



### 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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.

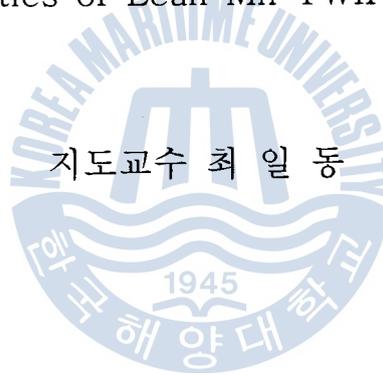
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

저망간 트웩강의 트윈형성 결정립의 분율이  
기계적 특성에 미치는 영향

The Effect of Twinned Grain Fraction on Mechanical  
Properties of Lean Mn TWIP Steels



지도교수 최 일 동

2011년 2월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

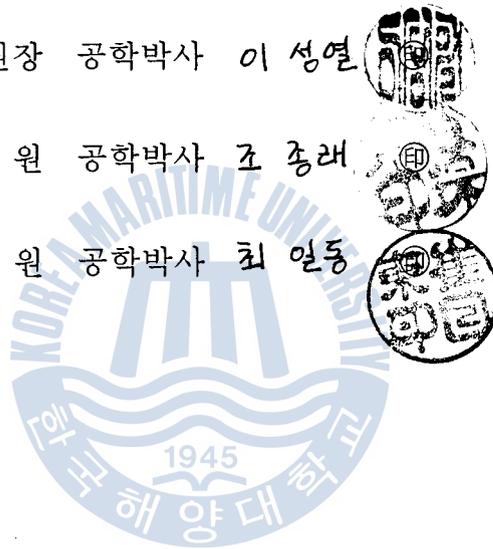
김 진 용

본 논문을 김진용의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 이 성열

위 원 공학박사 조 종래

위 원 공학박사 최 일동



2010년 10월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

김진용

## 목 차

1. 서론	1
2. 이론적 배경	3
2.1 쌍정유기소성	3
2.2 오스테나이트의 적층결합에너지에 영향을 미치는 인자	3
2.3 고속인장시험	5
2.3.1 고속인장 시험기의 특성	5
2.4 기계적 쌍정 형성의 메카니즘	5
3. 실험방법	9
3.1 TWIP 냉연 강판 제조 및 단상영역 열처리	9
3.2 준정적 인장 시험	12
3.3 고온 인장 시험	12
3.4 고속 인장 시험	12
3.5 변형률 제어 시험	17
3.6 미세조직 관찰	23
3.7 기계적 쌍정이 형성된 결정립의 분율 측정	23
4. 실험결과 및 고찰	24
4.1 Twinned Grain Fraction	24
4.1.1 변형률 조절 시험	24
4.1.2 Twinned Grain Fraction Result	24
4.2 준정적 및 고속인장시험 결과	33
4.2.1 공칭응력-공칭변형률 곡선	33
4.2.2 최대인장강도, 변형률속도민감도와 파단 연신율	34
4.2.3 변형 경화	35
4.2.4 X선 회절 결과	35

4.2.5 광학현미경 조직사진 -----	36
4.2.6 흡수에너지 -----	36
4.3 고온 인장시험 결과 -----	49
4.3.1 공칭응력-공칭변형률 곡선 -----	49
5. 결론 -----	54
6. 참고문헌 -----	56
7. ABSTRACT	



# 제 1 장 서 론

자동차 산업에서 에너지의 절약, 승객의 안전성 향상, 차체 무게감소는 가장 중요한 목표이다. 이 목표를 달성하기 위한 방법 중 한 가지가 고강도의 재료를 도입한 자동차의 무게 절감이다. GPa 수준의 고강도 강을 만드는 가장 기본적인 방법은 결정립의 미세화이지만, 강도의 증가로 연성과 성형성은 저하하게 된다. 철계 합금의 가공경화 방법 중 특수한 방법은 영구변형동안의 상변태나 쌍정형성 또는 전단띠 형성에 의해 강화되어진다. 특히 오스테나이트를 기지로 하는 20%이상의 Mn을 함유한 고망간강은 변형중에 오스테나이트 기지내의 결정립에서 변형 쌍정이 형성된다. 쌍정유기소성강(TWIP)은 변형중에 쌍정현상을 이용하여 700MPa가 넘는 높은 강도와 50%가 넘는 연신율을 동시에 얻을 수 있다<sup>[1~3]</sup>. 소성변형시 쌍정이 발생함으로써 응력집중을 해소하고 가공경화 속도를 증가시킴으로써 국부 necking을 방지하여 연성을 증가시킨다<sup>[4]</sup>. 일반적으로 금속재료의 동적거동은 정적 또는 준정적인 하중상태에서의 거동과 큰 차이를 보인다<sup>[5~10]</sup>. 이런 동적재료거동은 승객의 안정성이 중요시 되는 자동차에 매우 중요하기 때문에 TWIP강을 자동차에 적용하기 위해서는 고속변형특성 및 동적변형거동을 이해할 필요가 있다.

TWIP강은 변형중 발생하는 쌍정의 형성이 기계적 특성에 영향을 미치지만 변형중 형성된 쌍정의 양을 정확하게 측정하는 데는 어려움이 있다. 또한 많은 연구가 Mn이 20% 이상 함유된 TWIP강에 대해서만 이루어져 왔는데 이는 Mn의 함량이 적어질수록 TWIP보다는 TRIP현상이 잘 일어나기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 Mn이 20% 이하로 함유된 Fe-18Mn-1.5Al-0.6C (18Mn TWIP)과 Fe-12Mn-2Si-0.9C (12Mn TWIP)의 두 가지 조성의 TWIP강 시험편을 제작하여 준정적변형 및 고속변형에서 형성된 변형쌍정이 기계적 특성에 어떻게 영향을 미치는가를 조사하고 상온에서부터 약 600°C까지의 고온인장시험을 통해 고온에

서의 인장특성을 조사하였다. 또한, 변형 전후의 시험편에 대한 X선 회절 시험을 통해 상의 변화를 관찰하여 변형에 따른 상변태 유무를 분석하였다.



## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 쌍정유기소성 (TWIP: TWinning Induced Plasticity)

모상이 오스테나이트인 철계 합금을 가공할 때의 상변태는 모상 오스테나이트 적층결합에너지와 관계가 있고 적층결합에너지는 합금의 조성 및 가공 온도에 따라 변화한다.  $20 \text{ mJ/m}^2$  이하의 낮은 적층결합에너지를 가지는 강재는 가공 중에 오스테나이트가  $\epsilon$ 상으로 변태(TRIP변태)하지만  $20 \text{ mJ/m}^2$  이상의 적층결합에너지를 가지는 강재는 오스테나이트가  $\epsilon$ 상으로 상변태하는 것은 저지되고 변형쌍정을 형성하게 된다<sup>[11,12]</sup>.  $40 \text{ mJ/m}^2$  이상의 적층결합에너지를 가지는 오스테나이트는 dislocation에 의한 변형을 하게 된다. 여기서 모상 오스테나이트를 적층결합에너지  $20 \text{ mJ/m}^2$ 에서  $40 \text{ mJ/m}^2$  사이에서 변형시키면 기계적 쌍정에 의한 변형이 일어나며 이 경우 재료는 TRIP강 보다 더 높은 강도와 더 큰 소성을 나타내며 이런 현상을 쌍정유기소성이라 한다. 적층결합에너지에 따른 변형모드를 그림 1에 나타내었다.

### 2.2 오스테나이트의 적층결합에너지에 영향을 미치는 인자

알루미늄이나 탄소의 첨가로 fcc 오스테나이트의 적층결합에너지를 증가시키는 것으로 알려져 있고 이는 오스테나이트에서  $\epsilon$ 상으로의 상변태를 강하게 저지하지만<sup>[13]</sup> 실리콘이나 망간의 첨가는 fcc 오스테나이트의 적층결합에너지를 감소시켜 오스테나이트에서  $\epsilon$ 상으로의 상변태를 일으키게 한다<sup>[14]</sup>. 시험 온도의 증가 또한 적층결합에너지를 증가시킨다<sup>[15]</sup>.

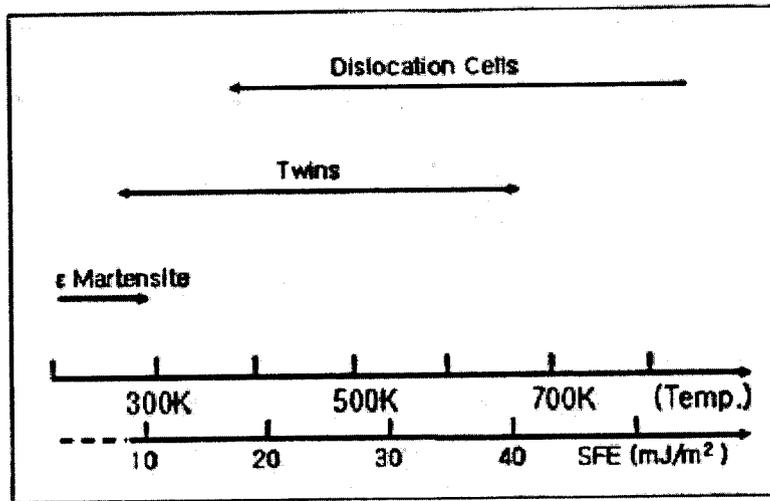


Fig. 1 Effect of stacking fault energy on the deformation structures.



## 2.3 고속인장시험

### 2.3.1 고속인장 시험기의 특성

고속인장시험기의 주요부분을 도식적으로 그림 2에 나타내었다. 시편의 윗부분이 고정되어 있는 상태에서 slack adapter를 통해 아래 방향으로 하중이 빠른 속도로 걸린다. Slack adapter는 하중이 시편에 걸리기 전에 요구속도로 가속되게 하고 slack adapter가 충분히 내려와 하부 그림을 당기면 하중이 시편, 상부그립, load washer, 기계의 크로스헤드로 전달되게 된다. Slack adapter가 하부 그림을 때릴 때의 충격과 하중 전달 경로를 따라 load washer까지 전달되어 특정 주파수로 load washer가 공명하게 만들고 하중-시간 곡선에서 진동으로 나타난다. 이와 같은 진동은 인장속도가 증가할수록 주파수는 적어지고 진폭은 커져서 하중의 결정을 힘들게 한다. 정확한 하중 결정을 위해서는 작은 진폭, 많은 주파수를 가진 하중-시간 곡선이 필요하다. 주파수는 시편과 로드셀 사이의 무게를 줄임으로써 증가시킬 수 있고, 진폭은 액츄에이터의 속도를 줄이거나 시편과 로드셀간의 거리를 줄임으로써 감소시킬 수 있다. 따라서, 하중 데이터를 개선시키기 위해 상부 그림의 무게를 경량 재료를 사용하여 줄였고 시편과 로드셀간의 거리는 그림부위에 탄성 스트레인 게이지를 부착하여 하중을 측정함으로써 줄였으며 액츄에이터 속도를 줄이기 위해 가능하면 표점거리가 짧은 시편을 사용하였다. 스트레인 게이지는 변형률을 측정하기 위해 소성 스트레인 게이지를 표점거리 내에, 하중 측정을 위해 탄성 스트레인 게이지를 그림 부분에 붙였는데 이를 그림 3에 나타내었다.

## 2.4 기계적 쌍정 형성의 메카니즘

TWIP강에서는 결정립내부에 기계적 쌍정의 형성이 매우 중요하다. 소

성변형 중에 형성된 기계적 쌍정은 전위의 이동을 방해하는 강한 장벽으로 작용하여 전위의 Mean Free Path(MPF)를 줄인다고 보고되어왔다<sup>[16-22]</sup>. 소성변형 중 기계적 쌍정의 형성은 첫 번째 twin system이 항복점에서 활성화되고 형성된 twin은 전 결정립을 걸쳐 전파되다가 결정립계에 의해 저지된다. 변형률이 증가하면 두 번째 twin system이 활성화된다. 두 번째 twin system은 첫 번째 twin system 사이의 공간에서 형성되며 그들에 의해 저지된다. 일부 결정립에서는 두 개의 system이 동시에 일어나기도 한다<sup>[16]</sup>.



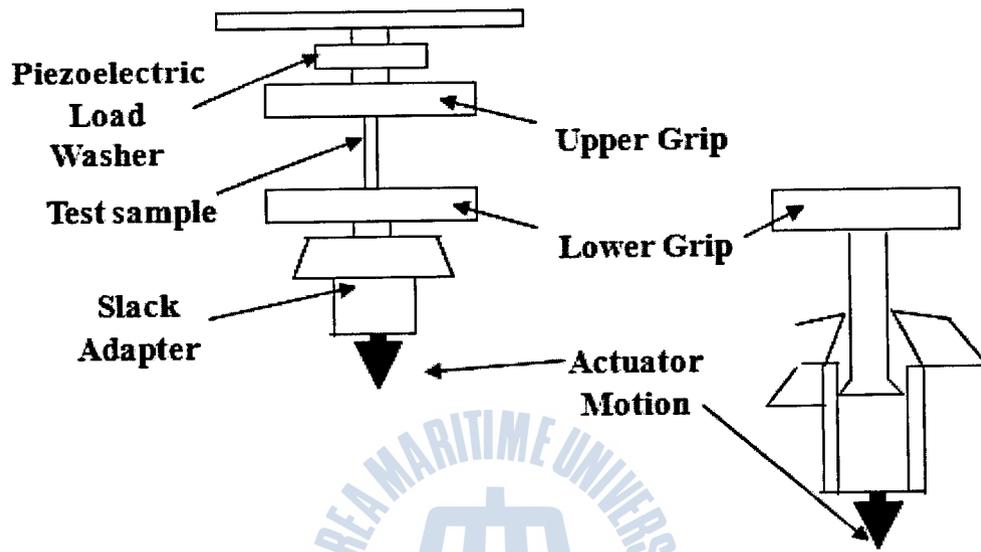


Fig. 2 Schematic diagram of high speed tensile testing equipment.

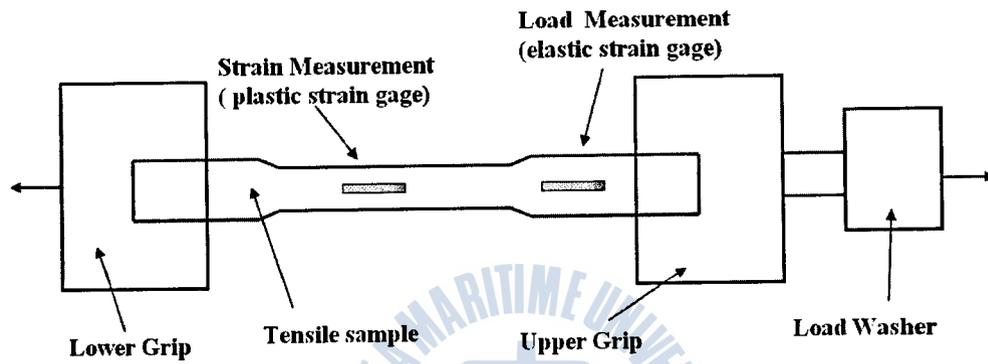


Fig. 3 Schematic diagram of typical tensile sample configuration.

## 제 3 장 실험방법

### 3.1 TWIP 냉연 강판 제조 및 단상영역 열처리

본 연구에서 사용된 합금은 Fe-18%Mn-0.6%C-1.5%Al (18Mn TWIP)과 Fe-12%Mn-0.9%C-2.0%Si (12Mn TWIP)의 조성을 가지고 있다. 합금의 Mn의 함량을 18%에서 12%로 줄이면서 기계적 쌍정이 형성될 수 있는 20~40 mJ/m<sup>2</sup> 범위의 적층결합에너지를 가지는 두 종류의 TWIP 강을 사용하였다. 각 조성의 열처리 이력을 그림 4에 나타내었다. 18Mn TWIP강의 slab은 1,250℃에서 균질화처리한 후 마무리 압연온도 1,000℃로 3mm의 두께로 열간압연하고 공냉시켰다. 그 후 열간압연한 강판을 1.5mm 두께로 냉연하여 제조하였다. 12Mn TWIP강의 slab은 1,200℃에서 균질화처리한 후 마무리 압연온도 1,000℃로 3mm의 두께로 열간압연하고 공냉시켰고 그 후, 1.5mm 두께로 냉연하여 제조하였다. 본 연구에서 사용된 냉연강판의 화학조성을 표1에 나타내었다.

TWIP강은 상온에서 그 미세조직이 100% 오스테나이트여야 한다. 이를 위해 냉연한 18Mn TWIP강은 800℃에서 10분간 항온유지 후 공냉하였고, 12Mn TWIP강은 1,000℃에서 10분간 항온유지 후 오일 퀘칭하였다.

