



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

초 고탄소강의 미세조직과 기계적성질에 미치는 열간 단조비의 영향



부경대학교 산업대학원

금속공학과

김 태 환

공학석사 학위논문

초 고탄소강의 미세조직과 기계적성질에 미치는 열간 단조비의 영향

지도교수 강 창 룡

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2012 년 8 월

부경대학교 산업대학원

금속공학과

김 태 환

이 논문을 김태환의 공학석사 학위논문으로 인준함

2012년 8 월



주 심 교 수 정 병 호 (인)

위 원 교 수 이 중 문 (인)

위 원 교 수 강 창 룡 (인)

<목 차>

Abstract	ii
1. 서 론	1
2. 실험방법	4
2.1 시 료	4
2.2 역변태처리	4
2.3 미세조직 관찰	5
2.4 기계적 성질 측정	5
3. 실험결과 및 고찰	7
3.1 미세조직 관찰	7
3.2 시멘타이트의 두께와 층 간격에 미치는 단조비의 영향	16
3.3 기계적 성질에 미치는 단조비의 영향	23
4. 결 론	30
참고문헌	32

Effect of Hot Forging Ratio on the Microstructure and Mechanical Properties of Ultra High Carbon Steel

Tae Hwan Kim

Department of Metallurgical Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University



Abstract

This study was carried out to investigate the effect of the hot forging ratio on the microstructure and mechanical properties of ultra high carbon steel.

The results obtained from this study are as follow :

The microstructure of ultra high carbon steel with 1.5% w.t. C consisted of a proeutectoid cementite network and acicular microstructure in pearlite matrix.

With increasing hot forging ratio, the volume and thickness of the network and acicular proeutectoid cementite decreased, and then were broken up into particle shapes .

Lamella spacing and the thickness of eutectoid cementite decreased with increasing hot forging ratio, and were broken up into particle shapes, which then became spheroidized.

When the forging ratio was over 65%, the network and acicular shape of the as-cast state disappeared.

With increasing hot forging ratio, hardness, tensile strength, elongation and impact value were not changed up 50%, and then rapidly increased with the increase of the forging ratio.



1. 서 론

0.8% 이상의 많은 탄소(C)를 갖는 과공석강은 퍼얼라이트의 기지조직에 시멘타이트가 전 오스테나이트 조직의 입계를 따라 망상으로 석출되어 있을 뿐만 아니라, 전 오스테나이트 조직의 입계에서 퍼얼라이트의 조직 내로 침상으로 석출되어 있거나 또는 퍼얼라이트 조직 내에서 침상으로 석출되어 있기 때문에 대단히 취약하여 기계적 성질 등이 크게 떨어져¹⁾ 공업적으로 폭넓게 사용되지 못하고 있다.

그러나 근년에 와서 0.8% 이상의 많은 탄소를 갖는 과공석강에 가공과 열처리 등을 단독 또는 복합적으로 행하여 망상 및 침상으로 존재하고 있는 초석 시멘타이트(Proeutectoid cementite)와 퍼얼라이트 조직내 존재하고 있는 공석 시멘타이트(Eutectoid cementite)를 입상 또는 구상으로 만들어서 강도, 인성 등을 향상시켜 바이트, 드릴과 같은 공구와 발전플랜트 산업 설비 등의 부품에 제한적으로 사용하고 있다. 뿐만 아니라, 이러한 고탄소강에 Cr, Ni, W, Mo 등과 같은 합금원소를 하나 또는 둘 이상 소량 첨가하여 경화능을 향상시킴과 동시에 시멘타이트보다 높은 경도를 갖는 합금 탄화물을 생성시킴으로서 내마모성 등을 향상시켜 금형과 롤 등의 소재로도 일부 사용하고 있다.

그러나 탄소 함량이 1.3% 이상으로 더 높아지게 된다면 이들 재료가 갖는 미세조직 등에 기인되어 재료가 대단히 취약하기 때문에 공업적으로 사용하는 데는 더 많은 어려움이 발생되어 거의 사용을 하지 못하고 있는 실정이다. 때문에 이러한 초 고탄소강에 대한 연구는 현재까지도 많이 수행되어 오지는 못하였지만 근래에 와서는 이러한 강에서 강도와 경도, 인성 등을 향상시켜 신

재생에너지 등과 같은 다양한 산업분야의 부품이나, 이러한 부품을 만드는데 필요한 공구 등에 적용하고자 하는 연구가 일부 수행되고 있다^{2,3)}.

과공석강과 같은 고탄소강에 대한 지금까지의 연구를 살펴보면, 주로 C 함량이 1.3% 이하인 강들에 대하여 가공과 열처리 등을 통하여 강도와 경도 그리고 인성 등을 확보하려는 연구와 단조 등과 같은 가공방법에 의해 여러 부품을 제조하는데 관련된 가공에 따른 금속의 유동, 응력 분포, 변형률 분포, 유한요소해석 및 단조 후 내마모성 등을 향상시키려고 하는 분야 등에 대하여 주로 수행되어 왔다^{4~11)}. 그러나 고탄소강의 사용범위를 더욱더 확대하기 위해서 뿐만 아니라 근래 괄목하게 성장하고 있는 조선관련 산업분야와 원자력 및 풍력 등과 같은 신 재생에너지 산업분야 등에서 설비의 효율향상 및 발전 효율 향상을 위해서 요구 되고 있는, 이 분야에서 사용되고 있는 기존의 부품보다 여러 특성이 우수한 부품의 제조와 이러한 부품의 제조에 관련되는 공구 등을 제작하는데 필요한 재료 특성이 우수한 소재개발의 측면에서도 고탄소강 뿐만 아니라 탄소함량이 1.5%인 초 고탄소 합금강에 대해서도 경도와 강도 그리고 인성을 향상시키기 위한 다양한 연구가 요구되고 있다.

본 연구는 이러한 측면을 고려하여 1.5% 정도의 C와 여기에 경화능을 향상시키면서 강력한 탄화물을 형성하는 합금원소인 Cr, Mo 등과 같은 합금원소를 소량 갖는 초 고탄소 합금강에 대해 경도와 인성 등을 향상시켜 근래 괄목하게 성장하고 있는 조선산업과 원자력, 풍력 등과 같은 신재생에너지 산업분야 등에 적용하는데 필요한 소재개발을 위한 자료를 얻기 위한 측면에서 수행하고자 한다. 즉, 1.5%의 탄소와 Cr, Mo 등과 같은 합금원소를 소량 갖는 초 고탄소 합금강에서 단조가공비를 달리하여 열간 단조를 행 한 다음, 열간

단조가공비의 변화에 따른 미세조직 변화를 조사하고, 이러한 미세조직 변화가 기계적 성질에 미치는 영향을 함께조사 하였다.



2. 실험 방법

2.1 시 료

본 연구에 사용된 시료는 먼저 전해철, Fe-Cr 및 금속 Mo 등을 사용하여 고주파 용해로에서 설계된 목적한 화학성분을 갖는 시료로 용해한 다음 소정의 크기를 갖는 잉곳으로 제작하였다. 다음 이 잉곳을 주방 상태의 조직과 편석 등을 제거하기 위한 균질화처리 하기 위하여 1,150℃에서 12시간 유지 후 공랭하는 오스테나이트화 처리(균질화처리)를 한 다음 시료로 사용하였다.

이때 사용된 시료의 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of the specimen (wt.%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Fe
1.49	0.55	0.77	1.0	1.21	0.27	0.055	bal.

2.2 단 조

1.5%의 C를 갖는 초 고탄소 합금강에서 이들 강의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 조사하기 위하여 먼저 시료를 1,200℃의 온도로 가열한 다음 일정시간 유지 후 단조작업을 시작하였다. 이때 단

조작업은 단조비가 각각 25%, 50%, 65%, 80%가 되도록 하기 위해 단조가 공비를 달리하여 단조작업 하였다. 한편 이러한 강에서 단조작업의 마무리 온도는 기계적성질에 대단히 큰 영향을 미치기 때문에 단조작업의 마무리 온도는 모두 동일하게 A₁ 변태점보다 높은 950℃가 되도록 하여 단조작업을 하였으며, 단조작업 후에는 공랭처리를 하였다.

