

직선 전단 시편을 이용한 신장 플랜지성 평가법 연구

한수식^{1, #}, 이현영²

Study on Stretch Flangeability Test Method with Straight Shear Line Specimen

S. S. Han, H. Y. Lee

(Received January 03, 2022 / Revised January 18, 2022 / Accepted January 19, 2022)

Abstract

Although the hole expansion test is currently the most commonly used method to evaluate the stretch flangeability of HSS, it has been criticized due to its poor repeatability and reproducibility for test results. This paper focuses on the development of a new measurement method to investigate the stretch flangeability of HSS. Two materials (DP590, DP980) were investigated with a hole expansion test and a developed test method. Test results showed that the developed test method could be used as one stretch flangeability test to help identify relevant parameters of the shearing process to avoid edge cracking.

Keywords: HSS, edge cracking, hole expansion test, shearing parameters

1. 서 론

자동차의 충돌 안전성 향상, 차체 경량화에 의한 연비 향상 등을 위하여 많은 양의 초고강도 강판이 자동차 차체에 적용되고 있다. 초고강도 강판의 자동차 부품 적용을 위하여 해결하여야 할 과제로는 초고강도 강판이 갖고 있는 높은 스프링백, 낮은 성형성이 있다. 최근 들어서 해결하여야 할 또 하나의 과제로서 대두되고 있는 것이 바로 초고강도 강판의 낮은 신장 플랜지성이다[1].

신장 플랜지성은 판재의 기계적 성질뿐만 아니라 신장 플랜지 변형이 작용하는 전단면의 특성에 의하여도 영향을 받는다[2]. 전단면의 특성은 전단날의 품질, 다이간극, 전단각의 유무와 크기, 압연 방향에 대한 전단선 방향 그리고 카운터 펀치의 유무 등과 같은 공정 인자들의 영향을 받는다. 일반적으로

로 판재의 신장 플랜지성 평가는 원통형 또는 원추형 펀치를 이용한 구멍 확장 시험을 통하여 이루어진다[3]. 구멍 확장 시험은 시험 초기 구멍 직경과 옛지 크랙이 발생한 후 구멍 직경의 비인 HER(hole expansion ratio)로 신장 플랜지성을 평가하는 시험법으로 판재의 신장 플랜지성을 용이하게 평가할 수 있다는 장점이 있다. 구멍 확장 시험은 시험시 변형이 구멍의 가장자리 전 영역에서 균일하게 발생한다는 가정을 근거로 하고 있다. 그러나 실제 구멍 확장 시험시 구멍 가장자리의 변형은 균일하지 않다[4]. 그리고 구멍 확장 시험은 원형 구멍을 펀칭하여 시험을 위한 전단면을 준비하기 때문에 다이간극을 제외한 다른 전단 공정인자들의 영향을 분석하기는 어렵다. 이러한 구멍 확장 시험법의 단점을 보완하고자 여러가지 전단 공정 인자를 변화시킬 수 있는 직선 전단선을 갖는 시편을 이용하여 전단면에 신장 플랜지 변형에 의한 파단을 발생시킨 후 크랙이 발생한 위치의 파단 변형률을 측정하여 판재의 신장 플랜지성을 평가하고자 하는 노력이 지속적으로 진행되고 있다. 그 대표적

1. 금오공과대학교 기계공학과, 교수

2. POSCO 철강술루션연구소 성형연구그룹, 책임연구원

Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering

Kumoh National Institute of Technology, E-mail: sshan@kumoh.ac.kr

ORCID: 0000-0001-5234-5594

인 시험법으로는, 한 쪽 면은 전단가공을, 다른 쪽 면은 기계가공을 실시한 인장 시편 형상의 시편에 대하여 인장 시험을 실시하여 전단 가공면에 크랙을 발생시키고 크랙 부분의 변형률을 측정하여 판재의 신장 플랜지성을 평가하는 방법이 있다[5]. 그러나 이 방법의 경우, 가장 자리에서부터 내부로의 변형 구배가 매우 작기 때문에 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 크랙의 발생이 전단 가공면에서 발생하지 않는 경우도 다수 존재하고 있어 판재의 신장 플랜지성을 평가하기에는 개선이 필요하다.

