

## 열차용 강판의 동적인장특성

김진성<sup>\*1)</sup>·허 훈<sup>1)</sup>·이장욱<sup>2)</sup>·권태수<sup>3)</sup>

한국과학기술원 기계항공시스템공학부<sup>1)</sup>·㈜로템 기술연구소<sup>2)</sup>·철도기술연구원 철도시스템안전연구본부<sup>3)</sup>

### Dynamic tensile characteristics of the steel sheets for a train

Jin Sung Kim<sup>\*1)</sup> · Hoon Huh<sup>1)</sup> · Jang Wook Lee<sup>2)</sup> · Tae Soo Kwon<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Science Town, Daejeon, 305-701, Korea

<sup>2)</sup> R&D center, Rotem company, 462-18, Sam-Dong, Uiwang-City, Gyeonggi-Do, Korea

<sup>3)</sup> Railway System and Safety Research Department, Korea Railroad Research Institute, 360-1, Woulam-Dong, Uiwang-City, Gyeonggi-Do, Korea

**Abstract :** This paper deals with the dynamic tensile characteristics of the steel sheets for structural members of a train. Train accidents occurs rarely but lead to many casualties and economical loss. Therefore the safety of the train becomes important during the train crash. The dynamic tensile characteristics of the steel sheets are indispensable to analyze the structural crashworthiness. Current research reports the stress-strain curves, fracture elongation and strain rate sensitivities evaluated at the various strain rates especially for SUS304L-ST and SUS304L-LT steel sheets. The results include the difference in the dynamic tensile characteristics of both rolling and transverse directions. Dynamic tensile tests were performed at the strain rates ranging from 0.003/sec to 200/sec using High Speed Material Testing Machine. The materials tested in this research shows interesting behavior at the low strain rates. The strain hardening exponent decreases remarkably while the yield strength increases.

**Key words :** Stainless steel(스테인리스스틸), High speed material testing machine(고속재료시험기), Rolling direction(압연방향), Transverse direction(압연수직방향), Dynamic tensile characteristics(동적인장특성)

### 1. 서론

열차의 충돌안전도 향상에 관한 연구는 그 역사가 길지 않다. 자동차 산업의 경우 충돌사고가 빈번히 일어나며 대중의 관심이 크지만 열차의 경우 자동차의 경우만큼 사고가 자주 일어나지 않는다. 하지만 열차 사고는 많은 인적 피해

와 사회적 파급효과가 크기 때문에 열차의 충돌안전도에 관한 규제가 강화되고 있다. 미국에서는 49 CFR 238이라는 규정을 제정하여 차체의 충돌에너지 흡수 능력, 승객의 상해치, 주요 충돌부재의 설계사양 등을 규제하고 있다. 또한 유럽에서는 SAFETRAIN 프로젝트를 통하여 충돌안전도 설계기준을 제시하고 있다. 따라서 열차 충돌안전에 관한 연구 역시 필수적이다. 열차의 충돌에너지 흡수는 독립된 에너지흡수구조에서 이루어 진다.<sup>1)</sup> 독립된 에너지흡수구조의 더 이상 에너지흡수를 하지 못할 경우 객

\* 김진성, E-mail: soitgoes@kaist.ac.kr

차의 양 끝단이 붕괴되어 에너지를 흡수하여야 하며 객실의 변형은 최소화되어야 한다. 따라서 열차의 구조 부재에 대해 정확하고 신뢰성 있는 에너지흡수능을 설계하고 평가할 필요가 있다. 이를 위해서는 부재를 구성하고 있는 재료의 동적거동을 정확히 파악하여야 한다. 지금까지의 열차 충돌해석은 정적인 물성치를 적용하여 수행되어 왔으나 자동차용 강판이나 합금, 플라스틱 등에 대한 고속재료시험의 예는 수년 전부터 꾸준히 보고되고 있다.<sup>2),3),4),5),6)</sup> 본 연구에서는 열차의 구조용 부재의 재료로써 널리 쓰이는 SUS304L 계열의 강판의 동적인장특성을 평가한다. 열차의 경우도 자동차의 경우와 마찬가지로 충돌 변형 시 변형률 속도의 범위는 수백/sec이하로 추정된다. 따라서 시험 범위는 준정적~200/sec으로 총 6개의 변형률 속도에 대해 인장시험을 수행하였다. 고속인장시험의 결과로 응력-변형률 선도, 변형률속도민감도 선도, 파단연신율 선도를 도출하였다. 얻어진 결과를 바탕으로 구조부재의 충돌해석을 보다 정밀하게 수행할 수 있을 것이다.

