

변형률속도를 고려한 DP590의 성형한계도

김 석 봉¹⁾ · 안 광 현¹⁾ · 하 지 웅¹⁾ · 이 창 수¹⁾ · 허 훈^{*1)} · 복 현 호²⁾ · 문 만 빈²⁾

KAIST 기계항공시스템학부¹⁾ · 현대하이스코 기술연구소²⁾

Forming Limit Diagram of DP590 considering the Strain Rate

Seokbong Kim¹⁾ · Kwanghyun Ahn¹⁾ · Jiwoong Ha¹⁾ · Changsoo Lee¹⁾ · Hoon Huh^{*1)} · Hyunho Bok²⁾ · Manbeen Moon²⁾

¹⁾School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering, KAIST, Daeduck Science Town, Daejeon 305-701, Korea

²⁾Technical Research Center, Hyundai Hysco, 313 Donggok-ri, Songsan-myeon, Dangjin-gun, Chungnam 343-831, Korea

(Received 10 June 2009 / Accepted 28 August 2009)

Abstract : This paper deals with the formability of DP590 steel considering the strain rate. The strain hardening coefficient, elongation and r-value were obtained from the static and dynamic tensile test. As strain rate increases from static to 100/s, the strain hardening coefficient and the uniform elongation decrease and the elongation at fracture and r-value decrease to 0.1/s and increase again to 100/s. The high speed forming limit tests with hemi-spherical punch were carried out using the high speed crash testing machine and high speed forming jig. The high speed forming limit of DP590(order of 10²/s) decreases compared to the static forming limit(order of 10⁻³/s) and the forming limit band in high speed forming test is narrower than that in the static forming test. This tendency may be due to the development of brittleness with increase of stain rate.

Key words : Forming limit diagram(성형한계도), Sheet metal forming process(박판성형공정), Strain rate(변형률 속도), r-value(r-값), Dual phase steels(DP 강)

1. 서 론

성형한계도(forming limit diagram; FLD)는 박판성형 시 성형의 성공여부를 판단할 수 있게 해주는 중요한 기준을 제시해 준다. 성형한계도란 파단을 유발하는 판면상의 임계 최대 주변형률 및 최소 주변형률의 값을 최대 및 최소 주변형률 평면상에 도시한 것이다. Keeler와 Backofen¹⁾이 1963년에 성형한계도를 실험적으로 측정하여 사용하기 시작하면서 성형성 평가시험의 효율성을 향상시켰다. 이축인장하에서 판재의 파단을 연구하면서 성형한계도의 존재를 증명하였으며 이축도가 증가할수록 국부파단

이 일어나는 한계 주변형률의 크기가 커진다는 사실도 발견하였다. 원형격자해석법과 함께 성형한계선의 개념이 Keeler에 의하여 도입되면서부터 성형성 평가기술이 본격적으로 발전하기 시작하였으며 여러 가지 컵 성형 시험과 인장시험을 통하여 FLD를 이축인장영역에서 단순인장영역까지 확장하였다. Raghavan 등²⁾은 표준 FLC를 이용하여 재료별로 축적된 데이터로부터 간단히 FLD를 도출하는 방법을 제안하였다.

지금까지의 박판금속의 성형속도에 따른 성형성 평가와 관련된 연구를 살펴보면 먼저 재료의 변형률속도 민감도 정도에 따른 성형성을 고찰한 경우에 변형률경화 및 항복응력 등의 다른 물성은 고정

*Corresponding author, E-mail: hhu@kaist.ac.kr

한 후 재료의 성형성을 비교하였다.³⁾ 즉, 한가지 재료에 대하여 변형률속도를 달리하여 성형성의 영향을 파악하지 않고 변형률속도에 대하여 민감한 재료와 그렇지 않은 재료에 대한 차이를 주로 고려하였다. 하나의 재료에 대하여 변형률속도 영향을 고찰한 연구들의 경우, 온도조건에 따라 성형성이 크게 달라지는 재료인 알루미늄-마그네슘 합금에 대한 연구가 대부분이다.⁴⁾ 따라서 대부분의 차체를 구성하는 부재인 강재에 대한 변형률속도에 따른 성형성 연구는 거의 없는 상태이며 실제 차체부재의 성형공정상의 성형성을 평가하기 위해서는 상온조건에 대하여 속도 및 강종 별로 체계적으로 성형성을 고찰할 필요가 있다.