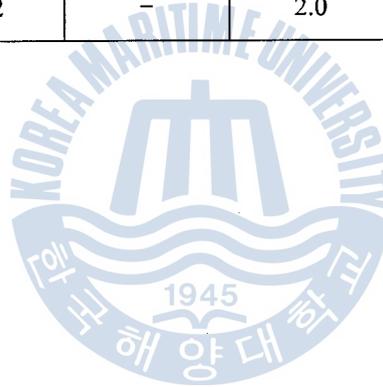
Table 1 Chemical composition of the experimental steels

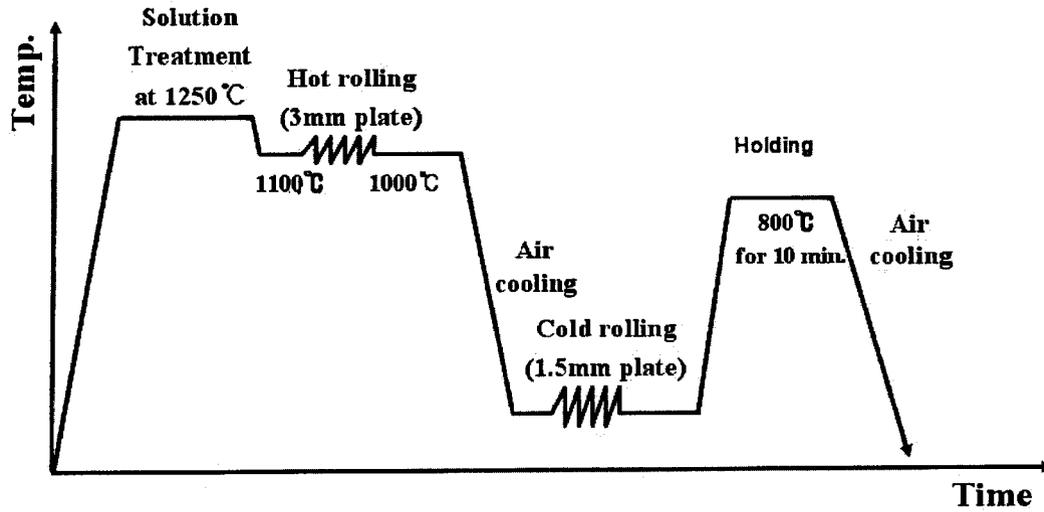
component specimen	Chemical composition (wt.%)				
	Mn	Al	Si	C	Fe
18Mn TWIP	18	1.5	-	0.6	Bal.
12Mn TWIP	12	-	2.0	0.9	Bal.



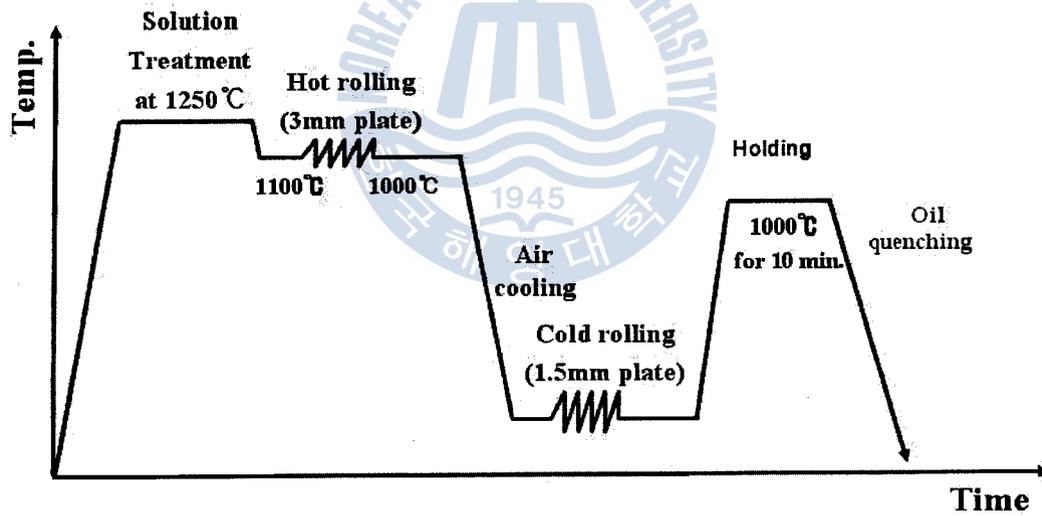
Table 1 Chemical composition of the experimental steels

component specimen	Chemical composition (wt.%)				
	Mn	Al	Si	C	Fe
18Mn TWIP	18	1.5	-	0.6	Bal.
12Mn TWIP	12	-	2.0	0.9	Bal.





(a) 18Mn TWIP



(a) 12Mn TWIP

Fig. 4 The schematic diagrams for manufacturing processes of specimens (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP.

### 3.2 준정적 인장 시험

본 연구에서 사용한 준정적 인장 시험장비는 Instron 모델 4469 인장 시험기를 이용하였다. 18Mn TWIP 시편은 8개의 시편을 이용하여  $10^{-4}/\text{sec} \sim 10^{-1}/\text{sec}$  범위의 4종류의 변형속도에서 시험하였고 12Mn TWIP 시편은 12개의 시편을 이용하여  $10^{-4}/\text{sec} \sim 10^{-1}/\text{sec}$  범위의 4종류의 변형속도에서 시험하였다. 각 시편에 대한 부하 하중은 Instron 인장시험기에 부과한 load cell의 하중 값을 사용하였고, 변형률은 인장시험편의 평행부에 부착한 extensometer를 이용하여 측정하였다. 각 시편의 형상을 그림 5에 나타내었다.

### 3.3 고온 인장 시험

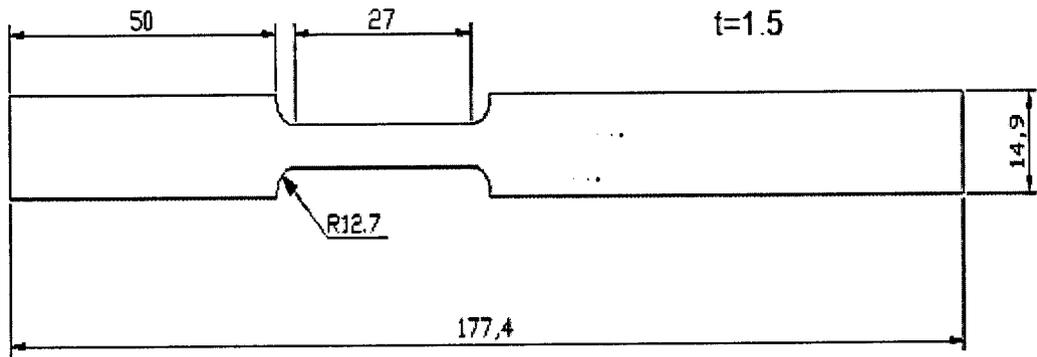
본 연구에서 사용한 고온인장시험장비는 MTS 모델 810이며 인장시험기에 부착되어 있는 가열로는 RNB 모델 307FM-F인데 승온한 후 인장 시험하였다. 18Mn TWIP 및 12Mn TWIP강에 대한 고온 인장시험은  $70^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$  범위의 8종류의 온도범위에서  $10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형률 속도로 시험하였다. 각 시편의 형상을 그림 6에 나타내었으며 변형률은 고온인장 시험 후 파단된 시편으로부터 측정하였다.

### 3.4 고속 인장 시험

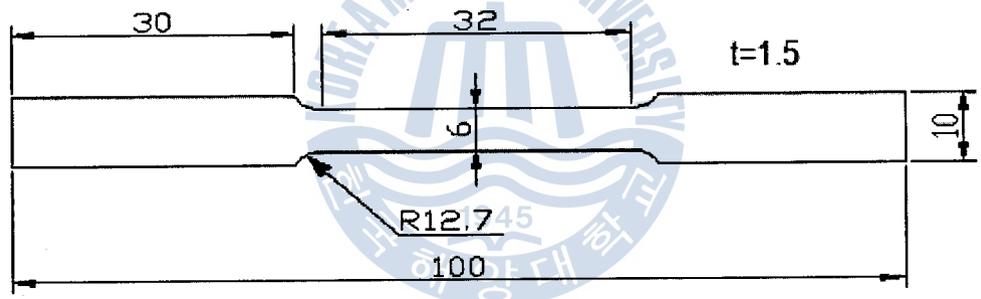
본 연구의 18Mn TWIP강의 고속인장시험에서 사용한 장비는 카이스트의 HSMTM이고 12Mn TWIP강의 연구에서 사용한 고속인장시험장비는 Colorado School of Mines의 HSMTS(ASPPRC)이다. 18Mn TWIP강은  $1/\text{sec} \sim 2 \times 10^2/\text{sec}$  범위에서 4종류의 변형률 속도로 고속 인장하였다. 12Mn TWIP은  $1/\text{sec} \sim 3 \times 10^2/\text{sec}$  범위에서 4종류의 변형률

속도에서 시험하였다. 각 시편의 형상을 그림 7에 나타내었으며 변형률은 고속인장시험편의 평행부에 부착한 소성 strain gage에 의해 측정하였다.



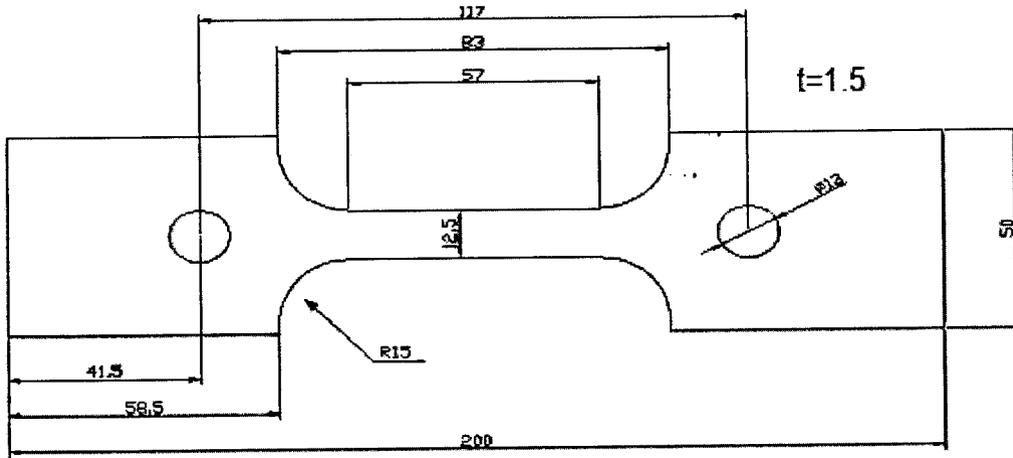


(a) 18Mn TWIP

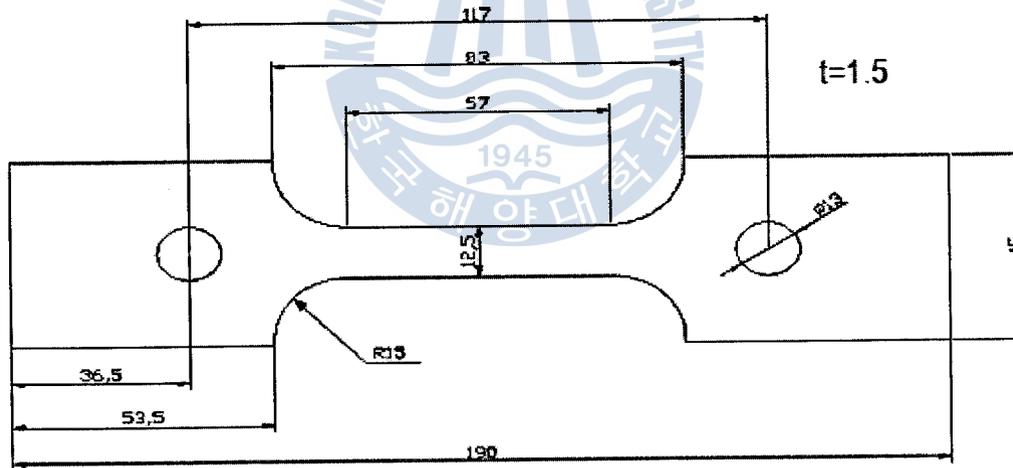


(b) 12Mn TWIP

Fig. 5 The schematic diagrams of quasi-static tensile specimen (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP.

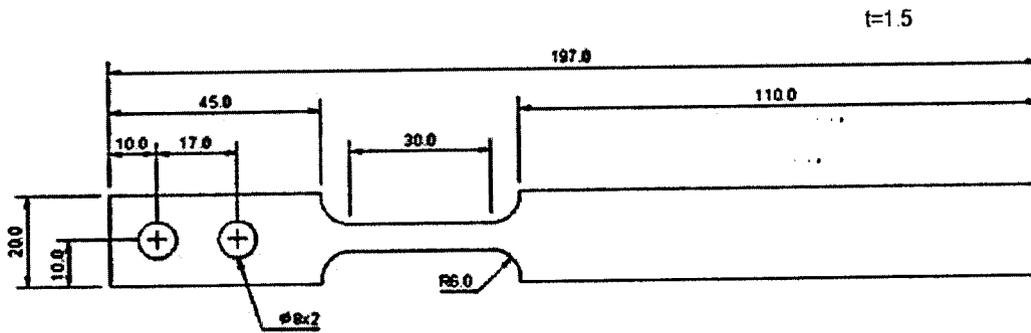


(a) 18Mn TWIP

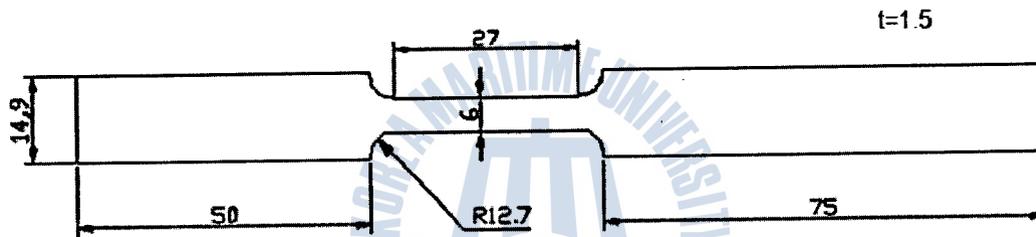


(b) 12Mn TWIP

Fig. 6 The schematic diagrams of high temperature tensile specimen (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP.



(a) 18Mn TWIP



(b) 12Mn TWIP

Fig. 7 The schematic diagrams of high strain rate tensile specimen (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP.

### 3.5 변형률 제어 시험

준정적 및 고속인장시험간 변형률을 제어하기 위하여 "stopper"라는 치구를 제작하였고, 치구의 치수 및 형상을 그림 8에 나타내었다. Stopper의 재질은 ASTM 4340 steel를 이용 제작하였다. 치구에 장착하여 변형률을 제어하기 위해 준정적인장시험에서는 18Mn TWIP강은 준정적인장시험에서 사용한 시험편을 사용하였고, 12Mn TWIP강은 치구에 맞추어 시험편을 따로 가공하였으며, 그 치수 및 형상은 그림 9에 나타내었다. 고속인장시험에서는 18Mn TWIP강과 12Mn TWIP강 모두 치구에 맞추어 시험편을 따로 가공하였고 그 치수 및 형상을 그림 10에 나타내었다. Stopper의 움직임 및 부하 상태에서 시험편의 거동을 그림 11에서 보여주고 있다. 하중이 시험편에 부과되어지면, 시험편의 변형과 함께 게이지부의 단면감소 및 아래쪽 guide bar가 아래쪽으로 움직이게 된다. 이후 guide bar가 미리 정해 놓은 거리만큼 움직이게 되고, 그 이상의 움직임은 하중이 부과되더라도 stopper grip에 의해 멈추게 된다. 이로 인해 gage부의 변형률은 제어되어진다. 이때 이후의 하중의 부과에 따른 시험편의 변형은 stopper 외부의 아래쪽 부분에서 변형이 되고 파단이 일어난다. 이 아래쪽 부분은 시험편의 단면적을 60% 감소시켜 만든 notch 부분으로 최종적인 시험편의 파단이 notch에 의해서 일어나게 제작한 것이다. 시험 이전에 하중을 부과하지 않은 시험편을 잡고 있는 stopper의 사진과 장착 후 시험편이 파단된 모습을 각각 그림 12에 나타내었다.

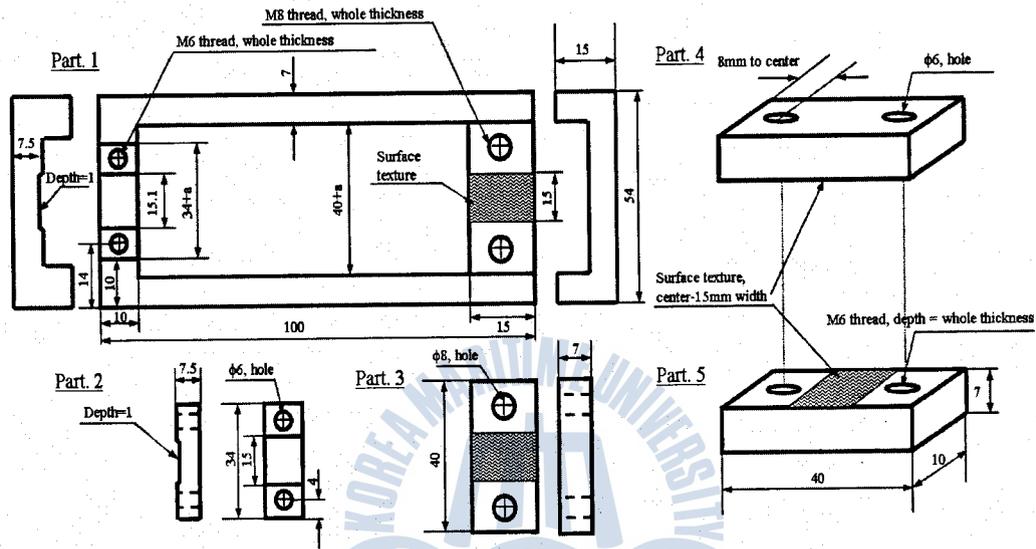


Fig. 8 Schematic diagram of stopper attachment (dimensions in mm).