2. 3 미세조직 관찰

주방 상태의 미세조직과 단조가공비를 달리하여 열간 단조 가공한 시료의 미세조직은 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 이들 여러 시료가 갖는 미세조직의 보다 상세한 관찰을 위해 주사전자현미경(SEM, Hitachi S-2400)을 사용하여 관찰하였다.

한편, 열간단조 가공비 변화에 따른 주방 상태에서 존재하는 망상 및 침상의 초석 시멘타이트 두께와 퍼얼라이트 조직 내 존재하는 공석 시멘타이트의 두께 및 층 간격은 주사전자현미경을 사용하여 관찰된 사진으로부터 화상분석 시험기를 사용하여 두께별로 여러번 측정하였다.

2. 4 기계적 성질 측정

주방 상태와 단조 가공비를 달리하여 열간 단조 가공한 시료의 인장성질을 측정하기 위한 인장시험은 표점거리가 50mm의 크기를 갖는 ASTM-E 8의

규격에 따라 인장시험편을 제작한 다음 cross head speed를 1mm/min로 하여 상온에서 인장시험하였다.

경도시험은 주방 상태 및 단조가공비를 달리하여 열간 단조 가공한 시료에 대하여 로크웰 경도시험기를 사용하여 1kg의 하중으로 시험하였다. 이때 경도값은 7회 이상 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 다음 평균하여 구하였다.

한편, 충격인성을 조사하기 위한 충격시험은 주방 상태 및 단조비를 달리하여 열간 단조 가공한 시료에 대해 2mmV 노치를 갖는 샤르피 충격시험편으로 제작한 다음 상온에서 시험하였다.



3. 실험결과 및 고찰

3. 1 미세조직 관찰

Photo 1은 실험에 사용된 1.5%의 C와 그 외 경화능을 향상시킬 뿐만 아니라 탄화물을 강력하게 형성하는 합금원소인 Cr과 Mo 등을 소량 갖는 초 고탄소 합금강의 주방 상태의 조직을 광학현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다.

이 사진에서 알 수 있는 바와 같이 1.5% 이상의 탄소를 갖는 초 고탄소강의 주방상태 조직은 퍼얼라이트의 기지조직에 사진에서 흰색으로 나타나 있는 초석 시멘타이트가 전 오스테나이트의 입계를 따라서 석출되어 망상형태로 존재하고 있을 뿐만 아니라, 전 오스테나이트의 입계에서 퍼얼라이트 조직 내로, 또는 퍼얼라이트 조직 내에서 침상형상으로 석출되어 존재하고 있는 것을 알 수 있다.

Photo 2는 Photo 1에서 광학현미경으로 나타낸 시료의 주방상태 조직을 보다 상세하게 관찰하기 위하여 주사전자현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다.

광학현미경 사진에서와 동일하게 주사전자현미경 사진에서는 검은색으로 나타나 있는 초석 시멘타이트가 전 오스테나이트의 입계를 따라 망상으로 석출되어 있을 뿐만 아니라 부분적으로 망상의 시멘타이트에서 퍼얼라이트의 조직 내로 또는 퍼얼라이트의 조직 내에서 침상형상으로 석출되어 존재하고 있는 것을 보다 명확하게 알 수 있다.

Photo 3은 초 고탄소강 합금강의 미세조직에 미치는 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 시료를 1200℃에서 950℃ 사이의 온도에서 각각 단조비가

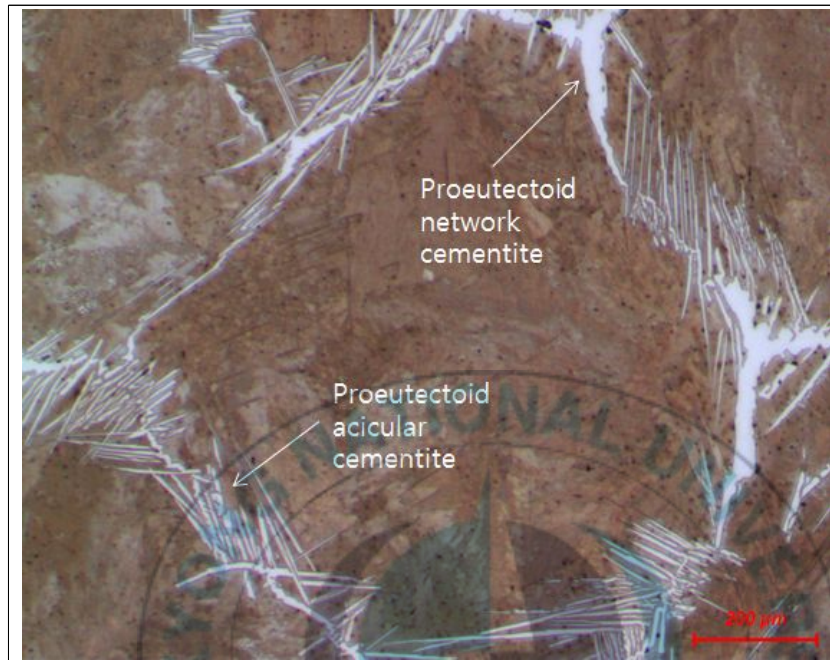


Photo 1 Optical micrograph of ultra high carbon steel at as-cast.

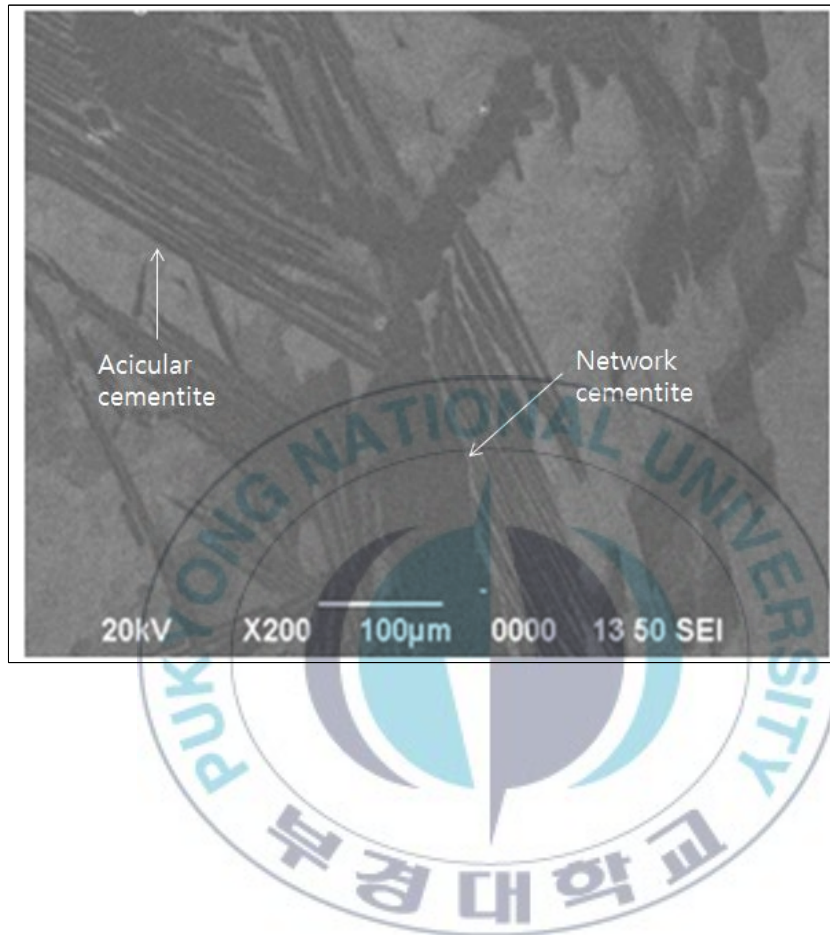


Photo 2 SEM micrograph of ultra high carbon steel at as-cast.

