[논문] 한국소성가공학회지, 제 30 권 제 2 호, 2021
Transactions of Materials Processing, Vol.30, No.2, 2021
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2021.30.2.74

구멍 파단면 상태와 구멍확장률 간의 비선형 상관관계 분석

정병석[1] · 조우진[1] · 박시욱[2] · 정진욱[1] · 나현택[3] · 한흥남[4,#]

Non-linear Correlation Between Hole Edge Condition and Hole Expansion Ratio

B.-S. Jeong, W. Cho, S. Park, J. Jung, H. Na, H. N. Han
(Received March 25, 2021 / Revised March 30, 2021 / Accepted March 30, 2021)

Abstract

Stretch-flangeability, which is the ability of sheet steels to be deformed into complex shapes, is a critical formability property in automobile body parts. In this study, the center-hole for hole expansion test, which is normally used to evaluate the stretch-flangeability of sheet steels, was prepared by both punching and electrical discharge machining (EDM) methods. Hole expansion ratio (HER) of punched hole was far lower than the HER of EDM drilled hole because of damage/crack in hole-edge due to punching process. The effect of hole-edge condition on HER was quantified by mechanical, fractographic and geometric factors. Based on these factors, the empirical equation used to determine HER for various sheet steels was derived using non-linear regression.

Keywords : Stretch-Flangeability, Hole Expansion Ratio, Non-Linear Correlation, Sheet Metal Forming

1. 서 론

자동차 산업계에서는 자동차 내외판 및 구조재료 강판류의 고강도화를 통해 차체를 경량화하고 연비 향상과 탄소저감을 목표로 수많은 연구를 진행해왔다. 최근 590 MPa 급 이상(dual phase, DP)강부터 980 MPa 급 복합상(complex phase, CP)강, 심지어는 1 GPa 을 넘어서는 TRIP(transformation induced plasticity)강, TWIP(twinning induced plasticity)강까지 초고강도강(advanced-high-strength steel, AHSS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5]. 강판을 차체에 적용하기 위해서는 고강도와 더불어 성형성이 확보되어야 하는데, 장출성, 플랜지성, 굽힘성 등의 여러 성형특성을 동시에 확보하는 것이 매우 중요하다.

균일 연신을 넘어 극한 변형의 수용 수준을 나타내는 성형특성을 신장플랜지성(stretch-flangeability)이라 한다. 일반적으로 고강도강에서는 이 신장플랜지성이 다른 연신특성에 비해 상당히 떨어진다. 보통강판의 고강도화는 미세조직을 페라이트와 같은 연성기지(soft phase matrix)와 베이나이트, 마르텐사이트와 같은 강한 상(hard phase)을 복합적으로 구성함으로써 가능해지는데[3,5], 파괴특성과 관계된 신장플랜지성의 경우 상간 경도차로 인해 계면에서 기공이 발생하기 용이해지면서 신장플랜지성이 열위해지는 것으로 알려져 있다[6,7]. TWIP 강의 경우, 오스테나이트의 단상으로 구성되었음에도 초고강도강판 중 신장플랜지성이 가장 낮은데, 이는 TWIP 강의 높은 가공경화지수와 음의 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity, SRS)와 관계가 있다고 알려져있다[8].

1. 서울대학교 재료공학부, 학생
2. 삼성전자 반도체연구소, 연구원
3. 포스코 기술연구소, 연구원
4. 서울대학교 재료공학부, 교수
Corresponding Author : Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, E-mail:hnhan@snu.ac.kr
ORCID : 0000-0001-5271-9023

신장플랜지성을 측정하는 대표적인 방법이 바로 구멍확장(hole expansion) 기법이다. 이는 강판 중앙부에 구멍을 타발한 뒤 다양한 형상의 펀치를 상승시켜 구멍의 플랜지를 확장시켜 변형 한계를 측정하는 방식으로 진행된다[9]. 이때 구멍을 타발하는 방법에 따라 신장플랜지성이 상당한 영향을 받게 되는데, 이는 타발 시 플랜지 부근에 가공경화 정도가 다양하고 플랜지 단부의 표면이 거칠어져 파단시작점(fracture initiation site) 역할을 할 수 있기 때문이다[10]. 따라서 강판의 미세조직적 측면 뿐만 아니라 타발 시 구멍확장률(hole expansion ratio, HER)에 영향을 줄 수 있는 요인들을 파악하여 구멍확장성을 확보하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 단상강부터 복합상, 그리고 여러조성을 가지는 TWIP강에 대한 구멍확장률(hole expansion ratio)을 실험적으로 측정하였다. 또한 타발의 영향을 분석하기 위해 방전가공과 펀치가공을 통해 구멍을 제작하였고, 타발로 인한 플랜지의 상태가 구멍확장률에 어떤 영향을 주는지에 대해 고찰하였다. 최종적으로 구멍확장률에 영향을 줄 수 있는 모든 인자를 고려하여 구멍확장률을 통계적으로 예측할 수 있는 회귀모형을 구성해보았다.

