냉 1개, 수냉 1개로 연속 냉각을 시키도록 한다. 위 그림에

따라서 각 시편의 상을 예측해본다면, 노냉 시에는 α-Ferrite와 Pearlite가 생성됨을 예측 할 수가 있고, 공냉 시에는 α-Ferrite와 Bainite와 Pearlite가 생성되거나 α-Ferrite와 Bainite와 Martensite가 생성되는 것을 예측할 수 있고, 수냉 시에는 매우 빠르게 냉각한다면 Martensite만 관찰 가능하지만 실험 조건에 따라 α-Ferrite상과 Martensite상이 생성 된다는 것을 예측할 수가 있다.

#### 2.4 Stress-Strain Curve

본 실험에서는 시편의 기계적 물성을 분석하기 위해서 인장 시험을 통해서 기계적 물성 분석을 진행하였는데 인장시험을 통해 나온 변형률에 따른 응력을 그래프로 나타낸 것을 Stress-Strain Curve라고 한다.

이 같은 Stress-Strain Curve를 그림으로써 탄성 계수, 항복강도, 연신율, 인성, 인장강도 등의 물성을 한눈에 알아보기 쉽게 된다.

위와 같은 Stress-Strain Curve는 Engineering Stress-Strain Curve와 True Stress-Strain Curve 두 가지 종류가 있다.

먼저 Engineering Stress-Strain Curve는 초기 면적을 이용하여 변형 길이에 따른 공칭 응력을 구하고 (공칭 응력( $\sigma$ ) =  $\frac{\text{하중}(F)}{\text{초기 단면적}(m^2)}$ ), 초기 길이를 이용하여 공칭 변형률을 구하여 (공칭 변형률( $\epsilon$ ) =  $\frac{\text{길이변화량}(\Delta l)}{\text{초기길이}(l_0)}$ ) 도식화 한

그래프이다. 다음으로 True Stress-Strain Curve은 좀 더 실제 응력과 실제 변형률에 가까운 그래프로 공칭 응력과 공칭 변형률과는 달리 순간 면적을 이용하여 진 응력을 구하고, 순간 길이 변화와 순간 길이를 이용하여 구한 진 변형률의 관계를 도식화한 그래프이다.

이때 인장 시험 시 시편의 부피변하는 없다는 가정 하에 공칭 응력과 공칭 변형률을 구할 수가 있는데, 이는 진 응력 ( $\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon)$ )과 진 변형률 ( $\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$ )으로 정리할 수가 있다.

또한 항복강도 이후의 그래프를 표현하기 위해  $\sigma_T = K\epsilon_T^n$  ( $\ln(\sigma_T) = \ln K + n \ln(\epsilon_T)$ )을 이용하여 변형 경화 상수 K 와 변형경화 지수 n을 구할 수가

있게 된다.<sup>[8][9]</sup>

#### 2.5 SM20C의 미세조직

탄소강을 A1변태점 이상으로 가열시켜주게 되면 고온 안정상인 Fig. 1.에서처럼 고온 안정상으로 변태되는데 이를 상온으로 냉각시켜주면 탄소가 고용되어 있지 않은 α-Ferrite와 탄소 화합물의 형태로 존재하는 Fe<sub>3</sub>C(Cementite)로 분리가 되고, 급냉시켜주게 되면 탄소가 빠져나가 Fe<sub>3</sub>C로 형성되지 못하고 BCT형태의 격자구조를 이르면서 Fig. 2.에서처럼 martensite로 무확산 변태되는 것을 알 수가 있다.

특히 용체화 처리된 탄소강의 냉각온도에 따라서 그 미세조직이 변화하게 되는데 TTT곡선에서의 nose 윗부분 온도 영역에서, 또는 CCT 곡선에서 충분히 느린 냉각속도에서의 탄소가 충분한 확산에너지를 가지게 되어 아래그림과 같은 라멜라 구조를 가지는 펄라이트 구조를 만들게 된다.

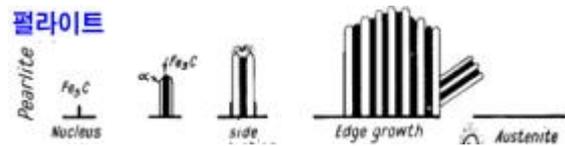


Fig. 4. Pearlite 구조<sup>[10]</sup>

하지만 nose온도 영역 아래에서의 온도나 공냉 같은 비교적 빠른 냉각속도에서는 탄소가 충분히 α-Ferrite를 빠져나가지 못하고 α-Ferrite사이사이에 Fe<sub>3</sub>C로 박혀있는 형태인 베이나이트를 형성하게 되는데 이러한 베이나이트는 nose온도와 가까운 온도영역에서 생성된 상부 베이나이트와 nose온도와 멀리 떨어진 온도영역에서 생성된 하부 베이나이트로 나뉜다.

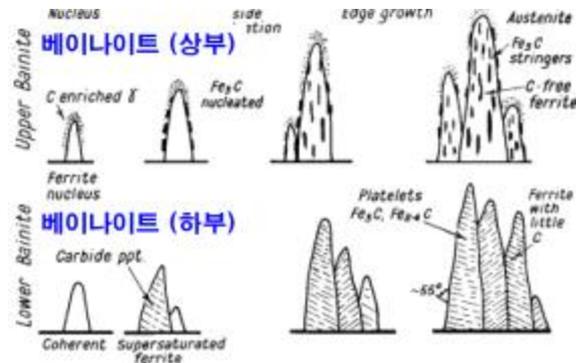


Fig. 5. 베이나이트 구조<sup>[10]</sup>

## 2.6 Hall-Petch Equation

결정립 크기에 따라 기계적 성질에 많은 영향을 줄 수 있는데, 항복 강도와 결정립 크기의 사이에는  $\sigma_{y.s} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$  라는 Hall-Petch

Equation이라는 관계식을 만족하게 되는데, 이 관계식은 결정립 크기가 미세할수록 항복 강도는 증가하게 된다는 것을 보여준다. 그 이유는 결정립계가 전위의 이동을 방해하기 때문에 결정립계가 미세해질수록, 소성변형을 일으키는데 장애요인으로 작용되기 때문이다. 하지만 결정립계의 크기가 무한정 작아질수록 항복 강도가 커지는 것이 아닌,

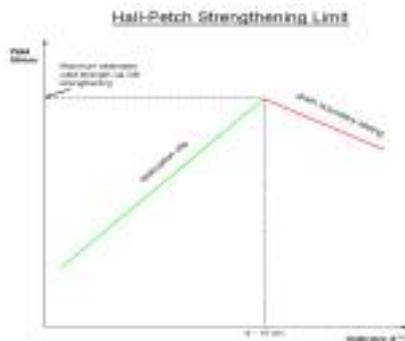


Fig. 6. 결정립계 크기와 항복 강도 관계<sup>[11]</sup>

위 식과 같은 그래프를 그려지게 되는데 결정립계의 크기인  $d \sim 10\text{nm}$  에서 최대 항복강도를 가지고 다시 크기가 작아질수록 항복강도가 작아지는 양상을 보이는데, 이는 결정립계의 직경이  $10\text{nm}$ 보다 작아지는 경우에 전위의 움직임이 아닌 결정립계 자체가 입계면에서 미끄러짐으로써 변형이 되기 때문에 더 작아지는 것을 확인할 수 있다.<sup>[11]</sup>

## 3. Experimental

### 3.1 SM20C 시편 준비

본 실험에서 사용한 시편은 SM20C를 사용해 실험을 진행하였다. SM20C란 기계 구조용 탄소강재(Carbon steel for machine structural use)로 기계 표기법으로 평균 탄소량을 나타내는 숫자를 S(steel)와 C(carbon)사이에 써서 표시한다. 그러므로 SM20C란 탄소의 평균 함유량이 0.20%인 강재라는 것을 의미하고 있다. 이 때문에 기계구

조용 탄소강재를 SM재라고 부르기도 한다.<sup>[12]</sup> 이런 SM20C의 함유 원소는 아래의 표와 같다.

이러한 SM20C는 연강(Mild Steel)으로 분류가 되는데, 연강이란 C의 함유량이 0.15~0.28%까지의 탄소강을 말한다.<sup>[13]</sup>

Table. 1. SM20C의 함유원소 및 함유량<sup>[14]</sup>

함유 원소	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
함유량 (%Max)	0.18 ~ 0.23	0.15 ~ 0.35	0.30 ~ 0.60	0.03	0.035	0.2	0.2	0.3

연강의 물성은 결정립 내에서의 전위이동을 방해하는 마찰응력  $\sigma_0 = 70\text{MPa}$ , Hall-Petch 상수  $k = 0.74\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 을 가진다.<sup>[15]</sup>

또한 본 실험에서는 인장 시험을 위하여 인장시편의 규격을 미국 재료 시험학회 규격인 ASTM E8 시험편 규격을 Subsize 80.8%시킨 규격을 사용하였다. ASTM E8 시험편의 모습과 규격은 아래와 같다.<sup>[6]</sup>

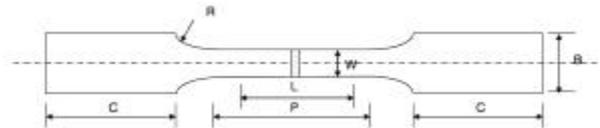


Fig. 7. ASTM E8 시험편의 모습<sup>[6]</sup>

Table. 2. ASTM E8 subsize 80.8%시험편의 규격<sup>[6]</sup>

나비 (W)	표점거리 (L)	물림부 나비 (C)	물림부 나비 (B)	평행부 길이 (P)	어깨부의 반지름 (R)
1.2 mm	4 mm	7.4 mm	3.2 mm	5.4 mm	1 mm

### 2.2 열처리

#### 2.2.1 가열 (Heating)

먼저 탄소강을 모두 Austenite화 시키기 위해서  $A_3$ 선 위로 가열을 해주어야하는데 본 실험에서 사용하는 SM20C는 Fig.1.에 따르면 약  $900^\circ\text{C}$  이상으로 가열을 해주어야한다. 하지만 실험 장비의 오차를 감안하여  $900\text{-}950^\circ\text{C}$ 에서 15-20분 금속을 가열해주어 Austenite화 시켜주도록 하였다. 이때 우리가 금속을 가열시켜주기 위한 Air Furnace를 사용함으로써 용체화 처리를 진행해주

도록 하였다. 본 실험에서 사용되는 Air Furnace는 아래 사진과 같은 Air Furnace로 진행하도록 하였다.



