

## 냉각제어된 Fe-Si-Mn-P 고장력 강판의 미세조직 및 기계적성질

文元振, 金眞水, 姜國龍\*, 金憲珠\*, 成章鉉\*\*, 金基敦\*\*\*

名古屋大學 工學部

\*釜慶大學校 工科大學

\*\*東亞大學校 工科大學

\*\*\*浦項綜合製鐵(株) 技術研究所

### Microstructure and Mechanical Properties of Fe-Si-Mn-P High Strength Steel Sheet Controlled by Cooling Rate

Won-Jin Moon, Ik-Su Kim, Chang-Yong Kang, Jang-Hyun Sung  
and Ki-Don Kim

Dep. of Mater. Science and Engineering, Nagoya University

Dep. of Matal. Engineering, Pukyong National University

Dep. of Matal. Engineering, Dong-A University

Technical Research Laboratories, POSCO

### ABSTRACT

Microstructure and mechanical properties of Fe-Si-Mn-P high strength steel sheet have been investigated by controlling the cooling rate. Bainite and ferrite were obtained by annealing in the ferrite plus austenite region, and ferrite and austenite were obtained after annealing in the fully austenite region. Ferrite and pearlite were obtained when the cooling rate was controlled from the annealing temperature above 760°C and bainite showed with increasing cooling rate, however below 760°C ferrite and bainite were obtained. Tensile strengths and hardness nearly unchanged with increasing cooling rate after control the cooling rate from the temperature above 760°C, while tensile strengths increased and elongation decreased with increasing cooling rate when the cooling rate was controlled from the temperature below 760°C. Without regard to annealing temperature, tensile strength increased and elongation decreased with increasing cooling rate. Tensile strengths and elongation values heat treated in the ferrite plus austenite region were higher than those in the fully austenite region. Retained austenite and strength-elongation balance showed the maximum value at 780°C and decreased with increasing annealing temperature. Strength-elongation balance value was controlled by the retained austenite.

## 1. 서 론

최근의 자동차 개발 추세는 자동차의 차체와 부품에 경량 및 고강도 재료를 적용함으로써 중량을 감소할 뿐만 아니라 성능향상을 도모하고 이를 바탕으로 한 연비향상을 이루어 배기가스 감소 및 연료 절감의 효과를 거두어 환경 및 에너지 문제를 극복하기 위한 목적에서 자동차 경량화를 위한 많은 연구와 개발이 진행되고 있다.

자동차 경량화를 위한 연구 및 개발은 자동차의 배기가스량이 자동차 중량과 밀접한 관계가 있고, 또한 자동차 중량은 연비와 직결되기 때문에 배기가스 감소 및 연료절감측면에서는 대단히 큰 중요성을 지니고 있다. 이와같이 자동차의 배기가스감소 및 연비 개선을 도모하기 위한 경량화방법으로는 FRP, 알루미늄, 티타늄합금등과 같은 저밀도 소재의 사용과 고강도 강판등을 사용함으로써 얻을 수 있는 자동차용 강판의 두께감소에 의한 차체 경량화가 효과적인 것으로 알려지고<sup>1)</sup> 있으며, 이중 고강도 강판의 적용에 의한 차체 경량화효과는 저밀도 소재에 비해 제한적이나 재활용성(recyclability), 생산성(productivity), 가격(cost) 등의 측면에서 가장 유리하기 때문에<sup>2)</sup> 자동차 관련업계 및 철강업계를 중심으로 자동차용 고강도강판을 개발하기 위하여 부단한 노력을 경주하고 있다.

일반적으로 자동차 차체등에 고강도 강판을 사용함으로써 경량화를 도모할 수 있는 고장력강판으로는 제어압연기술의 발달과 더불어 개발된 2상조직강, 소부경화형 강판 및 TRIP형 고장력강판등이 있고, 이들강의 대부분은 차체부품으로 제조하는 공정중 press성형을 받기 때문에 높은 강도 뿐만 아니라 우수한 성형성도 절실히 요구된다. 이러한 고장력강판중 TRIP형 고장력강판은 마무리 열간압연온도, 코일링온도 및 압연후 냉각속도등을 잘 조절함으로써 재료내 적당량의 오스테나이트를 잔류시킬 수 있고, 이때 잔류하는 오스테나이트는 다음 가공공정인 press성형가공에 의해 마르텐사이트로 변태하는 소위

가공유기변태(TRIP거동)를 나타내게 된다. 따라서 TRIP형 고장력강판은 이러한 TRIP거동에 기인되는 높은 강도와 우수한 연신율을 나타내기 때문에 강도-연성 밸런스가 우수<sup>3)</sup>할 뿐만 아니라, 변형이 증가함에 따라 가공경화지수가 증가하는 특이한 가공경화 거동때문에 우수한 성형성도 얻을 수 있다. 또한 이 강은 roll켄칭 기술로 제조할 수 있는 가능성 때문에 최근 많은 연구의 대상<sup>4-17)</sup>이 되고 있을 뿐만 아니라 이를 자동차의 범퍼 및 도어 보강재등과 같은 차체에 적용하기 위한 연구도 진행되고 있다.

TRIP강은 제강-슬리브-roll켄칭-박판-coiling의 공정을 통하여 제조되고 있다. 이 공정중 roll켄칭의 공정에서 오스테나이트를 적당량 잔류시켜야 하기 때문에 roll켄칭공정에서 마무리 압연 온도와 코일링온도 및 압연 후의 냉각속도등은 잔류오스테나이트의 생성 거동에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 마무리 압연온도와 압연후의 냉각속도를 결정하는 것은 무엇보다도 중요하다. 그러나 현재까지의 TRIP강에 대한 연구는 주로 잔류오스테나이트를 얻기 위한 열처리 조건 및 합금원소의 영향<sup>4-6)</sup>, TRIP 거동 및 TRIP효과<sup>12)</sup>와 잔류오스테나이트의 안정도<sup>13,14)</sup> 및 TRIP강의 인장성질에 미치는 초기조직의 영향<sup>15)</sup>등에 관하여 수행되어 왔지만, 실용화를 위한 제어압연기술에 관련되는 기초자료를 얻기위한 연구<sup>6)</sup>는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 환경 및 에너지 문제를 극복하기 위하여 자동차 차체등에 사용되는 강판의 고강도화를 도모함으로써 경량화를 달성하기 위하여 높은 강도와 우수한 연신율을 갖는 TRIP형 고강도강판의 제조에 관련되는 기초자료를 얻기 위한 목적에서 Fe-Si-Mn-P강을 사용하여 제어압연 열사이클과 유사한 열처리 및 냉각제어를 실시하고, 열처리 및 냉각제어에 따른 미세조직 및 인장성질변화등을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시료제작

고주파 진공 유도 용해로에서 Table 1과 같은 조성을 갖는 시료를 얻은 후 1200℃에서 균질화 처리한 다음 열간 압연하여 약 3mm 두께의 판재를 얻었고, 이를 다시 산세 및 냉간압연 과정을 거쳐 최종 두께 1.2mm의 판재를 만들어 시험편으로 사용하였다.

