creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:21031-200000181597

공학박사 학위 논문

초고탄소 저합금강의 강도와 인성에 미치는 열간단조의 영향

2019年 2月

부경대학교 대학원

금 속 공 학 과

김 종 백

공학박사 학위 논문

초고탄소 저합금강의 강도와 인성에 미치는 열간단조의 영향

지도교수 강 창 룡

이 논문을 공학박사 학위 논문으로 제출함.

2019年 2月

부경대학교 대학원

금 속 공 학 과

김 종 백

김종백의 공학박사 학위논문을 인준함.

2019년 2월 일

위 원 장 공학박사 남 기 우 (인)

위 원 공학박사 배 동 수 (인)

위 원 공학박사 왕 제 필 (인)

위 원 공학박사 김 권 후 (인)

위 원 공학박사 강 창 룡 (인)

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

목 차

Abstract iii

제 I 장 서론 1

제 II 장 초고탄소 저합금강의 미세조직과 인장성질에 미치는 열간단조의영향 6

2.1. 서 론 7

2.2. 실험방법 9

2.2.1 시료 9

2.2.2 열간단조 9

2.2.3 미세조직 관찰 10

2.2.4 인장시험 10

2.3. 실험결과 및 고찰 11

2.3.1 미세조직 관찰 11

2.3.2 미세조직의 성상변화에 미치는 단조비의 영향 20

2.3.3 인장성질에 미치는 미세조직의 영향 26

2.4. 결 론 35

제 III 장 초 고 탄소 저합금강의 경도와 인성에 미치는 열간단조의 영향 36

3.1. 서 론 37

3.2. 실험방법 39

3.2.1 시료 39

3.2.2 단조 39

3.2.3 미세조직 관찰 39

3.2.4 경도 및 충격시험 40

3.3. 실험결과 및 고찰 41
3.3.1 미세조직 관찰 41
3.3.2 시멘타이트와 경도, 충격인성에 미치는 단조비의 영향..... 47
3.3.3 경도와 충격인성에 미치는 미세조직의 영향..... 53
3.4. 결 론 61

제 Ⅳ 장 결 론 62

참고문헌 65

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Effect of Hot Forging on Tensile Strength and Toughness of Ultra High Carbon Low Alloy Steel

Jongbaeck Kim

Department of Metallurgical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Effect of the hot-forging ratio on the microstructure, hardness, tensile properties and impact toughness of ultra-high carbon low alloy steel was investigated.

The results obtained from this study are as follows:

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

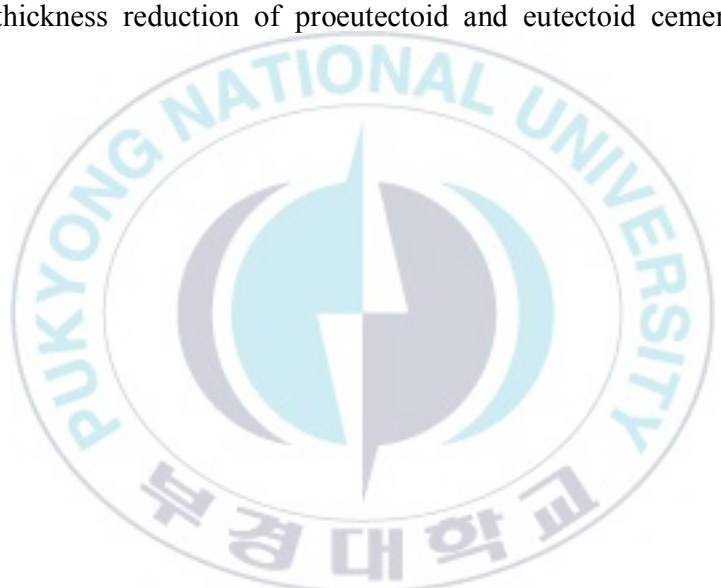
When the forging ratio was over 65%, the network and acicular shape of the as-cast state disappeared.

By increasing the hot-forging ratio, tensile strength and elongation were not changed up 50 %, and then increased rapidly with the increase in the forging ratio. Strength and elongation were not affected by the thickness of the proeutectoid and eutectoid cementites, but were greatly affected by the shape

of the proeutectoid cementite.

With increasing hot forging ratio, hardness, tensile strength, elongation and impact value were not changed up 50%, and then hardness rapidly decreased, while impact value rapidly increased.

Hardness and impact value was greatly affected by the disappeared of network and acicular shape of proeutectoid cementite, and became particle shape than thickness reduction of proeutectoid and eutectoid cementite.



제 I 장

서 론

최근 우리나라의 에너지 관련 산업분야 중 발전플랜트 산업분야의 변화를 살펴보면, 국가산업발전 정책 기조를 따라 원자력 및 화석연료를 사용하는 발전플랜트 산업 분야에서 신재생 에너지원인 풍력과 태양광을 이용하는 발전플랜트 산업분야로 변화하고 있다. 이에 따라서 관련 산업계에서도 이러한 발전플랜트 산업분야의 정책 변화에 부응하여 풍력 및 태양광 등의 신재생 에너지원을 이용하는 발전플랜트 산업 분야로 변화를 시도 하고 있고, 또한 이들 발전설비의 발전효율 향상을 위하여 설비수명의 장수화 및 대형화 등을 시도하고 있으며, 설비수명의 장수화 및 대형화를 추진하기 위하여, 그 특성에 적합한 새로운 재료를 개발하고 하고 있다.

특히 신 재생에너지를 이용하는 산업 분야 중 풍력을 이용하는 발전플랜트 산업 분야에서는 재료의 여러 가지 특성 중에서도 내마모성이 우수한 재료들의 수요가 크게 증가하고 있으며, 따라서 내마모성이 우수하다고 알려진 고 탄소와 저 합금원소를 함유한 강을 이용하여 부품을 제조하려는 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

일반적으로 탄소함량이 0.8% 이상인 과공석강을 서냉하면 초석 시멘타이트(Cementite)는 오스테나이트(Austenite) 조직의 입계를 따라 망상으로 석출되어 있을 뿐만 아니라, 오스테나이트 조직의 입계에서 펄라이트의 조직 내로 침상으로 석출되어 있으며, 공석 시멘타이트는 펄라이트(Pealite)의 기지조직에 내에서 침상으로 석출되어 있기 때문에 대단히 취약하여 기계적 성질 특히 인성 등이 크게 낮아[1] 공업적으로 폭

넓게 사용되지 못하고 있다.

특히 탄소 함량이 1.3% 이상이 되면 시멘타이트가 결정입계를 따라 망상으로 존재하거나 입내에 침상 등의 형상으로 존재하게 되며, 이들 재료가 갖는 미세조직이 재료의 성질을 대단히 취약하게 하기 때문에 인성 및 가공성 등이 문제가 되어 공업적으로 사용하는 데는 더 많은 어려움이 발생되어 현재까지는 거의 사용을 하지 못하고 제한적으로 일부 부품 등에 사용되고 있는 실정이다.

그러나 최근에는 이보다 더 많은 탄소를 갖는 과공석강에 가공과 열처리 등을 단독 또는 복합적으로 행하여 망상 및 침상으로 존재하고 있는 초석 시멘타이트(Proeutectoid cementite)와 펄라이트 조직 내 존재하고 있는 공석 시멘타이트(Eutectoid cementite)를 입상 또는 구상으로 만들어서 강도와 인성 등을 향상시켜 풍력과 같은 신재생에너지를 사용하는 발전플랜트 산업설비 등의 부품에 사용하려는 노력이 이루어지고 있을 뿐만 아니라, 이들 부품을 제조하는데 필요한 바이트, 드릴과 같은 공구를 만드는데도 사용하려는 노력이 활발히 이루어지고 있다.[2~24)]

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 사용하려고 하는 노력이 이루어지고 있다. 때문에 근래에 와서는 이러한 강에서 강도와 경도, 인성 등을 향상시켜 신 재생에너지 등과 같은 다양한 산업분야의 부품이

나[22,23], 이러한 부품을 만드는데 필요한 공구 등에 적용하고자 하는 연구가 수행되고 있으나[2,3] 매우 부족한 실정이다.

현재까지 수행된 과공석강 이상 고탄소강에 대한 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 확대하고, 근래 괄목하게 성장하고 있는 조선관련 산업분야와 풍력 등과 같은 신 재생에너지 산업분야 등에서 설비의 내구성 및 발전 효율을 향상시키기 위해여, 이들 산업 분야에서 사용되고 있는 기존의 부품보다 특성이 우수한 부품의 제조와 이러한 부품의 제조에 관련된 공구 등을 제작하는데 필요한 제 특성이 우수한 소재개발의 측면에서도 고탄소강뿐만 아니라 탄소함량이 1.5%인 초고탄소 합금강에 대해서도 경도와 강도 그리고 인성을 향상시키기 위한 다양한 연구가 요구되고 있다.[4~24]

따라서 본 연구는 이러한 측면을 고려하여 1.5% 정도의 C와 여기에 경화능을 향상시키면서 강력한 탄화물을 형성하는 합금원소인 Cr, Mo 등과 같은 합금원소를 소량 갖는 초고탄소 저합금강에 대해 경도와 인성 등을 향상시켜 근래 괄목하게 성장하고 있는 조선산업과 풍력 등과 같은 신재생에너지 산업분야 등에 적용하는데 필요한 소재개발을 위한

자료를 얻기 위하여 연구를 수행하였다. 즉, 1.5%의 탄소와 여기에 Cr, Mo 등과 같은 함금원소가 소량 첨가되어 있는 초고탄소 합금강에서 단조가공비를 달리하여 열간 단조를 행 한 다음, 열간 단조가공비의 변화에 따른 미세조직 변화를 계통적으로 조사하고, 이러한 미세조직 변화가 이들 강의 경도, 강도 및 인성 등에 미치는 영향을 함께 조사 하였다.