Fig. 8. Air Furnace

### 2.2.2 냉각 (Cooling)

시편을 가열한 후 용체화 처리를 완료하면 그 이후 냉각 공정(Cooling)을 통하여 시편의 온도를 낮춰주게 되는데 이때 고온 안정상이었던 Austenite가 저온 안정상인 Fe<sub>3</sub>C(Cementite)상과 Fe(α-Ferrite)상으로 변태하게 된다.

본 실험에서 사용하는 냉각방법은 수냉, 공냉, 노냉으로 Fig. 3.의 그래프를 통해서 대략적인 시편의 미세조직을 예상할 수 있고, 그 이후 Tempering 공정은 Fig. 2.를 통해 예상 가능하다.

### 2.2.3 템퍼링 (Tempering)

본 실험에서 주안점을 둔 인성을 개선시키기 위한 공정으로는 템퍼링을 채택하였는데, 먼저 900°C 온도에서 20분 동안 가열을 통해 시편을 용체화 처리 시킨 이후에 수냉을 통해 시편의 미세조직을 모두 Martensite로 변태시켰다. 그 이후 500°C에서 30분간 Tempering을 통해 공정을 진행하였는데 이 공정온도는 아래 그래프와 같다.

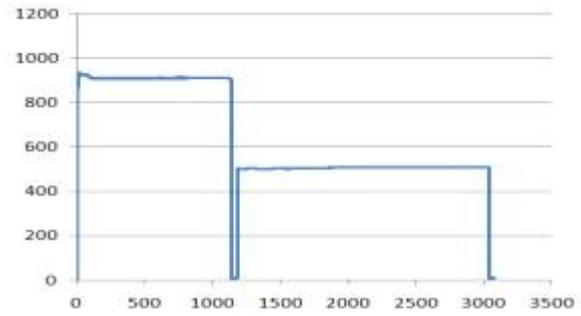


Fig. 9. Tempering 온도 그래프

본 실험에서 Tempering을 위해서 염욕로(salt bath furnace)를 사용하였는데 이때 사용한 염으로는 NaNO<sub>3</sub>와 KNO<sub>3</sub>의 혼합 염을 사용하였다. NaNO<sub>3</sub>와 KNO<sub>3</sub> 혼합 염은 아래 그래프와 같은 phase diagram을 그린다.

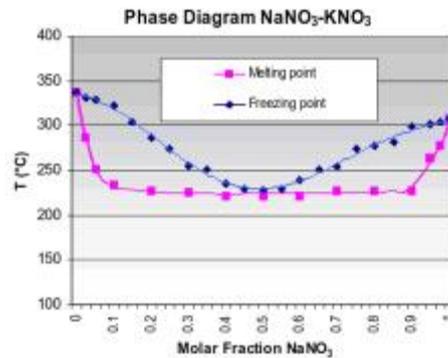


Fig. 10. NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> Phase diagram<sup>[17]</sup>

위의 상태도에 따라서 NaNO<sub>3</sub>와 KNO<sub>3</sub>의 혼합 염은 그 조성비에 따라 150-550°C까지의 온도에서 염욕 시킬 수 있어 저온 등온변태에서 많이 사용된다.

### 2.3 인장실험

본 실험에서 열처리를 끝낸 시편으로 인장 실험을 통해 물성을 측정해보도록 하였는데 먼저 열처리 한 시편을 최대한 응력집중이 생기지 않게 320방 및 1200방의 사포로 표면의 이물질과 결함을 제거한 후에 인장 실험을 진행하도록 하였다.

## 2.4 미세조직 관찰



Fig. 11. 열처리 후 시편의 모습

이후 아래와 같은 만능 시험기를 통해 시편을 만능 시험기에 고정시키고 시편에 인장응력을 주어 변형 길이에 따른 하중을 측정하고 Stress-Strain Curve를 그림으로써 열처리 시편의 물성을 분석해보도록 하였다. 이때 인장속도는 약 0.36mm/min으로 진행하였다.



Fig. 12. 인장 시험기



Fig. 13. 인장 시험 후 파단 시편

### 2.4.1 마운팅

본 실험에서는 인장 시험을 진행한 시편의 파편을 이용하여 시편의 미세조직을 관찰하는 실험을 진행하였는데 이때 시편의 파편은 다루기가 힘들어 마운팅을 시켜 주었는데, 마운팅이란 작거나 모양이 불규칙 하여 다루기 힘든 시료를 쉽게 취급하기 위한 작업이다.

이 같은 마운팅은 본 실험에서 아크레진을 사용하여 8분간 Heating 후 8분간 Cooling 처리를 진행하였다. 그 이후 마운팅 시편은 아래와 같다.



Fig. 14. 마운팅 시편 사진

### 2.4.2 Grinding

본 실험에서는 연마(Grinding)작업에서 사용하는 SiC 사포(Sand Paper)의 방수는 320방->600방->1200방순으로 점점 더 고은 연마지를 사용하면서 실험을 진행한다. 320방 30초, 600방 30초, 1200방 150초로 마운팅 한 시편의 결함, 산화된 금속, 오염물 등을 제거해주었다.

### 2.4.3 Polishing

그라인딩 이후에 에탄올을 베이스로 한 9 $\mu$ m, 6 $\mu$ m 크기의 다이아몬드 입자를 이용하여 폴리싱을 진행한 이후, 물을 베이스로 한 1 $\mu$ m 크기의 다이아몬드 입자를 이용해 폴리싱을 마무리 한다. 이때 9 $\mu$ m과 1 $\mu$ m은 600초간 6 $\mu$ m은 900초간 폴리싱을 진행해줌으로써

Grinding시 생긴 표면에 생긴 손상을 제거해주는 작업을 진행해주었다.

### 2.4.4 Etching

금속 시편이 폴리싱이 마무리되면 금속시편이 폴리싱이 잘되었는지 OM(Optical Microscope)을 사용하여 금속 시편의 표면을 확인한다. 금속 시편을 확인했을 때 폴리싱이 잘 되어있으면 금속 시편을 에칭 시켜준다.

금속에 에칭을 하게 되면 상에 따른 부식율의 차이, Grain boundary, Dislocation, vacancy 등과 같은 부식 촉발 요소에 의해서 부식의 차이가 생기게 되고 그 때문에 빛의 산란이 일어나 어둡게 비치게 되면서 결정립계나 제2상을 관찰할 수가 있게 된다.

본 실험에서는 부식액(etchant)로 3%nital(3% 질산+97% 에탄올)을 사용하여 금속 시편을 화학적 에칭 시킨 이후(약 10-60초 정도)에 증류수로 부식액을 린싱(rinsing) 해준 다음 에탄올을 이용해 증류수를 린싱(rinsing)하여 산화를 방지시키고, N2가스를 이용해 에탄올을 린싱(rinsing)해준다. 만약 에탄올이 제대로 린싱(rinsing)이 되지 않는다면, 에탄올에 의해서 빛이 산란이 되어 금속 시편을 광학현미경으로 관찰하였을 때 무지개 색으로 빛이 반사되어 주의해야 한다.

\* 나이탈 용액은 강의 현미경 조직 검경용으로 사용되는 부식액이다. 주로 열처리를 한 강과 특수강의 부식액에 사용된다. 트루스타이트, 소르바이트, 펄라이트, 마텐자이트의 순서로 침식한다. 시멘타이트는 침식하지 않는다. 결정입계를 명료하게 노출시키며, 피크랄(피크린산 3~5%의 알코올 용액)보다도 부식 작용이 강하다.<sup>[17]</sup>

### 2.4.5 OM 관찰 및 미세구조 관찰

Etching까지 시편이 마무리된다면 OM(optical microscope)을 이용하여 시편의 미세구조를 관찰하고 앞서 관찰한 시편의 표면의 미세구조를 입체학(stereology)을 이용하여 3차원 구조를 결정하기 위해서 부피 분율을 결정하기 위해 4×4그

리드에 점 분율 ( $P_{p\alpha} = \frac{\sum P_{\alpha}}{P_T} = \sum \text{point in } \alpha / \text{total}$ )

point)로 부피 분율을 결정하고, Intercept Line Method를 이용하여 결정립 크기를 결정하도록 한다.<sup>[17]</sup>