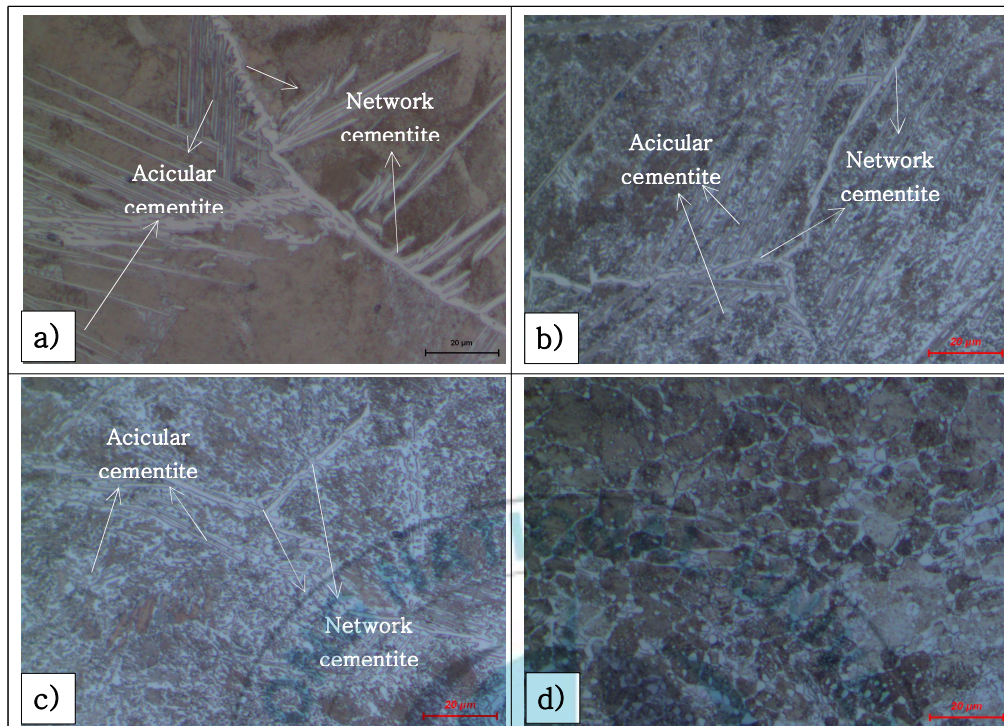


Photo 3 Optical micrographs showing the effect of hot forging ratio on microstructure change in ultra high carbon steel.

a) 25%, b) 50%, c) 65%, d) 80%

25%, 50%, 65%, 80%가 되게 단조 가공비를 달리하여 열간 단조한 다음 공랭한 시료의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다.

25% 열간 단조 가공 한 시료의 사진 a)에서는 단조 가공비가 많지 않기 때문에 단조가공에 의한 영향을 크게 받지 않아 주방 상태와 동일하게 퍼얼라이트의 기지조직에 초석 시멘타이트가 전 오스테나이트 입계를 따라 망상형태로 석출되어 있을 뿐만 아니라, 부분적으로 전 오스테나이트의 입계에서 퍼얼라이트 조직 내로 그리고 퍼얼라이트 조직 내에서 침상형상으로 석출되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 25% 정도의 단조가공비로 단조가공하게 되면 단조가공비가 적기 때문에 단조가공에 따른 영향을 크게 받지 않아 미세조직은 크게 변화되지 않고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 단조비가 증가하여 50% 정도의 단조 가공비로 단조 가공하면 사진 b)에서 알 수 있는 바와 같이 전 오스테나이트 입계를 따라 석출되어 있던 망상형태의 초석 시멘타이트는 주방 상태에서와 동일하게 망상으로 존재하고 있지만 그 두께가 얇아져 있고, 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트의 조직 내로 석출되어 있던 침상형태의 초석 시멘타이트 및 퍼얼라이트의 조직 내에서 침상형상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트와 퍼얼라이트 내의 공석 시멘타이트는 두께가 적어지면서 일부는 끊어져 입상으로 되기 시작하고 있는 것을 알 수 있다. 단조비가 더욱더 증가하여 65%가 되면 사진 c)에서 알 수 있는 바와 같이 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트의 조직 내로 또는 퍼얼라이트의 조직 내에서 침상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트와 퍼얼라이트 내 공석 시멘타이트는 대부분이 끊어져 입상으로 되어 있을 뿐만 아니라 전 오스테나이트 입계를 따라 석출되어 있던 망상형태의 초석 시멘타이트도 일부가 끊어져 입상으로 되어 있는 것을

알 수 있다. 그러나 주방 상태와 동일한 망상과 침상의 형태는 그대로 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 단조비가 더욱 증가하여 80%가 되면 망상 및 침상의 초석 시멘타이트와 퍼얼라이트 조직 내 공석 시멘타이트의 대부분이 끊어져 입상 또는 구상으로 되어 있는 것을 알 수 있다.

Photo 4는 초 고탄소 합금강의 미세조직에 미치는 단조비의 영향을 보다 상세히 조사하기 위하여 Photo 3에서 나타낸 시료의 미세조직을 주사전자 현미경으로 나타낸 것이다.

광학현미경 조직에서 설명된 바와 같이 25% 단조가공한 시료는 단조가공비가 적어 단조가공에 의한 영향을 크게 받지 않아 퍼얼라이트의 조직에 초석 시멘타이트가 전 오스테나이트 입계를 따라 망상형태로 석출되어 있을 뿐만 아니라 부분적으로 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트 내로 또는 퍼얼라이트 조직 내에서 침상형상으로 석출되어 있는 주방 상태와 동일한 조직으로 되어 있지만, 그 두께는 약간 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 퍼얼라이트 조직 내 존재하는 공석 시멘타이트는 극히 미소한 양이 끊어져 입상으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 단조비가 증가하여 50%가 되면 사진 b)에서 알 수 있는 바와 같이 전 오스테나이트 입계를 따라 석출되어 있던 망상형태의 초석 시멘타이트는 주방 상태와 동일하게 망상형상으로 존재하고 있지만 그 두께가 작아져 있는데 비하여 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트 내로 석출되어 있거나 퍼얼라이트 조직 내에서 침상형상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트는 부분적으로 끊어져 입상으로 되어 있는 것을 알 수 있고, 퍼얼라이트 조직 내의 공석 시멘타이트는 대부분이 끊어져 입상 또는 구상으로 되어 있을 뿐만 아니라 시멘타이트의 두께가 얇아지고 있는 것을 알 수 있

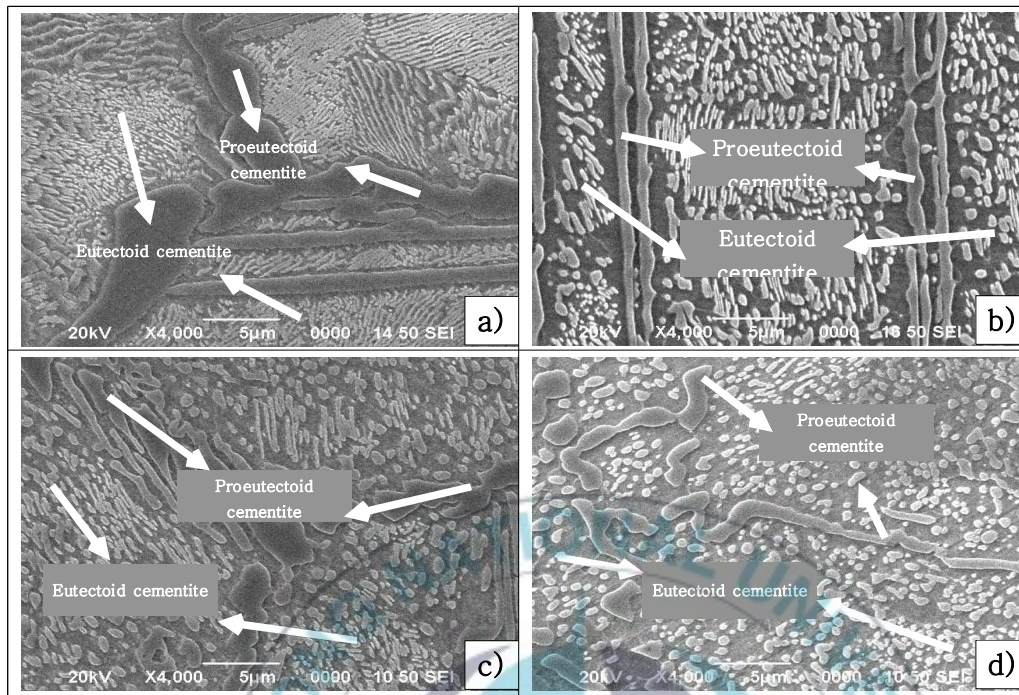


Photo 4 SEM micrographs showing the effect of hot forging ratio on microstructure change in ultra high carbon steel.

