

工學碩士 學位論文

잔류오스테나이트의 安定度에 따른
TRIP강의 高速引張 特性에 관한 研究

The Effect of Retained Austenite Stability
on High Speed Deformation Behavior of TRIP
Steels

指導教授 崔 日 東

2005年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

金 東 民

**The Effect of Retained Austenite Stability
on High Speed Deformation Behavior of
TRIP Steels**

**by
Dong-Min Kim**

**Department of Materials Engineering
Graduate School
Korea Maritime University**

**A thesis submitted to faculty of Korea Maritime
University in partial fulfillment of the requirements for
the degree of master in the field of materials
engineering**

**Busan, Korea
02. 2005**

**Approved by Prof. Ildong Choi
Major Advisor**

本 論 文 을 金 東 民 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

主 審 工 學 博 士 李 成 烈 ㉞

副 審 工 學 博 士 金 永 埴 ㉞

副 審 工 學 博 士 崔 日 東 ㉞

2005年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

金 東 民

목 차

1. 서 론	1
2. 이론적 배경	3
2.1 TRIP(Transformation Induced Plasticity) 냉연강판	3
2.1.1 변태유기소성(TRIP) 현상	4
2.2 잔류오스테나이트 형성에 영향을 미치는 인자	8
2.2.1 합금원소의 영향	8
2.2.2 열처리 조건의 영향	9
2.3 잔류오스테나이트의 안정도	11
2.3.1 잔류오스테나이트 안정도에 미치는 합금원소의 영향	11
2.3.2 연성 향상에 기여하는 잔류오스테나이트 기구	12
2.4 고속인장시험	14
2.4.1 TRIP강의 고속인장특성	14
2.4.2 고속변형에서의 TRIP 냉연강판	21
3. 실험 방법	23
3.1 TRIP 냉연강판의 제조	23
3.2 이상영역 열처리 및 항온변태처리	24
3.3 고속인장시험	27
3.4 미세조직 관찰	30
3.5 잔류오스테나이트 부피분율 측정	30
4. 실험결과 및 고찰	32
4.1 미세조직 관찰	32
4.2 진응력 - 진변형률 곡선	36
4.3 Strain Rate Sensitivity	41
4.4 Elongation	43
4.5 Absorbed Energy	43
5. 결 론	49
참고문헌	51
Abstract	54

제 1 장 서 론

자동차 업계를 중심으로 생산성 및 안전성 향상과 경량화를 위하여 우수한 가공성을 가지는 고강도 강판에 대한 요구가 급속히 증대되고 있는 추세에 따라, 고강도와 고연성을 동시에 가질 수 있는 철강소재로서 소성변형 중 잔류오스테나이트가 마르텐사이트로 변태함에 의해 강도와 연성이 향상되는 TRIP형(Transformation Induced Plasticity) 냉연강판이 주목을 받고 있다¹⁾. TRIP 강은 Zackay 등에 의해 처음으로 개발된 이후^{2~5)}, 최근 C, Mn 및 Si를 주요 합금성분으로 하는 C-Mn-Si계 냉연강판을 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 이상영역으로 가열한 후 베이나이트변태 온도 영역에서 수 분간 항온변태처리하면 비교적 다량의 잔류 오스테나이트와 함께 우수한 인장강도와 연성을 얻을 수 있으며, 통상의 연속소둔설비(CAL, continuous annealing line)를 항온변태처리에 이용할 수 있음이 확인되어 현재까지 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이제까지의 TRIP형 냉연강판에 대한 연구는 주로 탄소함량이 0.2~0.4wt.%인 경우를 대상으로 연구가 진행되어 왔는데, 이와 같은 중탄소 TRIP형 냉연강판은 기존의 고강도 냉연강판과 비교하여 기계적 특성이 우수한 점 등의 여러 가지 장점이 있으나 탄소함량이 높음으로 인하여 냉연강판에 요구되는 중요한 특성 중의 하나인 용접성이 열악한 단점이 있다^{6~8)}. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해서는 탄소함량을 적극적으로 낮추어 주는 것이 필요하다.

한편, 환경문제가 심각하게 대두되면서 환경부담을 최소화하기 위하여 고강도와 고연성을 가지면서도 높은 재활용성과 환경오염의 발생이 낮은 새로운 개념의 환경 조화형 철강 신소재의 개발에 대

한 요구가 증대되고 있다^{9~11)}. 철강 재료의 재활용성을 극대화하기 위해서는 스크랩(scrap)의 수집과 분류 및 재용해 등의 후처리가 용이하도록 가능한 한 합금조성이 단순하여야 하며, 소재의 사용분야와 목적에 따라 다양한 기계적 특성을 나타낼 수 있어야 한다. C-Mn-Si계 TRIP형 냉연강판은 이와 같은 요구조건을 충분히 충족시킬 수 있기 때문에 환경 조화형 철강소재로서 적합하나, 용접성 향상을 위해 탄소함량을 낮출 경우 다량의 안정한 잔류오스테나이트를 얻기 힘들다. 이러한 안정한 잔류오스테나이트의 양은 함유하고 있는 탄소함량, 이상영역에서의 열처리 온도, 또한 항온변태처리의 온도와 시간 등에 의해서 좌우된다.

높은 안정도의 잔류오스테나이트를 가지는 TRIP형 냉연강판과 낮은 안정도의 잔류오스테나이트를 가지는 TRIP형 냉연강판의 기계적 성질에는 큰 차이가 난다. 이러한 TRIP형 냉연강판의 잔류오스테나이트의 안정도는 실제 고속 충돌시 TRIP강판의 충돌 특성을 좌우하게 되는데 이러한 특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 일반적으로 자동차 충돌시 얻어지는 재료의 변형률 속도는 대략 10/sec~300/sec 정도이다. 따라서 이 부근의 속도범위에서 재료거동을 정확히 파악하기 위해서는 100/sec~1000/sec 정도 high strain rate에서의 시험결과를 확보하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 잔류오스테나이트의 안정도가 높은 TRIP형 냉연강판과 안정도가 낮은 TRIP형 냉연강판들을 설계하여, $10^{-2}/\text{sec} \sim 6 \times 10^2/\text{sec}$ 의 high strain rate까지 넓은 변형률 속도범위에서 인장시험을 한 후 TRIP강의 잔류오스테나이트의 안정도가 고속인장특성에 어떻게 영향을 미치는지 조사하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 TRIP(Transformation Induced Plasticity) 냉연강판

1967년 Zackay 등^{12~13)}이 Fe-Cr-Ni계 준안정 오스테나이트 스테인레스(metastable austenite stainless)강에서의 TRIP 현상이 강재의 연성을 향상시킨다고 보고한 이래, 이러한 현상을 응용한 여러 범주의 고강도-고연성의 합금강이 개발되었으며^{13~17)}, 특히 Fe-C-Si-Mn계 저합금 TRIP강이 개발되어 그 응용성이 더욱 증대되고 있다. 자동차 업계를 중심으로 생산성이 우수한 press forming법을 적용하기 위하여 보다 우수한 연성을 가지는 초고강도 강판을 요구하고 있으며, 이에 부응하기 위하여 최근에 연구가 진행되고 있는 TRIP강은 잔류오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하여 매우 큰 소성을 일으키는 TRIP(Transformation Induced Plasticity) 현상 즉, 변태유기소성 현상을 이용한 초고강도 냉연강판이다. TRIP 강판은 잔류오스테나이트의 TRIP 현상에 의한 연성향상이 가장 중요한 목적이므로, 10% 이상의 잔류오스테나이트를 함유하여야 하며, 기존의 이상조직강 수준의 C 함량(0.1wt.% 이하)으로는 잔류오스테나이트의 부피분율이 감소함에 따라 TRIP 현상에 의한 연성향상 효과는 작아질 수밖에 없다. 따라서 초기 Matsumura 그룹의 TRIP강에 대한 연구는 주로 0.4wt.% 수준의 탄소를 함유한 중탄소강에 대한 것이었다^{16~19)}. 그러나 높은 탄소함량은 강재의 용접성을 급격히 저하시킴으로써, 인장강도 1000MPa, 연신율 40% 정도의 매우 우수한 재질에도 불구하고 그 사용은 극히 제한적일 수밖에 없다. 이에 따라, Sugimoto 그룹은 탄소함량

0.2wt.%(spot 용접이 가능한 탄소 조성의 범위)의 강재에 대한 연구를 활발히 진행하였으며^{15,20)}, TRIP 강판의 최적의 조성 및 제조 공정 등이 여러 연구자들에^{2~7,13~20)} 의해 확립되었다.

2.1.1 변태유기소성(TRIP) 현상

마르텐사이트 변태와 관련된 온도 변화에 따른 자유에너지 변화를 그림 1에 도식적으로 나타내었다²¹⁾. 강을 오스테나이트 영역으로 가열한 후 임계냉각속도 이상으로 급냉하면 마르텐사이트 변태를 일으킨다. 그러나 오스테나이트인 γ 상과 마르텐사이트인 α' 상의 자유에너지가 서로 같은 온도는 T_0 이지만, 마르텐사이트 변태는 격자변태로 체적변화와 탄성변형을 수반하기 때문에 이를 극복하기 위한 추가적인 자유 에너지가 필요하여 이보다 낮은 M_s 온도에서 변태가 일어난다. 따라서 오스테나이트의 자유에너지와 마르텐사이트의 자유에너지의 차이가 마르텐사이트 변태를 일으키기 위한 임계구동력으로 취급되고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 M_s 온도에서는 $\Delta G_{M_s}^{\gamma \rightarrow \alpha} = AB$ 에 해당하는 화학적 자유에너지가 변태구동력으로 작용한다. M_s 온도와 T_0 온도 사이의 온도인 T_1 에서는 외부에서 응력을 가하여 AB 와 같은 크기의 구동력이 작용하면 마르텐사이트 변태가 일어날 수 있다. 즉 $AB = CE$ 이면, $CE = CD + DE$ 인 관계가 된다. 여기서, CD 는 화학적 자유에너지 차이에 기인된 화학적 구동력(chemical driving force)에 해당한다. 따라서 마르텐사이트 변태가 일어나기 위해서는 DE 에 해당하는 기계적 구동력(mechanical driving force)이 외부로부터 부가되어야 한다. 이때, 응력이나 변형을 가하는 온도가 높을수록 마르텐사이트 변태량은

적어지며 어느 일정 임계온도 이상에서는 외부에서 응력이나 변형을 아무리 가해도 변태가 일어나지 않는데, 이 임계온도를 M_d 라 한다. 이와 같이, 외력의 도움에 의해 변태가 일어나는 가공유기변태는 일반적으로 다음의 2가지 형태로 분류되고 있다^{22~23)}. 응력의 도움 없이 냉각시 생성되는 마르텐사이트와 동일한 위치에서 핵생성이 일어나는 경우를 응력유기변태(stress-assisted transformation)라 하고, 소성변형에 의해 새로운 장소에서 핵생성이 일어나는 경우를 변형유기변태(strain-induced transformation)라 한다. 두 변태 기구에 대한 응력과 온도의 관계를 그림 2에 도식적으로 나타내었다. M_s 온도와 M_s^α 온도 사이에서 일어나는 변태가 응력유기변태로서 재료의 slip에 요하는 응력보다 낮은 응력이 가해진 경우 발생하기 때문에 소성변형은 전부 변태소성에 의한 것으로, 마르텐사이트의 부피분율은 변형량과 직선적인 관계를 갖는다. M_s^α 온도는 마르텐사이트 변태가 탄성응력에 의해 유기될 수 있는 최대온도이다.

M_s^α 온도 이상에서는 응력유기변태에 필요한 응력에 도달하기 전에 모상 중에 소성유동이 일어나게 되고, 새로 생긴 변형유기 핵생성 장소(site)가 변태에 영향을 주게 된다. Shear band의 교차점이 응력유기 마르텐사이트 변태의 핵생성 장소(site)로 작용하며, 이에는 HCP 구조의 ϵ -마르텐사이트, 기계적 쌍정, 적층결함 및 planar slip band 등이 있다. 즉 M_s^α 온도와 M_d 온도 사이의 온도 범위에서 변형유기변태가 일어나며, 이와 같은 변형유기변태가 일어나는 경우 재료는 매우 큰 소성을 나타내며, 이러한 현상을 변태유기소성(TRIP : Transformation Induced Plasticity)이라 한다.

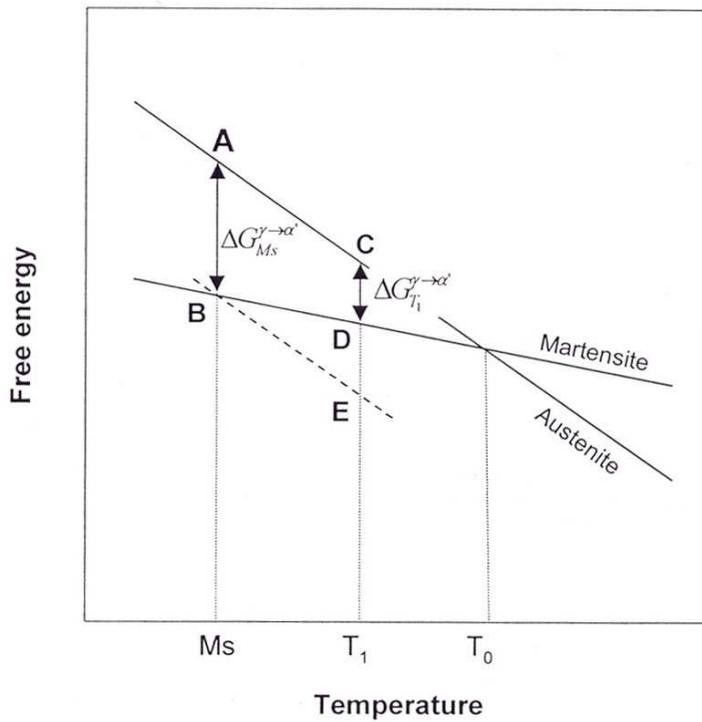


Fig. 1. Schematic diagram showing the free energy change for a martensite transformation from austenite.

