



저작자표시 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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

복합조직강의 고속인장 결과를 이용한
컴퓨터 전산모사와 실제 충돌시험 결과와의
비교 연구

A Comparative Study of Computer Simulation using High-Speed
Tensile Test Results with Actual Crash Test Results of DP Steels



2013년 2월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

방 형 진



공학석사 학위논문

복합조직강의 고속인장 결과를 이용한
컴퓨터 전산모사와 실제 충돌시험 결과와의
비교 연구

A Comparative Study of Computer Simulation using High-Speed
Tensile Test Results with Actual Crash Test Results of DP Steels



지도교수 최 일 동

2013년 2월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

방 형 진

본 논문을 방형진의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 문 경 만 ④

위 원 공학박사 최 일 동 ④

위 원 공학박사 이 성 열 ④



2012년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

ABSTRACT -----	I
List of tables -----	II
List of figures -----	III
1. 서론 -----	1
2. 이론적 배경 -----	3
2.1 2상 박강판 (Dual Phase steel sheet)-----	3
2.2 SRL(Sink Roll-Less)용융도금강판 -----	6
2.3 변형률속도 제어 인장시험 -----	9
2.3.1 DP강의 고속인장시험 필요성 -----	9
2.3.2 변형률속도에 따른 인장시험 방법 -----	10
2.4 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 물성 구성방정식 -----	12
3. 실험방법 -----	14
3.1 시험편 제조 -----	14
3.2 인장시험 -----	17
3.3 충돌 시험 -----	19
3.3.1 실제 충돌 시험 -----	19
3.3.2 컴퓨터 시뮬레이션 -----	22
4. 실험 결과 및 고찰 -----	23
4.1 기계적 성질 -----	23
4.1.1 공칭응력 - 공칭변형 곡선 -----	23
4.1.2 진응력 - 진변형 곡선 -----	25
4.1.3 시험편의 미세조직 -----	27
4.1.4 최대인장강도 -----	30
4.1.5 파단 연신율 -----	31
4.1.6 변형속도민감도 -----	32
4.1.7 Absorbed energy -----	33

4.2 충돌 시험 -----	35
4.2.1 실제 충돌시험 -----	35
4.2.2 고속인장 결과를 이용한 충돌 시뮬레이션 시험 -----	39
4.3 실제 충돌시험과 컴퓨터 시뮬레이션 결과 비교 -----	44
4.4 실제 충돌시험에서의 PB처리에 따른 결과 비교 -----	45
5. 결론 -----	47
6. 참고문헌 -----	48



A Comparative Study of Computer Simulation using High-Speed Tensile Test Results with Actual Crash Test Results of DP Steels

Hyung Jin Bang

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



Abstract

Recently, researches of energy efficiency improvement are actively proceeded in the automobile industry and the demand for high strength steels with excellent ductility is continually increasing. Passenger safety has also emerged as a major concern due to the light weight and faster speed of vehicle. Therefore, DP steel (Dual Phase Steel) which has composed of a soft ferrite and a hard martensite phase reveals both high strength and high ductility and has received an increased attention. In order to apply to automobile, sufficient understanding is needed about dynamic behavior. The testing of dynamic property of material is difficult and the testing results have severe errors. But in order for structural analysis which is conducted for the safety of vehicle, the highly credible result of an experiment is required. Therefore, in this study, tensile test was performed at the strain rate range from 10^{-4} /s to 300/s for Sink Roll-Less (SRL) hot-dip metal coated sheet. Collision properties were estimated through simulation by LS-DYNA

using stress-strain curve obtained from high speed tensile test. Simulation result was compared with actual crash test result for credibility of simulation. Also, tensile test and crash test of 2% prestrain and baking specimen were evaluated identically because automotive steel is used after forming and painting. The mechanical behaviors are improved with increasing strain rate regardless of PB treatment. Therefore, the plastic deformation with proper strain rate is expected to show better formability and crash characteristics than the plastic deformation with static strain rate. Ultimate tensile strength (UTS) and absorbed energy up to 10% strain are improved even though total elongation is decreased after PB treatment, The results of experimental crash test and computer simulation are slightly different but generally, similar propensity is seen.



List of tables

Table 1. Testing techniques according to strain rates.

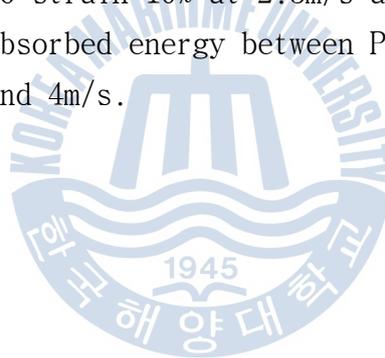
Table 2. Chemical compositions of tested steel.



List of figures

- Fig. 1 Schematic diagram that illustrates DP steel and TRIP steel processing.
- Fig. 2 Phase diagram of steel and heat treatment temperature.
- Fig. 3 Conceptual diagram of SRL.
- Fig. 4 Principle of electromagnetic levitation.
- Fig. 5 Dross behavior of former sink roll method.
- Fig. 6 (a) SRL pot and (b) former sink roll method pot.
- Fig. 7 GA simulation of tested steel.
- Fig. 8 (a) high speed tensile specimen (b) quasi-static tensile specimen.
- Fig. 9 (a) 2% prestrain, (b) measurement of 2% strain with traveling microscope.
- Fig. 10 (a) Hydraulic high speed tensile testing machine (Instron VHS-8800) (b) Quasi-static tensile testing machine. (Instron 4469)
- Fig. 11 High Speed Crash Testing Machine.
- Fig. 12 (a) Dimension of crash test sample before PB treatment, (b) Dimension of crash test sample with PB treatment.
- Fig. 13 Shape of sample for crash test.
- Fig. 14 Engineering stress-strain curve before smoothed data.
- Fig. 15 Engineering stress-strain curve (a) before PB treatment (b) after PB treatment.
- Fig. 16 True stress-strain curve (a) before PB treatment (b) after PB treatment.
- Fig. 17 Light optical micrographs of the fractured sample.
- Fig. 18 Misorientation maps of tensile specimen.
- Fig. 19 13 The effect of strain rate on UTS.
- Fig. 20 The effect of strain rate on the failure elongation.
- Fig. 21 Raw data of strain rate.
- Fig. 22 Strain Rate Sensitivity of UTS.
- Fig. 23 Calculated absorbed energy up to failure strain.
- Fig. 24 Calculated absorbed energy up to 10% engineering strain.
- Fig. 25 The shape of crashed sample tested at 2.5m/s and 4m/s.

- Fig. 26 Displacement versus time curve at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 27 Collision force versus time curve at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 28 Collision force versus displacement curve at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 29 Absorbed energy versus displacement curve at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 30 True stress-strain curve (a) before PB treatment for simulation. (b) after PB treatment for simulation.
- Fig. 31 The shape of crashed sample tested from computer simulation at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 32 Displacement versus time curve at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 33 Collision force versus time curve at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 34 Collision force versus displacement curve at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 35 Absorbed energy versus displacement curve at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 36 Comparison of absorbed energy between experiment and simulation up to strain 10% at 2.5m/s and 4m/s.
- Fig. 37 Comparison of absorbed energy between PB and NPB up to strain 10% at 2.5m/s and 4m/s.



제 1 장 서 론

20세기 후반에 들어서면서 철강업계 및 자동차 업계의 관심은 환경오염과 고강도, 경량화에 집중되어 왔고[1], 에너지 절감의 필요성과 강화되는 환경규제로 인한 연비효율 향상, 생산성 향상 그리고 고객들의 다양한 요구를 만족시키기 위해서 고강도 및 고성형성 재료에 대한 관심과 연구가 계속 되어 지고 있다[1]. 특히 자동차산업의 경우 강판이 차체무게의 70% 정도를 차지하고 있기 때문에 강판의 신소재 개발과 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 등 철강재를 대체하는 재료들에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한 자동차 디자인이 복잡해지고 소비자 욕구가 다양화됨에 따라 자동차업계에서는 고강도이면서 가공성과 성형성이 우수한 강에 대한 필요성이 더욱 커지고 있다[2~4]. 또한 최근 들어 자동차의 사용 환경이 점차 가혹 (제설염 사용, 공해, 산성비 등) 해지고 장수명화 됨에 따라 자동차용 강판에서 방청방식의 중요성이 크게 대두되고 있다[5~7]. 따라서 일반냉연강판의 수요는 감소하고 표면처리(아연도)강판의 수요가 늘어나는 추세에 있다[8~11]. 아연도금강판 중에서도 현재까지는 전기아연도금 강판이나 이층도금강판이 많이 사용되고 있으나 점차 합금화용융아연도금강판(단층)으로 변화하고 있다 [3,9]. 일반적으로 합금화 아연도금강판은 도장성, 용접성 및 도장 후 내식성이 우수하여 자동차용 강판으로 널리 사용되고 있다[12,13]. 이러한 합금화 아연도 강판의 상기 특성은 아연-철 합금화 도금층에 의해 나타나는 것이다. 합금화 도금층은 연속용융도금 공정 중에서 용융아연욕조를 통과한 후 아연 도금된 강판을 표층의 아연 도금층이 완전히 응고하기 전 도금욕 직상부에 설치된 합금화 열처리로에서 도금층을 가열한 다음 냉각시켜 제조하게 된다[7].

연한 페라이트와 강도가 높은 마르텐사이트의 두상이 혼합된 DP강은 우수한 가공성과 높은 강도를 동시에 확보하며[14,15], 다른 고장력강에 비해 합금 원소가 단순하여 스크랩에 대한 재활용성 또한 뛰어나다[15,16]. DP강은 일반강과는 달리 변형이 증가하면 그에 따라 응력이 연속적으로 증가하는 연속항복거동이 일어나서 인장강도 대비 항복강도가 낮으며[17], 제조과정에서 마르텐사이트 주변을 싸고 있는 페라이트 내에 유동성 전위가 발생하며, 이 유동성 전위의 생성으로 시효경화 발생을 억제한다[17,18]. 뿐만 아니라, 소부경화성이 우수하여 내덴트성이 요구되는 외판재로 적용이 가능하다

[18]. 이에 따라, 자동차업계 및 철강업계의 DP강에 대한 관심은 높아져왔고 상당한 수준의 제품 연구개발과 현장적용이 이루어져 오고 있다.

일반적으로 금속재료의 동적거동은 정적 또는 준정적인 하중상태에서의 거동과 큰 차이를 보인다. 이러한 동적거동은 운송수단의 고속화와 더불어 큰 관심사가 되고 있는데 특히 자동차, 항공기 등은 승객의 안전성 확보가 매우 중요하기 때문이다. DP강을 자동차에 적용하기 위해서는 승객의 안정을 고려한 충격특성이 뛰어나야하므로[1,19] 고속변형 특성, 다시 말해 동적거동에 대해 충분한 이해가 필요하다[15,20,21]. 그러므로 초기 합금설계단계부터 대상합금에 대한 고속인장 특성치를 파악하여 합금 설계에 반영할 필요가 있다. 일반적으로 자동차 충돌 시에 얻어지는 재료의 변형률속도는 약 10 ~ 300/s정도이므로, 이에 해당하는 속도범위에서 실험이 요구된다[1,22].

재료의 동적거동에 대한 정확한 물성 값을 확보하고 이를 충돌해석에 이용하기 위해서는 변형률속도에 따라 변하는 유동응력을 표현할 수 있는 물성 구성방정식이 필요하며 대표적인 물성 구성방정식은 Cowper - Symonds 모델이 있다. Cowper - Symonds 모델은 동적응력을 준정적 응력에 항복응력의 변형률속도 민감도를 곱한 형태로 제안 된다. 하지만 정적하중그래프에 변형률속도를 곱하였기 때문에 변형 정도에 상관없이 적용되기 때문에 증가하는 변형률에 대해 감소하는 변형률속도 민감도를 표현하지 못하는 오류가 있다. 따라서, 본 연구에서는 개발하고자하는 SRL(Sink Roll-Less)용 용도금강판에 대해 10^{-4} ~ 300/s까지의 변형률속도에서 인장 시험하여 고속인장특성을 평가하였고, 인장시험으로 부터 얻은 진응력 - 진변형률 곡선을 조각선형함수 (piecewise linear) 형태로 구성하여 수행 값으로 컴퓨터 시뮬레이션인 LS-DYNA 3D 프로그램을 이용하여 충돌특성을 나타내는 흡수에너지를 평가해보았으며, 사각통을 이용한 실제 충돌테스트에서 구한 충돌 특성과 비교 분석을 해보았다. 또한 실제 DP강이 자동차 제조 공정에서 성형 후 도장 작업을 하므로 이와 유사한 조건인 2%의 예비변형과 170° C, 20 min.간 실리콘 오일에서 베이킹(baking)처리한 시편에 대해서도 동일하게 인장 시험과 충돌테스트를 실시하였다.