2. 실험방법

2.1 소재 정보 및 일축 인장 실험

본 연구는 Hyper Burring 이라 불리는 페라이트 단상강(HB), 페라이트-베이나이트강(Ferrite-Bainite, FB), 복합조직강(CP)과 15%, 45% 냉간 압연을 진행하였거나 추가적인 원소가 첨가된(-Al,-V, -Al-V) 고망간 TWIP 강(high Mn TWIP steel, HMnS)을 대상으로 연구를 진행하였다. ASTEM E8 standard 규정 하에 시편을 서브사이즈로 제작하여 시험을 진행하였으며, 인장시험의 방향은 압연방향(RD)에 평행하게 수행되었다. 강재의 종류별 인장 물성과 기본 미세조직 정보를 Table 1 에 정리하였다.

2.2 구멍확장시험 (hole expansion test)

구멍확장시험은 ISO/TS 16630 (Metallic materials-Method of hole expanding) 규격 하에서 진행되었다. 먼저 구멍은 방전(electrical discharge machining, EDM)가공과 펀칭가공으로 제작되었다. 펀칭가공에서 펀칭기와 다이(die) 간 반지름의 차이를 두께로 나눈 개념인 클리어런스를 모두 16%으로 통일하여 실험을 진행하였다. 이후 구멍확장은 타발 시 발생하는 버어(burr) 발생부를 위로 향하도록 거치한 뒤 R25 mm의 원추형 펀치를 상승시키면서 진행되었다. 이때 구멍확장률은 아래의 식과 같이 초기구멍 직경(D_0)과 최종 구멍 직경(D_f)의 차이를 활용하여 아래와 같은 식으로 평가하였다.

$$HER = (D_0 - D_f) / D_0 \times 100(\%) \quad (1)$$

Table 1 Tensile properties, average grain size and phase of the investigated materials

Materials	YS(MPa)	UTS(MPa)	U.EL(%)	P.EL(%)	T.EL(%)	Average grain size(μm)	Phase
HB	738	789	11.5	11.5	23.0	4.64	α
FB	762	834	8.4	9.5	17.9	4.03	α+B
CP	1026	1134	5.5	9.3	14.8	5.8	α+B
HMnS	556	976	42.6	4.6	47.2	4.34	γ
CR HMnS 15%	923	1161	22.5	4.6	27.1		γ
CR HMnS 45%	1497	1593	2.11	3.54	5.65		γ
HMnS-Al	438	897	57.5	9.2	66.7	5.23	γ
HMnS-V	641	1215	51.2	9.5	60.7	3.18	γ
HMnS-Al-V	657	1027	41.2	6.3	47.5	6.33	γ

여기에서 D_f 는 플랜지 파면에 균열이 완전히 관통하는 즉시 펀치의 상승을 중단하였을 때의 구멍 지름이다.

2.3 펀칭가공된 구멍 파면 상태 평가

펀칭가공된 구멍 파면의 표면 거칠기(surface roughness)는 공초첨현미경(confocal laser scanning microscope, VK-X110, Keyence, Japan)을 통해 분석하였다. 뿐만 아니라, 공초점현미경을 활용하여 구멍 파면 기하학적 형상을 반영하여 구멍확장의 유한요소해석(finite element analysis, FEA)을 진행하였는데, 이때 EBSD 를 통해 확보한 미세조직 이미지와 인장시험 결과를 경계조건으로 하여 미세조직의 변화를 추적하는 듀얼스케일(dual-scale) 기법을 활용하였다[11,12]. 구멍 부근의 가공경화를 측정하기 위해 구멍 부근에 조성된 전단영향부(shear affected zone, SAZ)에 경도를 구멍 부근에서 방사형으로 측정하였다(the Dura Scan 70, Emco-test, Austria).

3. 결과 및 고찰

3.1 구멍 제작 방법에 따른 각 소재들의 구멍확장률 비교

Table. 2에 각 소재들에 대하여 펀칭가공된 시편의 구멍확장률(HER)과 방전가공된 시편의 구멍확장률(HER_0)을 도시하였다. 실험 방법에서 언급한 바와 같이 펀칭은 다양한 클리어런스 조건에서 수행하였는데, 16% 클리어런스 조건으로 펀칭된 시편의 구멍확장률을 대표값으로 하여 Table. 2에 도시하였다. 방전가공된 시편의 구멍확장률은 소재 별로 상이하게 나타났다. 방전가공된 구멍의 파면 상태는 모든 소재들에서 동일하기 때문에, 방전가공된 시편의 구멍확장률은 미세조직 및 인장 물성과 같은 소재의 고유 특성에 의해서 결정되는 것으로 알려져있다. 펀칭된 시편의 구멍확장률은 방전가공된 시편의 구멍확장률보다 낮은 것으로 나타났다. 기존 문헌들을 살펴보면 방전가공된 시편과 달리 펀칭된 시편은 펀칭 공정에 의해 구멍 부근에 변형이 가해지고 구멍 파면에 균열(crack)이 생성되기 때문에, 펀칭된 시편의 구멍확장률이 방전가공된 시편의 구멍확장률보다 낮다고 보고된 바가 있다[13-14]. 이상의 내용을 고려할 때 펀칭 공정에 의해 구멍 부근에 가해진 변형 및 구멍 파면에 생성된 균열이 소재의 구멍확장성에 큰 영향을 준 것으로 사료된다.