## 3. result

### 3.1 열처리 SM20C의 기계적 성질 분석

#### 3.1.1 기본 SM20C 시편의 기계적 성질

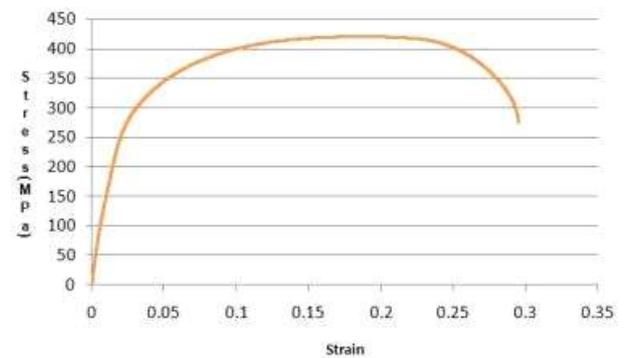


Fig. 15. 기본 SM20C의 Engineering Stress-Strain Curve

Table. 3. 기본 SM20C의 Engineering 물성치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	인성 (MJ)	연신율 (%)
261.2	420.9	12356	109.5	29.5

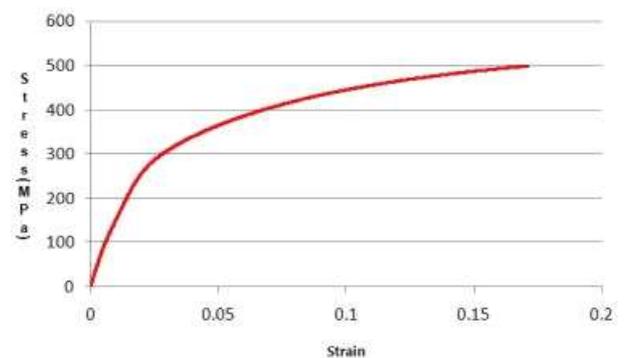


Fig. 16. 기본 SM20C의 True Stress-Strain Curve

Table. 4. 기본 SM20C의 True 물성치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	변형 경화 상수	변형 경화 지수
268.2	499.4	841.3	0.281

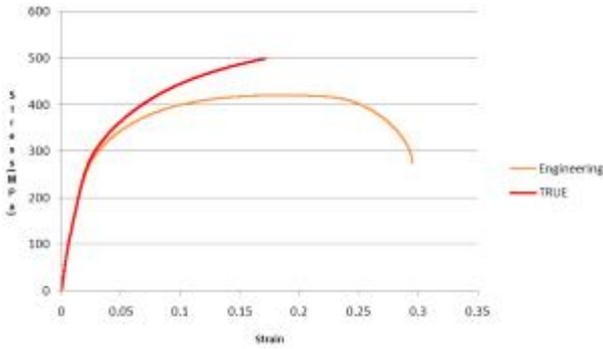


Fig. 17. True stress-strain curve VS engineering stress-strain curve

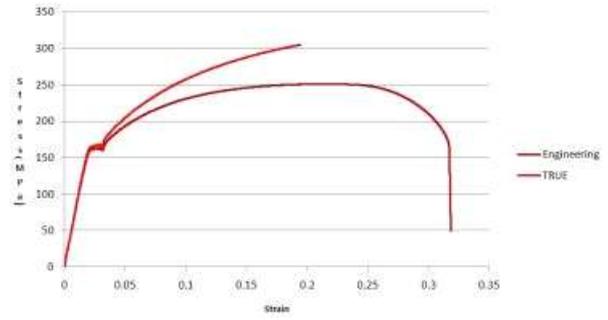


Fig. 20. True stress-strain curve VS engineering stress-strain curve

### 3.1.2 노냉 SM20C 시편의 기계적 성질

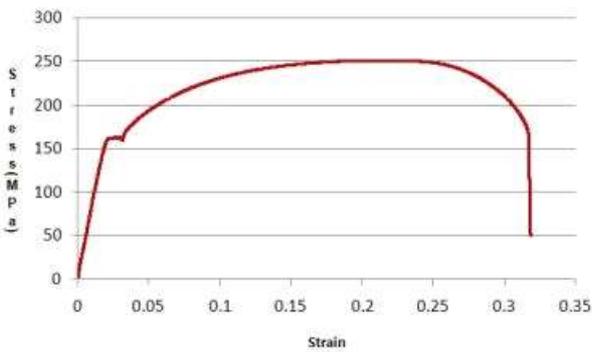


Fig. 18. 노냉 SM20C의 Engineering Stress-Strain Curve

Table. 5. 노냉 SM20C의 Engineering 물성 치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	인성 (MJ)	연신율 (%)
161.8	251.2	8362	69.8	31.8

### 3.1.3 공냉 SM20C 시편의 기계적 성질

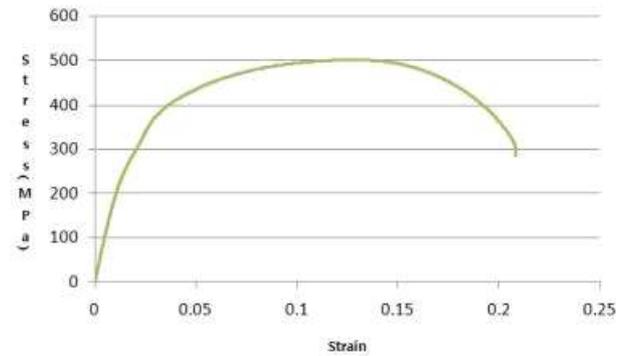


Fig. 21. 공냉 SM20C의 Engineering Stress-Strain Curve

Table. 7. 공냉 SM20C의 Engineering 물성 치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	인성 (MJ)	연신율 (%)
330.4	501.7	18293	88.6	18.0

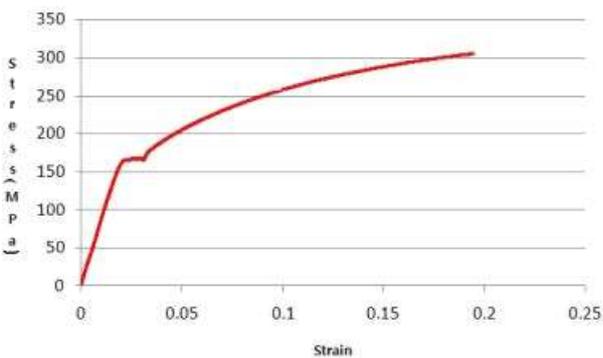


Fig. 19. 노냉 SM20C의 True Stress-Strain Curve

Table. 6. 노냉 SM20C의 True 물성 치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	변형 경화 상수	변형 경화 지수
165.7	305.0	508.8	0.300

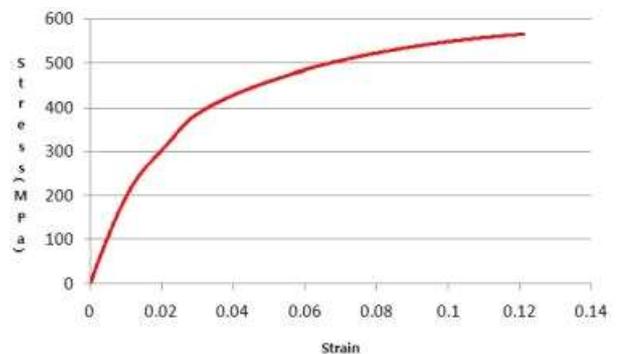


Fig. 22. 공냉 SM20C의 True Stress-Strain Curve

신소재 실험 2, 최종 report  
December, 14, 2016

Table. 8. 공냉 SM20C의 True 물성 치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	변형 경화 상수	변형 경화 지수
338.4	566.3	1056.8	0.282

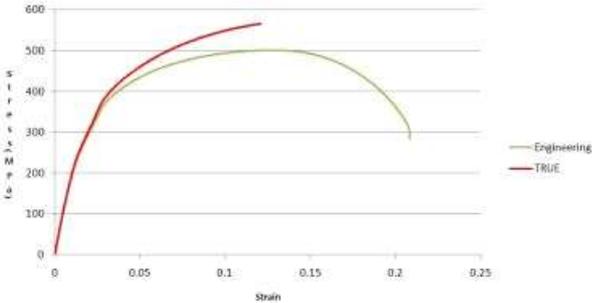


Fig. 23. True stress-strain curve VS engineering stress-strain curve

Table. 10. 수냉 SM20C의 True 물성 치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	변형 경화 상수	변형 경화 지수
947.6	991.2	2197.3	0.362

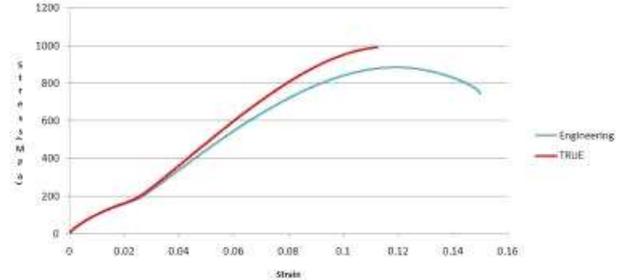


Fig. 26. True stress-strain curve VS engineering stress-strain curve

3.1.4 수냉 SM20C 시편의 기계적 성질

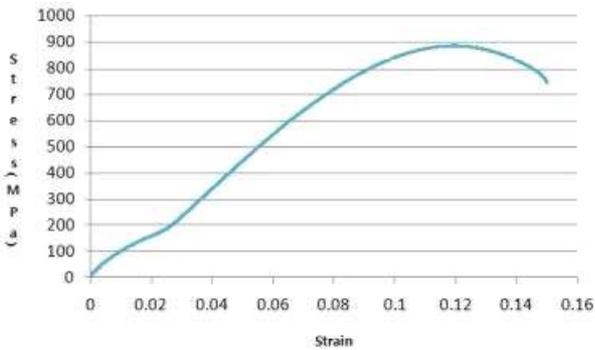


Fig. 24. 수냉 SM20C의 Engineering Stress-Strain Curve

Table. 9. 수냉 SM20C의 Engineering 물성 치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	인성 (MJ)	연신율 (%)
858.8	885.8	9127	86.8	15.0