제 Ⅱ 장

초고탄소 저합금강의 미세조직과 인장성질에 미치는 열간 단조의 영향

2.1. 서론

0.8% 이상의 탄소를 갖는 과공석강은 펄라이트의 조직에 시멘타이트가 구 오스테나이트 입계를 따라 망상으로 석출되어 있을 뿐만 아니라, 구 오스테나이트 입계에서 펄라이트 내로 또는 펄라이트 내에서 침상으로 석출되어 있어 대단히 취약하다[1]. 따라서 관련 산업분야에서 구조재로 사용하는 데는 크게 제한을 받고 있다. 특히, 탄소량이 1.3% 이상의 과공석강은 재료가 극히 취약하여 구조재로 거의 사용하지 못하고 있다. 그러나 최근 풍력 등과 같은 신재생 에너지 분야, 기계 구조물 및 산업설비 등의 분야에서는 설비 운용의 효율성 향상을 위해 기존 소재보다도 더 높은 경도와 내마모성 및 우수한 인성 등을 갖는 소재를 이용한 부품들을 요구하고 있다. 때문에 탄소량이 1.3% 이상인 과공석강에서 가공과 열처리 등을 단독 또는 복합적으로 수행하여 망상 및 침상의 초석시멘타이트와 펄라이트 내 공석[2,-7] 시멘타이트를 입상 또는 구상으로 만들어 내구성 및 인성 등을 증가시켜, 관련 산업분야의 부품 등에 적용하려는 노력이 활발히 이루어지고 있다. 뿐만 아니라, 최근에는 1.5% 이상의 초고탄소강에 소량의 Cr, Ni, W, Mo 등과 같은 합금원소를 첨가하여 경화능을 향상하고, 시멘타이트보다 높은 경도를 갖는 합금 탄화물을 생성시킴으로서[4,8] 경도와 내마모성 등을 높여 금형과 롤 등과 같은 소재로 사용하려는 연구도 활발히 이루어져 왔고, 그 결과 일부 부품에 적용하여 사용되고 있다. 그러나 최근 이들 산업분야에서

요구하는 부품의 사용 효율성 및 부품의 내구성 측면에서는 아직 많이 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구는 1.5%의 탄소에 소량의 Ni, Cr, Mo 등의 합금원소가 첨가되어 있는 초고탄소 저합금강에서 단조가공비를 달리하여 열간단조한 다음, 단조비 변화에 따른 미세조직 변화를 조사하고, 이러한 미세조직 변화가 인장성질 미치는 영향 등을 조사 하였다.[14,16)]

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

2.2. 실험방법

2.2.1 시료

1.5% C에 소량의 Cr과 Mo을 갖는 초 고 탄소 저합금강은 먼저 고주파 용해로에서 용해 후 30×30×50㎝ 크기의 잉곳으로 만들었다. 다음 이 잉곳을 주방상태의 조직과 편석 등을 제거하기 위해 1,150℃에서 12시간 유지 후 공랭하는 오스테나이트화 처리(균질화처리)한 다음 시료로 사용하였다. 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.

2.2.2 열간 단조

미세조직과 인장성질에 미치는 단조비의 영향을 조사하기 위한 열간 단조작업은 먼저 시료를 1,200℃의 온도로 가열한 후 일정시간 유지한 다음 단조비가 각 25%, 50%, 65%, 80%가 되도록 자유단조 작업을 하였다. 이 때 열간 자유 단조작업 조건은 소재의 미세조직과 기계적성질에 크게 영향을 미치기 때문에 1200℃의 온도에서 단조작업을 시작하여 단조 마무리 온도는 이 시료의 A1 변태점보다 높은 900℃가 되도록 하였다. 그리고 단조 후에는 공랭하였다.

2.2.3 미세조직 관찰

주방상태의 미세조직과 단조비를 달리하여 열간단조한 시료의 미세조직은 연마와 정마과정을 거친 다음 4% 피크린산에 부식 후 광학현미경과 주사전자현미경(SEM, Hitachi S-2400)을 사용하여 관찰하였다.

또한, 열간단조비 변화에 따른 구 오스테나이트의 결정립 크기, 주방상태의 망상 및 침상의 초석 시멘타이트 두께, 펄라이트 조직 내 공석 시멘타이트의 두께 및 층 간격 등은 주사전자현미경으로 관찰한 사진으로부터 화상분석시험기를 사용하여 두께별로 여러 회 측정한 다음 평균해서 구하였다.

2.2.4 인장시험

주방상태와 단조비를 달리하여 열간단조한 시료의 인장성질을 측정하기 위하 인장시험은 각 시료로 부터 평행부 길이가 50㎜인 JIS Z 2201 4호 규격을 따라 시험편을 제작한 다음 cross head speed를 2㎜/min.로 하여 시험하였다.

2.3. 실험결과 및 고찰

2.3.1 미세조직관찰

Fig. 1은 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰한 1.5% 탄소에 소량의 Ni, Cr, Mo등을 갖는 초고탄소 저합금강의 주방 상태 조직을 나타낸 것이다.

펄라이트 조직에 흰색(주사전자현미경 사진에서는 검은색)으로 나타나 있는 비교적 두꺼운 초석 시멘타이트가 전 오스테나이트 입계를 따라 망상으로 석출되어 있는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 초석 시멘타이트가 입계에서 펄라이트 내로 석출되어 있으며, 공석 시멘타이트는 펄라이트 내에서 침상으로도 석출되어 있는 것을 알 수 있다.[4,14)]

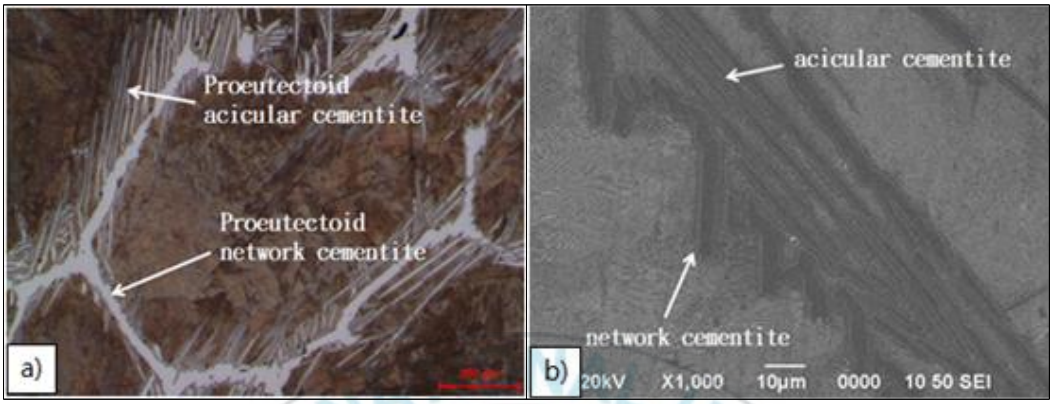


Fig. 2-1 Micrographs of ultra high carbon low alloys steel at as cast. a) Optical, b) SEM.

Fig. 2는 열간 단조비 변화가 단조 이전의 오스테나이트의 결정립 크기에 미치는 영향을 조사하기 위하여 단조 시작 온도를 1200℃로 하고 단조 마무리 온도를 900℃로 하는 온도영역에서 단조비를 달리하여 단조 한 다음 공랭한 시료의 광학현미경 조직 사진으로 사진 a)는 단조비가 25%, 사진 b)는 단조비가 65% 그리고 사진 c)는 단조비가 80%인 시료의 미세조직을 나타낸 것이다.

이 사진에서 알 수 있는 바와 같이 단조비가 높아질수록 단조 이전의 오스테나이트 결정립크기가 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 , 단조비가 80% 정도 되면 전 오스테나이트의 결정립 크기가 50㎛ 이하의 크기로 현저하게 미세화 되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 열간 단조비가 높아지면 오스테나이트의 결정립 크기가 감소하고 있는 것을 알 수 있다.[14)]

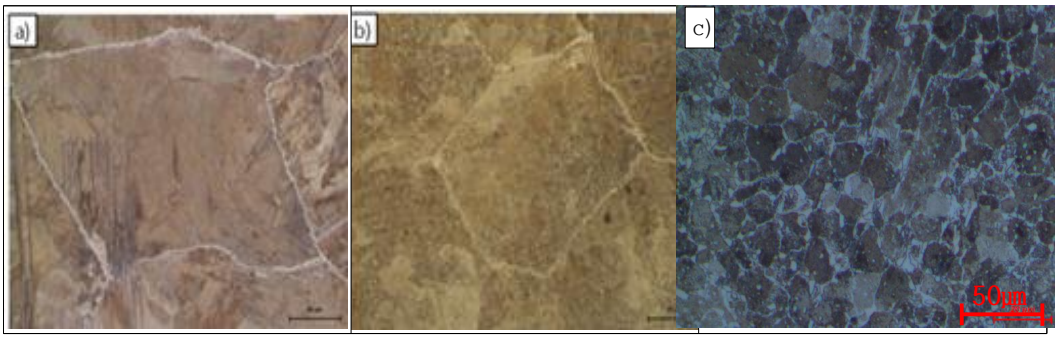


Fig. 2-2 Effect of hot forging ratio on the grain size of austenite in ultrahigh carbon low alloy steel a) 25%, b) 50 %, c) 80%.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Fig. 3은 1.5%의 탄소와 소량의 Ni, Cr, Mo 등의 합금 원소를 갖는 초고탄소 저합금강의 초석 및 공석 시멘타이트의 두께와 형상 등에 미치는 열간 단조비의 영향을 알아보기 위하여 1200℃에서 900℃ 사이의 온도에서 단조비를 달리하여 열간단조 한 다음 공랭한 시료를 주사전자현미경으로 관찰한 미세조직을 나타낸 것으로 역시 사진 a)는 단조비가 25%, 사진 b)는 단조비가 65% 그리고 사진 c)는 80% 인 시료의 미세조직을 나타낸 것이다.