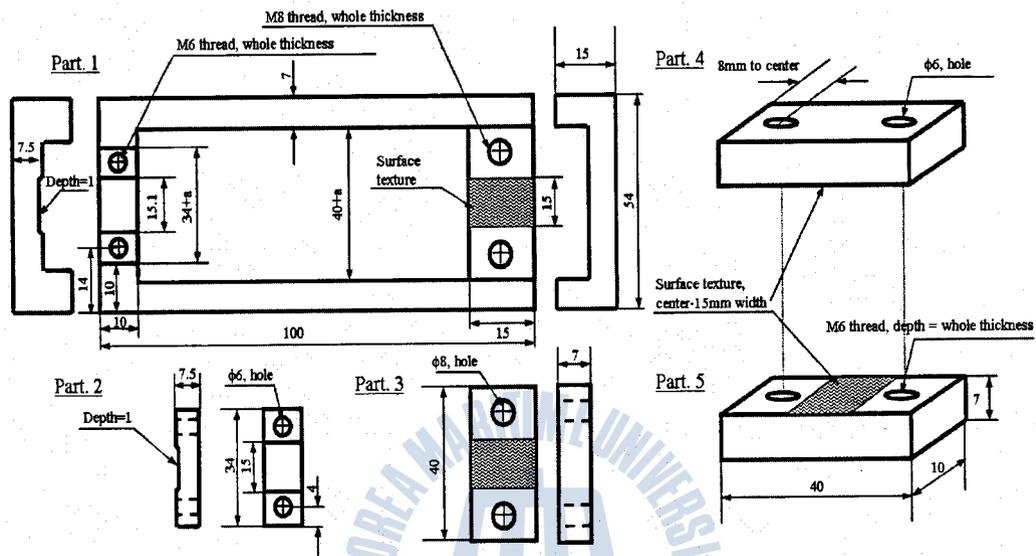
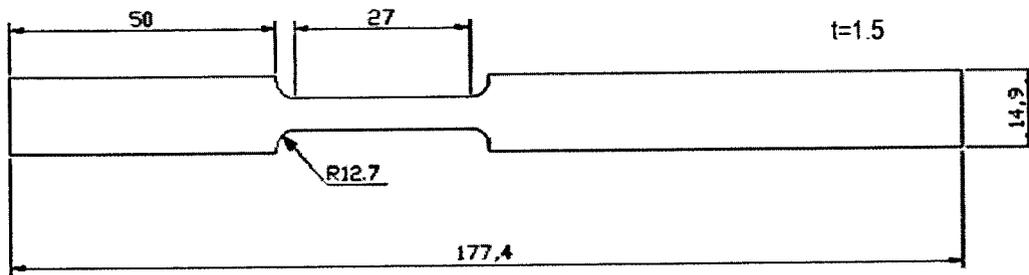
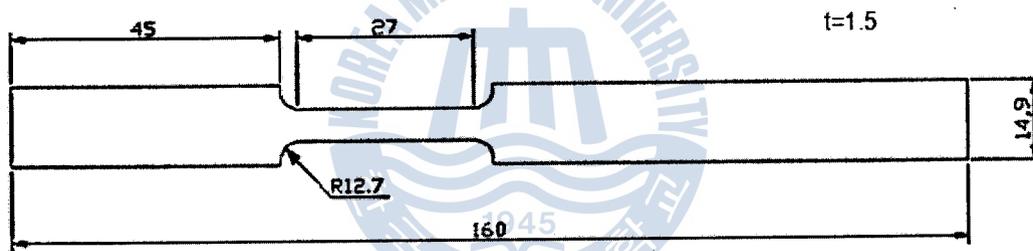


Fig. 8 Schematic diagram of stopper attachment (dimensions in mm).



(a) 18Mn TWIP



(b) 12Mn TWIP

Fig. 9 The schematic diagrams of strain-controlled quasi-static tensile specimen (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP.

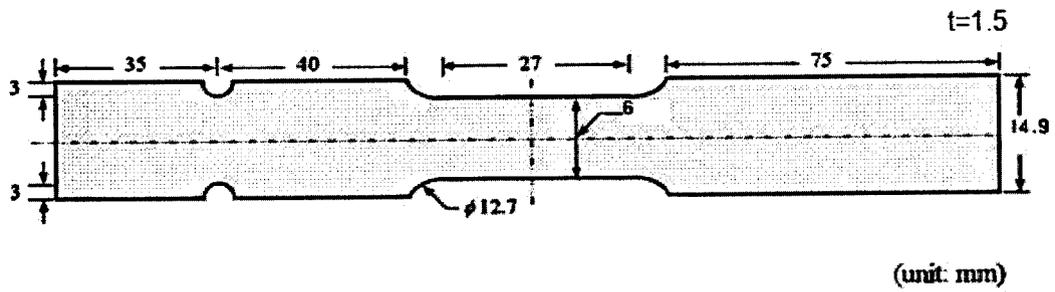
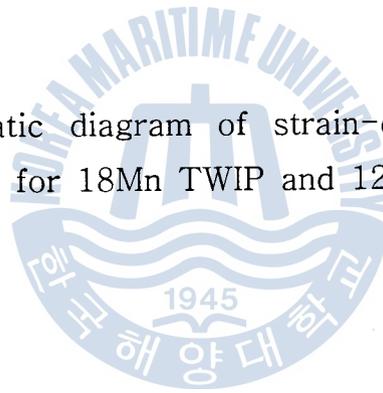


Fig. 10 The schematic diagram of strain-controlled high strain rate tensile specimen for 18Mn TWIP and 12Mn TWIP.



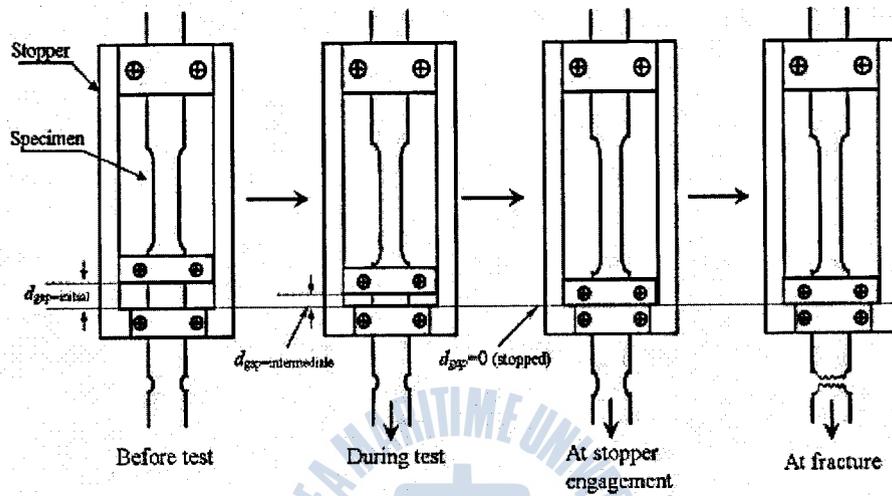
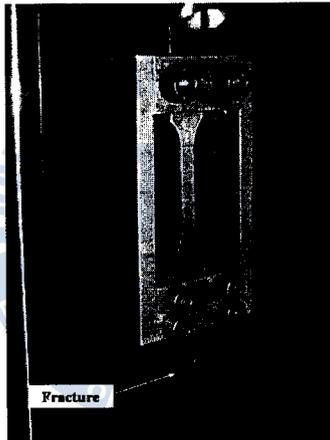


Fig. 11 The dynamics of stopper action and load transfer to the specimen.



(a) stopper attachment to the specimen



(b) sample failure

Fig. 12 (a) The stopper attachment to the undeformed specimen and (b) failure specimen with stopper mounted in the testing machine.

### 3.6 미세조직 관찰

인장시험에 의한 미세조직 변화를 조사하기 위하여 다음 과정으로 광학현미경 조직을 관찰하였다. 관찰을 위한 시편은 인장시험 전 후 시편의 평행부를 절단하여 두께 방향의 단면을 연마한 후 에칭하여 광학현미경 미세조직을 관찰하였다. 그런데 TWIP강은 오스테나이트의 단상으로 구성되어 있으나 결정입계내에 기계적 쌍정이 미세하게 형성되어 있어 nital ( $\text{HNO}_3$  3ml + ethyl alcohol 100ml)로만 에칭할 경우 기계적 쌍정이 명확하게 나타나지 않는다. 따라서 본 연구에서는 미세조직의 기계적 쌍정을 명확하게 관찰하기 위해 3% nital 용액으로 1차 에칭한 후 5% HCl ( $\text{HCl}$  5ml + ethyl alcohol 100ml)로 2차 에칭하고 10% sodium metabisulfite 용액( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  10g + 증류수 100ml)으로 3차 에칭하였다.

### 3.7 기계적 쌍정이 형성된 결정립의 분율 측정

준정적 및 고속인장에서 변형을 제어 시험한 시편에 대해 변형을 및 변형속도에 따른 기계적 쌍정의 양의 변화를 측정하기 위해 광학현미경 미세조직 사진을 Image-Pro라는 프로그램을 이용하여 기계적 쌍정의 면적 분율을 측정하였다. 기계적 쌍정은 그 두께가 수십~수백 마이크로미터로 그 두께가 매우 얇기 때문에<sup>[16]</sup> 정확한 두께와 길이를 측정하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 형성된 쌍정자체의 면적 분율이 아니라 쌍정이 형성된 결정립의 분율을 측정하는 방법을 사용하였다. 예를 들어 어떤 결정립에 한개의 기계적 쌍정이라도 형성되면 그 결정립을 twinned grain으로 간주하고 전체 미세조직 사진 중에서 twinned grain이 차지하는 영역의 면적 분율을 측정하였다. 각각의 시편마다 5장의 광학현미경 미세조직에 대하여 twinned grain의 면적 분율을 측정하였으며, 측정치의 평균값을 취하였다.

## 제 4 장 실험결과 및 고찰

### 4.1 Twinned Grain Fraction

#### 4.1.1 변형률 제어 시험

변형률 속도와 변형률에 따른 twinned grain fraction을 측정하기 위해 "stopper" 치구를 이용하여 일정한 변형률에 도달하면 인장시험이 중지 되도록 하였다. 준정적 인장속도는 18Mn TWIP의 경우  $10^{-1}/\text{sec}$ 과  $10^{-4}/\text{sec}$ 에서 4%, 20%, 40%의 변형률로 조절하여 인장시험하였고 12Mn TWIP은  $10^{-1}/\text{sec}$ 과  $10^{-4}/\text{sec}$ 에서 4%, 20%와 30%의 변형률로 조절하여 인장시험하였다. 고속변형에서는 18Mn TWIP은  $10^1/\text{sec}$ 과  $10^2/\text{s}$ 의 변형률속도에서 3%와 5%의 변형률로 조절하였고 12Mn TWIP은  $10^1/\text{sec}$ 과  $10^2/\text{sec}$ 의 변형률속도에서 3%와 15%의 변형률로 제어하여 인장하였다. 그림 13과 14에는 18Mn TWIP의 변형률 속도  $10^{-1}/\text{sec}$ 과  $10^{-4}/\text{sec}$ 에서 4%, 20%와 40%의 변형률로 조절한 조직사진을 각각 나타내었다. 그림 15과 16에는 12Mn TWIP의 변형률 속도  $10^{-1}/\text{sec}$ 과  $10^{-4}/\text{sec}$ 에서 4%, 20%와 30%의 변형률로 조절한 조직사진을 각각 나타내었다. 그림 17과 18에는 18Mn TWIP의 변형률 속도  $10^1/\text{sec}$ 과  $10^2/\text{sec}$ 에서 3%와 5%의 변형률로 조절한 조직사진을 각각 나타내었다. 마지막으로 그림 19과 20에는 12Mn TWIP의 변형률 속도  $10^1/\text{sec}$ 과  $10^2/\text{sec}$ 에서 3%와 15% 변형률로 조절한 조직사진을 각각 나타내었다.

#### 4.1.2 Twinned Grain Fraction Result

그림 21에 18Mn TWIP과 12Mn TWIP의 twinned grain fraction 측정 결과와 각 변형률 속도에서 연신율에 대응하는 18Mn과 12Mn TWIP의 응력을 나타내었다. 18Mn TWIP은 변형률 20%에서는  $10^{-1}/\text{sec}$ 과

$10^{-4}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 twinned grain fraction이 약 20% 정도로 변형률 속도에 따른 차이가 거의 없다. 하지만 변형률이 40%로 증가하면서  $10^{-4}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 twinned grain fraction이 약 80%,  $10^{-1}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 약 65%를 나타내었다. 이는 변형률 속도의 차이에 의한 것으로 생각된다.  $10^{-4}/\text{sec}$ 의 변형률 속도가  $10^{-1}/\text{sec}$ 의 변형률 속도보다 약 1000배 정도 느리게 변형되므로 twin이 형성되기에 충분한 시간적인 여유가 있으나 변형률 속도  $10^{-1}/\text{sec}$ 은  $10^{-4}/\text{sec}$ 에 비해 twin이 형성하기에 시간이 충분하지 않아 낮은 twinned grain fraction을 나타낸다. 하지만, 12Mn TWIP은 18Mn TWIP의 twinned grain fraction 결과와는 그 형태가 조금 다르다. 12Mn TWIP은 약 4%의 변형률에서  $10^{-1}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서는 약 50%에 달하는 twinned grain fraction을 나타내었지만  $10^{-4}/\text{sec}$ 에서는 약 10% 정도로 18Mn TWIP과 유사한 결과를 나타내었다. 20%의 변형률까지는  $10^{-1}/\text{sec}$ 의 변형률 속도가  $10^{-4}/\text{sec}$ 의 변형률 속도보다 높은 twinned grain fraction을 나타내었으며, twinned grain fraction도 60%이상으로 18Mn의 변형률 20%에서의 결과보다 월등히 높은 결과를 나타내었다. 하지만, 변형률 30%에서는 변형률 속도  $10^{-4}/\text{sec}$ 에서 95% 이상의 twinned grain fraction을 나타내고 변형률 속도  $10^{-1}/\text{sec}$ 에서는 약 85%의 twinned grain fraction을 나타냈다. 이것으로 보아 12Mn TWIP은 18Mn보다 매우 빠른 속도로 twinning 하는 것을 알 수 있다. 또한, twinned grain fraction이 TWIP상의 응력과 직접적으로 연결됨을 확인할 수 있다.

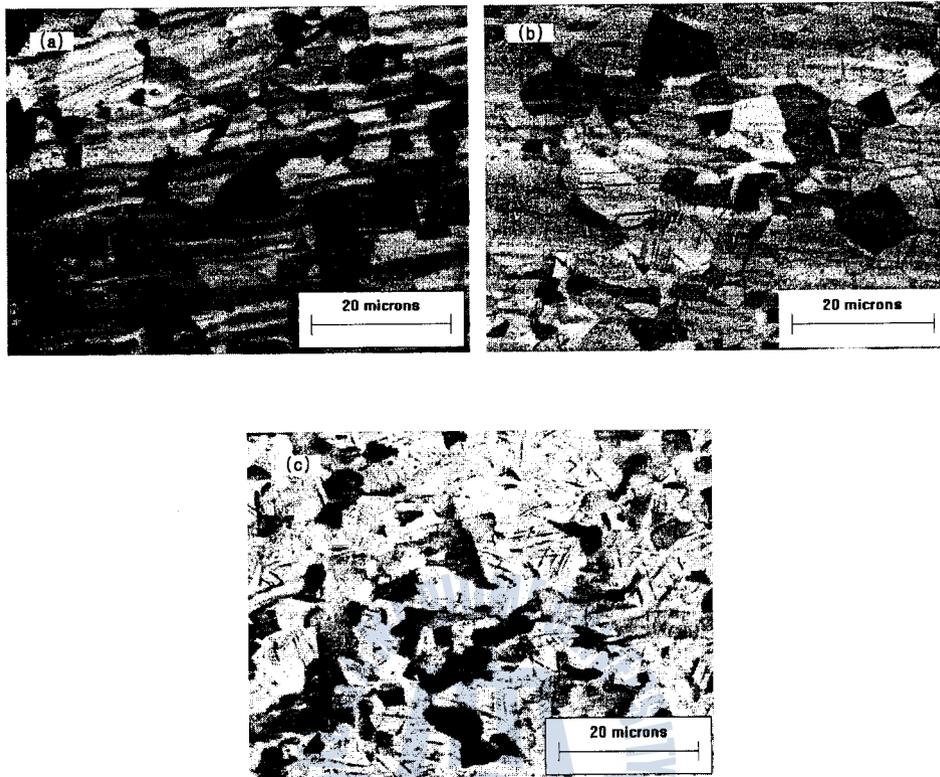


Fig. 13 The optical micrographs of 18Mn TWIP strained (a) 4%, (b) 20% and (c) 40% at the strain rate of  $10^{-4}$ /sec.

