

자동차 자동변속기 기어용 합금강의 열간 단조 성형에 따른 기계적 특성 변화에 관한 연구

김화정*[#], 김용조** , 김현수***
*한국폴리텍대학, **경남대학교, ***용암금속

Effect of Changes in Metal Characteristics of Hot-Forged Alloy Steel on Mechanical Properties of an Automotive Automatic Transmission Gear

Hwa-Jeong Kim*[#], Yohng-Jo Kim** , Hyun-Soo Kim***
*Korea Polytechnics, **Kyungnam University, ***Yongam Metal Co., LTD
(Received 4 April 2016; received in revised form 25 April 2016; accepted 7 June 2016)

ABSTRACT

This study investigated the effect of the changes in metal characteristics due to the hot forging on SCR420HB applied to ensure the optimal production of the hot-forging ratio on the mechanical properties of an automotive automatic transmission gear. The microstructural changes in the forging ratio were investigated by adjusting the forging range into multiple ranges from alloy steel. This was done in order to set the optimum forging range given the manufacturing process conditions during the hot forging of alloy steel parts with a carbon content of more than 0.8% wt. The effects of the content change in the microstructure on the mechanical properties due to the use of the part were examined.

Key Words : SCR40HB, Automatic Transmission(자동변속기), Finisher Type Gear(피니셔형 기어), Hot Forging(열간단조), Forging(단조공정)

1. 서 론

0.18% wt의 탄소(C)^[1]를 가진 합금강은 퍼얼라이트의 조직이 페라이트 조직의 입계를 따라 망상으로 석출되어 있어 전 오스테나이트 조직의 입계에서 페라이트 조직이 퍼얼라이트의 조직 내로 침상으로 석출되어 있거나 또는 퍼얼라이트 조직 내에서

침상으로 석출되어 있기 때문에 기계적 강도가 우수하여 다양한 용도로 적용되고 있다.

또한 최근에 와서 0.18% wt 이상의 탄소를 갖는 과공석강에 가공과 열처리 등을 단독 또는 복합적으로 행하여 망상 및 침상으로 존재하고 있는 초석 시멘타이트 (Proeutectoid cementite)와 퍼얼라이트 조직 내 존재하고 있는 공석 시멘타이트(Eutectoid cementite)를 입상 또는 구상으로 만들어서 강도, 인성 등을 향상시켜 자동차의 구동용부품 소재로 많이 적용되고 있다. 뿐만 아니라, 이러한 합금강에

Corresponding Author: mirrornet@hanmail.net
Tel: +82-55-279-1824, Fax: +82-55-260-1177

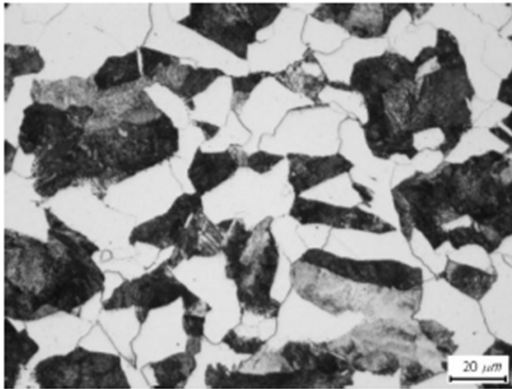


Photo. 1 SCR420HB organizational structure

[Pearlite - Ferrite]

Cr, Ni, W, Mo 등과 같은 합금원소^[2]를 하나 또는 둘 이상 소량 첨가하여 소재 특성을 다양화하여 향상시킴과 동시에 시멘타이트보다 높은 경도를 갖는

합금 탄화물을 생성시킴으로서 내마모성 등을 향상시켜 사용하고 있다. 그러나 합금강에서 탄소 함량의 변화로 표준 함량대비 10% 이상 더 높아지게 된다면 이들 재료가 갖는 미세조직 등에 기인되어 재료가 기계적 강도 특성이 변화하여 소재의 구조적 적용에 문제 요소가 발생할 가능성이 높다. 따라서 이러한 합금강에 대한 연구는 현재까지 많이 수행되어 있기는 하지만 근래에 와서 합금강에 대한 강도와 경도, 인성 등을 향상시켜 자동차용 부품뿐만 아니라 발전분야, 재생에너지 분야 등과 같은 다양한 산업분야의 부품에 활용하고 있다. Photo. 1^[3]은 본 연구에 적용할 SCR420HB 대한 합금강의 조직 구조이다.