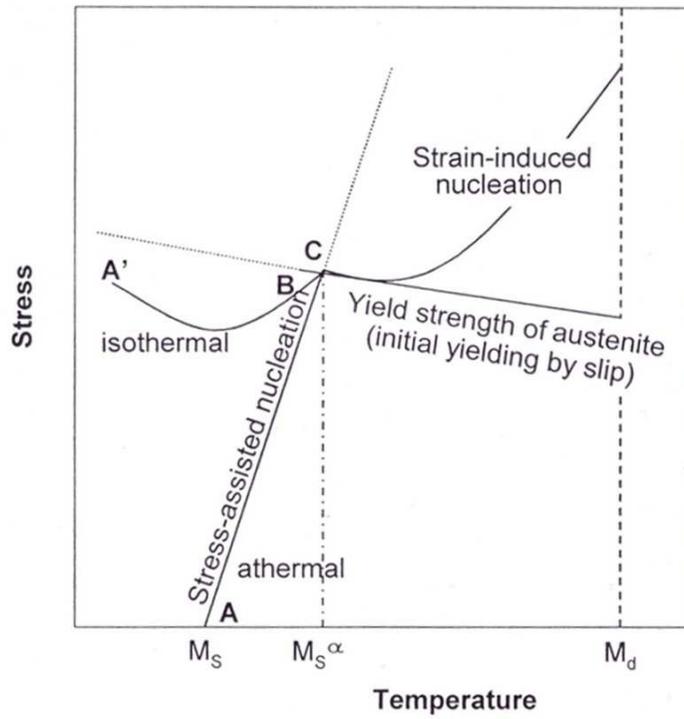


Fig. 2. Schematic representation of the stress-assisted and strain-induced martensitic transformation

2.2 잔류오스테나이트 형성에 영향을 미치는 인자

2.2.1 합금원소의 영향

잔류오스테나이트의 형성에 영향을 미치는 합금성분은 오스테나이트 형성원소, 페라이트 형성원소를 들 수 있다. 오스테나이트 형성원소는 냉연강판을 ($\alpha + \gamma$) 이상영역으로 가열할 때 오스테나이트 자체의 안정도를 증가시키는 역할을 하는 것으로 C, N, Mn, Ni 등이 있으며, 페라이트 형성원소는 가열 후 냉각과정이나 베이나이트 변태처리 과정에서 초석 페라이트의 생성을 촉진하여 페라이트 중의 탄소를 인접한 오스테나이트로 확산 이동시키는 역할을 하는 합금성분으로서 탄소의 활동도(activity)를 증가시키는 원소, 탄소와 repulsive interaction을 갖는 원소, 베이나이트 변태를 지연시키는 원소 등으로 Si, Al, P, Mo 등이 있다. 이러한 합금성분 중 잔류오스테나이트 형성에 주요한 역할을 하는 것은 C, Si, Mn 성분이며, $C > Si > Mn$ 순으로 그 효과가 크다고 알려져 있다.

잔류오스테나이트의 형성에 영향을 미치는 합금원소 중 주요한 역할을 하는 Si와 Mn에 대해 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. Si는 오스테나이트 내에서 C의 activity를 높여 탄화물로의 C 확산을 방해한다. 그리고 Si와 C의 상호작용계수가 부(負)이기 때문에 Si와 C는 repulsive interaction을 한다. 이러한 Si의 C에 대한 작용에 의해 항온변태처리시 페라이트 주위의 오스테나이트 중에 C 원자가 부화되어 안정된 잔류오스테나이트 형성에 유리한 작용을 한다.

Mn은 상태도상에서 오스테나이트 구역을 넓히는 역할을 하며,

오스테나이트 내에서 C의 활동도(activity)를 낮춘다. Mn이 오스테나이트/페라이트 계면에서 편석되면 C의 활동도를 낮추어 이러한 계면에서 C의 확산을 억제함으로써 오스테나이트를 안정화시킨다. 결과적으로 페라이트 성장에 대한 구동력과 변태속도를 감소시키고 또한 베이나이트 변태를 억제시키는데 이러한 것은 SDLE(Solute Drag-Like Effect)라 알려져 있다. 한편, Sakuma^{17,24)} 등은 Mn함량이 증가함에 따라 잔류오스테나이트 부피분율은 증가하나 안정도에는 별 영향이 없으며 경화능 향상으로 인해 이상역 열처리 후 냉각속도를 감소시켜야 한다고 보고하였다.

2.2.2 열처리 조건의 영향

잔류오스테나이트 형성에 영향을 미치는 열처리 조건은 이상역 열처리 온도 및 시간, 항온변태처리 온도 및 시간, 이상역 열처리 후 항온변태처리 온도까지의 냉각속도 그리고 항온변태처리 후 상온까지의 냉각속도 등을 들 수 있다. 이 중에서 주요한 역할을 하는 것은 이상역 열처리 온도와 항온변태처리 온도 및 시간으로 알려져 있다.

이상역 열처리는 냉간압연판재에 존재하는 펄라이트나 밴드조직의 완전한 분해가 일어날 수 있는 온도와 시간을 설정해야 하며, 이상역 열처리 온도가 증가함에 따라 초기 오스테나이트 부피분율이 증가하게 되고 이에 따라 잔류할 수 있는 오스테나이트의 부피분율이 증가하게 되면 초기 오스테나이트내의 합금원소, 특히 탄소의 농도는 상대적으로 낮아지게 되어 항온변태처리 온도가 높을 경우 베이나이트변태 개시 이전에 페라이트변태가 일어나기 때문에 잔류오스테나이트 부피분율이 급격히 감소하는 것으로 알려져 있

다. Matsumura^{16,18~19,25)} 등은 0.36wt.%C-1.49wt.%Si-0.84wt.%Mn 강에서 이상역 열처리 온도를 Ac_1 온도에서 20℃ 정도 높은 온도인 770℃(이때 페라이트와 오스테나이트의 부피분율이 50:50 정도의 비율을 가짐)에서 이상역 열처리하였을 경우 안정도가 우수한 다량의 잔류오스테나이트를 얻을 수 있으며 강도-연성 조합(balance)도 우수하다고 보고하였다. 그리고 Chung²⁶⁾은 ($\alpha + \gamma$) 이상역에서의 어닐링시 초기 오스테나이트가 40~50% 정도의 부피분율을 차지하는 (Ac_1+Ac_3)/2 온도에서 이상역 열처리하였을 때 다량의 잔류오스테나이트를 얻을 수 있다고 보고하였다. 따라서 이상역 열처리 조건의 설정은 초기 오스테나이트의 부피분율과 그 오스테나이트내에 고용되는 합금원소의 양을 고려하여 설정할 필요가 있다.

항온변태처리시 변태처리온도가 지나치게 높아지면 펄라이트가 생성되어 초기 오스테나이트가 감소하고, 반대로 유지온도가 낮아지면 이상역 열처리 후 항온변태처리 온도로의 냉각과정에서 오스테나이트로부터 마르텐사이트로의 변태가 일어나 결과적으로 다량의 잔류 오스테나이트의 형성에 불리하다. 그리고 항온변태처리 시간이 증가함에 따라 오스테나이트 중에 농축되는 용질원소량이 증가하여 안정도는 증가하지만, 오스테나이트의 베이나이트 변태가 너무 많이 일어나기 때문에 결과적으로 잔류오스테나이트의 부피분율은 감소한다. 반대로 유지시간이 짧으면 용질원자의 부화가 충분히 일어나지 못하기 때문에 잔류오스테나이트의 안정도가 낮아져 상온으로의 냉각과정에서 마르텐사이트로 변태하거나, 혹은 오스테나이트로 잔류한다 하더라도 안정도가 낮아 변형초기에 변태하므로 연성향상에 기여하는 효과가 감소되는 결과를 초래한다. 이에 대해 Chung²⁶⁾은 강도와 연성의 조합이 우수하고 다량의 잔류오스테나이트를 얻을 수 있는 항온변태처리 온도는 ($\alpha + \gamma$) 이상역 열처리

시 형성되는 초기 오스테나이트의 M_s 온도 직상의 온도인 ($M_s + 20^\circ\text{C}$)가 적당하다고 보고하고 있다.

2.3 잔류오스테나이트의 안정도

2.3.1 잔류오스테나이트 안정도에 미치는 합금원소의 영향

페라이트, 베이나이트 및 잔류오스테나이트로 구성된 복합조직 TRIP강에서의 높은 연신율은 잔류오스테나이트의 가공유기변태에 크게 의존한다. 이러한 TRIP강의 연성은 M_s 온도와 잔류오스테나이트의 부피분율에 의해 결정되며 연성향상은 변형유기변태를 적당히 억제함으로써 얻어질 수 있다¹⁵⁾. 즉 높은 균일연신율을 얻기 위해서는 적당한 안정도를 갖는 잔류오스테나이트를 미세조직 내에 균일하게 분포시키는 것이 바람직하다. 잔류오스테나이트가 너무 안정하면 큰 변형이 가해진 이후에도 변태되지 않아 단순히 석출물의 효과만을 보이고, 반대로 너무 불안정하면 변형 초기에 변태되어 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 이상조직강과 같은 결과를 얻게 된다. 일반적으로 잔류오스테나이트의 안정도는 M_s 온도에 크게 영향을 받는데, 이는 그림 1에 보인바와 같이 가공유기 마르텐사이트변태가 M_s 온도와 M_d 온도 범위에서만 일어나는 현상이기 때문이다. M_s 온도에 영향을 미치는 인자들은 주로 잔류오스테나이트의 조성, 크기 및 형상 등이며, 주로 고용되는 합금원소에 의해 좌우된다. 즉, 잔류오스테나이트 내에 오스테나이트 안정화 원소인 C, Mn의 고용함량이 증가함에 따라 잔류오스테나이트의 M_s 온도가 낮아지게 되어 결국 잔류오스테나이트의 안정도가 증가하게 된다. 합금원소의 고용함량이 M_s 온도에 미치는 영향은 아래 식

(1)로 나타내어진다.

$$M_s(^{\circ}C) = 550 - (360 \times wt.\%C) - (40 \times wt.\%Mn) \quad (1)$$

식 (1)에서, wt.%C는 잔류오스테나이트내의 C 함량이고, wt.%Mn은 잔류오스테나이트내의 Mn 함량이다.

2.3.2 연성 향상에 기여하는 잔류오스테나이트의 영향

변형 도중에 생성되는 변형유기상(쌍정, 마르텐사이트 등)이 연성향상에 기여하는 기구²⁶⁾는 준안정 오스테나이트계 합금에 대한 연구에서 출발하였다. McRaynolds²⁷⁾는 오스테나이트 강의 연구에서 변형 중에 마르텐사이트가 생성되면 준안정 오스테나이트의 가공경화가 촉진되어 necking이 억제된다는 기구를 제안하였다. 이 제안은 오스테나이트 단상조직의 변형 시에 생성되는 ϵ -마르텐사이트, α' 마르텐사이트 및 변형쌍정 등과 같은 변형유기상이 강의 연성과 파괴인성을 현저히 향상시킨다는 실험결과^{28~30)}의 뒷받침으로 널리 인정받고 있다. 또한 Marder³¹⁾와 Rigsbee³²⁾ 등은 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 이상조직강에 존재하는 수 %의 잔류오스테나이트가 연성향상에 기여하는 효과가 있다고 제안하였다. 이들은 이상조직강에 소량으로 존재하는 잔류오스테나이트가 변형 중에 마르텐사이트로 가공유기변태 되고, 이때의 부피팽창에 의해 인접한 페라이트에 가동전위가 발생되어 가공경화 되며, 변형 후기에는 먼저 변태된 마르텐사이트 주위에 전위의 증식이 일어남으로써 가공경화율이 높게 되어 necking이 높은 변형률영역 쪽에서 일어나 강도와 연성이 동시에 향상된다고 설명하였다. 그러나 강중에 함유된

모든 잔류오스테나이트가 모두 연성향상에 기여하는 것은 아니며, 잔류오스테나이트의 체적분율, 크기, 분포 및 안정도(stability) 등에 따라서 기여하는 정도가 달라지는 것으로 알려져 있다. Geol 등³³⁾은 잔류오스테나이트를 함유한 복합조직강의 변형을 semi-mechanistic model에 의해 계산하였으며, 기계적 성질과 잔류오스테나이트의 안정도와의 관계를 규명하였다. 즉, 잔류오스테나이트가 지나치게 안정하면 변형도중에 변태가 일어나지 못하여 강도 및 연성향상에 기여하지 못하며, 반대로 너무 불안정하면 변형초기에 거의 모든 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태함으로써 복합조직강과 유사한 특성을 나타내어 강도는 증가하지만 연성은 오히려 떨어진다. 따라서 적당한 안정도를 갖는 잔류오스테나이트만이 연성과 강도 향상에 기여한다고 보고하였다.