본 연구는 고속인장실험 방법, 실험결과 처리 방법, 컴퓨터 시뮬레이션 방법, 충돌시험 방법 등의 과정을 구축하고, 이를 바탕으로 충돌특성 분석의 한 가지 방법을 제안함을 목적으로 한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 2상 박강판 (Dual Phase steel sheet)

금속재료 중에서 가장 널리 그리고 양적으로도 가장 많이 쓰이고 있는 철강재료는 스크랩(scrap)의 발생량도 많을 뿐만 아니라, 사용분야 및 목적에 따라 다양한 합금원소의 종류와 조성범위를 가지기 때문에 재활용 시 중요한 과정인 스크랩의 수집과 분류가 어렵다. 따라서 환경문제의 해결과 자원의 효율적 활용을 위하여 우수한 재활용성을 가지는 환경조화형 철강재료의 개발이 요구되고 있으며, 이는 새로운 개념의 합금설계와 가공열처리 공정의 개발을 통하여 이를 수 있다. 이러한 환경조화형 철강재료는 재활용성의 극대화를 위하여 사용분야 또는 목적에 따라 다양한 물성을 가질 수 있어야 할 뿐만 아니라, 스크랩의 용이한 수집과 분류, 재용해 및 정련 등의 후처리를 위하여 가능한 합금조성을 단순화 할 필요가 있다[15]. 소재의 고강도화를 위해 철강소재의 측면에서는 TRIP강과 DP강과 같은 변태조직강의 개발이 진행 중에 있으며 기존의 고용강화나 석출강화를 이용한 고장력강 강판의 경우 강도가 증가하면서 성형성이 악화되어 그에 대한 대안으로 2상 박강판이나 변태유기소성 (Transformation Induced Plasticity) 강판 등이 개발되었다. 이러한 변태조직강 중 TRIP강은 강중에 함유되어있는 잔류 오스테나이트가 소성변형 시 가공성을 향상시키는 역할을 하게 되어 DP강에 비해 성형성이 우수하다고 알려져 있으나 탄소함량이 높을 뿐 아니라, Si등을 다량 첨가하게 되어 용접성 및 용융도금성이 열화 하는 문제가 있고[17], 그림 1 과 같이 열처리 과정 또한 DP강에 비해 복잡한 단점이 있지만, DP강은 연질의 페라이트 기지에 경질의 마르텐사이트가 분산되어 페라이트 고유의 우수한 연성과 마르텐사이트의 높은 강도가 조화되어 우수한 기계적 성질을 가지는 강종이다[3]. 특히 연속 항복거동과 낮은 항복강도를 나타내어 성형 후 형상 안정성이 우수하고 연신율도 높은 값을 보이고 있으며[3] 합금조성이 단순하여 자원 재활용성이 뛰어날 뿐 아니라, 다양한 열처리 방법에 따라 상의 부피분율, 분포, 형태, 크기 등을 쉽게 변화시킬 수 있는 장점이 있다. 유사한 강도수준에서 다른 고장력강과 비교할 때 가공성이 월등히 우수하기 때문에 구조용 철강재료로써 많은 주목을 받아왔다. 그림 2와 같이 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 구역에서 급냉을 소둔화한 후에

함으로써 오스테나이트는 마르텐사이트로 변태하게 되고 이 변태로 인하여 페라이트는 많은 전위를 함유하게 된다. 그러므로 이 오스테나이트의 형태는 DP강의 기계적 성질에 직접적인 영향을 준다. 오스테나이트는 핵이 생성하고 성장하며 초기 조직이 마르텐사이트일 때는 초기 오스테나이트 결정립에서 생성하고 초기 조직이 펄라이트일 경우는 시멘타이트와 페라이트의 계면에서 주로 생성한다. 또한 오스테나이트화 온도가 높거나 급속 가열을 할 경우에는 마르텐사이트의 래스입계(lath boundary) 혹은 페라이트의 아결정립계(sub-boundary)에서 intragranular 형태의 핵을 생성한다[16]. DP강의 강도는 마르텐사이트 자체의 체적분율이 증가함에 따라 증가하며, 또한 페라이트의 입도 크기를 작게 함으로써 강도를 증가 시킬 수 있다. DP강의 연성은 페라이트의 체적분율에 크게 영향을 받지 않으며, 페라이트 자체의 연성을 증가시킴으로써 강도가 크게 저하되지 않고 DP강의 연성을 증가 시킬 수 있다. 또한 입자의 평균지름이 감소함에 따라 강도는 증가하며 그 조직이 페라이트이거나 베이나이트일 경우에는 연성도 증가하게 되며 마르텐사이트일 경우에도 평균지름이 0.01mm이상일 때는 증가한다[16]. DP강의 기계적 성질에 영향을 주는 인자는 1) 페라이트기지내의 마르텐사이트의 형태와 그의 분포, 2) 마르텐사이트의 기계적 성질, 3)페라이트의 기계적 성질, 4) 마르텐사이트의 체적분율, 5) 탄화물의 분포 등이며 이러한 것은 제3원소의 첨가와 정확한 열처리로써 조절할 수 있다. 압연을 하게 되면 내부의 축적 에너지가 많아지고 전위밀도가 높아지며 또한 아결정립계의 생성 등으로 인하여 핵 생성 사이트(site)가 많아진다[16].

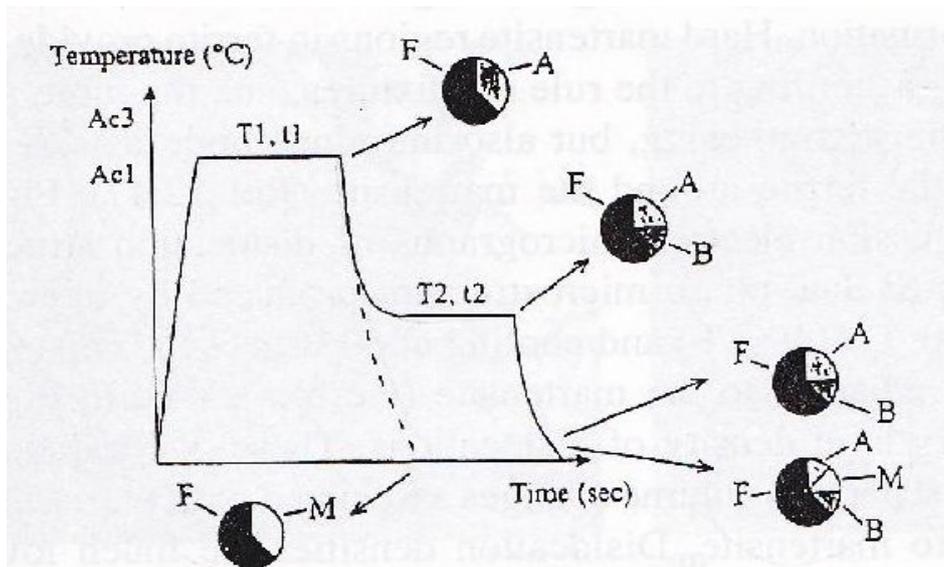


Fig. 1 Schematic diagram that illustrates DP steel and TRIP steel processing. (F : ferrite, A : austenite, M : martensite, B : bainite)

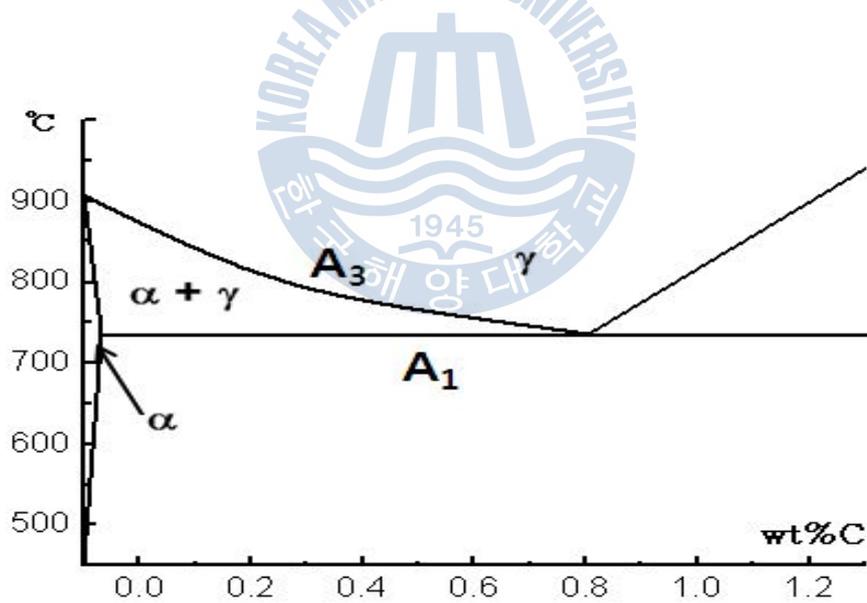


Fig. 2 Phase diagram of steel and heat treatment temperature.

2.2 SRL(Sink Roll-Less)용융도금강판

SRL의 개념은 1991년 러시아에서 기초기술 개발로 시작되었으며, 그림 3과 같이 SRL방식의 도금욕은 욕 내에 구동하는 roll이 없는 것이 특징이다. 이를 통하여, roll에 의해 발생할 수 있는 표면 결함을 방지할 수 있고, 순환하는 도금욕을 통하여 균일한 욕 조성을 구현할 수 있다.

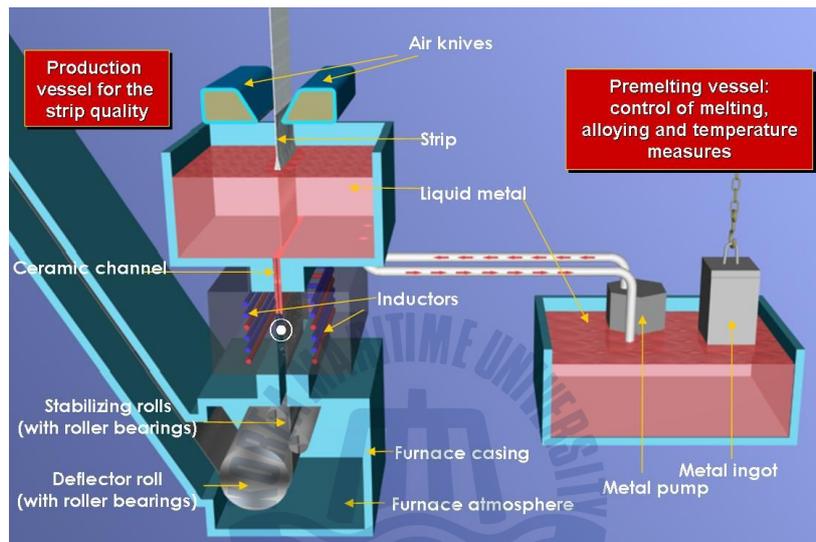


Fig. 3 Conceptual diagram of SRL.

SRL의 핵심 기술이라고 할 수 있는 전자기부양 기술의 원리는 그림 4와 같다. 용융도금욕 내에 로렌츠힘을 적용하여 용융금속이 받는 중력을 상쇄시켜 용융금속이 세라믹 채널 안에서 부양할 수 있는 기술이다.

$$F = q(E + v \times B) ; \text{로렌츠 힘의 공식}$$

로렌츠 힘은 전하를 띤 입자가 전자기장 안에서 받는 힘을 뜻하는데, 위 식에서 E는 전기장, B는 자기장을 의미하며, q는 입자의 전하량, v는 입자의 속도를 의미한다. SRL 도금욕 내의 용융금속은 전기장 안에서 qE의 힘을 받고, 자기장 안에서 $qv \times B$ 의 힘을 받는다.

용융금속에 로렌츠힘이 가해지는 원리는 다음과 같은 두 가지가 있다. 첫째로는, 용융도금욕 밑에 있는 세라믹 채널 주위를 감싸고 있는 유도 코

일이 용탕에 유도전류를 발생시켜, 이 때 수직 위쪽 방향으로 생기는 힘이 용탕의 중력을 상쇄시켜 용탕이 부유하도록 하는 역할을 한다. 유도 전류의 강도는 유도 주파수의 함수이며, 세라믹 채널의 두께 때문에 고주파를 인가하여야 한다. 이 고주파 때문에 강한 와전류가 용탕에 걸리게 되고, 용탕을 가열하는 효과가 있다. 두 번째 원리로는, 횡방향 전자기장을 걸어주는 방법이 있다. 스트립 진행방향에 수직인 방향으로 전기장과 자기장을 인가하면, 플레밍의 왼손법칙에 의해, 스트립 진행방향으로 로렌츠힘이 작용하여 용융금속을 부양시킨다. 실제 적용 시에는, 세라믹 채널을 코일로 감싸는 형태의 첫 번째 방식보다는, 횡방향 전자기장을 걸어주는 두 번째 방식이 더 유리하다.

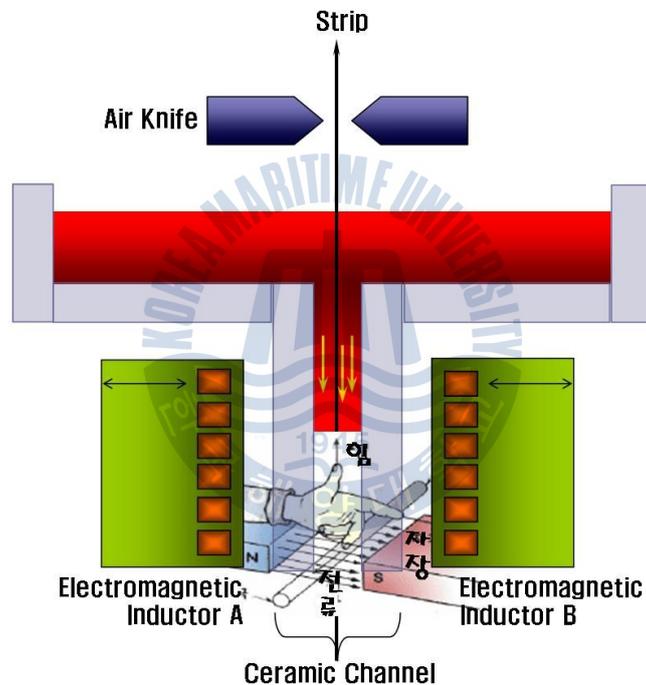


Fig. 4 Principle of electromagnetic levitation.