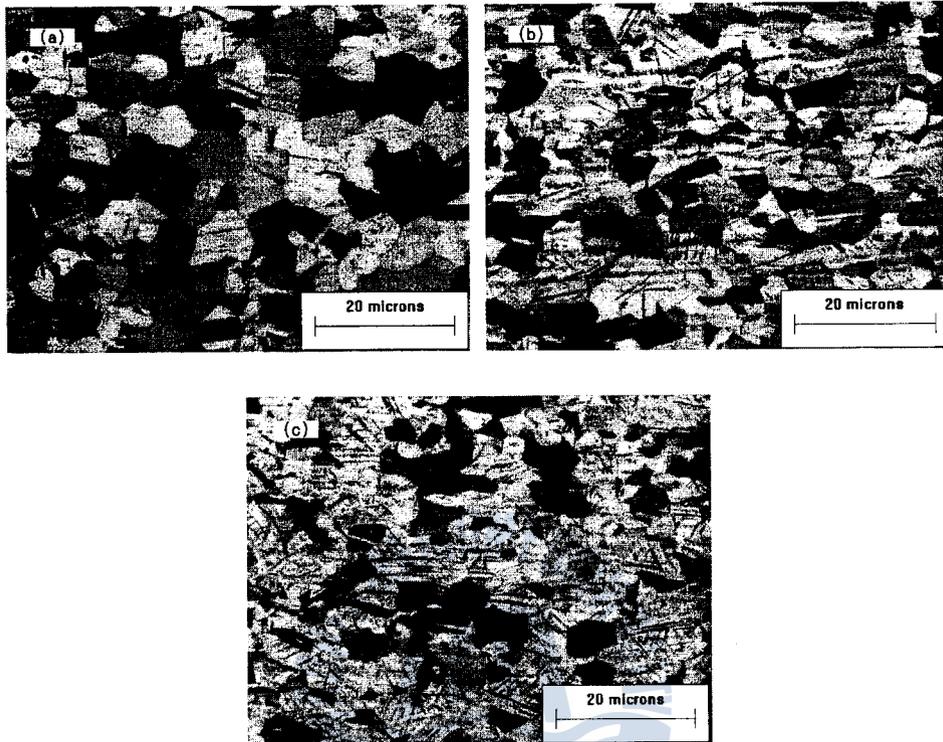


Fig. 14 The optical micrographs of 18Mn TWIP strained (a) 4%, (b) 20% and (c) 40% at the strain rate of  $10^{-1}/\text{sec}$ .

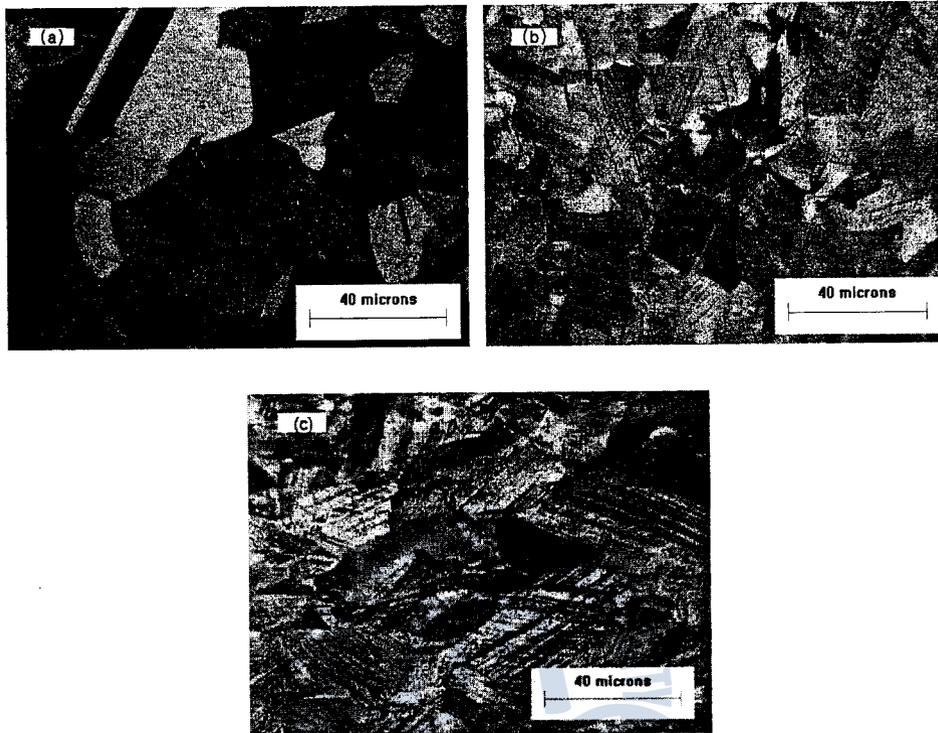


Fig. 15 The optical micrographs of 12Mn TWIP strained (a) 4%, (b) 20% and (c) 30% at the strain rate of  $10^{-4}$ /sec.

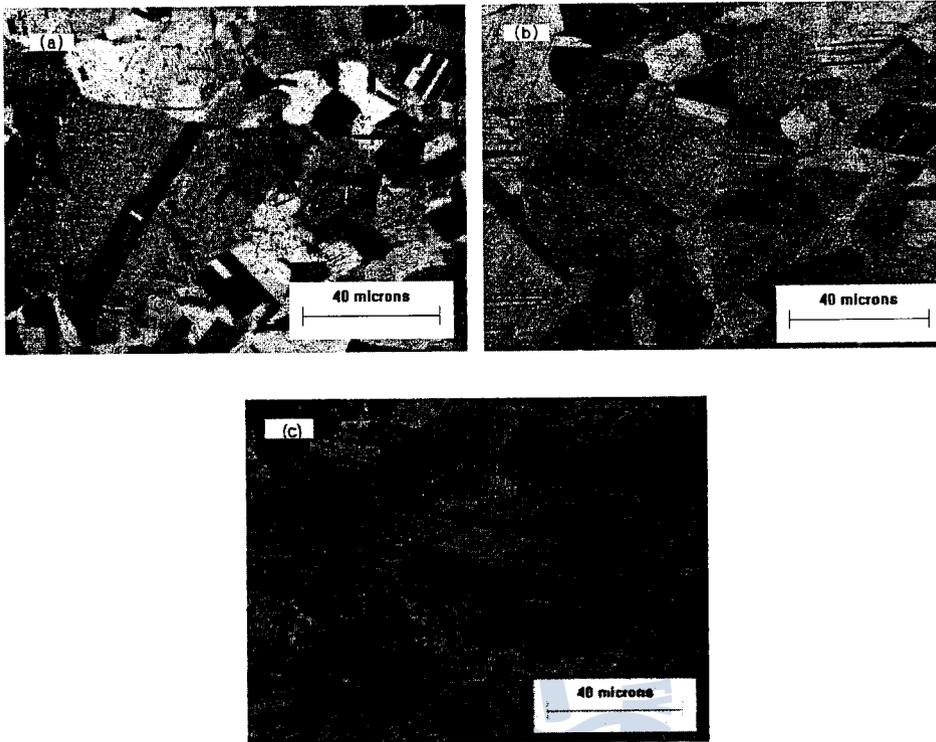


Fig. 16 The optical micrographs of 12Mn TWIP strained (a) 4%, (b) 20% and (c) 30% at the strain rate of  $10^{-1}/\text{sec}$ .

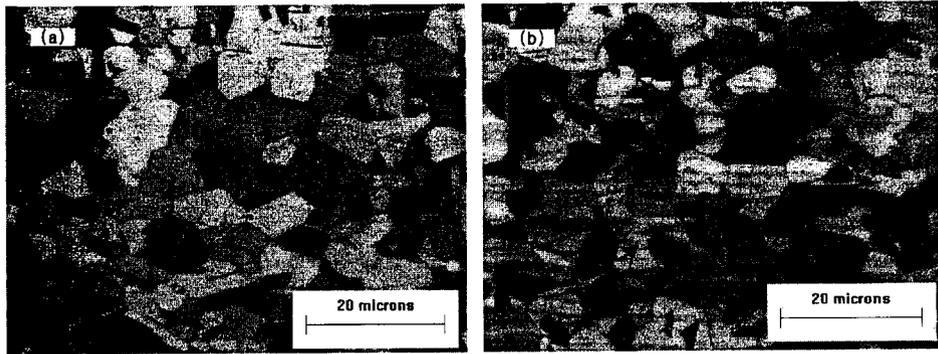


Fig. 17 The optical micrographs of 18Mn TWIP strained (a) 3% and (b) 5% at the strain rate of  $10^1$ /sec.

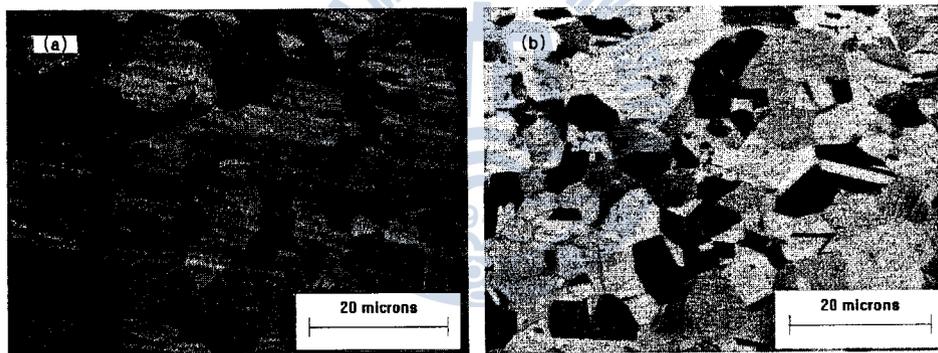


Fig. 18 The optical micrographs of 18Mn TWIP strained (a) 3% and (b) 5% at the strain rate of  $10^2$ /sec.

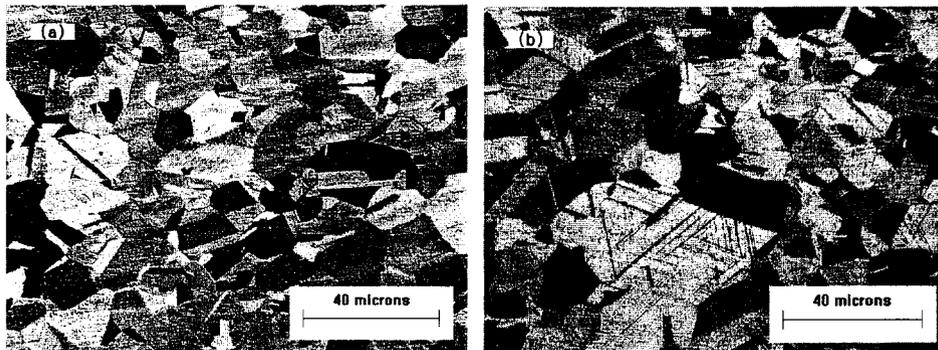


Fig. 19 The optical micrographs of 12MnTWIP strained (a) 3% and (b) 15% at the strain rate of  $10^1$ /sec.

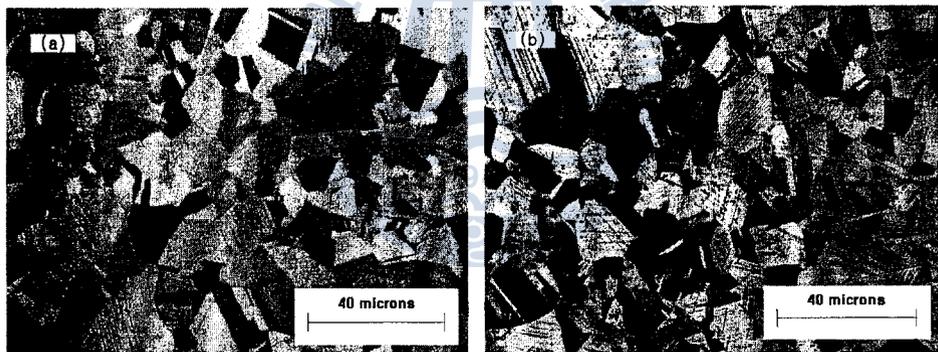


Fig. 20 The optical micrographs of 12MnTWIP strained (a) 3% and (b) 15% at the strain rate of  $10^2$ /sec.

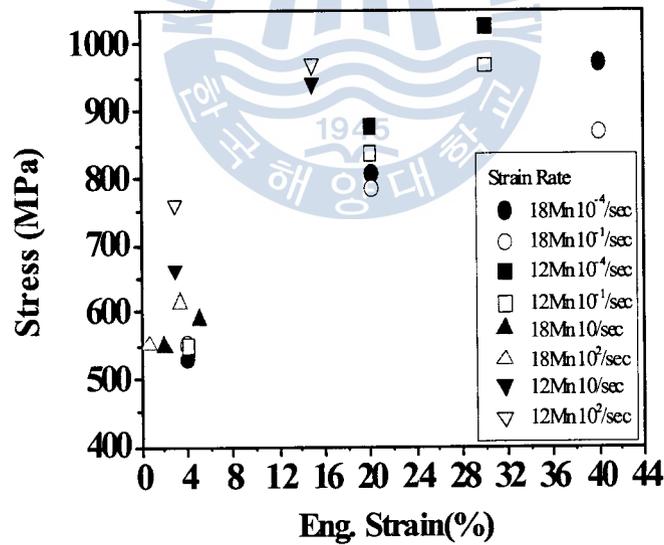
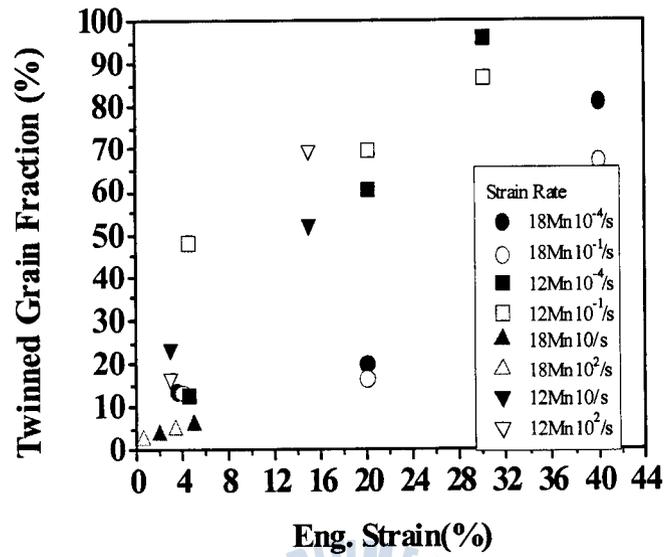


Fig. 21 (a) Twinned grain fraction and (b) stress at each strain with varying strain rates.

## 4.2 준정적 및 고속 인장시험 결과

### 4.2.1 공칭응력-공칭변형률 곡선

그림 22에 준정적 변형률속도에서의 18Mn TWIP과 12Mn TWIP에 대한 공칭응력-공칭변형률 곡선을 나타내었다. 18Mn TWIP은  $10^{-4}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 인장했을 때 1,000MPa 수준의 인장강도와 60%가 넘는 높은 연신율을 나타내었으며 최대인장강도 및 파단연신율이 변형률 속도의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 12Mn TWIP은 18Mn TWIP과는 달리  $10^{-1}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 인장했을 때 1,100 MPa 이상의 높은 인장강도와 약 60%의 연신율을 나타내었으며 변형률 속도가 증가 할수록 최대인장강도와 파단연신율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 인장강도가 증가하면 연신율이 감소하는, 즉, 인장강도와 연신율이 반비례하는 일반적인 현상과 달리 본 실험에 사용한 18Mn TWIP, 12Mn TWIP에서는 인장강도와 연신율이 비례하는 현상을 보인다. 18Mn TWIP에서 변형률 속도가 증가하면서 인장강도와 연신율이 동시에 감소하는 이유를 소성변형 중 인장시편이 단열적으로 가열되고 이에 따라 상승된 시편의 온도는 적층결함에너지를 증가시켜 연속적인 기계적 쌍정형성이 저지되기 때문이라고 Grassel 등이 설명하고 있다<sup>[11]</sup>. 그림 23에는 같은 변형률 속도에서 18Mn TWIP과 12Mn TWIP의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 한 그래프로 나타내어 변형률속도에 따른 직접적인 차이를 나타내었다. 모든 변형률 속도에서 12Mn TWIP이 18Mn TWIP보다 최대인장강도가 높고 가공경화가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 twinned grain fraction이 모든 변형률에 걸쳐 12Mn TWIP이 18Mn TWIP보다 높은 것으로 설명할 수 있다. 그림 24에는 고속변형률속도에서의 18Mn TWIP과 12Mn TWIP의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 나타내었다. 18Mn TWIP은 변형률 속도 증가에 따라 파단변형률과 항복강도 및 최대인장강도가 거의 일정함을 확인할 수 있다. 12Mn

TWIP은 변형률속도 증가에 따라 항복강도가 증가하며 300/sec을 제외하면 최대인장강도는 대체로 변형속도 증가에 따라 조금씩 감소하는 것을 확인할 수 있으나 그 차이는 크지 않다.