또한, 페라이트, 베이나이트 및 잔류오스테나이트로 구성된 3상 조직강에서 연성향상에 기여하는 잔류오스테나이트의 역할은 Rigsbee³²⁾가 제안한 변태에 따른 가공경화율의 증가로 설명되고 있다. Matsumura^{16,18~19,34)} 등은 비교적 많은 양의 잔류오스테나이트를 함유한 3상 조직강에 대한 연구에서 소성변형 중에 변태가 일어나면 모상인 페라이트의 가공경화율을 증가시켜 necking 발생 조건인 $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ 를 보다 높은 변형률영역 쪽으로 이동시킴으로써 균일연신을 향상에 기여한다고 보고하였다.

이상의 제안들을 종합해 보면 오스테나이트의 변형유기상은 연질상인 모상(matrix)의 전위밀도 증가에 따른 가공경화를 촉진하여 necking을 억제하기 때문에 강도와 연성이 향상된다고 요약할 수 있다. 그러나 모상의 전위밀도만을 고려한다면 강의 가공경화율이 변태시기, 즉 잔류오스테나이트의 안정도에 따라서 달라질 이유가 없다. 따라서 Suzuki³⁵⁾와 Chung²⁶⁾ 등은 잔류오스테나이트의 가공유

기변태는 페라이트 기지(matrix)의 응력집중을 완화하는 과정으로 볼 수 있으며, 이러한 응력집중의 완화과정이 점진적으로 일어날수록, 즉 잔류오스테나이트의 마르텐사이트 변태가 점진적으로 일어날수록 강판은 균일하게 변형하여 연성이 향상된다고 보고하였다.

2.4 고속인장시험

2.4.1 TRIP강의 고속인장특성

시험기의 주요 부분을 그림 3에 도식적으로 나타내었는데 하중은 piezoelectric load washer를 이용하여 측정하였고 gage section 부위의 변형률은 고연신 strain gage를 사용하여 측정하였다. 그림 3에서 나타낸 것처럼 인장시험에서 시편의 상층부가 고정된 상태에서 시편의 하층부로 하중이 급격하게 부과되고 이에 따른 충격은 slack adapter란 장치에 의해 완화된다.

그림 4에 나타낸 고속변형 data에서 gage section에 부착된 strain gage에 의해 측정된 변형률은 만족할 만 하지만 그림 5에서 나타낸 것처럼 piezoelectric load washer를 이용한 하중의 측정은 고속에서 큰 폭의 요동(ringing)을 보여 만족스럽지 못한 결과를 보였다. Load washer를 이용한 하중의 측정이 변형속도에 따라 응력-변형률 곡선의 모양에 미치는 영향을 그림 6에서 나타내었는데 변형속도가 증가하면서 fluctuation이 심해져서 정확한 data 판단이 어려움을 보여주고 있다.

하중이 고속으로 부과되면 응력파장이 시편길이를 따라 전파되는데, 탄성파는 시편의 전체길이를 전파한 후 load washer까지 그

파가 전달되어 관찰된 ringing이 발생하게 된다. 이와 같은 큰 진폭과 낮은 주파수의 진동은 정확한 하중의 측정을 어렵게 하므로 정확한 하중의 측정을 위해서는 작은 진폭과 많은 주파수의 진동이 필요하게 된다. 진동주파수는 기계배치와 시험재료에 따라 달라지므로 시편과 load cell의 무게를 줄여주면 주파수를 증가시킬 수 있다. 진동진폭은 actuator 속도와 load cell 위치에 의존하므로 actuator속도와 시편과 load cell간의 거리를 줄여주면 진폭을 줄일 수 있다.

따라서 높은 신뢰도의 load data를 얻기 위해서는 시편과 하중 측정기사이의 거리와 무게를 줄이고 actuator 속도를 낮출 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 aluminum을 경량의 상부 그립으로 사용하여 무게를 줄이고 grip section에 elastic strain gage를 부착하여 하중을 측정함으로써 거리를 줄였다. 또한, 특정변형속도에서 gage length가 짧은 시편을 사용함으로써 actuator 속도를 줄여 load data의 신뢰도를 높일 수 있다. 이외에도 strain gage 부착위치, strain gage로부터의 신호포착을 위한 electronic conditioner의 조합 등 각종 방안의 검토에 의해 elastic modulus shift등 data의 신뢰도를 떨어뜨리는 요소들을 해결하여 안정적인 고속변형 data를 얻고 있다.

그림 7에 gage section 부위와 grip 부위에 2개의 strain gage를 부착한 모식도와 실제 시편을 나타내었고, 이와 같은 보정에 의해 개선된 낮은 진폭, 고진동의 load data를 그림 8에 나타내었다.

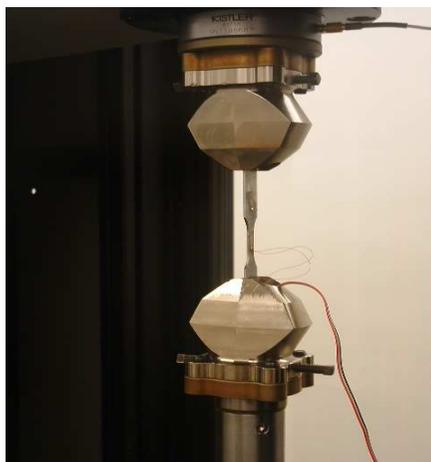
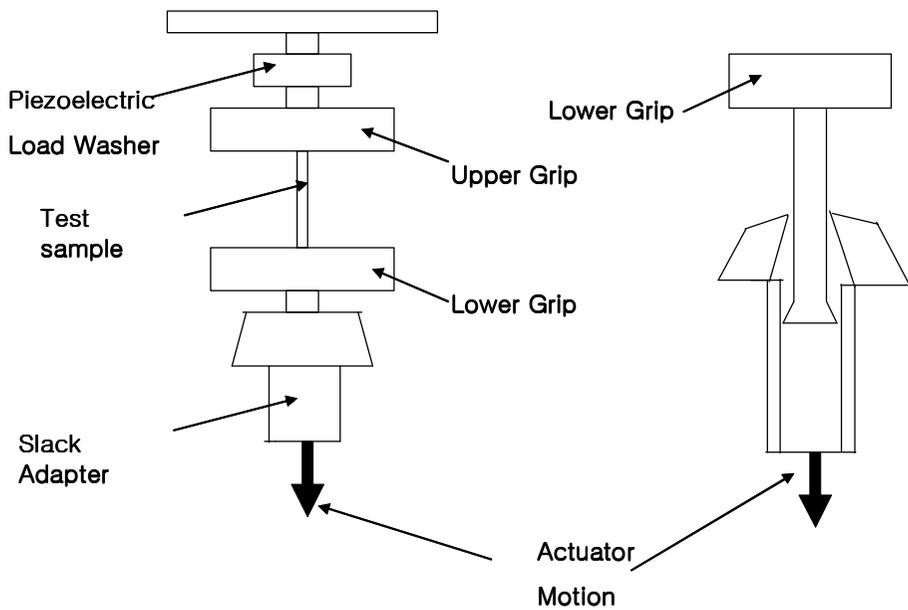


Fig. 3. Schematic diagram of high rate testing equipment.

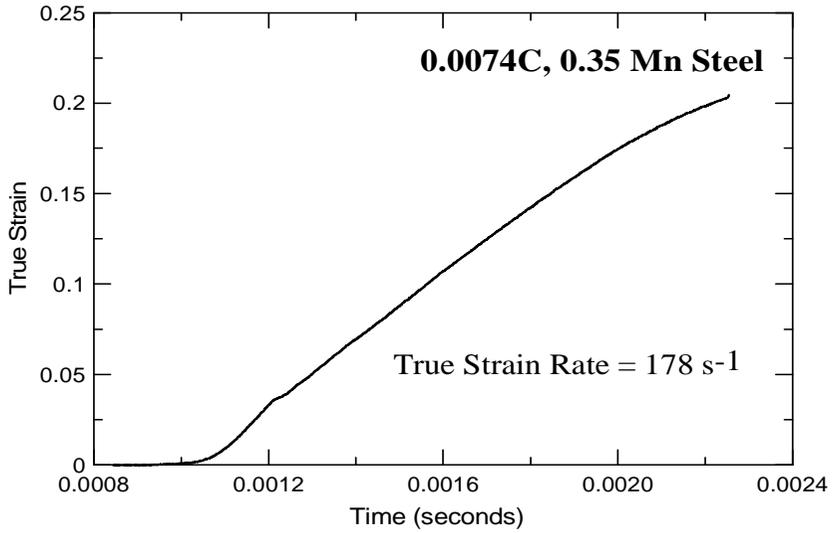


Fig. 4. Strain data using gage section strain gage for a steel at a strain rate of 178/sec.

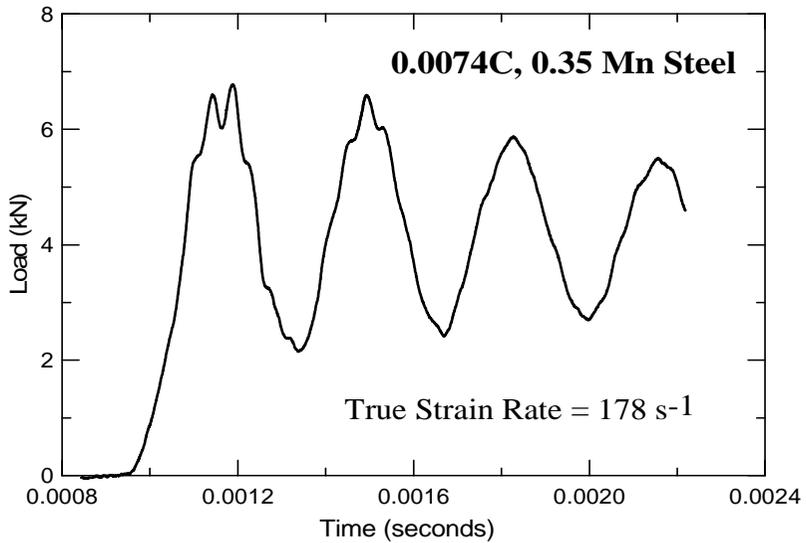


Fig. 5. Load data using the load washer for a steel at a strain rate of 178/sec.

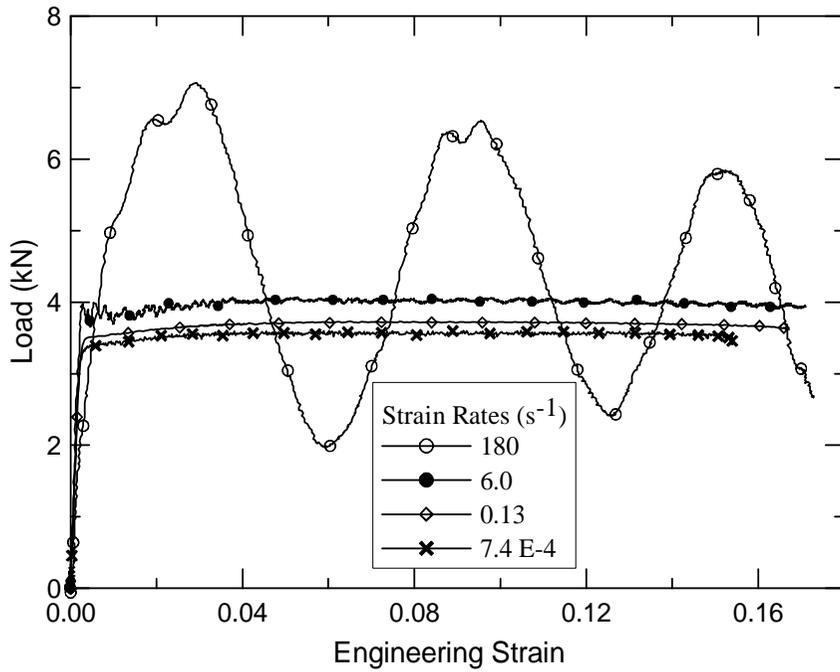


Fig. 6. Load versus strain data acquired using the load washer and gage section strain gage. Small fluctuations in load are noticeable at a strain rate of 6.0/sec and become very large at a strain rate of 180/sec.