SRL과 기존 싱크롤 방식의 차이점은 다음과 같다. 첫 번째로, 기존 싱크롤 방식의 아연도금강판에 비해 월등한 표면 품질을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그림 5 에서 볼 수 있듯이, 싱크롤 방식의 도금욕에서는 용융금속이 욕 내에 정체되어 있으므로, 아연과 철이 반응하여 생성되는 Bottom dross와, 아연과 알루미늄이 반응하여 생성되는 Top dross가 용탕 내에 혼재되어 있다. 이러한 불순물이 싱크롤과 스트립 사이에 들어가서 강판 표면에 부착되면 표면 결함으로 작용하게 된다. SRL방식은 싱크롤이 없어 dross가 강판에

부착되지 않으며, 그림 3 에서 보았듯이 working pot와 storage pot가 분리되어 계속 순환되므로 청정한 용융금속 상태를 유지하게 된다. 또한, 용융도금 시 첨가되는 알루미늄의 함량을 낮추어 도금강판의 용접성을 개선하는 것이 가능하다. 용융도금에서 알루미늄은 강판과 먼저 반응하여 inhibition layer라는 층을 형성하는데, 이 층이 용융아연과 강판이 더 이상 반응하는 것을 억제하여 아연의 합금화를 방지한다. 기존의 싱크롤 방식 도금욕에서는 용융금속의 유동이 크지 않아, 강판 표면에서 소진되는 알루미늄을 보충하기 위해 알루미늄 농도를 0.18~0.2% 수준으로 유지 관리한다. 그러나, SRL방식 도금욕에서는 용융금속의 유동이 충분히 크게 일어나므로, 알루미늄이 소진되어도 바로 공급될 수 있어 도금욕 내 알루미늄 농도를 낮출 수 있다.

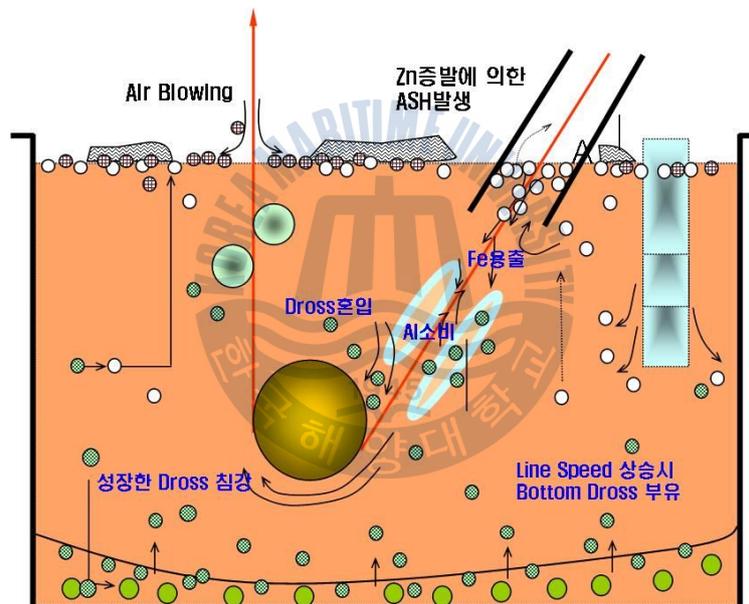


Fig. 5 Dross behavior of former sink roll method.

두 번째로 생산성 면에서 고속도금이 가능하고, 싱크롤 교체가 필요 없으므로 연속작업이 가능하며, 용융아연도금(GI)과 합금화용융아연도금(GA) 생산 전환 시 시간이 대폭 절감된다. 통상 GI와 GA를 제조하기 위한 도금욕 성분은 다소 차이가 있는데, 그 차이는 알루미늄 농도에 있다. GI 제조 시에는 inhibition layer를 형성하여야 하므로 알루미늄 농도를 높여야 하고, GA 제조 시에는 반대로 알루미늄 농도를 낮춰야 한다. 전술한 바와 같이, SRL 방식에서는 용탕이 계속적으로 순환하여 교반되므로 도금욕 성분이 매우 균일하고, 따라서 GI와 GA 전환 시간이 대폭 줄어들 수 있다.

마지막으로 경제성 면에서는, 싱크롤 교체가 필요 없으므로, 그에 따른 정비 비용이 절감되고, 기존 방식보다 작은 도금욕으로 인해 전력비가 감소되는 효과가 있다.

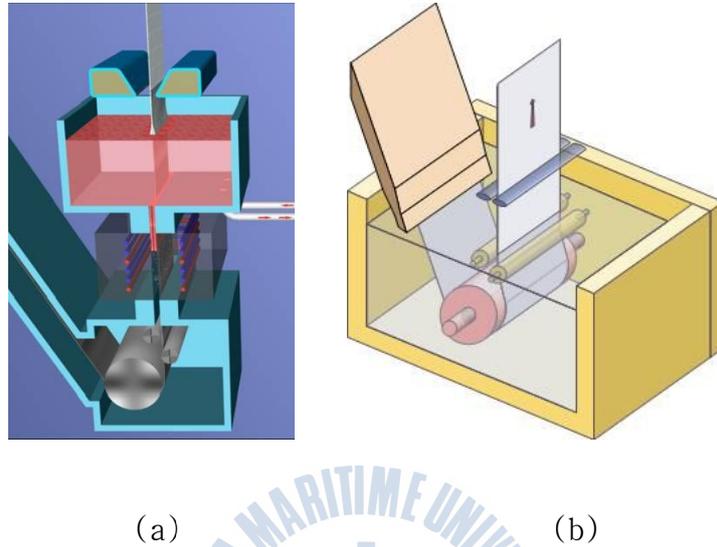


Fig. 6 (a) SRL pot and (b) former sink roll method pot.

2.3 변형률속도 제어 인장시험

2.3.1 DP강의 고속인장시험 필요성

일반적으로 금속재료의 동적 거동은 정적 또는 준정적인 하중상태에서의 거동과 큰 차이를 보인다. 이러한 동적 재료거동은 운송수단의 고속화와 더불어 많은 관심사가 되고 있는데 특히 자동차는 승객의 안전성이 굉장히 중요한 문제이므로 충돌시의 변형정도를 정확히 파악해야한다. 일반적으로 자동차 충돌 시 일어나는 재료의 변형률 속도는 대략 10/s~300/s 정도이다. 따라서 이 부근의 속도범위에서 재료거동을 정확히 파악하기 위해서는 100/s~1000/s 정도 고속변형속도에서의 시험결과를 확보해야한다[1]. 또한, 성형공정의 고속화로 차량 부재의 가공 시 변형률속도가 100/s보다 크게 나타나는 경우가 있다. 일반적으로 재료는 변형률속도가 증가하면 유동응력이 증가하는 경향을 보이며 이는 재료의 종류에 따라 다르다. 자동차 경량화 및 충돌안전성을 고려한 설계를 위해서는 변형률속도를 고려한 강판의 동적 물성 데이터의 생산이 꾸준히 이루어져야 한다. 현재 자동차용 강판의 동

적물성을 지속적으로 측정하여 사용하는 기관은 자동차 업계, 철강 생산업체 등 매우 한정적이며 중소기업에서는 동적물성 데이터의 생산절차에 대한 표준화가 이루어지지 않았으며 현재 동적물성에 대해서는 불확도의 개념이 없는 데이터가 사용되고 있다. 준정적 인장시험에 대해서는 ASTM, ISO등에서 표준시험법이 제정되어 있으나, 높은 변형률속도의 인장 시험에 대해서는 지금까지 표준시험법이 제정된 바 없으며 ISO에서 현재 표준시험법을 준비 중인 실정이다[19].

2.3.2 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 물성 값을 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, 10^3 /s 이상의 고속변형률속도실험에는 Hopkinson bar 시험법이 사용된다. 본 연구에서는 중변형률속도에서의 실험이 요구되므로 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		
10^1	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
10^0			
10^{-1}			
10^{-2}			
10^{-4}	Creep & Stress relaxation Conventional testing machines, Creep testers	Visco-Plastic response of metals	Isothermal
10^{-5}			
10^{-6}			
10^{-7}			
10^{-8}			

2.4 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 물성 구성방정식

동적 물성치를 유한요소법에 적용하기 위해서는 재료의 거동을 잘 표현하는 적절한 구성방정식을 적용하여야 한다. 재료거동을 완벽하게 나타낼 수 있는 수학적 해는 찾기 어려우며, 전이이론에 의한 방법이 사용되기도 하지만 아직까지 해결되어야 할 많은 문제가 있다. 전이이론에 기초한 구성방정식은 유한요소 코드에 적용이 어렵기 때문에 많은 경우에 있어서 실험적인 방법을 근거한 구성방정식을 쓰고 있다. 이와 같이 실험을 통하여 얻어진 구성방정식은 특정 변형률 속도 범위에서 성립하게 되므로 사용상에 많은 주의를 요하게 되며, 실험을 통하여 검증된 변형률, 변형률 속도 범위를 벗어날 경우 외삽법(extrapolation)에 의하여 사용이 가능하지만 그 타당성에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다. 이러한 실험식들은 많은 경우 재료 거동을 변형률 경화, 변형률 속도 경화 및 열적 연화 효과로 구분하고 각각의 영향을 서로 독립적인 항으로 수식화 한 후 재료거동을 표현하고 있다. Cowper 와 Symonds는 재료의 동적응력이 준정적 응력에 항복응력의 변형률 속도 민감도를 곱한 형태로 표현되는 구성방정식을 제안하였다. 그러나 Cowper-Symonds 구성방정식은 변형률 속도 민감도가 변형률에 따라서 변하지 않는 일정한 값으로 표현되기 때문에 변형률이 증가함에 따라서 변형률 속도 민감도가 실제 재료의 거동보다 강도를 크게 예측하는 문제가 있다. Jones는 Cowper-Symonds 구성방정식의 변형률 속도 민감도를 항복응력과 최대응력에서 각각 구하여 이를 변형률에 따라서 내분하는 구성방정식을 제안하였다. Johnson과 Cook은 무산소동, 4340 steel등의 홉킨스 바 실험을 통하여 소성변형에 의한 열적연화를 고려할 수 있도록 변형률 경화항, 변형률 속도 경화항, 열적 연화항이 분리된 형태의 구성방정식을 제안하였다. 그러나 Johnson-Cook 구성방정식은 단열상태가 보장되지 않은 중변형률 속도에서 소성변형에 의하여 발생하는 열을 계산하기 어렵기 때문에 자동차 충돌 문제에 적용하는데 어려움이 있다. Klopp, Clifton, Shawki와 Campbell은 실험에 의거하여 구성방정식을 전단응력과 전단 변형률의 관계로 표현하였고, Zerilli와 Armstrong은 Johnson-Cook 구성방정식을 보완하여 FCC 격자 구조를 가진 금속재료와 BCC 금속 재료에 대한 구성방정식을 제안하였다. Khan등은 1100 알루미늄 재료의 거동을 바탕으로 광범위한 변형률 속도에 적용할 수 있는 구성방정식을 제안하였고, Kang등은 Johnson-Cook 모델의 변형률 속도 경화항을 수정하여 넓은 변형률 속도에 적용할 수 있는 수정된 Johnson-Cook 모델을 제시하였다.

재료의 변형률 속도에 의존한 구성방정식은 여러 연구자들에 의하여 다양하게 표현되어 왔으나 일반적으로 Cowper-Symonds 구성방정식과 Johnson-Cook 구성방정식을 많이 사용한다. 그러나 기존의 구성방정식들은 중변형률 속도에서의 정확한 시험을 바탕으로 만들어진 것이 아니기 때문에 중변형률속도에서의 재료의 거동을 정확히 표현하는 데는 무리가 있으며 실제 시험결과와 오차가 크게 발생한다. 따라서 본 연구는 고속인장 실험으로부터의 변형률속도에 따른 진응력 - 진변형률 곡선을 조각선형함수(piecewise linear) 형태로 구성하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.



제 3 장 실험방법

3.1 시험편 제조

본 연구에서 사용된 합금은 Fe - 0.063%C - 0.068%Si - 1.79%Mn - 0.015%Al wt% 조성을 갖는 합금으로 시험편의 합금설계와 제조는 모두 현대 하이스코에서 실시하여, 최종상태로 제공받았다. GA(Galvannea - led) 모사를 포함한 열처리 이력을 그림 7에 나타내었으며, 화학조성은 표 2에 나타내었다.

