

변형률속도에 따른 고강도 강판의 이방성 변화에 관한 연구

허지항¹ · 허 훈[#] · 이창수²

Effect of Strain Rate on the Anisotropic Deformation Behavior of Advanced High Strength Steel Sheets

J. Huh, H. Huh, C. S. Lee

(Received September 2, 2011 / Revised September 9, 2011 / Accepted September 28, 2011)

Abstract

This paper investigates the effect of strain rate on the anisotropic deformation behavior of advanced high strength steel sheets. Uniaxial tensile tests were carried out on TRIP590 and DP780 steel sheets at strain rates ranging from 0.001/sec to 100/sec to determine yield stresses and r -values at various loading angles from the reference rolling direction. R -values were determined by the digital image correlation technique. Hill48 and Yld2000-2d yield functions were tested for their capability to describe the plastic deformation anisotropy of the materials. Initial yield loci were constructed using the Yld2000-2d yield function, which adequately described the anisotropic behavior of the materials. The shape of the initial yield loci was found to change with different strain rate, and the anisotropic behavior decreased with increasing strain rate.

Key Words : Anisotropy, Strain-rate, Yield Function, AHSS

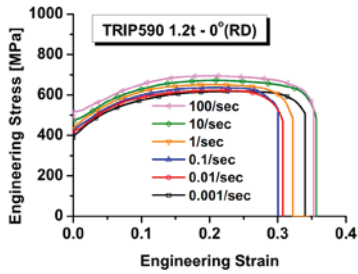
1. 서 론

박판 성형공정은 금속판재를 이용하여 복잡한 형상의 제품을 생산하는 공정으로 대량 생산에 적합하며 생산된 제품의 표면이 우수하고 강도가 높기 때문에 산업의 여러 분야에서 널리 사용된다. 박판 성형공정에서 성형성을 평가하고 그에 맞는 공정 변수를 설계하기 위하여 수치해석 기법이 널리 이용되고 있다. 압연공정으로 생산되는 박판재료는 판재의 두께방향 및 평면 내의 이방성을 지니므로 수치해석의 정확도를 향상시키기 위하여 재료의 이방성을 정확히 평가하는 것이 필수적이다. 특히 평면 내의 항복강도와 r -값의 변화는 재료의 이방성을 결정하는 중요한 인자이다.

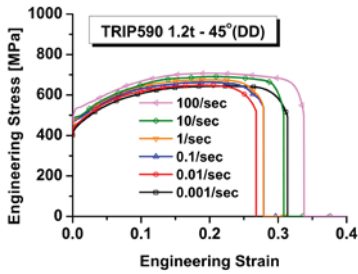
성형공정 시, 판재는 수에서 수백/sec의 높은 변형률속도를 겪는다. 현재까지의 수치해석은 변형률속도에 따른 유동응력의 변화만을 고려한다. 즉, 재료의 이방성은 변형률속도에 관계없이 일정하다고 두고 항복곡면의 크기만 변형률속도의 영향을 받는다고 가정한다. 하지만 Lee[1]와 Huh[2-3] 등이 관찰한 바 있듯이 재료의 r -값은 변형률속도에 따라 변화하며 이는 재료의 이방성이 변형률속도에 따라 달라짐을 의미한다. 따라서 수치해석의 정확도를 향상시키기 위하여 변형률속도를 고려한 이방성의 변화를 연구하고 이를 차체강판의 해석에 적용하여야 한다.

본 논문에서는 자동차 외판에 많이 쓰이는 고강도 강판인 TRIP590(1.2t)와 DP780(1.0t)에 대하여

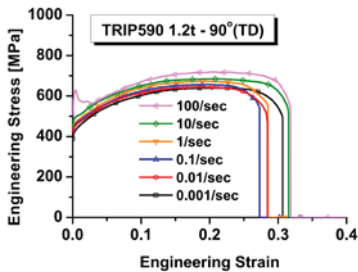
1. 한국과학기술원 기계항공시스템학부
2. 자동차부품연구원
교신저자: 한국과학기술원 기계항공시스템학부,
Email: hhuh@kaist.ac.kr



(a) 0° (RD)



(b) 45° (DD)



(c) 90° (TD)