단조비가 가장 적은 25%로 열간 단조한 사진 a)에서는 단조비가 적기 때문에 단조가공에 의한 영향을 적게 받아 주방 상태와 거의 동일하게 펄라이트의 조직에 두께가 두꺼운 초석 시멘타이트가 전 오스테나이트 입계를 따라 망상형태로 존재하고 있을 뿐만 아니라, 부분적으로 전 오스테나이트 입계에서 펄라이트 내로 침상으로 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 펄라이트 조직내 있는 공석 시멘타이트는 일부 끊어져 입상으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 단조비가 더욱더 증가하여 65%가 되면(사진 b)), 전 오스테나이트 입계를 따라 망상으로 석출되어 존재하고 있던 두꺼운 두께를 갖는 초석 시멘타이트는 주방 상태와 동일하게 망상의 형태를 유지되고 있지만, 대부분 끊어져 있을 뿐만 아니라 그 두께도 작아져 있으며, 전 오스테나이트 입계에서 펄라이트 내로 침상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트와 펄라이트 내 공석 시멘타이트는 대부분 끊어져 입상 또는 구형으로 되어 있는 것을 알 수 있다.[14,16,22)]

단조비가 더욱 증가하여 80%가 되면 망상 및 침상의 초석 시멘타이트는 대부분 끊어져 입상으로 되어 있고, 펄라이트 내 공석 시멘타이트는 전부가 끊어져 약 1㎛ 크기 이하의 미세한 구형으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 주방상태에서 구 오스테나이트 입계를 따라 망상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트는 망상형태도 완전히 없어져 있는 것을 알 수 있다[4].

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

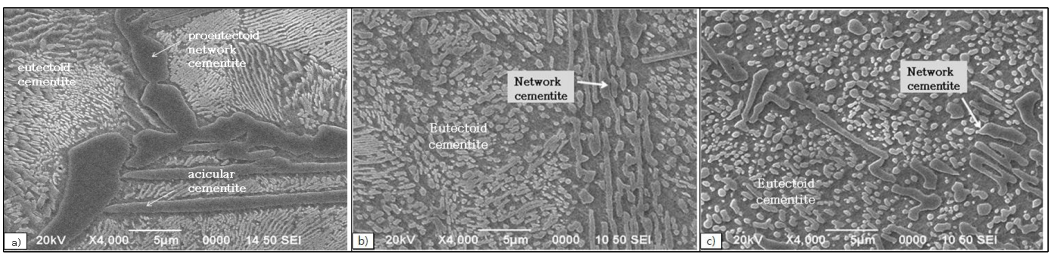


Fig. 2-3 SEM micrographs showing the effect of hot forging ratio on microstructure change in ultra high carbon low alloys steel.

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

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Fig. 4는 펄라이트 내 존재하는 공석시멘타이트의 두께와 시멘타이트의 층간거리에 미치는 열간단조의 영향을 알아보기 위하여 주방상태의 시료 및 단조비가 25%가 되도록 열간단조 한 두 시료를 주사전자현미경으로 관찰한 펄라이트 조직을 나타낸 것이다.

단조비 25%로 열간단조한 시료의 펄라이트 조직은 주방상태 시료의 펄라이트 조직에 비해 펄라이트내 공석 시멘타이트의 두께뿐만 아니라 시멘타이트의 층간거리가 크게 작아져 있는 것을 확인 할 수 있다.

이상의 미세조직 관찰로부터 단조비가 증가하면 오스테나이트의 결정립 크기가 작아지고, 망상 및 침상의 초석 시멘타이트는 두께가 얇아지다가 끊어져 입상과 구상으로 되며, 주방 상태에서의 망상과 침상 형태도 없어지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 펄라이트 내 공석 시멘타이트도 층간 간격이 작아지고, 시멘타이트의 두께도 적어지다가 끊어져 입상으로 된 다음, 단조비가 더 높아지면 구상으로 되고 있고 있는 것을 알 수 있다[4,6,7].

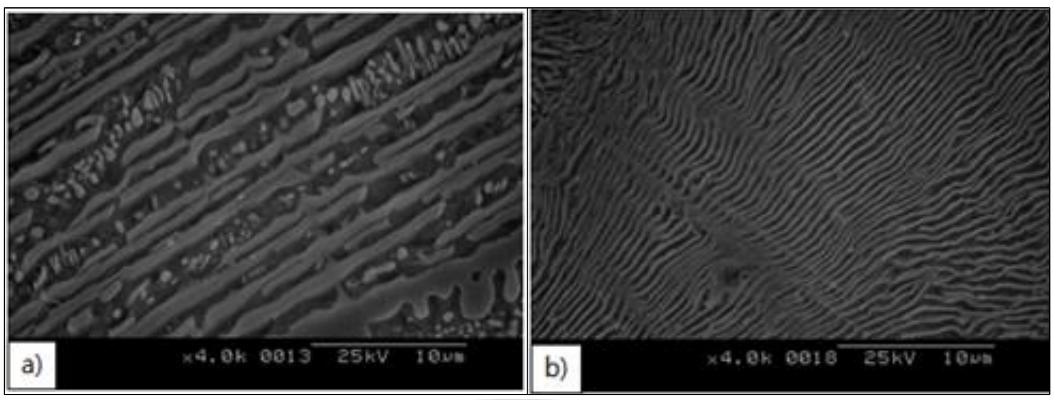


Fig. 2-4 SEM micrographs showing the effect of hot forging ratio on size of pearlite microstructure in ultrahigh low alloy carbon steel: a) as cast and b) 25% forging.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

2.3.2 미세조직의 성상변화에 미치는 단조비의 영향

탄소량이 0.8% 이상을 갖는 과공석강의 인장성질은 오스테나이트 조직의 결정립크기, 망상 및 침상 초석 시멘타이트의 두께와 형상, 공석 시멘타이트의 두께 및 층간격 등에 따라 달라질 것으로 판단되고, 이러한 조직의 성상은 단조비 변화에 따라 달리질것으로 판단된다. 따라서 열간 단조비에 따른 이들 미세조직의 성상변화를 조사하였다

Fig. 5는 초고탄소 저합금강의 오스테나이트 결정립크기에 미치는 단조비의 영향을 조사하기 위하여 단조비를 달리하여 단조작업 한 다음 오스테나이트의 결정립 크기를 조사하여 나타낸 것이다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 단조비가 증가함에 따라 구 오스테나이트의 결정립 크기가 빠르게 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 주방 상태에서 900㎛ 이상의 크기를 갖는 결정립이 단조비가 80% 가 되면 결정립 크기가 100㎛ 이하의 크기로 작아지고 있는 것을 알 수 있다.

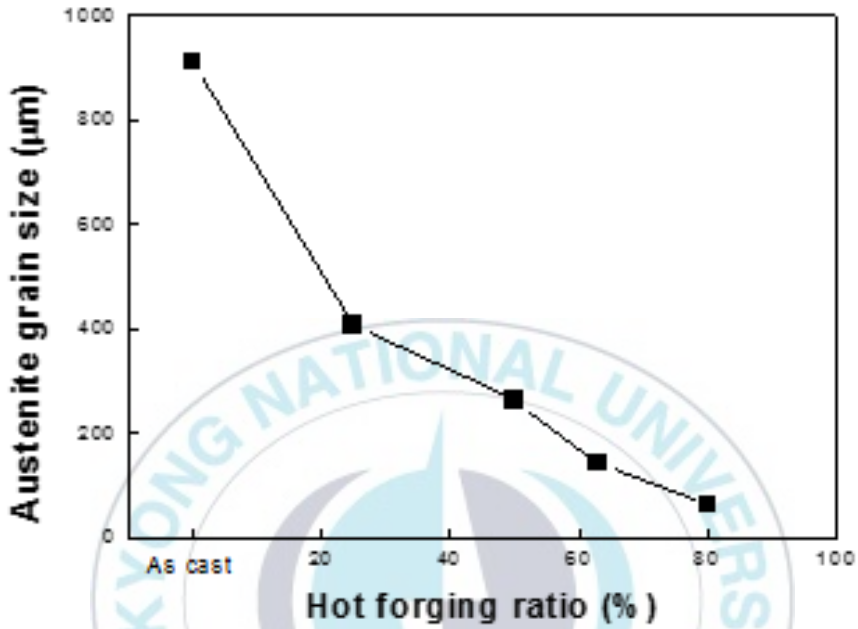


Fig. 2-5 Effect of hot forging ratio on the austenite grain size of ultrahigh carbon low alloy steel.

Fig. 6은 초고탄소 저합금강에서 존재하는 구 오스테나이트 입계를 따라 존재하고 있는 망상 및 구 오스테나이트 입계에서 펄라이트 내로 또는 펄라이트 내에서 침상으로 석출되어 있는 초석 시멘타이트의 두께에 미치는 단조비의 영향을 조사하기 위하여 단조비를 변화시켜 단조작업 한 다음, 오스테나이의 입계를 따라 망상으로 석출되어 있는 초석 시멘타이트와 오스테나이 입계에서 펄라이트 내로 침상으로 석출되어 있는 초석 시멘타이트의 두께를 조사하여 단조비에 대해 나타낸 것이다.

단조비가 증가함에 따라 망상 및 침상의 초석 시멘타이트의 두께가 빠르게 감소하다 단조비가 25% 이상이 되면 서서히 감소하고 있는 것을 알 수 있다(단조비가 80%가 되면 망상 및 침상 시멘타이트가 입상으로 되기 때문에 0으로 나타냄).

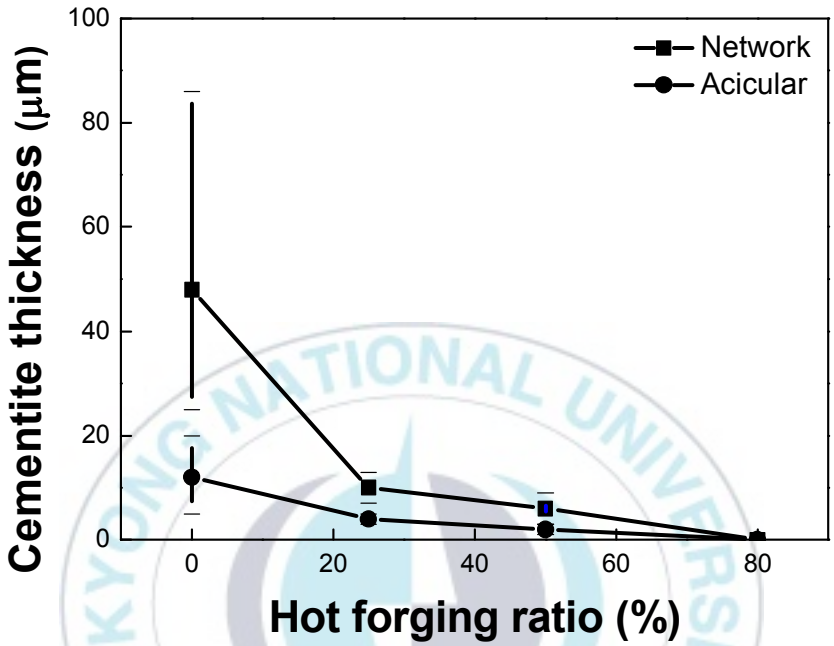


Fig. 2-6 Thickness of network and acicular cementite as a function of hot forging ratio in ultra high carbon low alloy steel.