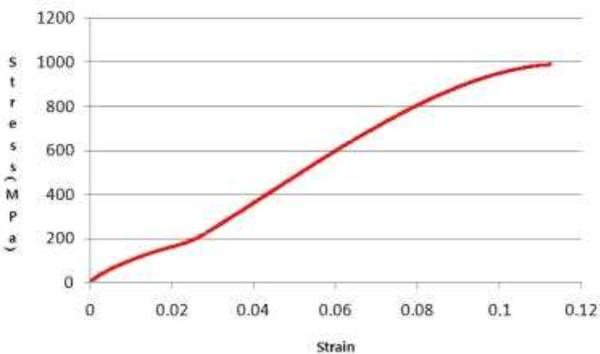


Fig. 25. 수냉 SM20C의 True Stress-Strain Curve

3.1.5 Tempering SM20C 시편의 기계적 성질

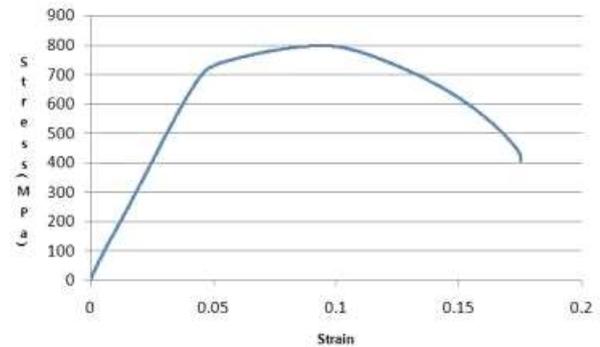


Fig. 27. Tempering SM20C의 True Stress-Strain Curve

Table. 11. Tempering SM20C의 Engineering 물성 치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	인성 (MJ)	연신율 (%)
720.5	799.5	15458	108.8	17.5

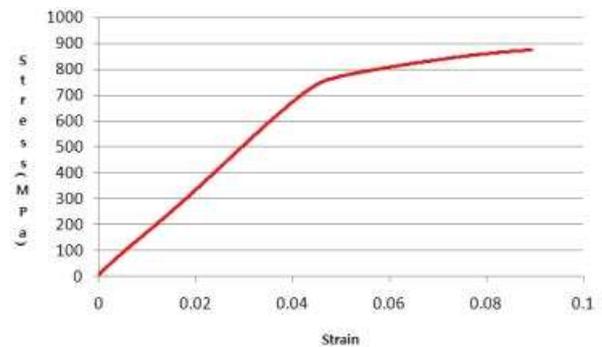


Fig. 28. Tempering SM20C의 True Stress-Strain Curve

Table. 12. Tempering SM20C의 True 물성 치

0.2% Offset 항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	변형 경화 상수	변형 경화 지수
754.9	874.3	1499.7	0.220

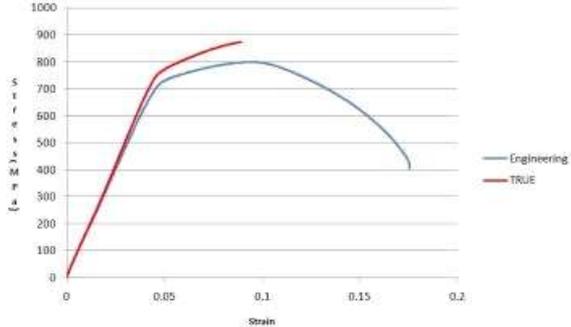


Fig. 29. True stress-strain curve VS engineering stress-strain curve

### 3.1.6 여러 열처리 SM20C시편의 물성 비교

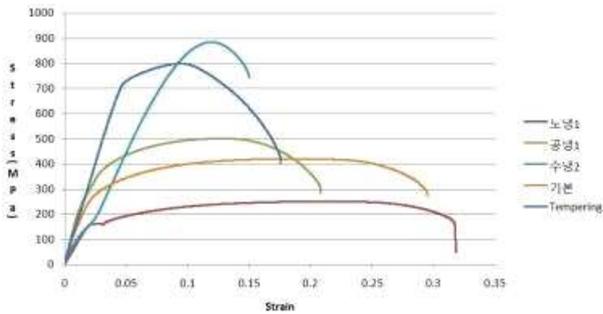


Fig. 30. 열처리에 따른 engineering stress-strain curve 비교

Table. 13. 열처리에 따른 SM20C 시편 물성 값

	기본	노냉	공냉	수냉2	Tempering
0.2% Offset 항복강도 (MPa)	261.2	161.8	330.4	858.8	720.5
인장강도 (MPa)	420.9	251.2	501.7	885.8	799.5
탄성계수 (MPa)	12356	8362	18293	9127	15458
인성 (MJ)	109.5	69.8	88.6	86.8	108.8
연신율 (%)	29.5	31.8	20.8	15.0	17.5