Table 2 HER results of punched samples and machined samples

Materials	Punched sample	Machined sample
	HER(%)	HER_0(%)
HB	61.2 ± 2.69	180 ± 1
FB	51.5 ± 4.17	138.3 ± 26
CP	23.7 ± 1.75	86.6 ± 2.9
HMnS	49.6 ± 1.75	115 ± 3.8
CR HMnS 15%	56.6 ± 1.73	90.2 ± 0.5
CR HMnS 45%	35.8 ± 9.45	42.1 ± 1.6
HMnS-Al	44.8 ± 2.08	123 ± 1.9
HMnS-V	18.6 ± 1.26	54 ± 1.6
HMnS-Al-V	30 ± 2.2	77.2 ± 3.4

펀칭된 구멍의 파면(fracture surface)은 롤오버 영역(roll-over zone), 전단 영역(sheared zone), 파단 영역(fractured zone), 버어(burr)로 나뉘어 진다. 롤오버 영역은 펀치가 시편 표면에 닿을 때 표면이 펀칭 방향으로 말리면서 형성되고, 그 아래에서 전단 변형(shear deformation)이 발생하여 전단 영역이 형성된다. 전단 영역의 아래 부분에서는 불안정한 파단이 발생하여 파단 영역과 버어가 형성된다.

구멍확장시험 시 구멍의 바깥쪽 가장자리에 해당하는 파단 영역에 더 큰 변형이 가해지기 때문에 파단 영역에 존재하는 균열이 전파되면서 구멍 두께 방향으로의 파단을 야기하게 된다[12]. 따라서, 펀칭 시 파단 영역에 가해진 변형 정도와 파단 영역의 표면 거칠기(surface roughness) 정도가 방전가공된 시편과 펀칭된 시편의 구멍확장률 차이를 유발하는 것으로 사료된다.

3.2 펀칭에 의해 파단 영역에 가해진 변형량 정량화

Fig. 1에는 각 소재들의 펀칭된 구멍 파면 부근에서 측정한 경도와 펀칭된 시편의 구멍확장률을 도시하였다. 본 연구에서 사용한 소재들은 각기 다른 기계적 물성을 가지고 있기 때문에, 구멍 파면 부근

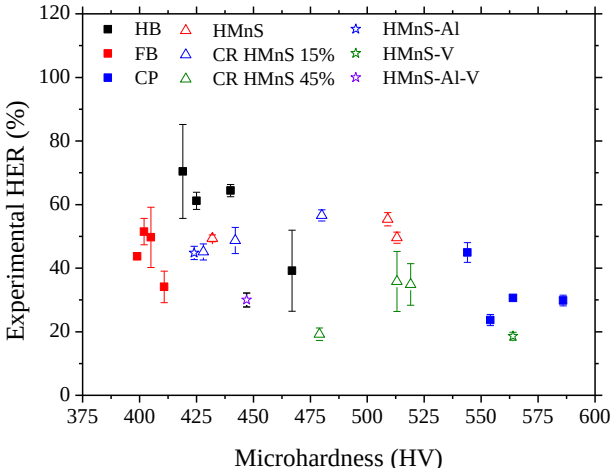

Fig. 1 Variation of HER of punched samples with microhardness of transverse direction surface for fracture zone right next to the hole edge

에서 측정한 경도가 유사할 지라도 소재의 강도 및 성형성에 따라 구멍 부근에 가해진 변형 정도는 상이하게 된다. 따라서 구멍 파면 부근의 경도를 등가소성변형률(equivalent plastic strain)로 환산하여 구멍 주위의 변형 정도를 정량화하였다.

먼저, 파단 영역 부근에서 측정한 경도(H_{fr})와 유동 응력(σ_{fr})의 관계를 나타내는 식(2)을 이용하여 경도를 구멍 파면 부근에 가해진 유동응력으로 환산하였다.

$$\sigma_{fr} = -90.7 + 2.876 \times H_{fr} \tag{2}$$

다음으로 Fig. 2와 같이 각 강종들의 인장 곡선을 식(3)에 표현한 mixed Swift Voce 식을 이용하여 피팅한 후 환산된 유동 응력(σ_{fr})에 상응하는 등가소성변형률($\bar{\varepsilon}_p$)을 계산하였다.

$$\bar{\sigma} = \alpha\left[k_1\left(\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_p\right)^n\right] + (1-\alpha)\left[K_2 + Q\left(1-\exp\left(-\beta\bar{\varepsilon}_p\right)\right)\right] \tag{3}$$

상술한 방법으로 계산한 각 소재들의 파단 영역에서의 등가소성변형률과 구멍확장률을 Fig. 3에 도시하였다. 펀칭에 의해 파단 영역에 가해진 변형률이 클수록 구멍확장시험 시 가해지는 변형을 수용하기가 어렵기 때문에, 등가소성변형률과 구멍확장률은

