



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

트립강의 충돌특성에 대한 충돌시험과 컴퓨터 전산모사 결과의 비교 연구

A Comparative Study on the Crash Properties of TRIP Steels
between Computer Simulation and Crash Test Result



지도교수 최 일 동

2010년 10월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

강 성 규



공학석사 학위논문

트립강의 충돌특성에 대한 충돌시험과 컴퓨터 전산모사 결과의 비교 연구

A Comparative Study on the Crash Properties of TRIP Steels
between Computer Simulation and Crash Test Result



2010년 10월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

강 성 규

본 논문을 강성규의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 ①

위원 공학박사 ①

위원 공학박사 ①



2010년 10월

한국해양대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	I
List of tables	II
List of figures	III
1. 서론	1
2. 이론적 배경	3
2.1 변태유기소성형 강판	3
2.2 변형률속도 제어 인장시험	4
2.2.1 TRIP강의 고속인장시험 필요성	4
2.2.2 변형률속도에 따른 인장시험 방법	4
2.2.3 변형률속도에 따른 물성 구성방정식	6
3. 실험방법	10
3.1 시험편 제조	10
3.2 고속인장시험	12
3.3 실험 결과 처리 방법	15
3.3.1 고속인장실험 결과 처리	15
3.3.2 Cowper-Symonds equation	18
3.4 Crash test	18
3.5 Computer simulation	22
4. 실험 결과 및 고찰	24
4.1 기계적 성질	24
4.1.1 True stress-True strain curve	24
4.1.2 기계적 물성값 결정	27
4.1.3 Strain rate sensitivity	31

4.1.4 Absorbed energy	33
4.2 Cowper-Symonds equation	34
4.3 Crash test	35
4.3.1 Experimental crash test	35
4.3.2 Computer simulation of crash test	35
4.3.3 실제 충돌실험과 computer simulation 결과 비교	41
4.4 향후 과제	41
5. 결론	43
6. 참고문헌	46



A Comparative Study on the Crash Properties of TRIP Steels between Computer Simulation and Crash Test Result

Seong Geu Kang

Department of Materials Engineering

*Graduate School of
Korea Maritime University*

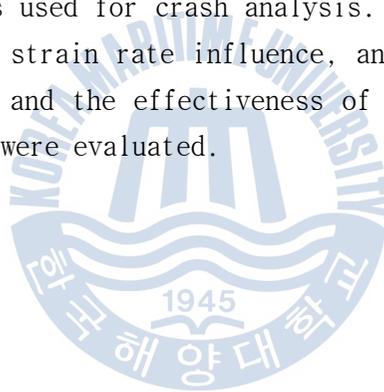
Abstract

The light-weight and safe design of auto-body structures becomes an important challenging issue in the automotive industry in order to increase the fuel efficiency satisfying the emission-gas regulation of vehicles. The demand for high strength steels with excellent ductility is continually increasing in the automotive industry. So, TRIP steel which have both high strength and ductility have received increased attention.

Recently, passenger safety has emerged as a major concern because of the light weight and faster speed of the vehicle. Collision characteristics must be accurately evaluated to ensure the safety of passengers in the vehicle. If a car runs at sixty kilometers per hour, arithmetical strain rate is a 67 per sec when considering a part of car with 250 millimeters. If a car runs at a hundred kilometers per hour, strain rate is 111 per

sec. Therefore, tensile test carried out at $10^2 \sim 3 \times 10^2$ per sec strain rate is needed for crash analysis. But, in the past, the experimental results at quasi-static strain rate were applied to constitutive equation for evaluating crash properties. Recently, a test at the high strain rate can be carried out and test results can apply to constitutive equation. Therefore, it is possible to evaluate the collision characteristics accurately.

In this paper, the tensile testing of TRIP steel sheet for auto-body have been carried out to obtain flow stress-strain curves at the strain rate of $10^{-2}/s$ to $4 \times 10^2/s$. Material constitutive equation is needed to represent the stress at the wide strain rate. The most typical material constitutive equation is Cowper-Symonds equation. And it's used for crash analysis using a computer. The software LS-DYNA for non-linear plasticity analysis was used for crash analysis. The simulation results, which had considered a strain rate influence, and the actual crash test results were compared, and the effectiveness of simulation considered a high speed deformation were evaluated.



List of tables

Table 1 Testing techniques according to strain rates

Table 2 Chemical composition of tested steel

Table 3 Mechanical properties for LS_DYNA card

Table 4 Data points for LS-DYNA card

Table 5 Mechanical properties of TRIP steel



List of figures

- Fig.1 True strain - true stress curves applied Johnson-Cook equation ; a) fitted from 2.37% strain to end point strain b) fitted from 1.18% strain to end point strain.
- Fig.2 GA simulation applied on the TRIP steel studied.
- Fig.3 Sample size for high strain rate tensile test.
- Fig.4 The high strain rate tensile test system (Instron VHS-8800).
- Fig.5 Knock-out wedge system.
- Fig.6 The sample attached strain gage is used at high strain rate tensile test at $4 \times 10^2/s$.
- Fig.7 Comparison of stress-strain curve between load washer and strain gage at a strain rate of $4 \times 10^2/s$.
- Fig.8 Comparison of load data from strain gage and from FFT smoothing.
- Fig.9 Equipment for crash test.
- Fig.10 Dimension of crash test sample.
- Fig.11 Geometrically shape of sample for crash test.
- Fig.12 True strain - true stress curves applied Johnson-Cook equation ; a) fitted from 2.37% strain to end point strain b) fitted from 1.18% strain to end point strain.
- Fig.13 Engineering strain-stress and smoothed engineering strain-stress curve ; a) smoothed data by FFT filter and b) smoothed all data.
- Fig.14 True strain-stress and smoothed true strain-stress curve ; a) smoothed data by FFT filter and b) smoothed all data.
- Fig.15 Strain hardening rate of studied steel; a) $10^{-2}/s$, b) $1/s$, c) $10/s$, d) $6 \times 10/s$, e) $10^2/s$, f) $2 \times 10^2/s$ and g) $4 \times 10^2/s$.

Fig.16 UTS and YS are lineally increasing with increased strain rate.

Fig.17 Strain hardening exponent, uniform elongation and fracture elongation are increasing with increasing strain rate.

Fig.18 Strain rate sensitivity of UTS and YS.

Fig.19 Calculated absorbed energy up to 0.1 engineering strain of tested steel.

Fig.20 Trend lines of the experimental result for the UTS of studied steel.

Fig.21 Vertical displacement versus time curve at 6m/s and 10m/s

Fig.22 Collision force versus time curve at 6m/s and 10m/s.

Fig.23 Absorbed energy versus time curve at 6m/s and 10m/s.

Fig.24 Vertical velocity versus time curve at 6m/s and 10m/s.

Fig.25 Stress state of tested steel at 1msec from computer simulation; a) 6m/s and b) 10m/s.

Fig.26 Vertical displacement versus time curve at 6m/s and 10m/s.

Fig.27 Collision force versus time curve at 6m/s and 10m/s.

Fig.28 Absorbed energy versus time curve at 6m/s and 10m/s.

Fig.29 Vertical velocity versus time curve at 6m/s and 10m/s.

Fig.30 Comparison of absorbed energy between experiment and simulation up to strain 0.1(Vertical displacement versus absorbed energy); a) 6m/s and b) 10m/s.

제 1 장 서 론

최근 국제적으로 환경규제가 강화되면서 에너지 절감에 대한 관심이 높아지고 있으며, 사회가 발달함에 따라 고객들의 요구 또한 다양해지고 있다. 특히, 자동차산업의 경우 강판이 차체 무게의 70% 정도를 차지하고 있기 때문에 강판의 신소재 개발과 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 등 철강재를 대체하는 재료들에 대한 연구가 진행되고 있다. 에너지 절감을 위해서는 차체 무게 감소가 필요하므로 고강도 재료에 대한 관심이 높으며, 고객들의 다양한 요구를 만족시키기 위해 복잡한 디자인의 차량이 제조됨으로서 고성형성 재료에 대한 관심 또한 높아지고 있다. 그 결과 차량용 재료들이 고강도화 되고 차체 무게가 가벼워지면서 속도 또한 빨라지고 있다. 이에 따라서 차량이 충돌할 때 승객의 안전성 확보가 중요한 인자로 대두되고 있으며, 승객의 안정성확보를 위해서는 재료의 충돌 특성에 대한 분석이 정확하게 이루어져야 한다. 자동차 충돌은 고속 변형이며, 충돌 특성 평가를 위해서는 이에 부합하는 동적물성값 확보가 필수적이다.

현재 고강도, 고성형성 철강재료로 가장 관심 받고 있는 것은 페라이트, 베이나이트, 잔류오스테나이트, 마르텐사이트 등의 여러 가지 상이 혼합되어 있는 TRIP강이다. TRIP강은 상온의 잔류오스테나이트가 변형을 받으면 단단한 마르텐사이트로 변태하면서 강도와 연신율을 증가시키는 변태유기소성(Transformation Induced Plasticity)의 특성을 가지고 있어^[1,2] 비슷한 강도를 가진 일반 고장력강에 비해 낮은 항복비와 높은 변형경화능을 나타낸다^[3-8]. 높은 변형경화능은 자동차부품의 제조과정에서 국부적인 necking 발생에 대한 저항성을 높여 성형성을 향상시키고, 제조된 부품에서의 높은 인장강도는 충돌흡수에너지와 피로성질을 개선시킨다. 따라서 자동차업계 및 철강업계의 TRIP강에 대한 관심은 높아져 왔고 상당한 수준의 제품 연구개발과 현장적용이 이루어져 오고 있다.

일반적으로 금속재료의 동적거동은 정적 또는 준정적인 하중상태에서의 거동과 큰 차이를 보인다^[9-14]. 이러한 동적거동은 운송수단의 고속화와 더불어 큰 관심사가 되고 있는데 특히 자동차, 항공기 등은 승객의 안전성 확보가 매우 중요한 문제이기 때문이다. TRIP 강을 운송수단에 적용하기 위해서는 고속변형 특성 즉, 동적거동을 잘 이해해야할 필요가 있다^[15-18]. 일반적으로 자동차가 충돌할 때 얻어지는 재료의 변형률속도는 대략 $10^2/s \sim 3 \times 10^2/s$ 정도이므로 이에 해당하는 속도 범위에서의 실험이 요구된다^[19].

재료의 동적거동에 대한 정확한 물성값을 확보하고 이를 충돌해석에 이용하기 위해서는 변형률속도에 따라 변하는 유동응력을 표현할 수 있는 물성 구성방정식이 필요하다. 이제까지 많은 물성 구성방정식들이 제안되었으며, 이들은 변형률경화, 변형률속도 경화 및 열적연화를 서로 구분하고 독립적인 항으로 수식화한 후 유동응력을 표현하고 있다. 또한 이들은 기술적 요인으로 정적영역의 결과를 바탕으로 고속영역의 유동응력 거동을 예측하였다. 하지만, 현재 고속변형률속도 실험이 가능하게 되면서 기존보다는 정확한 분석이 가능해 지고 있다.

대표적인 물성 구성방정식으로는 Cowper-Symonds^[20] 모델과 Johnson-Cook^[21] 모델이 있다. Cowper-Symonds 모델은 동적응력을 준정적 응력에 항복응력의 변형률속도 민감도를 곱한 형태로 제안되고, Johnson-Cook 모델은 소성변형에 의한 열적연화를 고려하여 변형률 경화항, 변형률속도 경화항, 열적연화항이 분리된 형태로 제안되었다. 이 두 모델은 현재 상용화된 컴퓨터 해석 프로그램에 적용되어 있어 사용이 편리하다. 본 연구에 사용된 컴퓨터 해석 프로그램은 LS-DYNA 이며, 이를 이용하여 충돌 특성을 simulation을 통해 예측하였다. 이렇게 예측된 결과와 실제 충돌 실험을 통한 결과를 비교하였다.

본 연구는 고속인장실험 방법, 실험결과 처리 방법, 물성 구성방정식의 적용 방법, computer simulation 방법, 충돌실험 방법 등의 과정을 구축하고, 이를 바탕으로 충돌특성 분석의 한 가지 방법을 제안함을 목적으로 한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 변태유기소성형 강판

1967년 Zackay등^[1]에 의해 개발된 TRIP강은 다량의 Ni와 Cr을 함유한, 준안정 오스테나이트 스테인레스(metastable austenite stainless)강이다. 오스테나이트가 상온에서도 비교적 안정하게 존재하도록 하여 소성 변형 과정에서 가공유기 마르텐사이트가 변태되도록 설계되었다. 일반적인 탄소강에서 잔류오스테나이트를 얻기 위해서는 탄소나 오스테나이트 안정화 원소 (Si, Mn 등)를 첨가하여 M_s 점을 상온까지 낮추거나, 항온변태처리(Austempering) 방법을 사용한다. 이 처리를 이용하여 강도-연성의 밸런스가 우수한 강을 개발하고 있다^[22,23]. TRIP강에 대한 연구가 활발히 진행된 것은 TRIP 현상의 응용이 일반적인 재료의 강화법과는 달리 연성이 저하되지 않으면서 강도를 향상시킬 수 있다는 이점 때문이다. 즉 동일한 강도의 강판과 비교하면, 연신율이 크므로 인장강도-연신율 밸런스가 다른 고강도 강에 비해 높다. 일반적으로 재료의 강화는 연성의 저하를 유발하고, 특히 철강소재의 경우 강도향상은 연성의 저하를 일으키고 이에 따른 가공성이 감소한다. 또한 저온인성의 감소, 용접성의 저하도 함께 동반함으로 사용에 제한을 받고 있다. 그러나 TRIP강은 미세조직내 존재하는 잔류오스테나이트의 TRIP 현상에 의해 우수한 인장강도-연성 밸런스를 보이며, 아울러 성형성 및 용접성 등도 우수한 것으로 보고되고 있으므로 고연성, 고강도를 필요로 하는 자동차업계를 중심으로 각광을 받고 있다.

2.2 변형률속도 제어 인장시험

2.2.1 TRIP강의 고속인장시험 필요성

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

컴퓨터를 이용한 충돌해석에 이용될 수 있는 동적 기계적 특성은 load path와 충돌 시 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 자동차업체에서 이용할 수 있는 고속변형 data를 얻기 위해 노력하고 있다.

2.2.2 변형률속도에 따른 인장시험 방법

일반적으로 변형률속도에 따라 재료의 유동응력이 변화하며, 이에 따른 동적하중과 정적하중의 관계는 변형률속도에 의존하고, 그 정도가 각 재료마다 다르기 때문에 실험을 통해 고유 물성값을 구해야 한다. 때문에 변형률속도를 다르게 하는 실험이 필요하며 표 1에 변형률속도에 따른 시험방법들을 요약하였다. 통상적으로 1/s 이하의 변형률속도 실험은 준정적 변형률속도시험으로 기계식 인장시험기가 사용되고, 약 1/s ~ 5×10^2 /s 변형률속도는 중변형률속도실험으로 유압인장시험기가 사용되며,

10³/s 이상의 고속변형률속도실험에는 Hopkinson bar 시험법이 사용된다. 본 연구에서는 중변형률속도에서의 실험이 요구되므로 현대 하이스코 철강연구소가 보유하고 있는 유압식 인장시험기 Instron VHS 8800 모델을 사용하여 변형률속도 제어 인장실험을 실시하였다.