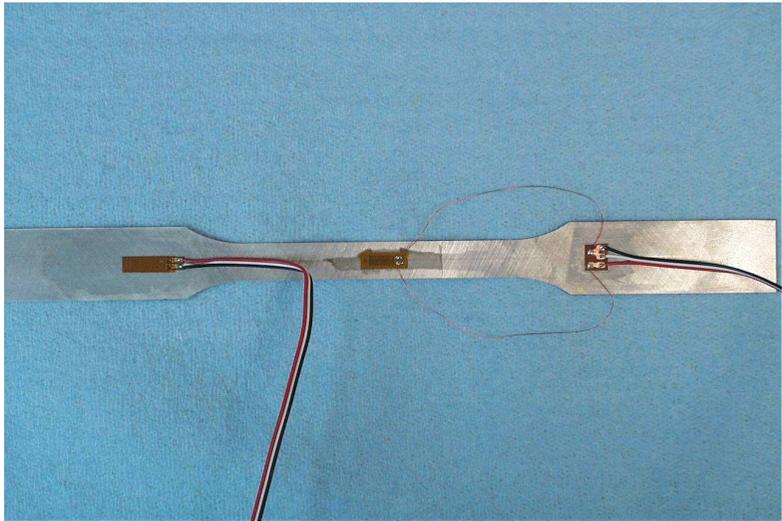
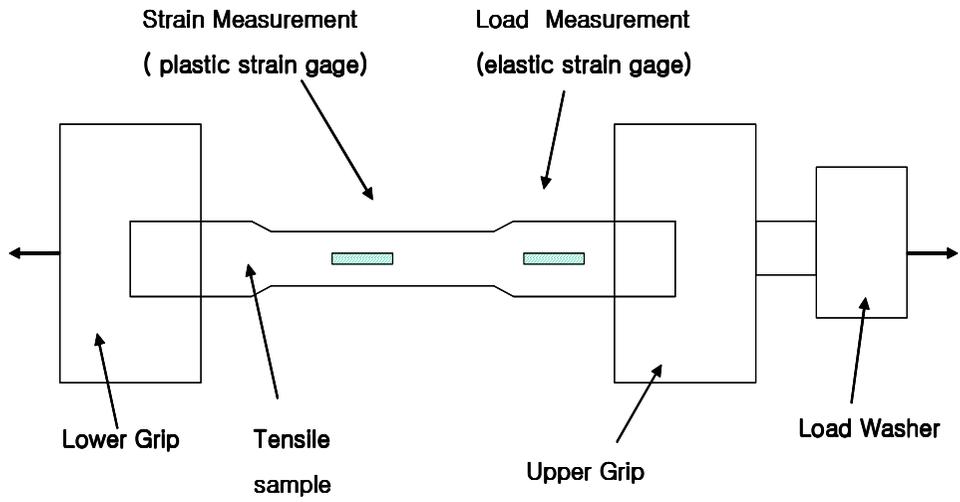


Fig. 7. Schematic diagram of typical tensile sample configuration.

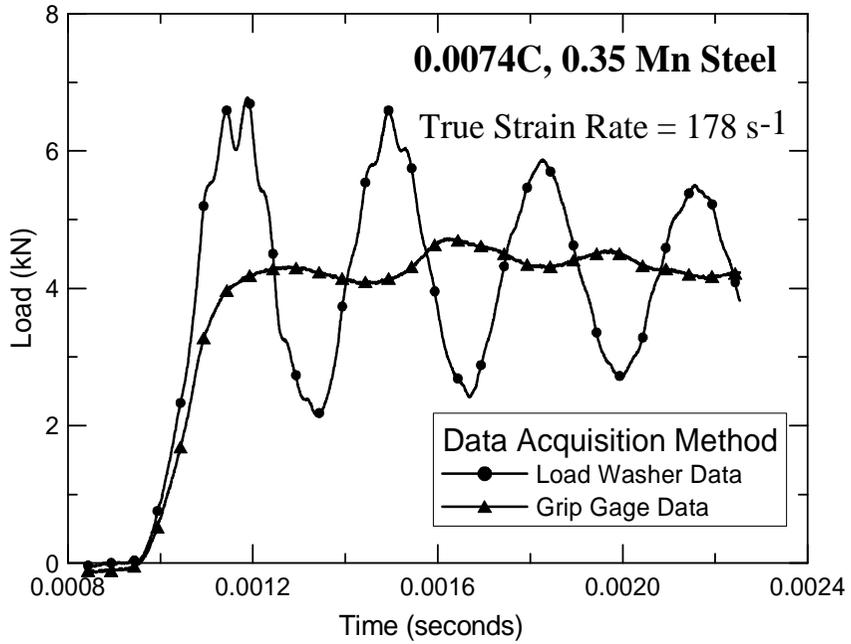


Fig. 8. Comparison of load data using the load washer and a grip section strain gage for a steel at a strain rate of 178/sec.

2.4.2 고속변형에서의 TRIP 냉연강판

비슷한 강도를 가진 일반 고장력강과 비교하여 TRIP강은 낮은 항복강도/인장강도비와 높은 변형경화능의 고유한 성질을 나타낸다. 높은 변형경화능은 자동차부품의 제조과정에서 국부적인 necking 발생에 대한 저항성을 높여 성형성을 향상시키고, 제조된 부품에서의 높은 인장강도는 충돌흡수에너지와 피로성질을 개선시킨다.

TRIP강의 기계적 특성을 향상시키는 제조공정인자, 즉, 잔류오스테나이트의 부피분율, 변태상, 페라이트 결정입도 등을 조절할 수 있는 열처리조건을 평가하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다. 하지만, 이러한 기계적 특성에 대한 연구는 대부분이 10/sec이하의 저속변형조건에 국한되어왔다. 하지만, 자동차에서 승객의 안전성 확보는 대단히 중요한 문제이므로 TRIP강을 자동차에 적용하기 위해서는 고속변형거동에 관한 좀더 많은 관심이 필요하다.

컴퓨터를 이용한 충돌해석에 이용될 수 있는 동적 기계적 특성은 load path와 충돌시 소성불안정을 보다 더 잘 예측할 수 있으므로 해석 식에서의 인공적인 보정상수의 필요성을 없앨 수 있다. 따라서 세계 유수의 철강업체들이 공동으로 추진하고 있는 ULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concepts)와 유럽연구기관에서도 철강업체와 자동차업계에서 이용할 수 있는 고속변형 data를 얻기 위해 노력하고 있다.

만약 시속 60km의 속도로 달리는 자동차의 250mm 부품을 고려하면 요구되는 실험실적 변형속도는 67/sec이 되고, 시속 100km의 속도로 달리면 요구되는 변형속도는 111/sec이 된다. 따라서 ULSAB-AVC에서 충돌해석에 사용하기 위해서는 100-300/sec의 변형속도에서 측정된 data가 필요하다고 기술하고 있다.

다음 표 1에 변형속도에 따른 시험방법들을 요약하였다. 통상적인 10/sec이하의 변형속도에는 일반적인 유압인장시험기가 사용되고 1000/sec이상의 고속변형에서는 Hopkinson bar 시험법이 사용된다. 100-300/sec의 변형속도에는 고속유압시험기가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 최대하중 50kN, 최대변위속도 15m/s의 고속유압 시험기를 사용하였다.

Table 1. Testing techniques according to strain rates

Strain rate (s ⁻¹)	COMMON TESTING METHODS	DYNAMIC CONSIDERATIONS	REMARKS
10 ⁷	HIGH VELOCITY IMPACT -Explosives	SHOCK-WAVE PROPAGATION	INERTIAL FORCES IMPOTRTANT
10 ⁶	-Normal plate impact	SHEAR-WAVE PROPAGATION	
10 ⁵	-Exploding foil -Incl. Plate impact (pressure-shear)		
10 ⁴	DYNAMIC-HIGH -Taylor anvil tests -Hopkinson Bar -Expanding ring		
10 ³	DYNAMIC-LOW High-velocity hydraulic, or Pneumatic machines; cam Plastometer	MECHANICAL RESONANCE IN SPECIMEN AND MACHINE IS IMPORTANT	
10 ²			
10 ¹	QUASI-STATIC Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	TESTS WITH CONSTANT CROSS HEAD VELOCITY STRESS THE SAMETHROUGHOUT LENGTH OF SPECIMEN	INERTIAL FORCES NEGLIGIBLE
10 ⁰			
10 ⁻¹			
10 ⁻²			
10 ⁻⁴			
10 ⁻⁵	CREEP AND STRESS RELAXATION Conventional testing machines Creep testers	VISCO-PLASTIC RESPONSE OF METALS	
10 ⁻⁶			
10 ⁻⁷			
10 ⁻⁸			

제 3 장 실험 방법

3.1 TRIP 냉연강판의 제조

본 연구에서는 Si과 Mn을 각각 1.5 wt.%로 고정하고 탄소량을 0.10 wt.%와 0.15 wt.%로 변화시킨 두 종류의 TRIP강을 사용하였다. 고순도 전해철과 Fe-Mn, Fe-Si 등의 합금철을 이용하여 진공 유도 용해하였으며, 봉상의 고순도 알루미늄으로 탈산처리를 하였다. 주조된 강괴는 25mm 두께의 slab 형태로 조압연한 후, 이를 다시 3mm 두께로 열간압연 하였다. 조압연 및 열간압연은 강괴를 1250℃에서 2시간동안 가열하여 균질화처리한 후 3 pass의 압연을 실시하였으며 마무리 압연온도는 900℃로 하였다. 열간압연된 강판들은 표면의 산화피막을 제거하기 위해 80℃의 10% HCl 수용액으로 산세한 후 0.8mm 두께로 냉간압연 하였다. 본 연구에서 사용된 냉연강판의 화학조성과 Andrews³⁶⁾의 식으로 계산된 냉연강판들의 A_{c1} , A_{c3} 온도 및 M_s 점을 표 2에 나타내었다.

Table 2. Chemical composition(wt.%) and estimated transformation temperature(°C) using Andrews's equation of the cold-rolled steel sheets used in this study.

Sample	C	Si	Mn	Cu	P	S	A_{c1}	A_{c3}	M_s
10LS	0.10	1.45	1.50	0.50	≤20ppm	≤20ppm	750	912	450
10HS									
15LS	0.15	1.48	1.49	0.50	≤20ppm	≤20ppm	750	900	432
15HS									

3.2 이상영역 열처리 및 항온변태처리

TRIP형 냉연강판의 잔류오스테나이트 형성과 이에 따른 기계적 성질의 변화에는 이상영역 열처리 및 항온변태처리 온도와 열처리 시간이 주요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 다양한 열처리조건으로 실험한 결과로부터 안정도가 높은 잔류오스테나이트와 안정도가 낮은 잔류오스테나이트를 얻을 수 있는 조건을 선택하여 이상영역 열처리 및 항온변태처리를 실시하였다.

이러한 열처리 조건은 최근의 연구보고에서 $(Ac_1 + Ac_3)/2$ 의 온도 또는 페라이트와 오스테나이트의 부피분율이 50 : 50이 되는 온도에서 이상영역 열처리를 실시할 경우 가장 높은 잔류 오스테나이트 부피분율을 얻는 것과 함께 인장강도와 인장 연신율 등의 기계적 성질이 가장 우수하다고 보고한 사실에 입각하여 결정하였다. 이상영역 열처리를 $(Ac_1 + Ac_3)/2$ 의 온도와 페라이트 : 오스테나이트 부피분율이 50 : 50이 되는 온도에서 5분간 실시하였으며, 항온변태처리는 Ms 온도와 이보다 20~30℃ 높은 온도범위에서 3~10분간 실시한 후 공냉하였다. 이상영역 열처리와 항온변태처리는 고온용 및 저온용 염욕로(salt bath)를 사용하여 실시하였다.

그림 9는 열처리 조건을 나타내고, 그림 10은 열처리 후 각 시편들의 잔류오스테나이트의 안정도를 알아보기 위하여 변형률에 따른 각 시편의 잔류오스테나이트 부피분율 변화를 XRD로 측정하여 나타낸 것이다. 변형을 전 구간에 있어서 15HS가 15LS보다 그리고, 10HS가 10LS보다 잔류오스테나이트의 부피분율의 감소량이 작게 나와 15HS와 10HS의 잔류오스테나이트의 안정도가 각각 15LS와 10LS보다 높은 것으로 확인되었다.

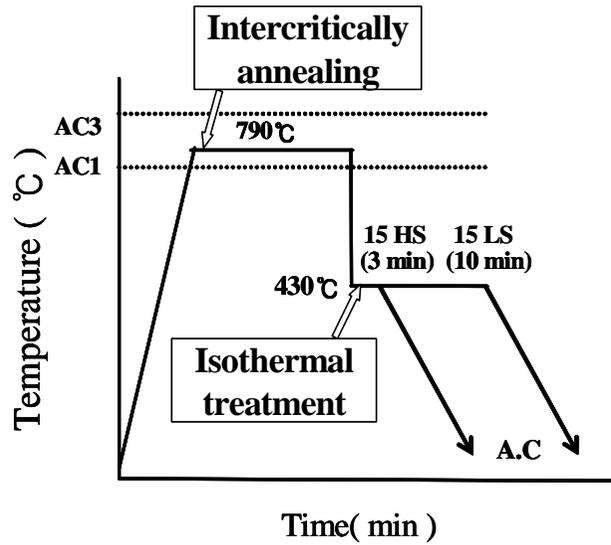
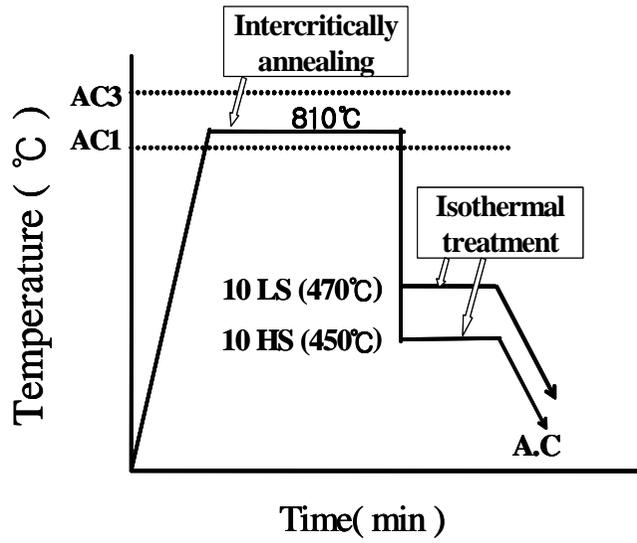


Fig. 9. Schematic diagram of the heat treatment processes of the cold-rolled steel sheet used in this study.