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

C	Mn	Si	P	Fe
0.237	1.98	1.45	0.098	bal

## 2.2 열처리

시편의 열처리는 시료를 920℃에서 20분간 노르말라이징 처리한 다음 변태점을 측정하기 위하여 변태에 수반되는 길이변화를 측정하는 열팽창시험에 의해 측정된 가열 및 냉각시의 A<sub>1</sub> 및 A<sub>3</sub> 변태점을 참고로 하여 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상 영역의 온도와 오스테나이트 단상영역의 온도인 760℃에서 950℃사이의 여러 온도로 재가열하여 유지한 후 10~100℃/min의 속도로 냉각하였다. 또한, 열처리 및 냉각제어에 따른 시료의 미세조직 변화를 조사하기 위하여 시료를 A<sub>1</sub> 변태점 부근인 760℃의 온도를 기준으로 하여 그 이상 및 이하의 온도영역에서 냉각속도를 달리하는 냉각속도제어 열처리를 하였다.

## 2.3 인장 및 경도시험

냉간가공이 끝난 시료를 KS B 0802의 규정을 따라 비례시험편을 제작하여 열처리한 후 인장시험기(model: Shimadzu DSC-25T)에서 cross head speed를 1mm/min로 정한 다음, 어닐링온도변화 및 냉각속도변화등에 따른 인장성질을 조사하였다. 한편, 어닐링온도 변화 및 냉각속도제어에 따른 경도값의 조사는 열처리가 완료된 시험편에 대하여 미소경도 시험기를 사용하여 500g의 하중에서 측정하였다.

## 2.4 조직관찰

열처리가 완료된 시료는 페라이트 또는 베이나이트의 기지조직에 펄라이트, 마르텐사이트 및 잔류오스테나이트등이 존재하는 다상혼합조직(multiphase structure)으로 이루어져 있기 때문에 이들의 조직을 각각 구분하기 위하여 2% Nital과 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 기본으로 한 착색 부식액을 사용하여 부식한 후 광학현미경에 의해 조사하였다.

## 2.5 잔류오스테나이트 측정

어닐링온도 및 냉각속도변화에 따른 잔류오스테나이트의 측정은 X선 회절시험기에서 Co K $\alpha$ 선을 이용하여 35kV와 17.5mA의 조건으로 회절시험한 후 얻은 회절선의 적분강도를 측정한 후 이를 비교하여 구하였다.<sup>19)</sup>

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 미세조직관찰

열간압연조건을 변화시킴으로서 강재의 기계적성질을 제어할 수 있음이 밝혀진 이래 열간압연조건과 기계적성질에 관한 많은 연구가 수행되어진 결과, 열간압연을 A<sub>3</sub> 변태점 이상의 온도에서 마무리하면 기계적성질을 향상시키는데 유효하고, 열간압연 마무리온도가 A<sub>3</sub> 변태점 이하가 되면 미세조직 및 집합조직의 불균일 때문에 강재의 가공성이 급격히 저하된다고 보고되고 있다<sup>20, 21)</sup>. 그러나 TRIP강은 열간압연의 공정에서 재료내에 오스테나이트를 잔류시켜야 하기 때문에 열간압연 마무리 온도는 A<sub>3</sub> 변태점 이하 2상영역이 바람직한 것으로 예상된다. 따라서 본 실험에서는 열간압연 마무리 온도에 관한 자료를 얻기 위하여 시료를 페라이트와 오스테나이트가 존재하는 2상영역과 오스테나이트 단상영역에서 어닐링한 후 냉각하여 어닐링온도 변화에 따른 미세조직변화를 조사하였다.

Photo. 1은 어닐링온도 변화가 미세조직변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 시료를 2상영역 온도 구간인 760℃와 850℃ 및 오스테나이트 단상영역

온도인 950℃에서 유지 후 50℃/min의 속도로 냉각하였을 때 얻은 조직을 광학현미경에 의해 나타낸 것이다. 어닐링 온도가 2상영역인 760℃와 850℃의 경우에는 사진 a)와 b)에서 알 수 있는 바와 같이 두시료가 비슷하게 베이나이트와 페라이트의 기지조직에 소량의 펄라이트가 존재하고 있는 조직으로 현미경 조직상상 뚜렷한 차이점은 없지만, 유지온도가 낮은 760℃의 경우가 850℃ 보다도 페라이트조직이 약간 많은 경향을 나타내고 있다. 이에 반하여 유지온도가 오스테나이트단상 영역인 950℃의 경우인 사진 c)에서는 페라이트와 펄라이트의 기지조직에 소량의 베이나이트와 잔류오스테나이트가 존재하고 있는 조직을 나타내고 있다. 이와같이 어닐링 온도가 2상영역인 경우 기지조직이 베이나이트 조직이 되는 이유는 오스테나이트 단상영역에서의 어닐링에 비하여 2상영역에서 어닐링하게 되면 오스테나이트의 안정도가 높아지기 때문에 오스테나이트의 변태속도가 지연되는데 기인되어 베이나이트로의 변태가 용이해지기 때문이다. 다시말하여 이상영역에서 어닐링하는 경우는 페라이트 안정화 원소인 Si가 탄소의 활동도를 높이기 때문에 탄소가 오스테나이트로 이동하게 되어 오스테나이트내 탄소농도가 증가하는데 기인

되어 오스테나이트의 안정도가 높아지게 된다<sup>12)</sup>. 따라서 오스테나이트는 펄라이트와 페라이트로의 변태가 지연되고 베이나이트로의 변태가 용이해지기 때문<sup>20)</sup>에 기지조직이 베이나이트가 된다.