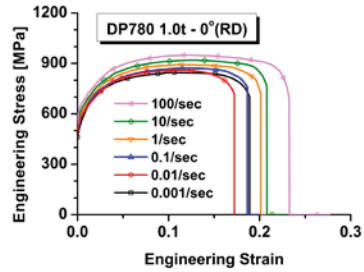
Fig. 1 Engineering stress–strain curves of TRIP590 at various strain rates

정적 및 중고속 변형률속도(0.001/sec~100/sec)에서 단축인장시험을 수행하고 디지털 이미지 프로세싱 기법을 이용한 변형률 측정 기법[2]을 사용하여 r -값을 측정하였다. 측정된 항복강도 및 r -값을 바탕으로 Hill1984[4]와 Yld2000-2d[5] 항복함수를 구성하고 적절한 항복함수를 선정하였다. 선정된 항복함수에 대하여 변형률속도에 따른 항복곡면의 변화를 관찰하였다.

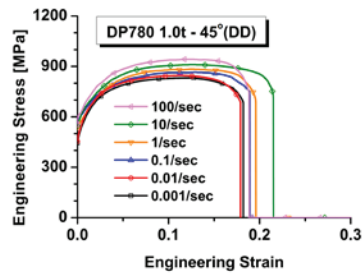
2. 변형률속도를 고려한 단축인장시험

2.1 동적 단축인장시험

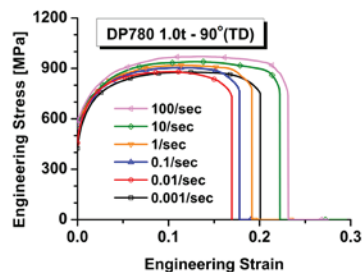
정적인장시험기(INSTRON5583) 및 고속재료시험기(HSMTM)[6,7]를 이용하여, 차체용 고강도 강



(a) 0° (RD)



(b) 45° (DD)



(c) 90° (TD)

Fig. 2 Engineering stress–strain curves of DP780 at various strain rates

판인 TRIP590(1.2t)와 DP780(1.0t)에 대하여 압연방향으로부터 0도(RD), 45도(DD), 90도(TD)방향에 대하여 단축인장시험을 실시하였다. 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도 및 항복응력은 각각 Fig. 1~2와 Table 1~2와 같다.

2.2 소성변형률비

소성변형률비(r -값)은 두께방향의 소성 진변형률에 대한 폭방향의 소성 진변형률의 비로 식 (1)과 같이 정의된다.

$$r = \frac{d\epsilon_w}{d\epsilon_t} = \frac{-d\epsilon_w}{d\epsilon_t + d\epsilon_w} \quad (1)$$

Table 1 Yield stress of TRIP590 with respect to the strain rates[MPa]

Loading Direction	Strain rate [/sec]					
	0.001	0.01	0.1	1	10	100
RD	360	392	413	433	460	491
DD	405	418	438	451	468	485
TD	392	413	424	441	464	493

Table 2 Yield stress of DP780 with respect to the strain rates [MPa]

Loading Direction	Strain rate [/sec]					
	0.001	0.01	0.1	1	10	100
RD	457	488	530	548	550	566
DD	444	472	518	535	545	573
TD	460	492	517	537	559	580

Table 3 *r*-value of TRIP590 with respect to the strain rates

Loading Direction	Strain rate [/sec]					
	0.001	0.01	0.1	1	10	100
RD	1.02	0.97	0.94	1.02	1.06	1.10
DD	0.76	0.72	0.70	0.79	0.81	0.87
TD	1.06	1.03	0.98	1.06	1.10	1.15

Table 4 *r*-value of DP780 with respect to the strain rates

Loading Direction	Strain rate [/sec]					
	0.001	0.01	0.1	1	10	100
RD	0.79	0.73	0.66	0.81	0.82	0.86
DD	0.99	0.93	0.86	1.02	1.05	1.09
TD	0.80	0.78	0.70	0.84	0.86	0.89

여기서 ϵ_l 은 길이방향, ϵ_w 는 폭방향, ϵ_t 는 두께방향 소성 진변형률이며 마지막 항은 체적일정 조건에 의하여 유도되었다. *r*-값은 재료의 성형성의 척도이며 *r*-값이 큰 재료는 디프트로잉성이 우수하다.