본 연구 내역의 합금강에 대한 지금까지의 연구를 살펴보면, 탄소 함량이 0.2% 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. 이러한 합금강의 사용범위를 더욱 더 확대하기 위하여 단조 과정에서의 적정 성형비율을 구성하고

이에 대한 비율적 기계적 특성을 확보하여 다양한 형태의 구조물 형상 대응을 유도하고자 한다.

따라서 본 연구는 이러한 측면을 고려하여 0.2% wt 정도의 탄소 함량을 가진 SCR420HB의 합금 소재를 단조가공비를 달리하여 열간 단조를 행한 다음, 열간 단조가공비율의 변화에 따른 미세조직 변화를 조사하고, 이러한 미세조직 변화가 기계적 성질에 미치는 영향을 함께 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시료

본 연구에 사용된 시료는 먼저 전해철, Fe-Cr 및 금속 Mn 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 위해 균질화 처리를 하기 위하여 1,150°C에서 6시간 유지 후 공냉하는 오스테나이트화 처리(균질화처리)를 한 다음 시료로 사용하였다.

이때 사용된 시료의 화학조성을 Table 1^[1,4]에 나타내었다.

2.2 단조

0.18~0.23%의 탄소를 갖는 합금강에서 이들 강의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 조사하기 위하여 먼저 시료를 1,200°C의 온도로 가열한 다음 일정시간 유지 후 단조작업을 시작하였다. 이때 단조작업은 단조비율을 각각 25%, 50%, 65%, 80%가 되도록 하기 위해 단조가공비를 달리하여 단조작업을 실시하였다. 한편 이러한 강에서 단조작업의 마무리온도는 기계적 성질에 대단히 큰 영향을 미치기 때문에 단조작업의 마

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

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.18	0.15	0.60	0.03	0.03	0.25	0.90	0	0.30
~0.23	~0.35	~0.85	↓	↓	↓	~1.25		↓

주방 온도는 모두 동일하게 A1 변태점보다 높은 950°C가 되도록 하여 단조작업을 하였으며, 단조작업 후에는 공냉 처리를 실시하였다.

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 열간가공재현시험기인 Thermecmaster-Z 을 사용하여 관찰하였다.

한편, 열간 단조 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 여러 차례 측정하였다.

2.4 기계적 특성 측정

주방 상태와 단조 가공비를 달리하여 열간 단조 가공한 시료의 인장강도를 측정하기 위한 인장시험^[5]은 표점거리가 50mm의 크기를 갖는 ASTM-E 8의 규격에 따라 인장시험편을 제작한 다음 cross head speed를 1mm/min로 하여 상온에서 인장 시험하였다. 경도시험은 주방 상태 및 단조가공비를 달리하여 열간 단조 가공한 시료에 대하여 로크웰경도 시험기를 사용하여 1kg의 하중으로 시험하였다. 이때 경도 값은 7회 이상 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 다음 평균하여 구하였다.

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

2.5 SCR420HB 기계적 물성 도출 해석

연구내역의 단조 해석을 위하여 SCR420HB 소재의 유동응력선도 도출 실험을 실시하였고 이에 사용 장비는 열간가공재현시험기인 Thermecmaster-Z 활용하고 실험은 약 1,200°C의 단조온도 및 금형으로의 열전달을 고려하여 800°C, 1,000°C, 1,200°C에