## 3.2 열처리 SM20C의 미세구조 관찰

### 3.2.1 기본 SM20C 시편의 미세 구조

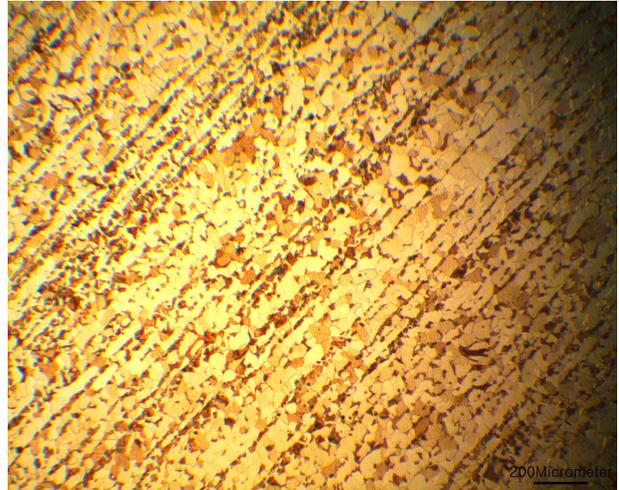


Fig. 31. 기본 SM20C시편의 x50 미세구조

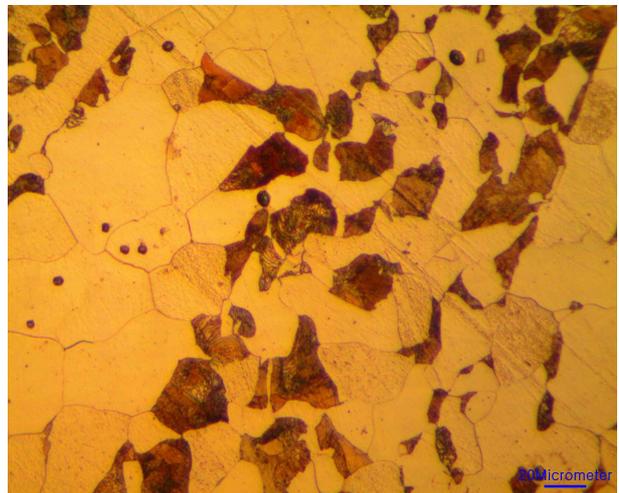


Fig. 32. 기본 SM20C 시편의 x400 미세구조

### 3.2.2 노냉 SM20C 시편의 미세 구조

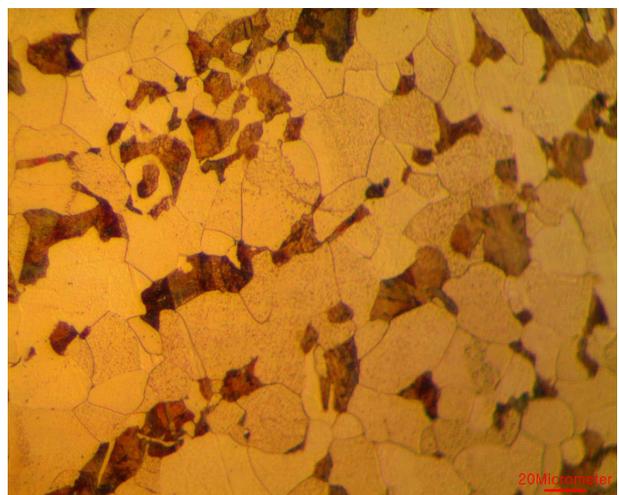


Fig. 33. 노냉 SM20C 시편의 x400 미세 구조

### 3.2.4 수냉 SM20C 시편의 미세 구조

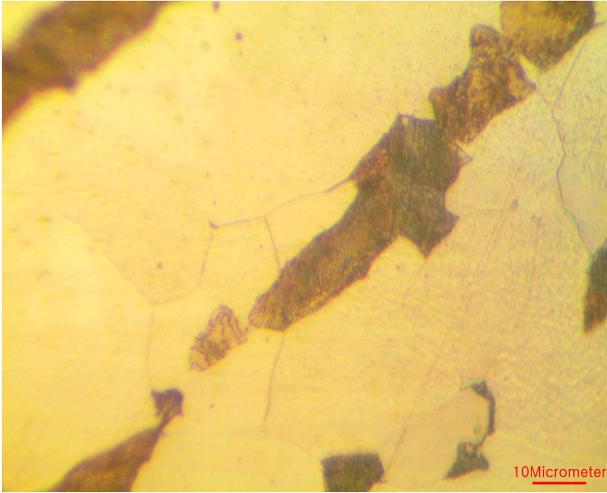


Fig. 34. 노냉 SM20C 시편의 x1000 미세 구조

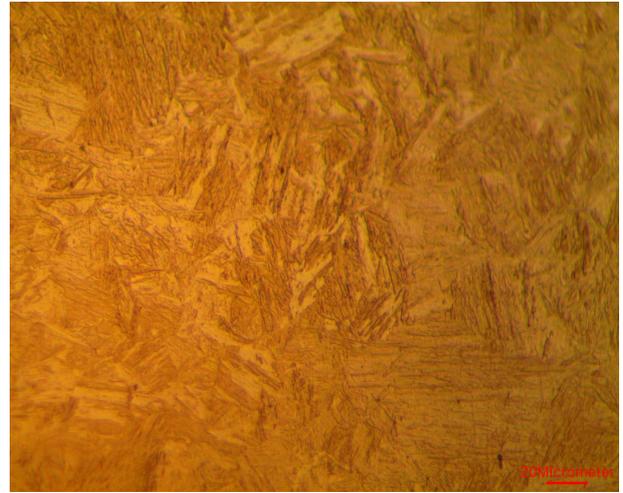


Fig. 37. 수냉 SM20C 시편의 x400 미세 구조

### 3.2.3 공냉 SM20C 시편의 미세 구조

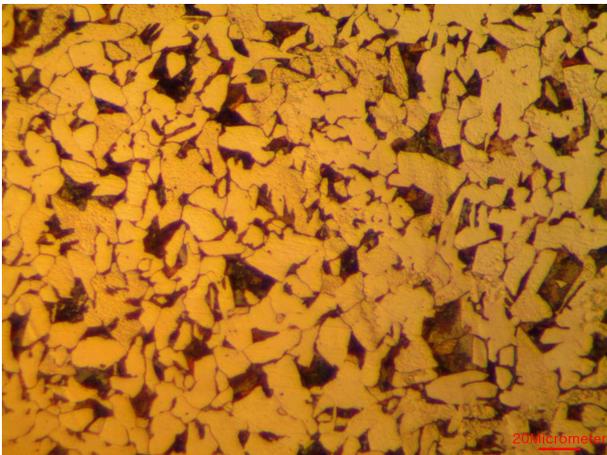


Fig. 35. 공냉 SM20C 시편의 x400 미세 구조

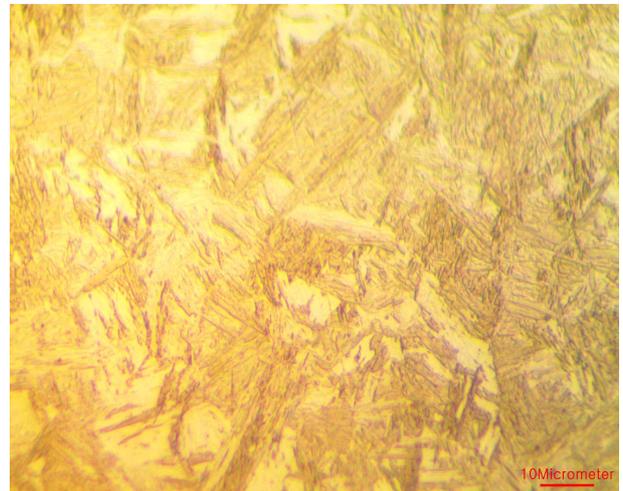


Fig. 38. 수냉 SM20C 시편의 x1000 미세 구조

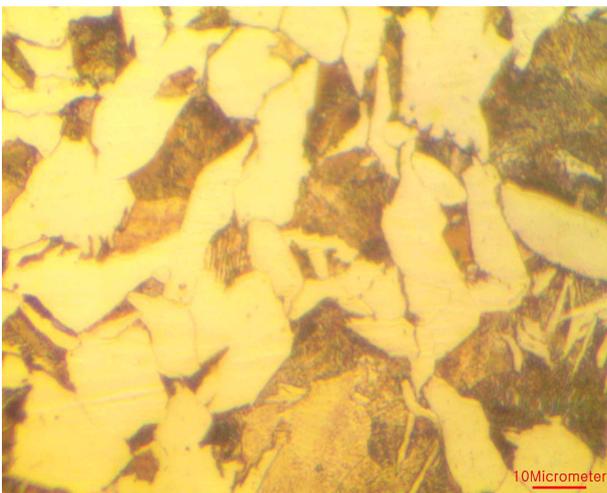


Fig. 36. 공냉 SM20C 시편의 x1000 미세 구조

### 3.2.5 Tempering SM20C 시편의 미세구조

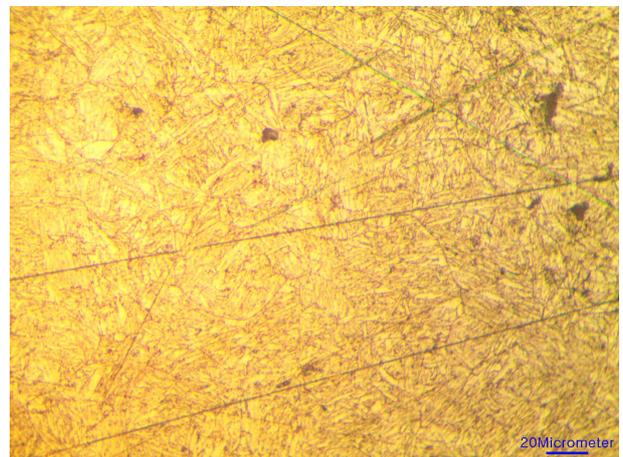


Fig. 39. Tempering SM20C 시편의 x400 미세 구조

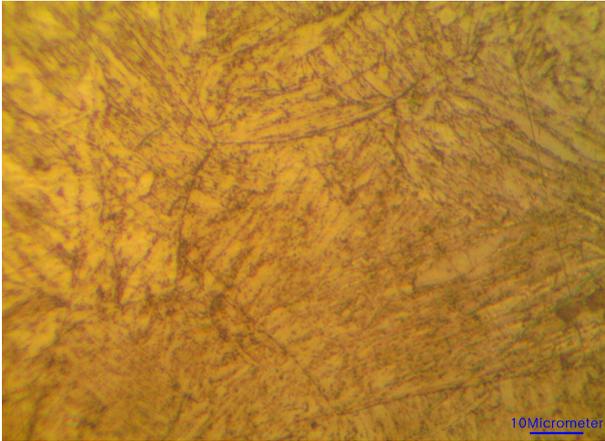


Fig. 40. Tempering SM20C 시편의 x1000 미세 구조

15	6	24
16	5.5	22
17	5	20
18	5	20
19	7	28

### 3.2 열처리 SM20C의 부피 분율 분석

#### 3.2.1 기본 SM20C의 점 부피 분율 분석

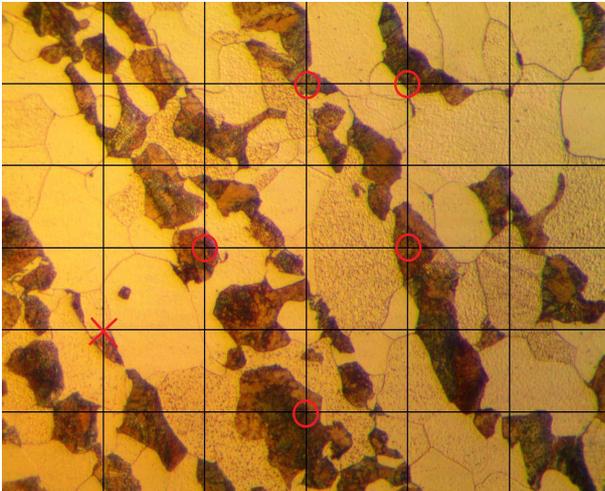


Fig. 41. 기본 SM20C의 x400 5번 사진 점 부피 분석

Table. 14. 기본 SM20C시편의 점 분석 결과

측정 사진	점의 개수 (Pearlite)	P <sub>p</sub> (%)
1	6.5	26
2	5.5	22
3	4.5	18
4	5.5	22
5	5.5	22
6	8	32
7	8	32
8	5	20
9	6.5	26
10	6	24
11	5.5	22
12	6	24
13	5.5	22
14	5	20

#### 3.2.2 노냉 SM20C의 점 부피 분율 분석

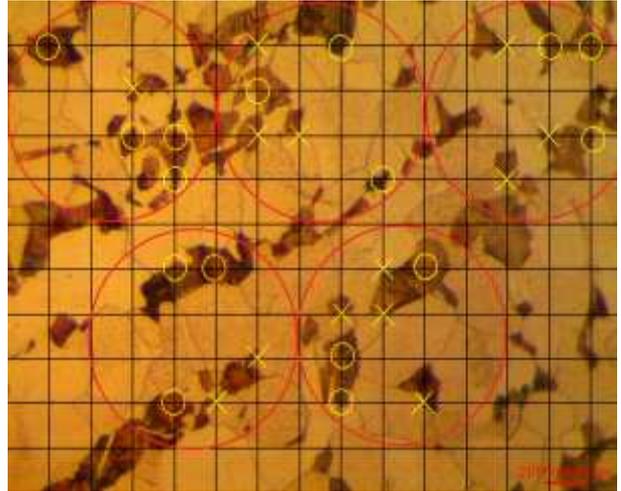


Fig. 42. 노냉 처리 SM20C의 x400 1번 사진 점 부피 분석

Table. 15. 노냉 처리 SM20C시편의 점 분석 결과

측정 사진	점의 개수 (Pearlite)	P <sub>p</sub> (%)
1	4.5	28.125
2	4	25
3	4.5	28.125
4	3.5	21.875
5	4.5	28.125
6	4.5	28.125
7	4.5	28.125
8	4	25
9	5	31.25