Table 2 Chemical compositions of tested steel.

alloy	Chemical compositions (Wt%)				
	C	Si	Mn	P	Al
DP	0.063	0.068	1.79	0.01	0.015

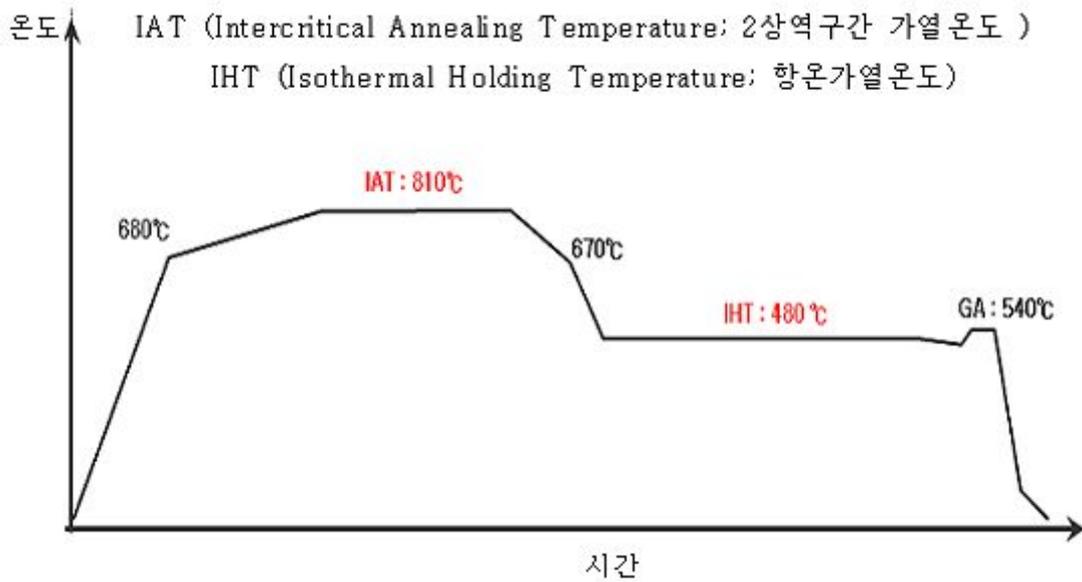
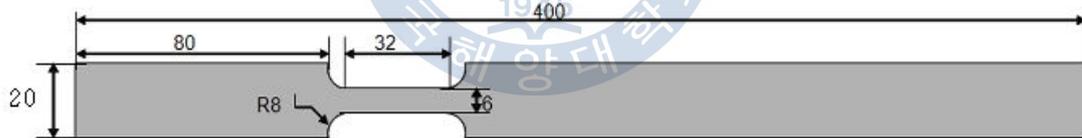
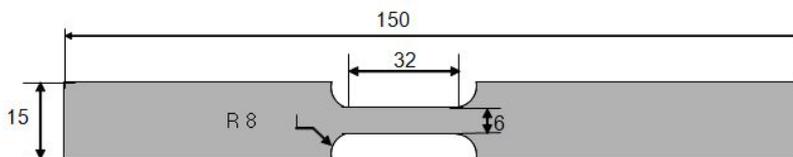


Fig.7 GA simulation of tested steel.

시편 형상은 그림 8에 나타내었는데 시편은 고속인장시편과 저속인장시편으로 나누어 가공하였다. 시편 사이즈가 다른 이유는 고속 변형에서는 시험 속도에 도달하는데 필요한 시간 고려하여 그립(grip)부분이 길어야 할 필요가 있기 때문이다.



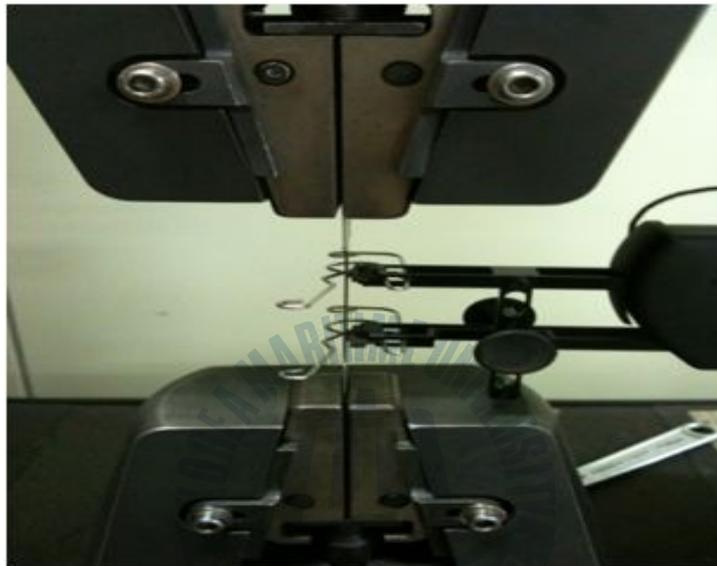
(a)



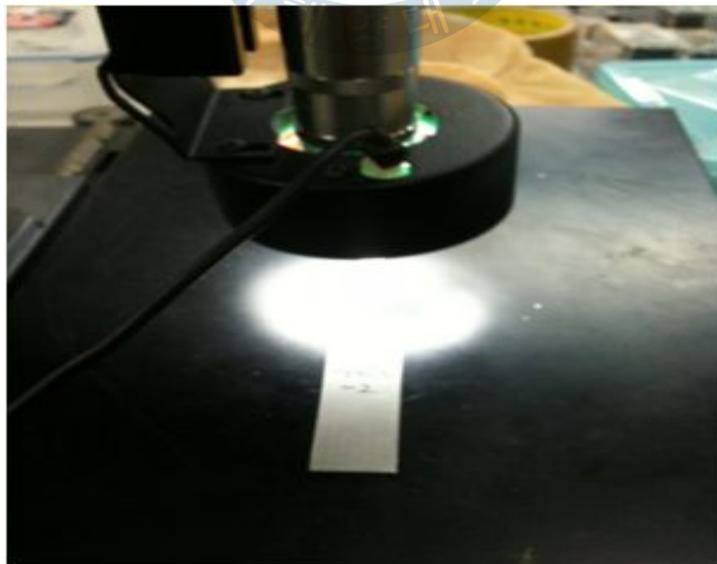
(b)

Fig. 8 (a) high speed tensile specimen (b) quasi-static tensile specimen.

또한, 자동차용 강판 도장처리와 동일한 조건에서의 소부경화성을 시험하기 위해 2% 예비변형을 한 뒤, 170° C 실리콘 오일에서 20분간 베이킹 처리를 한 시편을 제작하였다. (앞으로는 Prestrain & Baking 처리된 시편을 PB로 줄여서 표현 함.) 그림 9에는 예비변형 후 트래벌링 마이크로스코프 (traveling microscope)를 이용하여 정확한 2% 예비변형이 이루어졌는지 측정하였고, 변형률의 오차가 큰 시편($\pm 0.5\%$ 이상)은 실험시편에서 제외하여 실험을 진행하였다.



(a)



(b)

Fig. 9 (a) 2% prestrain, (b) measurement of 2% strain with traveling microscope.

3.2 인장시험

고속인장시험은 그림 10(a)에 나타난 Instron VHS-8800 인장 시험기를 사용하여 변형속도 3, 10, 50, 100, 300/s로 각각 시험을 실시하였고, 저속 인장시험은 그림 10(b)에 나타난 Instron 4469인장 시험기를 사용하여 $10^{-4}, 10^{-2}$ /s의 속도로 실험을 하였다.



(a)



(b)

Fig. 10 (a) Hydraulic high speed tensile testing machine (Instron VHS-8800) (b) Quasi-static tensile testing machine. (Instron 4469)

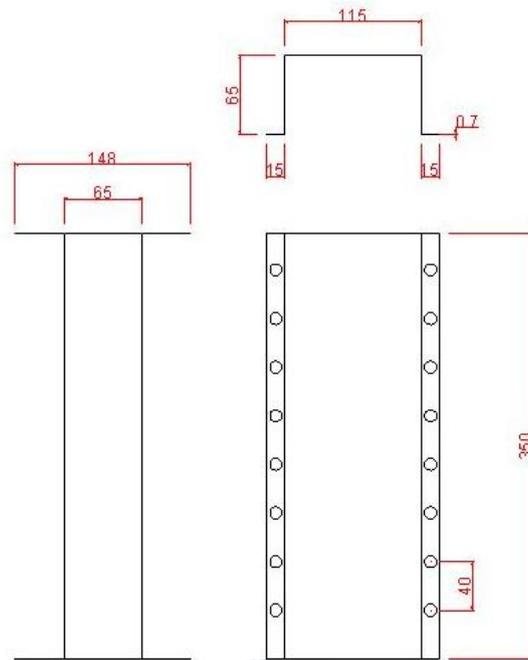
3.3 충돌 시험

3.3.1 실제 충돌 시험

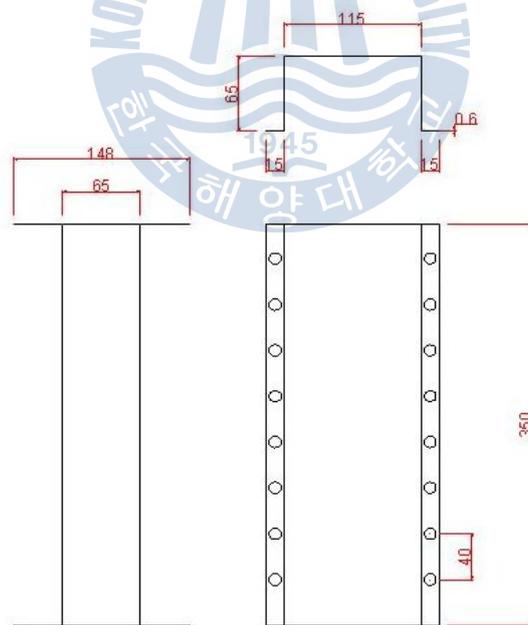
충돌시험은 그림 11의 High Speed Crash Testing Machine를 사용하여 시험을 실시하였고, 고속인장시험 결과를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교 분석을 하였다. 충돌 시험 조건은 290kg의 물체가 2.5m/s, 4m/s 각각의 속도로 충돌하도록 하였으며 각 속도와 PB처리 유무에 따라 4가지 조건에서 실험을 2회 실시하였다. 이때 시간에 따른 변위와 속도 변화, 흡수에너지 변화를 측정하게 된다. 그림 12와 13에 나타낸 것처럼 충돌 시험편은 3mm 두께의 cover 1, 2와 0.7mm 두께의 box와 plate로 구성되어 있다. PB처리 된 시편은 압연을 통하여 예비변형을 실시하였고 두께는 0.6mm로 측정되었다. cover와 box는 CO₂용접이 되어 있으며, box와 plate는 40mm 간격으로 점 용접하였다.



Fig. 11 High Speed Crash Testing Machine.



(a)



(b)

Fig. 12 (a) Dimension of crash test sample before PB treatment, (b) Dimension of crash test sample with PB treatment.

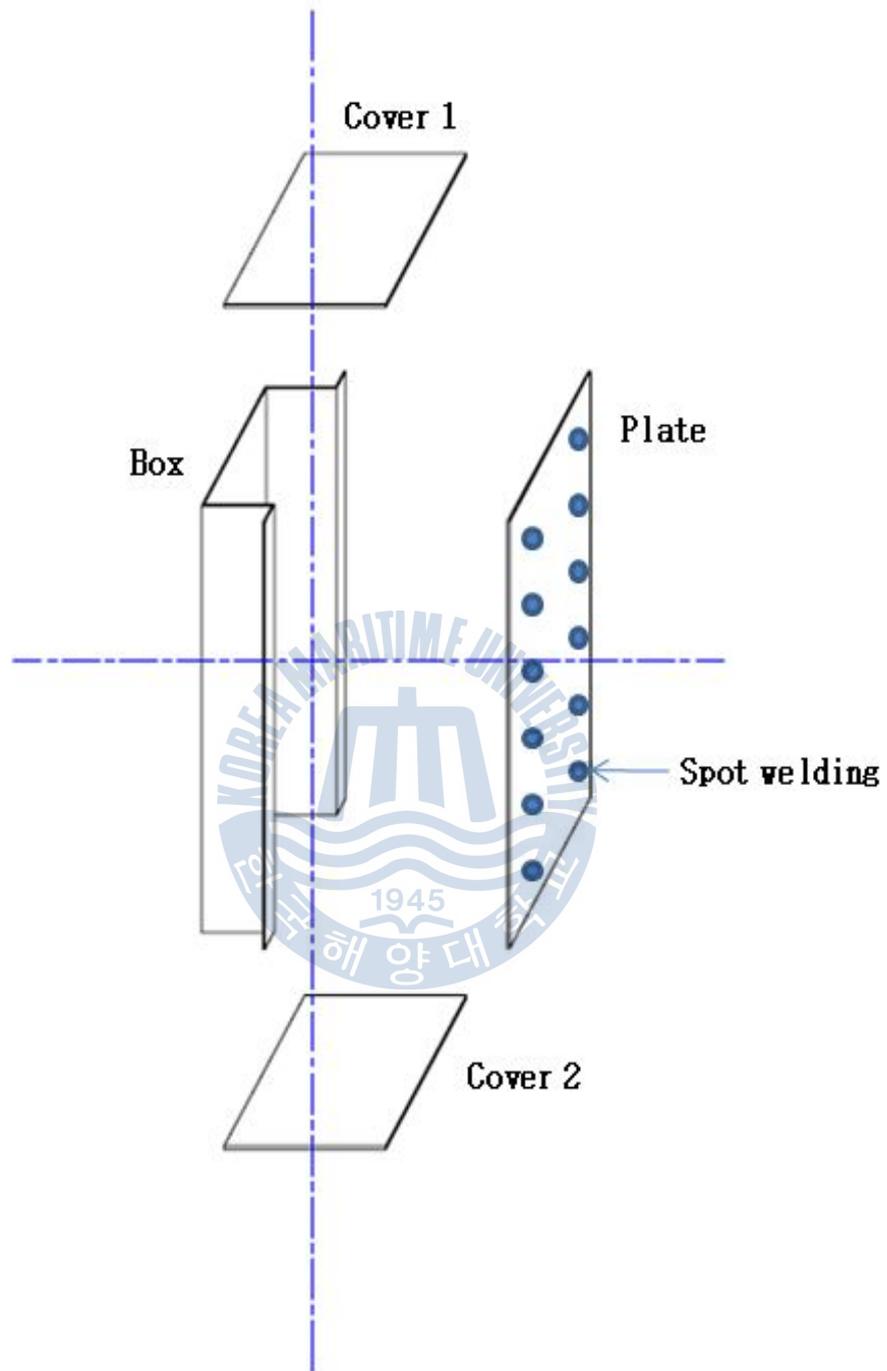


Fig. 13 Shape of sample for crash test.