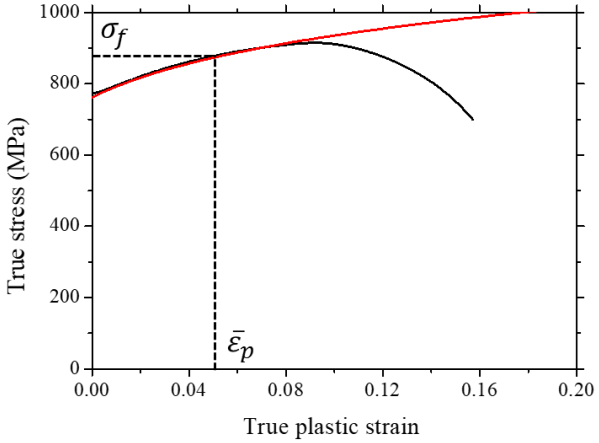

Fig. 2 Experimental True stress-true plastic strain curve of HB steel(black line) and fitted true stress-true plastic strain curve of HB steel using the mixed Swift-Voce hardening model(red line)

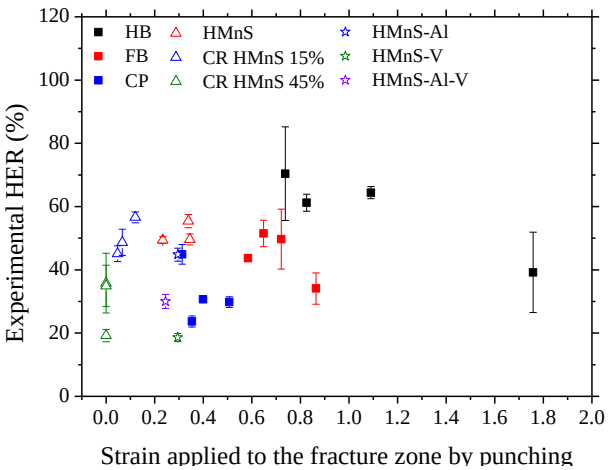

Fig. 3 Variation of HER of punched samples with strain applied to the fracture zone by punching

음의 상관관계를 가질 것으로 예상하였으나[15], 실제 분석 결과 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 이는 각 소재 별로 펀칭 공정에 의해 파면에 생긴 균열의 정도나 파면의 기하학적 형상이 상이하기 때문에 파단 영역에 가해진 변형량만으로 구멍확장률과의 뚜렷한 상관관계가 관찰되지 않은 것으로 사료된다.

3.3 파단 영역의 표면 거칠기 정량화

펀칭된 구멍의 파면을 공초점현미경으로 촬영하여 얻은 이미지를 Fig. 4(a)에 도시하였다. 펀칭 공정에 의해 구멍 표면에 전단 영역과 파단 영역이 생

성 된 것이 관찰됐다. 파면의 표면 거칠기를 관찰하기 위해 Fig. 4(b)에 파면의 3D height map을 도시하였다. 전단 영역은 표면 높이가 균일한 반면, 파단 영역은 표면 높이가 매우 불균일 한 것으로 보아 표면 거칠기가 큰 것으로 관찰됐다. 파단 영역에는 펀칭 동안 많은 미소 기공(micro void) 및 미소 균열(micro crack)이 형성됨에 따라 표면 거칠기가 커진 것으로 사료된다[11]. 파단 영역에 존재하는 미소 기공이나 미소 균열은 구멍확장시험 시 파단시작점(fracture initiation site) 역할을 하여 구멍확장성에 영향을 주는 요인으로 알려져 있다[10]. 본 연구에서는 표면 거칠기를 정량화하기 위해 Neighbor Roughness Distribution (NRD)라는 파라미터를 도입하였고, 식 (4)과 같이 NRD를 표현하였다.

$$NRD = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left|h_{adj,k} - h\right| \quad (4)$$

여기서 h는 특정 픽셀의 높이를 의미하고, $h_{adj.k}$는 특정픽셀로부터 10번째로 인접한 픽셀에서의 높이 값을 나타내며, N은 공초점현미경으로 관찰한 이미지의 전체 픽셀 개수이다. 10번째로 인접한 픽셀과의 높이 차이를 NRD값으로 정의한 이유는 가까운 인접 픽셀과의 높이 차이로 NRD값을 정의할 경우 해당 영역에 균열이 존재하더라도 높이 차이가 저평가될 수 있기 때문이다. Fig. 4(c)에는 식(3)을 이용하여 HB 시편에서 각 픽셀들의 NRD값을 계산하여 얻은 NRD 사상(mapping)를 도시하였다. 전단 영역은 전체적으로 낮은 NRD값을 가지는 반면 파단 영역은 펀칭 공정 중 생성된 균열 근처에서 높은 NRD값을 갖는 것이 확인되었다. 이상의 결과로부터 NRD값이 표면 거칠기를 정량화하는 파라미터로서 적합한 것으로 판단하였다.