인장방향 및 변형률속도에 따른 소성변형률비를 측정하기 위하여 디지털 이미지 프로세싱 기법을 이용하였다[2]. 측정된 소성변형률비는 Table 3~4에 나타내었다.

3. 이방성 항복식

3.1 Hill48 이차 항복식

평면응력상태에서 Hill48 이차 항복식은 다음과 같다[4].

$$2f = (G + H)\sigma_{xx}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + (H + F)\sigma_{yy}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = 1 \quad (2)$$

여기서 G, H, F, N은 재료 이방성을 나타내는 상수이고 *r*-값과 재료상수와와의 관계는 식 (3)과 같다.

$$F = \frac{r_0}{\sigma_0^2(1+r_0)r_{90}}$$

$$G = \frac{1}{\sigma_0^2(1+r_0)} \quad (3)$$

$$H = \frac{r_0}{\sigma_0^2(1+r_0)}$$

$$N = \frac{(2r_{45}+1)(r_0+r_{90})}{2\sigma_0^2(1+r_0)}$$

0도 방향의 항복응력과 0도, 45도, 90도 방향의 *r*-값을 알면 식 (3)에 의하여 재료상수가 결정되며 식 (2)를 이용하여 Hill48 이차 항복식의 항복곡면을 구성할 수 있다.

3.2 Yld2000-2d 항복식

Barlat 등은 평면응력상태에서 다음과 같은 이방성 항복식을 제안하였다[5].

$$\phi = |X'_1 - X'_2|^M + |2X''_2 + X''_1|^M + |2X''_1 + X''_2|^M = 2\bar{\sigma}^M \quad (4)$$

여기서 M은 체심입방결정의 경우 6, 면심입방결정의 경우 8로 결정되는 재료상수이며 X'_i 과 X''_i 는 식 (5)와 같이 정의되는 두 개의 선형변환응력 텐서의 주치이다.

$$\mathbf{X}' = \mathbf{L}'\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{X}'' = \mathbf{L}''\boldsymbol{\sigma}$$

여기서

$$\begin{bmatrix} L'_{11} \\ L'_{12} \\ L'_{21} \\ L'_{22} \\ L'_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 & 0 \\ -1/3 & 0 & 0 \\ 0 & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_7 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} L''_{11} \\ L''_{12} \\ L''_{21} \\ L''_{22} \\ L''_{66} \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -2 & 2 & 8 & -2 & 0 \\ 1 & -4 & -4 & 4 & 0 \\ 4 & -4 & -4 & 1 & 0 \\ -2 & 8 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \end{bmatrix}$$

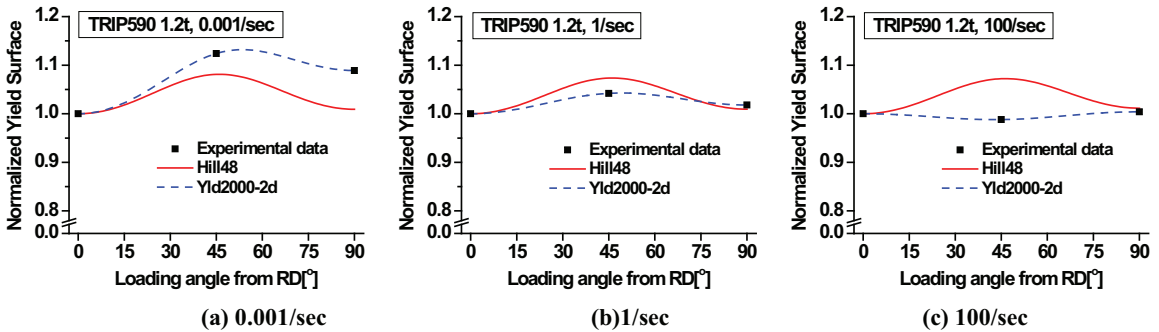


Fig. 3 Normalized yield stress with the variation of loading angle from RD (TRIP590)