Photo. 2는 열간압연공정에서 roll퀵칭에 의한 온도제어에 관한 자료를 얻기위한 목적에서, 시료를 A, 변태점 부근 온도인 760℃를 기준으로 하여 그 이상의 온도영역에서는 10~50℃/min사이의 여러 속도로 냉각하고 760℃ 이하의 온도에서는 30℃/min의 속도로 냉각하였을 때 얻은 조직변화 나타난 광학현미경 사진이다. 10℃/min의 속도로 냉각하였을 때 얻은 사진 a)에서는 주로 페라이트와 펄라이트 기지조직에 베이나이트 조직이 부분적으로 펄라이트 조직의 사이에서 소량 존재하고 있는데 반하여, 30℃ 및 50℃/min의 속도로 냉각한 사진 b)와 c)에서는 페라이트와 펄라이트의 기지조직에 베이나이트조직과 잔류오스테나이트가 존재하고 있는 조직을 나타내고 있다. 또한 냉각속도가 증가할수록 냉각시 변태생성되는 베이나이트 조직과 잔류오스테나이트의 양이 증가하고 있으며, 결정립크기도 미세해지고 있음을 알 수 있다. 이와같이 냉각속도가 증가함에 따라 베이나이트조직의 양이 많아지는 이유는 냉각속도가 빨라지

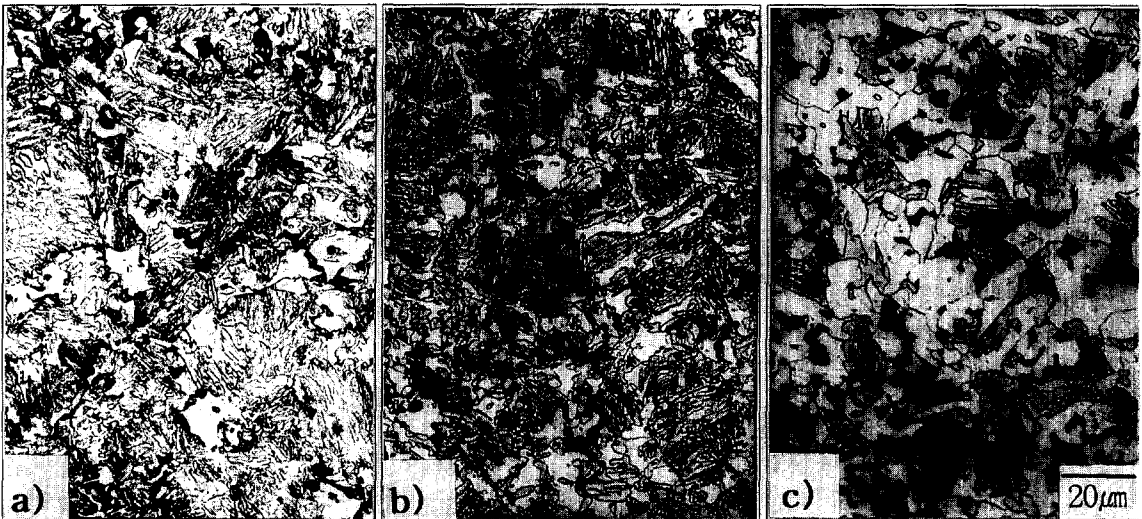


Photo. 1 Optical micrographs obtained after cooling by rate of 50℃/min from various annealing temperature.

a) 760℃

b) 850℃

c) 950℃



Photo. 2 Optical micrographs obtained by changing the cooling rate between 950°C and 760°C followed by fixed cooling rate of 30°C/min.

a) 10°C/min

b) 30°C/min

c) 50°C/min

면 상대적으로 오스테나이트의 안정도가 낮아지기 때문에 오스테나이트 상태로 유지될 수 있는 기회가 적어 베이나이트로의 변태가 쉬워지기<sup>21)</sup> 때문이고, 냉각속도가 증가함에 따라 베이나이트 조직의 결정립크기가 작아지는 이유는 냉각속도가 증가할수록 과냉도가 증가하기 때문에 베이나이트의 핵생성 속도가 증가하여 많은 핵이 생성되기 때문이라고 생각된다.

Photo. 3은 시료를 760°C까지는 30°C/min의 속도로 냉각하고 760°C/min 이하의 온도영역에서는 냉각속도를 달리하여 여러속도로 냉각하였을 때 얻은 조직변화를 광학현미경에 의해 나타낸 것이다. 시료를 10°C/min의 속도로 냉각하였을 때 얻은 사진 a)에서는 주로 페라이트와 펄라이트의 조직으로 이루어져 있는데 반하여, 냉각속도가 30°C/min의 경우인 사진 b)에서는 페라이트와 펄라이트의 조직에 베이나이트 조직과 미량의 잔류오스테나이트가 존재하고 있고, 50°C/min의 냉각속도에서는 페라이트와 베이나이트 조직에 펄라이트와 잔류오스테나이트가 미량 존재하고 있으며, 냉각속도가 증가할수록 펄라이트 조직의 양은 감소하고 베이나이트 조직의 양은 증가

하고 있음을 알 수 있다. 이와같이 냉각속도가 증가할수록 베이나이트 조직의 양이 증가하는 이유는 냉각속도가 빨라질수록 760°C 이상의 온도에서 미변태되어진 오스테나이트가 서냉조건에서 일어나는 확산변태에 의해 생성되는 펄라이트 조직과 페라이트 조직으로의 변태는 어려워지고, 급냉조건에서 일어나는 전단변태특성과 서냉조건에서 일어나는 확산변태특성을 동시에 갖는 베이나이트 조직으로의 변태가 용이해지기<sup>22)</sup> 때문이다.

