

Hill 48 이차 항복식을 이용한 변형률 속도에 따른 항복곡면 구성

이창수[†] · 배기현* · 김석봉* · 허 훈*

Construction of Yield Loci with respect to the Strain Rates using Hill 48 Quadratic Yield Function

C. S. Lee, G. H. Bae, S. B. Kim, H. Huh

Key Words : Hill 48 quadratic yield function(Hill 48 이차 항복식), Strain rate(변형률 속도), Convex combination(볼록 조합)

1. 서 론

금속판재의 소성 이방성을 묘사하기 위하여 다양한 형태의 항복식이 제안되었다. 그 중에서도 Hill 48 이차 항복식은 기본 가정이 간단하고, 적은 수의 재료상수를 사용하지만 판재의 이방성을 비교적 정확히 묘사하므로, 실제 공정에서 폭넓게 이용되고 있다. 성형공정 시에 판재는 다양한 변형률 속도를 겪으므로 변형률 속도에 따른 소성이방성에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 Hill 48 이차 항복식에 사용되는 계수를 결정하기 위하여, 압연방향(rolling direction; RD)과 압연수직방향(transverse direction; TD)으로 변형률 속도에 따른 DP590 재료의 단축인장시험이 수행되었다. 실험결과를 바탕으로 평면응력상태에서 변형률 속도에 따른 Hill 48 이차 항복식을 구성하고, 이방성의 근사 정밀도를 정량적으로 평가하였다. 압연방향 및 압연수직방향에서 이방성을 정확히 근사하기 위하여 볼록 조합을 도입하여 기존의 Hill 48 이차 항복식을 수정하였다.

2. 변형률 속도를 고려한 단축인장시험

정적인장시험기(INSTRON5583) 및 고속재료시험기를 이용하여, 차체용 고강도 강판인 DP590(1.2t)의 압연방향 및 압연수직방향으로 인장시험을 실

시하였다.

재료의 이방성 정도를 거시적으로 나타내는 방법으로 소성변형률비를 사용한다. 소성변형률비는 두께방향의 진소성변형률(true plastic strain)에 대한 폭방향의 진소성변형률의 비로 식(1)과 같이 정의한다.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{-\varepsilon_w}{(\varepsilon_l + \varepsilon_w)} \quad (1)$$

여기서, ε_w , ε_t , ε_l 는 각각 폭방향, 두께방향 및 길이방향으로의 변형률이다.

인장시험의 표점부에 지름 2.54 mm 크기의 그리드를 에칭하였다. 시험의 표점부가 길이방향으로 14%의 변형률로 변형할 때까지 각 하중방향에 대해서 변형률 분포를 측정하였다. 시험의 표점부 변형률은 고속 카메라, Phantom V. 9.0 을 사용하여 100 fps 의 샘플링 속도로 측정되었다.

실험으로 얻어진 변형률 속도에 따른 항복응력 및 소성변형률비는 각각 Table 1 에 나타내었다.

3. Hill 48 이차 항복식

3.1 Hill 48 이차 항복식

평면응력상태에서 응력텐서의 주방향이 이방성의 주축과 일치한다고 가정하면, Hill 48 이차 항복식은 다음과 같이 두 가지 식의 형태로 표현된다.

$$\sigma_I^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_I \sigma_{II} + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{II}^2 = \sigma_0^2 \quad (2)$$

$$\sigma_I^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_I \sigma_{II} + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{II}^2 = \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{90}^2 \quad (3)$$

[†] 한국과학기술원 기계항공시스템학부

E-mail : changsl@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3262 FAX : (042)350-3210

* 한국과학기술원 기계항공시스템학부

Table 1 Yield stress[Unit: MPa] and r-value of DP590 with respect to the strain rates at the rolling and transverse direction

	0.001/s	0.01/s	0.1/s	1/s	10/s	100/s
σ_0	380	398	412	414	441	474
r_0	0.822	0.782	0.760	0.847	0.851	0.841
σ_{90}	402	407	421	432	456	482
r_{90}	1.083	1.039	0.875	0.890	0.949	1.058