각 소재들의 파단 영역에 해당하는 모든 픽셀의 NRD값을 계산하여 평균값을 구하였고, 파단 영역의 평균 NRD값에 따른 구멍확장률을 Fig. 5에 도시하였다. 파단 영역의 NRD값과 구멍확장률은 음의 상관관계를 가질 것으로 예상되었다. 그러나, 구멍확장시험은 펀칭 공정에 의해 파면에 가해진 변형량, 파면의 균열의 정도 및 파면의 기하학적 형상이 복합적으로 작용하는 시험이기 때문에 Fig. 5와 같이 NRD와 구멍확장률 간의 뚜렷한 상관관계가 관찰되지 않은 것으로 사료된다.

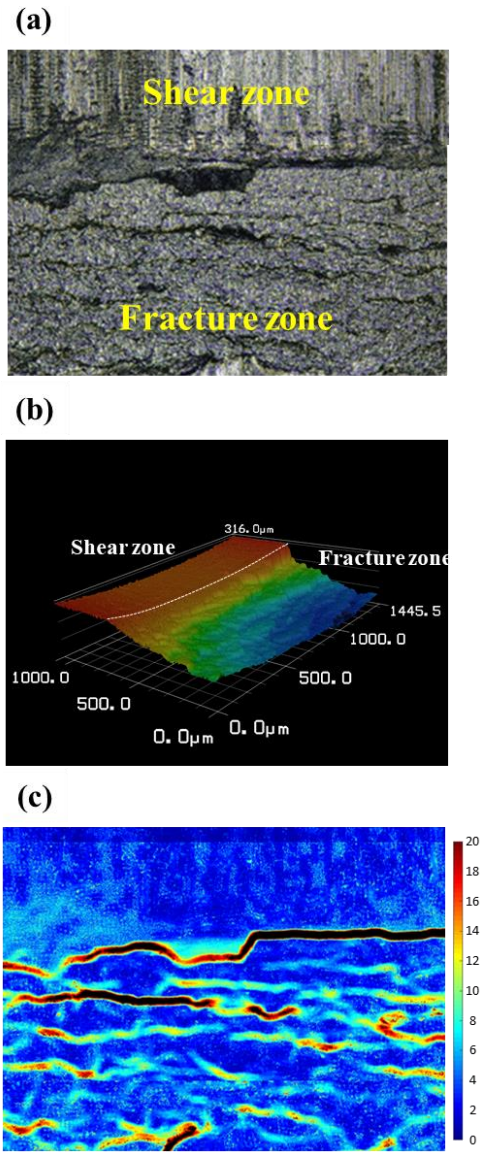

Fig. 4 (a) Laser scanning confocal microscope(LSCM) image of punched hole edge surface for HB steel, (b) 3D height map of punched hole edge surface for HB steel, and (c) NRD map of punched hole edge surface for HB steel

3.4 구멍의 기하학적 형상이 구멍확장률에 미치는 영향 정량화

Fig. 4(b)를 보면 전단 영역에 비해 파단 영역의 표면 높이가 더 낮고, 파단 영역의 가장자리로 갈수록 표면 높이가 더 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 전단 영역과 파단 영역의 구멍 반지름이 다르다는 것을 의미한다. 이처럼 구멍의 반지름이 불균

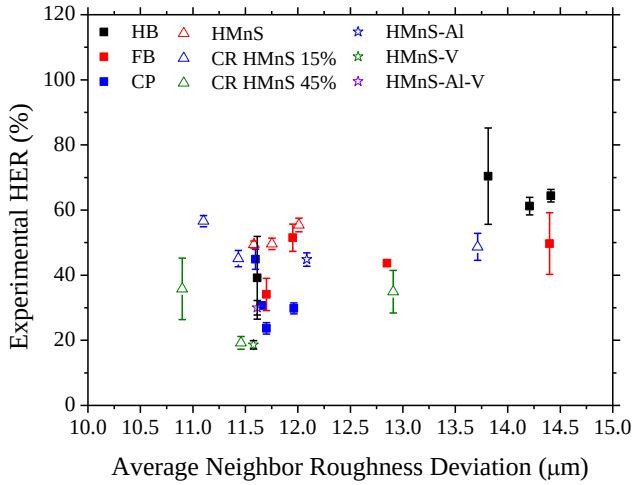

Fig. 5 Variation of HER of punched samples with average Neighbor Roughness Deviation(NRD) of fracture zone