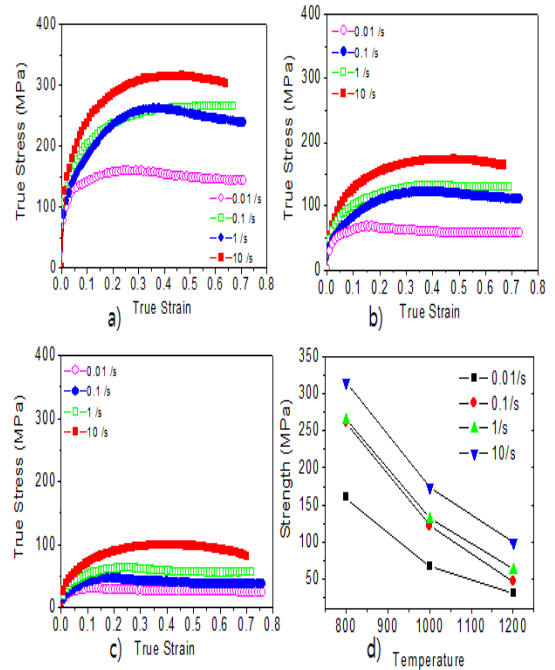


Fig. 1 Flow stress of the leading SCR420HB
a) 800°C , b) 1,000°C, c) 1,200°C, d) yield strength by the temperature and strain rate

서 압축시험 수행하고 변형률 속도는 0.01/s, 0.1/s, 1.0/s, 10.0/s 하에서 유동응력 선도 도출을 위한 실험을 실시하고 결과는 Fig. 1^[6]와 같다.

본 소재는 일반적으로 온도가 증가하거나 변형률 속도가 감소할수록 변형저항이 감소하는 일반적인 탄소강의 유동응력특성을 보이며 변형초기 변형률이 커짐에 따라 결정립 내 전위 증가에 의한 변형경화가 발생하여 변형저항(유동응력)이 증가하며, 이후 증가된 전위밀도로 인해 새로운 결정핵이 생성하고 성장하는 동적 재결정에 의해 변형저항이 감소하고 변형경화는 온도가 낮거나 변형률속도가 클수록 커지고 온도가 증가하거나 변형률 속도가 증가하면 최대응력이 발생하는 변형률이 감소하는 특성을 나타낸다. 또한, 동적 재결정은 온도가 높을수록, 변형률 속도가 낮을수록 빨리 발생하는 특성을 보이고 있음이 조사되었다.

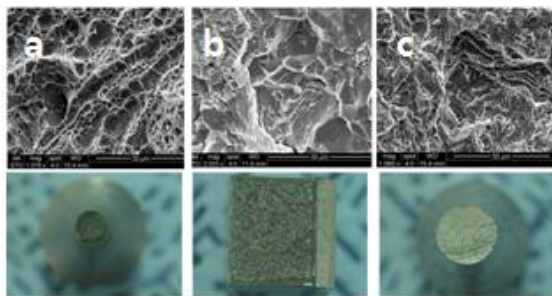
2.6 기계적 특성 실험 결과

기계적 특성 실험 결과는 인장시험과 충격시험, 피로시험을 실시하였고 그 결과를 Photo. 2^[7]에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Photo. 3는 실험에 사용된 0.18~0.23%의 탄소는 소재의 경화능을 향상시킬 뿐만 아니라 탄화물을 강력하게 형성하는 합금원소인 Cr과 Cu 등을 소량 갖는 합금강의 주방 상태의 조직을 광학현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 이 사진에서 알 수 있는 바와 같이 0.20% 범위의 탄소를 갖는 합금강의 주방 상태 조직은 퍼얼라이트의 기지조직에 사진에서 흰색으로 나타나 있는 초석 시멘타이트가 오스테나이트의 입계를 따라서 석출되어 망상형태로 존재하고 있을 뿐만 아니라, 오스테나이트의 입계에서 퍼얼라이트 조직 내로, 또는 퍼얼라이트 조직 내에서 침상형상으로 석출되어 존재하고 있는 것을 알 수 있다. Photo. 4는 Photo. 3에서 광학현미경으로 나타낸 시료의 주방 상태 조직을 보다 상세하게 관찰하기 위하여 주사 전자현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 광학현미경 사진에서와 동일하게 주사전자



Material	Yield point (N/mm ²)	The tensile strength(N/mm ²)	Elongation (%)	Brinell Hardness(HB)
SCR420HB	-	862	15	287

Photo. 2 SCR420HB mechanical properties test results a) tensile Test, b) Impact test, c) Fatigue test