a) 25%, b) 50%, c) 65%, d) 80%

다. 단조비가 더욱더 증가하여 65%가 되면 사진 c)에서와 같이 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트 조직 내로 그리고 퍼얼라이트 조직 내에서 침상형상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트와 퍼얼라이트 조직 내 공석 시멘타이트의 대부분이 끊어져 입상 또는 구상으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 전 오스테나이트 입계를 따라 석출되어 있던 망상형태의 초석 시멘타이트도 주방 상태에서의 존재 형태인 망상의 형상은 유지되고 있지만 대부분이 끊어져 입상으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 단조비가 더욱 증가하여 80%가 되면 망상 및 침상형상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트가 대부분 끊어져 입상과 구상으로 되어 있을 뿐만 아니라 퍼얼라이트 조직 내 공석 시멘타이트도 전부가 끊어져 입상으로 된 다음 약 $1\mu\text{m}$ 크기 이하의 구상으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 전 오스테나이트 입계를 따라 석출되어 있던 망상형태의 초석 시멘타이트는 주방 상태에서의 존재 형태인 망상형태가 완전 소멸되어 없어져 있는 것을 알 수 있다.

Photo 5는 기지 조직인 퍼얼라이트 조직에 미치는 단조비의 영향을 알아보기 위하여 단조비가 25%가 되도록 열간단조한 시료에서의 퍼얼라이트 조직을 주사전자현미경으로 관찰하여 주방 상태의 조직과 비교하여 나타낸 것이다.

단조비가 25%가 되게 열간단조한 시료에서 존재하고 있는 퍼얼라이트 조직 내 공석 시멘타이트는 주방 상태에 비해 그 두께가 얇아져 있을 뿐만 아니라 시멘타이트의 층간거리도 적은 것을 알 수 있다.

이상의 미세조직 관찰로부터 단조 가공비가 증가하면 망상 및 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 두께가 얇아지다 끊어져 입상과 구상으로 되고 있을 뿐만 아니라 주방 상태에서 존재 형태인 망상형태도 소멸되고

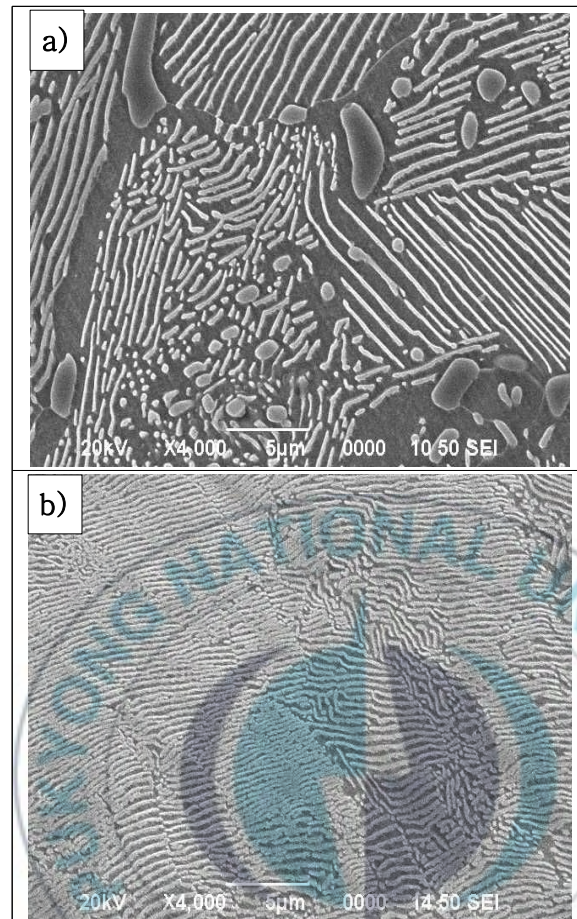


Photo 5 SEM micrographs showing the effect of hot forging ratio on size of pearlite in ultra high carbon steel.

a) as cast, b) 25% forging

없어지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 퍼얼라이트 내 공석 시멘타이트도 끊어져 입상으로 된 다음 구상으로 되고 있는 것을 알 수 있다.

3. 2 시멘타이트의 두께와 층 간격에 미치는 단조가공비의 영향

Fig. 1은 주방 상태에서 전 오스테나이트 입계를 따라 망상형상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트의 두께에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 주방 상태의 시료를 50%의 단조 가공비 까지 열간 단조한 다음 망상형상으로 존재하고 있던 시멘타이트의 두께를 조사하여 나타낸 것이다(열간 단조 가공비가 50% 이상이 되면 망상의 형태로 존재하던 시멘타이트가 끊어져 입상으로 되기 시작하기 때문에 50% 이상은 의미가 없어 두께의 변화를 조사하지 않았음).

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주방 상태에서 망상형상으로 존재하던 시멘타이트의 두께는 약 $25\mu\text{m}$ 에서 $91\mu\text{m}$ 사이의 크기를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 25% 단조가공하면 망상형상으로 존재하고 있던 시멘타이트의 두께는 약 $7\mu\text{m}$ 에서 $13\mu\text{m}$ 사이의 크기로 얇아지고 있고, 단조 가공비가 더욱 증가하여 50%가 되게 가공하면 약 $3\mu\text{m}$ 에서 $9\mu\text{m}$ 사이의 크기로 얇아지고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 단조 가공비가 증가하면 전 오스테나이트 입계를 따라서 망상형상으로 석출되어 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 두께가 얇아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 주방 상태에서 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트의 조직 내로 그리고 퍼얼라이트의 조직 내에서 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘

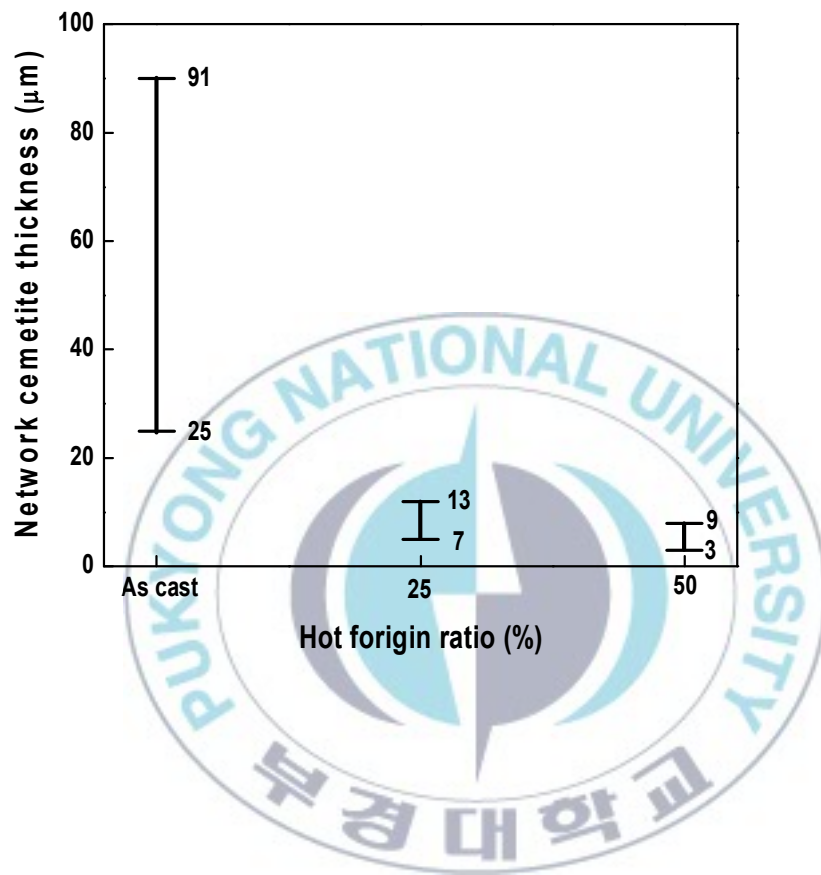


Fig. 1 Effect of hot forging ratio on proeutectoid network cementite thickness of ultra high carbon steel.