일한 기하학적 형상이 구멍확장률에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6(a)와 같이 구멍 파면이 평평한 방전가공된 구멍의 경우와 Fig. 6(b)와 같이 구멍 파면의 전단 영역에 비해 파단 영역의 반지름이 더 큰 펀칭된 구멍의 경우를 비교하였다. 구멍 파면의 형상을 제외한 모든 물성은 두 경우에서 동일하게 설정하였다. 구멍확장률이 55%일 때 구멍 주변에 가해진 변형 분포를 Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)에 도시하였는데, 구멍 파면의 반지름이 불균일한 Fig. 6(d)의 경우 구멍 파면의 파단 영역에 더 적은 변형이 가해지는 것으로 확인되었다. 즉, 펀칭된 구멍의 기하학적 형태가 구멍확장시험 중 파단 영역에 가해지는 변형을 적게 하여 소재의 구멍확장성에 도움을 주는 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 구멍의 기하학적 형상을 전단 영역과 파단 영역의 구멍 반지름 차이(radius difference)로 표현하였고, Fig. 7에 전단 영역과 파단 영역의 구멍 반지름 차이에 따른 구멍확장률을 도시하였다. 유한요소해석을 통해 구멍 파면의 기하학적 형상에 따라 파단 영역에 가해지는 변형 정도가 상이한 것을 분명히 확인하였음에도 불구하고, 구멍확장률과 반지름 차이 간의 뚜렷한 상관관계가 관찰되지 않았다. 이는 구멍확장률이 하나의 요인에 의해 결정되는 성형성이 아닌 것을 의미한다.

3.5 비선형회귀분석을 이용한 구멍확장률 예측

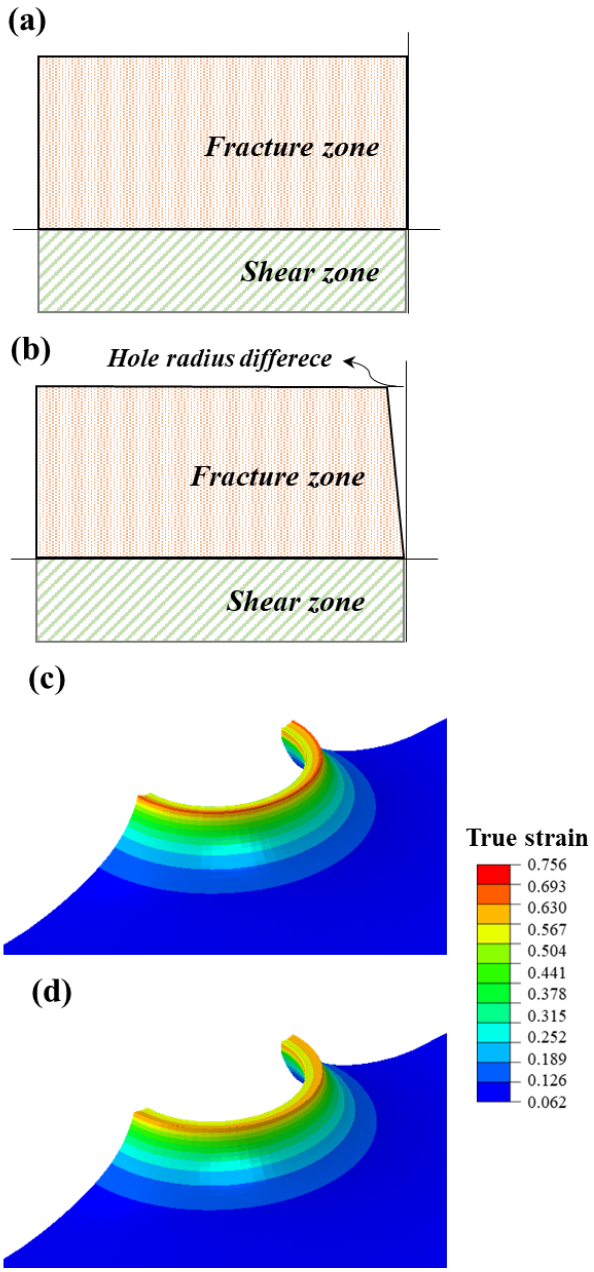

Fig. 6 Schematic representations of the hole edge fabricated by (a) electrical discharging machined and (b) punching. And (c-d) true strain distribution at hole edge considering the shape difference

펀칭 중 파단 영역에 가해진 변형량, 파단 영역의 표면 거칠기, 그리고 펀칭된 구멍의 기하학적 형상을 변수로 하여 방전가공된 시편의 구멍확장률 대비 펀칭으로 인해 구멍확장률이 감소되는 비율 ($(HER_0-HER)/HER_0$)을 비선형회귀식으로 예측한 결

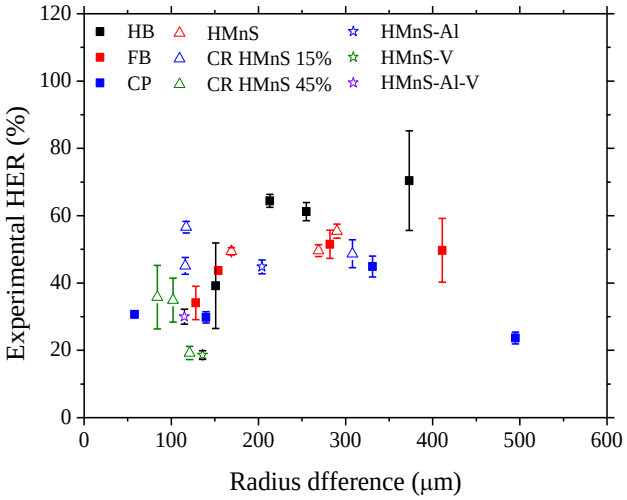

Fig. 7 Variation of HER of punched samples with radius difference

과를 식(5)에 나타냈다.