본 연구에서는 변형률속도를 고려한 DP590의 단축인장시험을 통하여 동적 인장특성 및 성형성을 평가한다. 정적 및 고속 성형한계도를 얻기 위하여 UTM 및 고속충돌시험기를 사용하여 편치-장출성형 시험을 수행한다. 이를 통하여 변형률속도가 박판의 성형성에 미치는 영향을 고찰한다.

2. 동적 인장시험을 통한 성형성 평가

DP590(1.2t)에 대하여 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100/s의 변형률속도에서 정적 및 고속재료시험기를 사용하여 박판의 인장시험을 수행하였다.⁵⁾ 하중방향은 압연방향(RD), 압연에서 45°(DD) 및 90°(TD) 방향이다. RD에서의 성형성평가 항목은 Fig. 1~3와 같다. 가공경화지수 및 균일연신율의 단조감소는 DP590의 성형성이 변형률속도 증가에 따라 점차 감소함을 의미한다. 파단연신율은 0.1, 1/s 까지 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 정적 및 동적 인장 시험을 수행하여 변형률속도에 대한 DP590의 r-값을 측정하였다. 본 연구에서는 동적 인장 시에 표점부의 폭 및 길이방향 변형률을 동시에 측정하여야 하므로 고속카메라를 사용하여 표점부 내의 그리드 변형을 측정하였다. 시편의 인장에 따른 r-값은 변형률에 따라 선형으로 근사 됨을 확인하였다. r-값은 0.1/s까지 감소하다 다시 증가하는 경향을 보이거나 정적에 비하여 동적 인장시 성형성이 크게 향상되지는 않는다. 결국 가공경화지수 및 연신율의 경향이 일치하지 않으며 단축인장시험에서 하나의 물

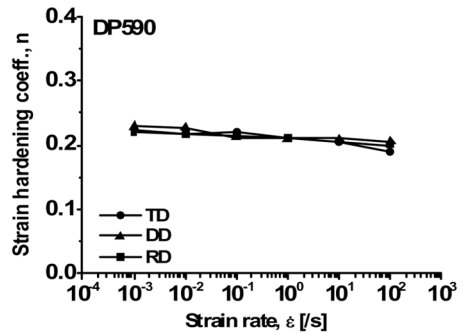


Fig. 1 Strain hardening coeff. of DP590 at various strain rates

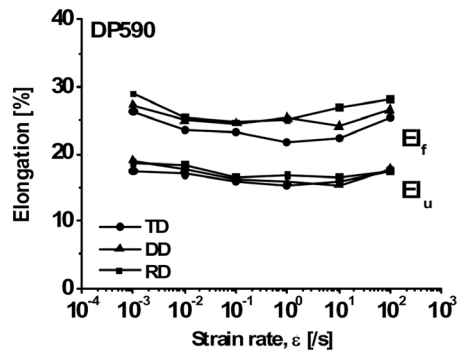


Fig. 2 Elongation of DP590 at various strain rates

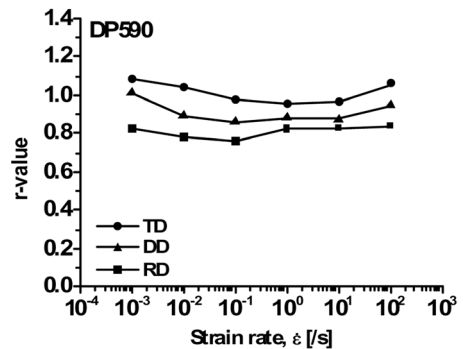


Fig. 3 r-value of DP590 at various strain rates

성으로 DP590의 성형성을 평가하기 어렵다.

3. 고속 성형한계도

3.1 시험조건 및 장비

DP590의 정적 및 고속 조건에서 성형성을 평가하기 위하여 20 mm/min에서 10 m/s의 성형속도에서 직경 100 mm의 반구형 편치를 이용한 장출시험을 수행하였다. 시편의 형상은 폭 20, 40, 60, 80, 100 mm

의 호(arc) 형과 한 변이 200 mm인 정사각형이다.⁶⁾ RD로 강판에서 채취되었으며 성형한계도 측정을 위하여 직경 5 mm의 원형 그리드를 에칭하였다. 성형한계도의 인장-압축영역을 얻기 위한 시험에서는 테프론(teflon)과 플라스틱신(plasticine)을 사용하여 윤활조건을 동일하게 사용하였으며 시편 폭만 20 mm에서 100 mm로 달리하였다. 성형한계도의 중앙 및 인장-인장 영역에서는 정사각형 시편을 이용하여 마찰조건을 달리하였다. 이때 무윤활(dry), 테프론(T), 테프론+바세린(T+V), 테프론+플라스틱신(T+P) 순으로 마찰계수를 감소시켜 등이축에 가까운 변형을 얻었다.