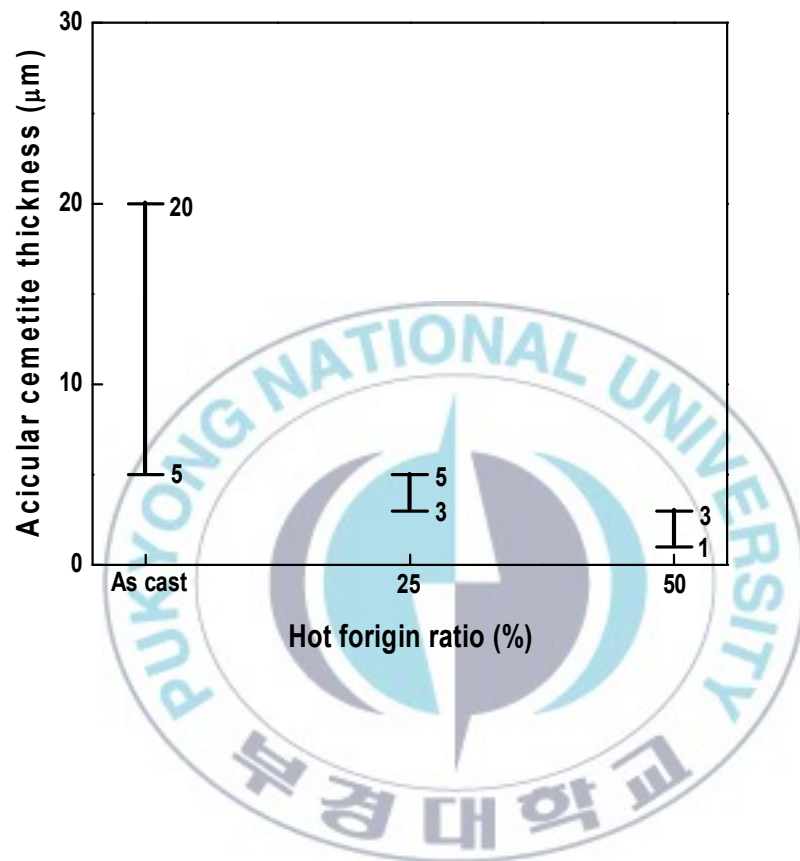


Fig. 2 Effect of hot forging ratio on proeutectoid acicular cementite thickness of ultra high carbon steel.

타이트의 두께에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 주방 상태의 시료를 50%의 단조 가공비까지 열간 단조한 다음 침상형상으로 존재하고 있는 초석 시멘타이트의 두께를 조사하여 나타낸 것이다(역시 열간 단조 가공비가 50% 이상이 되면 침상형상으로 존재 하던 시멘타이트가 끊어져 입상으로 되기 시작하기 때문에 50% 이상은 의미가 없어 두께 변화를 조사하지 않았음).

역시 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주방 상태에서 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 두께는 약 $5\mu\text{m}$ 에서 $20\mu\text{m}$ 사이의 크기를 나타내었다. 그러나 25% 열간 단조 가공하면 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 두께는 약 $3\mu\text{m}$ 에서 $5\mu\text{m}$ 사이로 작아지고 있고, 단조 가공비가 더욱 증가하여 50%가 되면 두께는 약 $1\mu\text{m}$ 에서 $3\mu\text{m}$ 사이의 크기로 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 열간 단조 가공비가 증가하면 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트 내 및 퍼얼라이트 내에서 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 두께도 얇아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 주방 상태에서 퍼얼라이트 조직 내에 존재하고 있는 공석 시멘타이트의 두께에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 주방상태의 시료를 25%의 단조 가공비로 열간 단조 가공한 다음 공석 시멘타이트의 두께를 조사하여 나타낸 것이다(열간 단조 가공비가 25% 이상이 되면 공석 시멘타이트가 끊어져 입상으로 되기 시작하기 때문에 그 이상의 가공비에서는 의미가 없기 때문에 두께 변화를 조사하지 않았음).

주방 상태에서 퍼얼라이트 조직 내 존재하던 공석 시멘타이트의 두께는 약 $0.2\mu\text{m}$ 에서 $0.8\mu\text{m}$ 사이의 크기를 나타내었다. 그러나 25% 열간 단조 가공하

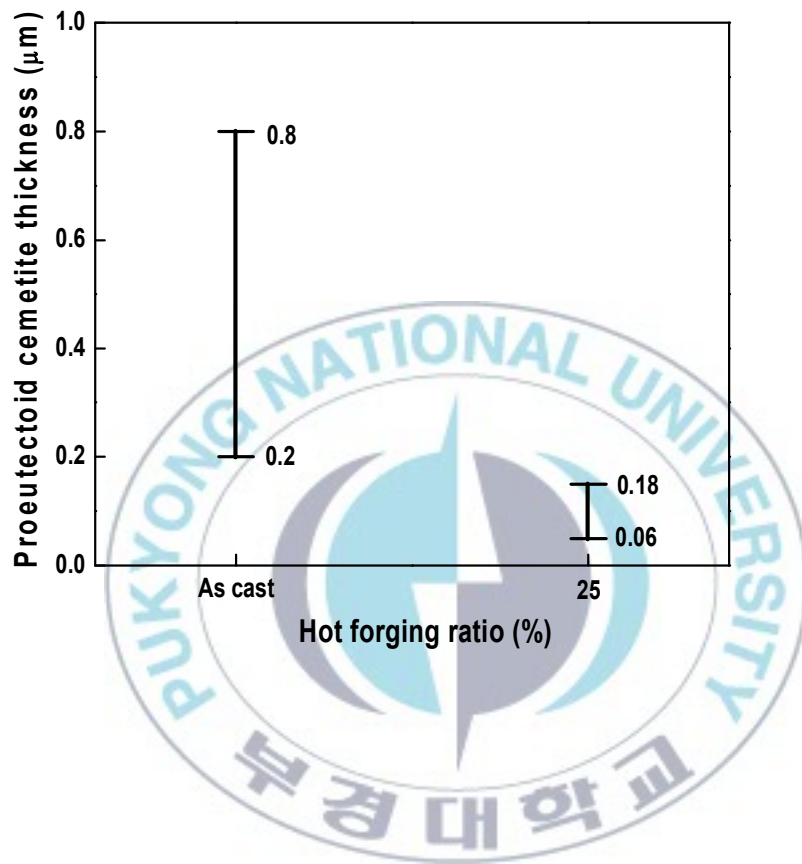


Fig. 3 Effect of hot forging ratio on proeutectoid cementite in ultra high carbon steel.

면 퍼얼라이트 조직 내 존재하고 있던 공석 시멘타이트의 두께는 약 $0.06\mu\text{m}$ 에서 $0.18\mu\text{m}$ 사이의 크기로 얇아지고 있는 것을 알 수 있다. 역시 이 결과로부터 열간 단조 가공비가 증가하면 퍼얼라이트 조직 내에 존재하고 있던 공석 시멘타이트의 두께도 얇아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 주방 상태에서 존재하고 있던 퍼얼라이트의 조직 내 공석 시멘타이트의 층 간격에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 주방 상태의 시료를 25%의 열간 단조 가공한 다음 공석 시멘타이트의 층 간격을 조사하여 나타낸 것이다(역시 단조가공비가 25% 이상이 되면 공석 시멘타이트가 끊어져 입상으로 되기 시작하기 때문에 그 이상의 가공비에서는 의미가 없기 때문에 층간격을 조사하지 않았음).