3.3.2 컴퓨터 시뮬레이션

본 연구에서 수행된 모자형 사각관의 충돌해석은 고속인장시험으로부터 획득한 변형률속도에 따른 진응력-진변형률 곡선을 조각선형함수(piecewise linear) 형태로 구성하여 수행하였다. 충돌해석을 위하여 대표적인 외연적 유한요소 프로그램인 LS-DYNA 3D를 사용하였다. 충돌해석은 실제 충돌시험과 동일하게 사각관의 왼쪽 끝단을 구속하고 오른쪽 끝단에 시험에 사용된 290kg의 대차를 강체(rigid body)로 모사하여 2.5 m/s와 4 m/s의 속도로 충돌해석을 수행하였다. 모자형 사각관은 5 mm * 5 mm 크기의 4절점 쉘요소를 이용하여 모델링 하였으며, box와 plate를 접합하는 점용접부는 직경 6 mm 크기로 다수의 육면체 요소를 하나의 용접점으로 표현하여 모델링하고 묶은 접촉조건으로 점용접부와 box 및 plate의 연결 특성을 표현하였다. 시뮬레이션 결과, 충돌 시간에 따른 변위와 하중 곡선을 구하였고 이로부터 변위에 따른 충돌 하중 관계를 구하여 흡수에너지를 계산하였다.



제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 기계적 성질

4-1-1 공칭응력 - 공칭변형 곡선

그림 14에 FFT필터를 활용하기 전의 거친 그래프를 나타내었다. 유연화 과정을 거치기 전의 결과들은 하중떨림현상에 의한 거친 그래프가 그려진다. 저속인장시험의 결과 값은 고속인장시험의 결과 값에 비해 매끄럽지만 고속인장시험의 결과 값은 그냥 사용하기에는 무리가 있기 때문에 유연화 과정을 거쳐야만 한다. origin 8.0에서 FFT필터를 사용하여 유연화 작업을 하며 유연화 작업을 거친 각 시험편에 대해 속도별 공칭응력 - 공칭변형을 곡선은 그림 15에 나타내었다. 그림 15(b) 곡선에서 항복점이 나타난 이유는 소부처리에 의한 침입형 원자의 전위로의 확산 때문에 발생한 변형시효에 의한 것으로 판단된다. PB처리 전, 후 모두 변형속도가 증가할수록 항복강도, 인장강도, 연신율 모두 증가한다는 것을 알 수 있다.

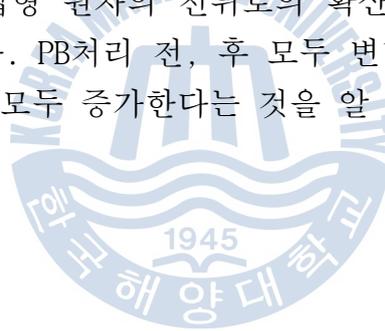
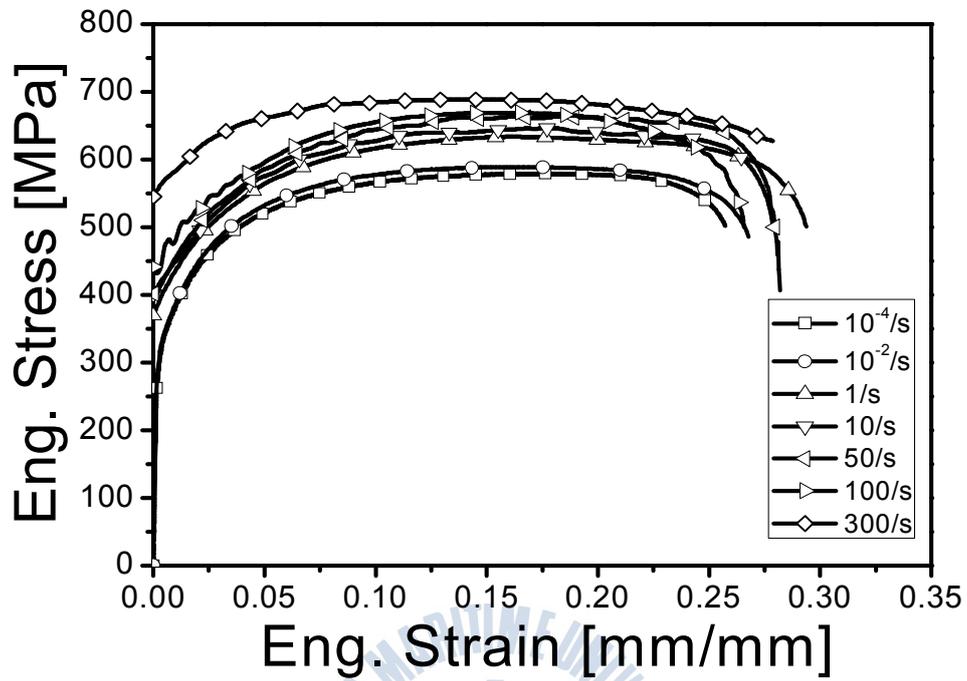
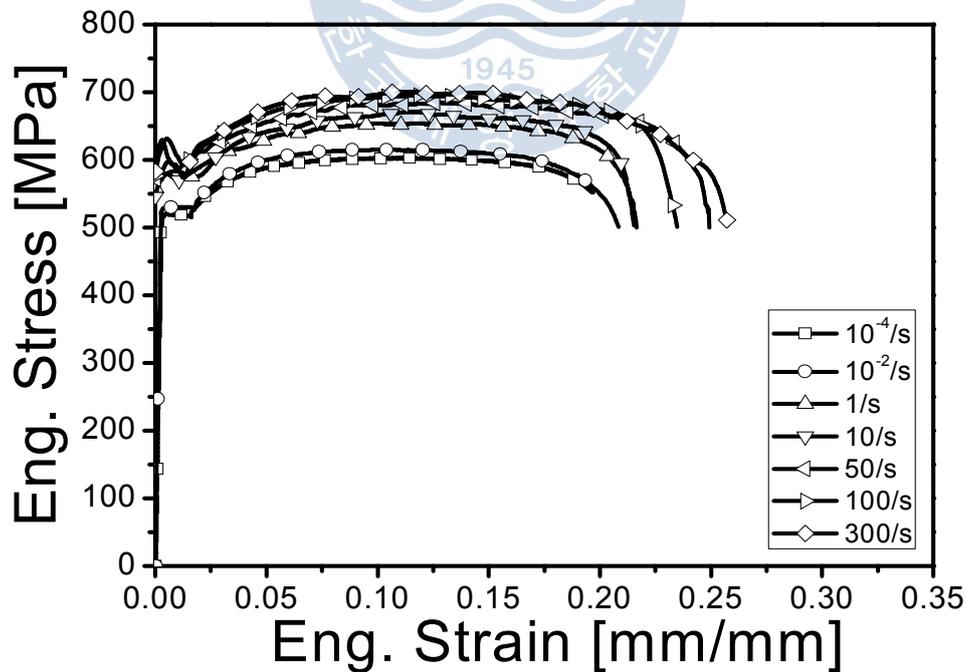


Fig. 14 Engineering stress-strain curve before smoothed data.



(a)



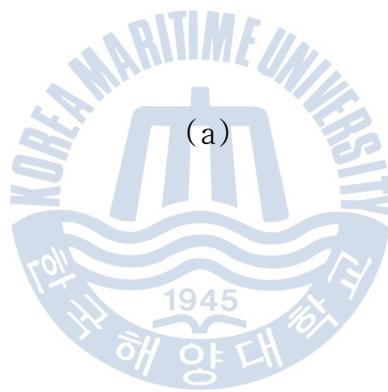
(b)

Fig. 15 Engineering stress-strain curve (a) before PB treatment (b) after PB treatment.

4-1-2 진응력 - 진변형 곡선

일반적으로 사용하는 하중 - 변위 곡선은 같은 재료일 경우라도 시편의 크기가 달라지게 되므로 재료의 특성을 나타내기에는 적당하지 못하는 결점이 있다. 이러한 결점을 없애기 위하여 공칭응력 - 공칭변형률 곡선이 사용되어진다. 하지만, 실제 재료의 인장시험에서는 변형이 증가함에 따라 시편의 단면적이 점차 감소하며 특히, 충돌특성 해석을 하기위한 컴퓨터 시뮬레이션을 위해서는 보다 정확한 재료의 응력을 알아야 할 필요가 있기 때문에 진응력 - 진변형률곡선을 사용하는 것이 바람직하다. 변형에 따라 감소하는 단면적을 $\varepsilon = \ln(e+1)$, $\sigma = s(e+1)$ 의 식을 이용하여 공칭응력으로부터 진응력 - 진변형률곡선을 구하여 그림 16에 나타내었다. 이렇게 구한 유동곡선을 가장 보편적인 수학적 표현 $\sigma = K\varepsilon^n$ 을 사용하여 나타낼 수 있으며 여기서 K 는 $\varepsilon = 1$ 에서의 응력이며 강화계수라고하고 n 은 가공경화지수이다.





(b)

Fig. 16 True stress-strain curve (a) before PB treatment
(b) after PB treatment.

4-1-3 시험편의 미세조직

미세조직의 관찰을 위해서 인장시험편의 과단부분을 커팅 하여 연마한 후, 나이탈 용액(nitric acid 2ml + ethyl alcohol 100ml)으로 1차 에칭을 하고, sodium metabisulfite 용액 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 10g + H_2O 100ml)으로 2차 에칭을 하였다. 위의 방법으로 PB 처리전과 PB 처리후의 시편을 에칭을 하여 광학 현미경으로 관찰을 했을 때 그림 17과 같이 밝은 부분의 페라이트와 어두운 부분의 마르텐사이트를 관찰할 수 있었다. 응력 - 변형률곡선에서 변형속도가 증가 할수록 최대인장강도가 증가 했고 PB처리에 따라서도 최대인장강도가 증가하였지만, PB처리의 유무 혹은 변형속도에 따른 페라이트와 마르텐사이트의 부피 분율의 차이점은 관찰하지 못하였다. 보다 정확한 부피분율의 차이를 측정하기 위해 EBSD촬영을 실시하였다. PB처리 전과 후 그리고 고속과 저속으로 나누어 그림 18에 타내었다. EBSD촬영 결과 또한 PB처리의 유무 혹은 변형속도에 따른 페라이트와 마르텐사이트의 부피 분율의 차이점은 관찰하지는 못하였다.

현미경사진으로부터 직경측정법을 이용해 결정립크기를 측정하였다. 직경측정법은 현미경 사진 상에 선 1개의 길이가 $L(\text{mm})$ 인 평행선을 긋고 선상의 결정립수 z 를 세어 평균한다. 이때 전부 들어가는 것만 세고 걸치는 것은 제외한다. 이렇게 구한 결정립의 크기는 PB 처리 유무와 변형속도에 상관없이 15 ~17 μm 로 큰 차이가 없었다.

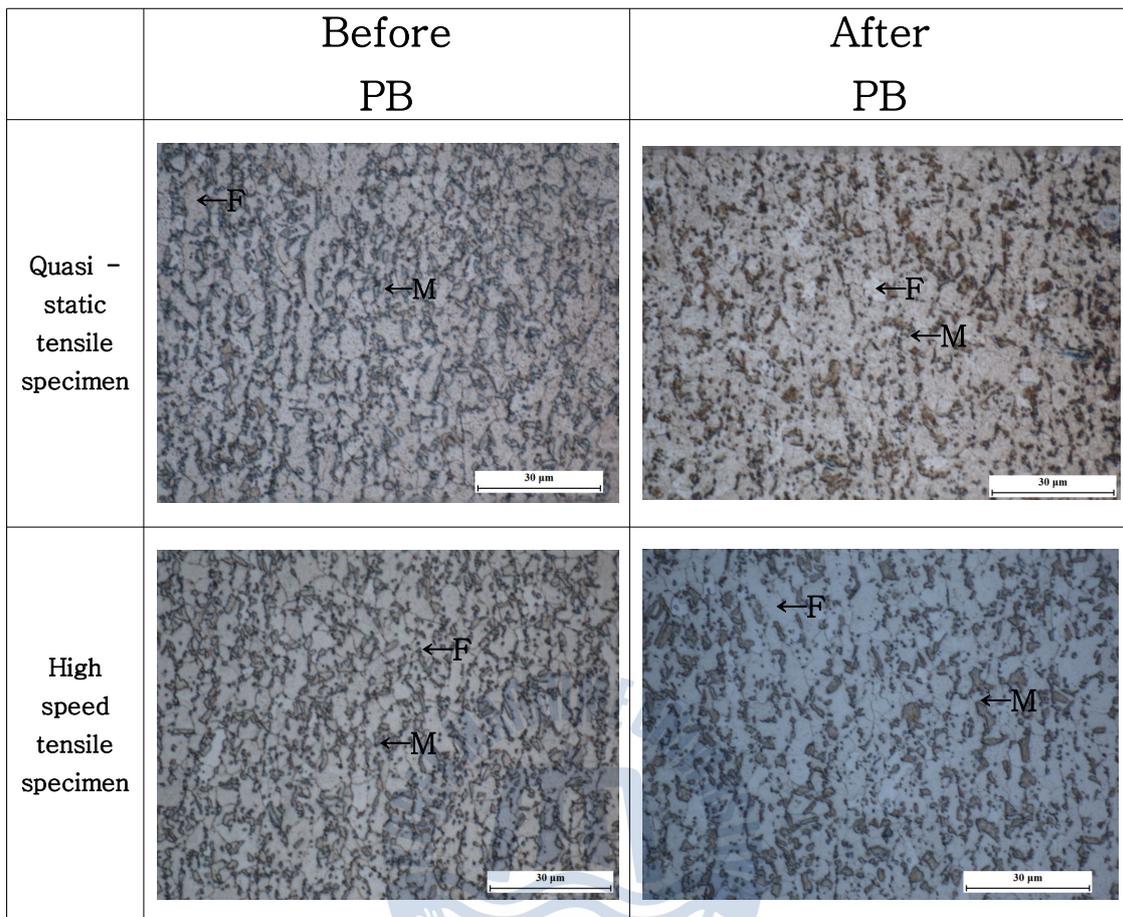


Fig. 17 Light optical micrographs of the fractured sample.
(F: Ferrite, M: Martensite)