$$\frac{HER_0 - HER}{HER_0} = 0.39\varepsilon_f^{0.24} + 0.024 \times NRD \times R_{fr}^{0.035} - 0.16 \times \frac{RD}{t_{specimen}} \quad (5)$$

먼저 첫 번째 항의 ε_f는 Fig. 3에 나타냈던 파단 영역에 가해진 등가소성변형률이다. 두 번째 항의 NRD는 파단 영역의 평균 Neighbor Roughness Deviation 값이며, R_{fr}은 파면 전체에서 파단 영역이 차지하는 비율이다. 표면 거칠기가 큰 파단 영역의 비율이 클수록 파단 영역에 존재하는 미소 균열이 구멍확장시험 시 파단시작점의 역할을 할 가능성이 높아지기 때문에 NRD값에 R_{fr} 값을 곱한 형태로 식을 구성하였다. 세 번째 항의 RD는 Fig. 5에 도시하였던 파단 영역과 전단 영역 간의 구멍 반지름 차이이고, $t_{specimen}$은 시편의 두께이다. 시편의 두께가 매우 큰 경우, 파단 영역과 전단 영역 간의 반지름 차이가 구멍확장률에 미치는 영향은 미미할것으로 사료되어, 반지름 차이 값을 시편의 두께로 나누어 식을 구성하였다.

식(5)를 HER에 대해 정리하여 식(6)에 나타냈다.

$$HER = HER_0[1 - (0.39\varepsilon_f^{0.24} + 0.024 \times NRD \times R_{fr}^{0.035} - 0.16 \times \frac{RD}{t_{specimen}})] \quad (6)$$

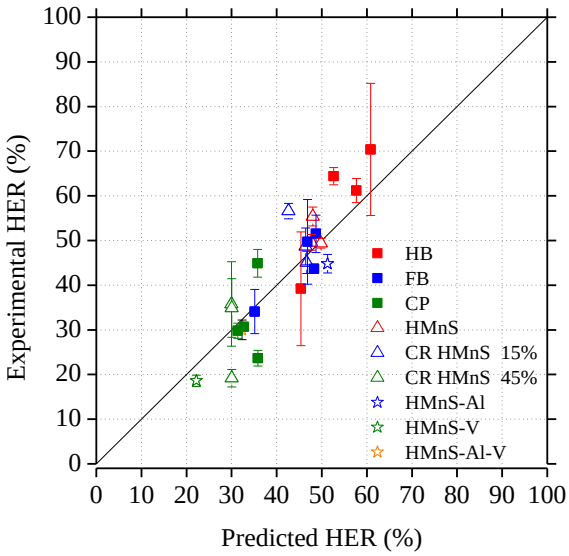

Fig. 8 Comparison of experimental HER results with predicted HER results calculated using regression equation

파단 영역에 가해진 등가소성변형률과 파단 영역의 NRD값의 경우 음의 계수를 가지는데, 이는 펀칭으로 인해 구멍확장률이 감소하는데 기여하는 요인임을 의미한다. 반대로 반지름 차이 값의 경우 양의 계수를 가지는데, 이는 펀칭으로 인해 구멍확장률이 증가하는데 기여하는 요인임을 의미한다. 즉, 앞서 예측하였던 각 요인들과 구멍확장성 간의 상관관계와 일치하는 것을 확인하였다. Fig. 8은 식(5)를 이용하여 예측한 구멍확장률과 실험으로 측정한 구멍확장률을 비교한 결과이다. 실험값과 예측값 간의 결정계수(R^2)은 약 0.8이고, 평균절대오차(MAE)는 약 14%로 회귀식이 유의함을 검정하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 페라이트 단상강, 페라이트-베이나이트강, 복합조직강, 고망간 TWIP강에 대하여 펀칭된 시편의 구멍확장률과 방전가공된 시편의 구멍확장률 간의 차이를 유발하는 요인들을 도출하였다. 첫 번째 요인으로, 펀칭에 의해 구멍 부근에 가해진 변형량을 분석하였다. 소재 별로 기계적 물성이 상이한 점을 고려하기 위해 구멍 부근에서 측정한 경도값을 유동응력으로 환산한 후 mixed Swift-Voce 식을 이용하여 등가소성변형량을 계산하였다. 다음으로, 펀칭 공정에 의해 표면에 미소 균열 및 미소 기

공이 생성됨에 따라 야기되는 표면 거칠기 증가를 정량화하였다. 공초점현미경을 통해 얻은 이미지를 분석하여 NRD라는 파라미터를 정의하였고, 균열이 존재하는 영역에서의 NRD값이 큰 것을 확인하였다. 마지막으로, 펀칭공정에 의해 형성되는 구멍의 기하학적 형상이 구멍확장률에 미치는 영향을 고려하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과로부터 구멍의 파면이 평평한 경우에 비해 구멍 파면의 반지름이 불균일한 경우 파단 영역에 가해지는 변형량이 적어지는 것을 확인하였다. 펀칭된 구멍의 기하학적 형상은 전단 영역과 파단 영역의 반지름 차이로 표현하여 분석하였다. 상술한 요인들을 변수로 하여 구멍확장률을 예측하는 회귀식을 도출하였다. 회귀식의 결정계수는 약 0.8, 평균절대오차는 약 14%로 회귀식의 유의성을 검정하였다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 (No. 2019M3D1A1079215, No. 2020R1A5A6017701, No. 2021R1A2C3005096)의 지원 및 포스코의 지원을 받아 수행된 연구이며, 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사드립니다.