## 2. 시편 결정 및 시험 조건

### 2.1 고속재료시험기

고속재료시험은 표준화가 이루어지지 않은 분야이며 고속재료시험기는 대형 시험기 제작 업체에서 시판 중이며 일정한 가이드라인을 제시하고 있다. 본 연구에서 사용한 고속재료시험기는 Fig. 1과 같으며 자체 제작한 유압식 시험기이다.<sup>3)</sup> 제작된 고속재료시험기는 가로 1000 mm, 세로 600 mm, 높이 2300 mm이며 크로스헤드의 높이는 단계적으로 조절이 가능하다. 크로스헤드에 지그가 고정되며 로드셀이 설치되어 하중을 측정한다. 로드셀은 피에조타입이며 최대 측정하중은 30 kN이다. 실린더의 인장 방향은 아래쪽이며 최대속도 7.8 m/sec, 최고 유압 300 kg/cm<sup>2</sup>, 최대유량 240 l/min이다. 변위는 실린더 내부의 LDT(Linear Displacement Transducer)로 측정한다.

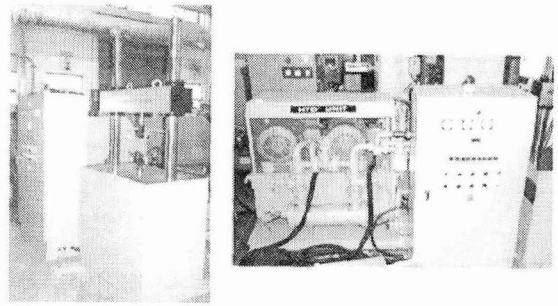


Fig. 1 High speed material testing machine

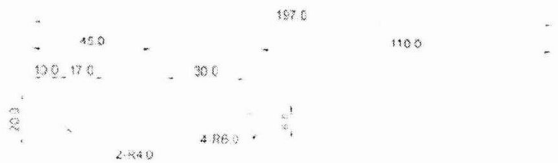


Fig. 2 Specimen dimension for the dynamic tensile tests

### 2.2 시편 결정

앞서 언급한대로 고속재료시험법은 표준화가 이루어지지 않았다. 따라서 고속재료시험을 위한 시편의 표준화 역시 미흡한 실정이다. 고속재료시험을 위한 시편은 충격하중에 의한 응력파의 영향, 관성의 영향을 고려해야 하므로 준정적 시험 시의 시편 설계보다 고려해야 할 요소가 많다. 본 연구에서 사용한 시편의 형상은 Fig. 2와 같다. 이 시편은 다양한 형상인자를 고려한 유한요소해석을 통해 결정된 시편 형상이다.<sup>3)</sup> 시편의 형상은 Fig. 2와 같이 오른쪽 그림부가 반대편 그림부보다 65 mm만큼 길게 설계되었다. 그 이유는 실린더가 일정한 속도에 도달한 후에 시편을 잡고 인장하기 때문에 가속거리가 필요하기 때문이다.

### 2.1 시험 조건

스테인리스틸인 SUS304L의 ST, LT급 2종의 강판에 대해 압연방향(Rolling direction)과 압연직각방향(Transverse direction)에 대해 고속재료시험을 수행하였다. 변형률 속도의 범위는 0.003, 0.1, 1, 10, 100, 200/sec으로 0.003/sec의 변형률 속도는 Instron 5583에서

수행하였으며 그 이상의 변형률 속도에 대해서는 Fig. 1의 고속재료시험기로 고속인장시험을 수행하였다. 변형률 속도의 범위를 위와 같이 설정한 이유는 재료의 유동응력은 일반적으로 변형률 속도의 로그값에 비례하는 것으로 알려져 있기 때문이다. 따라서 변형률 속도는 10의 배수로 증가시켰으며 200/sec에 해당하는 속도는 시험기의 최대속도에 근접한 속도이다.