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주방 상태에서 존재하던 공석 시멘타이트의 층 간격은 약 $0.45\mu\text{m}$ 에서 $2\mu\text{m}$ 사이의 크기를 나타내고 있는데 비하여, 25% 단조가공한 시료에서는 약 $0.25\mu\text{m}$ 에서 $0.8\mu\text{m}$ 사이의 크기를 나타내었다. 따라서 이 결과로부터 열간 단조 가공하면 공석 시멘타이트의 층 간격도 작아지고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 단조가공하면 망상 및 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트와 퍼얼라이트 내 공석 시멘타이트의 두께가 얇아지고 있으며, 퍼얼라이트 내 공석 시멘타이트의 층 간격도 짧아지고 있는 것을 알 수 있다.

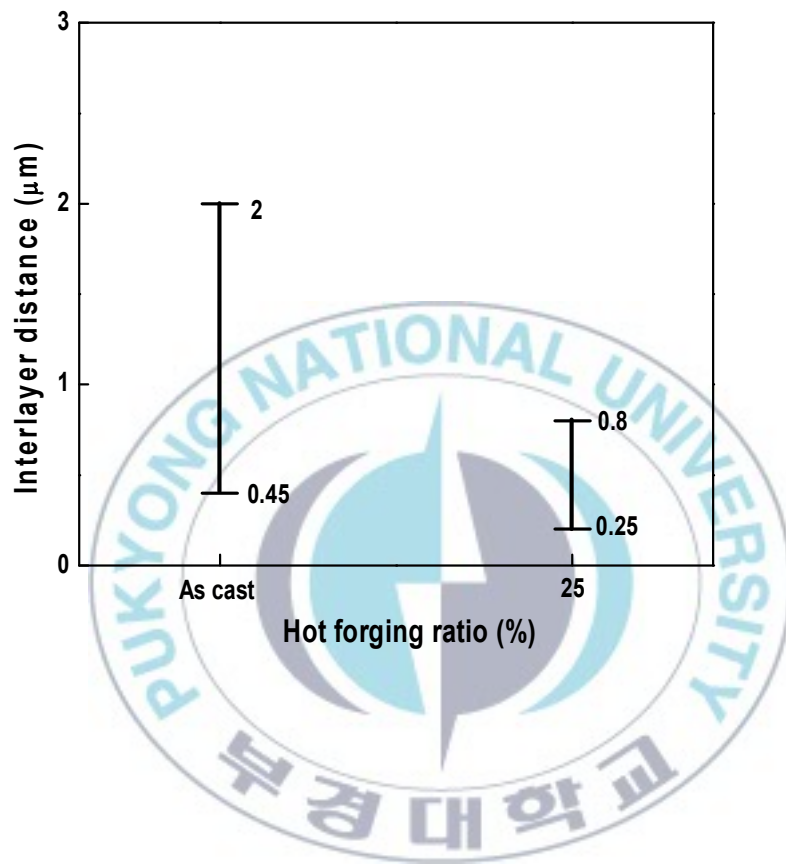


Fig. 4 Effect of hot forging ratio on interlayer distance of pearlite in ultra high carbon steel.

3.3 기계적 성질에 미치는 단조비의 영향

Fig. 5는 열간 단조 가공비 변화에 따른 초 고탄소 합금강의 경도 변화를 알아보기 위하여 열간 단조 가공비를 달리하여 열간 단조한 시료의 경도값을 조사하여 나타낸 것이다.

단조 가공비가 증가함에 따라 단조 가공비가 50%까지는 경도가 서서히 감소하고 있지만 단조 가공비가 50%보다 많아지게 되면 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 이전의 미세조직관찰 결과로부터 알 수 있다. 즉 단조비가 50% 까지는 단조비가 증가함에 따라 기계적 성질에 크게 나쁜 영향을 미치는 망상 및 침상형상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트의 두께는 얇아지고 있지만, 주방 상태에서의 존재 형태인 망상과 침상형상은 그대로 유지하고 있기 때문이고, 또한 퍼얼라이트 조직 내 공석 시멘타이트의 두께와 층간거리가 짧아지고, 일부가 끊어져 입상과 구상으로 되고 있지만 그 정도가 적기 때문에 단조가공비가 증가하여도 경도는 서서히 낮아지고 있다고 판단된다. 그러나 단 있던 초석 시멘타이트가 끊어져 입상으로 되기 시작하고, 퍼얼라이트 조직 내 존재하고 있던 공석 시멘타이트도 많은 양이 끊어져 입상과 구상으로 되고 있다. 뿐만 아니라 단조 가공비가 더욱더 높아지게 되면 망상 및 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 대부분이 끊어져 입상으로 되면서 주방 상태에서의 존재형태인 망상과 침상형상도 없어짐과 동시에 대부분의 공석 시멘타이트가 구상으로 되고 있다. 따라서 미세조직이 이와 같이 변화되는데 기인하여 응력에 대한 소성구속이 적어지기 때문에 가공량이 증가함에 따라 경도값은 빠르게 낮아진다고 판단된다.

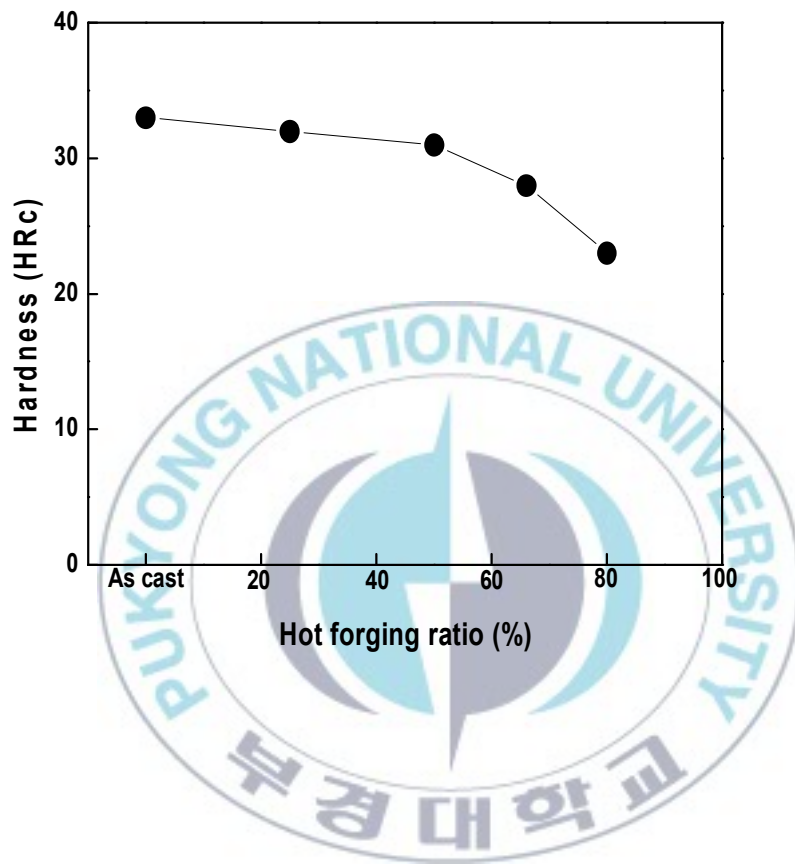


Fig. 5 Effect of hot forging ratio on the hardness in ultra high carbon steel.

Fig. 6은 열간 단조 가공비 변화에 따른 인장성질 변화를 알아보기 위하여 열간 단조 가공비를 달리하여 열간 단조 가공한 다음 인장성질을 조사하여 나타낸 것이다.