Table 1 Testing techniques according to strain rates

strain rate(s ⁻¹)	Common Testing Method	Dynamic Considerations	Remarks
10 ⁷	High Velocity Impact -Explosives	Shock-Wave Propagation	Inertial forces important
10 ⁶	-Normal plate impact -Exploding foil	Shear-Wave Propagation	
10 ⁵	-Plate impact (pressure-shear)		
10 ⁴	Dynamic-High -Taylor anvil tests	Plastic-Wave Propagation	Adiabatic
10 ³	-Hopkinson Bar -Expanding ring		
10 ²	Dynamic-Low High-velocity, or Pneumatic machines: cam Plastomer	Mechanical resonance in specimen & machine is important	
10 ¹			
10 ⁰	Quasic-Static Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	Test with constant cross head velocity Stress the same throughout length of specimen	Inertial forces neglected
10 ⁻¹			
10 ⁻²			
10 ⁻⁴			
10 ⁻⁵			
10 ⁻⁶	Creep & Stress relaxation Conventional testing machines, Creep testers	Visco-Plastic response of metals	Isothermal
10 ⁻⁷			
10 ⁻⁸			

2.2.3 변형률속도에 따른 물성 구성방정식

변형률속도를 제어한 인장실험에서 얻은 결과를 충돌해석에 적용하기 위해서는 재료의 거동을 표현할 수 있는 물성 구성방정식이 필요하다. 일반적으로 동적 항복응력을 정적 항복응력과 근사하여 변형률속도 민감도를 구한 후 정적 응력-변형률 그래프에 곱하여 동적 응력-변형률 그래프를 구하곤 하였다. 하지만 이 방법은 증가하는 변형률에 따른 재료의 동적 거동을 완전하게 해석하지 못하며, 이를 해결 하고자 많은 연구들이 이루어져 왔으나, 정확한 실험 결과가 부족하고 구성방정식의 한계로 사용에 제약이 있다.

물성 구성방정식의 대표적 모델이 식 2-1로 표현되는 Cowper-Symonds 구성방정식이다.

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (2-1)$$

σ_0 는 정적 항복응력을 나타내고, $\dot{\epsilon}$ 은 유효 변형률속도이다. C와 p는 재료상수로 C는 정적항복응력에 비하여 응력이 두 배가 되는 변형률속도를 의미한다. Cowper-Symonds 구성방정식은 정적하중그래프에 변형률속도 경화항을 곱하였기 때문에 변형 정도에 상관없이 적용되기 때문에 증가하는 변형률에 대해 감소하는 변형률속도 민감도를 표현하지 못하는 오류가 있다.

Johnson-Cook 구성방정식은 Ludwik 방정식을 기초로 식 2-2와 같이 표현되며, 실험적으로 A, B, n, C, m의 재료 상수를 결정한다.

$$\bar{\sigma} = [A + B \bar{\epsilon}^n] [1 + C \ln \bar{\epsilon}] [1 - T^{*m}] \quad (2-2)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (2-3)$$

대수함수를 이용하여 변형률속도 민감도를 표현한다. 첫 번째 괄호는 변형률 경화효과, 두 번째 괄호는 변형률속도 경화, 세 번째 괄호는 열적 연화효과를 나타낸다. 변형률, 변형률속도, 온도 상승효과를 고려하긴 했지만 재료의 변형이 이들에 의해서만 영향을 받는 것이 아니기 때문에 정확하게 응력 변화를 표현하지는 못한다. 또한 변형률 경화를 항복응력에 변형률 경화량을 더한 형태로 표현하므로 항복강도 부근의 응력그래프가 잘 맞지 않는다.

이 외에도 식 2-4로 표현되는 Klopp-Clifton-Shawki 모델과 식 2-5의 Campbell 모델이 있으며, 이들은 전단응력과 전단변형률의 관계를 나타낸다. 식 2-4의 τ 와 γ 는 전단응력과 전단변형률, n 과 m 은 변형률 경화계수와 변형률속도 경화계수를 나타내며 v 는 열적연화를 나타낸다. 식 2-5의 Campbell 모델은 A, n, m, B 의 재료상수를 갖는다.

$$\tau = \tau_0 \gamma^n T^{-v} \dot{\gamma}_p^m \quad (2-4)$$

$$\tau = A \gamma^n \left[1 + m \ln \left(1 + \frac{\dot{\gamma}}{B} \right) \right] \quad (2-5)$$

식 2-6로 표현되는 Zerilli-Armstrong 모델은 FCC와 BCC 구조의 금속재료에 대한 구성방정식을 제안한다.

$$\begin{aligned} FCC: \sigma &= \sigma_G + C_2 \epsilon^{1/2} \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}) + k d^{-1/2} \\ BCC: \sigma &= \sigma_G + C_1 \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}) + C_5 \epsilon^n + k d^{-1/2} \end{aligned} \quad (2-6)$$

위에 열거한 구성방정식 중 Johnson-Cook 구성방정식과 Cowper-Symonds 구성방정식을 가장 많이 사용하고, 상용 프로그램에 이 두 방정식이 채택되어 있어서 사용이 편리하다. 본 연구에서는 Johnson-Cook 구성방정식 대신 Cowper-Symonds 구성방정식을 사용하였다. 그 이유는 Johnson-

Cook 모델의 경우 열적연화향이 있기 때문에 변형동안의 온도변화를 측정해야 한다. 하지만 본 실험에서는 온도를 측정하지 않았으므로 Johnson-Cook 모델을 적용하는데 한계가 있다. 더군다나 Johnson-Cook 계수들을 결정하는데 있어서 그림 1처럼 범위에 따라서 편차가 나타난다. 때문에 응력-변형률 곡선에서 직접 값을 입력하는 Cowper-Symonds 모델을 적용하였다.



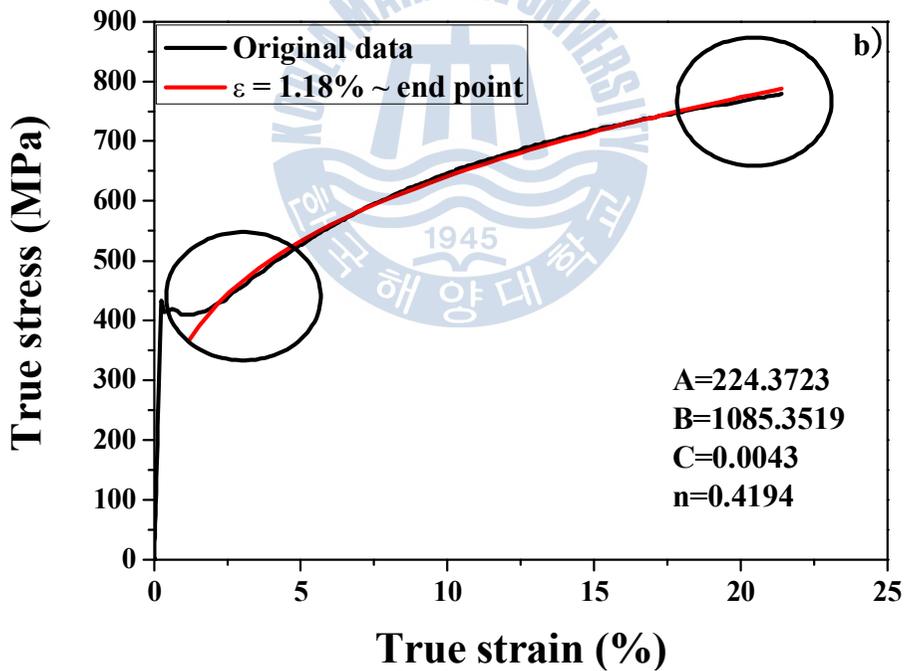
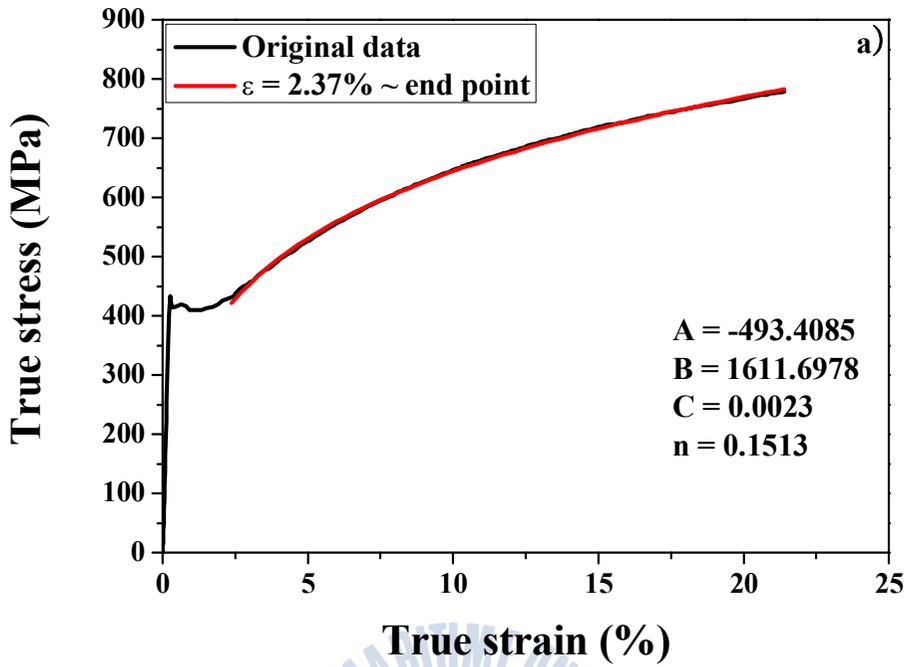


Fig.1 True strain - true stress curves applied Johnson-Cook equation ; a) fitted from 2.37% strain to end point strain b) fitted from 1.18% strain to end point strain.

제 3 장 실험방법

3.1 시험편 제조

본 연구에서 사용된 합금은 Fe-0.147%C-0.28%Si-1.5%Mn-0.93%Al-0.5Cu-0.34%Co wt%조성을 갖는 합금으로 시험편의 합금 설계와 제조는 모두 현대 하이스코에서 실시하였으며, 최종 상태로 제공받았다. GA(Galvannealed) 모사를 포함한 열처리 이력을 그림 2에 나타내었으며, 화학조성은 표 2에 나타내었다.

위에서 언급했듯이 고속인장시험은 실험의 어려움과 시험기에 대한 많은 연구가 필요한 분야로 아직 정확한 시험편의 규격이 정해지지 않았다. 그래서 앞으로 더 많은 연구가 필요한 분야이기도 하다. 그림 3에 장비 제작사의 제안에 의한 시험편 규격을 나타내었으며, 모든 실험은 상온에서 실시되었다.

Table 2 Chemical composition of tested steel

alloy	C	Si	Mn	Al	Cu	P	Co	Fe
TRIP	0.147	0.28	1.50	0.93	0.50	-	0.34	Bal.

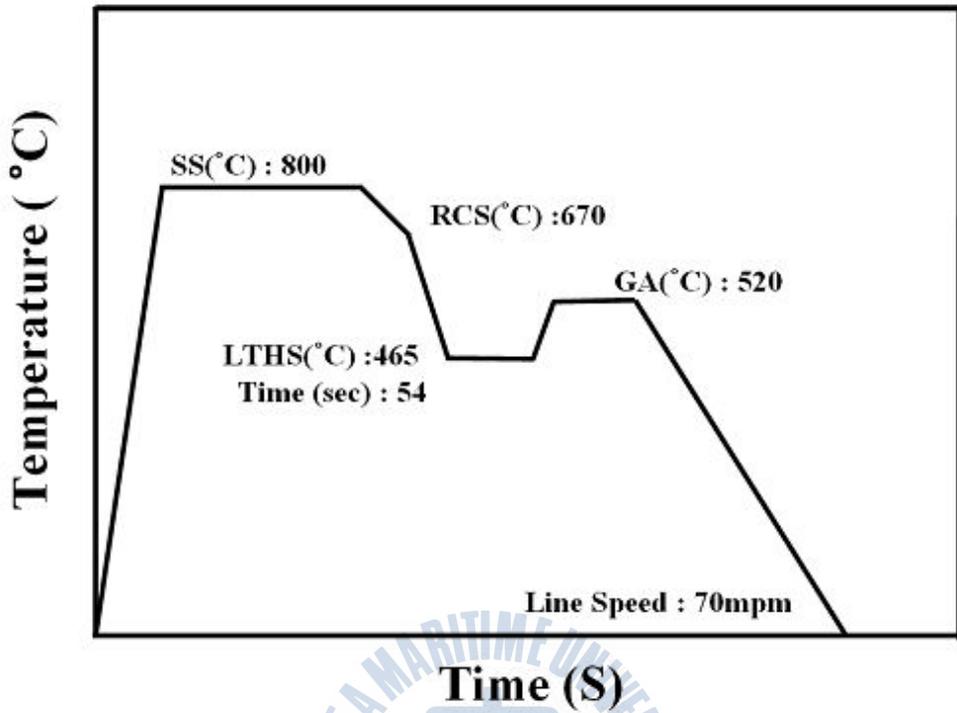


Fig.2 GA simulation applied on the TRIP steel studied.

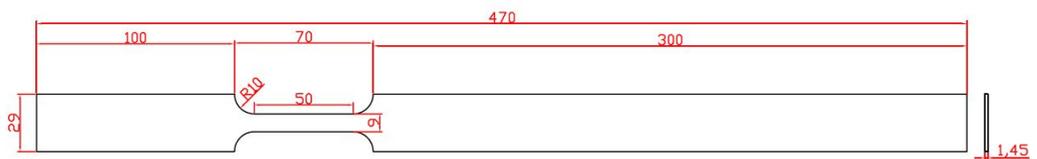


Fig.3 Sample size for high strain rate tensile test.

3.2 고속인장시험

본 연구에 사용되어진 고속인장시험장비는 충남 당진에 위치한 현대 하이스코 연구소가 보유하고 있는 유압식 고속인장기 Instron-VHS 8800을 사용하였으며, 고속인장시험 장비를 그림 4에 나타내었다. 일반적으로 고속인장시험은 시편을 입력속도에 도달한 지그가 갑자기 잡아당기는 방식을 사용한다. 그래서 그림에 충분한 속도보상을 위해 시편의 하단 부분이 길게 설계된다. 대표적인 고속인장시험 기구에는 슬랙 어댑터(slack adapter)방식과 녹아웃 웨지(knock-out wedge)방식이 있다. Instron-VHS 8800의 경우 녹아웃 웨지 방식을 채택하고 있으며, 그 구조를 그림 5에 나타내었다. 녹아웃 웨지 방식의 지그는 크게 봉스프링, 녹아웃 웨지, 녹아웃 핀, U형 그림으로 구성된다^[24]. 시편이 U형 그림 사이에 위치하고 이를 관통하는 봉스프링을 조여 줌으로써 시편을 잡아당기게 된다. 시편과 U형 그림 사이에 간격을 주어 U형 그림이 입력속도까지 이동이 가능하며 입력속도에 도달하면 녹아웃 핀에 의해 녹아웃 웨지가 분리되며 U형 그림이 시편을 고정시키고 인장을 가하게 된다. 녹아웃 웨지 방식은 슬랙 어댑터 방식에 비해 충격력이 작기 때문에 상대적으로 정확한 실험이 가능하다. 이러한 녹아웃 웨지 방식을 채택하여 각 변형률속도별 3회의 실험을 실시하였으며, $10^{-2}/s \sim 4 \times 10^2/s$ 범위의 7단계 변형률속도에서 총 21회 시험하였다. 변형률속도 $10^{-2}/s \sim 6 \times 10/s$ 까지는 하중떨림현상이 크지 않아 실험 data 분석이 용이하였다. 그러나 $10^2/s$ 이상의 변형률속도에서는 하중떨림현상이 커지게 되어 data 분석이 어려워진다. 가장 하중떨림현상이 큰 $4 \times 10^2/s$ 실험의 경우 하중은 시편의 grip 부위에 부착한 탄성 스트레인 게이지에 의해, 변형률은 게이지 부위에 부착한 소성 스트레인 게이지에 의해 측정하였다. 게이지가 부착된 시편의 모식도를 그림 6에 나타내었다.