TRIP형 고장력강판은 마무리 열간압연 온도변화와 열간압연 후 냉각속도에 따라 재료내 존재하는 잔류오스테나이트의 양이 달라져서 강도-연성 발란스 값도 달라지기 때문에 마무리 열간압연 온도와 열간압연 후 냉각속도의 정확한 설정이 보다 중요하다. 따라서 열간압연 공정에서의 마무리 열간압연 온도와 열간압연 후 냉각방법에 대한 기초자료를 얻기 위한 실험을 하였다. Photo. 4는 시료를 오스테나이트 단상 영역인 950°C에서 유지한 후 여러가지의 냉각속도로 냉각하였을 때 얻은 광학현미경 조직을 나타낸 것이다. 냉각속도가 10°C/min인 사진 a)에서는 기

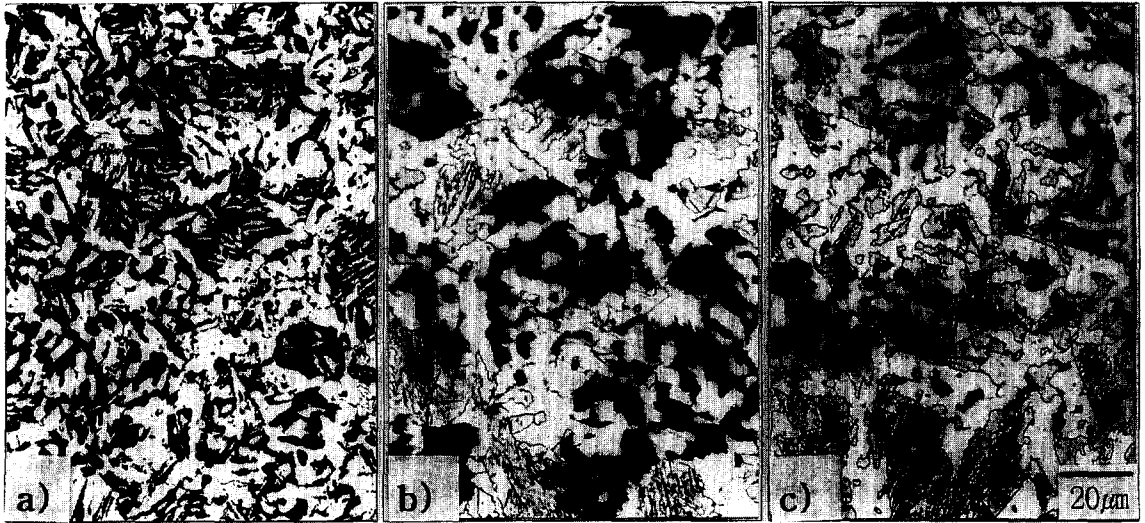


Photo. 3. Optical micrographs obtained by changing cooling rate below 760°C after cooling with fixed rate of 30°C/min between 950°C and 760°C.

a) 10°C/min      b) 30°C/min      c) 50°C/min

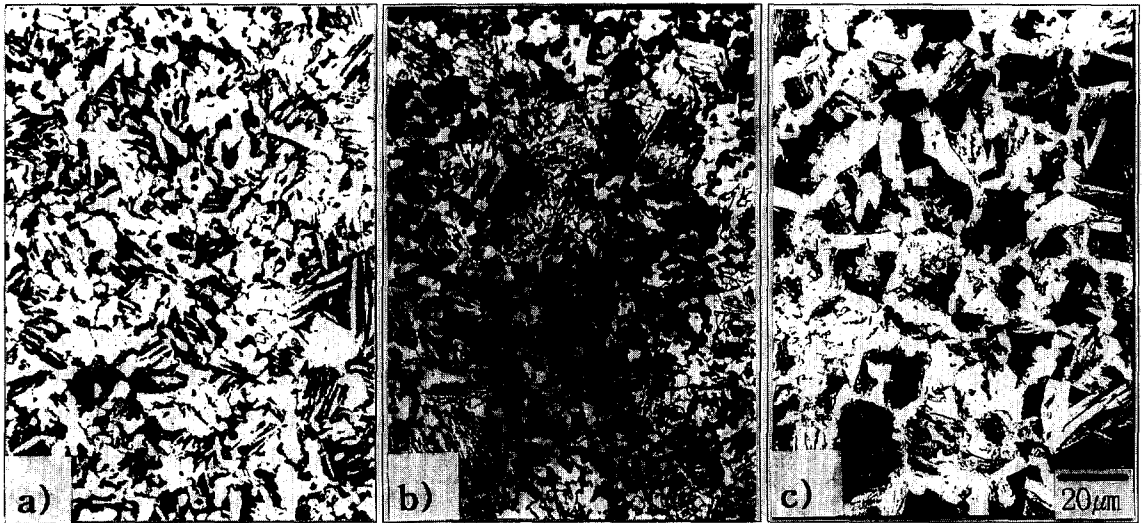


Photo. 4. Optical micrographs obtained by cooling rate of 10~100°C/min after annealing at 950°C

a) 10°C/min      b) 30°C/min      c) 100°C/min

지조직이 페라이트와 펄라이트의 기지 조직으로 이루어져 있고, 30°C/min속도로 냉각한 사진 b)에서는 페라이트와 펄라이트조직에 부분적으로 베이나이트가

존재하고 있는 조직에 잔류오스테나이트가 미량 존재하고 있는 조직을 나타내고 있다. 한편 냉각속도가 증가하여 100°C/min의 속도가 되면, 사진 d)에서

알 수 있는바와 같이 페라이트와 마르텐사이트의 기지 조직에 펄라이트 조직이 부분적으로 존재하고, 잔류오스테나이트도 극소량 존재하고 있음을 알 수 있다.

Photo. 5는 시료를 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상영역 온도 구간인 760℃에서 유지한 후 10~100℃/min사이의 여러 냉각속도로 냉각하였을 때 얻은 사진을 광학현미경에 의해 나타낸 것이다. 냉각속도가 10~30℃/min까지는 주로 베이나이트와 페라이트의 기지 조직에 펄라이트와 잔류오스테나이트가 소량 존재하고 있는 조직을 나타내고 있는데 반하여, 100℃/min의 속도로 냉각한 경우는 페라이트와 마르텐사이트의 기지 조직에 소량의 베이나이트

와 펄라이트 및 잔류오스테나이트가 존재하고 있다. 또한 냉각속도가 증가할수록 베이나이트 조직의 양은 감소하고 잔류오스테나이트의 양은 증가하고 있으며, 베이나이트 조직의 결정립크기도 미세해지고 있다. 이와같이 기지를 이루고 있는 조직이 10~30℃/min의 냉각속도에서는 페라이트와 베이나이트조직이 얻어지는데 반하여, 100℃/min속도로 냉각한 경우는 페라이트와 마르텐사이트 조직이 얻어지는 이유는 냉각속도가 100℃/min가 되면 760℃에서 존재하고 있던 오스테나이트 조직이 냉각속도가 빨라 전단변태 특성과 확산변태 특성을 동시에 요하는 베이나이트로 변태<sup>23)</sup>할 수 있는 시간적 여유가 없기 때문에 우선적으로 마르텐사이트로 변태하기 때문이다.