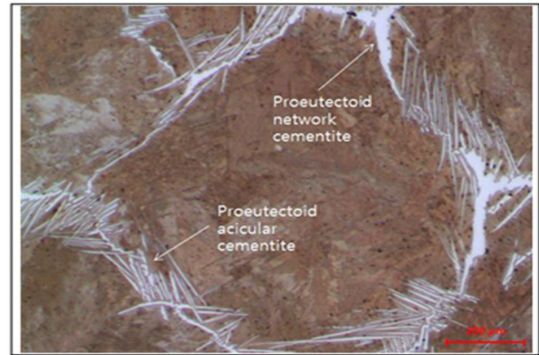


Photo. 3 Optical-micrograph of SCR420HB steel at as-cast

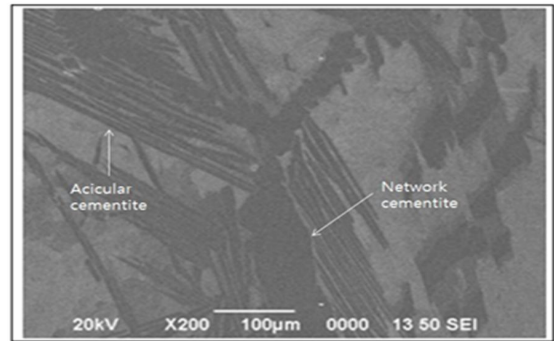


Photo. 4 SEM micrograph of SCR420HB steel at as-cast

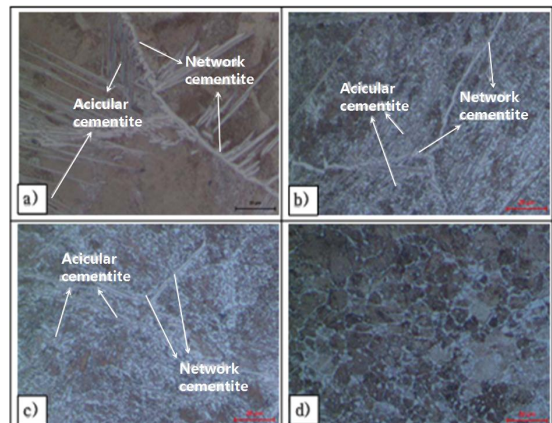


Photo. 5 Optical-micrographs showing the effect of hot forging ratio on microstructure change in SCR420HB a)25%, b)50%, c)65%, d)80%

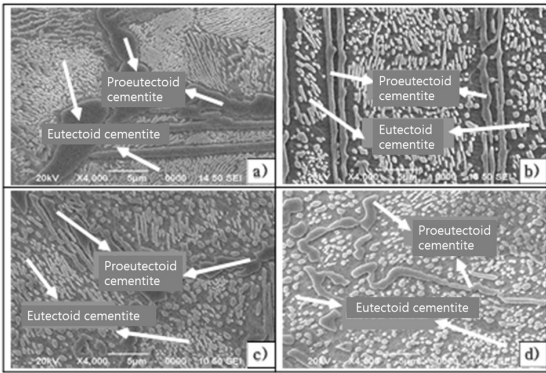


Photo. 6 SEM micrographs showing the effect of hot forging ratio on microstructure change in SCR420HB a)25%, b)50%, c)65%, d)80%

현미경 사진에서는 검은색으로 나타나 있는 초석 시멘타이트가 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 5는 합금강의 미세조직에 미치는 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 시료를 1200℃에서 950℃ 사이의 온도에서 각각 단조비가 25%, 50%, 65%, 80%가 되게 단조 가공비를 달리하여 열간 단조한 다음 공냉한 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 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 단조 가공비가 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 사

진 b)에서 알 수 있는 바와 같이 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 6은 합금강의 미세조직에 미치는 단조비의 영향을 보다 상세히 조사하기 위하여 Photo 4에서 나타낸 시료의 미세조직을 주사전자현미경으로 나타낸 것이다.