Fig.4 The high strain rate tensile test system
(Instron VHS-8800).

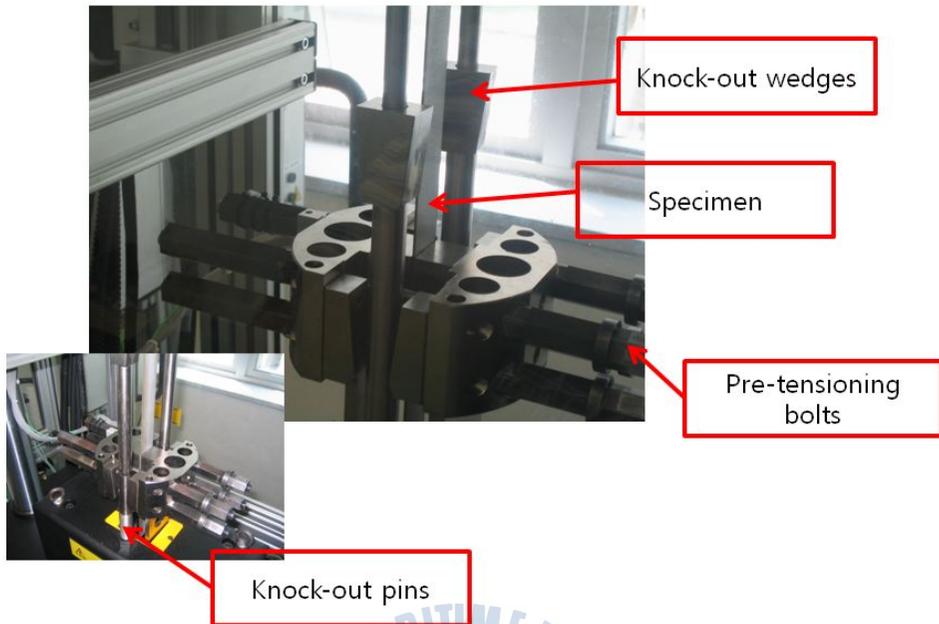


Fig.5 Knock-out wedge system.

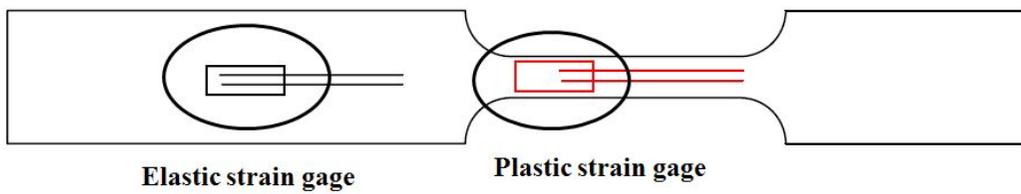


Fig.6 Schematic diagram of sample attached strain gage.

3.3 실험 결과 처리 방법

3.3.1 고속인장실험 결과 처리

실험 재료의 동적 물성값을 얻기 위해 준정적영역에서 중변형률속도 영역까지 $10^{-2}/s \sim 4 \times 10^2/s$ 조건에서 유압식 고속인장시험기를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 속도가 중변형률속도 영역으로 분류되지만, 본 연구에서는 준정적 영역보다 빠르므로 고속인장실험으로 명명한다. 고속인장실험에 사용된 유압식 고속인장시험기의 작동기구는 녹아웃 웨지 방법으로 녹아웃 웨지가 충분히 내려와 녹아웃 웨지 핀에 걸리면서 제거가 되고 U형 그립이 시편을 당기면서 하중이 시편, 상부그립, load washer, 기계의 크로스헤드로 전달되게 된다. 이 때 발생하는 충격파가 하중 전달 경로를 따라 load washer까지 전달되어 공칭변형률-공칭응력 그래프에 진동으로 나타난다. 이와 같은 진동은 인장속도가 증가할수록 주파수는 적어지고 진폭은 커져서 하중의 결정을 힘들게 한다. 이를 보정하기 위해 변형률을 측정하기 위한 소성 스트레인 게이지를 표점거리 내에, 하중 측정을 위한 탄성 스트레인 게이지를 그립 부분에 부착하여 사용하게 된다. Load washer에 의한 변형률-응력 그래프와 스트레인 게이지에 의한 변형률-응력 그래프의 예를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타나듯이 스트레인 게이지를 사용하더라도 하중떨림현상이 발생한다. 그래서 이를 좀 더 매끄러운 하중그래프를 얻기 위해 유연화 과정을 실시하였다. 유연화는 origin 7.5 버전에서 실시하였다. Origin에서 설정한 주파수보다 높은 주파수의 퓨리에 성분을 제거하는 FFT(Fast Fourier Transform) 필터를 사용하였으며, 그 예를 그림 8에 사각형 기호로 나타내었다. FFT 필터에 의해 유연화 과정을 거친 공칭응력 그래프와 스트레인 게이지를 이용한 공칭응력 그래프가 비교적 잘 일치하며 유연화 과정을 거친 data를 신뢰할 수 있음을 보여주고 있다. 정지 상태의 시편을 특정 속도로 갑자기 인장하기 때문에 탄성구간에서 큰 충격력이 시편에

가해진다. 그래서 탄성영역에서 소성영역으로 넘어가는 부분의 항복점에
서 하중이 예상보다 높게 측정된다.

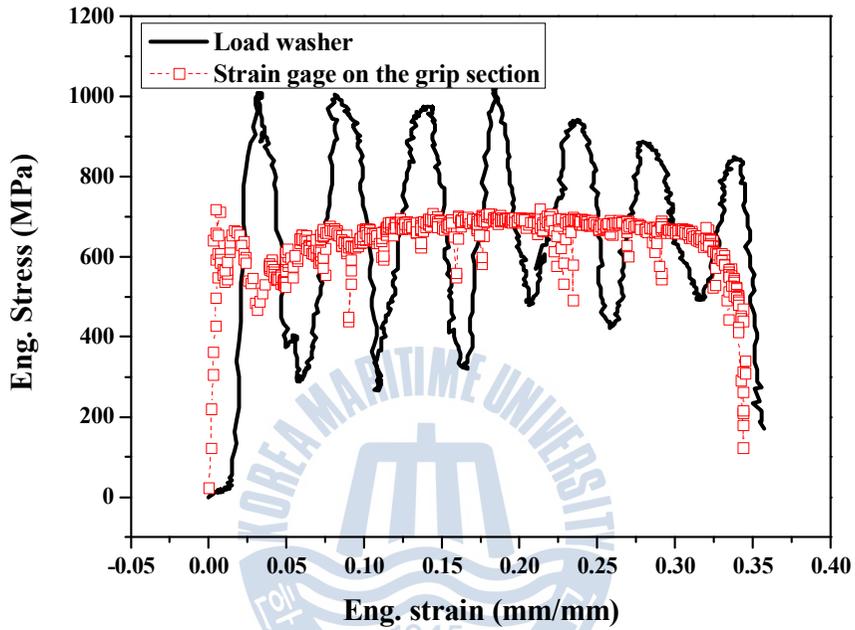


Fig.7 Comparison of stress-strain curve between load washer and
strain gage at a strain rate of $4 \times 10^2/s$.

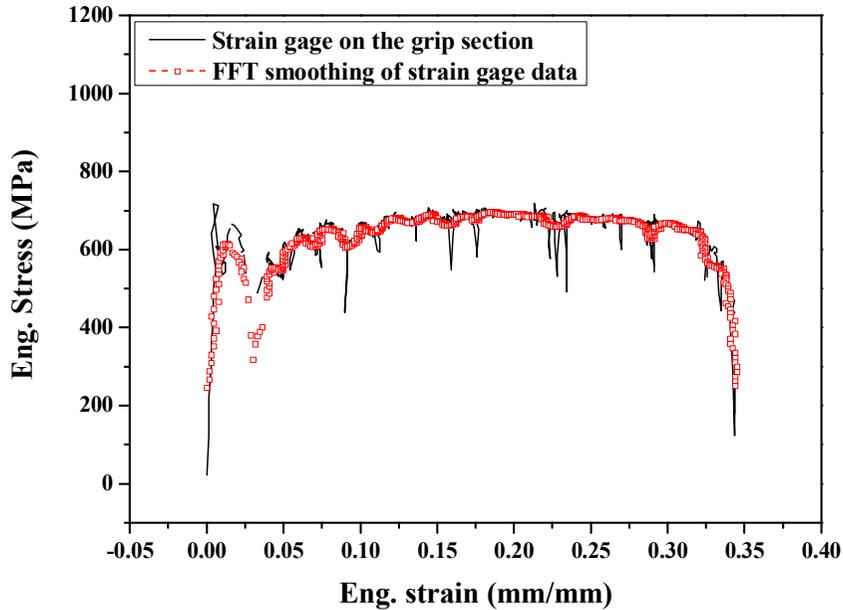


Fig.8 Comparison of load data from strain gage and from FFT smoothing.

앞서 설명한 동적 인장시험 방법에 의하여 변형률속도에 따른 공칭응력 - 공칭변형률 그래프를 얻었으며, 공칭응력과 공칭변형률을 식 (3-1)과 (3-2)에 의하여 진응력과 진변형률로 변환하였다.

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (3-1)$$

$$\sigma = s(1 + e) \quad (3-2)$$

진변형률은 공칭변형률에 1을 더한 것을 자연로그 취한 형태로 표현이 되고 진응력은 공칭응력과 공칭변형률에 1을 더한 것의 곱으로 표현된다. 위의 식은 공칭응력 그래프에서 최대 인장강도까지만 적용이 되며, 유연화 과정 역시 최대 인장강도까지로 제한하였다.

3.3.2 Cowper-Symonds equation

앞서 설명한 방법으로 구한 진응력과 진변형률을 사용하여 식 (3-3)으로 표현되는 Cowper-Symonds equation에 적용하여 물성상수 C와 p를 구한다.

$$\sigma'_0 = \sigma_0 + \sigma_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (3-3)$$

여기서, σ'_0 은 동적 유동응력, σ_0 는 정적 유동응력을 나타내며, C와 p는 변형률속도에 따른 인장실험으로 얻을 수 있는 재질 상수이다. 식 (3-3)의 양변에 자연로그를 취한 후 정리하면 아래 식 (3-4)와 같다.

$$\ln \dot{\epsilon} = p \ln \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} - 1 \right) + \ln C \quad (3-4)$$

식 (3-4)를 $x = \ln(\sigma'_0/\sigma_0 - 1)$, $y = \ln \dot{\epsilon}$ 로 놓으면 기울기 p, y축과 교점 $\ln C$ 를 갖는 1차 방정식으로 변환되며, 추세선의 기울기와 교점 값으로 C와 p 값을 정의할 수 있다^[25].

3.4 Crash test

실제 충돌 실험에 사용된 장비를 그림 9에 나타내었으며, 충돌 시험편의 규격을 그림 10에 나타내었다. 충돌 실험 조건은 200kg의 물체가 6m/s, 10m/s 각각의 속도로 충돌하며 각 속도 마다 2회 실험을 실시하였다. 이때 시간에 따른 변위와 속도 변화, 흡수에너지 변화를 측정하게 된다. 그림 11에 나타낸 것처럼 충돌 시험편은 3mm 두께의 cover1, cover2와 1.4mm 두께의 box, 그리고 1.4mm 두께의 plate로 구성되어 있

다. Cover와 box는 일반 아크 용접이 되어 있으며, plate와 box는 40mm 간격으로 점 용접하였다.

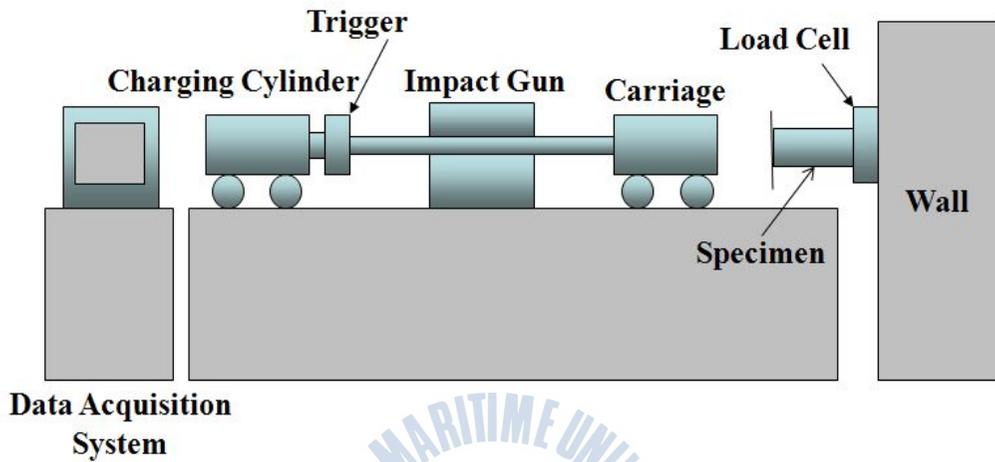


Fig.9 Equipment for crash test.