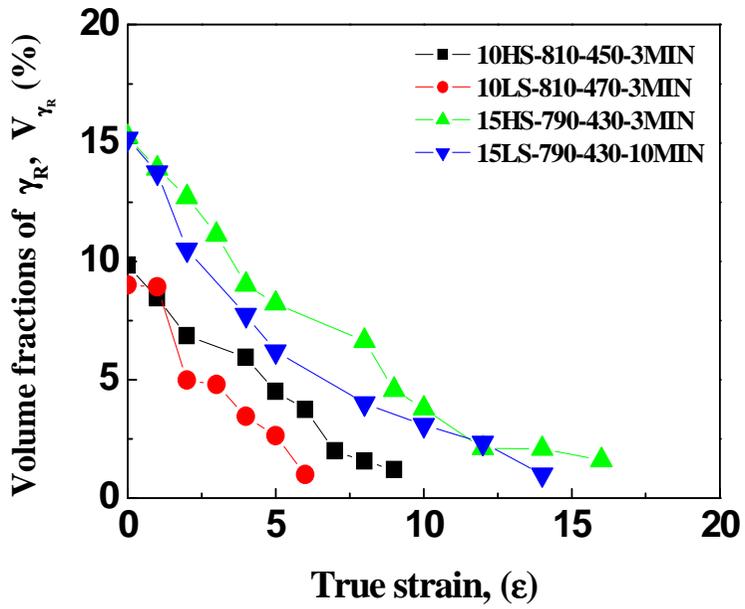


Fig. 10. Volume fractions of retained austenite as a function of strain for the each steel sheets.

3.3 고속인장시험

본 연구에서 사용된 고속인장시험기는 미국 덴버에 위치하고 있는 Colorado School of Mines의 Advanced Steel Processing and Products Research Center에 있는 high strain MTS system을 이용하였다. 고속인장시험기를 도식적으로 그림 11에, 사양은 표 3에 나타내었다. 이론적 배경에서 언급한바와 같이 신뢰성이 있는 load data를 얻기 위해 표 4에 나타낸 것과 같이 2가지 서로 다른 gage length의 인장시편을 준비하였다. 한 종류의 시편에 대하여 18개의 시편을 이용하여 $10^{-2}/\text{sec} \sim 6 \times 10^2/\text{sec}$ 범위의 9단계의 변형속도에서 시험하였는데 목표변형속도와 사용한 시편종류를 표 5에 나타내었다. 각 시편에서 하중은 시편의 grip 부위에 부착한 탄성 strain gage에 의해, 변형률은 gage 부위에 부착한 소성 strain gage에 의해 측정하였다.

Table 3. Characteristics of the high strain rate MTS system

High Strain Rate MTS System
· 50 KN (11,000lb) capacity
· 10m/s actuator velocity (under load)
· actuator slack adaptor
· NI data acquisition board - 4 channel input
· NI Virtual Scope Software

Table 4. Sample designations and dimensions for tensile samples.

Sample Designation	Gage Section Length (mm)	Gage Section Width (mm)	Grip Section Width (mm)
1 in	25.4	6.4	16
1/2 in	12.7	6.4	16

Table 5. Test matrix for tensile samples of each material studied.

Target Strain Rate (/sec)	Sample Designation & Number of Samples Tested
0.01	1 in - 1 sample 1/2 in - 1 sample
1	"
10	"
30	"
60	"
100	"
200	"
400	"
600	"

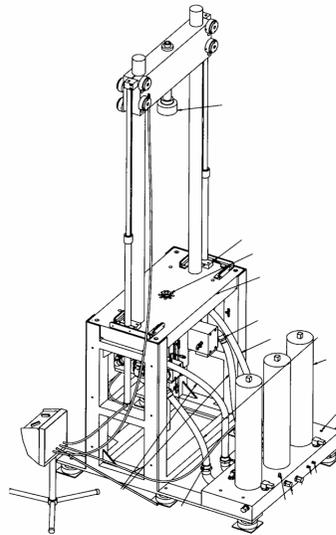


Fig. 11. The high strain rate MTS system.

3.4 미세조직 관찰

각 TRIP 냉연강판의 열처리된 시편의 미세조직은 압연방향에 90°방향으로 시편을 절단하여 연마한 후 에칭하여 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다. 본 연구에서 사용된 시편인 C-Si-Mn계 TRIP형 냉연강판은 페라이트, 베이나이트, 잔류오스테나이트 또는 마르텐사이트 등으로 구성되어 미세조직이 매우 복잡하기 때문에 나이탈(nitric acid 3ml + ethyl alcohol 100ml) 에칭용액으로만 에칭할 경우 각각의 구성상들이 명확하게 구별되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 미세조직 구성상들을 구분하기 위하여 3% nital 용액으로 1차 에칭한 후 10% sodium metabisulfite 용액($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 10g + 증류수 100ml)으로 시편을 재차 에칭 하였다. 10% sodium metabisulfite 용액으로 시편을 에칭하여 광학현미경으로 관찰하게 되면, 페라이트는 회색, 베이나이트 또는 마르텐사이트는 검은색, 그리고 잔류오스테나이트는 흰색으로 나타나기 때문에 구성상의 구분이 용이하다.

3.5 잔류오스테나이트 부피분율 측정

잔류오스테나이트의 안정도와 화학조성에 따른 각 시편의 잔류오스테나이트의 부피분율은 X-선 회절분석기(XRD)를 사용하여 측정을 하였고, XRD 분석용 시편은 열처리된 냉연강판을 먼저 기계적 연마로 표면을 정리한 후, 두께가 최대한 얇게 되도록(1mm이내) 5% HF + 95% H_2O_2 용액으로 화학적 연마를 하여 준비하였다. XRD 분석은 Mo-K_α 특성선을 이용하였으며, 적분강도로부터 잔류오스테나이트의 부피분율(V_V)은 페라이트, 오스테나이트 peak의 강

도를 다음 식 (3)에 대입하여 계산하였다.^{37,38)}

$$V_y = 1.4I_y / (I_a + 1.4I_y) \quad (3)$$

식 (3)에서 I_y 는 $\{220\}_y$ 과 $\{311\}_y$ peak에서 얻어진 평균 적분강도 값이며, I_a 는 $\{211\}_a$ peak로부터 구한 적분강도값이다.

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 미세조직 관찰

비슷한 잔류오스테나이트양을 가지지만 안정도를 달리한 각 시편에 대하여 열처리를 한 후의 미세조직 사진을 그림 12과 13, 14에서 나타내고 있다.

그림 12은 각 시편의 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰한 사진이고, 그림 13는 각 시편의 미세조직을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰한 사진이다. 또한 그림 14은 EBSD(Electron Back Scattered Diffraction)를 이용하여 관찰한 사진이다.

위에서 언급했듯이 그림 12에서 각 시편의 조직은 페라이트는 회색, 베이나이트 또는 마르텐사이트는 검은색, 그리고 잔류오스테나이트는 흰색으로 나타난다. 각 시편의 조직을 살펴보면, 0.1% C을 함유하고 있는 10HS와 10LS 보다 0.15% C을 함유하고 있는 15HS와 15LS 시편의 잔류오스테나이트 양이 더 많은 것으로 관찰되어진다. 실제로 X-선 회절분석기(XRD)로 분석한 잔류오스테나이트의 양에 있어서도 15HS와 15LS가 더 많은 것으로 나타났다. 표 6에서 X-선 회절분석기(XRD)로 분석한 각 시편의 잔류오스테나이트의 양을 보여주고 있다.

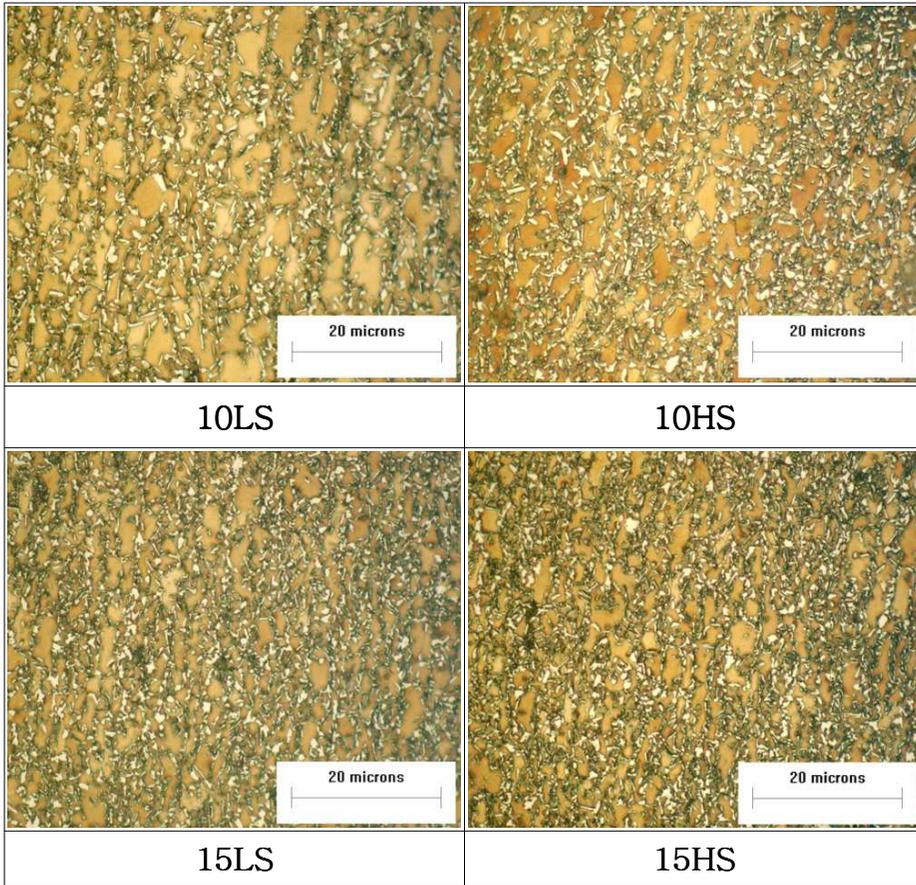


Fig. 12. Optical micrographs of the 10LS, 10HS, 15LS, 15HS steel sheets etched by 10% sodium metabisulfite solution.

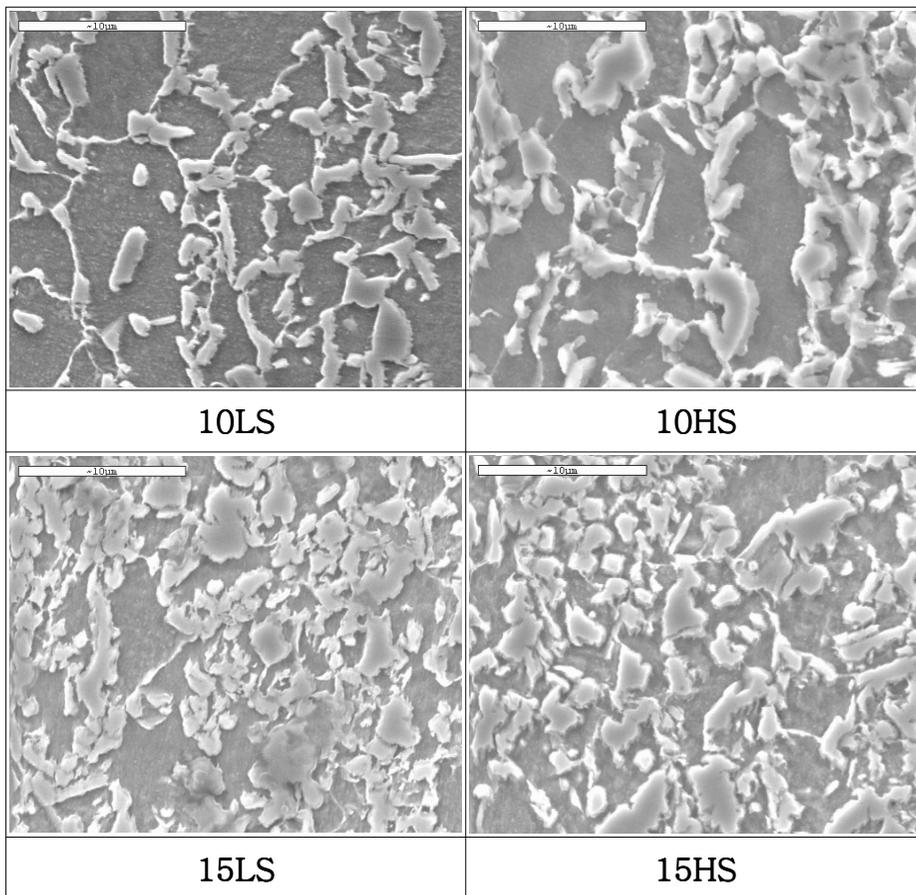


Fig. 13. SEM micrographs of the 10LS, 10HS, 15LS, 15HS.