REFERENCES

[1] G. A. Meehl, W. M. Washington, W. D. Collins, J. M. Arblaster, A. Hu, L. E. Buja, W. G. Strand, H. Teng, 2005, How much more global warming and sea level rise?, science 307(5716), pp. 1769-1772. https://doi.org/10.1126/science.1106663

[2] J.-Y. Kang, S.-J. Park, D.-W. Suh, H. N. Han, 2013, Estimation of phase fraction in dual phase steel using microscopic characterizations and dilatometric analysis, Mater. Charact. 84, pp. 205-215. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.08.002

[3] B. De Cooman, O. Kwon, K.-G. Chin, State-of-the-knowledge on TWIP steel, 2012, Mater. Sci. and Technol. 28(5), pp. 513-527. https://doi.org/10.1179/1743284711Y.0000000095

[4] H. N. Han, C.-S. Oh, G. Kim, O. Kwon, 2009, Design method for TRIP-aided multiphase steel based on a microstructure-based modelling for transformation-induced plasticity and mechanically induced martensitic transformation, Mater. Sci. Eng.: A 499(1-2), pp. 462-468. https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.026

[5] H. N. Han, C. G. Lee, D.-W. Suh, S.-J. Kim, 2008, A microstructure-based analysis for transformation induced plasticity and mechanically induced martensitic transformation, Mater. Sci. Eng.: A 485(1-2), pp. 224-233. https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.022

[6] A. Karelova, C. Krempaszky, E. Werner, P. Tsipouridis, T. Hebesberger, A. Pichler, 2009, Hole Expansion of Dual-phase and Complex-phase AHS Steels-Effect of Edge Conditions, Steel Res. Int. 80(1), pp. 71-77. https://doi.org/10.2374/SRI08SP110

[7] S.-I. Hashimoto, M. Sudo, K. Mimura, T. Hosoda, 1986, Effect of microstructure on mechanical properties of C-Mn high strength hot rolled sheet steel, Trans. I.S.I.J 26(11), pp. 985-992. https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.26.985

[8] A. Kundu, D. P. Field, 2020, Influence of microstructural heterogeneity and plastic strain on geometrically necessary dislocation structure evolution in single-phase and two-phase alloys, Mater. Charact. 170, 110690. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110690

[9] L. Chen, J. K. Kim, S. K. Kim, G. S. Kim, K. G. Chin, B. De Cooman, 2010, Stretch-Flangeability of High Mn TWIP steel, Steel Res. Int. 81(7), pp. 552-568. https://doi.org/10.1002/srin.201000044

[10] X. Chen, H. Jiang, Z. Cui, C. Lian, C. Lu, 2014, Hole expansion characteristics of ultra high strength steels, Procedia Eng. 81, pp. 718-723 https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.066

[11] J. G. Kim, J. I. Yoon, S. M. Baek, M. H. Seo, K. G. Chin, S. Lee, H. S. Kim, 2018, Stretch-flangeability of twinning-induced plasticity steel-cored three-layer steel sheet, J. Mater. Process. Technol. 258, pp. 220-225. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.002

[12] S. Park, J. Jung, K. I. Kim, H, Kim, S.-I. Kim, K. H. Oh, M.-G. Lee, H. N. Han, 2019, Practical microstructure-informed dual-scale simulation for predicting hole expansion failure of hyper-burring steel, Int. J. Mech. Sci. 156, pp. 297-311. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.04.010

[13] S. Park, J. Jung, W. Cho, B.-S. Jeong, H. Na, S.-I Kim, M.–G. Lee, H. N. Han, 2021, Predictive dual-scale finite

element simulation for hole expansion failure of ferrite-bainite steel, Int. J. Plast 136, 102900. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2020.102900

[14] B. M. Hance, R. J. Comstock, D. K. Scherrer. 2013, The influence of edge preparation method on the hole expansion performance of automotive sheet steels. SAE Tech. Pap. No. 2013-01-1167. https://doi.org/10.4271/2013-01-1167

[15] D. J. Branagan, A. E. Frerichs, B. E. Meacham, S. Cheng, A. V. Sergueeva, 2017, New Mechanisms Governing Local Formability In 3 rd Generation AHSS. SAE Tech. Pap. No. 2017-01-1704. https://doi.org/10.4271/2017-01-1704

[16] K.–I. Mori, Y. Abe, Y. Suzui, 2010, Improvement of stretch flangeability of ultra high strength steel sheet by smoothing of sheared edge, J. Mater. Process. Technol. 210.4, pp. 653-659. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.014