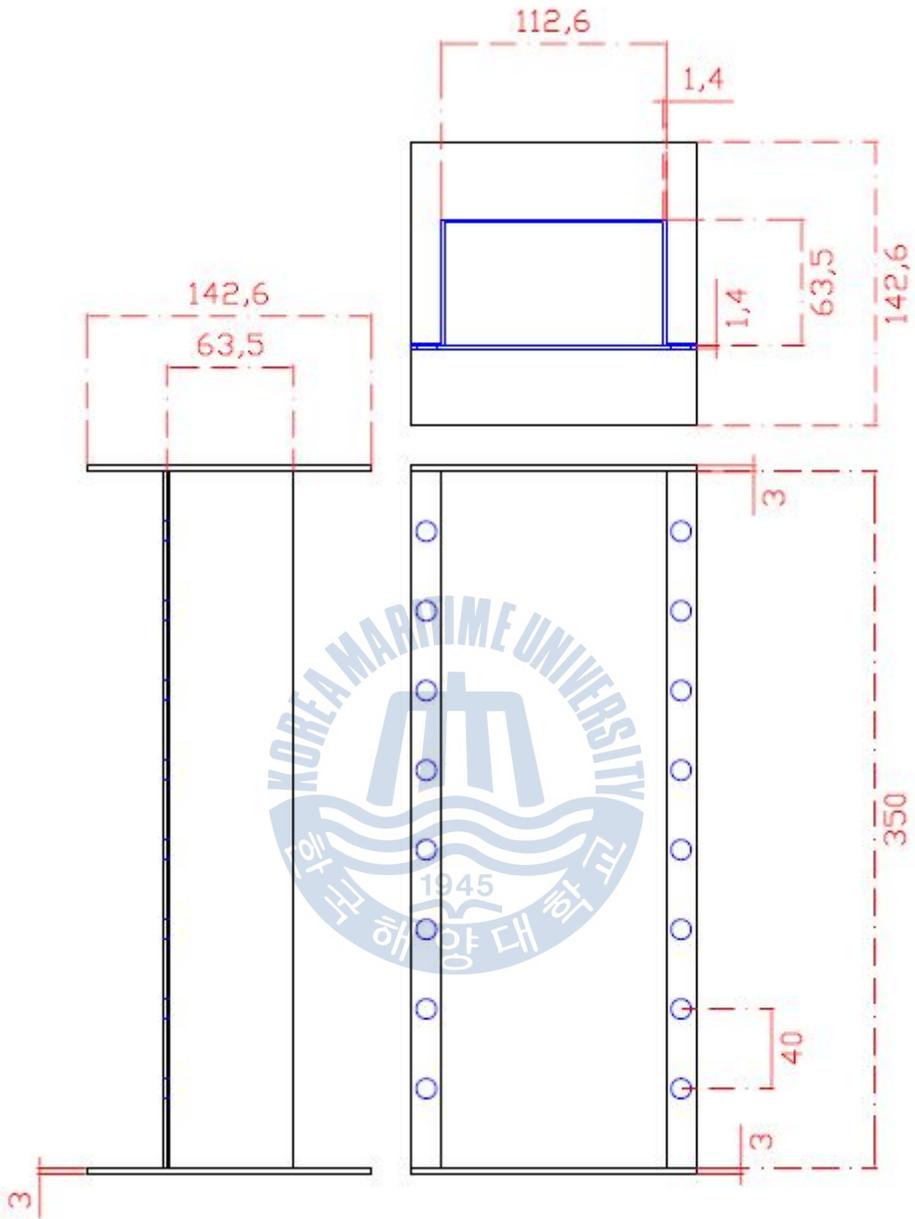


Fig.10 Dimension of crash test sample.

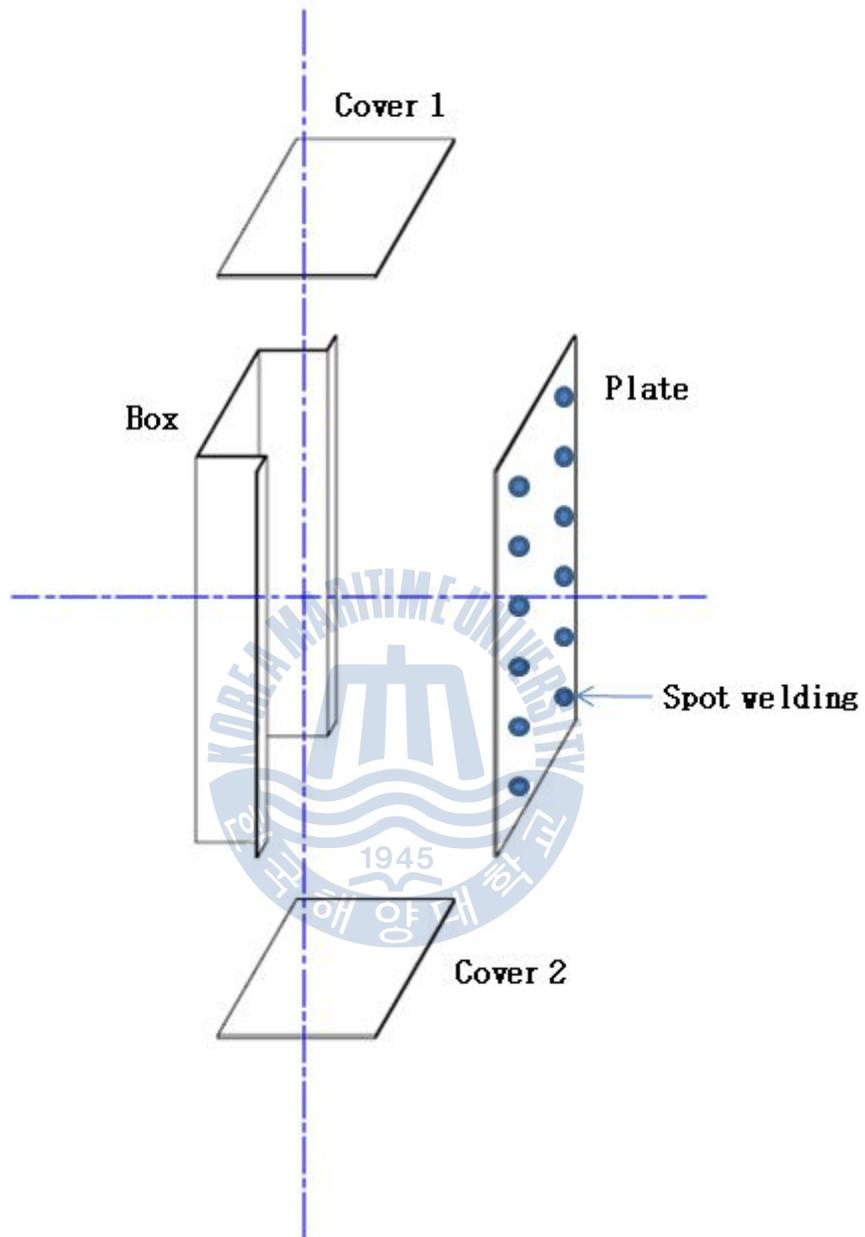


Fig.11 Shape of sample for crash test.

3.5 Computer simulation

Computer simulation은 LS-DYNA solver를 사용하였다. Box와 plate는 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY card^[25]를 적용하였으며, 이때 사용한 기계적 물성 값은 표 3에 나타내었다.

Table 3 Mechanical properties for LS-DYNA card

Young's modulus		250 GPa
Density		7.8 g/cm ³
Poisson's ratio		0.3
Yield stress	6m/s	506 MPa
	10m/s	519 MPa
Dynamic yield stress constants		C= 151309 /s , p = 6

충돌 실험 조건이 5m/s와 10m/s 이었으나, 실제 충돌 실험결과 속도가 6m/s와 10m/s였다. 이를 평행부 50mm에 적용하여 변형률속도를 계산하면 10²/s와 2× 10²/s에 유사하므로 이 두 변형률속도의 항복강도를 각각 적용하였다. MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY card 구성은 그림 12와 같으며, 변형률, 응력을 한 쌍으로 하는 8개의 점이 필요하다. 이 8개의 점은 실제 인장실험결과 그래프에서 추출하게 되는데 이때 항복강도와 최대 인장강도 등을 포함하는 것이 좋다. 본 연구에서는 10²/s, 2× 10²/s 에 해당하는 진변형률-진응력 그래프에서 표 4와 같이 8개의 점을 각각 추출하였으며 이를 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY card에 적용하였다. 분석 시간은 6m/s의 경우는 15msec, 10m/s의 경우는 40msec 동안 분석하였다. 그 이유는 실제 충돌실험이 6m/s, 10m/s 각각 15msec와 40msec 이내에서 실험이 정지하였기 때문이다. 그리고 실제 충돌실험과 마찬가지로 시간에 따른 속도, 변위, 흡수에너지 변화 등의 물성값을 LS-Prepost 2.2를 사용하여 구해낼 수 있었다.

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (2)

TITLE

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	3	7.830e-009	2.300e+005	0.3000000	512.00000	0.0	0.0	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	1.383e+005	6.0000000	0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0030000	0.0300000	0.0800000	0.1600000	0.2100000	0.2600000	0.3300000
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	512.00000	581.00000	667.00000	716.00000	714.00000	693.00000	583.00000

COMMENT:

Total Card: 2 Smallest ID: 3 Largest ID: 5 Total deleted card: 0

VARIABLE	DESCRIPTION
MID	Material identification. A unique number or label not exceeding 8 characters must be specified.
RO	Mass density.
E	Young's modulus.
PR	Poisson's ratio.
SIGY	Yield stress.
ETAN	Tangent modulus, ignored if (LCSS,GT,0) is defined.
FAIL	Failure flag.
TDEL	Minimum time step size for automatic element deletion.
C	Strain rate parameter, C, see formula below.
P	Strain rate parameter, P, see formula below.
EPS1-EP58	Effective plastic strain values (optional; supersedes SIGY, ETAN). At least 2 points should be defined. The first point must be zero corresponding to the initial yield stress. WARNING: If the first point is nonzero the yield stress is extrapolated to determine the initial yield. If this option is used SIGY and ETAN are ignored and may be input as zero.
ES1-ES8	Corresponding yield stress values to EPS1 - EP58.

Fig.12 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY card.

Table 4 Data points for LS-DYNA card

100/s	strain	0	0.01	0.02	0.05	0.1	0.17	0.23	0.26
	stress	0	506	503	620	759	845	865	748
200/s	strain	0	0.01	0.02	0.04	0.1	0.17	0.25	0.27
	stress	0	519	521	622	774	854	878	794

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 기계적 성질

4.1.1 True stress-true strain curve

그림 12에 변형률속도별 공칭응력-공칭변형률 그래프와 origin 7.5에서 FFT filter를 활용한 유연화 과정을 거친 그래프를 나타내었다. 그림 13 (a)에 나타나듯이 유연화 과정을 거치기 전의 결과들은 하중떨림현상에 의한 거친 그래프가 그려진다. 저속결과는 고속에 비해 매끄러우나 그냥 사용하기에는 다소 무리가 있어서 유연화 과정을 거치게 된다. 먼저 origin 7.5에서 FFT 필터를 활용하여 1차 유연화 작업을 하며, 모든 인장실험의 결과를 유연화한 그래프를 그림 13 (b)에 나타내었다. 이런 유연화 과정을 거친 결과를 소성영역과 최대 인장강도까지로 제한하여 식 (3-1), (3-2)를 활용하여 진응력-진변형률 그래프를 그렸다. 이렇게 구해진 진응력-진변형률 그래프를 탄성영역을 제외한 소성영역에 대해서 보정을 거친 결과를 그림 14 (a)에 나타내었다. 소성영역에 대한 보정을 실시한 진응력-진변형률 그래프를 그림 14 (b)에 모두 나타내었다.

변형률속도에 따라 증가하는 항복강도, 최대 인장강도와 변형률속도에 따른 연신율의 변화 등이 경향성을 나타내는 것으로 보아 유연화 과정을 거친 데이터들이 신뢰성을 갖는다고 할 수 있다. 즉, 변형률속도가 증가할수록 항복강도, 최대 인장강도, 연신율이 증가하는 것을 잘 나타내고 있다. Park^[26] 등은 연강의 경우 변형률속도가 증가할수록 항복강도, 최대 인장강도의 증가폭이 고강도강에 비해 크다고 보고하였다. 하지만 고강도강의 경우 변형률속도가 증가할수록 항복강도, 최대 인장강도의 증가폭은 그림 14에 나타나는 것처럼 작다. 즉, 본 연구에 사용된 TRIP강 역시 고강도강의 일반적인 특성^[27]을 나타내고 있음을 알 수 있다.

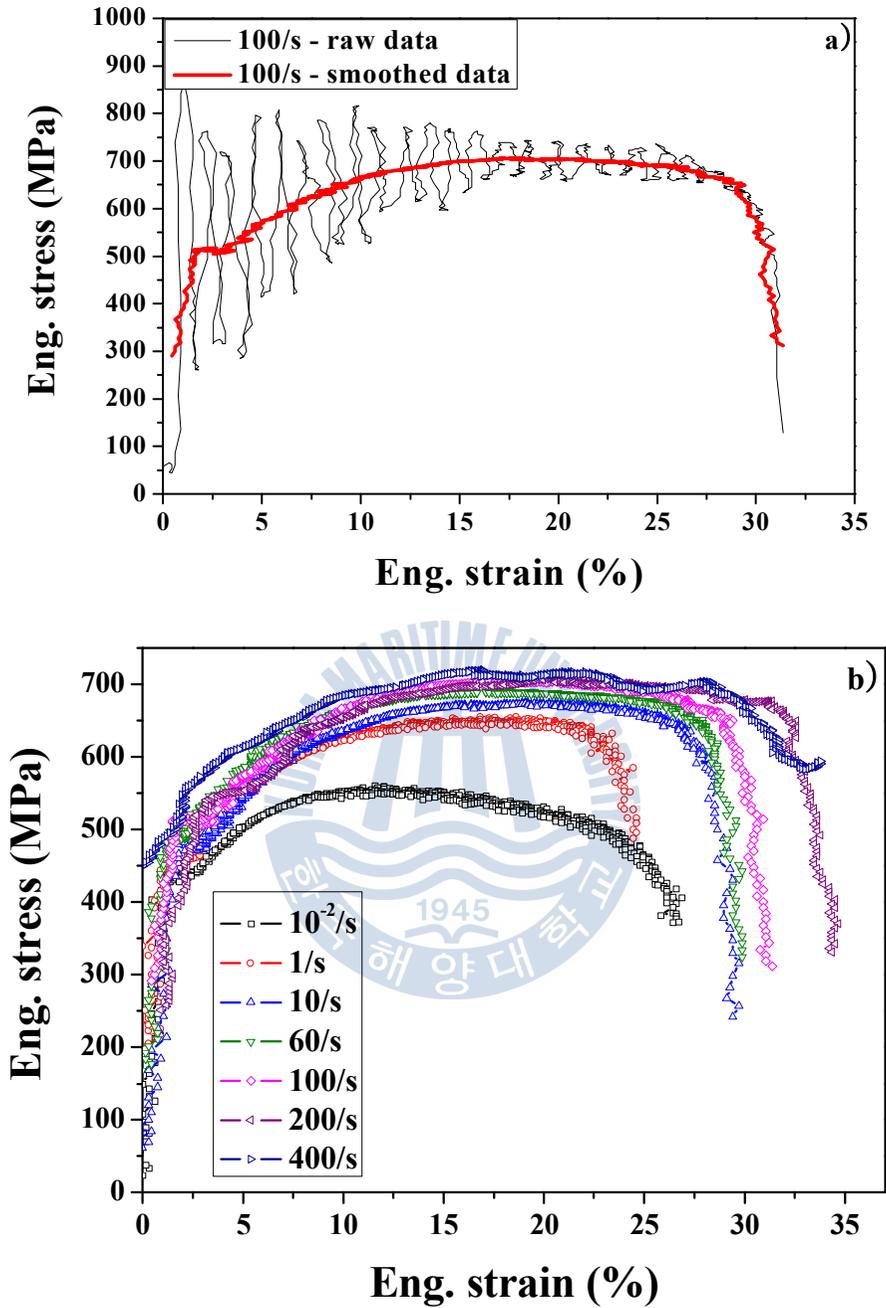


Fig.13 Engineering strain-stress and smoothed engineering strain-stress curve ; a) smoothed data by FFT filter and b) smoothed all data.