인장강도는 단조 가공비가 65%까지는 단조 가공비가 증가하여 큰 변화가 없다가 단조 가공비가 그 이상이 되면 빠르게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 단조 가공비가 65%까지는 망상 및 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 두께가 얇아지고는 있지만 아직도 주방 상태와 같은 망상형태를 그대로 유지하고 있고, 또한 퍼얼라이트 내 공석 시멘타이트의 두께가 얇아지다 끊어져 입상으로 되고 층 간격이 짧아지고 있지만 그 정도가 많지 않아서 소성구속을 크게 하고 있기 때문에 인장강도에 크게 영향을 미치지 못하였기 때문이라 판단된다. 그러나 단조 가공비가 80%로 증가하게 되면 망상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트가 입상으로 될 뿐만 아니라 주방 상태에서의 존재 형태인 망상형태도 소멸되고 없어지게 되어 소성구속이 적어지기 때문에 취약한 성질이 개선되어 강도는 크게 증가한다고 생각된다. 이에 비하여 연신율은 50%의 단조비까지는 단조 가공비가 증가함에 따라 서서히 증가하고 있다가 단조비가 50%를 넘어서게 되면 빠르게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 경도에 미치는 단조비의 영향과 마찬가지로 단조비 50%까지는 열간 단조비가 증가함에 따라 망상 및 침상형상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트의 두께는 얇아지지만, 주방 상태에서의 존재 형태인 망상과 침상의 형상은 그대로 유지되고 있고, 퍼얼라이트 내의 공석 시멘타이트도 그 두께 및 층간거리가 감소하다가 끊어져 입상과 구상으로 되지만 그 정도가 작기 때문에 연신율에 크게 영향을 미치지 못하였기 때문에 서서히 증

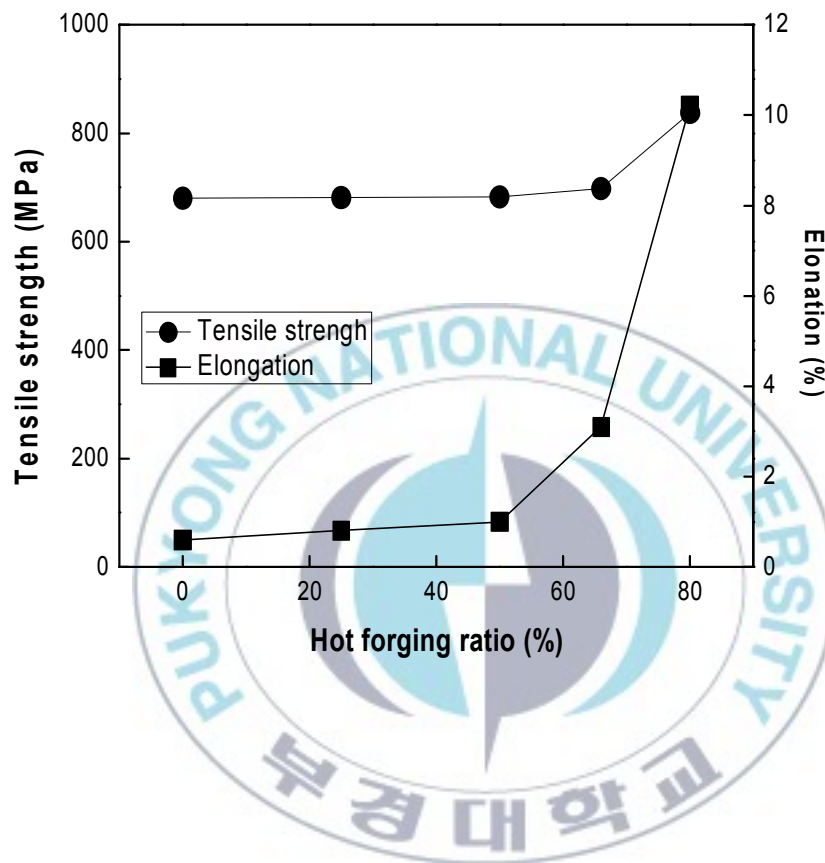


Fig. 6 Effect of hot forging ratio on the tensile properties in ultra high carbon steel.

가한다고 판단된다. 그러나 단조 가공비가 50% 이상이 되면 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 망상 및 침상의 형태로 존재하고 있던 초석 시멘타이트가 주방 상태와 같은 망상과 침상의 형상은 유지하고 있지만 끊어져 입상과 구상으로 되고 있고, 단조비가 더욱더 커지게 되면 초석 시멘타이트가 끊어져 입상과 구상으로 되면서 주방 상태의 존재 형태인 망상과 침상의 형상이 없어지고, 더불어 대부분의 공석 시멘타이트가 구상으로 되는데 기인되어 취약한 성질이 크게 개선되기 때문에 연신율은 빠르게 증가한다고 판단된다.

Fig. 7은 충격인성에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 시료를 여러 가공비로 달리하여 열간 단조 가공한 다음 충격인성을 조사하여 나타낸 것이다.

충격값은 그림 6에서 나타낸 연신율과 동일한 거동으로 50%의 단조 가공비까지는 크게 변화가 없지만, 열간 단조 가공비가 50% 이상이 되면 빠른 속도로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유 역시 연신율에 미치는 열간 단조비의 영향과 동일한 것으로 판단된다. 즉 단조 가공비가 50%까지는 열간 단조비가 증가함에 따라 망상 및 침상형상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트의 두께는 얇아지지만, 주방 상태에서의 존재 형태인 망상과 침상형상은 그대로 유지되고 있고, 퍼얼라이트 내의 공석 시멘타이트도 그 두께 및 층간거리가 감소하다가 끊어져 입상과 구상으로 되고 있지만 그 정도가 적기 때문에 충격인성에 크게 영향을 미치지 못하였기 때문에 서서히 증가한다고 판단된다.

그러나 단조가공비가 50% 이상이 되면 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 초석 시멘타이트가 주방 상태와 같은 망상과 침상의 형태를 유지하고 있지만

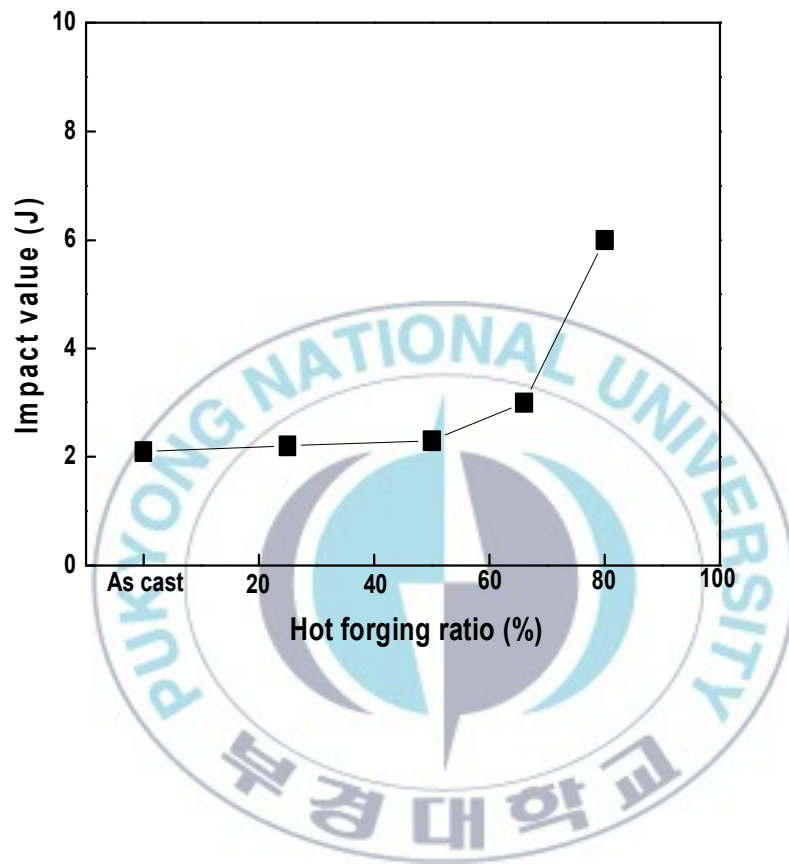


Fig. 7 Effect of hot forging ratio on the impact value in ultra high carbon steel.