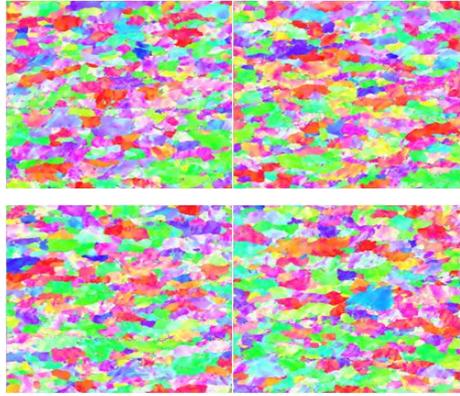
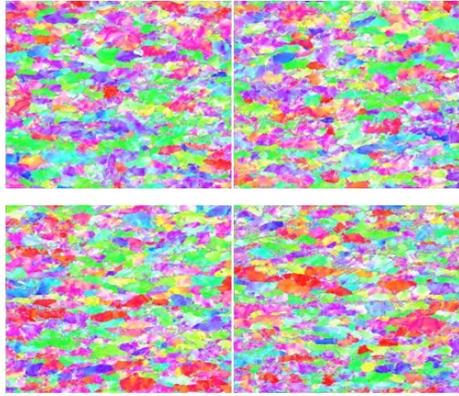
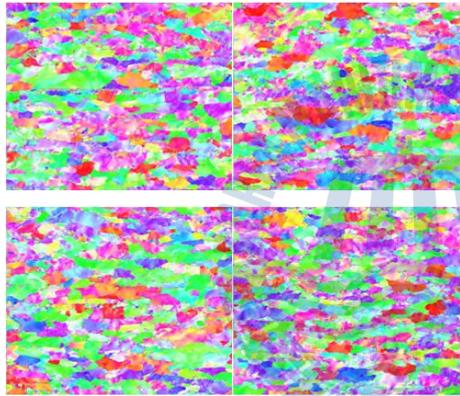
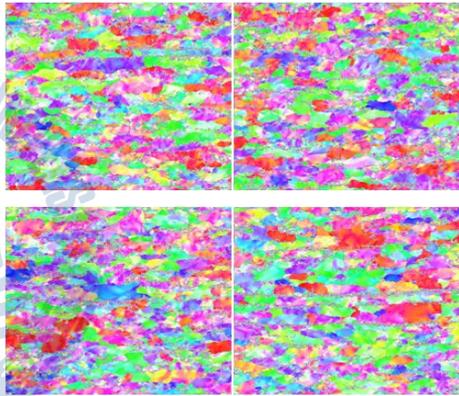
	Before PB	After PB
Quasi - static tensile specimen		
High speed tensile specimen		

Fig. 18 Misorientation maps of tensile specimen.

4-1-4 최대인장강도

그림 15의 공칭응력-공칭변형률 곡선의 최대인장강도를 PB처리 유무와 변형속도 별로 비교해 그림 19에 나타내었다. 변형속도가 증가할수록 인장강도는 증가했으며, PB처리 후에도 2%의 예비변형으로 인해 시험편에 가공경화효과가 나타나 인장강도는 증가하였다. 변형속도가 증가할수록 인장강도가 증가하는 것은 동일한 강도의 590MPa TRIP(TRansformation Induced Plasticity)강과 같은 다른 철강 제품들과 유사한 경향을 보이고 있다 [16].



Fig. 19 The effect of strain rate on UTS.

4-1-5 파단 연신율

그림 20에는 변형속도에 따른 파단 연신율의 변화를 나타내었다. 정적변형속도에서는 일반적으로 금속 재료의 강도가 증가할수록 연성은 감소하지만 본 연구 결과에서는 변형속도가 증가할수록 강도가 증가하고 연성도 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 단순 정적 인장 시험에서는 네킹(necking) 현상에 의한 변형이 게이지 영역에서 국부적으로 발생하여 파단이 일어나지만, 높은 변형률 속도에서 인장 시험이 수행될 경우 국부적으로 변형률 속도 경화가 네킹의 진행을 억제시키고 네킹 부에 넓은 밴드를 형성하며 네킹을 근처로 전파하기 때문에 변형률 속도가 증가할수록 오히려 파단연신율은 증가하게 된다[21,22]. 이런 파단 연신율의 증가는 차체의 충돌 특성, 특히 차체 부재의 파단 관점에서 매우 중요하며 박판의 성형성을 향상시키기 위한 차체 부재의 박판성형공정에 적용 가능하다. 저속으로 박판성형을 수행할 때보다 고속으로 성형을 수행할 때 연신율이 더 증가한다면 우수한 성형성을 기대할 수 있다. 즉, 적절한 변형률 속도 영역에서 파단 연신율은 변형률 속도 경화에 의하여 증가하므로 적절한 변형률 속도를 수반한 성형 공정은 정적으로 수행한 공정에 비하여 충돌 특성과 성형성이 더 우수할 것으로 사료된다[21,22].

Fig. 20 The effect of strain rate on the failure elongation.

4-1-6 변형속도민감도

유동응력 σ 와 변형속도 $\dot{\epsilon}$ 과의 관계는 일정한 온도에서는 $\sigma = c\dot{\epsilon}^m$ 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 m 을 변형속도 민감도라고 하며, 위의 식을 사용하여 m 값을 구하면 $m = (\Delta \log \sigma) / (\Delta \log \dot{\epsilon})$ 이다. 여기에서 σ 는 진응력 - 진변형률 커브에서 나타난 최대인장강도이며 $\dot{\epsilon}$ 은 그림 21과 같이 인장 시험 시 시간에 따른 변위의 기울기 값으로부터 구할 수 있다. 이렇게 진변형 속도에 따른 최대인장강도의 기울기 값으로 구한 m 값을 그림 22에서 나타내었다. 검은색으로 표시된 그래프는 저속에서의 변형속도 민감도를 나타내며, 빛금으로 표시된 그래프는 고속에서의 변형속도 민감도를 나타낸다. PB 처리에 따른 민감도의 차이는 거의 나타나지 않지만, 고속에서는 저속보다 변형속도 민감도가 크게 증가하여 고속에서 충돌특성이 크게 향상될 것으로 예측된다.

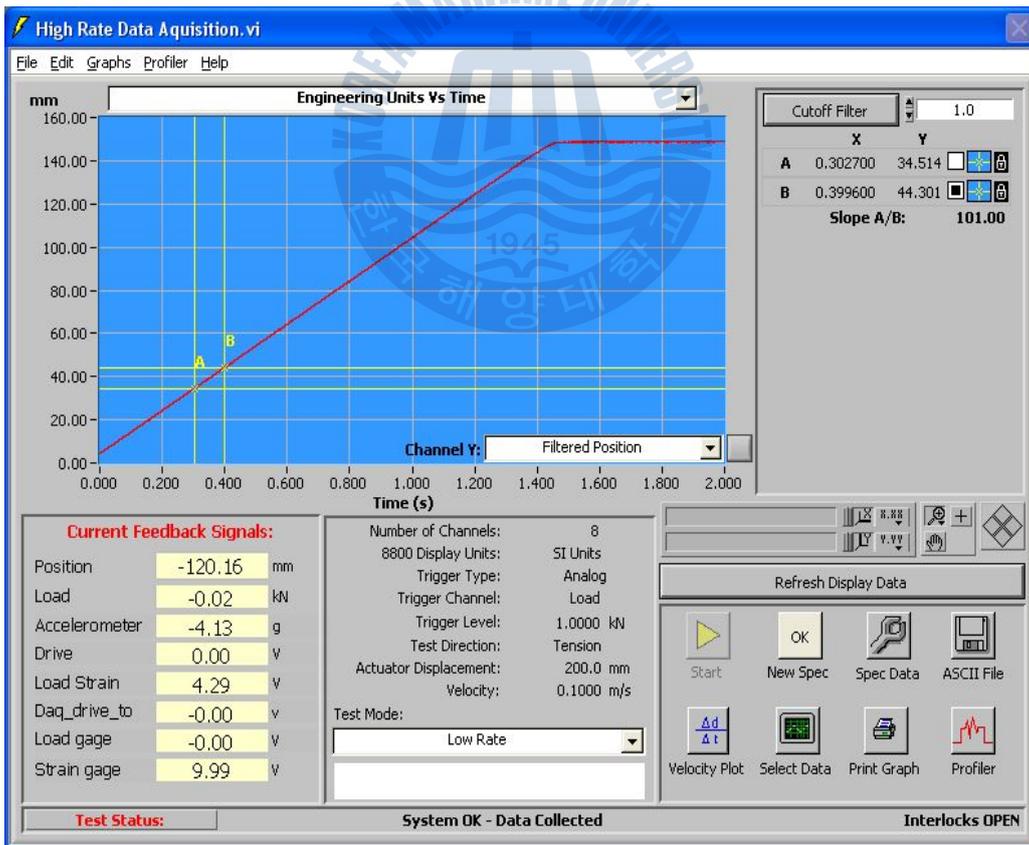


Fig. 21 Raw data of strain

Fig. 22 Strain Rate Sensitivity of UTS.

4-1-7 Absorbed energy

흡수에너지는 공칭응력-공칭변형률 곡선의 면적으로부터 구할 수 있지만, smoothing 과정에서 파단 연신율이 달라 질 수 있기 때문에 전체 흡수에너지는 최대인장강도 [MPa] × 파단 연신율 [%] 의 형태로 구하여서 각 조건 별로 비교를 하여 그림 23에 나타내었다. 이때 파단 연신율은 시편의 표점 거리로 부터 실제 측정된 값을 사용하였다. PB처리 된 시편은 강도는 높지만, 연성이 떨어지기 때문에 총 흡수에너지는 PB처리 전 보다 낮은 값을 나타내는 것을 볼 수 있고, TRIP강이 DP강보다 높게 나타난다. 하지만, 자동차의 충돌해석에서는 초기 변형률 10%까지의 응력-변형률 데이터가 중요하다[21]. 때문에 10% 변형률까지의 공칭응력 - 공칭변형률 곡선의 면적으로 흡수энер지를 다시 구해 그림 24에 나타내었다. 10% 변형률 흡수에너지는 PB처리 된 시편이 PB처리 전 시편과 TRIP강보다 높은 값을 나타내어 총 흡수에너지와는 다른 경향을 나타내었다. 이는 예비변형에 의해 항복강도가 높아졌기 때문이라고 판단되며 10% 변형률 흡수에너지로 판단하면 PB처리 전이나 TRIP강에 비교하여 PB 처리 시편이 우수한 충돌특성을 나타낼 것으로 기대된다.

Fig. 23 Calculated absorbed energy up to failure strain.

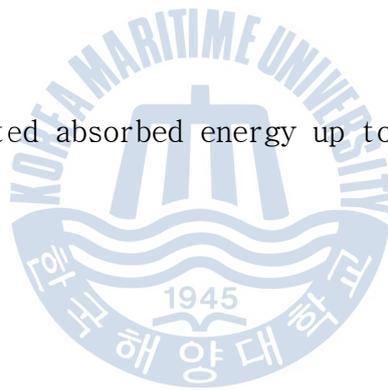


Fig. 24 Calculated absorbed energy up to 10% engineering strain.

4.2 충돌 시험

4-2-1 실제 충돌시험

충돌시험 결과를 거친 시험편의 형상을 그림 25에 나타내었다. 그리고 충돌 시간에 따른 변위와 하중의 변화로 구하였고 그림 26에 시간에 따른 변위량을 나타내었는데 변위량은 PB처리 유무에 상관없이 속도가 빨라짐에 따라 증가하였다. 시간에 따른 하중은 그림 27에서 나타내었는데, 속도가 빨라지면서 하중이 증가하는 것은 알 수 있다. 그림 26과 27에서 각각 측정된 시간에 따른 변위와 하중을 구하게 되면 그림 28과 같이 변위에 따른 하중을 계산할 수 있게 되고, 변위에 따른 하중 그래프의 면적을 구하면 그림 29와 같이 변위에 따른 흡수에너지를 구할 수 있다. 인장시험으로 부터 구한 인장응력은 하중을 단면적으로 나누어 주기 때문에 두께가 다른 시험편이라도 비교가 가능하지만, 충돌시험의 경우는 하중으로 비교를 하기 때문에 두께가 다른 시험편끼리의 비교는 사실상 어렵다. 하지만, 충돌시험에 사용된 PB시험편은 2% 예비변형을 위한 압연 작업 때문에 두께가 얇아져서 하중의 감소를 예상할 수 있지만, PB처리 전보다 오히려 하중이 증가하였다. 이것으로 보아 PB처리 후 가공경화에 의해 재료의 하중이 증가 하였으며, 하중의 증가로 인해 흡수에너지 역시 증가했다고 판단할 수 있겠다.

	Before PB	After PB
2.5m/s		
4m/s		

Fig. 25 The shape of crashed sample tested at 2.5m/s and 4m/s.

Fig. 26 Displacement versus time curve at 2.5m/s and 4m/s.

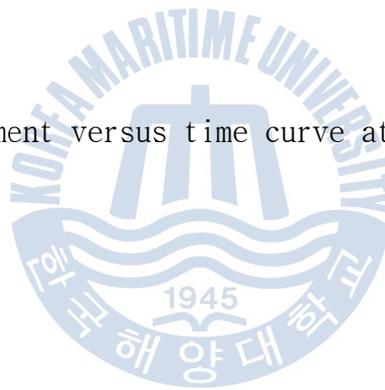


Fig. 27 Collision force versus time curve at 2.5m/s and 4m/s.