### 3. 고속인장시험 결과

SUS304계열의 강판 두 종에 대해 압연방향과 압연수직방향의 시편을 제작하여 준정적 및 동적인장시험을 수행하였다. 준정적 인장시험을 수행한 결과는 Table 1에 간략히 도시하였다. 준정적 인장시험을 통해 얻는 공칭 응력-변형률 선도는 Fig. 3의 0.003/sec에 해당하는 그래프이다. 준정적 변형률 속도에서는 SUS304L-ST와 SUS304L-LT의 두 종의 강판은 변형률 경화가 큼을 알 수 있다. SUS304L-ST의 경우 압연방향의 항복응력이 611.5 MPa, 압연수직방향의 항복응력이 675.7 MPa로 압연수직방향의 항복응력이 10%가량 높은 값을 보이는 반면 최대응력은 압연방향이 886.6 MPa, 압연수직방향이 886.4 MPa로 거의 같은 값을 나타낸다. 이러한 경향은 Fig. 3의 변형률 속도에 따른 공칭 응력-변형률 선도를 통해 변형률 속도가 증가해

도 압연수직방향의 유동응력이 압연방향의 유동응력보다 큼을 알 수 있다. 이러한 결과를 보다 쉽게 확인하기 위해 Fig. 4의 변형률속도민감도 곡선을 도시하였다. 변형률속도민감도 곡선은 각 변형률에 해당하는 유동응력을 변형률 속도에 따라 도시함으로써 변형률 속도에 의한 경화량과 변형률에 의한 경화량을 도식적으로 볼 수 있는 장점이 있다. 항복점에서의 변형률 속도에 따른 항복응력은 Fig. 4의 맨 아래의 그래프와 같다. 압연방향의 경우 변형률 속도가 0.003/sec일 경우 항복응력이 611.5 MPa인 반면에 200/sec의 경우 항복응력이 804.0 MPa로 약 31.5%의 증가를 보인다. 압연수직방향의 경우는 변형률 속도가 0.003/sec의 경우 항복응

Table 1 Quasi-static material properties of SUS304L-ST and SUS304L-LT.

	Tensile Direction	Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
SUS304L-ST 1.93t	RD	611.5	886.6	39.2
	TD	675.7	886.4	39.0
SUS304L-LT 2.83t	RD	374.4	795.3	55.5
	TD	378.9	798.0	53.5

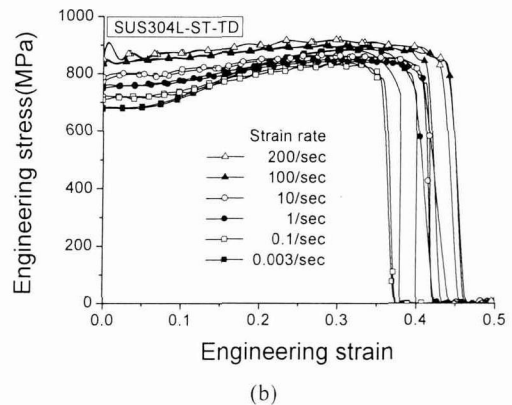
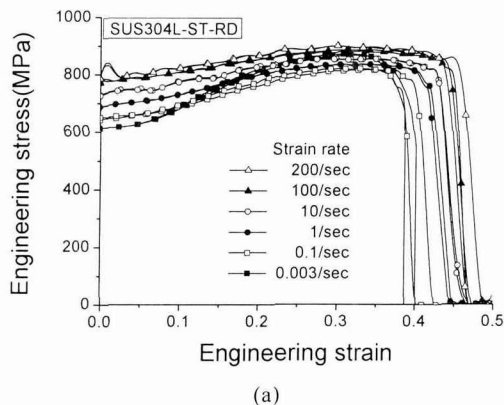


Fig. 3 Engineering stress-strain curves of SUS304L-ST at the various strain rates: (a)rolling direction; (b)transverse direction.

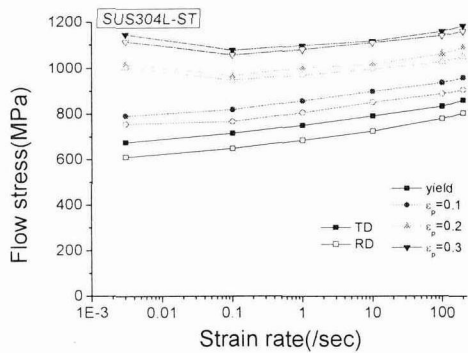


Fig. 4 Strain rate sensitivity for the rolling and transverse direction of SUS304L-ST.