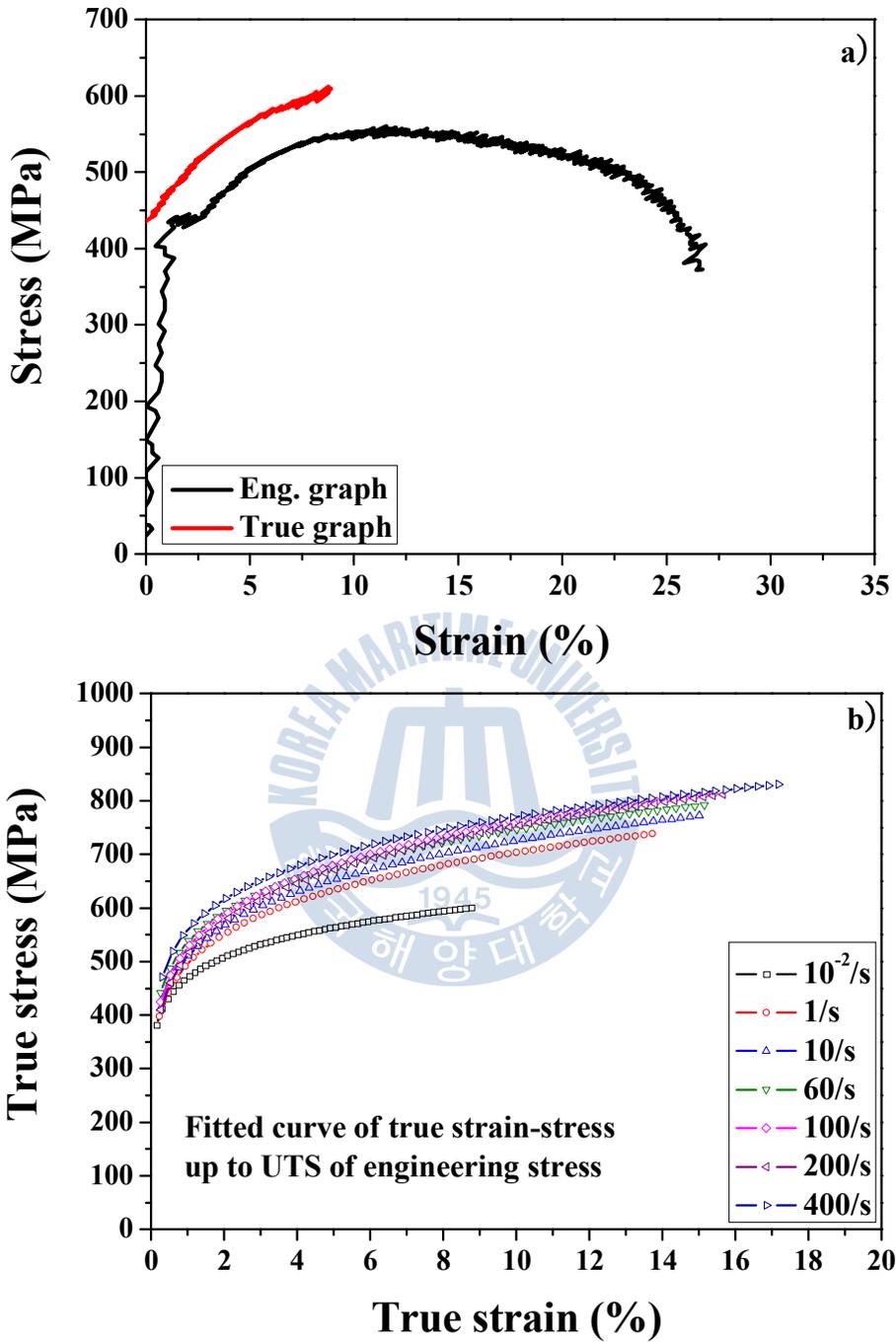


Fig.14 True strain-stress and smoothed true strain-stress curve ;
 a) smoothed data by FFT filter and b) smoothed all data.

4.1.2 기계적 물성값 결정

앞서 구한 그림 13의 결과를 바탕으로 일반적인 기계적 물성값들을 결정하였다. 첫 번째로 변형률에 따른 가공경화 정도를 확인하기 위해 식 (4-1)을 이용하여 유연화 과정을 거친 진응력-진변형률 그래프(그림 14)에서 가공경화률을 구하였으며, 그 결과를 그림 15에 변형률속도 별로 나타내었다. 두 번째로 최대 인장강도와 항복강도는 그림 13의 유연화를 거친 공칭응력-공칭변형률 그래프에서 결정하였으며, 결과를 그림 16에 나타내었다. 그리고 그림 13의 결과를 이용하여 균일 연신율과 파단 연신율, 그림 14의 그래프에서 가공경화지수를 구하여 그 결과를 그림 17에 각각 나타내었다. 가공경화지수와 강화계수는 일반적으로 유동곡선의 보편적인 수학적 표현인 식 (4-2)로부터 구할 수 있다. K 는 $\epsilon=1$ 에서의 응력이며 강화계수라 하며, n 은 가공경화지수를 나타낸다. n 과 K 는 식 (4-2) 양변에 대수를 취한 곡선의 기울기로부터 구할 수 있으며, origin 7.5버전을 활용하여 fitting을 하면 쉽게 구할 수 있다.

$$\text{Strain hardening rate} = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (4-1)$$

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (4-2)$$

위에서 구한 기계적 성질 결과를 표 5에 나타내었다. 가공경화지수, 균일 연신율, 파단 연신율은 변형률속도 증가와 함께 증가하는 경향을 나타낸다. 최대 인장강도와 항복강도, 흡수에너지 역시 변형률속도 증가와 함께 증가하는 경향을 나타낸다. 변형률속도 증가에 따라 응력이 증가하는 이유는 변형률속도 증가에 따라 활성화 되는 전위의 근원점 수가 증가하기 때문이다. 이러한 영향이 고강도 재료의 경우 원래 높은 강도에 비해 상대적으로 작아 변형률속도에 둔감한 것으로 보고하며 이는 고속 변형에서 전위구조의 변화도 관계가 있다^[28]. 증가하는 연신율은 단순 인장의 경우 넥킹부에서 집중적인 넥킹이 발생하지만, 고속인장시험의

경우 넥킹이 발생하는 부분에서 국부적인 높은 변형률속도 경화가 발생하여 넥킹의 진행을 억제하여 주위로 전파시키기 때문에 증가하는 것으로 보고한다^[29].



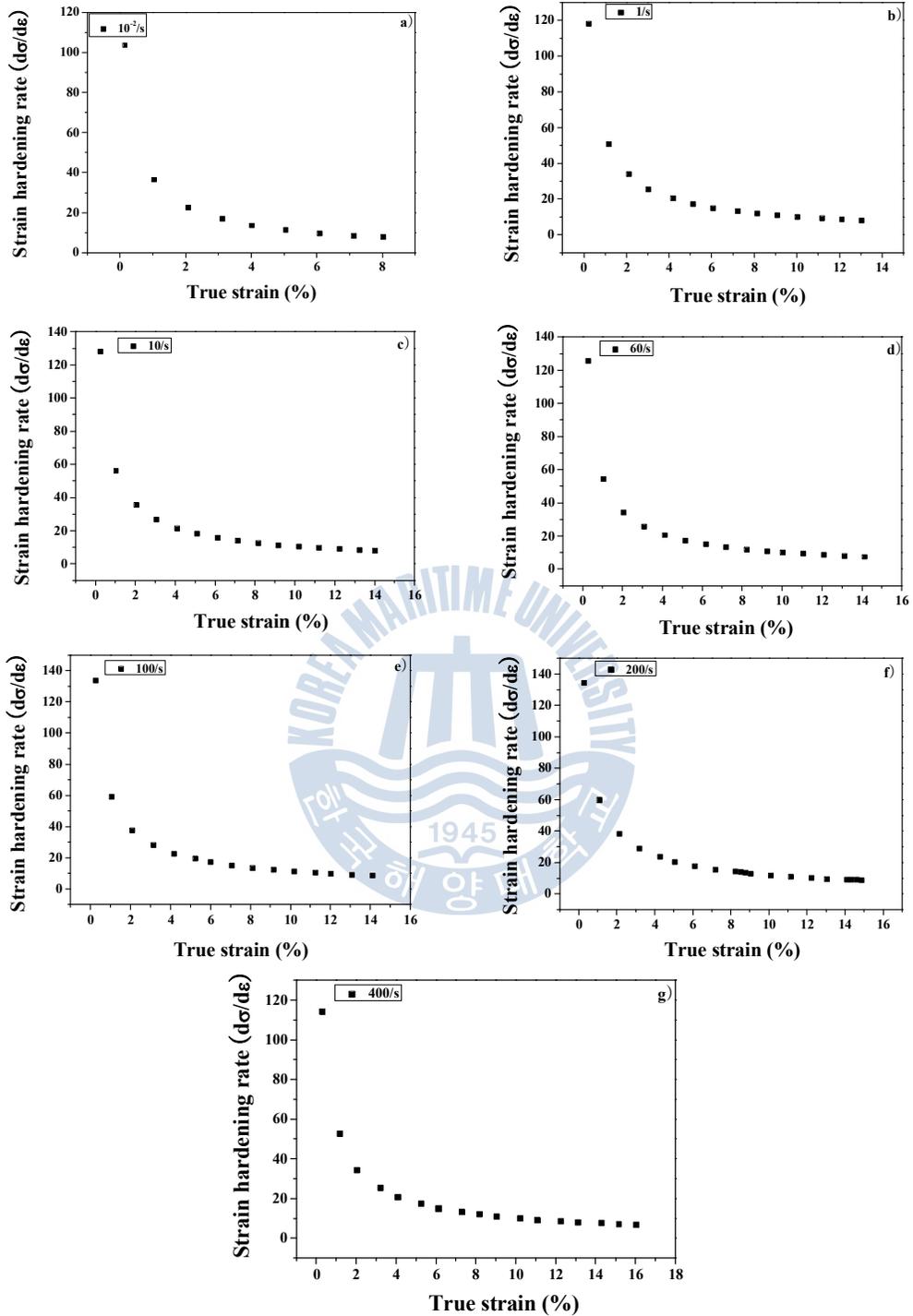


Fig.15 Strain hardening rate of studied steel; a) 0.01/s, b) 1/s, c) 10/s, d) 60/s, e) 100/s, f) 200/s and g) 400/s.

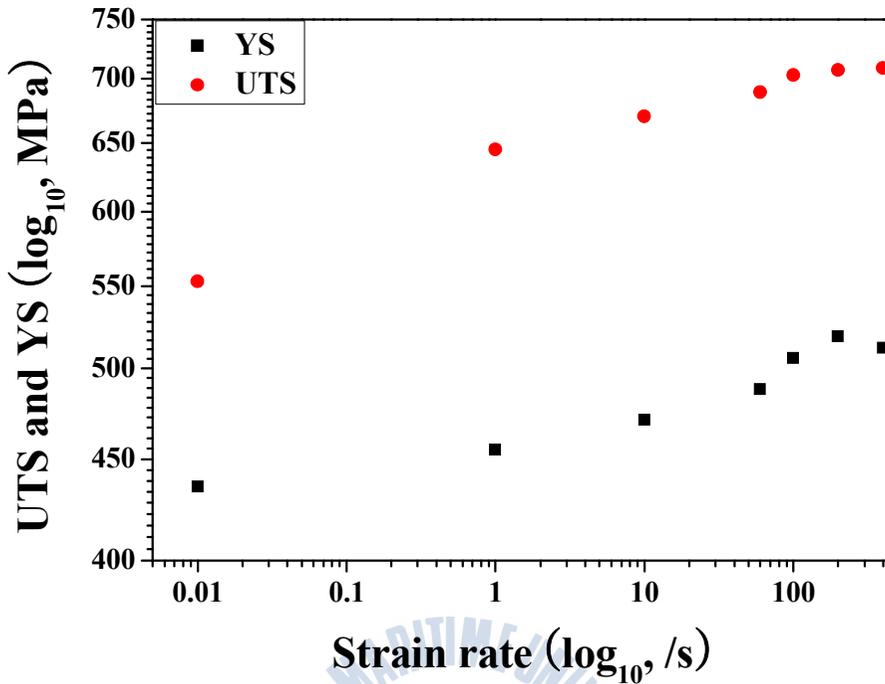


Fig.16 UTS and YS are linearly increasing with increased strain rate.

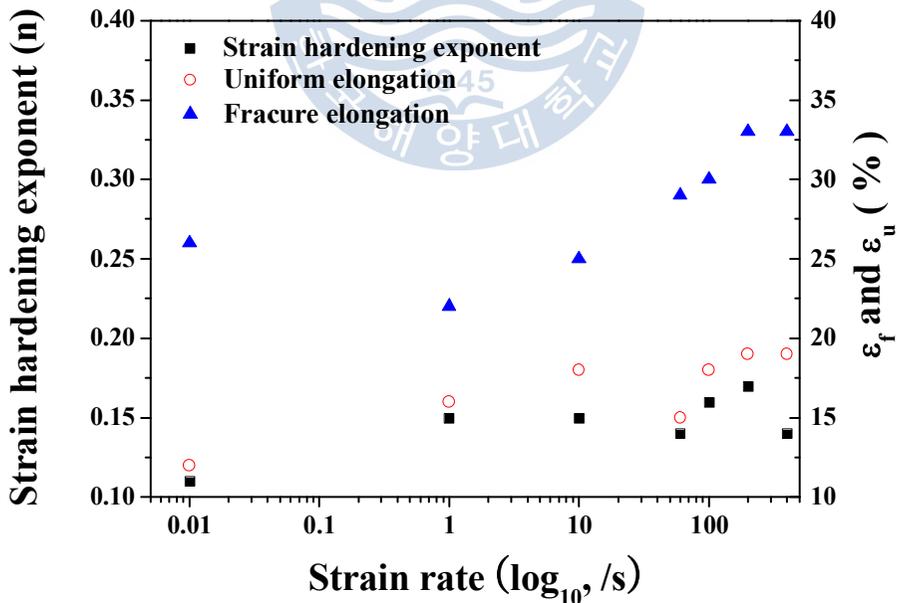


Fig.17 Strain hardening exponent, uniform elongation and fracture elongation are increasing with increasing strain rate.