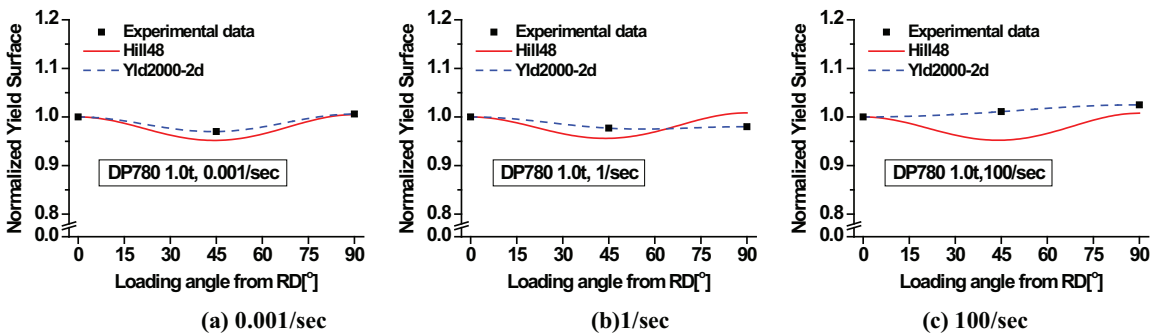


Fig. 4 Normalized yield stress with the variation of loading angle from RD (DP780)

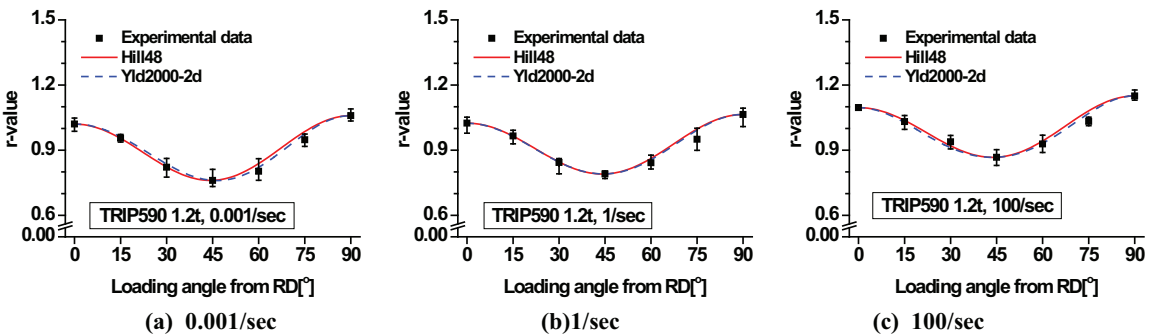


Fig. 5 *r*-value with the variation of loading angle from RD (TRIP590)

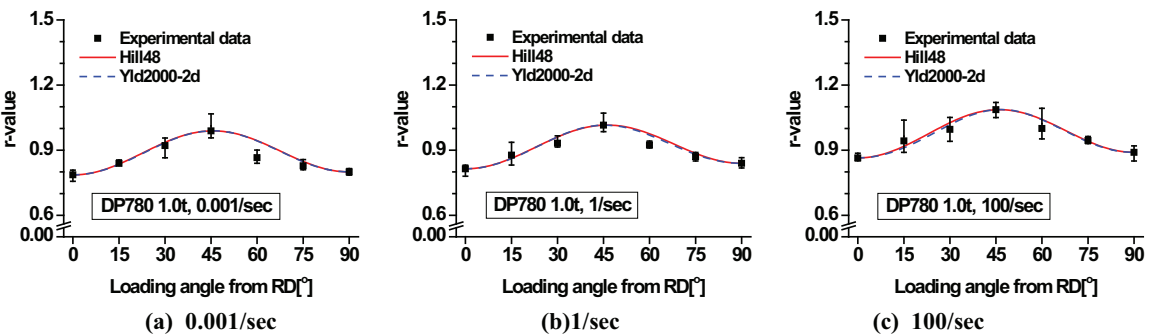


Fig. 6 *r*-value with the variation of loading angle from RD (DP780)