Fig. 7은 펄라이트 내부에 존재하는 공석시멘타이트의 두께와 층 간격에 미치는 단조비의 영향을 조사하기 위하여 단조비를 변화시켜 단조작업 한 다음 공석 시멘타이트의 두께와 층간격을 조사하여 나타낸 것이다.

단조비가 증가함에 따라 공석 시멘타이트의 두께와 층 간격이 빠르게 직선적으로 감소하고 있는 것을 알 수 있다(역시 단조비가 50%가 되면 공석시멘타이트가 끊어져 구상으로 되기 때문에 0으로 나타냄). 따라서 이 결과로부터 단조비가 증가하면 시멘타이트의 두께 및 층 간격이 작아지고 있다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 단조비가 증가함에 따라 오스테나이트의 결정립 크기는 작아지고, 망상 및 침상의 초석 시멘타이트와 공석 시멘타이트의 두께가 감소하고 있으며, 공석 시멘타이트의 층간거리도 감소하고 있는 알 수 있다[4].

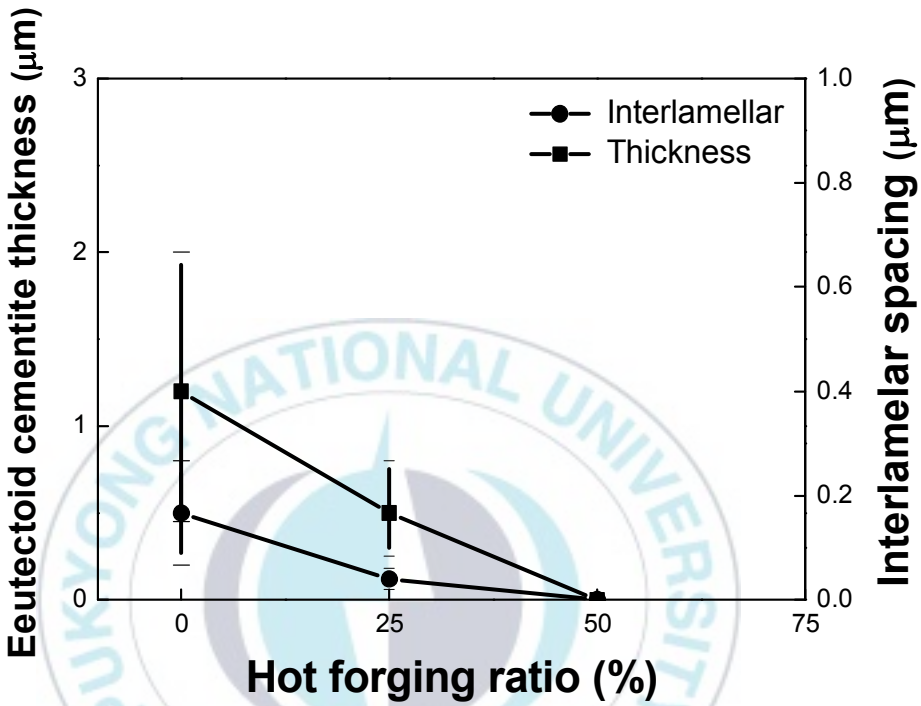


Fig. 2-7 Effect of hot forging ratio on the eutectoid cementite thickness and interlamelar spacing in ultrahigh carbon low alloy steel.

2.3.3 인장성질에 미치는 미세조직의 영향

앞의 미세조직 관찰로부터 열간 단조비 변화에 따른 오스테나이트의 결정립 크기, 망상 및 침상의 초석 시멘타이트 두께와 형상, 공석시멘타이트의 두께 및 층간격 등이 달라지고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 이러한 변화는 인장성질에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 이러한 미세조직 변화와 인장성질과의 상호관계를 조사하였다.

Fig. 8은 인장성질에 미치는 열간단조비의 영향을 조사하기 위하여 초고탄소 저합금강을 단조비를 달리하여 단조 작업 한 다음 인장강도와 연신율을 조사하여 나타낸 것이다.

단조비가 증가함에 따라 강도와 연신율은 큰 변화가 없다가 강도는 단조비가 65% 이상이 되면 빠르게 증가 하고 있고, 연신율은 단조비가 50% 이상이 되면 빠르게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이와 같이 단조비가 증가하면 인장강도와 연신율이 큰 변화가 없다가 특정 단조비 이상이 되면 빠르게 증가하는 이유는 이전의 단조비 변화에 따른 미세조직 관찰 결과로부터 알 수 있다. 즉, 단조비가 50% 까지는 망상 및 침상으로 석출되어 있던 초석 시멘타이트의 두께는 감소하지만 주방상태의 망상과 침상의 형태를 그대로 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 망상의 침상 형태가 그대로 유지되고 있기 때문에 강도와 연신율은 크게 변화되지 않는다고 판단 된다[4]. 그러나 단조비가 50% 이상이 되면 구 오스테나이트 입계를 따라 망상으로 석출되어 있는 시멘타이트가 망상의 형태는 유지되고 있지만 끊어져서 입상으로 되기 시

작하고 있을 뿐만 아니라, 침상의 초석 시멘타이트 및 공석 시멘타이트가 끊어져 구형으로 되며, 또한 단조비가 60% 이상이 되면 망상으로 존재하는 시멘타이트도 끊어져 입상으로 될 뿐만 아니라 주방상태에서의 존재 형태인 망상의 형태도 사라지기 때문에 강도와 연신율이 크게 증가하기 때문이라 판단된다[4,7].

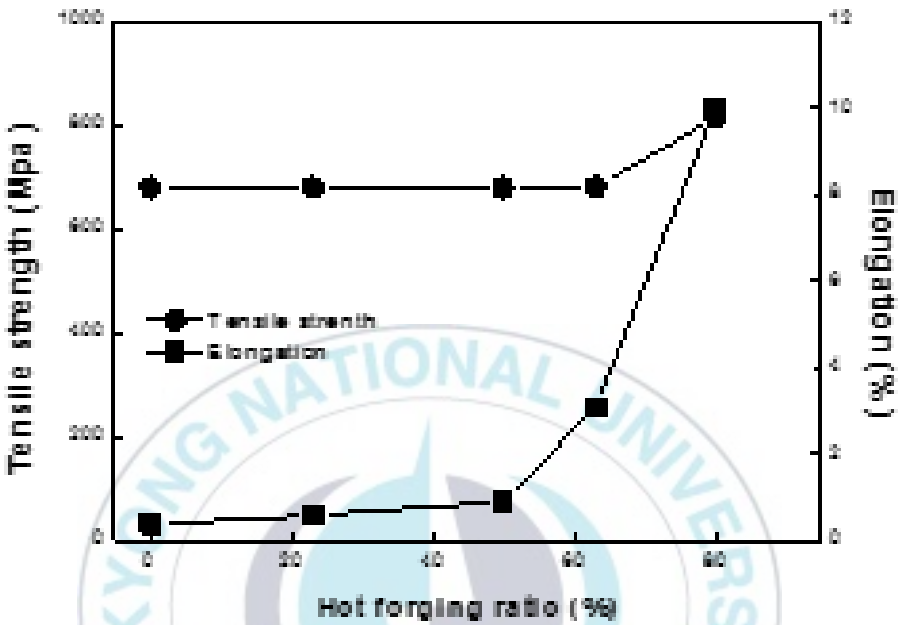


Fig. 2-8 Effect of hot forging ratio on the tensile strength and elongation in ultrahigh carbon low alloy steel.

Fig. 9는 인장성질에 미치는 망상으로 존재하고 있는 초석 시멘타이트 두께의 영향을 조사하기 위하여 단조비를 달리하여 단조한 초고탄소 저합금강의 인장 성질과 초석 시멘타이트 두께와의 상호 관계를 조사하여 나타낸 것이다.

망상 시멘타이트의 두께가 감소하여도 강도와 연신율은 큰 변화가 없다가 망상 시멘타이트의 두께가 약 8㎛ 크기 이하가 되면[65% 단조비] 강도와 연신율이 빠르게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 여기에서 강도와 연신율이 증가하는 이유는 망상 시멘타이트의 두께가 적어지는데 크게 영향을 받기 때문이라 판단하기 보다는 망상의 초석 시멘타이트가 끊어져 입상이 되고, 또한 망상으로의 형태가 없어지기 때문이라 판단된다. 다시 말하여 Fig. 6의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 8㎛ 이하의 두께는 65% 이상의 단조비에서 얻어지게 된다. 그러나 단조 가공비가 65% 이상이 되면 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 전 오스테나이트 입계를 따라 석출되어 있는 망상의 시멘타이트가 끊어져 입상 또는 구상으로 될 뿐만 아니라 망상의 형태가 소멸되고 있는데 이에 기인되어 강도가 증가하고 연신율이 증가한다고 판단된다.

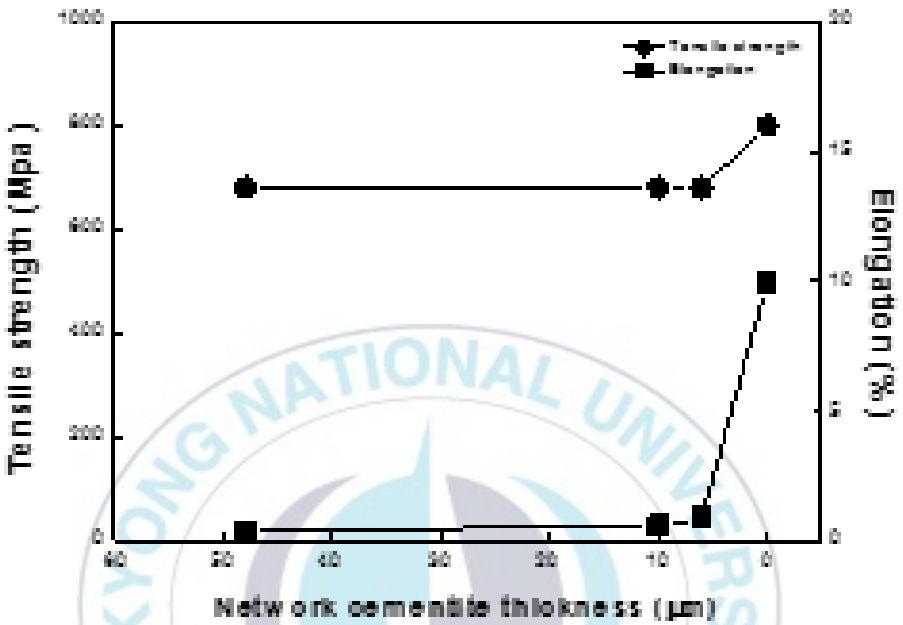


Fig. 2-9 Effect of network proeutectoid cementite thickness on tensile strength and elongation in ultrahigh carbon low alloy steel.