광학현미경 조직에서 설명된 바와 같이 25% 단조 가공한 시료는 단조 가공비가 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 있다. 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 μ 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. 7^[8]은 기지 조직인 퍼얼라이트 조직에 미치

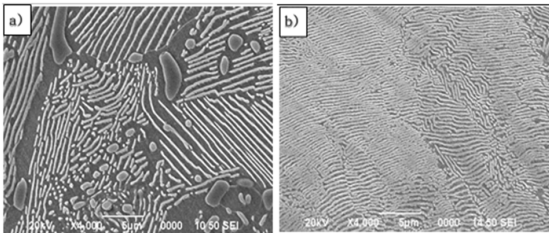


Photo. 7 SEM micrographs showing the effect of hot forging ratio on size of pearlite in SCR420HB a) as cast, b) 25% forging

는 단조비의 영향을 알아보기 위하여 단조비가 25%가 되도록 열간 단조한 시료에서의 퍼얼라이트 조직을 주사전자현미경으로 관찰하여 주방 상태의 조직과 비교하여 나타낸 것이다.

단조비가 25%가 되게 열간 단조한 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 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 단조 가공비의 영향

Fig. 2는 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 가공비까지 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 μ m에서 91 μ m 사이의 크기를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 25% 단조가공하면 망상형상으로 존재하고 있던 시멘타이트의 두께는 약 7 μ m에서 13 μ m 사이의 크기로 얇아지고 있고, 단조 가공비가 더욱 증가하여 50%가 되게 가공하면 약 3 μ m에서 9 μ m 사이의 크기로 얇아지고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 단조 가공비가 증가하면 전 오스테나이트 입계를 따라서 망상형상으로 석출되어 존재하고 있

던 초석 시멘타이트의 두께가 얇아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 주방 상태에서 전 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트의 조직 내로 그리고 퍼얼라이트의 조직 내에서 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 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 μ m에서 20 μ m 사이의 크기를 나타내었다. 그러나 25% 열간 단조 가공하면 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 두께는 약 3 μ m에서 5 μ m 사이로 작아지고 있고, 단조 가공비가 더욱 증가하여 50%가 되면 두께는 약 1 μ m에서 3 μ m 사이의 크기로 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 열간 단조 가공비가 증가하면 오스테나이트 입계에서 퍼얼라이트 내 및 퍼얼라이트 내에서 침상형상으로 존재하고 있던 초석 시멘타이트의 두께도 얇아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 주방 상태에서 퍼얼라이트 조직 내에 존재하고 있는 공석 시멘타이트의 두께에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 주방 상태의 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 μ m에서 0.8 μ m 사이의 크기를 나타내었다. 그러나 25% 열간 단조 가공하면 퍼얼라이트 조직 내 존재하고 있던 공석 시멘타이트의 두께는 약 0.06 μ m에서 0.18 μ m 사이의 크기로 얇아지고 있는 것을 알 수 있다. 역시 이 결과로부터 열간 단조 가공비가 증가하면 퍼얼라이트

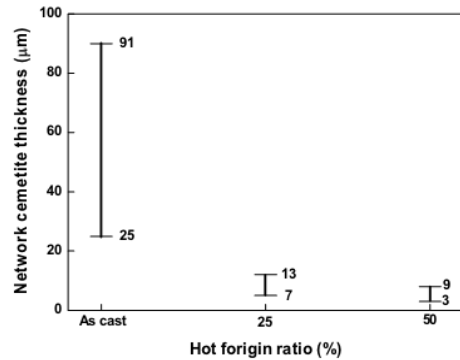


Fig. 2 Effect of hot forging ratio on proeutectoid network cementite thickness of SCR420HB

조직 내에 존재하고 있던 공석 시멘타이트의 두께도 얇아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 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 층 간격을 조사하지 않았음).

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주방 상태에서 존재하던 공석 시멘타이트의 층 간격은 약 0.45 μ m에서 2 μ m 사이의 크기를 나타내고 있는데 비하여,

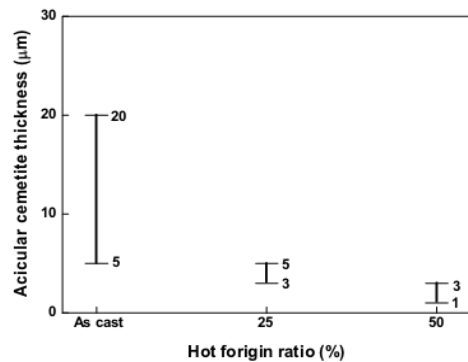


Fig. 3 Effect of hot forging ratio on proeutectoid acicular cementite thickness of SCR420HB