#### 3.2.3 공냉 SM20C의 점 부피 분율 분석

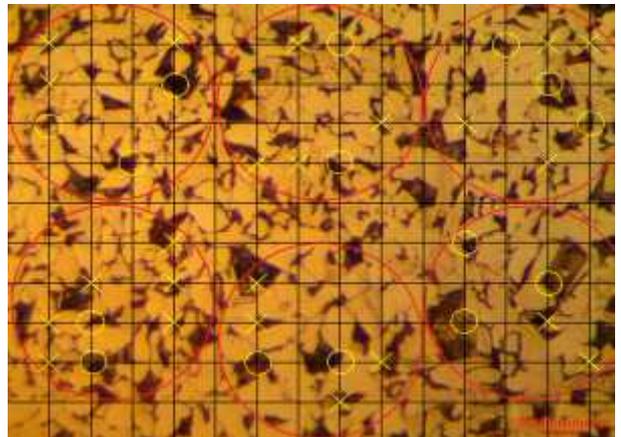


Fig. 43. 공냉 처리 SM20C의 x400 1번 사진 점 부피 분석

Table. 16. 공냉 처리 SM20C시편의 점 분석 결과

측정 사진	점의 개수 (Pearlite)	P <sub>p</sub> (%)
1	4.5	28.125
2	4	25
3	5	31.25
4	4	25
5	4	25
6	5	31.25
7	4	25
8	5	31.25
9	4	25
10	5	31.25
11	3	18.75
12	4.5	28.125

12	15	6	8	0	13.47	21.92
14	16	7	10	0	13.49	17.13
14	17	8	15	1	13.63	10.14
14	18	7	12	0	14.13	14.48
14	19	8	13	0	12.74	13.12
14	20	7	12	0	13.62	14.72
21	21	5	11	1	17.97	14.88
21	22	3	12	2	13.52	18.32
21	23	7	15	0	9.44	13.95
21	24	8	13	0	10.67	14.05
21	25	8	13	0	10.81	13.99

### 3.3 열처리 SM20C의 결정립 크기 분석

#### 3.3.1 기본 SM20C의 결정립 크기 분석

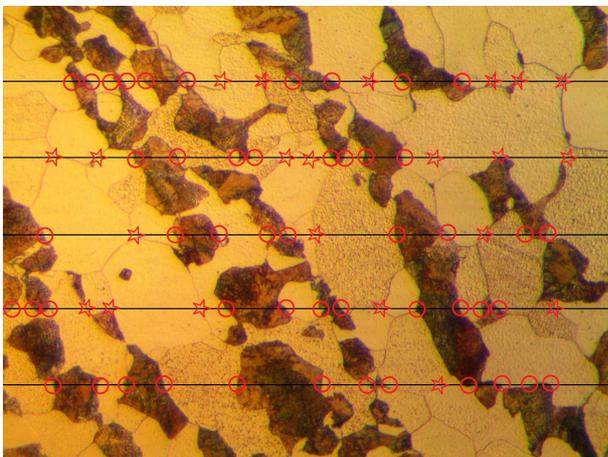


Fig. 44. 기본 SM20C의 x400 5번 사진의 결정립 크기 분석

Table. 17. 기본 SM20C시편의 결정립 크기 분석 결과

측정 사진	측정 횟수	F-F 경계	F-P 경계	P-P 경계	L <sub>p</sub> 평균	L <sub>f</sub> 평균
5	1	6	10	0	16.59	17.28
5	2	7	8	0	13.53	19.90
5	3	3	9	0	19.02	25.00
5	4	5	11	0	13.79	18.78
5	5	1	12	0	18.89	22.82
10	6	9	11	0	11.37	14.52
10	7	8	12	0	8.6	15.82
10	8	11	12	0	10.49	12.36
10	9	13	16	0	7.37	10.20
10	10	6	13	0	17.46	12.77
12	11	4	17	0	11.09	14.30
12	12	3	12	0	17.27	18.83
12	13	5	8	0	12.63	24.73
12	14	4	8	0	15.9	26.18

#### 3.3.2 노냉 SM20C의 결정립 크기 분석

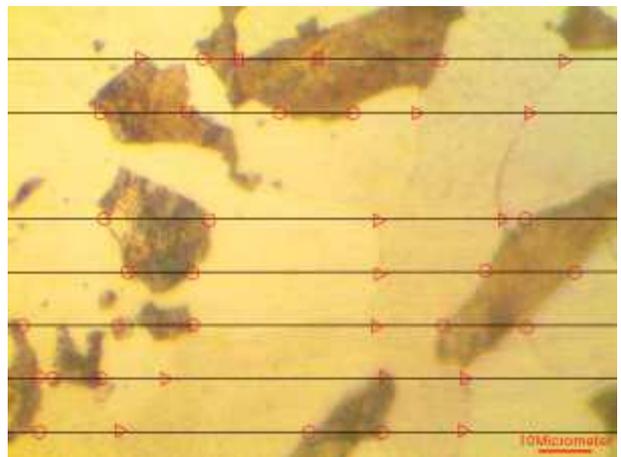


Fig. 45. 노냉 처리 SM20C의 x1000 2번의 결정립 크기 분석

Table. 18. 노냉 처리 SM20C의 결정립 크기 분석 결과

측정 사진	측정 횟수	F-F 경계	F-P 경계	P-P 경계	L <sub>p</sub> 평균	L <sub>f</sub> 평균
1	1	1	5	0	13.36	22.08
1	2	3	2	0	17.62	23.27
1	3	4	2	0	16.86	18.77
1	4	3	3	0	13.01	20.26
1	5	2	3	0	14.92	25.23
1	6	0	6	0	10.59	26.31
2	7	2	2	2	14.41	22.49
2	8	2	4	0	15.46	19.95
2	9	2	3	0	21.69	22.33
2	10	1	4	0	14.86	26.99
2	11	1	5	0	13.54	21.96
2	12	3	3	0	10.234	21.19
2	13	2	3	0	13.55	25.82
3	14	0	6	0	10.77	26.13
3	15	2	4	0	12	21.68
3	16	3	2	0	18.92	22.95
3	17	2	2	1	16.70	25.77
3	18	1	6	0	9.59	20.49
3	19	2	6	0	13.08	14.29
3	20	2	4	0	18	18.68

### 3.3.3 공냉 SM20C의 결정립 크기 분석

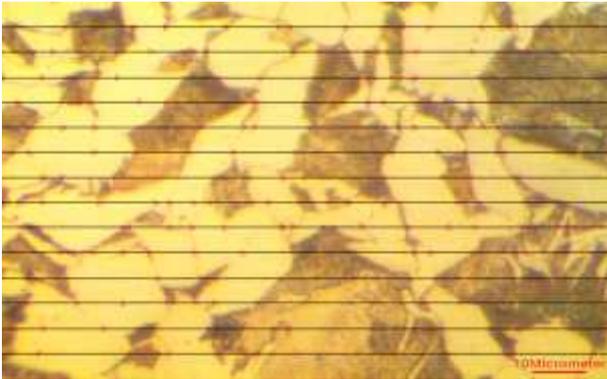


Fig. 47. 공냉 처리 SM20C의 x1000 2번의 결정립 크기 분석

Table. 19. 공냉 처리SM20C의 결정립 크기 분석 결과

측정 사진	측정 횟수	F-F 경계	F-P 경계	P-P 경계	L <sub>p</sub> 평균	L <sub>f</sub> 평균
1	1	5	12	0	6.56	6.49
1	2	7	14	0	6.83	4.49
1	3	4	11	0	7.92	7.07
1	4	5	18	0	6.11	3.98
1	5	7	10	0	9.31	5.35
1	6	5	10	0	8.11	7.02
1	7	3	10	0	7.79	8.97
1	8	5	15	0	4.63	6.08
1	9	9	10	0	4.93	6.15
1	10	7	13	0	6.25	5.19
1	11	2	15	0	8.33	5.08
1	12	6	10	0	8.75	6.09
1	13	4	14	0	5.61	6.49
1	14	5	13	0	5.031	6.78
2	17	6	7	0	8.57	8.50
2	18	5	11	0	6.94	6.91
2	19	9	9	0	6.86	5.91
2	20	4	8	1	8.17	8.73

### 3.3.4 수냉 SM20C시편의 결정립크기 분석

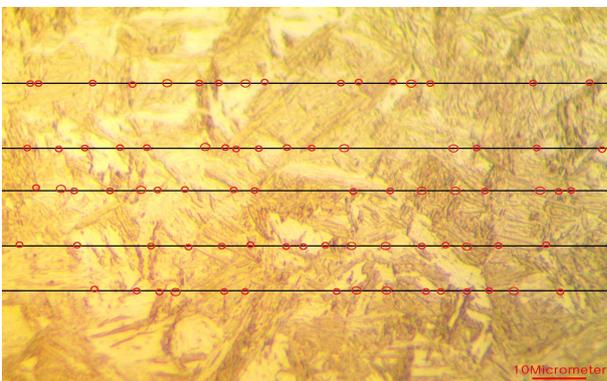


Fig. 48. 수냉 SM20C시편의 x1000 1번 결정립크기 분석

Table. 20. 수냉 처리SM20C 시편의 결정립 크기 분석 결과

측정 사진	측정 횟수	상의 경계	L 평균
1	1	17	6.511924
1	2	16	6.918919
1	3	17	6.511924
1	4	16	6.918919
1	5	15	7.38018
2	6	12	9.225225
2	7	16	6.918919
2	8	15	7.38018
2	9	14	7.907336
2	10	14	7.907336