Fig. 10은 인장성질에 미치는 주방상태에서 침상으로 존재하고 있는 초석 시멘타이트 두께와 펄라이트내 존재하고 있는 공석 시멘타이트 두께의 영향을 조사하기 위하여 초고탄소 저합금강을 단조비를 달리하여 단조작업 한 다음 인장성질과 초석 및 공석 시멘타이트 두께와의 상호관계를 조사하여 나타낸 것이다.

초석 시멘타이트의 두께가 감소하여도 강도와 연신율은 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 초석 시멘타이트의 두께 감소는 인장성질에 크게 영향을 미치지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 공석 시멘타이트의 두께가 감소하여도 강도와 연신율은 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 이상의 결과로부터 초석 및 공석 시멘타이트의 두께 변화는 인장성질에 크게 영향을 미치고 있지 않는 다는 것을 알 수 있다.

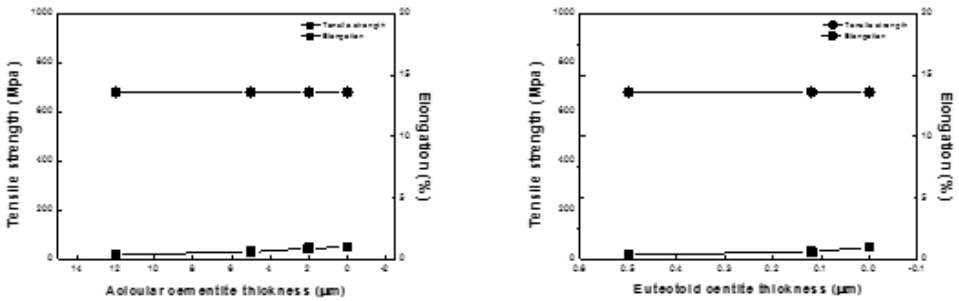


Fig. 2-10 Effect of (left) acicular proeutectoid and (right) eutectoid cementite thickness on the tensile strength and elongation in ultrahigh carbon low alloys steel

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Fig. 11은 펄라이트 내 존재하고 있는 공석 시멘타이트 층간거리가 인장성질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 단조비를 변화시켜 단조 작업한 초고탄소 저합금강의 인장 성질과 공석 시멘타이트의 층간거리와 상호 관계를 조사하여 나타낸 것이다.

역시 공석 시멘타이트의 층간거리가 감소하여도 강도와 연신율은 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 펄라이트 내 공석 시멘타이트의 두께와 층간거리의 감소는 강도와 연신율에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 전 오스테나이트 입계를 따라 석출되어 있는 망상의 초석 시멘타이트 및 펄라이트 내 석출되어 있는 초석 및 공석 시멘타이트의 두께 감소와 공석 시멘타이트의 층간거리 감소는 초고탄소 저합금강의 인장성질에는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 오스테나이트 결정립 크기가 작아지고, 망상 및 침상의 초석 시멘타이트와 공석시멘타이트가 끊어져 입상 또는 구상이 되거나, 주방상태에서의 형태인 망상 및 침상의 형태가 없어지게 되는데 기인되어 강도와 연신율이 크게 증가하고 있다는 것을 알 수 있다[4,8].

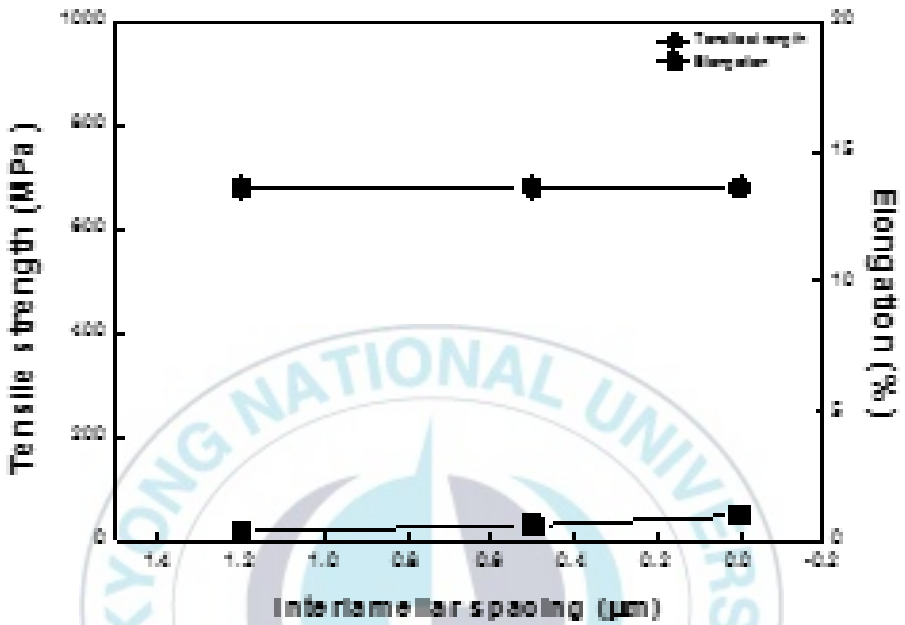


Fig. 2-11 Effect of interlayer eutectoid cementite interlameller spacing on tensile strength and elongation in ultra-high carbon low alloy steel.

2.4. 결론

초고탄소 저합금강의 미세조직과 인장성질에 미치는 열간 단조비 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단조비가 증가함에 따라 오스테나이트의 결정립 크기는 작아졌다. 또한 망상 및 침상의 초석 시멘타이트 두께는 감소하다, 단조비가 50% 이상이 되면 입상 또는 구상으로 되기 시작하며, 단조비가 80%가 되면 주방 상태에서의 망상 및 침상의 형태도 없어졌다.
2) 단조비가 증가함에 따라 공석시멘타이트의 두께가 감소하고, 단조비가 50% 이상이 되면 깨어져 입상으로 된 다음 구상으로 되었다. 또한, 단조비가 증가함에 따라 시멘타이트의 층간거리는 감소하였다.
3) 인장강도와 연신율은 초석 및 공석 시멘타이트의 두께가 감소하고, 층간거리가 작아지는 데는 크게 영향을 받지 않았다.
4) 인장강도와 연신율은 오스테나이트 결정립크기가 작아지고, 초석 및 공석 시멘타이트가 입상 또는 구상으로 되는데 기인되어 증가하고, 망상 및 침상의 형태가 없어지는데 기인되어 크게 증가하였다.

제 Ⅲ 장

초 고 탄소 저합금강의 경도와 인성에 미치는 열간단조의 영향

3.1. 서론

0.8% 이상의 C를 갖는 과공석강은 펄라이트 조직에 초석 시멘타이트가 전 오스테나이트의 입계를 따라 망상으로 석출되어 있을 뿐만 아니라, 전 오스테나이트의 입계에서 펄라이트 내부로 또는 펄라이트 내에서 침상으로 석출되어 있기 때문에 대단히 취약하여[1] 현재는 공업적으로 다양하게 사용되지 못하고 있다.

그러나 근년에 와서는 과공석강에 가공과 열처리 등을 과정을 단독 또는 복합적으로 행하여 망상 및 침상의 초석 시멘타이트(Proeutectoid cementite)와 펄라이트 내 공석 시멘타이트(Eutectoid cementite)를 입상 또는 구상으로 만들어 강도, 인성 등을 향상시켜 바이트, 드릴과 같은 공구와 발전플랜트의 설비 등의 부품으로 사용하려는 노력이 이루어지고 있고 그 결과 일부 부품 등에 적용하고 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 높게하여 금형과 롤 소재 등으로 사용하고 있다.

그러나 풍력 등과 같은 신재생 에너지산업 및 산업기기 등과 관련된 산업분야에서는 더 높은 강도와 내마모성 등을 갖는 부품이 요구되고 있고, 이러한 요구에 부응하기 위하여 초고탄소강에서 인성을 확보하여 이러한 산업분야의 부품 등에 적용하려고 하는 노력이 진행되고 있지만

[1,12,14,17-19] 아직 만족할 만한 결과가 얻어지지 못하고 있다.

본 연구는 이러한 측면을 고려하여 1.5%의 극히 많은 C와 경화능 향상과 강력한 탄화물을 형성하는 합금원소인 Cr, Mo 등이 소량 첨가된 초고탄소 저합금강에서 경도와 인성 등을 향상시켜 근래 괄목하게 성장하고 있는 조선 산업분야와 원자력, 풍력 등과 같은 신재생에너지 산업분야 등에 적용하는데 필요한 자료를 얻기 위해 연구를 수행하였다. 즉 1.5%의 탄소와 Cr, Mo 등과 같은 함금원소를 소량 갖는 초고탄소 합금강에서 단조비를 달리하여 열간단조 한 다음, 열간단조비 변화에 따른 미세조직 변화를 조사하고, 이러한 미세조직 변화가 경도와 인성에 미치는 영향을 조사 하였다.[14,16]

3.2. 실 험 방 법

3.2.1. 시 료

시료는 전해철 Fe-Cr, 금속 Mo 등을 사용하여 고주파 용해로에서 용해하여 소정의 크기를 갖는 잉곳으로 만들었다. 다음 이를 1,150℃에서 12시간 유지 후 공랭하는 오스테나이트화 처리한 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.

3.2.2. 단 조

열간단조의 영향을 조사하기 위한 열간단조는 시료를 1,200℃의 온도로 가열한 다음 소정시간 유지 후 단조비가 각 25%, 50%, 65%, 80%가 되게 단조 하였다. 이 때 단조 마무리 온도는 모두 950℃ 이상이 되도록 하였고, 단조작업 후에는 공랭하였다.