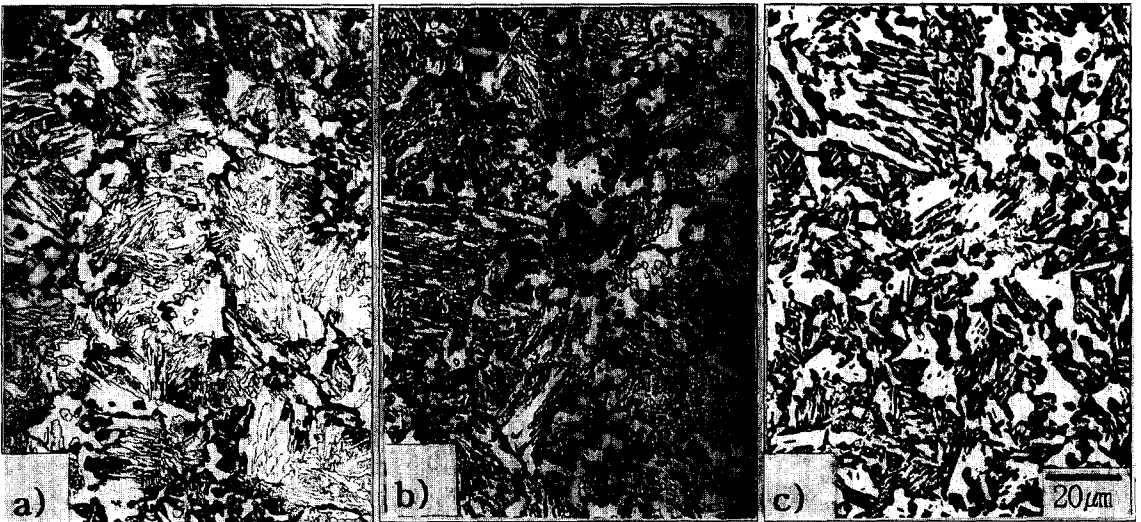


Photo. 5. Optical micrographs obtained by cooling rate of 10~100℃/min after annealing at 760℃  
a) 10℃/min      b) 30℃/min      c) 100℃/min

이상의 미세조직 결과로부터 어닐링 온도변화 및 냉각속도 변화에 따라 미세조직이 변화되고 있음을 알 수 있다. 즉, 어닐링온도가 2상영역인 경우에는 베이나이트와 페라이트의 조직이 얻어지는데 반하여 오스테나이트 단상 영역인 경우에는 페라이트와 펄라이트 조직이 얻어지며, A<sub>1</sub> 변태점 부근인 760℃ 이상의 온도범위에서 냉각속도를 제어한 경우에는 페라이

트와 펄라이트의 기지 조직에서 냉각속도 증가와 함께 베이나이트 조직의 양이 많아지는데 반하여 760℃이하의 온도 영역에서 냉각속도를 제어한 경우는 냉각속도가 30℃/min까지는 페라이트와 펄라이트 조직에 베이나이트 조직이 소량 존재하는 조직이 얻어지고 있지만 냉각속도가 50℃/min이 되면 페라이트와 베이나이트 조직이 얻어진다.

### 3.2 냉각속도제어 온도 영역에 따른 경도 및 인장성질 변화

앞의 미세조직 관찰에서 알 수 있는 바와 같이 A<sub>1</sub> 변태점을 기준으로 하여 760°C 이상의 온도영역 및 그 이하의 온도영역에서 냉각속도를 제어한 경우와 어닐링온도를 달리 한 후 냉각속도를 변화시켜 냉각하였을 때 미세조직이 크게 변화되고 있음을 알 수 있고, 이러한 변화는 기계적 성질에도 큰 영향을 미칠 것으로 사료되어 이에 따른 경도 및 인장성질변화를 조사하였다.

Fig. 1은 시료를 950°C에서 유지한 다음 A<sub>1</sub> 변태점 부근의 온도인 760°C까지는 10~50°C/min의 여러 속도로 냉각하고 760°C 이하의 온도 영역에서는 30°C/min의 속도로 냉각한 시료와 950°C에서 760°C까지는 30°C/min속도로 냉각하고 760°C 이하의 온도에서는 10~50°C/min속도로 냉각속도를 달리하여 냉각한 시료를 인장시험하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 냉각속도에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 760°C 이상의 온도영역에서 냉각속도를 달리한 시료는 인장강도와 연신율이 냉각속도에 따라 크게 변화되지 않고 있는데 반하여, 760°C 이하의 온도영역에서 냉각속도를 달리한 시료의 경우는 냉각속도가 증가함에 따라 인장강도는 빠른속도로 증가하고 있고, 연신율은 급격히 감소하였다. 이와같이 760°C 이상의 온도 영역에서는 냉각속도를 달리하여도 인장강도와 연신율이 크게 변화하지 않고 비슷한 값을 나타내는데 반하여 760°C 이하의 온도영역에서 냉각속도를 달리한 경우 냉각속도 증가와 함께 인장강도가 빠른속도로 증가하고 연신율이 급격히 감소하는 이유는 Photo. 2와 3에서 알 수 있는 바와 같이 760°C 이상의 온도 영역에서 냉각속도를 달리한 경우는 냉각속도가 증가함에 따라 베이나이트 조직의 양이 약간 증가하고 결정립크기가 작아지고 있지만 그 정도가 적어 인장강도와 연신율에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 인장강도와 연신율이 크게 변화가 되지 않는 것으로 생각된다. 그러나 760°C 이하의 온도영역에서 냉각속도를

달리한 경우는 냉각속도가 증가함에 따라 펄라이트 조직의 양이 적어지면서 상대적으로 펄라이트 보다도 강한 베이나이트조직의 양이 현저하게 많아지는데 기인되어 강도가 증가하고 연신율이 감소하는 것으로 생각된다.