Table 2 Yield stress from Hill 48 quadratic yield function with experimental data of r_0 , r_{90} , σ_0 and relative error

Strain rate [/sec]	Yield stress [MPa]	Relative Error [%]
	σ_{90}	$Err_{.90}$
0.001	408	+1.6
0.01	429	+5.4
0.1	428	+1.6
1	420	-2.9
10	454	-0.5
100	503	+4.3

Hill 48 이차 항복식에서 얻어진 항복응력과 상대 오차를 Table 2 와 Table 3 에 나타내었다. 식(4)와 식(5)를 이용하여 구성한 항복곡선에서 각각의 실험값이 적용되지 않은 방향으로 최대 5.4%의 오차가 발생함을 알 수 있다.

3.2 Hill 48 이차 항복식의 수정

볼록 조합을 이용하여 식(2)과 식(3)를 다음과 같이 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sigma_I^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_I\sigma_{II} + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_{II}^2 \\ & = \alpha\sigma_0^2 + (1-\alpha) \cdot \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_{90}^2, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

수정된 항복식은 압연방향과 압연수직방향에서 소성변형률비와 항복응력을 사용한다. 그러나 수정된 항복식은 기존의 실험결과를 사용하여 구성되므로 추가적인 실험은 필요하지 않다.

양방향 모두에서 실험값과 일치할 수 있도록 α 는 σ_I 과 σ_{II} 의 함수로써 식(5)과 같이 정의하였다.

$$\alpha = \frac{\sigma_I^2}{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2} \quad (5)$$

최종적으로 식(5)을 식(4)에 대입하여 Hill 48 이차 항복식을 수정할 수 있다.

Table 3 Yield stress from Hill 48 quadratic yield function with experimental data of r_0 , r_{90} , σ_{90} and relative error

Strain rate [/sec]	Yield stress [MPa]	Relative Error [%]
	σ_0	Err_0
0.001	374	-1.6
0.01	378	-5.1
0.1	405	-1.6
1	426	+3.0
10	433	-1.8
100	454	-4.2

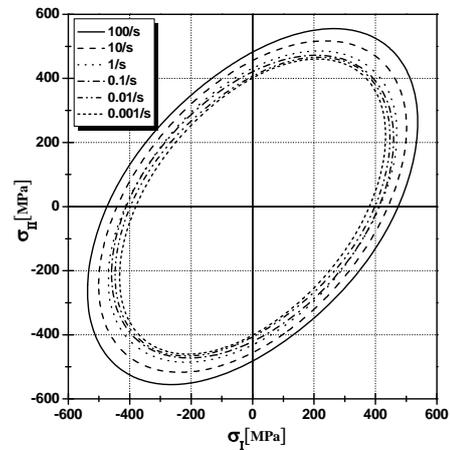


Fig. 1 Initial yield locus of DP590 using modified Hill 48 quadratic yield function with convex combination

Fig. 1 에 수정된 항복식을 이용한 항복곡면을 나타내었다. 볼록 조합을 이용하여 압연방향 및 압연수직방향에서 정확히 실험값을 반영하였으므로 수정된 항복식에서 얻어진 항복응력은 실험값과 정확히 일치한다.

4. 결론

본 논문에서는 차체용 강관으로 쓰이고 있는 DP590 의 정적 및 동적 단축인장시험을 통하여 변형률 속도와 인장방향에 따른 항복응력 및 소성변형률비를 얻었다. 이를 바탕으로 기존의 Hill 48 이차 항복곡선을 구성하여, 변형률 속도에 따른 항복곡선의 변화를 관찰하였다. 또한 기존 Hill 48 이차 항복식에서 각각의 실험값이 적용되지 않은 방향으로의 항복응력이 실험값과 오차가 발생함을 알 수 있었다. 이를 개선하기 위해 볼록 조합을 이용하여 기존의 Hill 48 이차 항복식을 수정하였다. 수정된 항복식은 소성이방성을 기존의 Hill 48 이차 항복식과 비교하여 더욱 정확하게 근사하므로 판재 성형 시에 효율적으로 활용할 수 있다.