3.2.3. 미세조직 관찰

주방상태와 열간단조 한 시료의 미세조직은 광학현미경과 주사전자현

미경(SEM, HitachiS-2400)으로 관찰하였다. 한편, 단조비 변화에 따른 망상 및 침상의 초석 시멘타이트 두께와 펄라이트 내 공석 시멘타이트 두께와 층 간격은 주사전자현미경을 이용하여 관찰된 사진으로부터 화상분석시험기를 사용하여 두께별로 여러 회 측정하여 평균해서 구하였다.

3.2.4. 경도 및 충격시험

주방상태와 단조비를 달리하여 열간단조 한 시료의 경도측정은 로크웰 경도시험기를 사용하여 1㎏의 하중으로 7회 이상 측정하여 최대 값과 최소 값을 제외한 다음 평균하여 구하였다. 한편, 충격시험은 2㎜ V 노치를 갖는 샤르피 충격시험편(JIS B 7703)으로 제작한 다음 상온에서 시험하였다.

3.3. 실험결과 및 고찰

3.3.1. 미세조직 관찰

Fig. 1은 1.5% C를 갖는 초고탄소 합금강을 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰한 주방 상태 조직을 나타낸 것이다. 펄라이트 조직에 초석 시멘타이트가(광학현미경에서는 흰색, 주사전자현미경 사진에서는 검은색) 전 오스테나이트 입계를 따라 망상으로 석출되어 있을 뿐만 아니라 입계에서 펄라이트 내로, 또는 펄라이트 내에서 침상으로 석출되어 있는 것을 알 수 있다.[4)]

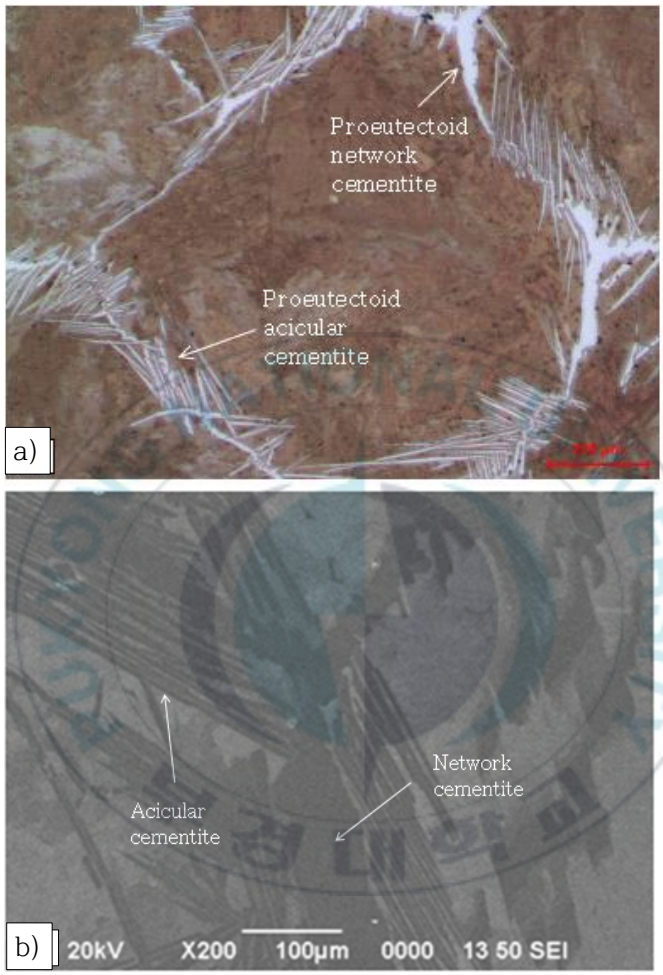


Fig. 3-1 Micrographs of ultra high carbon low alloys steel at as cast.

a) Optical, b) SEM

Fig. 2는 초고탄소 합금강의 미세조직에 미치는 열간단조비의 영향을 조사하기 위하여 시료를 1200℃에서 950℃ 사이의 온도에서 단조비를 달리하여 열간 단조한 다음 공랭한 시료의 미세조직을 주사전자현미경으로 나타낸 것이다. 25% 단조한 시료의 사진 a)에서는 단조의 영향을 크게 받지 않아 주방상태와 같은 조직으로 되어있지만, 망상과 침상의 초석 및 공석 시멘타이트의 두께는 약간 작아져 있는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 단조비가 65%인 b)에서는 망상의 초석 시멘타이트는 전 오스테나이트 입계를 따라 존재하고 있지만 일부는 끊어져 입상으로 되어 있고, 침상의 초석 시멘타이트와 펄라이트 내 공석 시멘타이트는 대부분 끊어져 입상으로 되어 있는 것을 알 수 있다.

단조비가 더욱 증가하여 80%가 되면 망상 및 침상의 초석시멘타이트는 전부 끊어져 입상으로 되고 있을 뿐만 아니라, 망상과 침상 형태도 없어지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 펄라이트 내 공석 시멘타이트도 전부 입상으로 되어 있는 것을 알 수 있다.[16)]

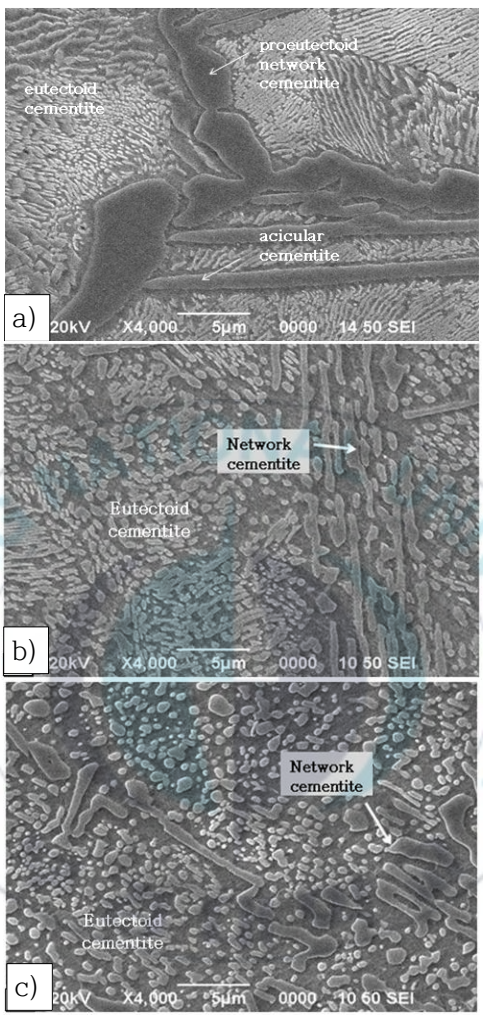


Fig. 3-2 SEM micrographs showing the effect of hot forging ratio on microstructure change in ultra high carbon low alloys steel.

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

Fig. 3은 공석 시멘타이트에 미치는 열간 단조비의 영향을 알아보기 위하여 주방상태와 25% 열간단조 한 시료의 펄라이트 조직을 주사전자현미경으로 비교하여 나타낸 것이다. 주방상태에 비해 25% 열간단조 한 시료의 공석 시멘타이트 두께와 층간거리가 적은 것을 알 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

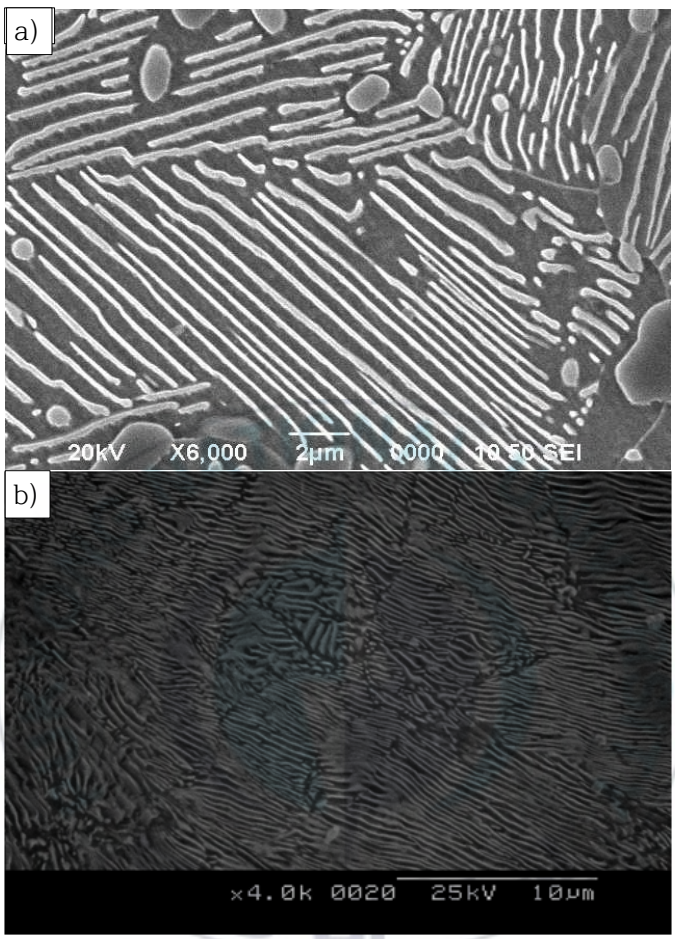


Fig. 3-3 SEM micrographs showing the effect of hot forging ratio on size of pearlite microstructure in ultra high low alloys carbon steel. a) as cast, b) 25% forging

3.3.2. 시멘타이트와 경도, 충격인성에 미치는 단조비의 영향

Fig. 4는 망상 및 침상 초석 시멘타이트의 두께에 미치는 단조비의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 단조비가 증가함에 따라 망상 및 침상 초석 시멘타이트 두께가 빠르게 적어지다가 단조비가 25% 이상이 되면 서서히 적어지고 있는 것을 알 수 있다(단조비가 80%인 시료는 망상과 침상 초석 시멘타이트가 전부 끊어져 입상 및 구상으로 되기 때문에 0으로 하였음).[16,22)]

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

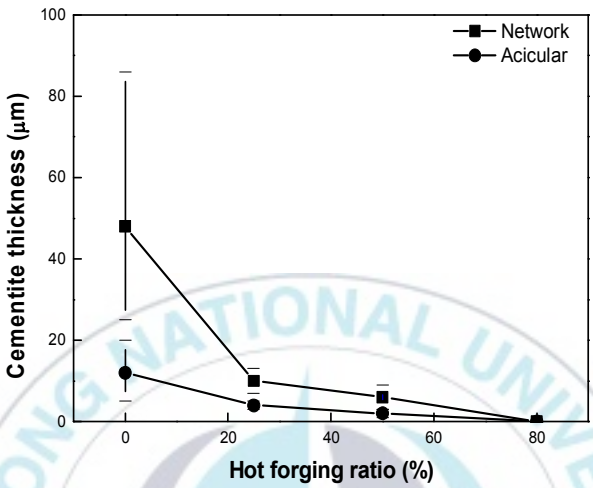


Fig. 3-4 Effect of hot forging ratio on network and acicular proeutectoid cementite thickness in ultra high carbon low alloys steel.