#### 4.2.2 최대인장강도, 변형률 속도 민감도와 과단연신율

그림 25에는 18Mn TWIP과 12Mn TWIP의 변형률 속도증가에 따른 최대인장강도의 변화와 과단연신율의 변화를 나타내었다. 변형률 속도의 증가와 관계없이 모든 범위에서 12Mn TWIP의 최대인장강도가 18Mn TWIP의 최대인장강도보다 높은 것을 확인할 수 있다. 이것은 4.1.2절에서 언급한 바와 같이 변형률 속도에 관계없이 모든 변형률에 걸쳐 18Mn TWIP보다 12Mn TWIP이 높은 twinned grain fraction을 나타낸 것으로 설명할 수 있다. 소성변형 중 형성된 기계적 쌍정은 전위 이동에 대한 장벽과 같은 역할을 하여 전위의 평균이동거리를 줄이므로 보다 높은 twinned grain fraction을 나타낸 12Mn TWIP의 최대인장강도가 높은 값을 가지게 된다. 모든 변형률 속도에 대한 최대인장강도의 변화 양상을 보면 18Mn TWIP은 변형률 속도가 증가함에 따라 최대인장강도가 감소하다가 10<sup>0</sup>/sec 이상의 변형률 속도에서는 거의 일정한 것을 확인할 수 있고, 12Mn TWIP은 변형률 속도가 증가함에 따라 최대인장강도가 증가하다가 10<sup>0</sup>/sec 이상의 속도에서는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 이러한 거동은 최대인장강도의 변형속도민감도(m)로 확인할 수 있고, 이를 그림 26에 나타내었다. 변형속도민감도(m)는 다음의 식 (1)을 사용하였고, 식에서  $\sigma$ 는 진응력,  $\dot{\epsilon}$ 는 진변형속도이다.

$$m = \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \dot{\epsilon}} \quad (1)$$

시험에 사용된 TWIP 강의 경우 변형률 속도에 따라 변형속도민감도가 2가지의 명확한 구역으로 나뉘어질 수 있다. 변형속도 10<sup>0</sup>/sec이하의 구역에서는 18Mn TWIP은 음(-)의 민감도를 나타내었으나, 12Mn TWIP은 양(+)의 민감도를 나타낸다. 10<sup>0</sup>/sec 이상의 구역에서는 18Mn

TWIP은 0.05 수준의 민감도가 거의 없는 모습을 나타내고, 12Mn TWIP은 -0.01 수준의 낮은 음의 민감도를 나타낸다. 과단연신율은  $10^{-1}/s$ 의 변형률 속도부터 12Mn TWIP이 18Mn TWIP보다 높아지는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 강도가 증가하면 연신율은 감소하는 모습을 나타내지만, 18Mn TWIP과 12Mn TWIP에서는 강도의 증가와 연신율의 증가가 함께 일어난다. 따라서 변형률 속도에 따른 TWIP강의 연신율에 대해서는 추후 더 깊은 연구가 필요한 것으로 사료된다. 상기의 결과를 정리하면,  $10^0/s$ 이상의 변형률 속도에서는 18Mn TWIP과 12Mn TWIP 모두 최대인장강도 및 과단연신율이 변형률 속도의 증가에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

#### 4.2.3 가공 경화

공칭변형률 2.5% 마다 가공경화지수를 구하고 이를 변형률 속도마다 비교하여 그림 27에 나타내었다.  $10^{-4}/sec \sim 10^{-1}/sec$ 까지의 저속 변형률 속도에서는 12Mn TWIP이 18Mn TWIP보다 가공경화지수가 월등히 큰 것을 확인할 수 있다. 이것 역시 12Mn TWIP의 twinned grain fraction이 18Mn의 그것보다 월등히 높은 것으로 설명할 수 있다. 소성변형이 진행되어감에 따라 18Mn TWIP보다 12Mn TWIP이 더 빠른 속도로 twinning을 하기 때문에 결정립내부에 형성된 twin에 의해 12Mn TWIP이 전위의 이동에 방해를 더 많이 받아 같은 변형률 속도에서 더 높은 가공경화지수를 가지는 것으로 보여 진다.

#### 4.2.4 X선 회절 결과

변형 전과 후의 상변태의 발생유무를 확인하기 위해 X선 회절 분석 시험을 하였다. 18Mn TWIP과 12Mn TWIP의 X선 회절 분석 결과를 그림 28와 그림 29에 각각 나타내었다. 변형 전, 후 18Mn TWIP과 12Mn

TWIP 모두 100% 오스테나이트의 상을 나타내며 변형률 속도의 증가에 관계없이 변형에 따른 상변태가 일어나지 않았음을 알 수 있다. 이것으로부터 TWIP강은 상변태가 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2.5 광학현미경 조직사진

18Mn TWIP 강과 12Mn TWIP강의 변형 전의 미세조직 사진을 그림 30에 나타내었고 변형 후 파단된 시편의 조직사진을 그림 31와 32에 각각 나타내었다. 변형 전의 광학현미경 미세조직 사진에서는 기계적 쌍정이 전혀 없는 것을 확인할 수 있고 변형 후의 광학현미경 미세조직 사진에서는 대부분의 결정립내부에 매우 미세한 기계적 쌍정이 형성된 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2.6 흡수 에너지

Crash-worthiness 모델에서는 자동차의 충돌해석에서 10%까지의 응력-변형률 데이터가 중요하다고 한다<sup>[23]</sup>. 그러므로 변형률 10%까지의 공칭응력-변형률 곡선의 면적으로 흡수에너지를 계산하였고, 변형률 속도 변화와 흡수에너지의 관계를 그림 33에 나타내었다. 변형률속도  $10^{-4}/\text{sec}$ 에서  $10^{-1}/\text{sec}$ 까지는 18Mn TWIP과 12Mn TWIP 둘 다 55MPa이상의 높은 흡수 에너지를 나타내었다. 변형률 속도  $10^0/\text{sec}$  이후에는 18Mn TWIP은 저속에서의 결과보다 낮은 값을 나타낸다. 이는 18Mn TWIP의 경우 변형률 속도 증가에 따라 인장강도 값이 감소하는 경향을 나타내기 때문인 것으로 생각된다. 하지만, 12Mn TWIP은  $10^0/\text{sec}$  이후 흡수에너지가 증가하여 300/sec에서 약 90MPa의 높은 흡수에너지를 나타낸다.

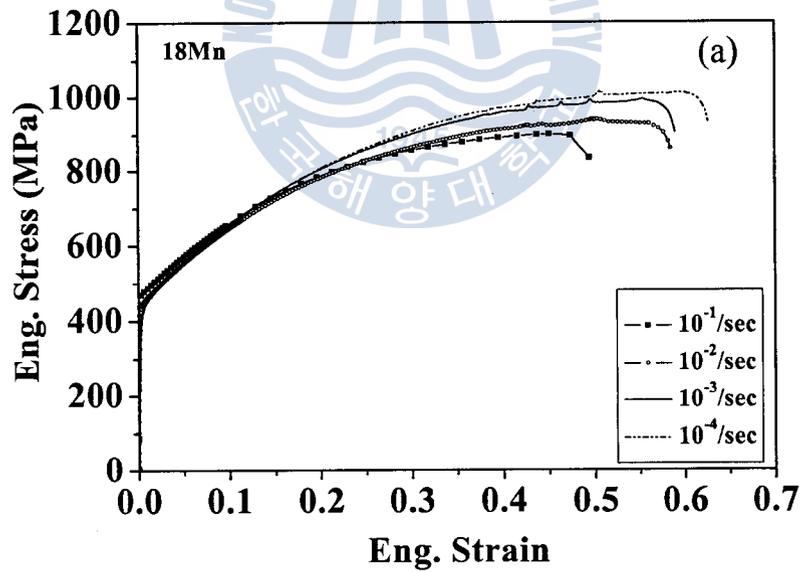
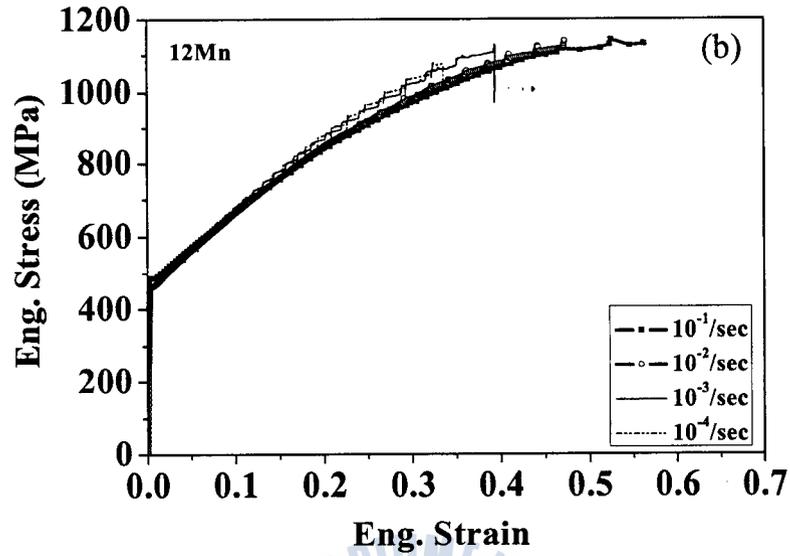


Fig. 22 The engineering stress-strain curves of (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP with different quasi-static strain rates.

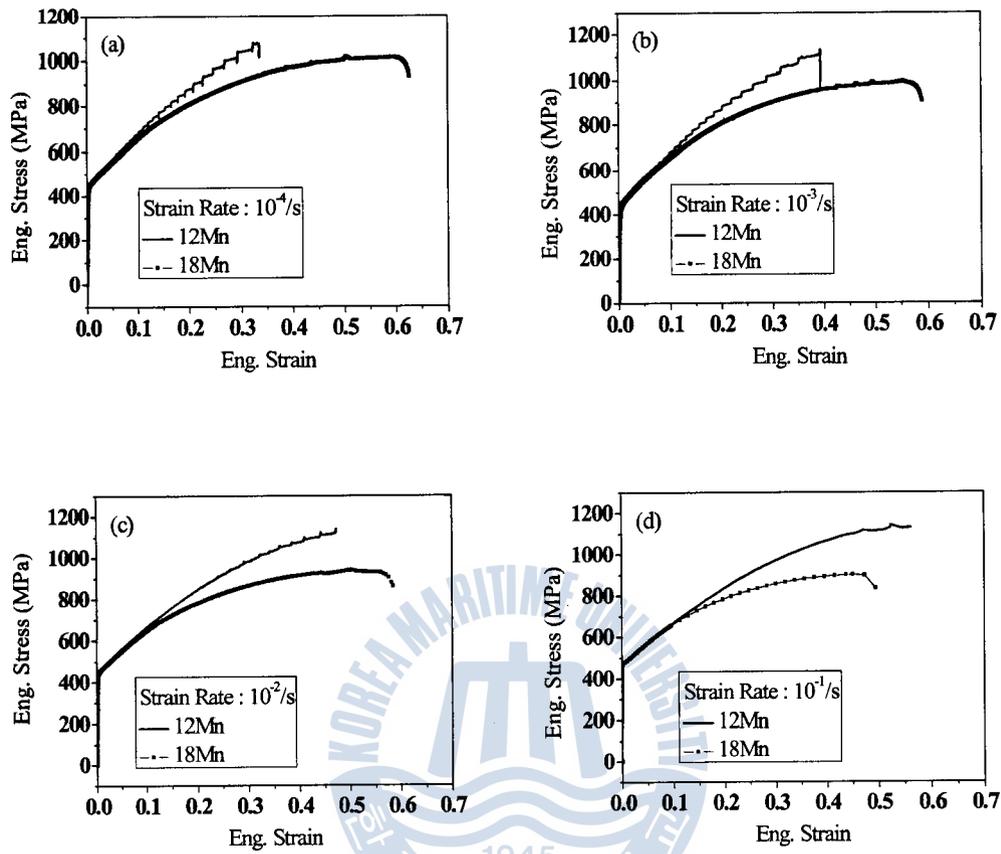


Fig. 23 Engineering stress-strain curves of 18Mn TWIP and 12Mn TWIP at the each strain rates (a)  $10^{-4}/\text{sec}$ , (b)  $10^{-3}/\text{sec}$ , (c)  $10^{-2}/\text{sec}$  and (d)  $10^{-1}/\text{sec}$ .

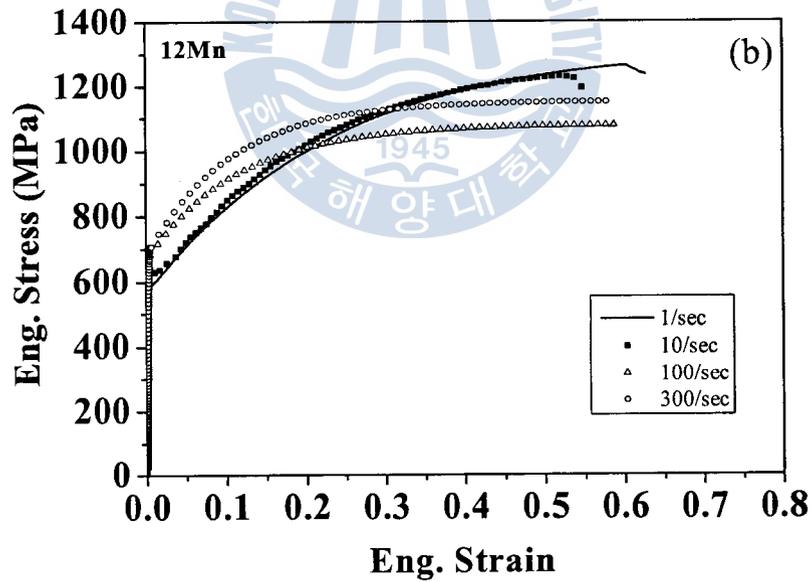
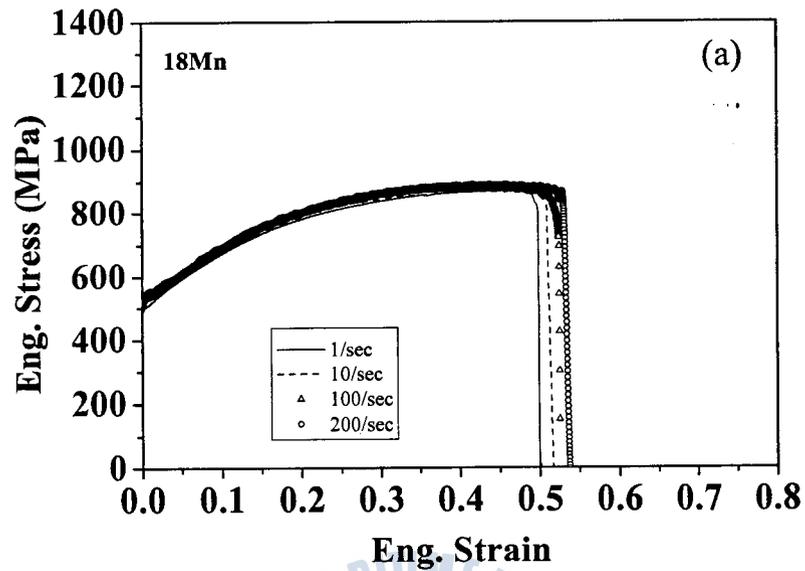


Fig. 24 The engineering stress-strain curves of (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP at high strain rates.