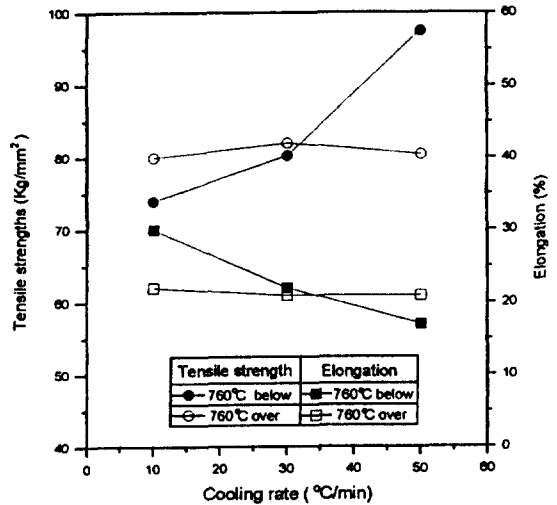


Fig. 1. Effect of cooling rate on the tensile properties of Fe-Si-Mn-P steel after annealing below or above 760°C

Fig. 2는 Fig. 1과 동일한 냉각속도 제어에서 얻어진 시료의 경도값을 냉각속도에 대해 나타낸 것이다. 인장강도와 마찬가지로 760°C 이상의 온도에서 냉각속도를 달리하여 냉각한 경우는 경도값이 크게 변화되지 않지만, 760°C 이하의 온도영역에서 냉각속도를 달리하여 냉각한 경우에는 냉각속도가 증가함에 따라 경도값이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 760°C 이상의 온도 영역에서 냉각속도를 달리한 경우 냉각속도가 증가하여도 경도값이 크게 변화되지 않지만, 760°C 이하의 온도영역에서 냉각속도를 달리하여 냉각한 경우 냉각속도 증가와 더불어 경도값이 증가하는 이유는 Fig. 1의 설명에서와 같이 베이나이트 조직의 양이 달라지는데 기인된다고 생각된다.



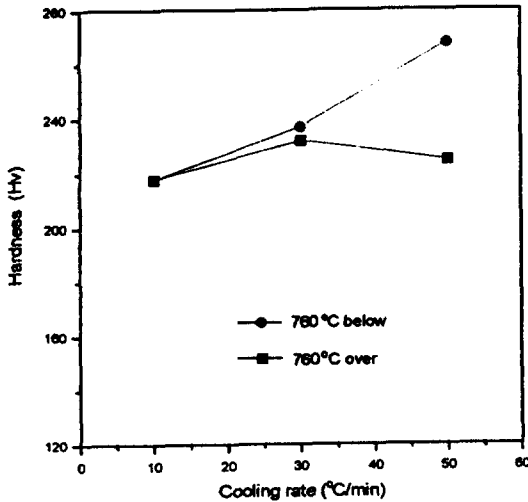


Fig. 2. Effect of cooling rate on the hardness of Fe-Si-Mn-P steel after annealing below or above 760°C

이상의  $A_1$  변태점 온도 부근인 760°C를 기준으로 하여 그 이상의 온도영역에서 냉각속도를 제어한 경우와 그 이하의 온도영역에서 냉각속도를 제어하여 이에따른 미세조직 변화와 경도 및 인장성질 변화를 조사한 결과로부터 강도-연성 발란스가 우수한 TRIP강의 제조를 위한 열간압연에서는 열간압연중의 온도제어 보다는 마무리 열간압연 후의 냉각속도를 조절하는 것이 더욱더 중요하다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 어닐링 온도 및 냉각속도 변화에 따른 인장성질 변화

Fig. 3은 시료를 2상영역 온도 구간인 760°C 및 780°C의 온도와 오스테나이트 단상영역인 950°C에서 유지한 다음 10~100°C/min의 범위까지 냉각속도를 달리하여 냉각한 시료를 인장시험하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 냉각속도에 대해 나타난 것이다. 세 시료 모두 냉각속도가 증가함에 따라 인장강도가 증가하고 있으며, 어닐링온도가 오스테나이트

단상 영역인 경우보다도 2상영역인 경우가 인장강도는 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편 연신율은 오스테나이트 단상영역인 950°C에서 유지한 다음 냉각한 시료의 경우는 냉각속도가 50°C/min까지는 냉각속도 증가와 함께 연신율이 급격히 감소하고 있지만 그 이상의 냉각속도에서는 냉각속도가 증가하여도 큰 변화가 없는데 반하여, 2상영역에서 유지한 후 냉각한 시료의 경우는 냉각속도가 30°C/min인 경우에는 연신율이 감소하지만, 이후 냉각속도가 50~100°C/min로 증가되면 연신율이 증가하고 있다. 또한 냉각속도가 50°C/min 이상에서는 780°C에서 유지한 다음 냉각한 시료의 경우가 가장 높은 연신율을 나타내고 있다. 이와같이 2상영역에서 유지 후 냉각한 시료보다도 인장강도가 높은 이유는 Photo. 4와 5에서 알 수 있는 바와 같이 오스테나이트 단상영역에서 유지 후 냉각한 시료는 기지조직이 주로 페라이트와 펄라이트 조직으로 이루어져 있는데 반하여, 2상영역에서 유지한 다음 냉각한 시료의 경우는 기지조직이 주로 강인한 베이나이트 조직으로 이루어져 있기 때문에 강도가 더 높게 나타난 것으로 생각된다. 한편, 2상영역에서 유지 후 냉각한 시료의 경우 냉각속도가 30°C/min일 때 연신율이 감소하고 그 이상의 냉각속도에서는 인장강도가 증가함에도 불구하고 연신율이 증가하는 특이한 거동을 나타내는 이유는 냉각속도가 30°C/min일 때는 냉각속도가 늦어 냉각시에 생성되는 잔류오스테나이트의 양이 작아진다. 따라서 잔류오스테나이트가 인장변형에 의해 마르텐사이트로 변태하는 소위 가공유기변태거동(TRIP거동)의 효과가 거의 나타나지 않기 때문에 연신율이 감소하지만, 냉각속도가 30°C/min 이상이 되면 냉각시에 5% 이상의 잔류오스테나이트가 생성되어 인장변형시 TRIP거동을 나타내기 때문에 연신율이 증가된다"고 생각된다. 이때 X선 회절법에 의해 얻어진 각 시료내 존재하는 잔류오스테나이트의 양은 760°C에서 유지한 다음 30°C/min의 속도로 냉각한 시료에서는 2%, 50°C/min속도로 냉각한 시료에서는 5

%이며, 100℃/min속도로 냉각한 경우에는 6%이었다. 또한 2상영역온도인 780℃에서 유지 후 냉각한 시료의 경우가 가장 높은 연신율을 나타내는 이유는 780℃에서 유지후 냉각한 시료가 약 10% 정도의 가장 많은 잔류오스테나이트가 생성되기 때문에 인장변형시에 의한 TRIP효과가 가장 크게 나타나기 때문이라 생각된다.