Fig. 5는 펄라이트 내 공석 시멘타이트의 두께와 층간격에 미치는 단조비의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 단조비가 증가함에 따라 공석 시멘타이트의 두께와 층간격이 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다 (역시 50% 단조한 시료는 공석 시멘타이트가 전부 끊어져 입상으로 되기 때문에 0으로 하였음).

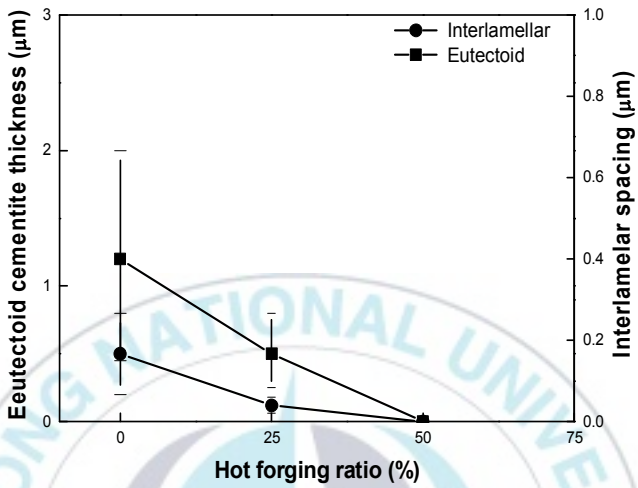


Fig. 3-5 Effect of hot forging ratio on the proeutectoid cementite thickness and interlamelar spacing ultra high carbon low alloys steel.

Fig. 6은 초고탄소 저합금강의 경도와 충격인성에 미치는 단조비의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 단조비가 증가하여도 경도와 충격인성은 큰 변화가 없다가 단조비가 50%보다 높아지면 경도는 빠르게 감소하고, 충격인성은 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 단조비가 50% 까지는 공석 시멘타이트가 끊어져 입상으로 되고, 초석 시멘타이트의 두께가 감소하지만 망상 및 침상 형태가 그대로 유지되고 있기 때문에 경도와 충격인성이 크게 변화하지 않는다. 그러나 단조비가 50% 이상이 되면 망상 및 침상의 초석 시멘타이트가 끊어져 입상으로 될 뿐만 아니라, 침상과 망상 형태도 없어지기 때문에 빠르게 경도는 낮아지고 충격인성은 높아진다고 판단된다[1,12,22].

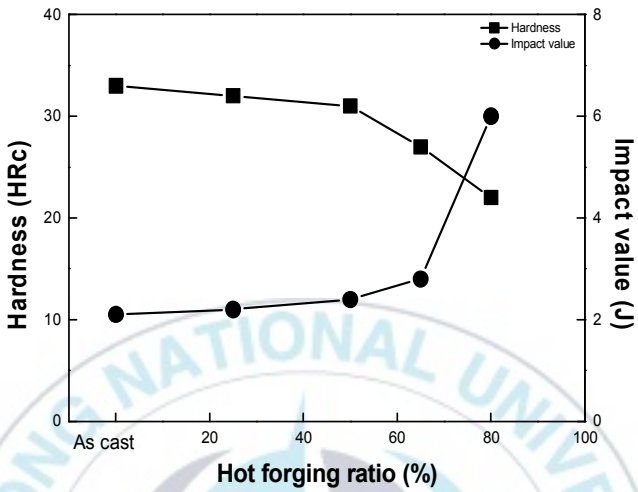


Fig. 3-6 Effect of hot forging ratio on the hardness and impact value in ultra high carbon low alloys steel.

3.3.3. 경도와 충격인성에 미치는 미세조직의 영향

Fig. 7은 단조비를 달리하여 열간단조 한 시료의 경도와 충격인성에 미치는 망상 시멘타이트 두께의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 망상 시멘타이트의 두께가 감소하여도 경도와 충격값은 큰 변화가 없다가 두께가 10㎛ 이하가 되면 빠르게 경도는 낮아지고 충격인성은 증가하는 것을 알 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

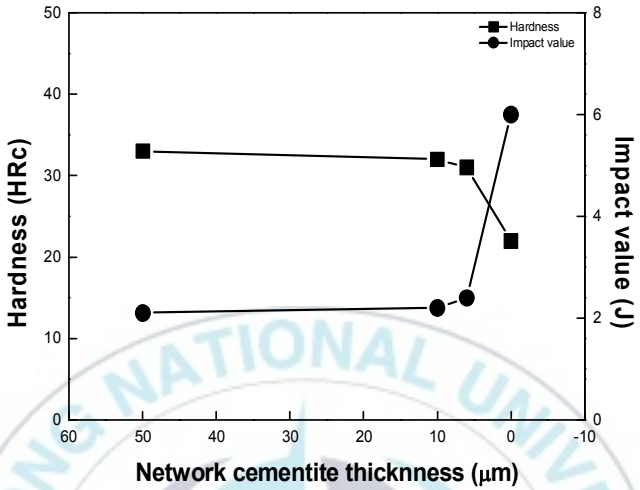


Fig. 3-7 Effect of network proeutectoid cementite thickness on the hardness and impact value in ultra high carbon low alloys steel.

Fig. 8은 경도와 충격인성에 미치는 침상 시멘타이트 두께의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 역시 침상 시멘타이트의 두께가 감소하여도 경도와 충격값은 큰 변화가 없다가 두께가 5㎛ 이하가 되면 빠르게 경도는 낮아지고 충격값은 증가하는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서 경도와 충격값은 초석 시멘타이트의 두께가 감소하여도 큰 변화가 없다가 망상 시멘타이트는 10㎛, 침상 시멘타이트는 5㎛ 이상이 되면 빠르게 경도는 낮아지고, 충격값은 증가하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 이와 같이 초석 및 공석 시멘타이트의 두께가 특정 두께 이하가 되면 경도가 낮아지고 충격값이 증가하는 이유는 초석 시멘타이트의 두께가 감소하는데 기인되는 것 보다는 Fig. 2와 6의 단조비 변화에 따른 미세조직과 경도 및 충격인성 변화의 결과로부터 망상 및 침상의 초석 시멘타이트가 끊어져 입상으로 될 뿐만 아니라 망상과 침상 형태가 없어지는데 더 크게 영향을 받기 때문이라 생각된다[1,12,16].

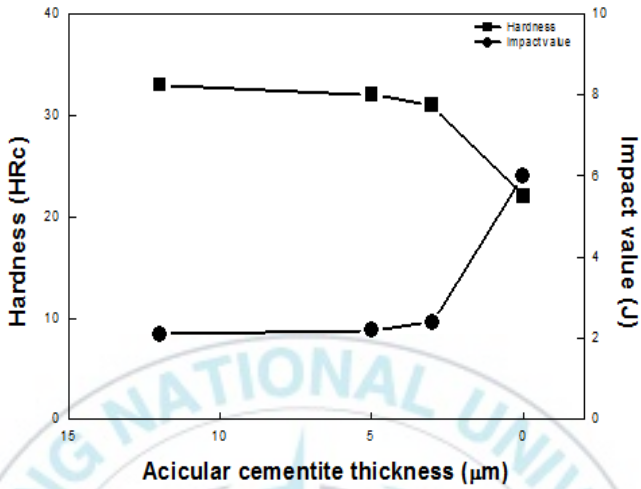


Fig. 3-8 Effect of acicular proeutectoid cementite thickness on the hardness and impact value in ultra high carbon low alloys steel.

Fig. 9는 경도와 충격값에 미치는 공석 시멘타이트 두께의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 공석 시멘타이트의 두께가 감소함에 따라 서서히 경도는 감소하고, 충격인성은 증가하고 있는 경향을 나타내고 있지만 그 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

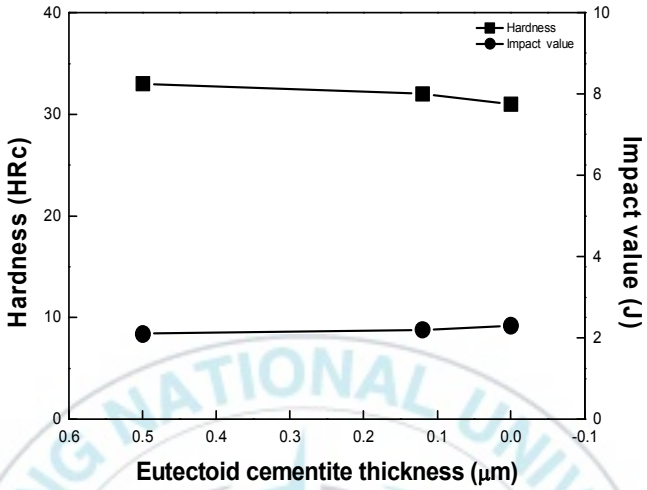


Fig. 3-9 Effect of eutectoid cementite thickness on the hardness and impact value in ultra high carbon steel.