### 3.3.5 Tempering SM20C시편의 결정립크기 분석

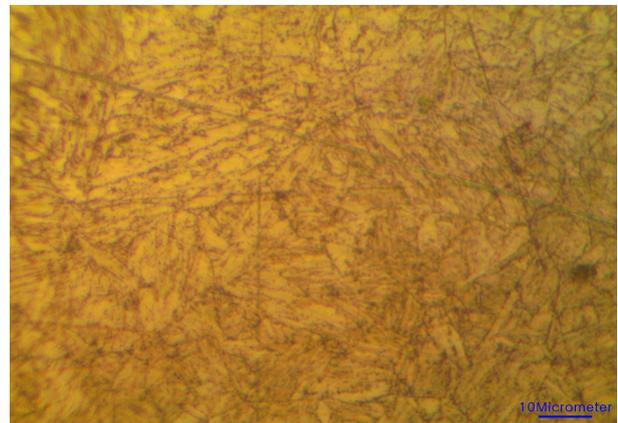


Fig. 49. Tempering SM20C의 x1000 크기 예측

Tempering 시편의 결정립 크기는 Intercept method법을 사용해서 측정할 수 없을 정도로 작은 페라이트 사이사이에 시멘타이트가 석출되어 있는 상을 확인할 수 있었다.

## 4. Conclusions

본 실험에서는 SM20C 시편을 사용하여 기존의 SM20C 기계적인 성질을 인장 실험을 통해 구해보고, 단면적을 분석해 결정립의 크기와 부피 분율을 분석한 후에 각기 다른 열처리를 통해 SM20C 시편의 미세구조를 제어한 후에 기계적인 성질을 인장 실험을 통해 구해보고, 단면적을 분석해 결정립의 크기와 부피 분율을 분석한 후 각 시편들을 비교해보는 실험을 진행하였다. 특히 기계적 특성 중 인성 향상을 주안점을 두어

실험을 진행하였다.

#### 4.1 열처리 SM20C의 기계적 성질 분석 결론

우리는 인장 시험을 통해 여러 열처리 가한 SM20C의 기계적 성질을 측정해보았는데 이는 아래의 표와 같다.

Table. 21. 열처리에 따른 SM20C 시편 물성 값

	기본	노냉	공냉	수냉2	Tempering
0.2% Offset 항복강도 (MPa)	261.2	161.8	330.4	858.8	720.5
인장강도 (MPa)	420.9	251.2	501.7	885.8	799.5
탄성계수 (MPa)	12356	8362	18293	9127	15458
인성 (MJ)	109.5	69.8	88.6	86.8	108.8
연신율 (%)	29.5	31.8	20.8	15.0	17.5

Table. 22. 열처리에 따른 시편 물성 비교

항복강도	수냉>Tempering>공냉>기본>노냉
인장강도	수냉>Tempering>공냉>기본>노냉
인성	기본>Tempering>공냉>수냉>노냉
연신율	노냉>기본>공냉>Tempering>수냉

열처리에 따른 각 시편의 항복 강도를 비교 했을 시 수냉>Tempering>공냉>기본>노냉으로 항복강도가 작아지는 것을 확인할 수 있었고, 인장강도는 수냉>Tempering>공냉>기본>노냉의 순으로 작아지는 것으로 항복강도와 일치함을 보였다. 또한 각 시편이 견딜수 있는 정도 인 인성은 기본>Tempering>공냉>수냉>노냉 순으로 시편들이 인성을 견딜 수 있음을 확인 했고, 노냉>기본>공냉>Tempering>수냉 순으로 더 잘 끊어지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4.2 열처리 SM20C의 부피 분율 분석 결론

Table. 23. 기본 SM20C시편의 점 분석 통계 값

평균 (%)	표준편차 (%)	95% 신뢰한계 (%)	상대 정확도(%)
23.47	3.88	1.83	7.79

Table. 24. 노냉 처리 SM20C시편의 점 분석 통계 값

평균 (%)	표준편차 (%)	95% 신뢰한계 (%)	상대 정확도(%)
27.08	2.71	1.91	7.07

Table. 25. 공냉 처리 SM20C시편의 점 분석 통계 값

평균 (%)	표준편차 (%)	95% 신뢰한계 (%)	상대 정확도(%)
27.08	3.85	2.32	8.56

점 분석법을 통해 각기 다른 열처리 (기본, 노냉, 공냉)를 가한 시편을 점 분석법을 통해서 부피 분율을 구해보았다. 이때 기본 시편의 Pearlite의 부피 분율은 23.47%로 계산되었으며, 공냉과 노냉 열처리를 한 시편의 Pearlite의 부피 분율은 27.08%로 나타났다. 이론 부피 분율을 약 26%로 어느 정도 오차가 있었지만 크게 오차범위를 벗어나지 않았다. 즉, 열처리를 통해서는 시편의 조성이 크게 변하지 않았음을 이해할 수가 있었다.

통계적인 분석을 통해 분석의 횟수를 증가시키면 각각의 상대 오차 값이 이론값과 유사해 질것이라고 예상된다.

#### 4.3 열처리 SM20C의 결정립 크기 분석 결론

##### 4.3.1 기본 SM20C시편의 결정립 크기

Table. 26. 기본 SM20C시편의 Pearlite상의 통계 값

평균(μm)	표준편차(μm)	95% 신뢰한계	상대 정확도(%)
16.81	3.16	1.29	9.55

Table. 27. 기본 SM20C시편의 Ferrite상의 통계 값

평균(μm)	표준편차(μm)	95% 신뢰한계	상대 정확도(%)
13.50	4.51	1.84	10.95

##### 4.3.2 노냉 처리 SM20C 시편의 결정립 크기

Table. 28. 노냉 처리 SM20C시편의 Pearlite상의 통계 값

평균(μm)	표준편차(μm)	95% 신뢰한계	상대 정확도(%)
14.62	3.17	1.45	9.94

Table. 29. 노냉 처리SM20C시편의 Pearlite상의 통계 값

평균(μm)	표준편차(μm)	95% 신뢰한계	상대 정확도(%)
22.82	3.21	1.48	10.09

##### 4.3.3 공냉 처리 SM20C 시편의 결정립 크기

Table. 30. 공냉 처리 SM20C시편의 Pearlite상의 통계 값

평균(μm)	표준편차(μm)	95% 신뢰한계	상대 정확도(%)
7.04	1.41	0.69	9.74

Table. 31. 공냉 처리 SM20C시편의 Pearlite상의 통계 값

평균(μm)	표준편차(μm)	95% 신뢰한계	상대 정확도(%)
6.40	1.37	0.67	9.45

#### 4.3.4 수냉 SM20C 시편의 결정립 크기

Table. 32. 수냉 처리 SM20C시편2의 Martensite의 통계 값

평균(μm)	표준편차(μm)	95% 신뢰한계	상대 정확도(%)
6.85	0.98	0.66	9.57

#### 4.3.4 Tempering SM20C 시편의 결정립 크기

Tempering SM20C 시편의 경우 Fig. 49에서 확인 할 수 있듯이 그 결정립의 크기가 매우 미세하여 실험자가 직접 결정립계를 찾아 결정립계의 크기를 결정하는 Intercept Line Method을 이용하여 대략적인 결정립크기를 결론짓기 힘들지만 정성적으로 보았을 때 그 크기가 앞서 실험을 한 공냉, 노냉, 수냉보다 훨씬 미세함을 알수가 있었다.

본 실험에서는 Intercept Line Method를 이용하여 각 시편의 미세 조직의 크기를 예측하여 보았다. 이때 미세 조직의 크기는 공냉<수냉<기본<노냉 순으로 커짐을 확인 할 수가 있었다.

#### 4.6 열처리 SM20C의 Hall-Petch의 적용과 비교

Table. 33. 열처리에 따른 시편의 Hall-Petch 값과 항복강도

	기본	노냉	공냉	수냉	Tempering
항복강도 (MPa)	261.2	161.8	330.4	858.8	720.5
총 평균 크기 (μm)	15.15	18.72	6.72	6.85	가장 미세
Hall-Petch 값 (MPa)	70.19	70.17	70.28	70.28	x
Hall-Petch 값 비교	공냉>수냉>기본>노냉				
항복강도 비교	수냉>>Tempering>>공냉>기본>노냉				

본 실험에서는 앞서 구한 결정립의 크기와 Hall-Petch( $\sigma_{y.s} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$ ) 식을 이용하여 Hall-Petch 값과 앞서 인장강도를 이용해 항복강도를 비교해봤을 때, Hall-Petch 값의 크기는 공냉>수냉>기본>노냉 순으로 작아지고, 인장실험을 통한 항복강도는 수냉>Tempering>>공냉>기본>노냉 순으로 작아짐을 알 수가 있었다.

#### 4.7 최종 결론

결정립 크기에 따라 기계적 성질에 많은 영향을 줄 수 있는데, 항복 강도와 결정립 크기와의 사

이에는  $\sigma_{y.s} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$  라는 Hall-Petch Equation

이라는 관계식을 만족하게 되는데, 이 관계식은 결정립 크기가 미세할수록 항복 강도는 증가하게 된다는 것을 보여준다. 그 이유는 결정립계가 전위의 이동을 방해하기 때문에 결정립계가 미세해질수록, 소성변형을 일으키는데 장애요소로 작용되기 때문이다.