Fig. 28 Collision force versus displacement curve
at 2.5m/s and 4m/s.

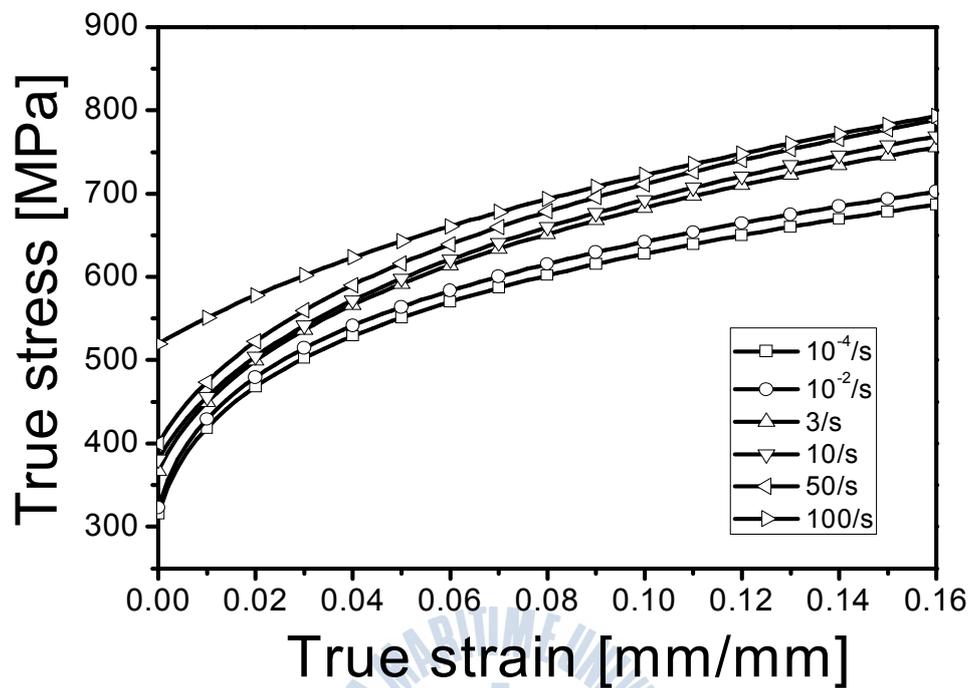


Fig. 29 Absorbed energy versus displacement curve
at 2.5m/s and 4m/s.

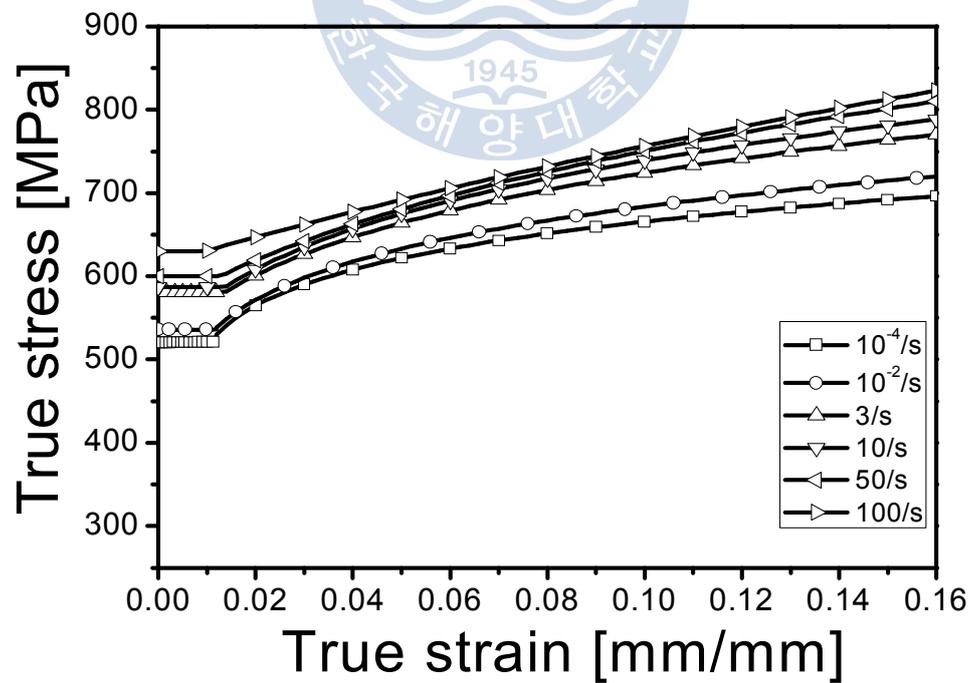
4-2-2 고속인장 결과를 이용한 충돌 시뮬레이션 시험

그림 30에는 고속인장시험 결과 값으로부터 얻은 진응력 - 진변형률을 나타내었는데 여기에서 나타나는 응력 값과 연신율 값이 LS-DYNA 3D 컴퓨터 시뮬레이션의 입력 값이 된다. LS-DYNA 3D로 컴퓨터 시뮬레이션의 결과는 그림 31에서 나타내었다. 충돌을 거친 시험편 외형이 실제 충돌테스트와 매우 흡사하다는 것을 알 수 있다. 그림 32는 PB처리 유무에 따른 변위량의 차이는 나지 않고, 속도가 빨라짐에 따라 변위량이 큼을 나타내는 것을 알 수 있는데 실제 충돌 시험 결과와 흡사하다. 그림 33은 시간에 따른 하중을 나타내었는데 속도가 빨라짐에 따라 총 하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 변위에 따른 하중은 그림 34에 나타내었는데 변위량의 증가에 따라 하중이 커짐을 알 수 있다. 그림 34에서 하중-변위 곡선의 아래 면적을 구하면 그림 35의 변위에 따른 흡수에너지를 구할 수 있는데 속도가 증가하면 흡수에너지가 크게 증가하는 것을 알 수 있다.





(a)



(b)

Fig. 30 True stress-strain curve (a) before PB treatment for simulation. (b) after PB treatment for simulation.

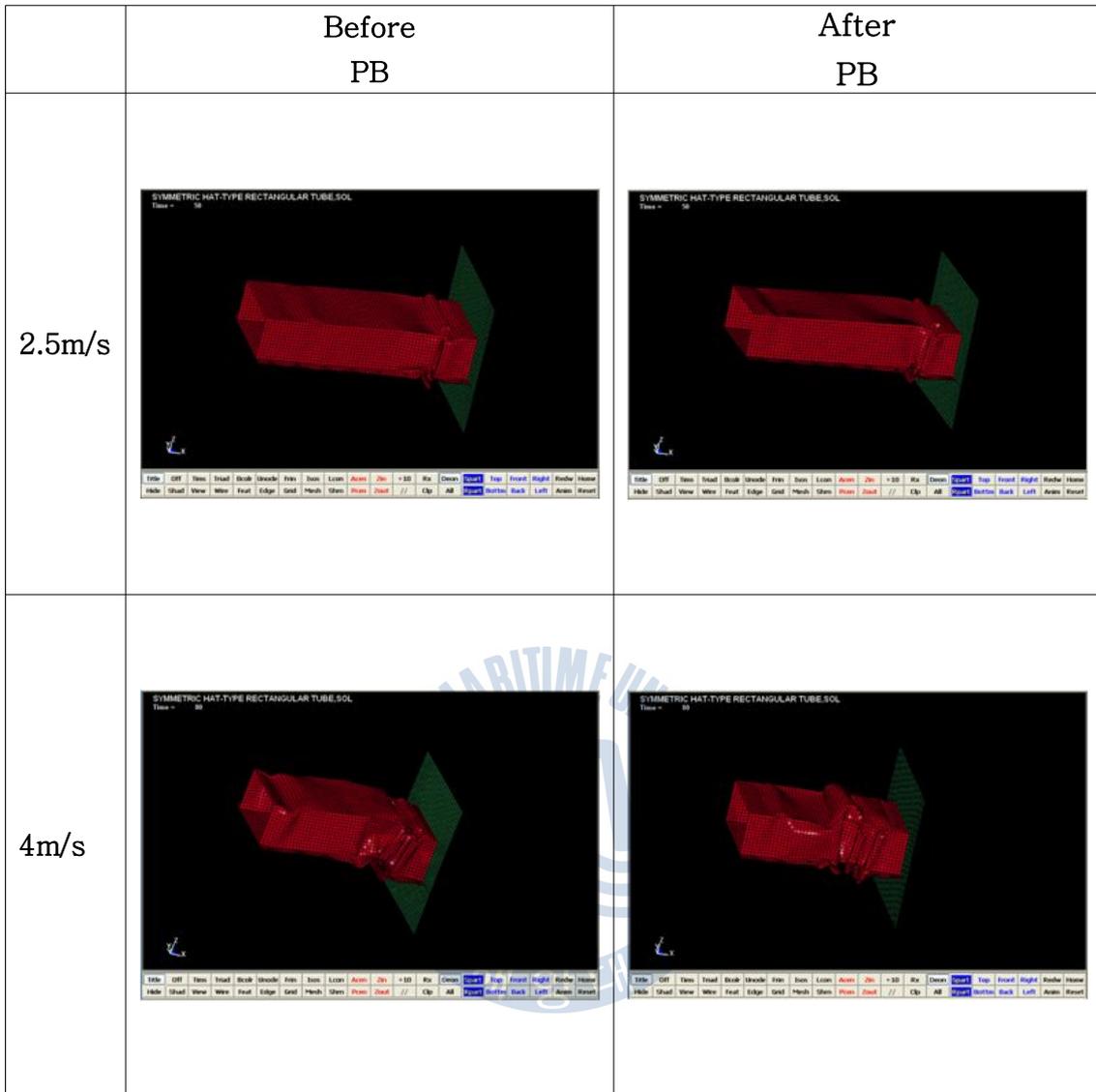


Fig. 31 The shape of crashed sample tested from computer simulation at 2.5m/s and 4m/s.

Fig. 32 Displacement versus time curve at 2.5m/s and 4m/s.

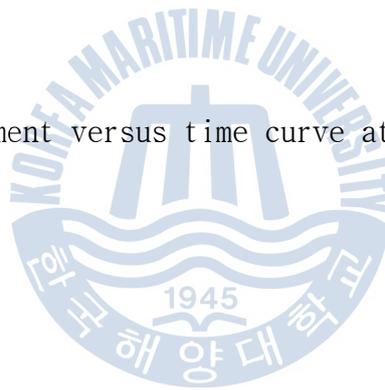


Fig. 33 Collision force versus time curve at 2.5m/s and 4m/s.

Fig. 34 Collision force versus displacement curve at 2.5m/s and 4m/s.

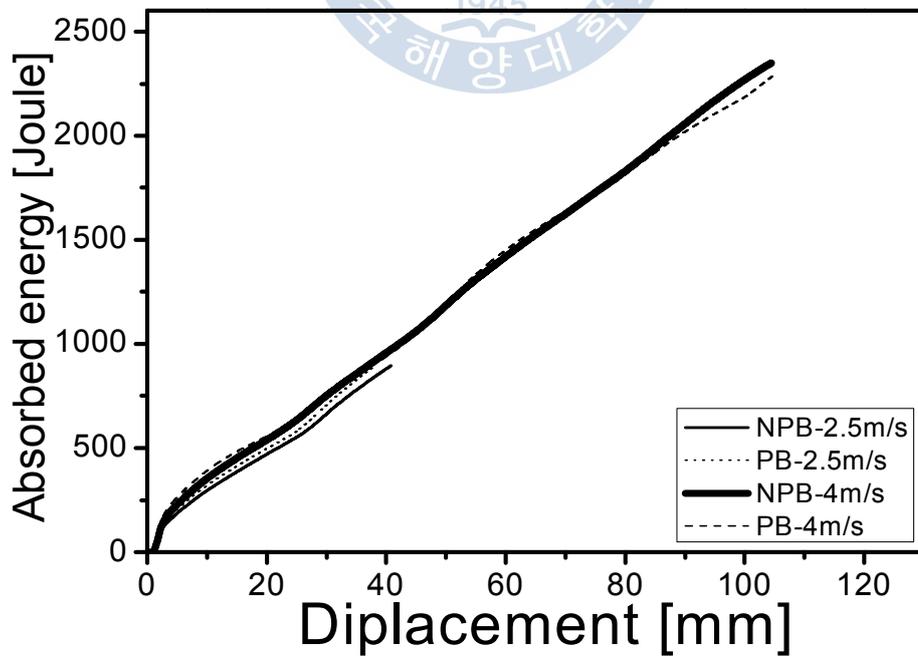


Fig. 35 Absorbed energy versus displacement curve at 2.5m/s and 4m/s.

4-3 실제 충돌시험과 컴퓨터 시뮬레이션 결과 비교

실제 충돌시험과 시뮬레이션 결과 비교는 변형률 10%에 해당하는 변위 35mm로 제한한 경우의 흡수에너지를 그림 36에 각 조건에 따라 비교하여 나타내었다. 실제 충돌 테스트와 시뮬레이션 결과는 정확하게 일치하지는 않았지만, 전반적으로 볼 때에 유사한 경향이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이로써 본 연구에 사용된 DP강의 충돌특성은 시뮬레이션만으로도 충분히 실제 충돌 시험의 결과와 유사하게 예측되며, 그 결과의 신뢰도 또한 높다고 할 수 있다. 또한 본 연구에 사용된 DP강이 다른 형태의 부품으로 적용될 경우, 시뮬레이션에 의한 결과를 신뢰할 수 있다고 말할 수 있다.