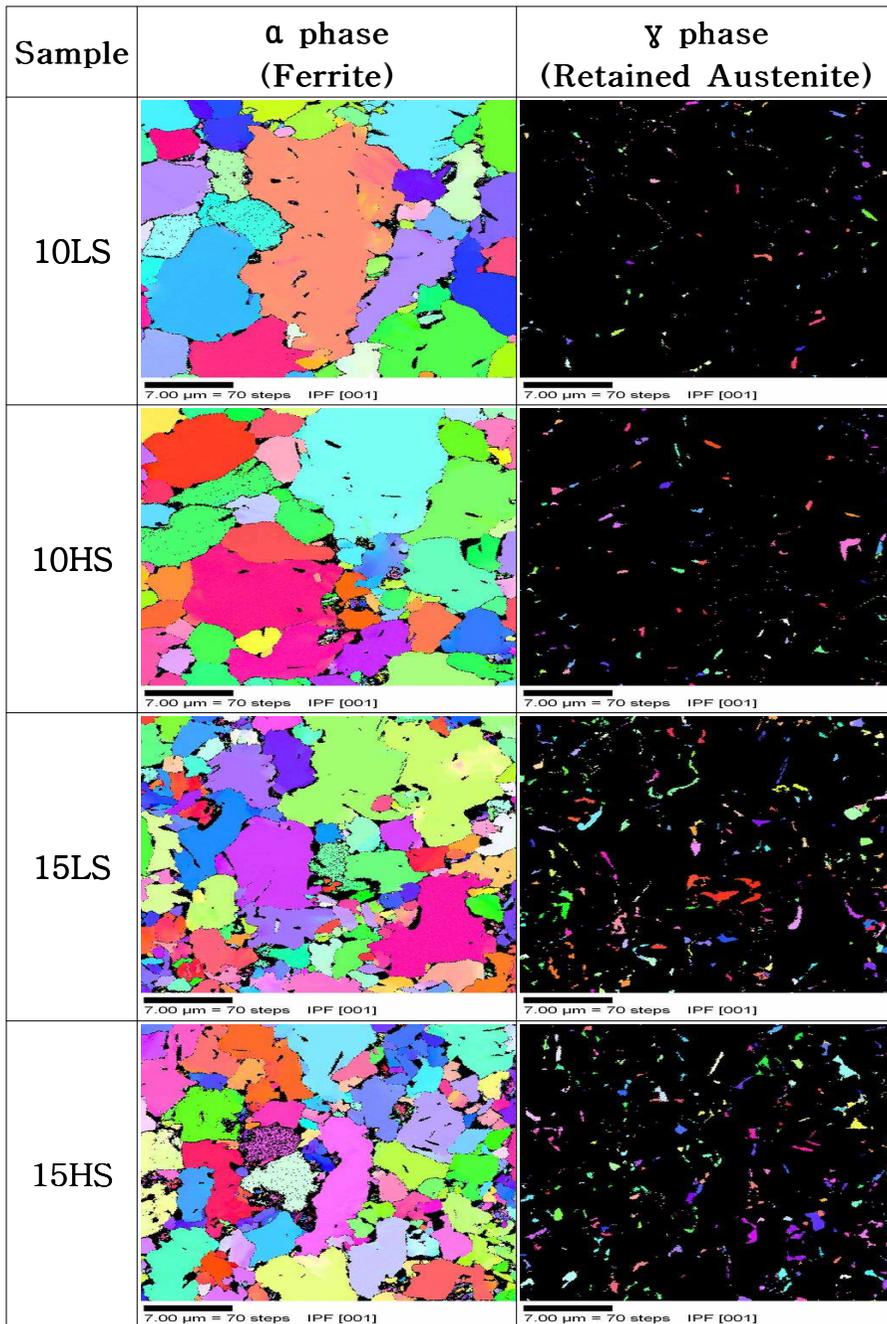


Fig. 14. EBSD micrographs of the 10LS, 10HS, 15LS, 15HS.

Table 6. Volume fractions of retained austenite of cold-rolled steel plates used in this study.

Sample	Volume Fractions of γ (%)
10LS	8.94
10HS	9.62
15LS	12.15
15HS	12.23

전체적으로 각 시편의 조직은 페라이트, 베이나이트 또는 마르텐사이트, 잔류오스테나이트가 시편 전반에 걸쳐 균일하게 분포되어 있으며 대부분 주변의 페라이트 및 베이나이트와 연계되어 있음을 알 수 있다.

잔류오스테나이트의 형태와 마르텐사이트로의 변형유기변태와 관련한 연구³⁹⁾에서 TEM 직접 관찰 실험을 통해 주변의 페라이트 및 베이나이트와 연계되어 있는 잔류오스테나이트만이 소성변형시 마르텐사이트로 변태하여 연성향상에 기여하며, 베이나이트 레스 사이에 위치하는 필름 형태의 잔류오스테나이트와 페라이트 결정립 내에 고립되어 있는 잔류오스테나이트는 많은 양의 소성변형이 가해져도 마르텐사이트로 변태되지 않는다고 보고하였다.

4.2 진응력 - 진변형률 곡선

그림 15에 본 연구에서 사용된 각 시편들의 저속, 중간속도, 고속에서의 진응력-진변형률 곡선을 나타내었다. 각 시편들의 진응력

-진변형률 곡선을 살펴보면 전체적으로 변형속도가 증가할수록 강도도 증가하며, 높은 속도에서는 비교적 심한 항복점 현상을 나타내고 있지만 낮은 속도에서는 항복점 현상이 약하게 나타나고 있다. 0.1wt.%의 C을 함유한 10LS와 10HS와 0.15wt.%의 C을 함유하고 있는 15HS와 15LS의 진응력-진변형률 곡선을 비교해보면 10LS와 10HS의 항복강도는 500~700MPa의 범위이고, 15LS와 15HS의 항복강도는 600~800MPa의 범위로, 0.1wt.% C을 함유하고 있는 시편보다 0.15wt.% C을 함유하고 있는 시편의 항복강도가 더 높게 나왔다. 앞에서 언급했듯이, C의 함유량이 많으면 강도는 강할지 모르나, 용접성에 있어서 단점을 나타내고 있기 때문에 현재 C 함유량을 줄이고 있는 태세이므로, C의 함유량은 줄이되, 강도와 연성의 밸런스가 우수한 그런 TRIP형 냉연강판을 계속해서 연구해야한다.

그림 16와 17에 저속, 중간속도, 고속에서의 잔류오스테나이트의 안정도가 높은 시편과 낮은 시편의 진응력-진변형률 곡선을 나타내었다. 탄소 함유량의 차이에 상관없이 전체적으로 낮은 안정도의 잔류오스테나이트를 함유한 10LS와 15LS보다 높은 안정도의 잔류오스테나이트를 함유한 10HS와 15HS의 항복강도가 전 변형속도에서 높게 나왔고, 특히 0.15wt.% C을 함유한 15LS와 15HS에서 항복강도의 차이는 크게 나타났다.

하지만 시편 전체적으로 변형속도가 비교적 낮은 속도에서는 확연하게 구분이 가계 항복점이 쉽게 나타났지만, 변형속도가 빨라질수록 ringing에 의한 fluctuation이 심해져서 항복점의 생성여부를 결정하는데 어려움을 겪게 된다.

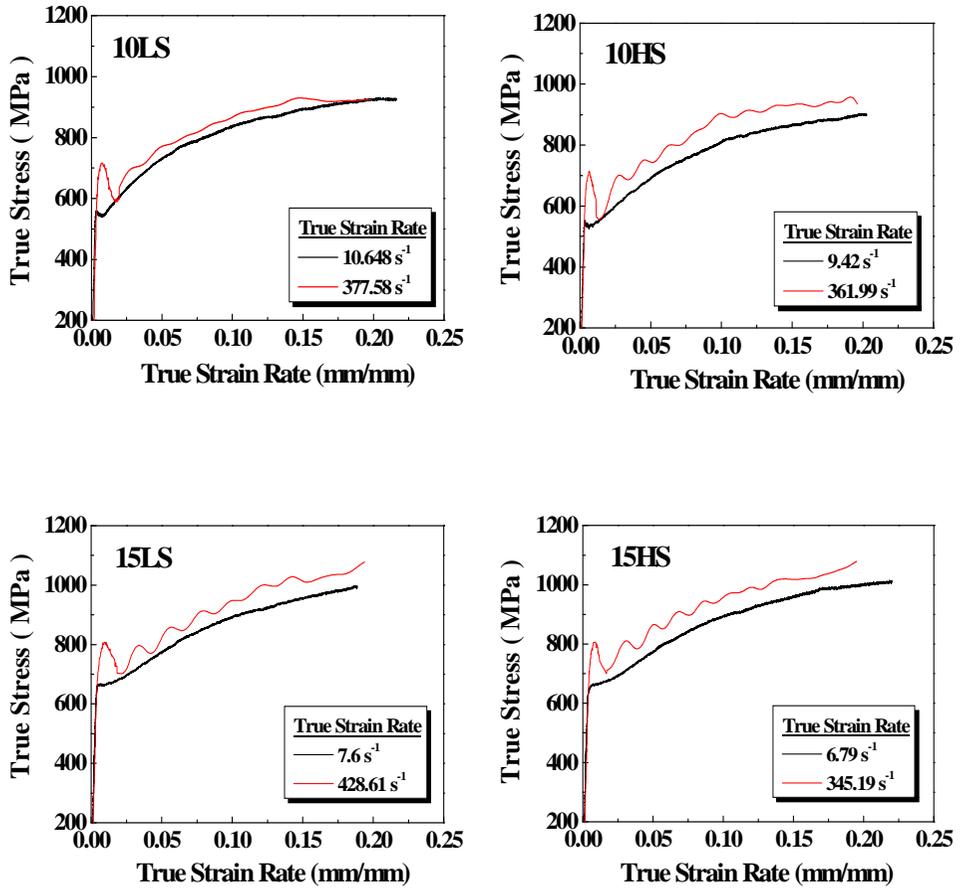


Fig. 15. True stress-strain curves at two different strain rates for each TRIP steel studies.

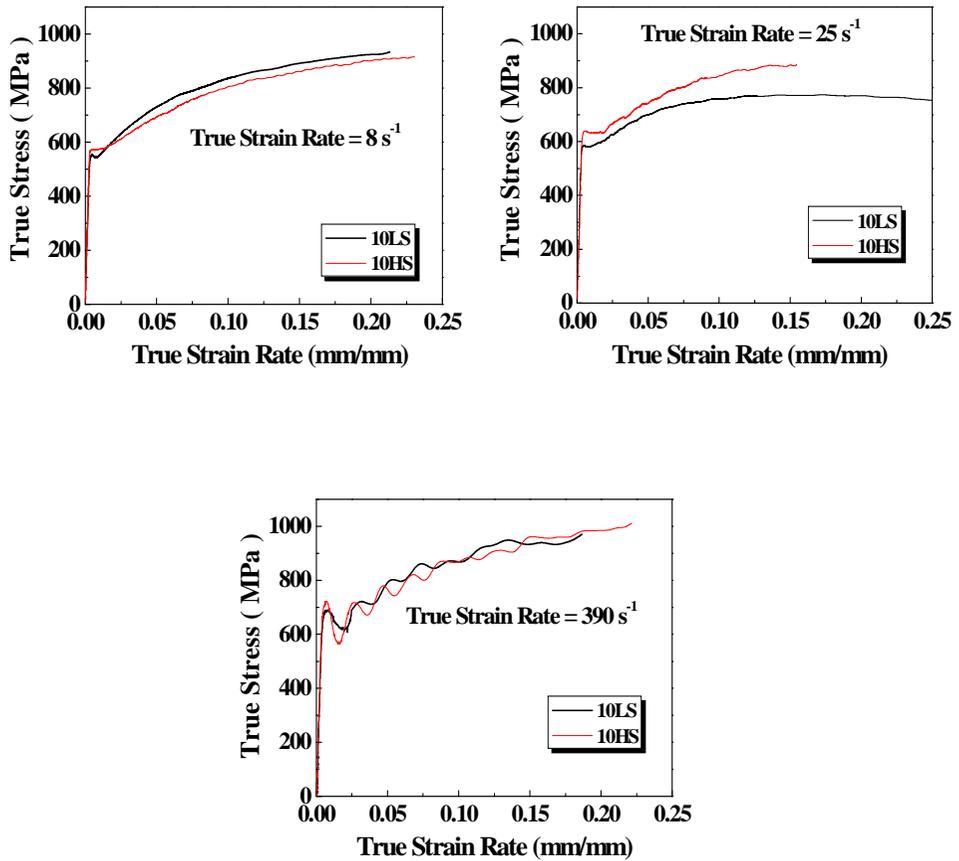


Fig. 16. True stress–strain curves comparing 10LS and 10HS for three different strain rates.