Table 5 Anisotropy coefficients of Yld2000-2d yield function for TRIP590

Strain rate [1/sec]	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
0.001	1.1386	0.8042	1.0545	0.9543	0.9901	1.0545	0.8873	0.7810
0.01	1.0771	0.8809	1.0311	0.9698	0.9985	1.0311	0.9183	0.9048
0.1	1.0310	0.9414	1.0115	0.9863	1.0020	1.0115	0.9204	0.9245
1	1.0273	0.9668	1.0148	0.9869	0.9982	1.0148	0.9452	0.9463
10	1.0158	0.9918	1.0131	0.9897	0.9972	1.0131	0.9660	0.9984
100	1.0087	1.0103	1.0142	0.9895	0.9963	1.0142	0.9942	1.0573

Table 6 Anisotropy coefficients of Yld2000-2d yield function for DP780

Strain rate [1/sec]	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
0.001	0.9810	0.9650	0.9815	1.0068	1.0116	0.9815	1.0232	1.0768
0.01	0.9659	0.9666	0.9781	1.0056	1.0162	0.9781	1.0180	1.0941
0.1	0.8981	1.0336	0.9493	1.0302	1.0204	0.9493	1.0008	1.0839
1	0.9374	1.0375	0.9695	1.0190	1.0115	0.9695	1.0202	1.0533
10	0.9968	0.9556	0.9921	0.9980	1.0098	0.9921	1.0139	1.0166
100	1.0216	0.9327	1.0020	0.9915	1.0063	1.0020	0.9990	0.9572

0도, 45도, 90도 방향에 대한 항복응력과 r -값, 이축항복응력이 주어지고 $C''_{12} = C''_{21}$ 의 조건을 이용하면 Yld2000-2d 항복곡면을 구성할 수 있다[8]. 본 논문에서는 이축항복응력을 실험으로부터 얻을 수 없기 때문에 이축항복응력과 압연방향의 항복응력이 같다고 가정하였다.

3.3 항복식의 평가

Table 1~4의 실험데이터를 이용하여 TRIP590과 DP780에 대하여 다양한 변형률속도에서 Hill48과 Yld2000-2d 항복식을 구성하고 방향에 따른 r -값 및 항복응력을 예측하였다. Fig. 3~4는 하중방향에 따른 항복응력의 변화를 나타낸 것이다. 항복응력은 압연방향의 항복응력으로 정규화하여 나타내었다. Hill48 항복함수는 두 재료의 이방성을 제대로 근사하지 못하고 45도, 90도 방향의 항복응력 예측에 큰 오차를 보인다. 하지만 Yld2000-2d 항복함수는 주어진 실험값을 잘 근사한다. 이는 Yld2000-2d 항복함수의 계수를 결정할 때 45도와 90도에서의 항복응력이 고려되었기 때문이다.

Fig. 5~6는 하중방향에 따른 r -값의 변화를 나타낸 것이다. 두 항복함수 모두 실험값을 잘 예측한다. 위의 평가로부터 두 재료의 이방성을 Yld2000-2d 항복함수로 근사하는 것이 가장 적절하다고 판단하였다.

4. 변형률속도에 따른 이방성의 변화

Table 5~6은 TRIP590과 DP780에 대하여 Yld2000-2d 항복함수의 계수를 나타낸 것이다. Yld2000-2d 항복함수의 계수가 모두 1이면 등방성 재료를 의미한다. 두 재료 모두 변형률속도가 증가할수록 이방성 계수가 1에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 이는 변형률속도가 증가하면 재료의 이방성이 감소하는 것을 의미한다. Fig. 7~8은 TRIP590과 DP780의 변형률속도에 따른 초기 항복곡면을 나타낸 것이다. 변형률속도의 증가에 따라 항복응력이 증가하고 소성변형률비가 변화하므로 변형률속도가 증가함에 따라 항복곡면이 확장됨과 더불어 항복곡면의 형상이 변화하는 것을 관찰할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 차체용 강관으로 쓰이고 있는 TRIP590과 DP780의 정적 및 동적 단축인장시험을 통하여 변형률속도와 인장방향에 따른 항복응력 및 소성변형률비를 얻었다. 이를 바탕으로 Hill48과 Yld2000-2d 항복함수를 평가하고 Yld2000-2d 항복함수가 두 재료의 이방성을 잘 근사할 수 있음을 확인하였다. 변형률속도에 따른 재료의 이방성 변