Table 5 Mechanical properties of TRIP steel

strain rate(/s)	UTS (MPa)	YS (MPa)	e _u (%)	e _f (%)	n	K	absorbed energy(10%) (MPa× %)
0.01	553	436	12	26	0.11	788	4852
1	645	455	16	22	0.15	997	5479
10	670	471	18	25	0.15	1033	5220
60	689	488	15	29	0.14	1037	5508
100	703	506	18	30	0.16	1094	5522
200	707	519	19	33	0.17	1106	5471
400	709	512	19	33	0.14	1060	6437

4.1.3 Strain rate sensitivity

변형률속도 민감도는 식 (4-3)과 같이 변형률속도 증가에 대한 응력 증가 비로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 최대 인장강도와 항복강도에 대해서 구하였으며, 그 결과를 그림 18에 나타내었다.

$$m = \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \dot{\epsilon}} \quad (4-3)$$

변형률속도 민감도는 저변형률속도보다 고변형률속도가 항복강도와 최대 인장강도 모두 높게 나타났다. 이는 일반적인 변형률속도 증가에 대한 변형률속도 민감도 결과와 일치한다. 그리고 최대 인장강도가 항복강도보다 변형률속도 민감도가 낮은 이유는 잔류오스테나이트의 변태량이 변형률속도의 영향을 받기 때문으로 사료된다. 즉, 변형률속도가 빠를수록 낮은 변형률에서 변태를 많이 하기 때문에 항복강도의 변형률속도 민감도가 최대 인장강도보다 높은 것이다. 그리고 저변형률 속도에서 최대 인장강도의 변형률속도 민감도와 항복강도의 변형률속도 민감도가 유사한 것은 변형률속도가 느리기 때문에 잔류오스테나이트의 마르텐사이트

변태가 시간적인 여유를 갖고 변태하기 때문으로 이해할 수 있다. 이러한 결과는 M. Mukherjee^[30]등이 연구한 변형률속도에 따른 잔류 오스테나이트 부피 분율에 대한 연구 결과와 일치한다.

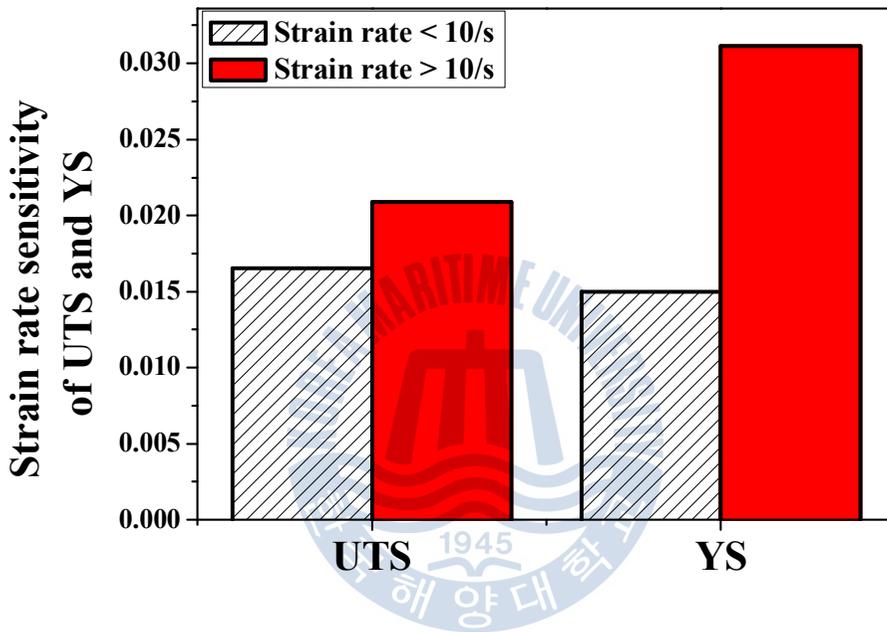


Fig.18 Strain rate sensitivity of UTS and YS.

4.1.4 Absorbed energy

ULSAB-AVC technical 보고서^[26]에서는 충돌에너지의 대부분이 변형률 10%이내에 흡수된다고 보고하고 있다. 흡수에너지는 변형률 10%까지 그림 13의 공칭응력-변형률 곡선의 면적으로부터 계산하였고, 변형률속도에 따른 결과를 그림 19에 나타내었다. 변형률속도가 증가할수록 흡수에너지 역시 증가한다. 변형률속도가 증가할수록 증가하는 유효응력을 고려했을 때 증가하는 흡수에너지 역시 이해가 된다.

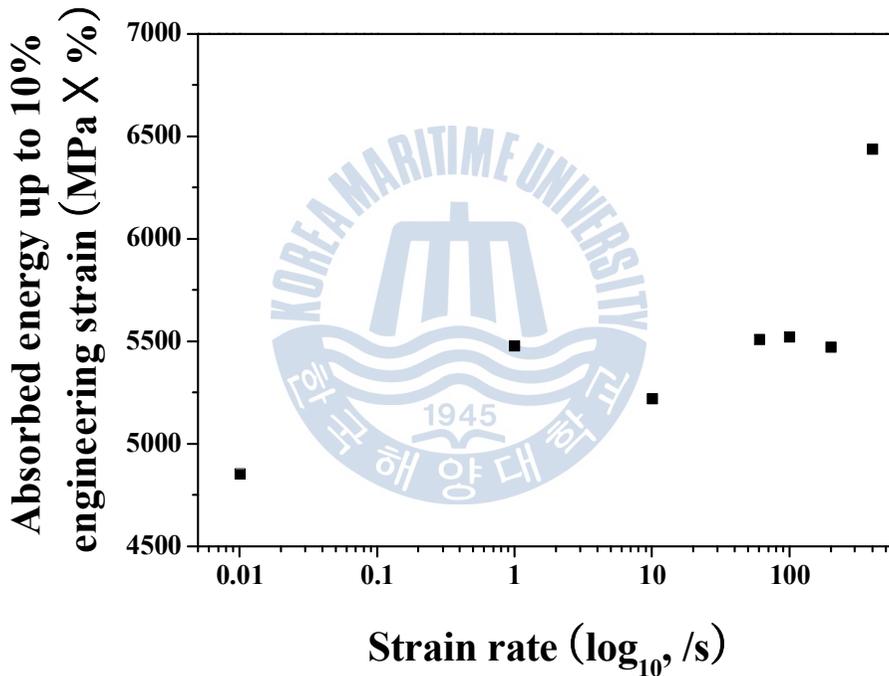


Fig.19 Calculated absorbed energy up to 10% engineering strain of tested steel.

4.2 Cowper-Symonds equation

변형률속도에 대한 진응력-진변형률 그래프를 그림 13에 나타내었다. 앞서 언급했듯이 항복점부근의 응력은 충격과 때문에 크게 예측이 되며, 이러한 이유로 항복강도를 결정하는데 어려움이 있다. 또한 변형률속도 증가에 따라 항복응력이 최대 인장응력보다 증가율이 더 크게 나타난다. Cowper-Symonds 모델의 경우 언급하였듯이 증가하는 변형률에 따라 감소하는 변형률속도 민감도를 표현하지 못하므로 항복강도를 채택하여 Cowper-Symonds 모델을 적용하는 것은 무리가 있다고 판단하였다. 그래서 최대 인장강도를 택하여 Cowper-Symonds 모델에 적용하여 물질상수인 C, p 값을 구하였다. C, p 구하는 방법은 앞서 3.3절에서 설명하였다. 그 결과를 그림 20에 나타내었다.

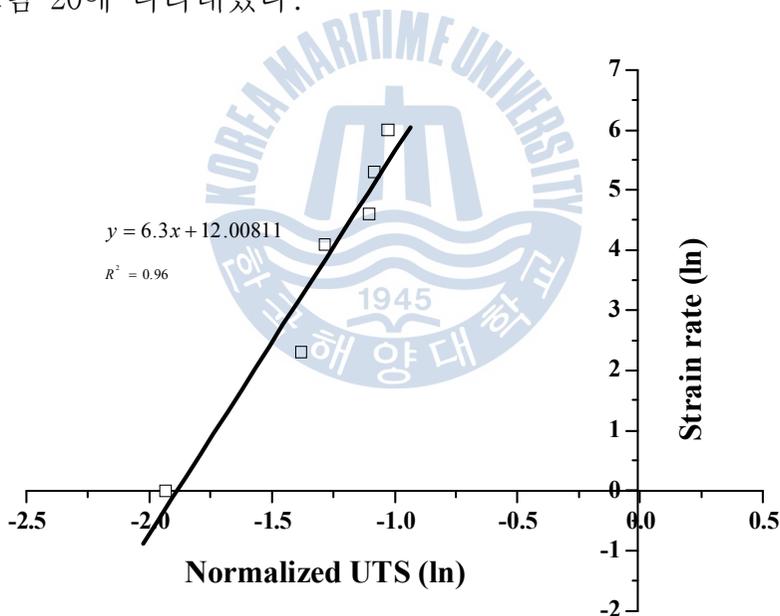


Fig.20 Trend lines of the experimental result for the UTS of studied steel.

4.3 Crash test

4.3.1 Experimental crash test

실제 충돌실험 결과를 시간-변위, 시간-충돌 힘, 시간-흡수에너지, 시간-속도변화 그래프로 그림 21, 그림 22, 그림 23, 그림 24에 각각 나타내었다. 최초 목표로 한 속도는 5m/s, 10m/s 였으나, 5m/s의 경우 실제 실험결과 속도는 6m/s였다. 그림 21에 나타나듯이 시간이 증가할수록 변위 변화량이 커짐을 알 수 있다. 시간이 증가함에 따라 감소하는 충돌 힘은 그림 22를 보면 알 수 있다. 그림 23은 시간에 따라 증가하는 흡수 에너지를 나타내었는데 감소하는 충돌 힘과 반대로 증가하고 있다. 그림 24는 시간에 따라 감소하는 속도변화를 나타내고 있으며, 그 경향 역시 충돌 힘과 비슷하다.

4.3.2 Computer simulation of crash test

그림 25에 1msec때의 응력 분포를 나타내었다. 10m/s의 경우 운동에너지가 6m/s보다 크므로 시간에 따른 변형량이 더 큼을 알 수 있다. 그림 26, 그림 27, 그림 28, 그림 29에 simulation에 의한 시간-변위, 시간-충돌 힘, 시간-흡수에너지, 시간-속도변화 그래프를 각각 나타내었다. 이 결과는 4.3.1절에서 설명한 경향들과 일치하며, 본 연구에서는 plate와 box의 점 용접과 cover와 box 사이의 아크 용접에 대한 사항은 고려하지 않았으므로 각 data는 LS prepost 2.2 버전에서 box에서 분석된 data 만을 택하였다.

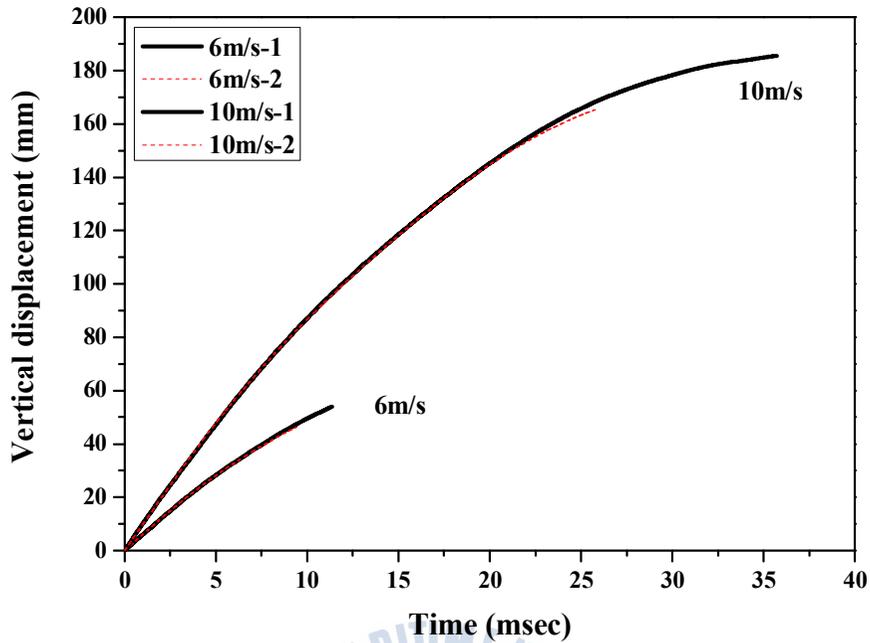


Fig.21 Vertical displacement versus time curve at 6m/s and 10m/s

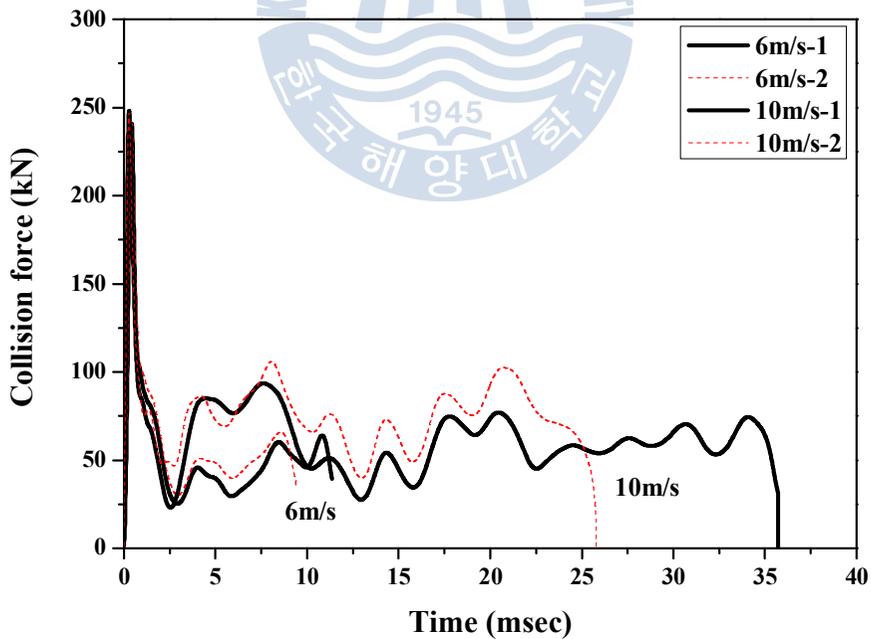


Fig.22 Collision force versus time curve at 6m/s and 10m/s.

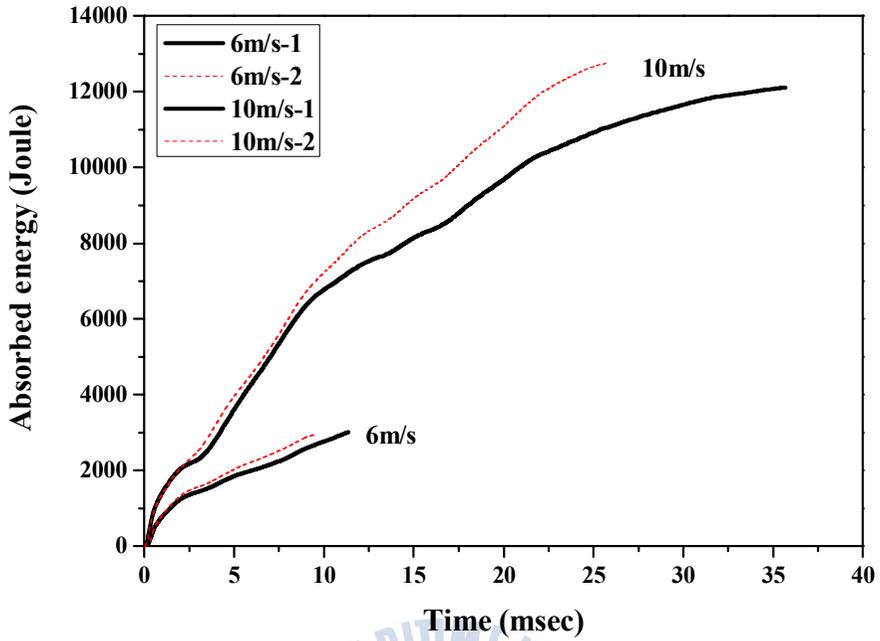


Fig.23 Absorbed energy versus time curve at 6m/s and 10m/s.