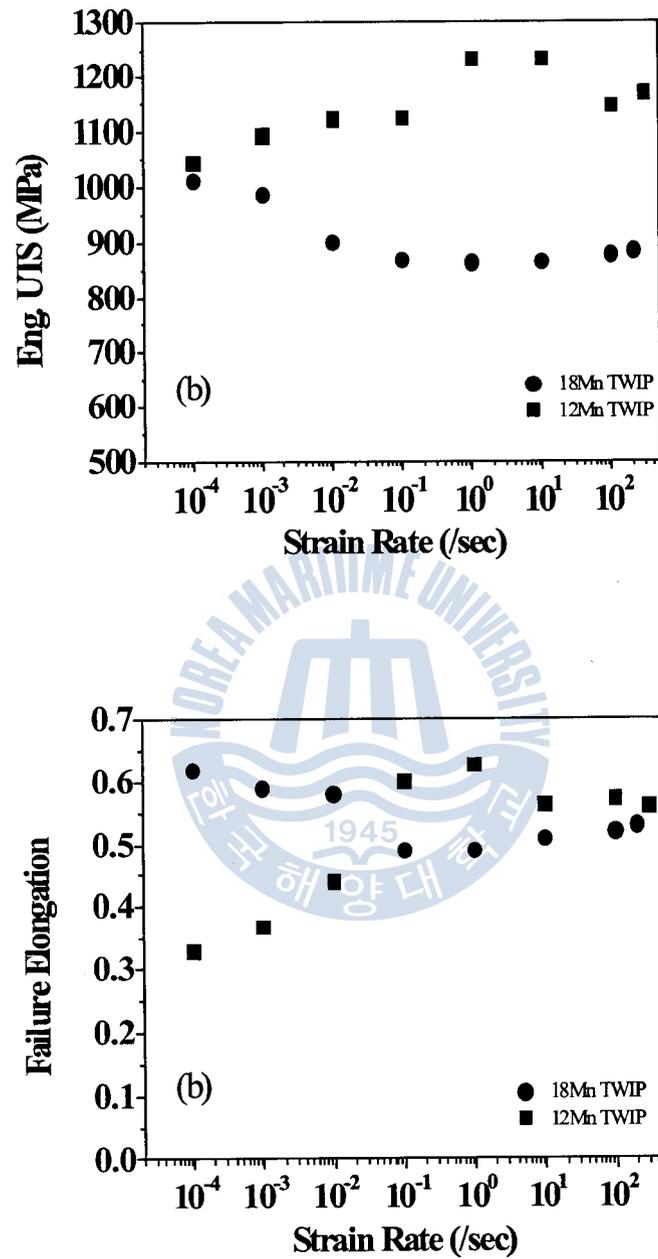


Fig. 25 The effect of strain rate on (a) the strength and (b) elongation.

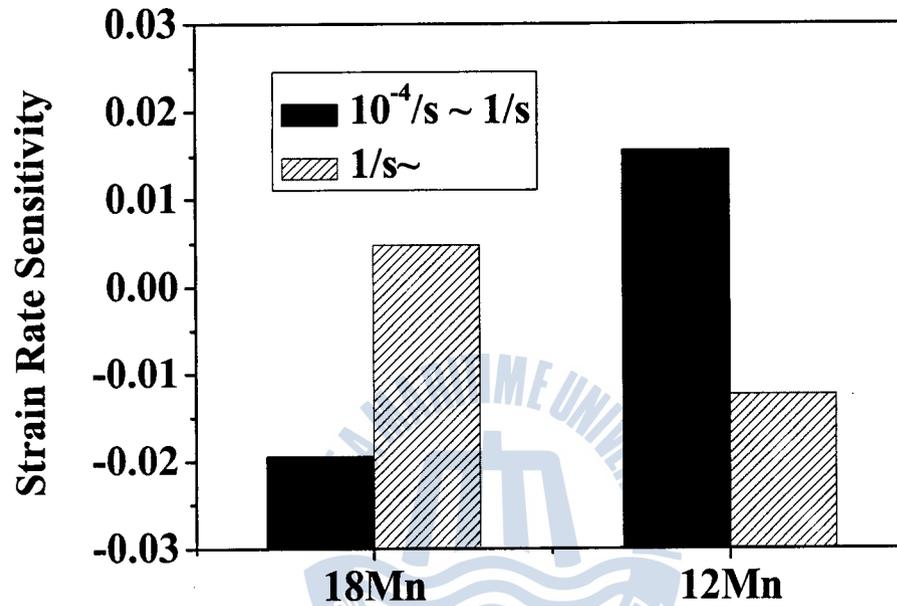


Fig. 26 Strain rate sensitivity of true stress for TWIP steels.

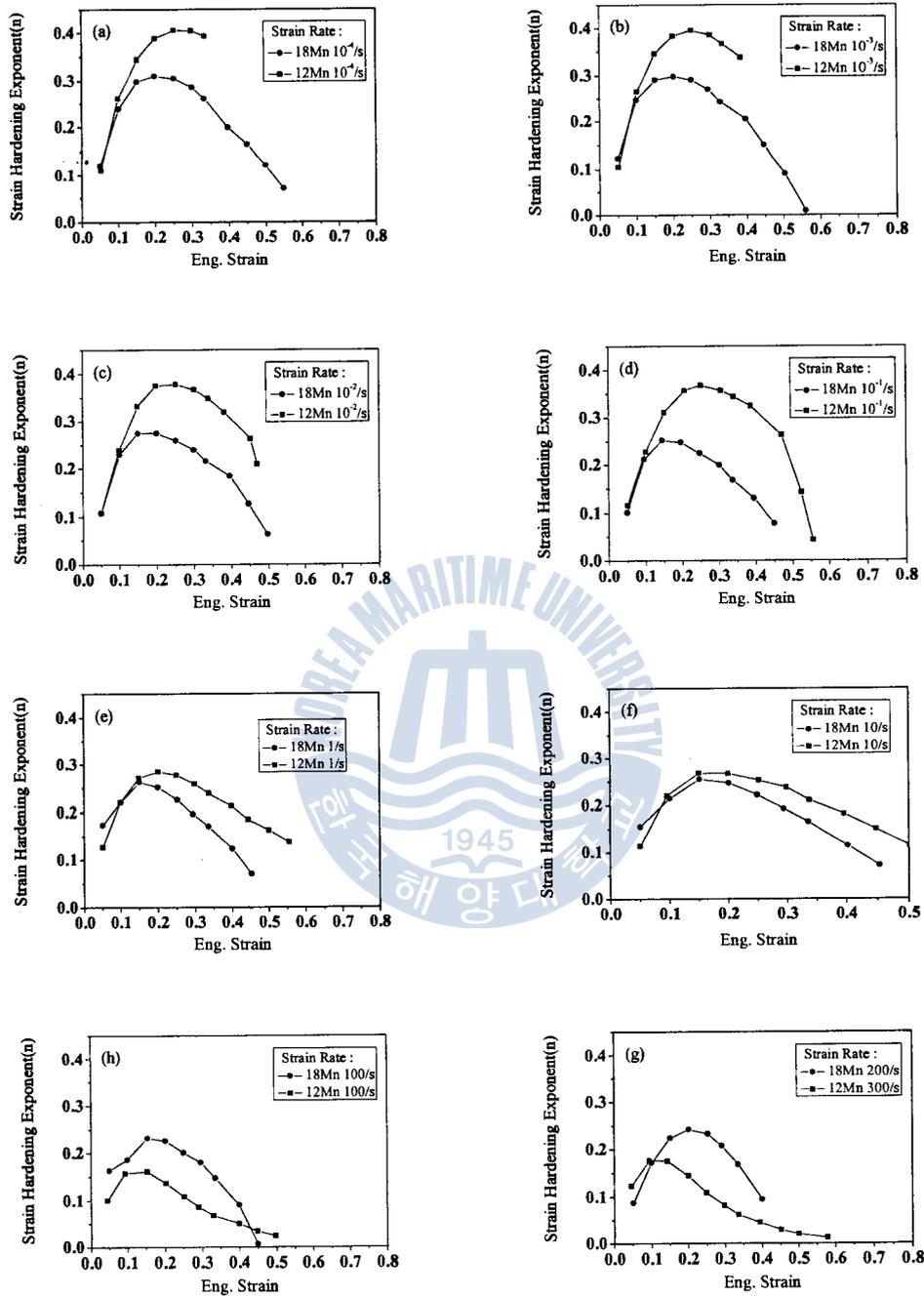


Fig. 27 Strain hardening exponents at each strain rate (a)  $10^{-4}/\text{sec}$ , (b)  $10^{-3}/\text{sec}$ , (c)  $10^{-2}/\text{sec}$ , (d)  $10^{-1}/\text{sec}$ , (e)  $1/\text{sec}$ , (f)  $10/\text{sec}$ , (g)  $100/\text{sec}$  and (h)  $200, 300/\text{sec}$

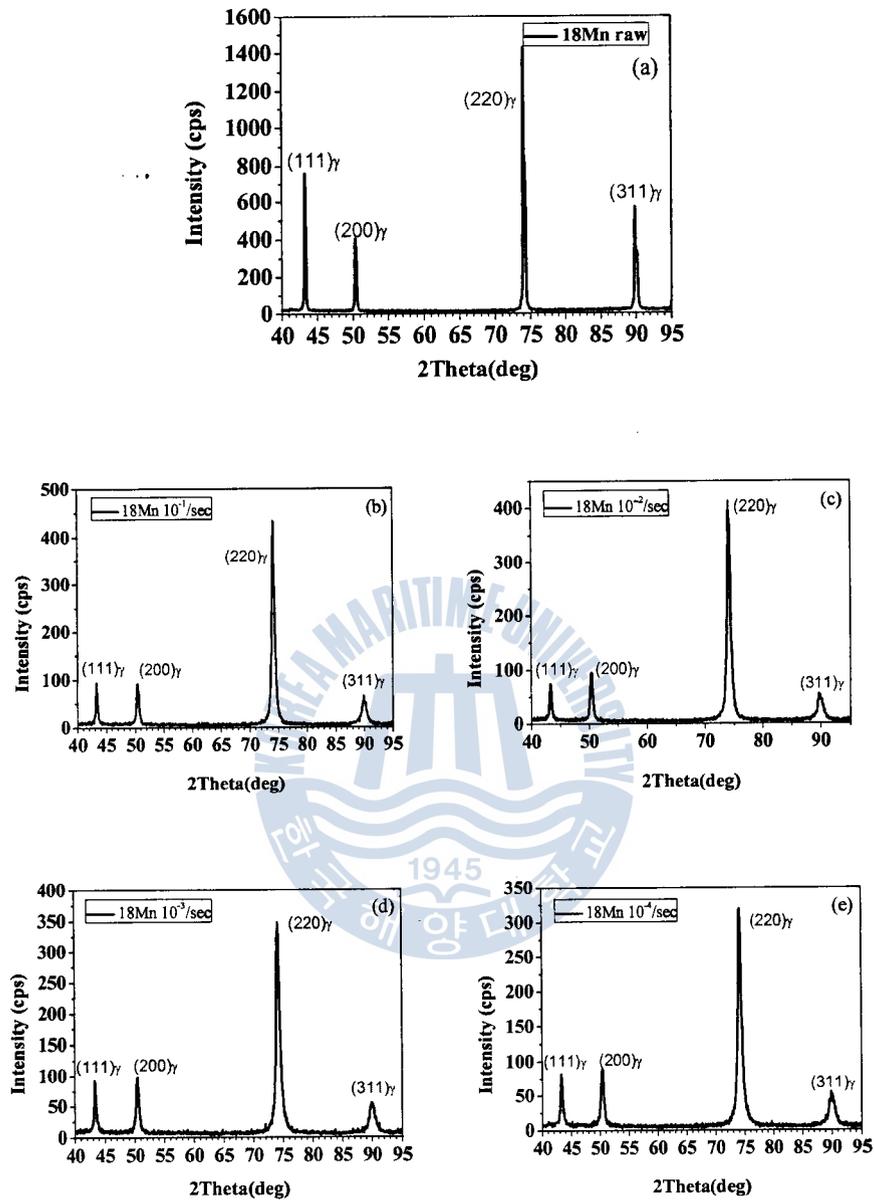


Fig. 28 The X-ray diffraction results of (a) undeformed specimen of 18Mn TWIP and of the fractured specimen of 18Mn TWIP at the strain rate of (b)  $10^{-1}/\text{sec}$ , (c)  $10^{-2}/\text{sec}$ , (d)  $10^{-3}/\text{sec}$  and (e)  $10^{-4}/\text{sec}$ .

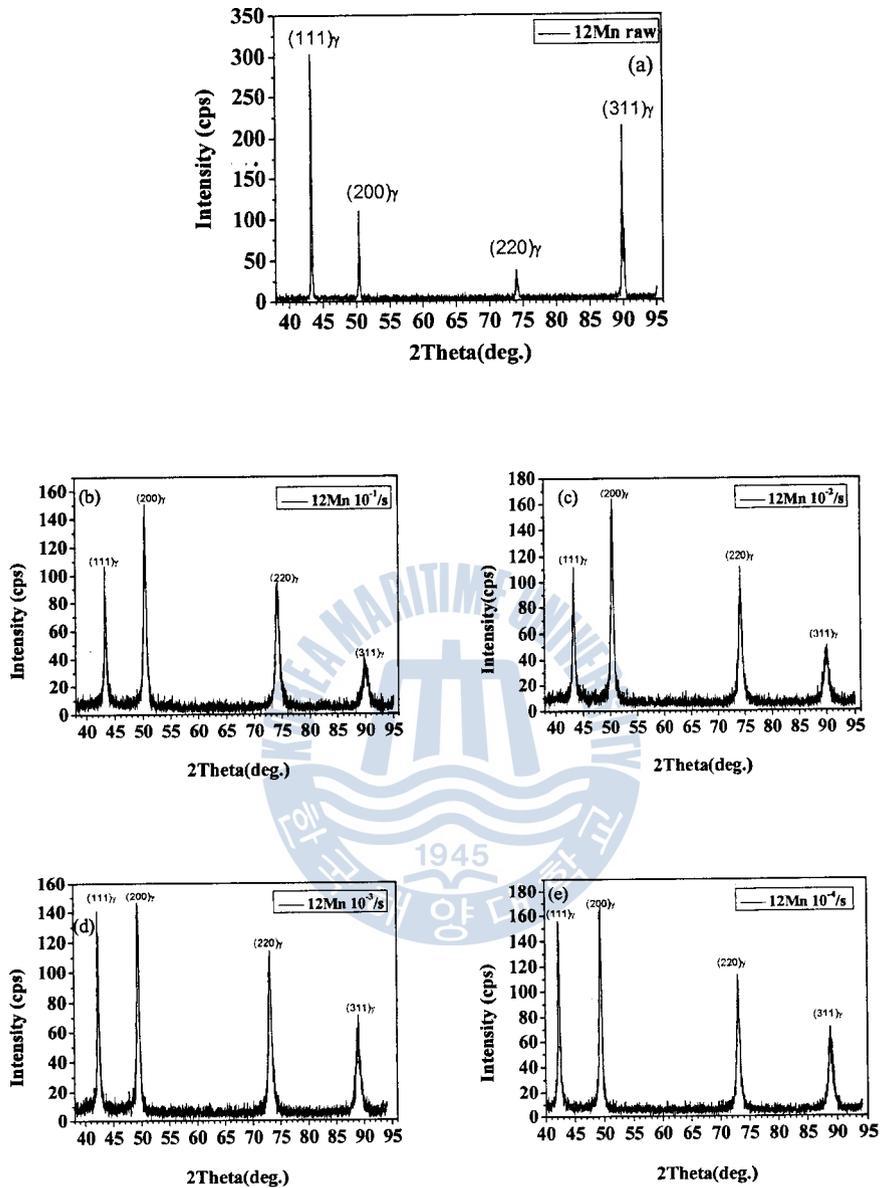


Fig. 29 The X-ray diffraction results of (a) undeformed specimen of 12Mn TWIP and of the fractured specimen of 12Mn TWIP at the strain rate of (b)  $10^{-1}/s$ , (c)  $10^{-2}/s$ , (d)  $10^{-3}/s$  and (e)  $10^{-4}/s$ .

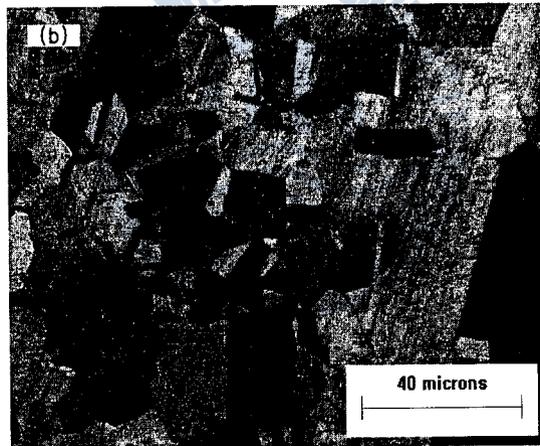
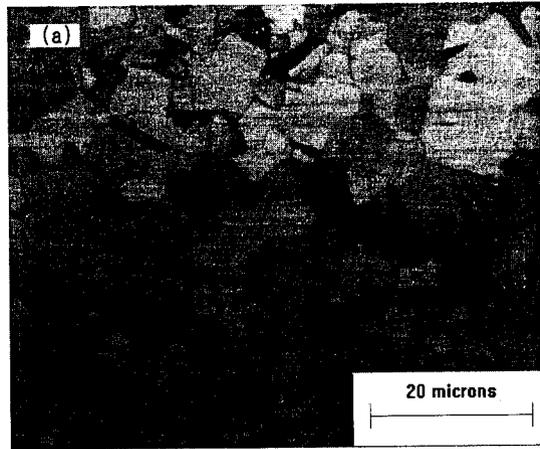


Fig. 30 The micrography of (a) undeformed specimen of 18Mn TWIP and of (a) undeformed specimen of 12Mn TWIP.