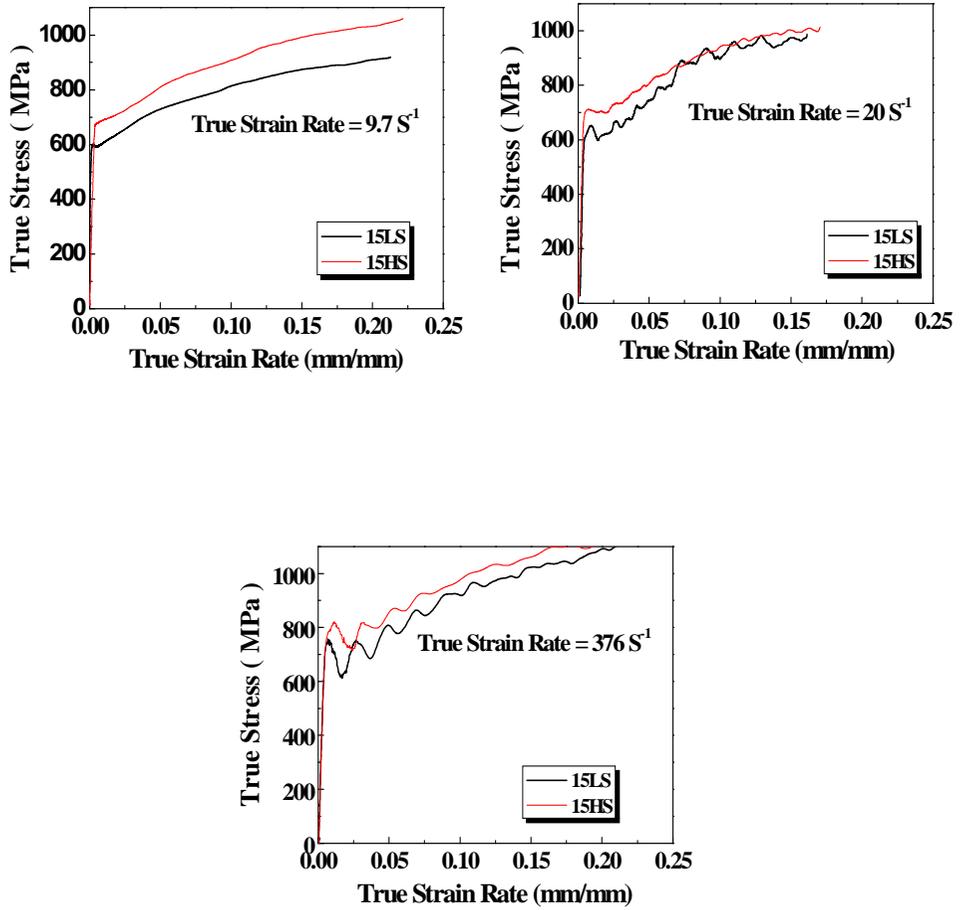


Fig. 17. True stress-strain curves comparing 15LS and 15HS for three different strain rates.

4.3 Strain Rate Sensitivity

그림 18에 각 시편의 UTS가 변형속도에 따라 변화하는 양상을 나타내었다. 전체적으로 변형속도가 증가함에 따라 UTS가 증가하는 양상을 나타내어 positive strain rate sensitivity를 보였다. 0.15wt.% C을 함유하고 있는 15LS와 15HS의 UTS값은 750~950MPa로서, 0.1wt.% C을 함유하고 있는 10LS와 10HS의 UTS값 650~850MPa 보다 약 100MPa정도 높게 나왔다. 잔류오스테나이트 안정도에 따른 차이는 높은 안정도의 잔류오스테나이트를 가지는 시편이 낮은 안정도의 잔류오스테나이트를 가지는 시편보다 UTS값이 30~50MPa정도 높았다. 이는 잔류오스테나이트의 안정도가 높다고 하는 것은 외부에서 충격이나 하중이 부과될 때 마르텐사이트로 변태하지 않고 그만큼 오래 견딜 수 있다는 의미이므로, 안정도가 낮은 잔류오스테나이트를 가지는 시편보다 UTS값이 높게 나오는 이유로 사료 된다.

각 시편의 경우, 변형속도에 따라 strain rate sensitivity가 2개의 뚜렷한 영역으로 나뉘어져 있다. 10/sec 이하의 변형속도에서는 상대적으로 완만한 strain rate sensitivity의 증가를 나타내었으나 그 이상의 변형속도에서는 변형속도의 증가에 따라 UTS가 급격하게 증가하는 경향을 보여주어 자동차 충돌과 같은 고속변형에서 높은 인장강도를 나타낼 것으로 예상된다.

그림 18에 나타난 strain rate sensitivity를 10/sec의 변형속도를 기준으로 두 개의 영역으로 나누어 strain rate sensitivity, m을 다음 식 (4)로 구하여 표 7에 정리하고 그 결과를 그림 19에 나타내었다.

$$m = \Delta \log \sigma / \Delta \log \dot{\epsilon} \quad (4)$$

10/sec 이하의 낮은 변형속도에서는 각 시편간의 strain rate sensitivity 차이가 거의 없으나, 10/sec 이상의 고속의 변형속도에서는 각 시편간의 strain rate sensitivity 차이가 나타난다. 0.1wt.% C을 함유하고 높은 안정도의 잔류오스테나이트를 가지는 10HS의 경우, 고속영역에서의 m값은 저속영역에 비해 2배이상 높으나 낮은 안정도의 잔류오스테나이트를 가지는 10LS의 경우에는 고속영역의 m값이 저속영역의 m값보다 50%정도밖에 높지 않아 같은 조성이지만 잔류오스테나이트의 안정도에 따라서 고속변형거동이 다르게 나타났다. 마찬가지로 15HS의 경우는 저속영역의 m값보다 고속영역의 m값이 2배였지만, 15LS는 저속영역의 m값보다 고속영역의 m값이 약 70%정도 높게 나타났다. 전체적인 strain rate sensitivity가 0.15wt.% C을 가지는 시편보다 0.1wt.% C을 가지는 시편이 높아 충돌특성은 0.1wt.% C을 가지는 10HS와 10LS가 더 우수할 것으로 판단된다. 그러나 앞의 UTS값이나 뒤에 나오는 absorbed energy값의 결과와는 대치되는 결과로서 이 부분에 있어서는 향후 체계적인 연구가 필요하다고 사료되어진다.

Table 7. Strain rate sensitivity m of UTS of steels tested

Sample	$m \times 10^3$ (strain rate < 10/sec)	$m \times 10^3$ (strain rate > 10/sec)
10LS	15	23
10HS	13	28
15LS	8	14
15HS	9	18

4.4 Elongation

과단연신율은 인장시험 전에 시편에 표시한 gage mark를 시편 과단 후 측정하여 결정하였다. 그림 20에서 나타난 것처럼 전 시편에 있어서 과단연신율은 변형속도가 증가할수록 증가하였다. 전체적으로 15HS의 연신율이 가장 높게 나왔고, 다음으로 10HS, 15LS, 10LS 순으로 연신율의 크기가 결정 되었다. 이는 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 C의 함유량이 많을수록 연신율이 높게 나왔다는 의미이다. 이와 같은 결과는 앞서서도 언급했듯이 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 외부의 충격이나 하중에 마르텐사이트로 변태하지 않고 오래 견딜 수 있다는 결과를 재차 확인시켜주는 결과이다. 따라서 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 고속인장 특성은 우수할 것으로 사료된다.

4.5 Absorbed Energy

총흡수에너지는 공칭응력-변형률곡선의 면적으로 나타내는데 다음 식(5)와 같은 간단한 식에 의해 계산하였고 그 결과는 그림 21에 나타내었다.

$$U_T \approx s_u e_f \quad (5)$$

U_T = work per unit volume (area under stress-strain curve)

S_u = ultimate tensile strength (UTS)

e_f = strain at failure

과단연신율은 인장시험전후 시편표면에 표시한 표점거리의 차이를 측정하여 결정하였다. 그림 21의 결과는 모든 시험대상 시편들에서 변형속도가 증가하는데 따라 흡수에너지도 증가함을 나타낸다. 전체적으로 15HS의 총흡수에너지가 가장 높게 나왔고, 다음으로 15LS, 10HS, 10LS 순으로 총흡수에너지의 크기가 결정되었다. 이는 위의 과단연신율의 결과와 마찬가지로 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 C의 함유량이 많을수록 총흡수에너지가 높게 나왔다는 의미이다. 이와 같은 결과 역시 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 고속인장특성이 우수하다는 결과를 다시 한번 확인시켜주고 있다.

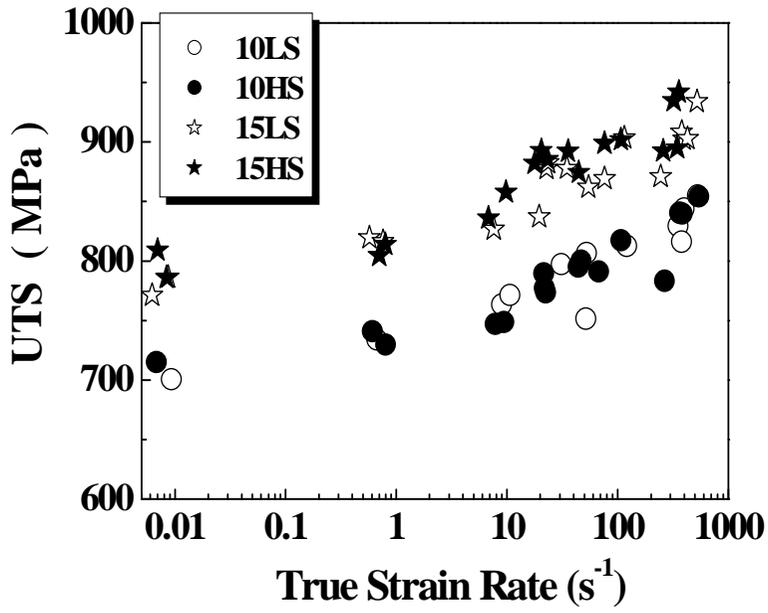


Fig. 18. UTS vs. true strain rate for each TRIP steel studied.

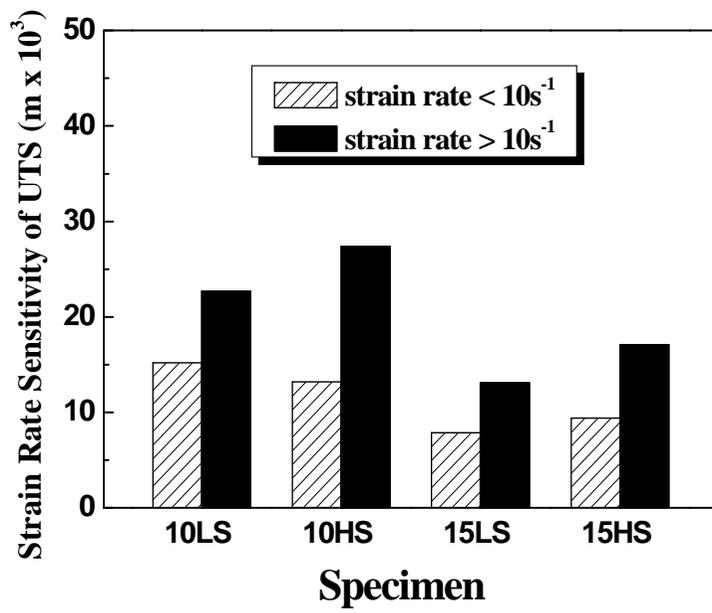


Fig. 19. Strain rate sensitivity m of steels tested

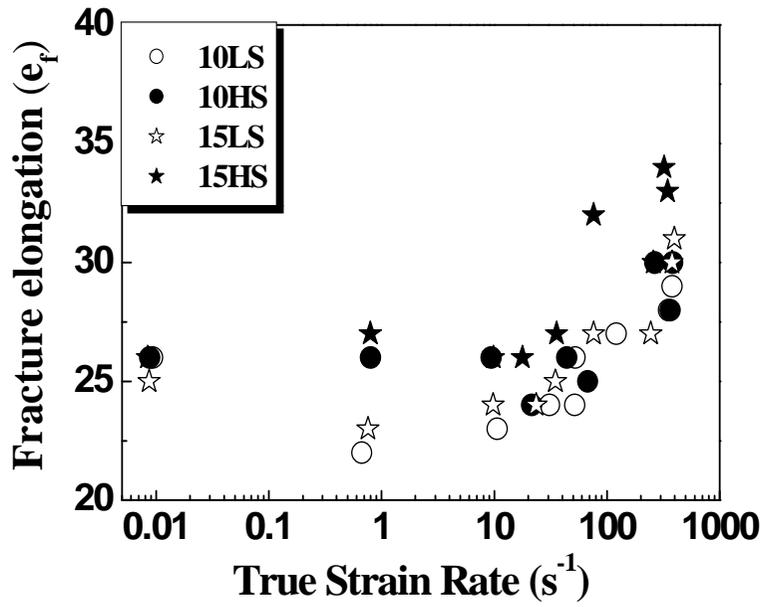


Fig. 20. Fracture elongation vs. true strain rate for each TRIP steel studies.