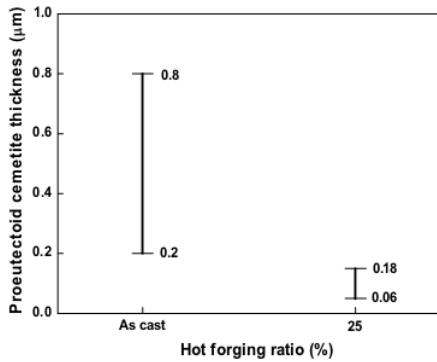


Fig. 4 Effect of hot forging ratio on proeutectoid cementite in SCR420HB

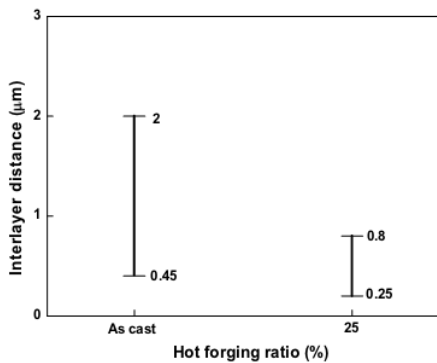


Fig. 5 Effect of hot forging ratio on interlayer distance of pearlite in SCR420HB

25% 단조 가공한 시료에서는 약 0.25 μm 에서 0.8 μm 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.

3.3 단조 가공비가 기계적 특성에 미치는 영향

Fig. 6은 열간 단조 가공비 변화에 따른 합금강의 경도 변화를 알아보기 위하여 열간 단조 가공비

를 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. 또한 초석 시멘타이트^[9]가 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. 7은 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 소성구속⁹⁾이 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 증가한다고 판단된다. 그러나 단조 가공비가 50% 이상이 되면 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 망상 및 침상의 형태로 존재¹⁰⁾하고 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. 8은 충격인성에 미치는 열간 단조 가공비의 영향을 알아보기 위하여 시료를 여러 가공비로 달리하여 열간 단조 가공한 다음 충격인성을 조사하여 나타낸 것이다. 충격값은 Fig. 7에서 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 시멘타

이트의 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 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 충격인성¹⁰⁾에 크게 영향을 미치게 된다는 것을 알 수 있다. 즉 이러한 거동에 의해 경도는 크게 낮아지고, 강도와 연신율, 충격인성은 크게 증가하는 것으로 판단된다.

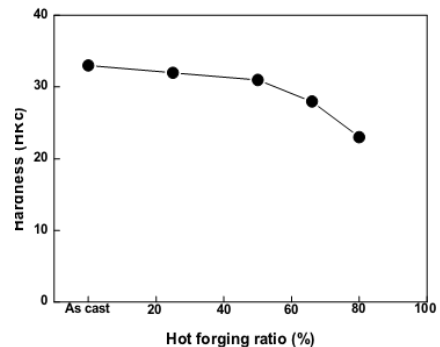


Fig. 6 Effect of hot forging ratio on the hardness in SCR420HB

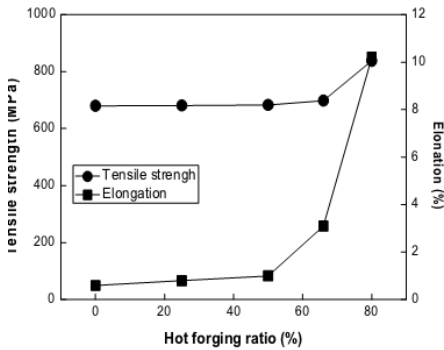


Fig. 7 Effect of hot forging ratio on the tensile properties in SCR420HB

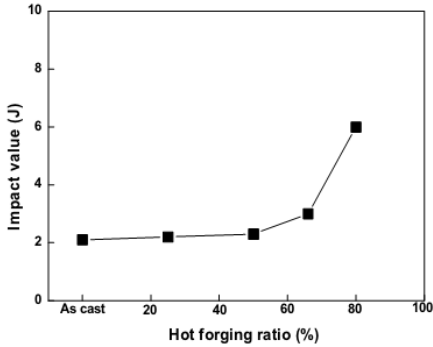


Fig. 8 Effect of hot forging ratio on the finisher gear in SCR420HB

3.4 단조비를 결정에 따른 피니셔형 기어 형상 단조 해석

기 언급된 단조비율에 대한 조사 분석 결과를 바탕으로 벌크의 단조비율을 50% 이하로 설정하고 photo. 8과 같은 제품의 단조 해석을 시행하고 그 결과를 photo. 9에 도시 하였다.