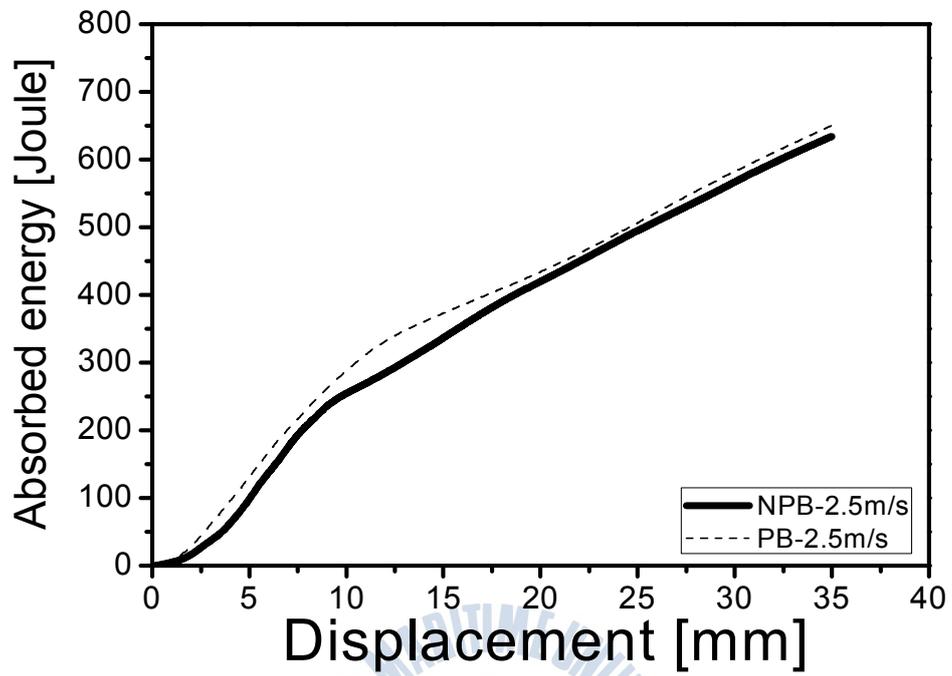
	Before PB	After PB
2.5m/s		
4m/s		

Fig. 36 Comparison of absorbed energy between experiment and simulation up to strain 10% at 2.5m/s and 4m/s.

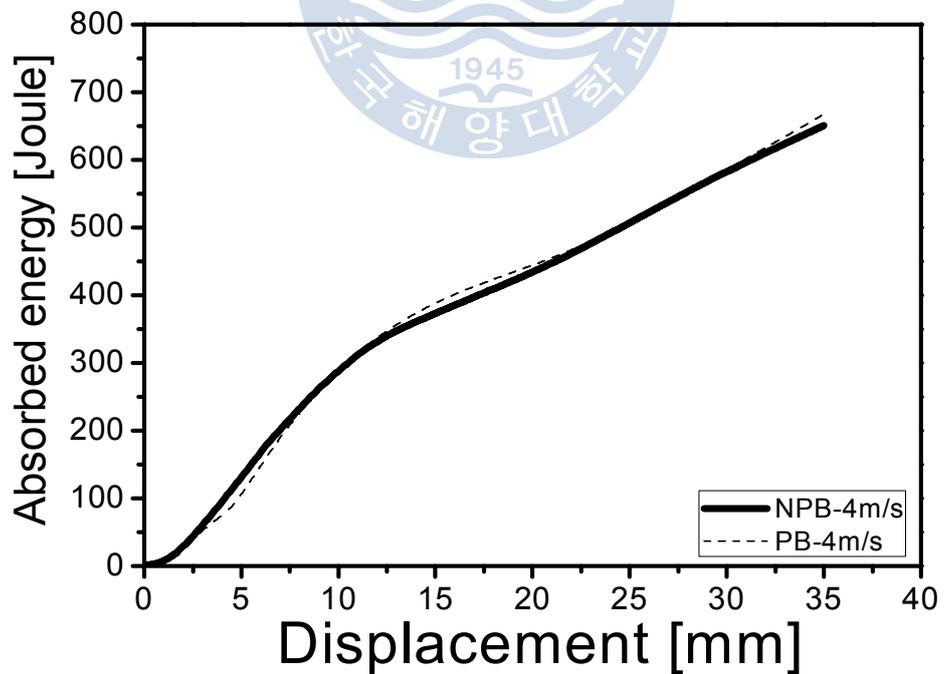
4-4 실제 충돌실험에서의 PB처리에 따른 결과 비교

PB처리에 따른 흡수에너지의 차이를 그림 37에서 나타내었다. 실제 테스트에서 PB처리는 압연을 거쳐 두께가 얇아졌지만, PB처리 전의 흡수에너지와 비교했을 때 줄어들지가 않았고 오히려 2.5m/s에서는 흡수에너지가 더 커지는 것을 알 수 있었다. 이 결과로 PB처리 후, 인장 테스트뿐 아니라 실제 충돌 테스트에서도 예비변형에 따른 강도증가로 충돌특성이 향상되었음을 알 수 있었다.





(a)



(b)

Fig. 37 Comparison of absorbed energy between PB and NPB up to strain 10% at 2.5m/s and 4m/s.

제 5 장 결론

본 연구에서는 현재 자동차용강의 대상제인 DP 강의 고속변형에서의 인장 특성에 관해서 실험을 실시하였으며, 이를 바탕으로 DP 강의 고속인장 거동이 일반 고강도강과 유사함을 알 수 있었다. 그리고 고속인장 실험 결과를 적용하여 고속변형 특성을 결정하였다. 고속인장 실험 결과로부터 구한 고속변형 특성을 기반으로 하여 LS-DYNA 3D를 사용하여 DP 강의 충돌특성을 시뮬레이션 할 수 있었다. LS-DYNA 3D를 통한 시뮬레이션의 신뢰도를 알아보기 위하여 실제 충돌 실험을 실시하여 시뮬레이션과 결과를 비교하였다. 위의 실험결과들을 바탕으로 얻은 결론은 다음과 같다.

1. PB처리 유무에 관계없이 변형속도가 증가할수록 강도와 연신율을 포함한 모든 기계적 특성이 우수한 결과가 나타났으며 적절한 변형률 속도를 수반한 성형 공정은 정적으로 수행한 공정에 비하여 충돌 특성과 성형성이 더 우수할 것으로 사료된다.
2. 인장시험 결과 PB처리 후 연신율은 감소하였고 항복강도, 인장강도 그리고 10% 흡수에너지는 증가하였다. 이는 예비변형에 의해 항복강도가 높아졌기 때문이라고 판단되며 10% 변형률 흡수에너지로 판단하면 PB처리 전이나 TRIP강에 비교하여 PB 처리 시편이 우수한 충돌특성을 나타낼 것으로 기대된다.
3. 충돌시험에서도 실제테스트와 시뮬레이션 모두 PB처리에 따라 높은 흡수에너지가 나타났다. 이 결과로 PB처리 후 인장 테스트뿐 아니라 실제 충돌 테스트에서도 예비변형에 따른 강도증가로 충돌특성이 향상되었음을 알 수 있었다.
4. 실제 충돌 테스트와 시뮬레이션 테스트에서 총 흡수에너지 차이는 다소 있었지만, 변형률 10%에 해당하는 흡수에너지 에서는 유사한 경향이 나타났다. 이로써 본 연구에 사용된 DP강의 충돌특성은 시뮬레이션만으로도 충분히 실제 충돌 실험의 결과와 유사하게 예측되며, 그 결과의 신뢰도 또한 높다고 할 수 있다.

제 6 장 참고문헌

1. I. D. Choi, D. M. Kim, D. M. Bruce, D. K. Matlock, J. G. Speer and S. H. Park 「자동차용강의 고속변형거동에 대한 예비변형과 소부경화의 영향」 J. Kor. Imst. Met.& Mater.43(2005).
2. Byoung-Hwan Song, Chang Gil Lee, Sung-Joon Kim and Il-Dong Choi 「0.1C-1.5Si-1.5Mn-0.5Cu TRIP형 냉연강판의 성형성에 미치는 열처리의 효과」 J. Kor. Imst. Met.& Mater.38(2000).
3. D.O. Kim, M.B. Moon, C.S. Shin, 「자동차용 590MPa급 복합조직 강판의 기계적 특성」 한국자동차공학회 추계학술대회논문집 (2003).
4. Youngwoo Kim, Namhyun Kang, Youngdo Park, Il-Dong Choi, Gyosung Kim, Sungkyu Kim, and Kyungmox Cho, 「Al첨가 TWIP강에서의 지연파괴에 대한 변형유기 마르텐사이트 변태의 영향」 J. Kor. Imst. Met.& Mater.46(2008).
5. D.W. Kim, J.W. Park, K.H. Lee, 「아연 도금 강판의 내식성 향상을 위한 TEOS/MTES 기반 sol-gel 코팅 공정 최적화」 한국표면공학회 춘계학술대회 논문집 (2010).
6. Y.H. Kim, M.B. Moon, Y.J. Lee, S. Namgung, 「용융아연도금 강판의 단면부 부식특성」 한국표면공학회 춘계학술발표회 논문 초록집 연구30 (2001).
7. M.B. Moon, S.J. Park, 「변태강화형 용융도금강판 개발」 재료마당 제 19권 제2호 (2006).
8. W.K. Lee, S. Jeon, 「강판의 내식성 향상을 위한 환경 친화형 표면처리」 Applied Chemistry, 7, (2003).
9. M.B. Moon, S.S. Cha, H.Y. Jung, 「자동차용 심가공 합금화용융아연도강판의 재질 특성에 미치는 연속소둔조건의 영향」 한국자동차공학회 부품부문 학술강연초록집 (1994).
10. M.B. Moon, S. Namgung, 「자동차용 합금화 용융아연도금강판의 도금층 특성에 미치는 합금화열처리 및 도금욕 조성의 영향」 한국자동차공학회 추계학술대회 (1999).
11. M.B. Moon, S.S. Cha, 「용융아연도금욕중 첨가원소가 아연도금층의 부식거동에 미치는 영향」 한국부식학회지, 22 (1993).
12. C. D. Park, D. C. Ko, B. M. Kim, 「자동차용 합금화 용융아연도금강판의 도금층 미소물성 및 파괴 거동」 한국정밀가공학회지 제24권 제3호

(2007).

13. S. Namkoong, M .B Moon, 「합금화 용융아연도금강관의 도금층 특성에 미치는 합금화처리조건의 영향」 한국표면공학회 추계학술발표대회 논문초록집 (1999).
14. Süleyman Gündüz, 「Effect of chemical composition, martensite volume fraction and tempering on tensile behaviour of dual phase steels」 *Materials letters*63.(2009).
15. B. C. Hwang, Tongyou Cao, S. Y. Shin, S. H. Lee, S. J. Kim, 「0.15C-2.0Mn-0.2Si 2상 조직강의 준정적 및 동적 변형특성에 미치는 페라이트 결정립 크기와 마르텐사이트 부피분율의 영향」 *J. Kor. Imst. Met.& Mater.* 42 (2004).
16. J.H.Hong, T.G. Ji, P.W. Shin and J.B. Yoon, 「Dual-Phase Steel에서의 냉간가공 효과」 *J. Kor. Imst. Met.& Mater.* 20 (1982).
17. S.H. Han, Y.S.Ahn, K.G. Chin, and I.B. Kim, 「이상조직강관의 성형 특성에 미치는 Mo와 Cr첨가의 영향」 *J. Kor. Imst. Met.& Mater.* 46(2008).
18. C.W.Kim, B.K.Han, J.J.Won, C.H.Lim, 「자동차 충돌특성 연구동향」 한국자동차공학회 특집I18(1996).
19. S.H. Jeong, H. Huh, G. W. Bang, C. G. Kim, K. S. Chae, 「자동차용 강관 동적인장물성 측정에서의 표준불확도평가」 한국자동차공학회 학술대회 논문집 (2011).
20. J.h. Lim, S.B. Kim, J.S Kim, H. Huh, J. D. Lim, S.H. Park, 「중변형률 속도에서의 체체용 강관의 고속 인장실험」 한국자동차공학회 추계학술대회논문집 (2005).
21. S.B. Kim, Hoon Huh, Daeon Kim and M. B. Moon, 「차체용 고장력 강관의 고속 인장 특성 연구」 대한기계학회 춘추학술대회 (2005).
22. S. B. Kim, H. Huh, J.H. Lim, K. P. Kim, 「차체용 TRIP강과 DP강의 동적 인장 특성」 한국자동차공학회 추계학술대회논문집 (2005).
23. ISO/DIS 26203-2, (2009).
24. S.K. Kang, 「트립강의 충돌특성에 대한 충돌시험과 컴퓨터 전산모사 결과의 비교 연구」 MS Thesis, pp 28,33 Korea Maritime University, Pusan (2011).
25. ULSAB-AVC, Technical Transfer Dispatch #6, Appendix III,(2001).

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 소중한 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 교수님, 김준영 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, 권운현, 방해중, 손동민, 김경아, 이상민, 오광열, 박효준, 서주현, 김진용, 윤상희, 이성희, 강성규, 김종배, 김치완 님들께 감사하단 말씀 전합니다. 더불어 저와 함께 실험실을 이끌었던, 송샘, 정승훈, 장지현, 이은지, 김시훈, 우진영, 서정철, 김경원 그리고 최근에 실험실에 들어와서 앞으로 이끌어갈 오흔택, 박지연, 임성상 에게 부족한 선배 때문에 고생했고, 고맙다고 전하고 싶습니다.

또한 본 연구에 도움을 주신 현대 하이스코, 성우하이텍, 동의대학교, 한국과학기술원, 재료연구소 관계자 분들께도 감사드린다는 말씀을 전하고 싶습니다.

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