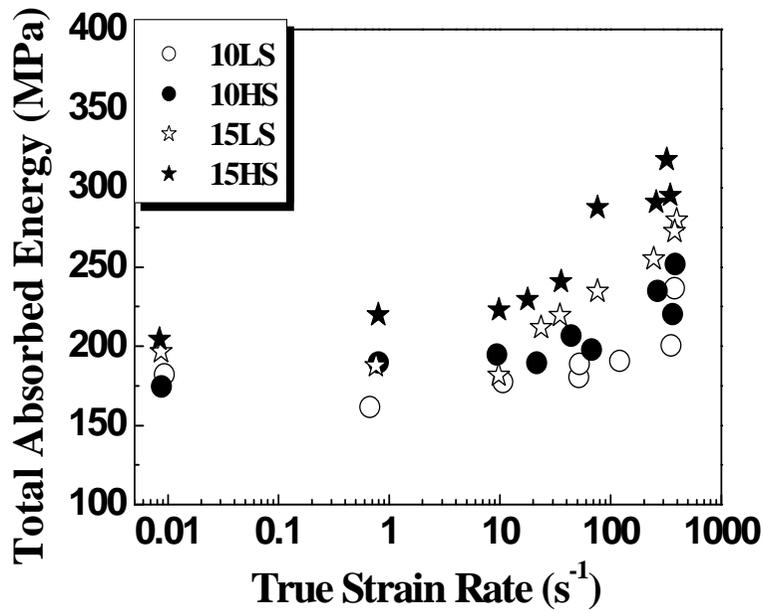


Fig. 21. Total absorbed energy vs. true strain rate for each TRIP steel studies.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 잔류오스테나이트의 안정도가 다르게 설계된 0.1wt.%C과 0.15wt.%C을 가지는 저탄소 TRIP형 냉연강판에 대하여 잔류오스테나이트의 안정도가 고속인장특성에 미치는 영향을 평가하였으며, 고속인장특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 미세조직 조사, 잔류 오스테나이트 분율 측정, 고속인장 data의 분석 등을 실시하여 그 결과를 분석한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경량재료인 Al을 grip 재료로 사용, load data의 fluctuation을 줄이기 위한 elastic strain gage의 grip 부위 부착, 높은 변형속도를 얻기 위한 짧은 gage length의 사용 등 다양한 방안에 의해 신뢰성이 높은 고속변형인장시험 결과를 얻을 수 있었다.
- (2) TRIP형 냉연강판의 고속인장특성은 잔류오스테나이트의 안정도와 직접적으로 관련이 있으며, 강재의 조성과 잔류오스테나이트 부피분율이 같더라도 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 변형에 대한 잔류오스테나이트의 저항성이 높아져 변태유기소성현상이 높은 변형률 영역까지 안정적으로 지속되기 때문에 균일변형률이 향상됨과 함께 높은 인장강도를 가져서 우수한 고속인장특성을 가지게 된다.
- (3) 모든 시편들의 진응력-진변형률 곡선을 살펴보면 전체적으로 높은 속도에서는 비교적 심한 항복점 현상을 나타내고 있지만, 낮은 속도에서는 항복점 현상이 약하게 나타나고 있다. 항복강도는 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록, C의 함유량이 많

을수록 높게 나왔고, 항복점 현상 역시 안정도가 낮은 시편보다 뚜렷하게 나타나는 경향을 보였다.

- (4) 모든 시편에 있어서 변형속도가 증가할수록 UTS가 증가하는 양상을 나타내어 positive strain rate sensitivity를 보였다. 15LS와 15HS의 UTS값은 750~950MPa로서, 10LS와 10HS의 UTS값 650~850MPa보다 약 100MPa정도 높게 나왔다. 잔류오스테나이트 안정도에 따른 차이는 안정도가 높은 시편이 안정도가 낮은 시편보다 UTS값이 30~50MPa정도 높았다. 이는 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 외부의 충격이나 하중에 변태유기소성현상이 잘 일어나지 않으므로, 안정도가 낮은 시편보다 UTS값이 높게 나오는 이유로 사료된다.
- (5) 파단연신율은 인장시험 전에 시편에 표시한 gage mark를 시편 파단 후 측정하여 결정하였고, 모든 시편에 있어서 파단연신율은 변형속도가 증가할수록 증가하였다. 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 C의 함유량이 많을수록 연신율은 증가하였다. 이 같은 결과 역시 변태유기소성현상에 대한 저항성이 안정도가 높을수록 크다는 사실에서 결과의 원인을 찾을 수 있다고 사료 된다.
- (6) 모든 시편들에서 변형속도가 증가하는데 따라 흡수에너지도 증가함을 나타낸다. 전체적으로 15HS의 총흡수에너지가 가장 높게 나왔고, 다음으로 15LS, 10HS, 10LS 순으로 총흡수에너지의 크기가 결정 되었다. 이는 위의 파단연신율의 결과와 마찬가지로 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록, C의 함유량이 많을수록 총흡수에너지가 높게 나왔다는 의미이다. 이와 같은 결과 역시 잔류오스테나이트의 안정도가 높을수록 고속인장특성이 우수하다는 결과를 다시 한번 확인시켜주고 있다.

참 고 문 헌

1. H. Hayashi : CAMP-ISIJ, 11 (1993) 388
2. K. I. Sugumoto, N. Ushi, M. Kobayashi, and S. I. Hashimoto :
ISIJ Inter., 32 (1992) 1311
3. K. I. Sugumoto, N. Ushi, M. Kobayashi, and S. I. Hashimoto :
Metall. Trans. A, 23 (1992) 3085
4. H. C. Chen, H. Era, and M. Shimizu : Metall. Trans. A, 20
(1989) 437
5. C. G. Lee and S. J. Kim : J. Korean Inst. Met. & Mater., 36
(1998) 1024
6. S. G. Park, C. G. Lee, S. J. Kim, and I. D. choi : J. Korean
Inst. Met. & Mater., 36 (1998) 1234
7. C. G. Lee, S. J. Kim, S. G. Park and I. D. choi : J. Korean
Inst. Met. & Mater., 36 (1998) 1382
8. K. Sugimoto : CAMP-ISIJ, 11 (1998) 400
9. S. J. Kim and T. H. Lee : Research Report of MOST, Korea
Inst. Machinery & Materials, Changwon (1996) 29
10. H. Sano : “Effects of Cu and Other Tramp Elements on
Steel Properties” , Iron and Steel Inst., Japan, Tokyo (1997) 19
11. H. Matsuoka, K. Osawa, M. Ono and M. Ohmura : ISIJ Inter.,
37 (1997) 255
12. H. J. Koh, S. K. Lee, S. H. Park, and N. J. Kim : Proceeding
of the 6th Symposium on Phase Transformation, Korean Inst.
Met & Mater., Pohang (1996) 157

13. V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr, and R. Bush : Trans. ASM, 60 (1967) 252
14. A. Z. Hanzaki, P. D. Hodgson, and S. Yue : ISIJ Inter., 35 (1995) 79
15. K. Sugimoto, M. Kobayashi, and S. I. Hashimoto : Metall. Trans. A, 23A (1992) 3085
16. O. Matsumura, Y. Sakuma, and H. Takechi : Scripta Metallurgica, 21 (1987) 1301
17. Y. Sakuma, O. Matsumura, and H. Takechi : Metall. Trans. A, 22A (1991) 489
18. O. Matsumura, Y. Sakuma, Y. Ishii, J. Zhao : ISIJ Inter., 32 (1992) 1110
19. O. Matsumura, Y. Sakuma and H. Takechi : ISIJ Inter., 32 (1992) 1014
20. K. Sugimoto, M. Misu, M. Kobayashi, and H. Shirasawa : ISIJ Inter., 33 (1993) 775
21. I. Tamura : Testu-to-Hagane, 56 (1970) 429
22. G. B. Olson and M. Cohen : Metall. Trans. A, 7A (1976) 1897
23. G. B. Olson and M. Cohen : Metall. Trans. A, 7A (1976) 1905
24. Y. Sakuma, N. Kimura, A. Itami, S. Hiwatashi, O. Kawano and K. Sakata : Nippon Steel Technical Report, No. 64, March (1995)
25. O. Matsumura, Y. Sakuma and H. Takechi : ISIJ Inter., 27 (1987) 570
26. J. H. Chung : "A Study on the Transformation Induced Plasticity in High Strength Cold Rolled Sheet Steel Containing

- Retained Austenite” , Ph. D Thesis, POSTECH, April, (1993)
27. A. W. McRaynolds : J. Appl. Phys., 20 (1949) 896
 28. S. A. Kulin, M. Cohen, and B. L. Averbach : H. Metals, 4 (1952) 661
 29. J. R. Patel and M. Cohen : Acta. Metall., 1 (1953) 531
 30. G. L. Huang, D. K. Matlock, and H. Hato : Metall. Trans. A, 20A (1989) 1239
 31. J. M. Marder : “Formable HSLA and Dual-Phase Steels”, A. T. Davenport, ed., TMS-AIME, Warrendale, PA (1979) 87
 32. J. M. Rigsbee and P. J. VanderArend : “Formable HSLA and Dual-Phase Steels” , A. T. Davenport, ed., TMS-AIME, Warrendale, PA (1979) 56
 33. N. C. Geol, S. Sangal, and K. Tangri : Meyall. Trans. A, 16A (1985) 2013
 34. O. Matsumura, Y. Sakuma and H. Takechi : ISIJ Inter., 27 (1987) 570
 35. T. Suzuki, H. Kojima, K. Suzuki, T. Hashimoto, and M. Ichimure : Acta Metall., 25 (1977) 1151
 36. K. W. Andrews : J. Iron Steel Inst., 203 (1965) 721
 37. R. L. Miller : Trans. ASM. 57 (1964) 892
 38. R. L. Miller : Trans. ASM. 57 (1964) 592
 39. C. G. Lee and S. J. Kim : J. Korean Inst. Met. & Mater., 36 (1998) 1024

The Effect of Retained Austenite Stability on High Speed Deformation Behavior of TRIP Steels

Dong-Min Kim

**Department of Materials Engineering
Graduate School
Korea Maritime University**

ABSTRACT

The safety of passengers is very important during an automobile collision. Because the collision event involves high speed deformation, property data and deformation mechanisms of materials under high strain rate conditions are needed to choose proper materials for automobiles. Therefore, in this study, dynamic mechanical properties of low carbon TRIP steels with varying retained austenite stabilities were evaluated over a wide range of strain rates using a high-velocity hydraulic tensile testing machine. Tensile tests were performed at strain rates ranging from 10^{-2} to 6×10^2 /sec using normal ASTM E-8 specimens with an elastic strain gage attached to the sample grip end to measure load and a plastic strain gage mounted on

the gage section to measure strain precisely. Ultimate tensile strengths, strain rate sensitivities, and strain hardening behaviors are reported. The strength of TRIP steels increased with increasing strain rate, that is, positive strain rate sensitivity was observed.

감사의 글

길게만 느껴졌던 지난 2년간의 세월이 너무도 짧은 것 같아 안타까움이 앞섭니다. 의욕도 컸고, 하고 싶은 일도 많았지만 돌이켜 생각해보니 나태했던 제 자신이 부끄럽기만 합니다. 2년 동안의 대학원 생활을 마무리하고 사회로 나서려는 지금, 너무나도 감사한 분들이 있기에 논문의 끝자리를 빌어 이렇게 감사의 마음을 전합니다.

지난 4년간 실험실 생활을 하는 동안 부족하고 모자란 저에게 너무나도 많은 깨달음을 주신 최일동 지도교수님께 머리 숙여 감사의 마음을 드립니다. 또한 저희 재료공학과와 최고 어른이시자 끝은 성품으로 제자들을 훌륭하게 가르치시는 김영식 교수님, 항상 학문적 열정이 가득하시며 미천한 저의 논문을 심사해 주신 이성열 교수님, 항상 제자들의 편에서 이해해 주시고 따뜻이 대해주시는 문경만 교수님, 김윤해 교수님, 이병우 교수님께 진심으로 감사드립니다.

재료강도실험실의 선배님이시자 탁월한 능력으로 사회에서 인정받고 계시고 항상 후배들이 걸어가야 할 길을 알려주시는 안경화 선배님, 박상곤 선배님, 진선화 선배님, 송병환 선배님, 주기운 선배님, 한창훈 선배님, 조권도 선배님, 박환영 선배님, 박종민 선배님, 전상혁 선배님, 이종영 선배님, 한향수 선배님에게 감사드리며, 약 5개월에 걸친 미국에서의 연구방문 동안 물심양면으로 저에게 도움을 주신 박영도 선배님과 한 공 선배님께 감사드립니다. 여러 선배님들에게 부끄러운 후배가 되지 않도록 앞으로 최선을 다하는 모습 보여드리도록 노력하겠습니다.

6년간 한국해양대학교의 학생으로서 희로애락을 같이 하였던 정현이, 태훈이, 선형이, 영희, 보성이, 명신이, 언종이, 무중이, 찬영이, 동수 등 96학번 모두에게 감사드리며, 못난 선배 밑에서 갖은 고생 다하며 저를 도와주었던 해중이, 운현이, 동민이, 상민이, 효준이, 주현이, 마지막으로 삭막한 남자들 사이에서 홍일점 역할을 해주는 성희에게 감사드립니다.

마지막으로 항상 부족한 저를 믿고 뒷바라지 해주신 부모님, 형님, 형수님, 동희, 그리고 사랑하는 가은이에게 감사드립니다. 앞으로도 부끄럽지 않은 사람으로 살아갈 것을 약속드립니다.