본 단조 해석에 있어 해석 Tool은 Deform을 사용하였고 조건을 Table 2와 같이 시행하였다.

본 단조 해석은 최소의 성형하중 조건하에서 벌크 형태의 소재를 최적의 가공비율로 제조하기 위한 공정조건을 도출하기 위하여 단조해석을 수행하였고 또한 마무리 단조 공정에서 소재의 변형양상, 주응력분포 등을 확인하고 단조공정시 발생할 수 있는 연성과괴 등 단조결함의 발생유무를 예측 및 확인하고자 시행하였다. 이때 적용금형 소재는 열

Table 2 Finisher type gear forging analysis conditions

Division	Upset	Blocker	Finisher	
Speed punch(mm/s)	100	100	100	
Element type	tetrahedron			
Heat transfer coefficient (Interfacial)	11	11	11	
Forging temperature	Material(°C)	1150	901~1165	839~1187
	Mold(°C)	500	500	500
	Atmosphere(°C)	25	25	25
Coefficient of friction	0.3	0.3	0.3	

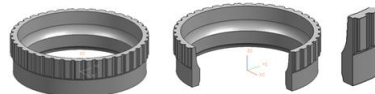


Photo. 8 Finisher type gear

간 단조용 소재인 AISI H13(SKD 61) 소재를 사용하였고 열간 단조 중 금형의 열팽창량, 열전도 계수, 비열등 물성을 고려하여 열간 단조해석을 수행하였다. 이때 열간 단조 특성상 마찰상수는 0.5, 열전달 계수는 11을 사용하였다.

단조해석 결과 Photo. 10에서 보는바와 같이 적정 단조비율(벌크대비 50% 이하)를 적용한 결과 전형적인 탄소강의 페라이트와 펄라이트 조직의 복합상으로 구성되어 있음을 볼 수 있으며 그림에서 알 수 있듯이 9μm에서 12μm 사이의 결정립이 가장 많은 것을 확인 할 수 있으며 평균 결정립 크기가 약 8.1μm로 안정화 상태를 보이고 있다. 또한 각 노드별 미소 경도는 약 163 ~ 183 Hv 사이의 값을 나타내고 있으며, 전반적으로 거의 일정한 경향을 보이고 있는데 이는 단조에 의한 결정립 크기 및 결정립 분포가 거의 일정하기 때문이다.

따라서 본 연구에서 다양한 단조 비율에 대한 검토 결과 SCR420HB의 열간 단조 비율 범위는 50% 이하일 때 가장 적절한 단조 공정 조건으로 확인할 수 있다.