정적 성형한계시험은 블랭크홀더 프레임에 장착한 UTM을 사용하였으며 고속성형한계시험은 고속성형지그가 장착된 고속충돌시험기를 사용하였다. 고속성형지그는 Fig. 4와 같으며 다이, 홀더, 펀치부로 구성된다. 고속충돌시험기의 대차가 목표속도로 발사되어 펀치부헤드와 충돌하게 되고 대차는 펀치부와 함께 고속으로 이동하여 시편을 변형시키게 된다. 정적 성형한계 시험에서 얻은 각 시편에서의 한계둔 높이를 시편의 파단시점이라 가정하고 다양한 두께의 우레탄 스톱퍼를 사용하여 펀치의 스트로크를 조절하였다.

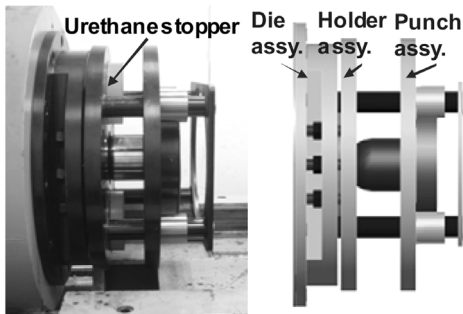


Fig. 4 High speed forming jig for forming limit test

3.2 정적 및 고속성형한계 평가

정적 성형한계 시험의 성형속도는 20 mm/min이며 블랭크홀더 프레임에 장착한 UTM을 사용하였다. 일반적으로 차체용 부재의 박판 성형공정 시 부재의 크기 및 생산성을 고려하여 6 m/s 이하의 속도로 성형이 수행된다. 이때 부재에 발생하는 변형률

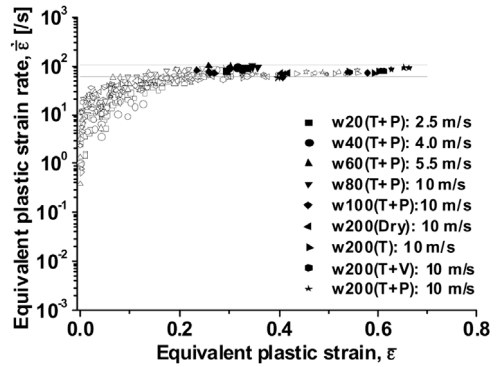


Fig. 5 Strain rate as a function of the effective plastic strain in course of the punch-stretch test (F. E. result)

속도는 국부적으로 차이를 보이나 일반적으로 수에서 수백/s의 변형률속도 분포를 보인다. 이 변형률속도 영역에서 강판의 성형성이 증가 또는 감소하는 경향을 알아보는 것이 본 연구의 목적이므로 이를 고려하여 성형속도를 결정하였다. LS-DYNA 3D v.970을 사용하여 고속펀치성형을 유한요소기법으로 해석하였다. 각 시편에 대한 동적 성형한계 시험에서 얻은 파단시점과 동일한 위치의 요소(element)에서의 변형률속도 분포는 Fig. 5와 같다. 시편에 따른 성형속도가 2.5 m/s 에서 10 m/s 일 때 변형률속도 범위는 65/s 에서 102/s 로 약 100/s에 수렴한다.

해석을 통하여 결정된 성형속도 범위에서 시험을 수행하였으며 네킹과 파괴가 일어난 부분의 변형된 타원 격자를 Mylar 필름으로 측정하여 최대 주변형률과 최소 주변형률을 결정하였다. 측정된 격자는 Success, Neck, Fracture로 분류되며 측정좌표들은 시편의 폭과 윤활방법에 따라 Fig. 6-8과 같이 성형한계도를 작성하였다. Fracture 및 Neck이 발생한 격자를 기준으로 각각 상계, 하계 성형한계선을 작성할 수 있다. 상계성형한계선 상부는 항상 파단이 발생하며 하계성형한계선 하부는 항상 안전한 영역임을 의미한다. 정적과 고속에서의 성형한계도를 비교하면 고속성형한계가 정적성형한계에 비하여 낮다. DP590의 경우 정적으로 성형을 진행하였을 때 성형성이 향상되며 강재의 고속 성형 시 파단이 발생할 확률이 더 높아짐을 의미한다. 단순인장영역에서 고속성형한계가 감소하는 경향은 정적 및 고속인장시험을 통하여 얻은 파단연신을 경향과 유사