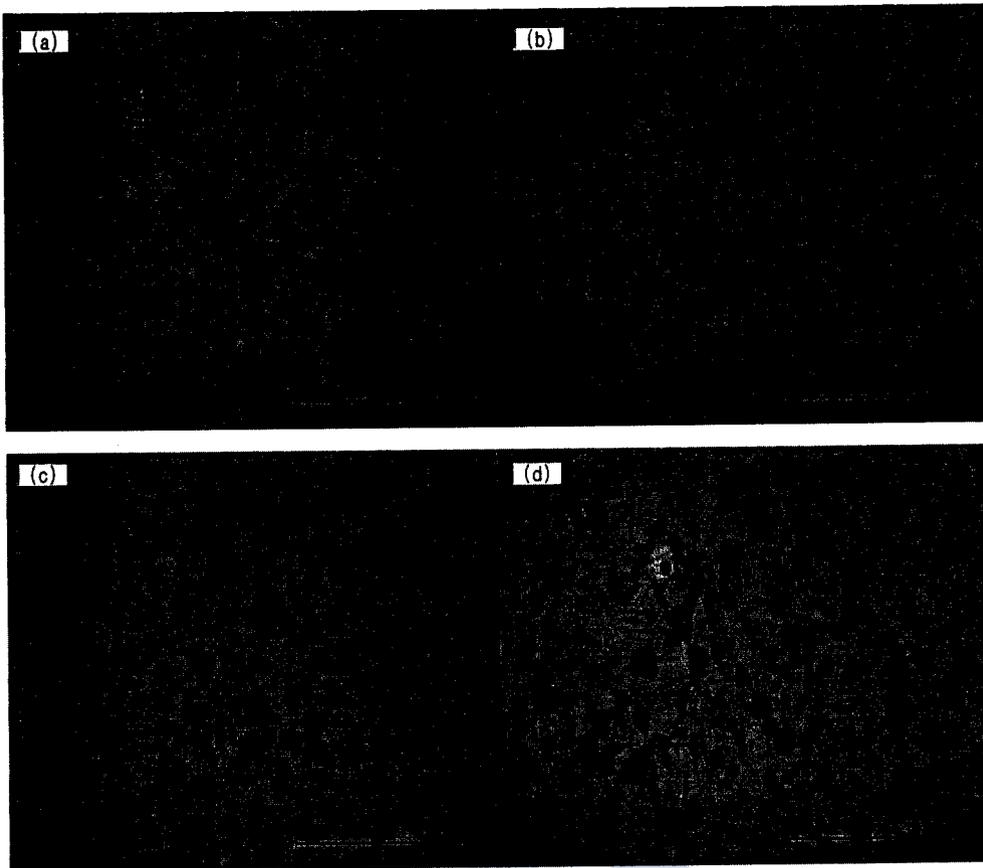


Fig. 31 The micrography of the fractured specimen of 18Mn TWIP at the strain rate of (a)  $10^{-1}/\text{sec}$ , (b)  $10^{-2}/\text{sec}$ , (c)  $10^{-3}/\text{sec}$  and (d)  $10^{-4}/\text{sec}$ .

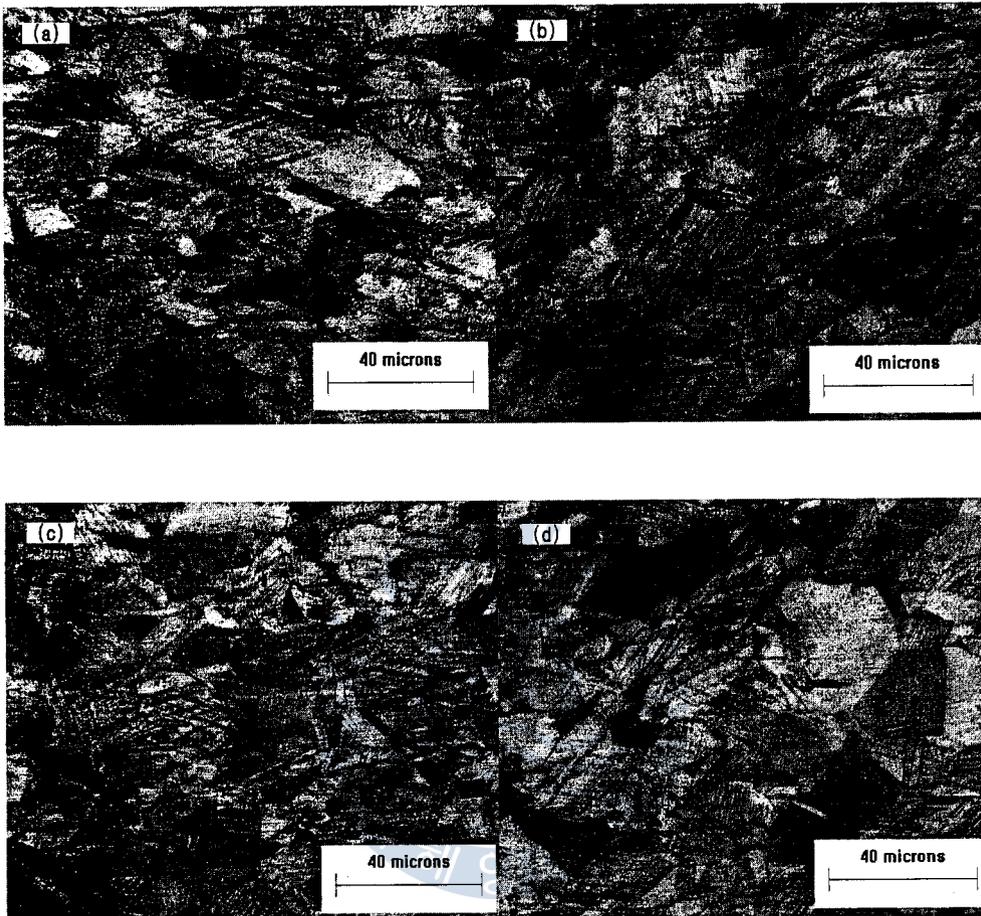


Fig. 32 The micrography of the fractured specimen of 12Mn TWIP at the strain rate of (a)  $10^{-1}$ /sec, (b)  $10^{-2}$ /sec, (c)  $10^{-3}$ /s and (d)  $10^{-4}$ /sec.

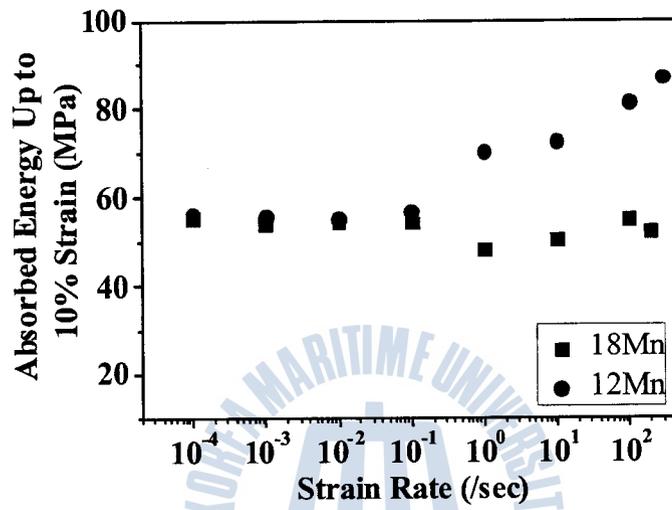
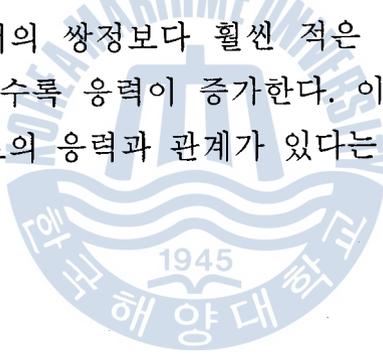


Fig. 33 The absorbed energy up to 10% engineering strain.

## 4.3 고온 인장시험 결과

### 4.3.1 공칭응력-공칭변형률 곡선

변형률 속도  $10^{-2}/\text{sec}$ 에서 상온에서부터 온도를 달리하여 시험한 공칭 응력-공칭변형률속도의 곡선을 그림 34에 나타내었다. 낮은 온도에서는 곡선에 serration이 나타나지만  $200^{\circ}\text{C}$ 를 넘어서면 나타나지 않는다. 인장강도와 연신율에 대한 온도의 영향을 그림 35에 정리하여 나타내었다. 인장강도는  $200^{\circ}\text{C}$ 까지는 비슷하지만  $200^{\circ}\text{C}$  이후부터는 급격하게 감소하는 경향을 나타낸다. 그림 36과 37에 각각 나타낸 18Mn TWIP강과 12Mn TWIP강의 미세조직 사진에서 그 이유를 찾을 수 있다. 두 합금 모두가  $200^{\circ}\text{C}$ 를 초과하는 온도에서는 결정립내부에 형성된 쌍정의 양이  $200^{\circ}\text{C}$  이하의 온도에서의 쌍정보다 훨씬 적은 것을 확인 할 수 있다. 즉 기계적 쌍정이 많을수록 응력이 증가한다. 이는 소성변형 중 형성되는 기계적 쌍정이 재료의 응력과 관계가 있다는 것을 뒷받침해 준다.



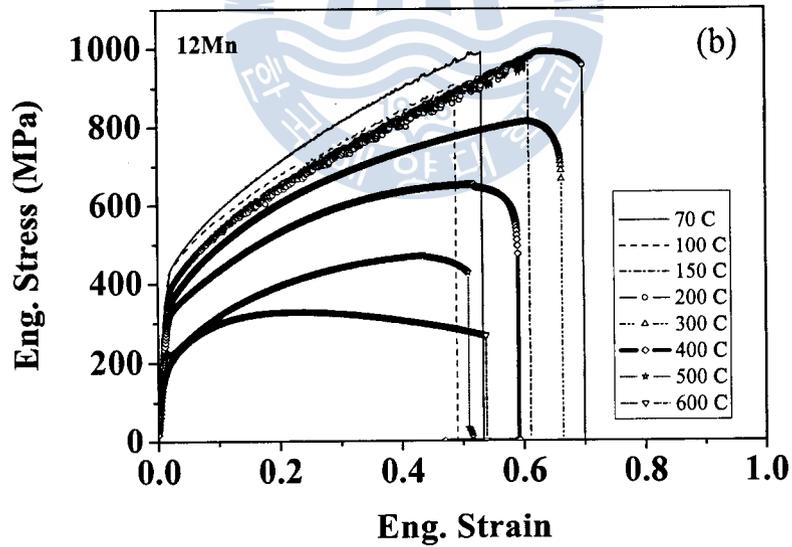
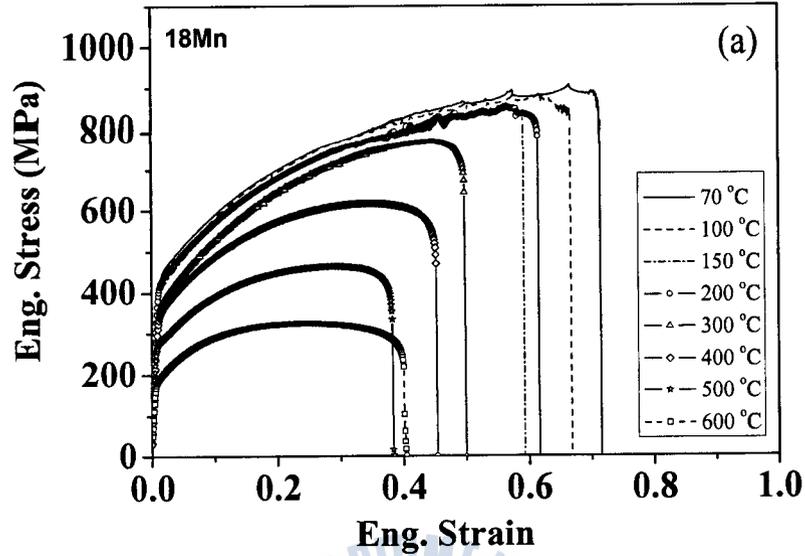


Fig. 34 The engineering stress-strain curves of (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP with different test temperatures at the strain rate of  $10^{-2}$ /sec.

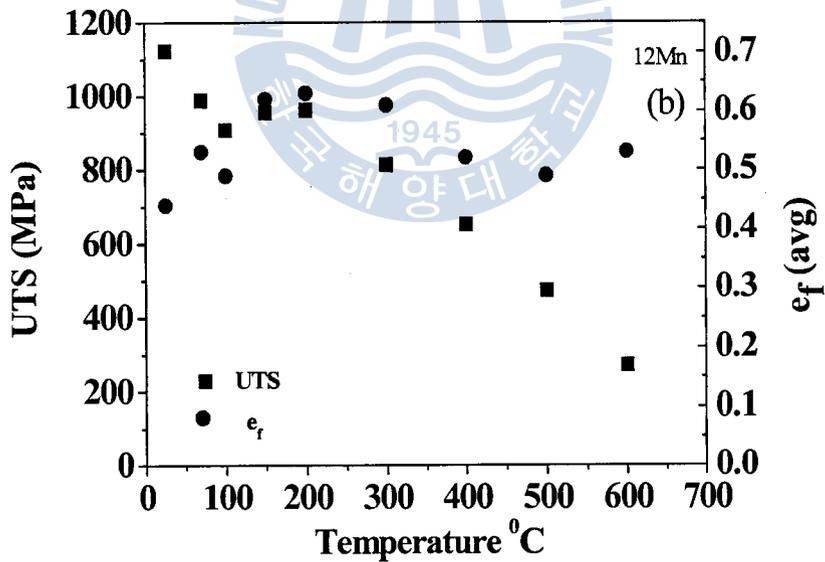
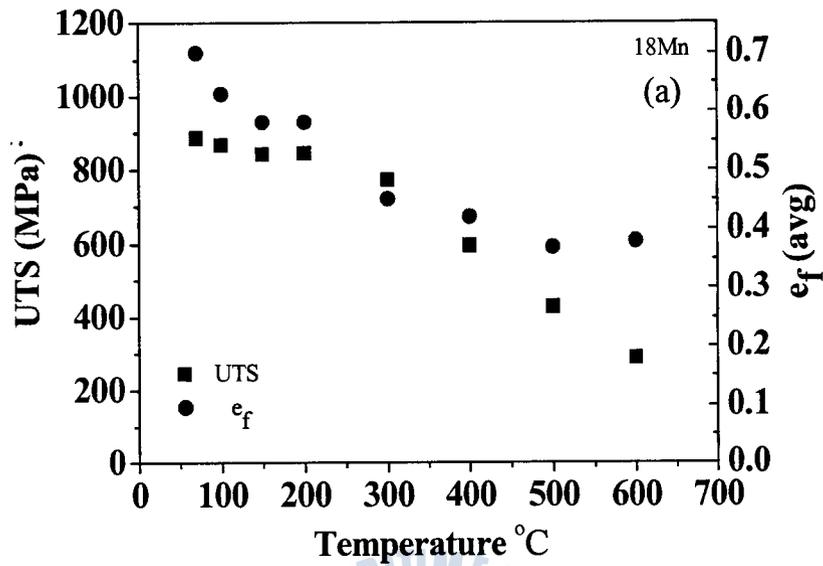


Fig. 35 The effect of test temperature of (a) 18Mn TWIP and (b) 12Mn TWIP on the strength and the elongation.

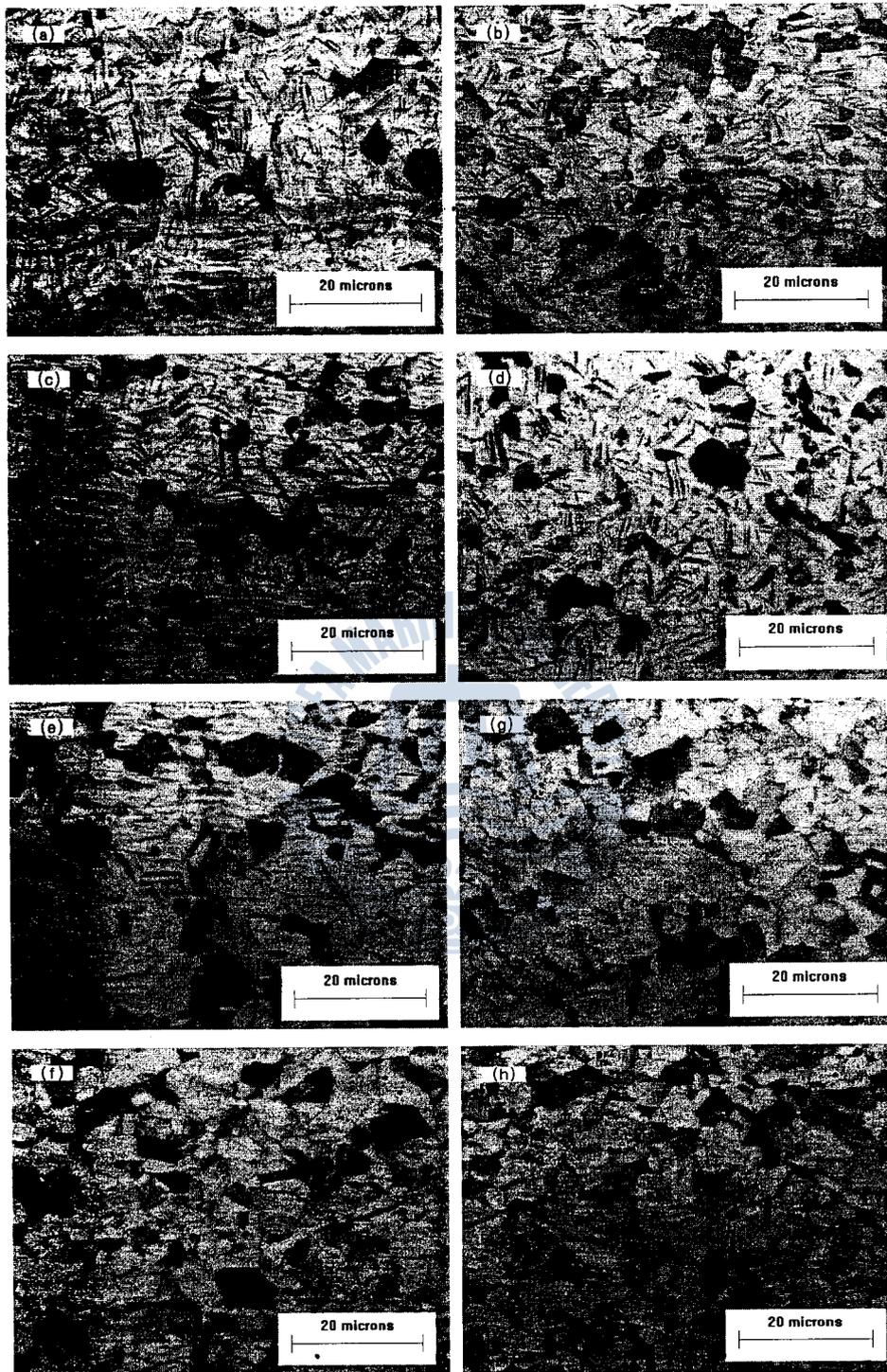


Fig. 36 The micrograph of 18Mn TWIP tested at (a) 70°C, (b) 100°C, (c) 150°C, (d) 200°C, (e) 300°C, (f) 400°C, (g) 500°C and (h) 600°C.