끊어져 입상과 구상으로 되고 있고, 단조가공비가 더욱더 많아지게 되면 초석 시멘타이트가 주방 상태의 존재 형태인 망상과 침상의 형태가 소멸되어 없어지고, 더불어 대부분의 공석 시멘타이트가 구상으로 되는데 기인되어 취약한 성질이 크게 개선되기 때문에 충격인성은 빠르게 증가한다고 판단된다.

이상의 결과로부터 열간 단조에 의해 망상 및 침상으로 존재하던 초석 시멘타이트의 두께가 얇아지고 퍼얼라이트 조직 내 공석 시멘타이트의 두께 및 층간거리가 감소하는 것은 경도, 인장 성질 및 충격인성에는 크게 영향을 미치지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 공석 시멘타이트가 구상으로 되고, 특히 망상 및 침상형상의 초석 시멘타이트가 입상 및 구상으로 될 뿐만 아니라, 주방 상태에서와 같은 존재 형태인 망상과 침상의 형상이 없어지게 되면 경도와 인장 성질 및 충격인성에 크게 영향을 미치게 된다는 것을 알 수 있다. 즉 이러한 거동에 의해 경도는 크게 낮아지고, 강도와 연신율, 충격인성은 크게 증가하는 것으로 판단된다.



4. 결 론

초 고탄소 합금강의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 열간 단조비의 영향을 알아보기 위하여 1.5%C를 갖는 합금강에서 단조비를 달리하여 열간 단조 가공한 후 단조비에 따른 미세조직 변화를 조사하였고 아울러 이러한 미세조직 변화가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1.5%C를 갖는 초 고탄소 합금강의 주방 상태 조직은 퍼얼라이트 기지조직에 초석 시멘타이트가 전 오스테나이트 결정입계를 따라 망상형태로 석출되어 있을 뿐만 아니라 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트의 조직 내로 또는 퍼얼라이트의 조직 내에서 침상형태로 석출되어 있었다.
2. 단조비가 증가할수록 망상 및 침상의 초석 시멘타이트 두께는 감소하였고, 단조비가 50% 이상이 되면 망상 및 침상형태의 초석 시멘타이트가 입상과 구상으로 되기 시작하며, 단조비가 80%가 되면 망상 및 침상의 형태가 없어졌다.
3. 단조비가 증가할수록 퍼얼라이트 조직 내 공석 시멘타이트는 두께가 감소하다 깨어져 입상으로 된 다음 구상으로 되고, 시멘타이트의 층간거리는 감소하였다.
4. 경도, 인장강도, 연신율 및 충격인성은 단조비 50%까지는 큰 변화가 없지만, 단조비가 50% 이상이 되면 초석 및 공석 시멘타이트가 입상 및 구상으

로 되고, 단조비가 65% 이상이 되면 초석 시멘타이트가 주방 상태의 존재 형태인 망상과 침상이 형상이 없어지는데 기인되어 경도는 감소하는데 비하여 인장강도, 연신율 및 충격인성은 빠르게 증가하였다.

5. 경도, 인장 성질 및 충격인성은 초석 및 공석 시멘타이트의 두께가 감소하고 층간거리가 짧아지는 데는 크게 영향을 받지 않았다. 그러나 주방 상태에서의 존재 형태인 망상과 침상의 형태가 없어지게 되면 크게 영향을 받게 된다는 것을 알 수 있었다.



참 고 문 헌

1. S. L. Zhang, X. J. Sun, H. Dong, *Mater. Sci. Eng. A* **432**, 324 (2006)
2. H. Sunada, J. Wadsworth, J.Lim, O. D. Sherby, *Mater SCI. Eng.* **38**, 35 (1979)
3. O. D. Sherby, T. Oyama, D. W. Kum, B. Walser, J. Wadsworth, *J.Met.* **37**, 50 (1985)
4. S. P. Dudra, Y. T. Im, *J. of Materials Process ing Technology*, **21**, 143 (1990)
5. S. P. Dudra, Y. T. Im, *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, **23**, 2, 222 (2002)
6. B. V. Kiefer, and K. N. Shah, Trans. ASME, *J. of Eng. Mat. and Tech.* **112**, 477 (1991)
7. E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch and D. C. Shah, *J. of Mechanical Working Technology* **19**, 165 (1989)
8. E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch and D. C. Shah, *J. of Mechanical Working Technology* **19**, 195 (1989)
9. B. Y. Choi, I. S. Kim, B. R. Chang and Y. H. Lee, *J. Kor. Inst. Met. & Mater*, **41**, 4, 211 (2003)
10. J. R. Choa, W. B. Baeb, Y. H. Kimb, S. S. Choic and D. K. Kim, *J. of Materials Processing Technology* **80~81**, 161 (1998)

11. S. C. Hong, H. C. Kang, J. C. Ahn, H. S. Hwang, S. J. Lee, K. J. Lee, J. J. Park and K. S. Lee, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **42**, 1, 82 (2004)
12. J. Wadsworth and O. D. Sherby, *J. Mater. Sci.* **13**, 2645 (1978)



감사의 글

오십후반의 늦은 나이에 시작한 대학원 석사과정, 어려운 여건 속에서도 무사히 마칠수 있도록 많은 도움을 주신 여러분들께 지면을 통해 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저, 대학원생활과 본 논문이 완성되기까지 많은 지도와 격려를 해주신 강창룡 교수님, 논문을 세심하게 심사하여 주신 정병호, 이종문 교수님과 많은 협조를 주신 그 외 금속공학과 교수님들께도 마음속 깊이 감사드립니다. 또한 밤을 지새는 실험과 논문작성에도 불평 없이 협조를 아끼지 않은 실험실의 태현, 종영, 목환 등의 후배들 그리고 빼놓을수 없는 우리회사의 임직원 여러분들에게도 감사의 마음을 전합니다.

늦은 나이에 석사과정을 시작하게 된 동기는 2006년 투병생활을 하면서 느낀 많은 후회와 아쉬움들, 꼭 했어야 하는 일들을 하지 않은 것들, 그리고 가장 소중한 것이 무엇인지도 모르고 살았다는 자책을 하면서 ‘지금이라도 늦지 않았다, 하나씩 하면 된다.’는 마음에서 시작하게 되었습니다. 이제 작지만 그 결실을 거두게 되었습니다. 이 결실로

첫 번째는 늦었지만 어머니의 원을 풀어 드리게 되어 기쁩니다.

두 번째는 아들 영재, 딸 지영, 언정 너희들에게 너무 미안하고 고맙구나. 어쩌면 늦었지만 지금이라도 너희들에게 조금은 모범이 되고자 하는 마음이 있었나 보다. 그리고 노력하는 아버지의 한 면을 보이게 된 것이 기쁘구나 많이 사랑한다.

세 번째로 사랑하는 내 아내 이영숙과 이 결실을 함께 하고자 합니다. 오늘이 있기까지 여러 과정 중에 2006년은 나에게 커다란 인생 전환점이 되었고 나 자신을 돌아보면서 내가 많이 부족했고 당신 마음에 아픔과 어려움을 준 여러 가지 일들이 회환으로 남고 있네요, 당신 말대로 아버님께서 내게 조언, 경고와 함께 격려와 반성의 기회를 주신

것이 큰 밑거름이 되었네요,

늦었지만 가족이 얼마나 소중한지, 당신이 내게 얼마나 소중한 사람인지도, 또한 당신이 지켜주었기에 오늘의 나와 가정이 있다는 것을 알게 되어 그 고마움을 세삼 또 한번 느끼게 됩니다. 작은 결실이지만 이 석사학위 취득으로 이러한 내 마음을 담아 함께하고자 합니다.

마지막으로 아버님은 언제나 제 가슴속 깊이 계십니다. 이제 부터 저와 제 자식들이 베푸는 마음으로 진솔되게 살도록 하겠습니다.

계속 지켜봐 주십시오.



2012.7
김태환 올림