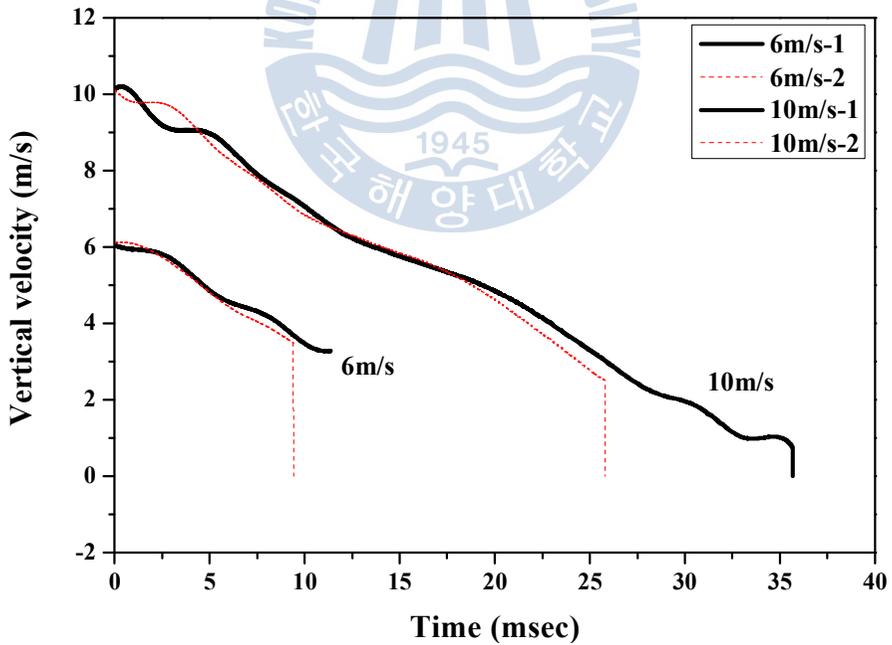


Fig.24 Vertical velocity versus time curve at 6m/s and 10m/s.

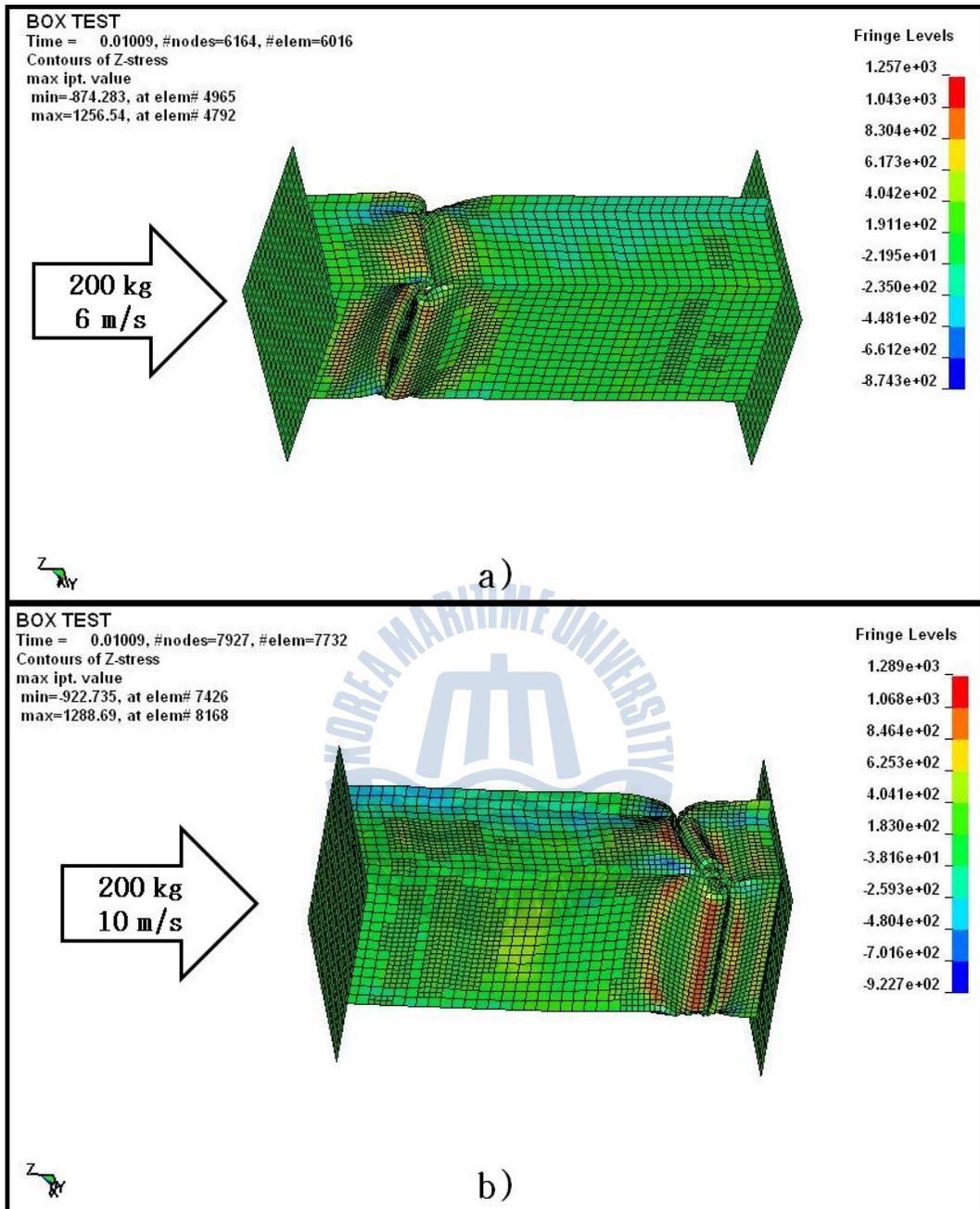


Fig.25 Stress state of tested steel at 1msec from computer simulation; a) 6m/s and b) 10m/s.

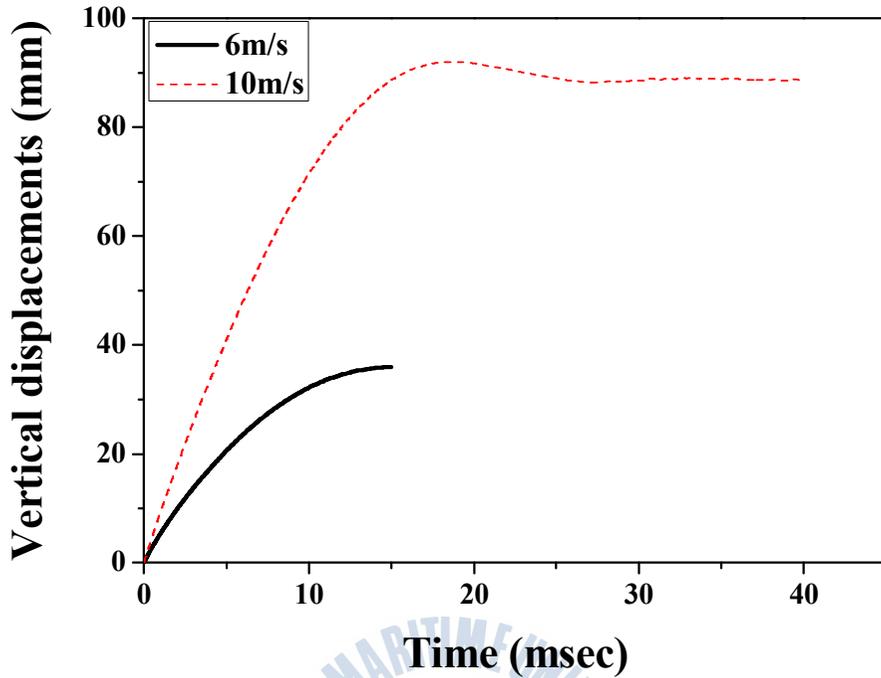


Fig.26 Vertical displacement versus time curve at 6m/s and 10m/s.

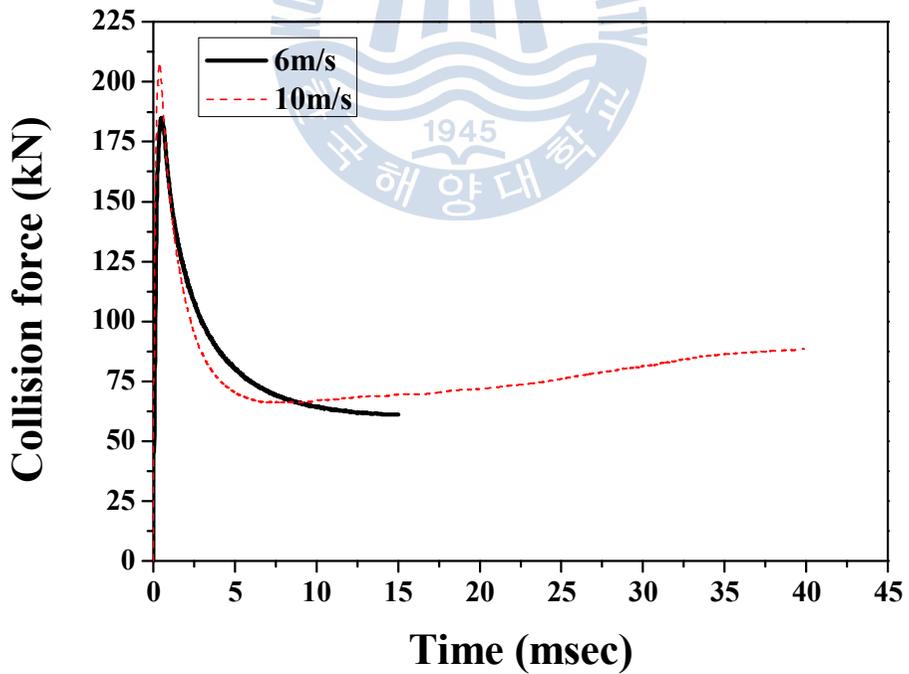


Fig.27 Collision force versus time curve at 6m/s and 10m/s.

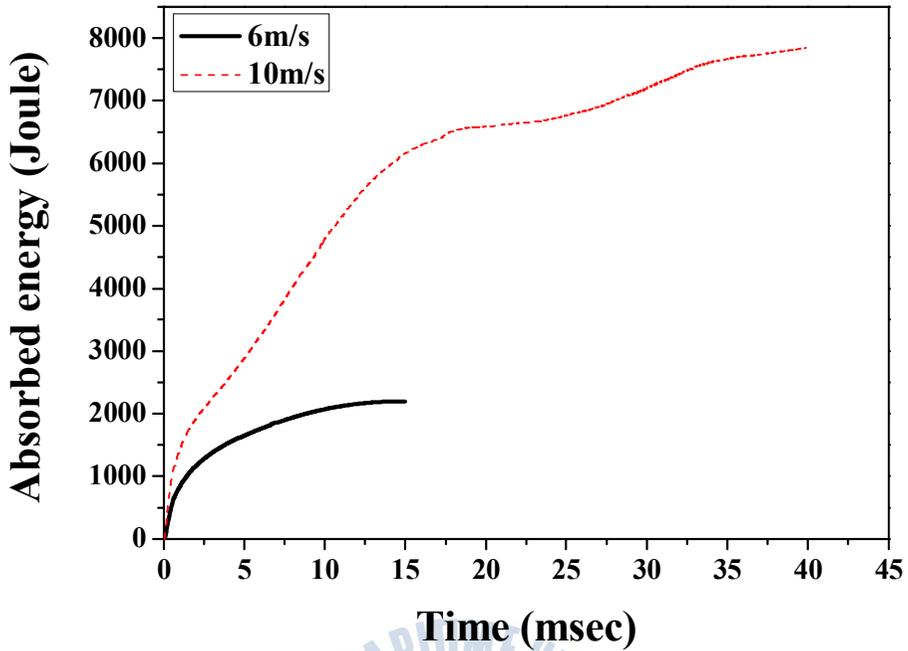


Fig.28 Absorbed energy versus time curve at 6m/s and 10m/s.

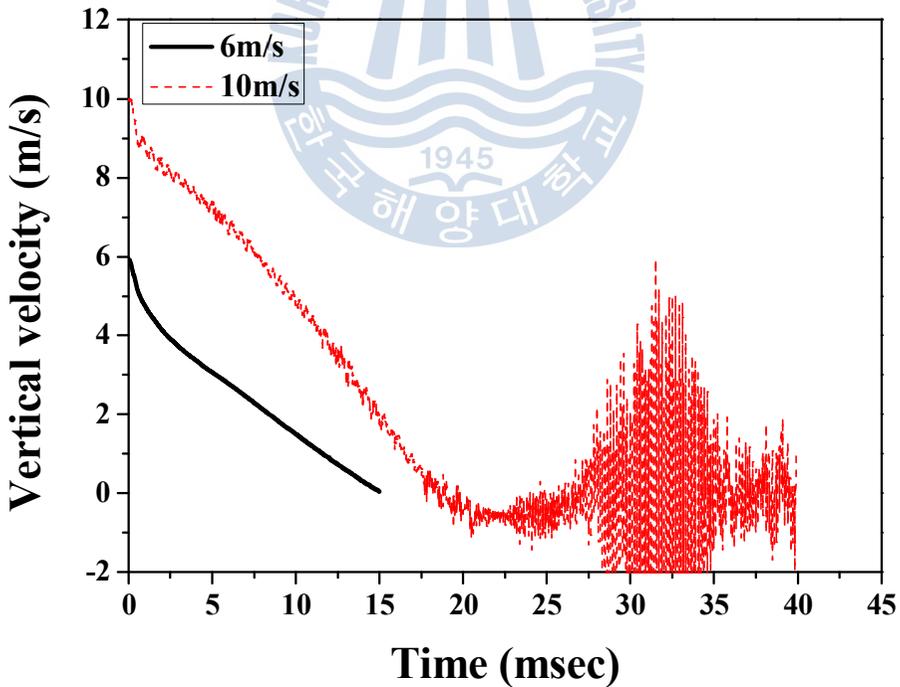


Fig.29 Vertical velocity versus time curve at 6m/s and 10m/s.

4.3.3 실제 충돌실험과 computer simulation 결과 비교

실제 충돌실험과 simulation 결과 비교는 변형률 10%에 해당하는 변위 35mm로 제한하였다. 그림 30에 6m/s, 10m/s 각각의 변위에 따른 흡수 에너지를 비교하여 나타내었다. 실제 충돌실험 결과와 simulation 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이로써 본 연구에 사용된 TRIP 강 of 충돌특성은 simulation 만으로도 충분히 실제 충돌실험의 결과와 유사하게 예측되며, 그 결과의 신뢰도 또한 높다고 할 수 있다. 또한 본 연구에 사용된 TRIP 강이 다른 형태의 부품으로 적용될 경우, simulation에 의한 결과를 신뢰할 수 있다고 말할 수 있다.