본 실험에서는 이와 같은 Hall-Petch Equation ( $\sigma_{y.s} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$ )을 이용하여 그 값을 통해 여러

방법으로 열처리한 시편의 Hall-Petch의 값을 비교하고 그것과 항복 강도와 비교해 봐서 공냉, 노냉, 기본 시편의 경우 각 시편의 미세구조의 크기가 더 작아지면 작아질수록 항복강도가 작아짐을 확인할 수가 있었다.

하지만 위에서의 구한 Pearlite와 Ferrite의 상의 평균 크기로는 Hall-Petch식을 이용하여 정확한 항복 응력을 구할 수는 없는데, 그 이유는 Pearlite는 엄밀히 말해서 강의 상이 아니기 때문이다.

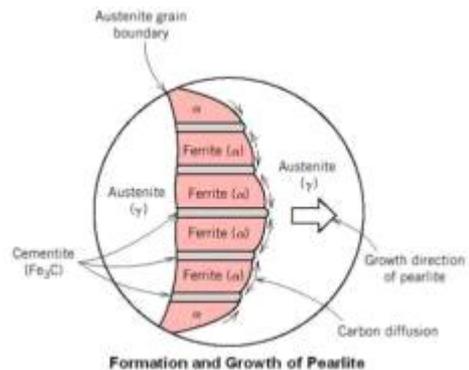


Fig. 50. Pearlite의 적층구조<sup>[19]</sup>

Pearlite는 Fig. 50.과 같이 강의 상중 하나인 Cementite와 Ferrite가 적층구조를 이루고 있는 강의 조직 중 하나로 결정립계가 Pearlite 구조의 결정립뿐만 아니라 적층 구조에서 발생하는 Cementite와 Ferrite에서 발생하는 결정립계의 직경까지 고려해 주어야하기 때문이다.

즉, 부피 분율 분석을 이용하여 Pearlite의 부피를 알 수 있고 Cementite의 양을 개략적으로 알 수 있다. 이러한 Pearlite조직의 크기가 많을수록 Ferrite와 Cementite의 결정립계와 Ferrite와 Pearlite의 결정립계가 많아지게 되고 Hall-Petch Equation에 의해서 항복강도가 증가함을 예측할 수가 있다.

마찬가지로 공냉에서 생성되는 베이나이트 경우에도 베이나이트는 Fig. 5.에서 볼 수 있듯 베이나이트 또한 nose온도 영역 아래에서의 온도나 공냉같은 비교적 빠른 냉각속도에서는 탄소가 충분히  $\alpha$ -Ferrite를 빠져나가지 못하고  $\alpha$ -Ferrite사이에서  $Fe_3C$ 로 박혀있는 형태로 존재함으로써 미세조직의 크기를 결정해 Hall-Petch Equation을 통해 그 항복강도를 정확히 구해내기에는 무리가 있지만 Hall-Petch Equation을 이용해 개략적인 항복 강도를 비교할 수 있다.

이와는 다르게 Martensite의 항복강도는 Hall-Petch식의 값과 매우 다르게 예측되는데 이는 Martensite의 경우 항복강도에 영향을 주는 요인이 결정립보다는 Austenite의 FCC격자에서 8면체 자리에서 급속 냉각하여 미처 빠져나가지 못한 탄소 때문에 철이 BCC구조로 변태하지 못하고 BCT구조로 변하게 되면서 내부 응력이 쌓인 상태가 되면서 가지상(lath) Martensite로 상변태가 되게 되는데 이 같은 Martensite 때문에 시편에 전단변형이 일어나게 되면서, 쌍정(Twin)이나 슬립(Slip)이 일어나게 되는데 이러한 쌍정이나 트윈이 dislocation의 이동을 방해하게 되면서 항복강도가 매우 커짐으로써 결정립계의 크기가 공냉이나 Tempering의 시편보다 비교적 크지만 매우 큰 항복강도를 가지게 됨을 예측할 수가 있다.

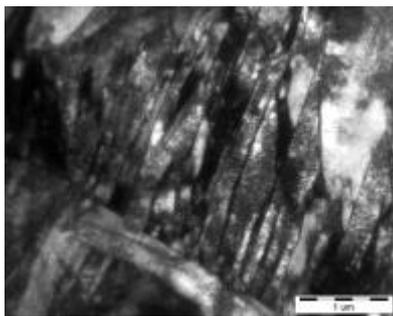


Fig. 51. 가지상의 Martensite<sup>[20]</sup>

#### 4.8 고찰

본 실험에서는 미세조직을 제어함으로써 물성 특히 인성을 크게 늘리는 것에 초점을 두고 여러 열처리함으로써 미세구조의 변화에 따른 물성 변화의 관계를 알아보는 실험을 진행하였다.

우리조의 경우 인성을 늘리기 위해서 필요한 강도와 연신을 두 개의 적정점을 동시에 잡기 위해서는 매우 미세한 결정립계를 형성함으로써

Dislocation의 이동을 방해함으로써 강도가 증가된다고 생각하여 그 결정립을 미세하게 만드는 방안으로는 마르템퍼링 즉, 저탄소강의 상을 모두 lath martensite로 만듦으로써 가지상을 매우 미세하게 만들고 다시 Tempering 함으로써 martensite의 BCT에 있는 탄소에 열을 가해주어 lath 사이사이에 시멘타이트를 형성시켜주어 martensite를  $\alpha$ -Ferrite와  $Fe_3C$ 로 분리시켜서 매우 미세한 결정립을 만듦과 동시에  $\alpha$ -Ferrite를 통한 연신을 또한 확보하는데 주안점을 두고 열처리를 진행한 결과 앞서 실험한 수냉, 공냉, 노냉의 열처리보다 월등한 인성을 확보할 수 있었음을 알아내었다.

하지만 우리 조에서 원래 예측했던 미세구조는 아래 그림과 같이 구상화된  $Fe_3C$ 를 예측을 하고 이러한 극히 미세한 구상화  $Fe_3C$ 를 이용하여 dislocation의 이동을 방해함으로써 강도를 제어하려고 하였지만

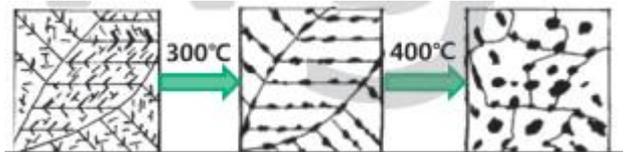


Fig. 52. Tempering 온도에 따른 martensite의 변태<sup>[21]</sup>

Fig. 40. 와같이 martensite의 lath 부분에 탄소가 석출이 되어  $Fe_3C$ 로 변태 된 형태의 미세조직을 얻을 수 있었다. 이는 예측을 해보았을 때 30분 동안의 Tempering으로는  $Fe_3C$ 가 충분히 구상화 될 정도의 시간을 얻지 못해  $Fe_3C$ 가 구상화 되지 못하고 lath사이에 있는 판과 같은 형태로 석출되었다고 예측할 수가 있다.

또한 Fig. 40.에서의  $Fe_3C$ 가 lath석출된 모습과 다르게 석출된 선의 모습이 보이는데 이는 Austenite화 시에 형성되었던 Austenite의 결정립계라고 예상이 되어 진다.



Fig. 53. Austenite 결정립계 예상

## REFERENCES

- [1] William F. Smith 외 1명, 『재료과학과 공학 5th』, McGraw Hill Education, (2012)
- [2] 두산백과, 상평형, (주)두산
- [3] www.slideshare.net, Fe-C diagram, Rakesh Singh
- [4] 금속용어사전편찬회, 『금속용어사전』 (황은변태), 성안당, 1998
- [5] Blair, M. & Stevens, T.L., Steel casting handbook. Materials Park, OH: Steel Founders' Society of America: 24-3.24-5., (1995)
- [6] www.randb.co.kr, [기타] TTT-CCT Curve, 알앤비
- [7] www.slideshare.net, TTT diagram, Rakesh Singh
- [8] 신찬선, 이론수업 1-1. 금속재료의 기계적 성질, 2016
- [9] 신찬선, 이론수업 1-2. 금속재료의 기계적 성질, 2016
- [10] practicalmaintenance.net, I-T Diagram and Cooling Curves, K P Shah
- [11] 박종성, 금속 열처리개론(2016)-chap01-, 2016
- [12] 두산백과, 기계구조용 탄소강재, (주)두산
- [13] 현대건축관련용어편찬위원회, 『건축용어사전』 (연강), 성안당, 2011
- [14] www.yjsteco.com, 탄소강, 용진 STECO
- [15] Smith & Hashemi, p. 243., 2006
- [16] www.archimedesolarenergy.it, Molten salts properties, archimedesolarenergy
- [17] 금속용어사전편찬회, 『금속용어사전』 (나이탈 부식액), 성안당, 1998
- [18] 신찬선, 이론수업 II. 금속재료 미세구조 관찰, 2016
- [19] practicalmaintenance.net, The Iron-Iron Carbide Equilibrium Diagram, K P Shah
- [18] www.msm.cam.ac.uk, Cold Deformation of Martensite in Steels, H. F. Lan, W. J. Liu and X. H. Liu
- [21] news.alibaba.com, Metals Knowledge: Quench hardening of steel, Key to Metals