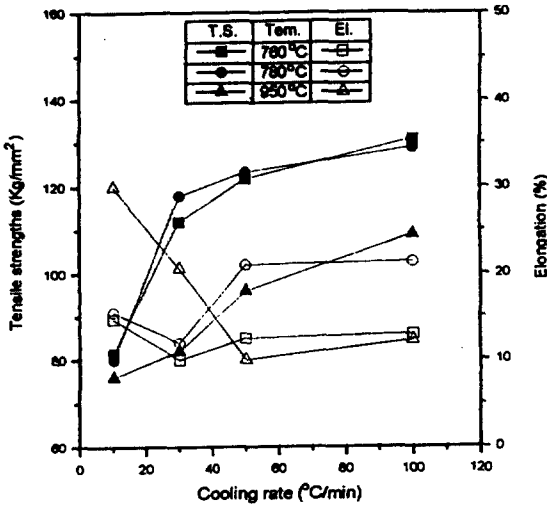


Fig. 3. Effect of cooling rate on the tensile properties of Fe-Si-Mn-P steel after annealing at three temperatures.

Fig. 4는 본 실험에 사용된 강판을 냉각제어 압연에 의해 자동차용 고장도강판으로 제조시 마무리 열간압연온도 설정에 관한 자료를 얻기 위한 목적에서 시료를 760℃~950℃사이의 여러 온도에서 유지후 50℃/min 속도로 냉각한 다음 인장시험하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 어닐링온도에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 2상영역 온도 범위내에서 어닐링한 시료의 경우에는 어닐링온도가 증가함에 따라 인장강도는 감소하다가 온도가 증가하여 오스테나이트 단상영역이 되면 다시 증가하는 거동을 나타내고 있는데 반하여 연신율은 780℃에서 최대값을 나타낸 후 온도증가와 함께 감소하고

있음을 알 수 있다. 이와같이 인장강도가 2상영역내에서는 온도증가와 함께 감소하는 이유는 상대적으로 잔류오스테나이트의 량이 많이 생성되어 기지의 강도가 낮아지는데 기인되고<sup>24)</sup>, 연신율이 2상영역 온도인 780℃에서 최대값을 나타낸 후 감소하는 이유는 Fig. 3의 설명에서 언급된 바와 같이 780℃에서 어닐링한 시료의 경우가 가장 많은 잔류오스테나이트가 생성되어 TRIP효과가 가장 크게 나타났기 때문에 최대의 연신율을 나타내고, 어닐링 온도가 780℃이상으로 높아지면 생성되는 잔류오스테나이트의 량이 적어지기 때문에 TRIP효과가 작아지는데 기인되어 연신율이 낮아진다<sup>23)</sup>.

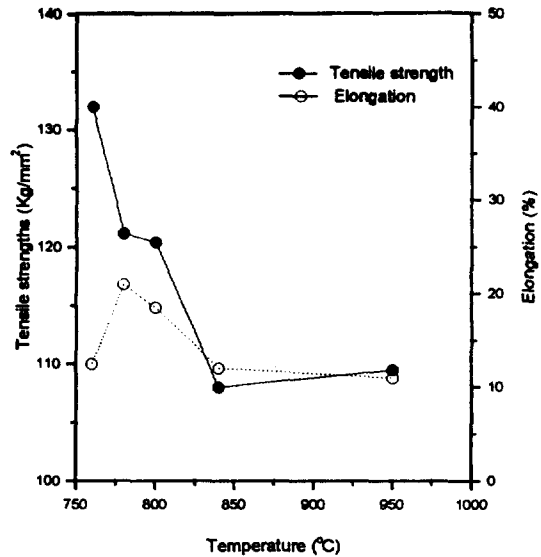


Fig. 4. Effect of annealing temperature on the tensile properties of Fe-Si-Mn-P steel obtained by cooling rate of 50℃/min after annealing at various temperature.

Fig. 5는 냉각시 생성되는 잔류오스테나이트가 인장성질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 4의 실험에서 얻은 강도-연성 발란스값과 잔류오스테나이트량을 유지 온도에 대해 나타낸 것이다. 강도-연성 발란스값은 어닐링온도가 2상영역 온도인 780℃에서 최대값을 나타낸 후 온도 증가와 함께 감소하

고 있고, 잔류오스테나이트의 량도 강도-연성 발란스값과 비슷하게 780℃에서 최대값을 나타낸 후 어닐링온도 증가와 함께 감소하였다. 이와같이 강도-연성 발란스값이 780℃에서 최대값을 나타낸 후 감소하는 원인은 이 온도에서 어닐링한 시료의 경우가 가장 많은 량의 잔류오스테나이트가 생성되는데 기인되어 가장 큰 TRIP효과를 나타내기 때문이라고 생각된다. 또한, 강도-연성 발란스값이 잔류오스테나이트와 동일한 경향을 나타내는 이유는 Fig. 5의 잔류오스테나이트량과 Fig. 4의 인장성질을 비교해 볼 때 어닐링온도에 따른 잔류오스테나이트량의 변화와 연신율의 변화가 동일한 경향을 나타내고 있는 결과로부터 잔류오스테나이트가 인장변형에 의해 마르텐사이트로 변태되는 TRIP거동은 인장강도보다는 연신율에 더 큰 영향을 미치게 되는데 기인되어 강도-연성 발란스값이 잔류오스테나이트의 량과 동일한 경향을 나타낸다고 생각된다.