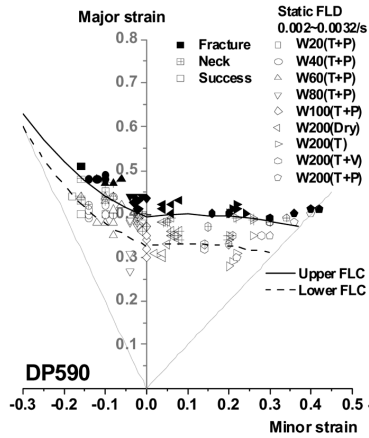


Fig. 6 Static FLD of DP590

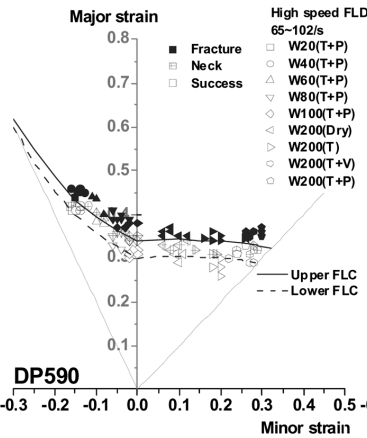


Fig. 7 High speed FLD of DP590

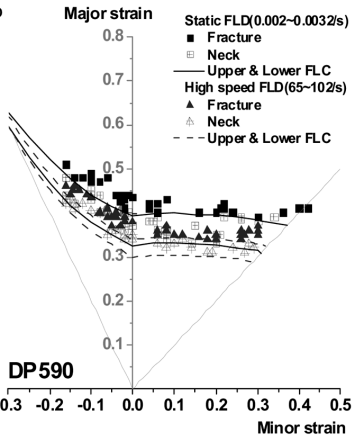


Fig. 8 Comparison of Static and high speed FLD of DP590

하며 주변형률이 단순인장영역으로 갈수록 단축인장시험과 유사해지기 때문인 것으로 판단된다. 이 축인장영역에서는 과단연신을 영향 뿐만 아니라 시편 두께방향으로의 전단과단이 고속성형 시 더 쉽게 발생하여 성형성이 더 감소하는 것으로 보인다.

4. 결론

DP590의 인장시험을 통하여 동적물성 및 r값의 변화를 고찰하였고, 고속성형한계시험과 정적성형한계시험 결과와 비교하여 변형률속도 증가에 따른 DP590의 성형성을 평가하였다.

변형률속도가 증가함에 따라 가공경화지수는 감소하며 과단연신율은 0.1/s까지 감소하였다가 다시 증가한다. r값은 변형률속도에 대한 차이가 거의 없다.

DP590의 정적 및 고속성형한계도를 작성하였으며 이때 고속성형한계는 정적성형한계에 비하여 낮게 측정되었다.

References

- 1) S. P. Keeler and W. A. Backofen, "Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches," Transaction of ASME, J. of En-

- gineering for Industry, Vol.56, pp.25-48, 1963.
- 2) K. S. Raghavan, R. C. Van Kuren and H. Darlington, "Recent Progress in the Development of Forming Limit Curves for Automotive Sheet Steels," SAE 920437, pp.87-104, 1992.
- 3) J. W. Hutchinson and K. W. Neale, "Strain-rate Sensitivity on Necking under Uniaxial Tension," Acta Metallurgica, Vol.25, pp.839-846, 1977.
- 4) T. Naka, G. Torikai, R. Hino and F. Yoshida, "The effect of temperature and forming speed on the Forming Limit Diagram for Type 5083 Aluminum-magnesium Alloy Sheet," Journal of Materials Processing Technology, Vol.113, pp. 648-653, 2001.
- 5) H. Huh, J. H. Lim and S. H. Park, "High Speed Tensile Test of Steel Sheets for the Stress-strain Curve at the Intermediate Strain Rate," Int. J. Automotive Technology, Vol.10, No.2, pp.195-204, 2009.
- 6) H. Huh, C. H. Lee and J. W. Chung, "Identification of Forming Limits of Sheet Metals for Automobile Parts by Asymmetric Deep-drawing Experiments," Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol.7, No.1, pp.81-93, 1998.