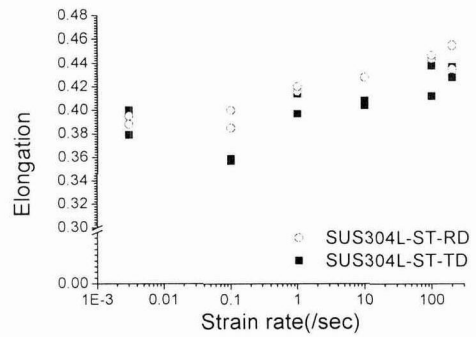
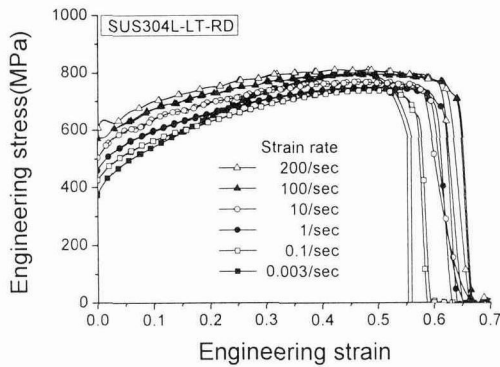
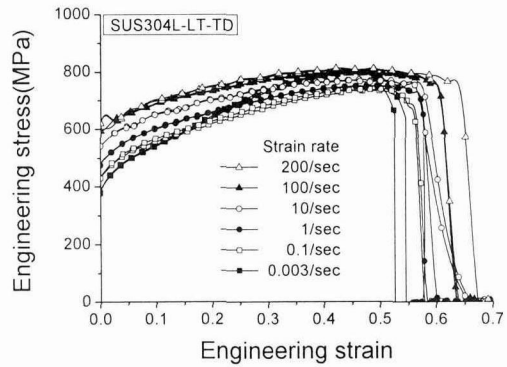


Fig. 5 Fracture elongation for the rolling and transverse direction of SUS304L-ST.



(a)



(b)

Fig. 6 Engineering stress-strain curves of SUS304L-LT at the various strain rates: (a)rolling direction; (b)transverse direction.

력이 675.7 MPa이며 200/sec의 경우 860.7 MPa로 약 27.4%의 증가를 보인다. 이러한 변형률 속도민감도를 통해 에너지흡수부채를 설계함에 있어서 재료의 동적인장특성을 반드시 고려해야 정확한 에너지흡수특성을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 항복응력의 경우 변형률 속도가 증가함에 따라 단조증가하고 있음을 확인할 수 있지만 변형률이 약 0.2일 경우의 변형률 속도민감도를 살펴보면 0.003 /sec의 유동응력이 0.1, 1/sec의 유동응력보다 낮은 결과를 보인다. 이는 변형률 속도 0.003/sec의 경우 변형률 경화 지수가 0.1/sec의 경우보다 크며 항복응력의

경우 변형률 속도 증가에 따라 단조증가하기 때문에 변형률이 약 0.1 이상이 되면 0.003/sec의 유동응력이 0.1/sec의 유동응력보다 낮아진다. SUS304L-ST의 변형률 속도에 따른 파단연신율은 Fig. 5와 같다. 준정적 인장시험 결과 파단연신율이 약 39%정도지만 200/sec의 경우 약 44%로 증가하였다. 또한 압연방향의 파단연신율이 압연수직방향보다 모든 변형률 속도에서 전반적으로 큰 값을 보인다. 변형률 속도가 증가함에 따라 파단연신율이 증가하는 이유는 변형률 속도민감도가 큰 재료의 경우 넥킹 발생부의 변형률 속도가 급격히 증가함에 따라 유동응

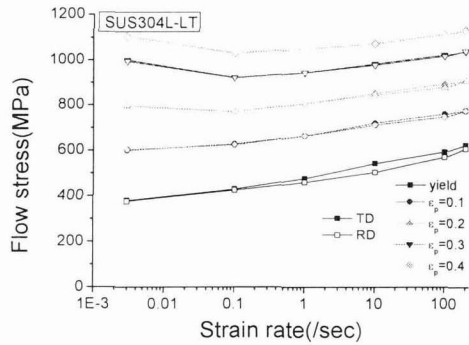


Fig. 7 Strain rate sensitivity for the rolling and transverse direction of SUS304L-LT.

력이 증가하기 때문에 넥킹부가 전파되었기 때문이다.