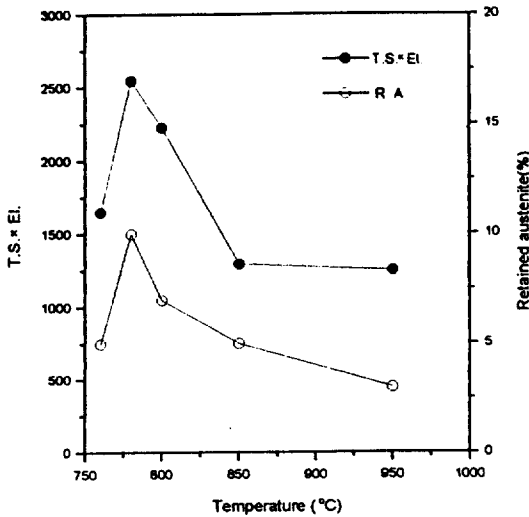


Fig. 5. T.S×El. and retained austenite as a function of annealing temperature obtained by cooling rate of 50℃/min.

이상의 실험 결과로부터 압연제어에 의해 TRIP강을 제조하기 위해서는 마무리 열간압연 온도는 오스

테나이트가 존재하는 단상영역 보다도 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상영역으로 하는 것이 보다 높은 TRIP거동에 기인되는 우수한 강도-연성 발란스 값을 얻을 수 있고, 2상영역중에서도 780℃부근의 온도가 가장 큰 강도-연성 발란스값을 얻을 수 있는 온도임을 알 수 있다. 또한 본 실험에서와 같이 냉각속도가 제어된 강판의 강도-연성 발란스값은 냉각속도 변화에 따른 조직변화에도 크게 영향을 받지만, 냉각시 생성되는 잔류오스테나이트의 량에도 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

roll켄칭 공정에서 냉각속도 제어에 따른 초고강도 강판을 제조하기 위한 기초자료를 얻기위한 목적에서 Fe-Si-Mn-P강을 사용하여 A<sub>1</sub> 변태점 부근의 온도인 760℃를 기준으로 하여 이 온도의 상, 하영역에서 냉각속도제어 및 여러 온도에서 어닐링한 후 냉각속도를 달리하는 열처리를 하여 미세조직 및 기계적 성질 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 어닐링온도가 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상영역인 경우에는 베이나이트와 페라이트의 조직이 얻어지고 오스테나이트 단상영역에서는 페라이트와 펄라이트 조직이 얻어졌다. 또한 760℃ 이상의 온도영역에서 냉각속도를 제어한 경우에는 페라이트와 펄라이트조직에서 냉각속도 증가와 함께 베이나이트가 증가하는데 반하여, 760℃ 이하의 온도영역에서 냉각속도를 제어한 경우는 냉각속도 증가와 함께 페라이트와 베이나이트 조직이 얻어졌다.
- 2) 인장강도 및 경도값은 760℃ 이상의 온도영역에서 냉각속도를 제어한 경우는 냉각속도제어에 따라 큰 변화가 없지만, 760℃ 이하의 온도영역에서 냉각제어한 경우는 냉각속도 증가와 함께 인장강도와 경도값은 급격히 증가하고 연신율은 감소하였다.

- 3) 인장강도는 어닐링온도에 관계없이 냉각속도 증가와 함께 증가하지만 연신율은 냉각속도 증가와 함께 감소하다 냉각속도가 30~50℃/min 이상이 되면 약간 상승하였다. 또한 인장강도와 연신율은 어닐링 온도가 오스테나이트 단상영역보다는 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 2상영역에서 더 높게 나타났다.
- 4) 잔류 오스테나이트 량과 강도 - 연성발란스값은 2상영역인 780℃에서 최대값을 나타낸 후 어닐링 온도 증가와 함께 감소하였고, 강도 - 연성 발란스값은 연신율이 잔류오스테나이트 량에 영향을 받는데 기인되어 잔류오스테나이트 량의 변화와 동일한 경향을 나타내었다.

### 참고문헌

- 1) H. Baker : Advanced Materials and Process, 138(1990), 27
- 2) 大橋正昭 : 鐵鋼界, (1983), 10, p.31
- 3) V.F.Zackey, E.R.Parler, D.fahr, R. Bush : Trans, ASM, Vol. 60, (1967), 252
- 4) 小松原望, 今井規雄, 國重和俊 : CAMP-ISIJ, Vol. 6(1993), 1702
- 5) O. Matsumura, Y. Sakuma, H. Takechi : Trans. ISIJ, Vol. 27(1987), 571
- 6) O. Matsumura, Y. Sakuma, Y. Ishii, J. Zhao : ISIJ International, Vol. 32(1992), No. 10, 1110-1116
- 7) 今井規雄, 小松原望, 國重和俊 : CAMP-ISIJ, Vol. 6(1993), 754
- 8) 杉本公, 小林光征, 橋本俊 : 日本金屬學會誌, 54, 6(1990), 657-663
- 9) W. S. Owen : Trans. ASM, 46(1954), 812
- 10) A. Z. Hanzaki, P.d. Hodgson, S. Yue : ISIJ International, Vol. 35(1995), No. 1, 79-85.
- 11) O. Matsumura, Y. Sakuma, H. Takechi : ISIJ International, Vol. 32(1992), 9, 1014-1020
- 12) Y. Sakuma, O. Matsumura, H. Takechi : Metallurgical Trans. ISIJ, A, Vol. 22A (1991), 489-498
- 13) 今井規雄, 小松原望, 國重和俊 : CAMP-ISIJ, Vol. 5(1992), 1986
- 14) 金教星, 權五俊, 張來雄 : 大韓金屬學會誌, 28, 3(1990), 235
- 15) W. B Huchinson : Inter, Mset. Rew., 29 (1984), 25
- 16) 池永則夫 外4人 : CAMP-ISIJ, 4(1991), 782
- 17) 河野治, 脇田淳, 江坂一彬, 阿部博 : CAMP-ISIJ, Vol. 1(1988), 877
- 18) 文元振, 姜昌龍, 金漢軍, 金基敦, 成章鉉 : 熱處理學會誌, 10, 1(1997)
- 19) M. J. Dickson : J. Appl. Cryst., 2(1969), 176
- 20) H. K. D. H. Bhadeshia : Proc. of Inter. Conf. on solid phase, Transe., AIME, (1982), 1041
- 21) 崔光溥, 金聖浩, 韓鳳熙, 朴容範 : 大韓金屬學會誌, 29, 3(1991)
- 22) 金東勳 : 금속조직학, (1982), 170
- 23) 文元振, 姜昌龍, 成章鉉 : 大韓金屬學會誌, 35, 3(1997)
- 24) 姜昌龍, 成章鉉 : 熱處理學會誌, 3, 2(1990), 20