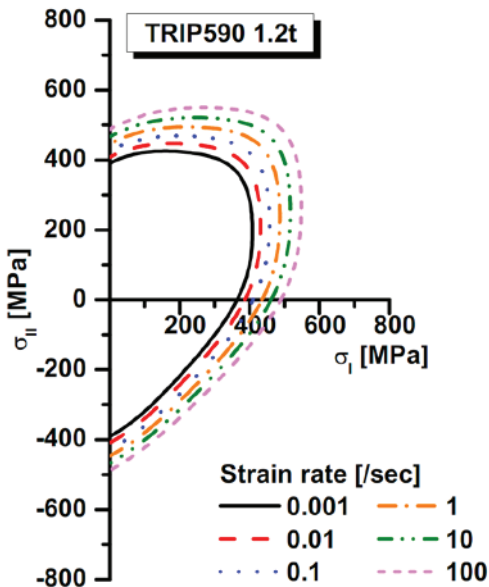


Fig. 7 Yld2000-2d Loci of TRIP590 at various strain rates

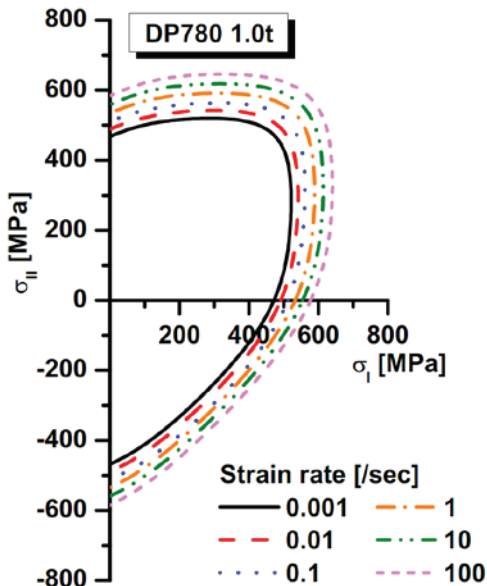


Fig. 8 Yld2000-2d Loci of DP780 at various strain rates

화를 관찰한 결과 변형률속도가 증가하면 재료의 이방성이 감소하는 것을 관찰하였으며 변형률속도가 증가함에 따라 항복곡면이 확장됨과 동시에 형상이 변화하는 것을 확인하였다. 이와 같이 변형률속도에 따라 재료의 이방성이 변화하므로 해석과정에서 변형률속도에 따른 이방성의 변화를 고려하여야 해석의 정확도를 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] C. S. Lee, G. H. Bae, S. B. Kim, H. Huh, 2010, Construction of Modified Yield Loci with Respect to the Strain Rates using Hill48 Quadratic Yield Function, *Trans. Kor. Soc. Automot. Eng.*, Vol. 18, No. 2, pp. 56~60.
- [2] J. Huh, Y. K. Kim, H. O. Lee, K. S. Kim, H. Huh, 2010, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*(ed. Y. S Lee), Kor. Soc. Tech. Plast., Jeju, Korea, pp. 127~130.
- [3] H. Huh, J. Huh, C. S. Lee, 2011, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*(ed. Y. S. Kim), Kor. Soc. Tech. Plast., Changwon, Korea, pp. 27~32.
- [4] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
- [5] F. Barlat et al., 2003, Plane Stress Yield Function for Aluminum Alloy Sheets-Part 1: Theory, *Int. J. Plast.*, Vol. 19, No. 9, pp. 1297~1319.
- [6] H. Huh, S. B. Kim, J. H. Song, J. H. Lim, 2008, Dynamic Tensile Characteristics of TRIP-type and DP-type Steel Sheets for an Auto-Body, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 50, No. 5, pp. 918~931.
- [7] H. Huh, J. H. Lim, S. H. Park, 2009, High Speed Tensile Test of Steel Sheets for the Stress-strain Curve at the Intermediate Strain Rate, *Int. J. Automot. Technol.*, Vol. 10, No. 2, pp. 195~204.
- [8] J. Yoon et al., 2004, Plane Stress yield Function for Aluminum Alloy Sheets-Part II: FE Formulation and its Implementation, *Int. J. Plast.*, Vol. 20, No. 3, pp. 495~522.