SUS304L-LT의 압연방향과 변형률 속도에 따른 공칭 응력-변형률 선도를 Fig. 6에 나타내었다. 이를 변형률속도민감도 곡선으로 도시하면 Fig. 7과 같다. 압연방향의 경우 변형률 속도 0.003/sec의 경우 항복응력이 374.4 MPa이며 200/sec의 경우의 항복응력은 607.5 MPa로 62.3%의 증가를 보이며 압연수직방향의 경우도 비슷한 결과를 보인다. SUS304L-ST와 같이 0.003/sec의 변형률 경화량이 상대적으로 크게 나타나면서 변형률이 약 0.2 이상이 되면 0.003/sec의 유동응력과 0.1/sec의 유동응력이 역전되는 현상이 발생한다. SUS304L-LT의 경우는 SUS304L-ST의 경우와 달리 압연방향에 따른 항복응력이나 최대응력의 차이가 2%이하이다. 따라서 압연방향과 압연수직방향의 기계적 물성의 차이는 무시할 수 있을 것으로 판단된다. SUS304L-LT의 파단연신율은 52~64% 정도로 일반적 강판과 비교하여 우수한 연신율을 가진다고 볼 수 있다. SUS304L-ST의 경우와 마찬가지로 변형률 속도가 증가함에 따라 파단연신율은 증가하며 압연방향의 파단연신율이 압연수직방향의 파단연신율보다 크다. 이는 준정적 시험을 통해 얻은 파단연신율을 기준으로 설계할 경우 실제 충돌이 발생했을 때 파단을 고려했을 때 안전한 설계를 한 것이라고 평가할 수 있는 근거가 될 수 있다.

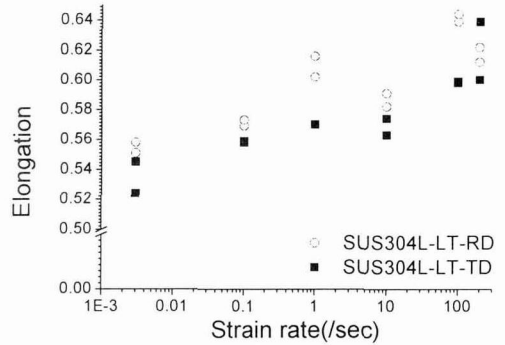


Fig. 8 Fracture elongation for the rolling and transverse direction of SUS304L-LT.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열차의 구조용 강판으로 쓰이는 SUS304L 두 종의 강판에 대한 동적인장시험을 수행하여 변형률 속도에 따른 유동응력 및 파단연신율의 변화를 정량적으로 구하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) SUS304L 두 종의 강판은 0.003/sec의 경우 변형률 경화량이 급격히 증가하나 0.1/sec 이상의 변형률 속도에서는 변형률 경화량이 감소한다.
- 2) 항복응력의 경우 0.003/sec과 200/sec의 변형률 속도를 비교해 볼 때 SUS304L-ST의 경우 27.4%, SUS304L-LT의 경우 62.3%만큼 증가한다.
- 3) SUS304L-ST의 파단연신율은 39~44%, SUS304L-LT의 파단연신율은 52~64%이며 변형률 속도가 증가함에 따라 파단연신율도 증가하는 경향을 보인다.
- 4) SUS304L-ST와 SUS304L-LT의 경우 변형률 속도민감도가 크며 변형률 경화량의 변형률 속도에 따른 변화가 급격하게 나타나므로 향후 동적 물성치를 열차의 충돌해석에 적용할 경우 준정적 물성치를 적용한 경우에 비해 정확한 하중 및 붕괴모드의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

## References

- 1) Tae-Min Cho, Tae-Soo Kwon and Hyun-Seung Jung, "A study on Light Collision Safety of Tilting Train Express", *proc. of the Korean Society for Railway*, pp. 186-191, 2004.
- 2) Hyun-Seung Jung, Tae-Soo Kwon, Jeong-Seo Koo and Tae-Min Cho, "Crush analysis of a TTX M-Car Design", *proc. of the Korean Society for Railway*, pp. 168-173, 2004.
- 3) J. H. Lim, S. B. Kim, J. S. Kim, H. Huh, J. D. Lim and S. H. Park, "High Speed Tensile Test of Steel Sheets for an Auto-body at the Intermediate Strain Rate", *Trans. of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 13, No. 2, pp. 127-134, 2005.
- 4) J. S. Kim, H. Huh, K. W. Lee, D. Y. Ha, T. J. Yeo and S. J. Park, "Evaluation of Dynamic Tensile Characteristics of Polypropylene with Temperature Variation", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 571-577, 2006.
- 5) H. J. Lee, J. H. Song and H. Huh, "Dynamic Tensile Tests of Auto-Body Steel Sheets with the Variation of Temperature", *Solid State Phenomena*, Vol. 116-117, pp. 259-262, 2006.
- 6) S.B. Kim, H. Huh, S.H. Park and J.H. Lim, "Dynamic Tensile Characteristics of TRIP-type and DP-type Sheets for an Auto-body", *Key Engineering Materials*, Vol. 340-341, pp. 255-262, 2007.