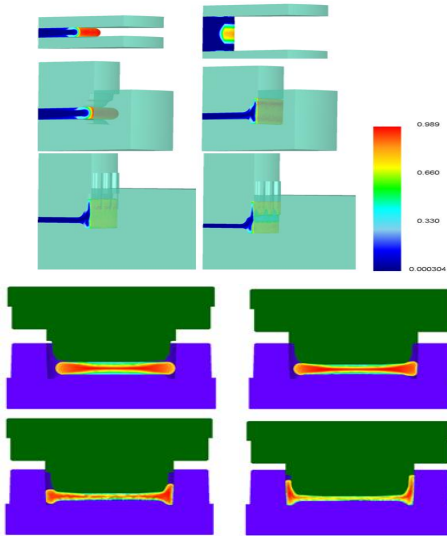


Photo. 9 Finisher type gear forging analysis

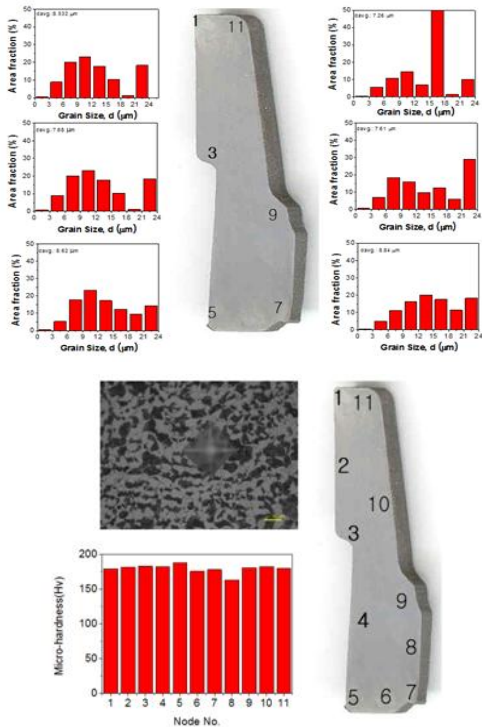


Photo. 10 The grain distribution stabilization when applying the forging ratio less than 50%

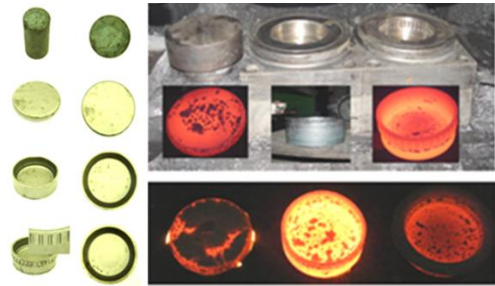


Photo. 11 Finisher type gear forging process

4. 결론

합금강의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 열간 단조비의 영향을 알아보기 위하여 0.18~0.23% C를 갖는 합금강에서 단조비율을 다양한 조건으로 달리 하여 열간 단조 가공한 후 단조비율에 따른 미세조직 변화를 조사하였고 아울러 이러한 미세조직 변화가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 0.18~0.23% C를 갖는 합금강의 주방 상태 조직은 퍼얼라이트 기지조직에 초석 시멘타이트가 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. 경도, 인장강도, 연신율 및 충격인성은 단조비율이 50%까지는 큰 변화가 없지만, 단조비가 50% 이상이 되면 초석 및 공석 시멘타이트가 입상 및 구상으로 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.

REFERENCES

1. Zhang, S. L., Sun, X. J., and Dong, H., "Effect of deformation on the evolution of spheroidization for the ultra high carbon steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 432, No. 1, pp. 324-332, 2006.
2. Sunada, H., Wadsworth, J., Lim, J., and Sherby, O. D., "Mechanical properties and microstructure of heat-treated ultrahigh carbon steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 38, pp. 35-40, 1979.
3. Sherby, O. D., Oyama, T., Kum, D. W., Walser, B., and Wadsworth, J., "Ultrahigh Carbon Steels", *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 37, pp. 50, 1985.
4. Dudra, S. P. and Im, Y. T., "Investigation of metal flow in open-die forging with different die and billet geometries" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 21, pp. 143-154, 1990.
5. Dudra, S. P., Im, Y. T., "Analysis of void closure in open-die forging", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 30, No. 1, pp. 65-75, 1990.
6. Kiefer, B. V. and Shah, K. N., "Three dimensional simulation of open-die press forging" *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 112, pp. 477-485, 1990.
7. Erman, E., Medei, N. M., Roesch, A. R., and Shah, D. C., "Physical modeling of blocking processes in open-die press forging", *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 19, pp. 165-194, 1989.
8. Erman, E., Medei, N. M., Roesch, A. R. and Shah, D. C., "Physical modeling of blocking processes in open—die press forging", *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 19, pp. 165-194, 1989.
9. Cho, J. R., Bae, W. B., Kim, Y. H., Choi, S. S. and Kim, D. K., "Analysis of the cogging process for heavy ingots by finite element method and physical modelling method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 161, pp. 80-81, 1998.
10. Wadsworth, J. and Sherby O. D., "Influence of chromium on superplasticity in ultra-high carbon steels" *Journal of Materials Science*, Vol. 13, pp. 2645-2649, 1978.