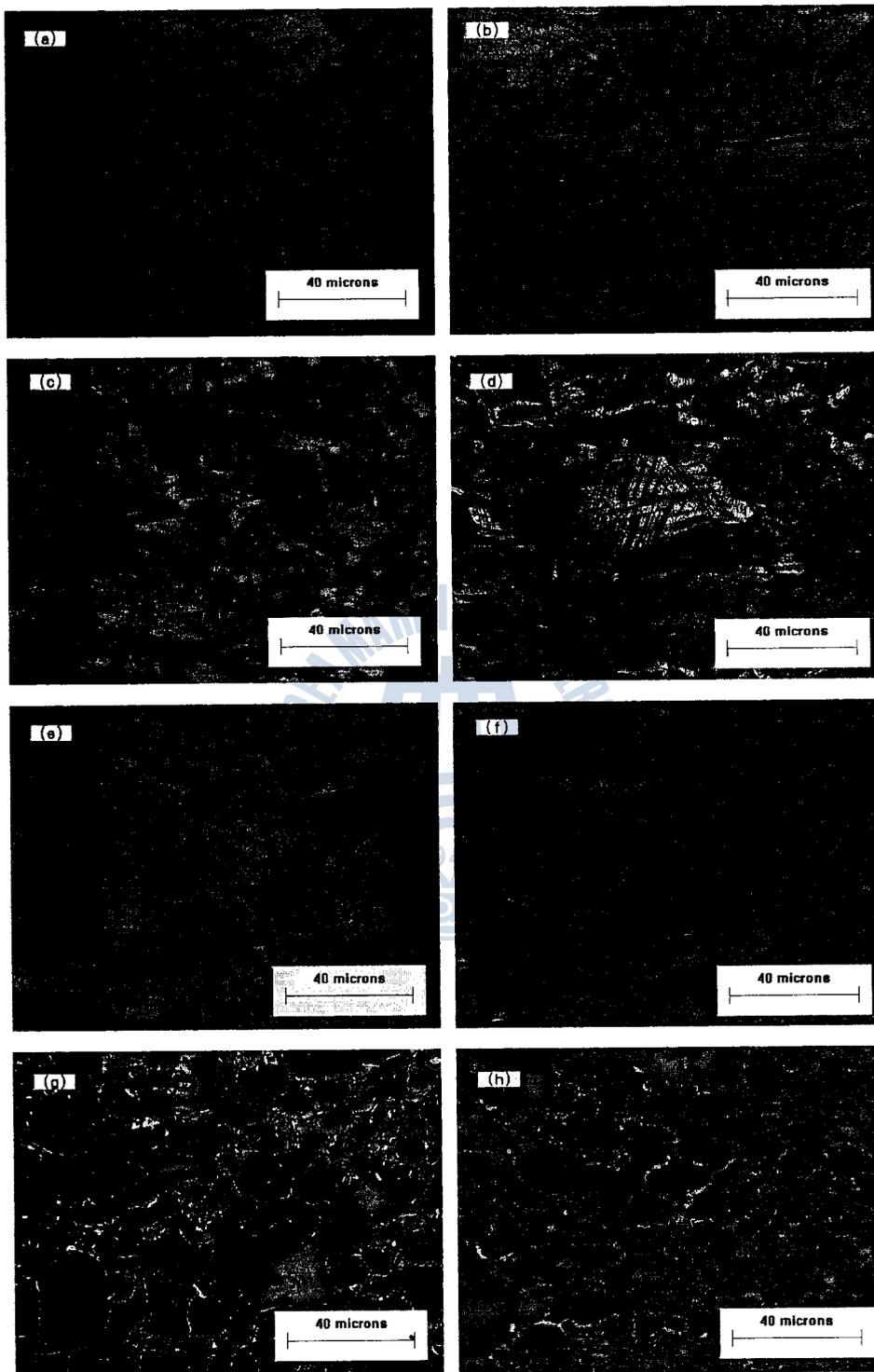


Fig. 37 The micrography of 12Mn TWIP tested at (a) 70°C, (b) 100°C, (c) 150°C, (d) 200°C, (e) 300°C, (f) 400°C, (g) 500°C and (h) 600°C.

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 Fe-18Mn-1.5Al-0.6C (18Mn TWIP)과 Fe-12Mn-2Si-0.9C (12Mn TWIP)강의 기계적 성질에 미치는 변형률 속도 및 인장 시험 온도의 영향을 조사하였다. 또한 변형에 따른 미세조직 변화를 알기 위하여 변형율에 따른 twinned grain fraction을 조사하고 twinned grain fraction과 강도의 상관관계를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Twinned grain fraction은 모든 변형률 속도와 변형률에 대해 18Mn TWIP보다 12Mn TWIP이 높은 값을 나타내었다. 또한 twinned grain fraction이 증가 할수록 그에 대응하는 변형률에서의 응력 역시 증가하는 것으로 보아 twinned grain fraction과 응력은 직접적인 연관 관계가 있다.
- (2) 18Mn TWIP은  $10^{-4}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 인장했을 때 1,000MPa 수준의 인장강도와 60%가 넘는 높은 연신율을 나타내었고 12Mn TWIP은  $10^{-1}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 인장했을 때 1,100 MPa 이상의 높은 인장강도와 약 60%의 연신율을 나타내었다.
- (3)  $10^{-1}/\text{sec}$  이하의 변형률 속도에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 18Mn TWIP의 인장강도와 연신율은 감소하였고 12Mn TWIP은 인장강도와 연신율이 증가하였다. 하지만,  $10^0/\text{sec}$ 이상의 높은 변형률 속도에서는 인장강도와 연신율에 대한 변형률 속도의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 낮은 변형률 속도에서 18Mn TWIP보다 12Mn TWIP이 높은 가공경화지수를 나타내는 것은 twinning rate가 18Mn TWIP보다 12Mn TWIP이 높기 때문이다.

(4) X선 회절 분석결과 변형 전과 후의 모든 상이 오스테나이트인 것으로 보아 TRIP변태는 일어나지 않았고 TWIP강의 강화에 영향을 주는 것은 기계적 쌍정인 것을 확인하였다.

(5)  $10^{-4}/\text{sec} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ 의 낮은 변형률 속도에서는 변형속도가 증가해도 10% 흡수에너지는 거의 일정하였고 100/sec 이상의 높은 변형률 속도에서는 18Mn TWIP은 낮은 변형률 속도보다 오히려 10% 흡수에너지가 약간 감소하는 경향을 나타내었으나 12Mn TWIP은 증가하는 결과를 나타내었다.

(6) 고온 인장 시험에서 200°C까지는 18Mn TWIP과 12Mn TWIP 모두 시험온도에 관계없이 높은 인장강도를 나타내었으나 200°C 이후에는 확연히 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 200°C 이후의 미세조직 사진에서는 그 이전과 비교하여 twinned grain이 확연히 감소하는 것으로 보아 높은 온도에서 적층결합에너지의 증가로 twinning이 어려워진 것의 영향으로 해석된다.

## 참 고 문 헌

1. O. Grassel, L. Kruger, G. Frommeyer and L.W. Meyer, 「High strength Fe-Mn-(Al, Si) TWIP/TWIP steels development-properties-application」, Int. J. Plast., 16 (2000) 1391
2. G. Frommeyer, U. Brux and P. Neumann, 「Supra-ductile and high-strength manganese-TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes」, ISIJ Int., 43 (2003) 438
3. T. Senuma, 「Physical metallurgy of modern high strength steel sheets」, ISIJ Int., 41 (2001) 520
4. 진광근, 「TWIP형 고강도강 개발 및 제조기술」, 재료마당, 2 (2006) 12
5. Y. Sakuma, D. K. Matlock, and G. Krauss, 「Intercritically annealed and isothermally transformed 0.15 Pct C steels containing 1.2 Pct Si-1.5 Pct Mn and 4 Pct Ni: Part I. Transformation, microstructure, and room-temperature mechanical properties」, Metall. Trans. A, 23A (1992) 1221
6. Y. Sakuma, D. K. Matlock, and G. Krauss, 「Intercritically annealed and isothermally transformed 0.15 Pct C steels containing 1.2 Pct Si-1.5 Pct Mn and 4 Pct Ni: Part II. Effect of testing temperature on stress-strain behavior and deformation induced austenite transformation」, Metall. Trans. A, 23A (1992) 1233
7. W. C. Jeong, D. K. Matlock, and G. Krauss, 「Observation of deformation and transformation behavior of retained austenite in a 0.14C-1.2Si-1.5Mn steel with ferrite-bainite-austenite structure」, Mater. Sci. & Eng., 165 (1993) 1
8. W. C. Jeong, D. K. Matlock, and G. Krauss, 「Effects of tensile-testing temperature on deformation and transformation behavior of retained austenite in a 0.14C-1.2Si-1.5Mn steel with ferrite-bainite-austenite structure」, Mater. Sci. & Eng., 165

(1993) 9

9. N. C. Goel, J. P. Chakravarty, and K. Tangri, 「The influence of starting microstructure on the retention and mechanical stability of austenite in an intercritically annealed-low alloy dual-phase steel」, Metall. Trans. A, 18A (1987) 5
10. I.D. Choi, D.M. Bruce, S.J. Kim, C.G. Lee, S.H. Park, D.K. Matlock, and J.G. Speer, 「Deformation behavior of low carbon TRIP sheet steels at high strain rates」, ISIJ Int., 42 (2002) 1483
11. K. Sato, M. Ichinose, Y. Hirotsu and Y. Inoue, ISIJ Int., 29 (1989) 868
12. G.B. Olson and M. Cohen, 「A general mechanism of martensitic nucleation: Part I. General concepts and the FCC → HCP transformation」, Met. Trans. A, 7A (1976) 1897
13. K. Ishida, T. Nishizawa, Trans. Jpn. Inst. Met., 15 (1974) 225
14. R.E. Schramm, R.P. Reed, 「Stacking fault energies of seven commercial austenitic stainless steels」, Metall. Trans. A, 6 (1975) 1345
15. L. Remy, A. Pineau, 「Twinning and strain-induced F.C.C. → H.C.P. transformation in the Fe-Mn-Cr-C system」, Mater. Sci. Eng., 28 (1977) 99
16. S. Allain, J-P. Chateau, D. Dahnoun, O. Bouaziz, 「Modeling of mechanical twinning in a high manganese content austenitic steel」, Mater. Sci. Eng. A, 387-389 (2004) 272
17. T. Shun, C. M. Wan, J. G. Byrne, 「A study of work hardening in austenitic Fe-Mn-C and Fe-Mn-Al-C alloys」, Acta Met., 40 (1992) 3407
18. O. Bouaziz, S. Allain, C. Scott, 「Effect of grain and twin boundaries on the hardening mechanisms of twinning-induced plasticity steels」, Scripta Mat., 58 (2008) 484

19. L. Remy, 「Kinetics of f.c.c. deformation twinning and its relationship to stress-strain behaviour」, Acta Metall., 26 (1977) 443
20. Z. Nishiyama, M. Oka, H. Nakagawa, Trans. Jpn. Inst. Met., 6 (1965) 88
21. K.S. Raghavan, A.S. Sastri, and M.J. Marcinkowski, Trans. TMS-AIME, 245 (1969) 1569
22. N.P. Goss, Trans. ASM, 34 (1945) 630
23. ULSAB-AVC, Technical Transfer Dispatch #6, Appendix III, 3 (2001)



## 감사의 글

지난 20대의 대부분을 재료강도실험실에서 보내면서 제 삶에 중요한 부분을 많이 배웠습니다. 학창시절 배우고 익힌 학문적 성과도 중요하지만, 오늘 이 순간까지 항상 저를 걱정해주시고 도움을 주신 분들과의 인연 또한 소중히 간직하겠습니다.

짧은 학위 과정동안 부족함이 많았던 저에게 세심한 조언과 학문 그리고 인생의 바른 길을 알려주신 최일동 지도교수님의 크신 은혜에 진심으로 감사드립니다. 최일동 교수님 뿐만 아니라, 제가 대학에 입학하면서부터 전공지식을 전해주시는 김영식 교수님, 문경만 교수님, 이성열 교수님, 김윤해 교수님, 이병우 교수님께 깊이 감사드립니다.

많이 부족한 저에게 인생의 충고와 관심을 보여주셨고, 재료강도실험실이 존재하게 해 주셨던 실험실 선배님들, 박영도, 한공, 안경화, 박상곤, 진선화, 송병환, 주기운, 한창훈, 조권도, 박환녕, 박종민, 전상혁, 김종영, 한향수, 김동민, 방해중, 손동민, 이상민, 오광열, 박효준, 서주현, 이성희 님들께 감사하단 말씀 전합니다. 더불어 저와 함께 실험실을 이끌었던, 성규, 종배, 치완이, 은지, 임지현, 장지현, 방형진, 서정철 그리고 최근에 실험실에 들어와서 앞으로 이끌어갈 송샘, 김시훈에게 부족한 선배 때문에 고생했고, 고맙다고 전하고 싶습니다.

돌아보면 정말 많은 사람들의 도움과 관심 속에서 즐겁게 생활했습니다. 참 행복했습니다. 이제 저 또한 여러분들처럼 롤러코스터를 타려합니다. 여러분의 지속적인 관심과 사랑 부탁드립니다.

마지막으로, 많은 어려움 속에서도 저 하나만을 생각하며 매일 걱정해 밤을 지새우시는 부모님께 감사드립니다. 평생을 다 갚지 못할 사랑을 주셔서 감사합니다. 부모님께 이 논문을 바치며 감사의 글을 마칠 것입니다.

# The Effect of Twinned Grain Fraction on Mechanical Properties of Lean Mn TWIP Steels.

Jinyong Kim

*Department of Materials Engineering  
Graduate School  
Korea Maritime University*

## ABSTRACT

Twinning-induced plasticity (TWIP) steels which have a high strength and high elongation use a twinning phenomenon during deformation. TWIP steels with more than 25% Mn can easily reveal the good combination of high strength and ductility with the conventional manufacturing processes without severe plastic deformation and accelerated cooling. However, the steels could not have an appropriate stacking fault energy for twinning with decreasing Mn content. In the present study, it was tried to make steels with lean Mn, that is, Fe-18Mn-1.5Al-0.6C (18Mn TWIP) steel and Fe-12Mn-2Si-0.9C (12Mn TWIP) steel and tested at various temperatures (25°C ~ 600°C) and strain rates ( $10^{-4}/s \sim 10^2/s$ ) to investigate the effect of temperature and strain rates on the mechanical properties of lean Mn steel. Strength and ductility of 18Mn TWIP steel were increased with decreasing the strain rate at the range of  $10^{-4}/s \sim 10^{-1}/s$ , but those of 12Mn TWIP steel were decreased with decreasing the strain rate at the range of  $10^{-4}/s \sim 10^{-1}/s$ . However, the effect of strain rates over  $10^0/s$  on strength and ductility of those steels was not significant.

Strength and ductility of steels increased with decreasing test temperature at the range of 25°C ~ 600°C. The deformation mechanisms of lean Mn TWIP steels were studied with the samples deformed with different amounts of strain using the fixture capable of controlling the deformation during tensile test. The volume fraction of twinned grain of 18Mn and 12Mn TWIP steel was increased with increasing strain and the stress also increased with increasing twin formation. Therefore, UTS is directly related with the volume fraction of twinned grain.