Fig. 10은 경도와 충격인성에 미치는 공석 시멘타이트 층간거리의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 공석 시멘타이트의 층간거리가 감소함에 따라 역시 서서히 경도는 감소하고, 충격인성은 증가하고 있지만 그 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 공석 시멘타이트의 두께와 층간 간격이 작아질수록 경도가 낮아지고 충격인성이 높아지고 있는 경향을 나타내고 있지만 그 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 이 결과로부터 경도와 충격인성은 초석 및 공석 시멘타이트의 두께와 공석 시멘타이트의 층 간거리에 크게 영향을 받지 않고 있다는 것을 알 수 있다.[16)]

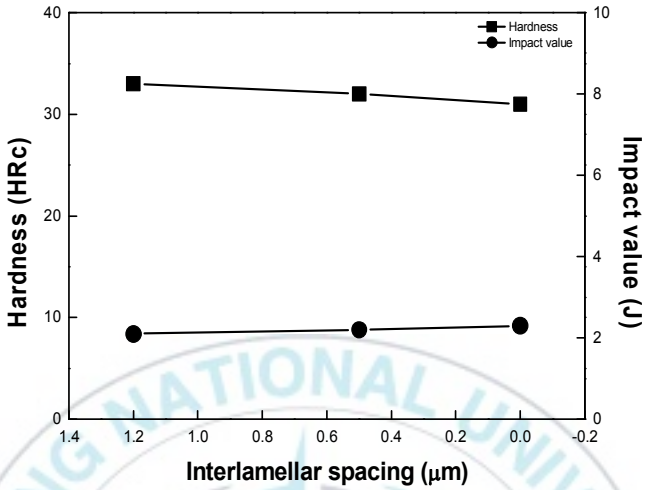


Fig. 3-10 Effect of eutectoid cementite interlamellar spacing on hardness and impact value in ultra high carbon low alloys steel.

3.4. 결론

초고탄소 저합금강의 경도와 충격에 미치는 열간 단조비 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1)단조비가 증가할수록 망상 및 침상 초석 시멘타이트의 두께는 감소하였고, 단조비가 50% 이상이 되면 망상 및 침상형태의 초석 시멘타이트가 끊어져 입상으로 되기 시작하며, 단조비가 80%가 되면 주방상태의 망상과 침상 형태가 없어졌다.

2)단조비가 증가할수록 펄라이트 조직 내 공석 시멘타이트 두께는 감소하다가 깨어져 입상으로 된 다음 구상으로 되고, 시멘타이트의 층 간거리는 감소하였다.

3)단조비가 증가할수록 경도 및 충격값은 큰 변화가 없다가 50% 이상이 되면 초석 및 공석 시멘타이트가 입상으로 될 뿐만 아니라 망상과 침상 형태가 없어지는데 기인되어 빠르게 경도는 감소하고, 충격인성은 증가하였다.

4) 경도 및 충격인성은 초석 및 공석 시멘타이트의 두께가 감소하고 층간거리가 작아지는데 보다 초석 시멘타이트가 입상이 되고, 망상과 침상 형태가 없어지는데 더 크게 영향을 받았다.

제 Ⅳ 장

결론

초고탄소 저합금강에서 단조비를 달리하여 단조 한 다음 미세 조직과 경도, 인장특성 및 충격인성에 미치는 열간 단조비의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단조비가 증가함에 따라 망목 및 침상 구조를 갖는 초석 시멘타이트의 두께가 감소하였다. 단조비가 50 % 이상으로 증가함에 따라 망목 및 침상 구조를 갖는 초석 시멘타이트는 입상 및 구형으로 변하여 80 %에 이르면 사라졌다.
2) 펄라이트 속의 공석 시멘타이트의 두께는 감소하고 파단되어 과립형 및 구형으로 변화하였고, 단차 비가 증가함에 따라 층간 간격이 감소하였다.
3) 인장 강도 및 연신율의 변화는 50 % 이상으로 증가 할 때 급격히 증가 하였지만 단조비가 50 %까지 증가함에 따라 발견되지 않았다.
4) 초석 및 공석 시멘타이트 및 층간 간격의 두께 감소는 인장 특성에 영향을 미치지 않았다. 그러나 망상 및 침상 구조를 갖는 초석 계 시멘타이트는 사라지고 세분화 된 형태로 분열되어 인장 특성이 저하되었다.
5) 단조비가 증가할수록 경도 및 충격값은 큰 변화가 없다가 50% 이상이 되면 초석 및 공석 시멘타이트가 입상으로 될 뿐만 아니라 망상과 침상 형태가 없어지는데 기인되어 빠르게 경도는 감소하고, 충격인성은 증가하였다.

6) 경도 및 충격인성은 초석 및 공석 시멘타이트의 두께가 감소하고 층간거리가 작아지는데 보다 초석 시멘타이트가 입상이 되고, 망상과 침상 형태가 없어지는데 더 크게 영향을 받았다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

제 V 장

참고문헌

참고문헌

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. C.Y. Kang, M. G. Kwoon, C. H. Kim, Korean J. Met. Mater., 50, 3, 212 (2012)
5. B. Wang, X. Song, H.Peng, Meterials and Design, 28,562 (2007)
6. Z. L. Zhang, Y. N. Liu, J. W. Zhu, G. Yu, Mater. Sci. Eng. A, 483, 64 (2008)
7. Y. S. Oh, I. H. Son, K. H. Jung, D, K. Kim, D. L. Lee, Y. T. Im, Mater. Sci. Eng.A, 528, 5833 (2011).
8. G. M. Luo, J. S. Wu, J. F. Fan, H. S. Shi, Y. J. Lin, J. G. Jhang, Materials Characterization, 52, 263 (2004)
9. N. Ozdemir, N. Orhan, 2006," Investigation on the superplasticity behavior of ultrahigh carbon steel", Mater. and Design, 27,pp. 706-709.
10. K. P. Liu, X. I. Dun, J. P. Lai, H. S. Liu, 2011, "Effect of modification on microstructure and properties of ultrahigh carbon steel", Mate. Sci. Eng. A 528, pp. 8263-8268.
11. A. F. Vicente, M. Carisi, F.Penalba, E. Taleff,O.A.Ruano, 2002,"

Toughness dependence on the microstructural parameters for an ultrahigh carbon steel", Mate. Sci. Eng. A 335, pp.175-185.

12. C. K. Syn, D. R. Lesuer, O. D. Sherby, Mater. Sci. Technolo, 2005, 21(3), pp.371-324
13. H. Peng, B. Wang, J. Zhang, X. Song, X. Ma, N. Gu, J. Mater. Sci. Technolo, 2004, 20(5), pp.567-570
14. J. B. Kim, J. H. Kim, C. Y. Kang, J. of Mater. Eng. and Performance, 2016, 25(12) pp.5225-5230
15. J. B. Kim, C. Y. Kang, J. of the Kor. Soc. for Power System Engineering, 2013, 17(6), pp.116-122
16. C. Y. Syn, D. R. Lesuer, O. D. Sherby, Met. Mater., Trans., A, 25(1994), pp.1481
17. S. L. Zhang, X. J. Sun, H. Dong, Mater. Sci. and Eng., A, 432(2006) pp.324-332
18. J. H. Whiteley, J. Iron Steel Inst., 105(1922), pp.339
19. W. Hewit, Heat Treat. Met. (1982-1993), pp.56
20. E. M. Taleff. C. K. Syn, D. R. Lesuer, O. D. Sherby, Met. Mater. Trans. A., 27A(1996), pp.111
21. Yong Lai Tian, R. Wayne Kraft, Merall. Trans. A, 18A(1987), pp.1403
22. H. J. Li, B. Q. Wang, X. y. Song, S. Z. Guo, N. J. Gu, J. of Iron and Steel. Res. International, 13(3), 2006, pp.9-13

23. O. D. Sherby, B. Walser, C. M. Young, Scripta Metall., 9, 1975, pp.569-574

24. B. Q. Wang, H. F. Peng, X. Y. Song, Trans. of Met. and Heat Treat., 25(1), 2004, pp.48-52

연구실적

▩ 논문 발표

1. 1.5% 초 고탄소강의 경도 및 인성에 미치는 열간 단조 가공의 영향
   2013 동력기계공학회 춘계학술대회
   김종백, 김슬기, 김권후, 강창룡
2. 초고탄소 저합금강의 인장 성질에 미치는 열간단조의 영향
   2013 동력기계공학회 추계학술대회
   김종백, 김슬기, 김권후, 강창룡

▩ 논문 게재

1. 초 고탄소 저합금강의 경도 및 인성에 미치는 열간단조의 영향
   동력기계공학회지 17권, 6호(2013.12), pp. 116-122
   김종백, 강창룡
2. Effect of Hot Forging on Microstructural Evolution and Tensile Properties in Ultra -High Carbon Low Alloy Steel
   Jounal of Materials and Engineering and Performance,25,12(2016), p. 5225
   J. B. Kim, J. H. Kim, C. Y. Kang

감사의 글

이 논문을 계획하고 완성되기 까지 세심한 지도와 큰 가르침을 주신 강창룡 교수님께 머리 숙여 감사드립니다.

그리고 바쁘신 중에서도 본 논문의 깊은 내용까지 검토하시고 심사과정에서 많은 격려와 더불어 학문의 깊은 깊이를 일깨워 주신 부경대 금속공학과 김권후 교수님, 왕제필 교수님, 부경대 재료공학과 남기우 교수님, 동의대학교 신소재공학부 배동수 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 석사과정부터 학문의 정도를 가르쳐 주시고 크나큰 용기를 주신 부산대 재료공학과 박익민 교수님 , 박용호 교수님, 정원섭 교수님, 조영래 교수님께도 끝없는 감사를 드림니다.

학위과정동안 항상 곁에서 도와주시고 노심초사 걱정해주신 부경대 금속공학과 석사과정 김도훈님, 김성주님, 손영민님께도 감사의 말씀 전합니다.

그리고 오늘에 이르기 까지 항상 사랑과 자애로써 성원을 해 주신 친지 여러분께 고마움을 전합니다.

긴긴 세월 하루 같이 돌 뿌리에 채이지나 않을까 못난 자식 가는 길에 돌 뿌리를 치워주시며, 자식위해 애쓰시는 아버님께 뜨거운 눈물로 감사드립니다.

오늘 까지 모든 어려움을 참고 견디며, 헌신적으로 내조해온 사랑하는 아내 하순경과 대견한 아들 슬기, 어여쁜 딸 예지와 미안하고 고마운 마

음으로 이 기쁨을 나누고자 합니다.

끝으로 희생만 하시다가 그리움만 남기고 말없이 떠나가신 어머님의 영전에 이 논문을 바칩니다.

2018년 2월

김 종 백 올림