4.4 향후 과제

본 연구에서 사용된 Cowper-Symonds equation의 경우 고속변형에 따른 온도변화가 고려되지 않았다. 또한 simulation 모델링에 있어서 plate와 box의 점 용접 역시 배제되었다. 전자의 경우 온도 항이 추가된 물성구성방정식 적용이 필요하며, 이에 따른 추가적인 실험도 필요하다. 후자의 경우 점 용접의 기본 정보를 알아야 하며, 이를 모델링하기 위해서는 LS-DYNA에 대한 심도 있는 이해가 필요하다. 향후 이러한 문제들이 보완이 된다면 더욱 정확한 simulation 결과를 도출할 수 있다. 또한 고속인장시험의 하중떨림현상을 최소화 하려는 노력이 필요하다.

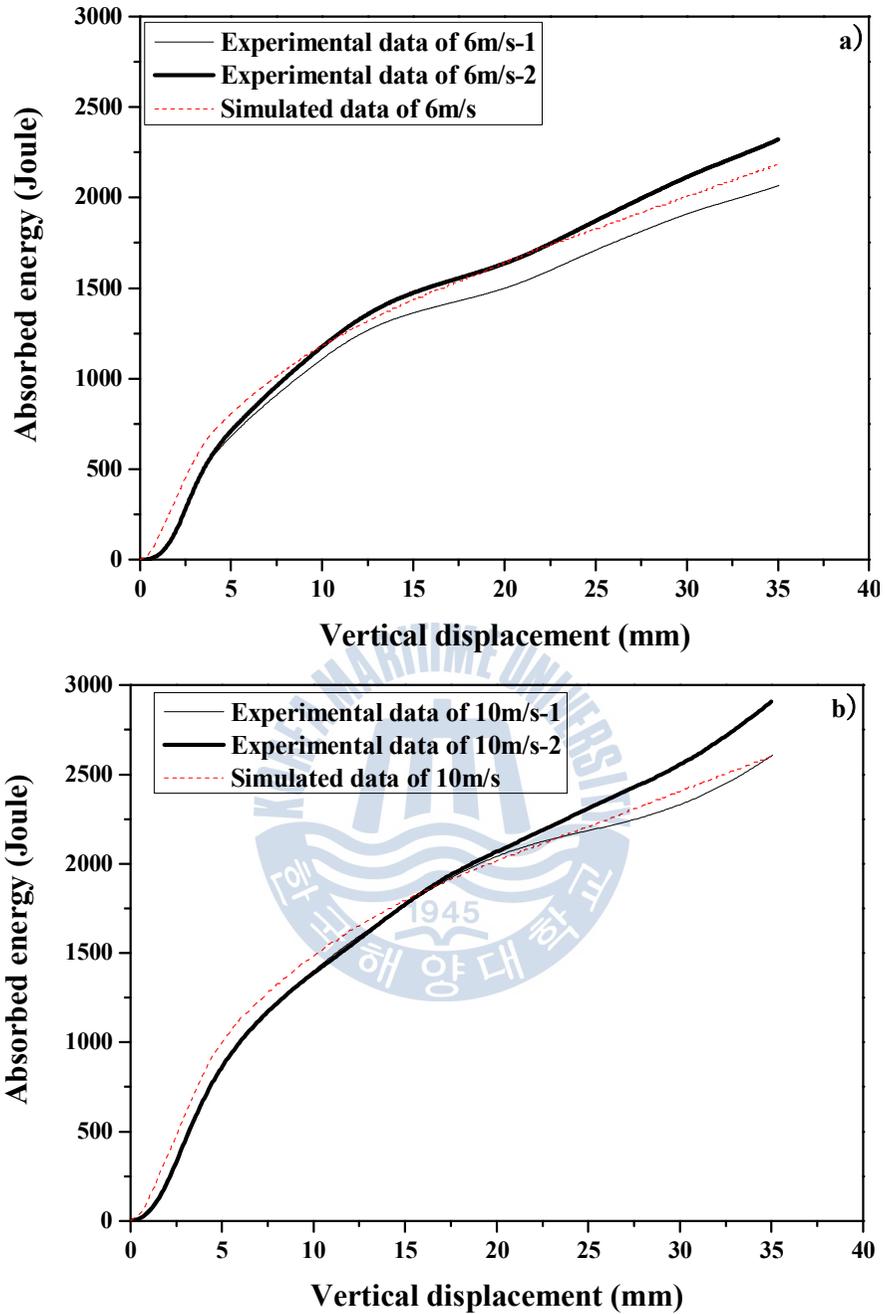


Fig.30 Comparison of absorbed energy between experiment and simulation up to strain 10%(Vertical displacement versus absorbed energy); a) 6m/s and b) 10m/s.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 고속변형률속도에서 TRIP 강의 인장실험을 실시하였으며, 이를 바탕으로 연구에 사용된 TRIP 강의 고속인장 거동이 일반 고강도강과 유사함을 알 수 있었다. 그리고 Cowper-Symonds 모델에 고속인장 실험 결과를 적용하여 고속변형 특성을 결정하였다. Cowper-Symonds 모델에 의해 평가한 고속변형 특성을 기반으로 LS-DYNA를 사용하여 TRIP 강의 충돌특성을 simulation 할 수 있었다. LS-DYNA를 통한 simulation의 신뢰도를 알아보기 위하여 실제 충돌 실험을 실시하여 simulation과 결과를 비교하였다. 위의 실험결과들을 바탕으로 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 변형률속도가 증가할수록 연신과 최대 인장강도, 항복강도는 증가하였다. 변형률속도 민감도 또한 변형률속도가 증가에 따라 함께 증가하며, 이로써 TRIP 강이 고속 충돌에서 좋은 특성을 나타낼 것으로 사료된다.

(2) TRIP 강의 경우 일반적인 고강도강과 유사하게 변형률속도가 고속이 될수록 변형률속도 민감도 증가폭이 작아지며, 변형률이 증가할수록 역시 변형률속도 민감도 증가폭은 감소한다.

(3) 고속인장시험의 결과를 얻어내는데 있어서 하중떨림현상이 심하여 어려움이 있었다. 하지만 Origin 7.5의 FFT 필터를 사용하여 유연화작업을 거침으로써 충분히 납득할 만한 응력-변형률 그래프를 얻었다.

(4) Cowper-Symonds equation이 일반적으로 정적변형률속도의 항복강도를 기준으로 물질상수를 결정하지만, 본 연구에서는 정적변형률속도의 최대 인장강도를 사용하였다. Cowper-Symonds equation이 증가하는 변형

률에 대해 감소하는 변형률속도 민감도를 표현하지 못하는데서 오는 오류가 항복강도를 택했을 때 보다 최대 인장강도를 사용함으로써 감소하였다. 때문에 Cowper-Symonds 모델을 적용할 경우 최대 인장강도를 사용하는 것을 권장한다.

(5) 시간에 따른 속도 변화는 simulation이 실제 충돌실험 결과 보다 더 급격하게 감소하였으며, 변위는 6m/s의 경우 실제 충돌실험 결과가 simulation 보다 짧은 시간에 더 많은 변형량을 나타내고 있다. 반면에 10m/s의 경우 실제 충돌실험 결과가 simulation 결과 보다 더 많은 변형량을 나타내면서 더 긴 시간동안 변형하였다. 변위 변화량의 증가폭은 6m/s, 10m/s 둘 다 실제 충돌이 더 크게 나타났다.

(6) 충돌 힘의 경우 6m/s, 10m/s 둘 다 simulation이 초반에는 실제 충돌실험 결과 보다 작게 예측하고 있다. 후반부에는 초반과는 다른 양상을 나타내고 있는데, 특히 10m/s의 경우 실제 충돌실험 결과 그래프의 중간을 지나고 있어 충돌 힘 변화 그래프를 유연화 시킨 것처럼 보인다. 때문에 10m/s의 경우 충분히 신뢰도가 높은 결과를 나타낸다.

(7) 충돌 특성에서 가장 중요한 흡수에너지의 경우 두 속도 모두에서 초반에는 실제 충돌실험 결과와 simulation 결과가 유사하게 나타났다. 하지만 전체적인 양상은 simulation 보다 실제 실험이 변화폭이 크며 좀 더 불규칙하다. 하지만, 충돌 특성상 특정 시간, 변형량 이후의 결과는 큰 의미를 부여하기 힘들다. 그래서 ULSAV-AVC technical report 및 여러 기관에서 변형율을 10%로 정의한 것이다. 이러한 부분에 대해서 더 많은 연구가 필요하다.

(8) 변형율을 10%로 제한하고, 이에 상응하는 변위량 35mm까지의 흡수 에너지를 비교하였다. 그 결과 실제 충돌실험 결과와 simulation이 매우 유사한 결과를 나타내었다. 이로써 본 연구에서 분석한 simulation 방법

이 신뢰도가 높은 방법이라 말 할 수 있겠다. 하지만, 추후 더 많은 인자를 고려한 simulation이 된다면 변형률이 큰 경우에 대해서도 충분히 실제 실험을 모사할 수 있을 것이다.



참 고 문 헌

1. V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr and R. Busch, 「The enhancement of ductility in high-strength steels」, Trans, ASM 60(1967)
2. T. Senuma, 「Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets」, ISIJ Inter., 41(2001)
3. K. I. Sugumoto, N. Ushi, M. Kobayashi, and S. I. Hashimoto, 「Effects of volume fraction and stability of retained austenite on ductility of TRIP-aided dual-phase steels」, ISIJ Inter., 32 (1992)
4. K. I. Sugumoto, N. Ushi, M. Kobayashi, and S. I. Hashimoto, 「Ductility and strain-induced transformation in a high-strength transformation-induced plasticity-aided dual-phase steel」, Metall. Trans. A, 23A(1992)
5. H. C. Chen, H. Era, and M. Shimizu, 「Effect of Phosphorus on the Formation of Retained Austenite and Mechanical Properties in Si-Containing Low-Carbon Steel Sheet」, Metall. Trans. A, 20A (1989)
6. S. K. Kim, H. C. Shin, J. H. Chung, and Y. W. Chang, J. Korea Inst. Machinery & Materials, Changwon(1996)
7. C. G. Lee and S. J. Kim, 「Tramp Element를 함유한 고강도 열연강판의 미세조직과 기계적 성질」, J. Korea Inst. Met & Mater., 36(1998)
8. K. I. Sugimoto, M. Misu, M. Kobayasi, and H. Shirasawa, 「Effects of second phase morphology on retained austenite morphology and tensile properties in a TRIP-aided dual-phase steel sheet」, ISIJ, Inter., 33(1993)
9. Y. Sakuma, D. K. Matlock, and G. Krauss : Metall. Trans. A, 22A(1992)

10. Y. Sakuma, D. K. Matlock, and G. Krauss : Metall. Trans. A, 22A (1992)
11. 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)
12. 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)
13. 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)
14. 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 Inter. 42(2002)
15. P. Larour, P. Verleysen, M. Vermeulen, M.A.R. Gomes, A. Wedemeier, J.L. Geoffroy, and W. Bleck, 《Proceeding of MS & T 04》, TMS, New Orleans, USA(2004)
16. K. Mahadevan, P. Liang and J. Fekete, SAE Technical Paper #2000-01-0625, SAE, Warrendale, PA(2000)
17. B. Yan and K. Xu, 《44th MWSP Conference Proceedings》, Vol. XL(2002)
18. K. Sato, A. Yoshitake, D. Zeng and S. D. Liu, SAE Technical Paper #2002-01-0641, SAE, Warrendale, PA(2002)
19. ULSAB-AVC, Technical Transfer Dispatch #6, Appendix III(2001)
20. N. Jones, 《Structural Impact》, Cambridge University Press, Trumpton Stresst, Cambridge(1989)
21. G. R. Johnson and W. H. Cook, 「A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strain, High Strain Rates and

- High Temperatures」, in Proceeding of the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, pp.541-547(1983)
22. O. Matsumura, Y. Sakuma and H. Takechi, 「Trip and its kinetic aspects in austempered 0.4C-1.5Si-0.8Mn steel」, Scripta Metall., 21. (1987)
23. K. Sugimoto, M. Kobayashi and S. I. Hashimoto, 「Warm Stretch-formability of TRIP-aided Dual-phase Sheet Steels」, ISIJ, Inter., 35 (1995)
24. Instron Corporation, 《Operating Instructions of Instron Fast Track 8800 and Materials Test Control Systems》 (2002)
25. LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual, 《Nonlinear dynamic analysis of structures》, Livermore Software Technology Co., California(1999)
26. J. C. Park, 「동 하중에 대한 연강 재질의 변형률 속도 민감도 특성 연구」, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(2004)
27. H. J. Lee, J. H. Song, H. Huh, S. H. Park, 「차체용 강판의 온도에 따른 동적 구성방정식에 관한 연구 (1)」, 대한기계학회논문집 A권, 제 31권 제 2호(2007)
28. K. Miura, S. Takagi, T. Hira, O. Furukimi and S. Tanimura, 「High Strain Rate Deformation of High Strength Sheet Steels for Automotive Parts」, SAE 980952 (1998)
29. J.H. Lim, S.B. Kim, J.S. Kim, H. Huh, S.Y. Kwon, S.S. Yoon and S.H. Park, 「Study on the fracture elongation of the steel sheet at the intermediate strain rate」, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집(2004)
30. M. Mukherjee, S. B. Singh, O. N. Mohanty 「Neural network analysis of strain induced transformation behaviour of retained austenite in TRIP-aided steels」, Materials Science and Engineering A 434 (2006)

감사의 글

지난 20대의 대부분을 재료강도실험실에서 보내면서 제 삶에 중요한 부분을 많이 배웠습니다. 항상 시간과 중압감에 보낸 날들이었지만, 그 시간 동안 학문을 포함한 많은 것들을 얻을 수 있었습니다. 돌아보면 항상 모자란 듯 아쉬움이 남습니다. 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 전해주시신 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, 진용이형, 종배, 치완이형, 은지, 임지현, 장지현, 방형진, 서정철 그리고 최근에 실험실에 들어와서 앞으로 이끌어갈 송샘, 김시훈에게 부족한 선배 때문에 고생했고, 고맙다고 전하고 싶습니다.

그리고 아무 연고가 없는 부산에 처음 만났던 우리 02학번 동기들 정말 고맙습니다. 특히 아직까지 철없이 같이 모여서 술 마시는 우리 성원이형, 진이, 충용이, 성민이, 우진이, 상경이, 순근이, 우정이, 정현이, 동훈이 고맙다. 돌아보면 정말 많은 사람들의 도움과 관심 속에서 즐겁게 생활했습니다. 참 행복했습니다. 이제 저 또한 여러분들처럼 롤러코스터를 타려합니다. 여러분들의 지속적인 관심과 사랑 부탁드립니다.

마지막으로, 많은 어려움 속에서도 저 하나만을 생각하며 매일 걱정

밤을 지새우시는 어머님, 최귀연씨께 감사드립니다. 멀리 타향살이 걱정도 모자라 잘 다니던 회사 관두고 연락도 자주 못 드리고 걱정만 끼쳤습니다. 평생을 다 갚지 못할 사랑을 주셔서 감사합니다. 어머님께 이 논문을 바치며 감사의 글을 마치겠습니다.

다시 한 번, 저를 항상 지켜보며 관심 보여주었던 제 주위의 모든 사람에게 감사하단 말씀 올립니다. 감사합니다.