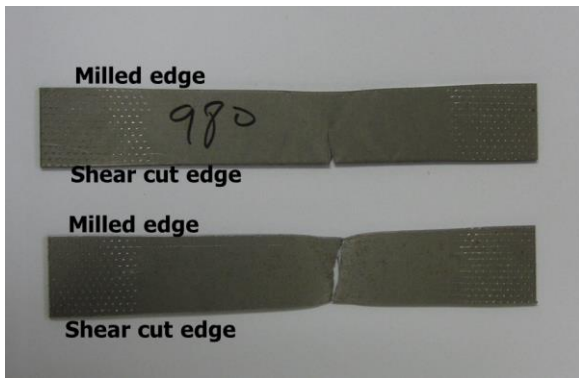


Fig. 1 Edge fracture tensile test[5] result for DP980

본 논문에서는 판재의 신장 플랜지성에 영향을 미치는 여러가지 전단 공정 인자들을 고려할 수 있는 직선 전단 시편으로 판재의 신장 플랜지성을 평가할 수 있는 평가법에 대하여 연구하였다. 제안하고자 하는 신장 플랜지성 평가법은 시편에 실제 신장 플랜지 성형 공정과 유사한 변형을 작용하여 시편의 가장자리에서부터 내부로 변형 구배를 갖도록 하였다. 성형 해석을 통하여 제안된 시험법이 신장 플랜지 변형의 특징인 변형 구배를 갖는 것을 확인하였으며 고강도 강판에 대하여 신장 플랜지성을 평가하고 그 결과를 구멍 확장 시험 결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 신장 플랜지성 시험법

신장 플랜지 변형의 가장 큰 특징은 전단면으로 이루어진 시편의 가장 자리에서부터 시편 내부로 갈수록 크기가 점점 작아지는 변형 구배이다. 이러

한 변형 구배는 굽힘 변형에서도 나타난다. Fig. 2 와 같이 판재를 폭방향으로 굽힘할 경우, 신장 플랜지 변형과 같은 유형의 변형 구배를 얻을 수 있다. 그러나 가장자리 부분의 최대 변형률이 굽힘 반지름과 시편 폭에 의하여 결정되어 버려 굽힘량등으로 최대 변형률을 변화시키기 곤란하고 판재 두께가 충분히 두껍지 않으면 굽힘 시험 중에 좌굴이 발생할 수 있다.

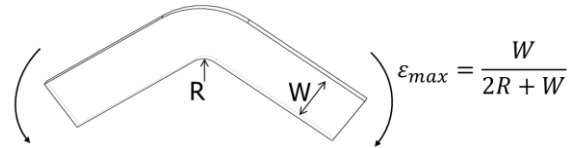


Fig. 2 Bending in the width direction and maximum major strain at the edge

굽힘 변형 중의 좌굴 발생을 방지하고 굽힘량에 따라서 가장자리 부분의 최대 변형률을 변화시키기 위하여 Fig. 3 과 같이 시편에 굽힘과 인장을 작용하여 시편의 가장자리 부분에 신장 플랜지 변형을 작용하는 방법을 제안하였다.

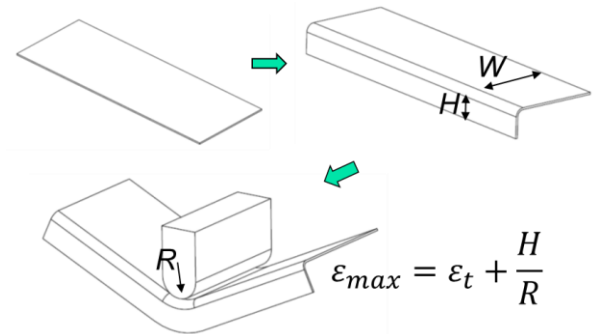


Fig. 3 Concept design for stretch flange test and maximum major strain at the edge

Fig. 3 과 같이 판재를 길이 방향으로 플랜지 높이 H 로 굽힘한 후에 양단을 고정된 후 반지름 R 펀치를 이용하여 굽힘을 실시하면 플랜지 부분은 인장과 굽힘을 받기 때문에 펀치 행정이 증가하면 굽힘에 의한 변형은 일정하나 인장 변형 ϵ_t 가 증가하여 가장자리 부분의 최대 변형률은 증가하게 된다. 제안된 시험 방법의 적용 가능성을 유한 요소 해석으로 검증하였다. Fig. 4(a)와 같이 시편 길이 방향으로

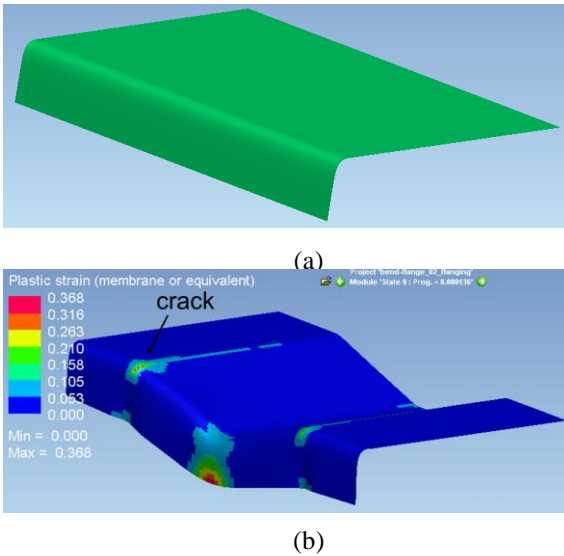


Fig. 4 Stretch flange test after full bending (DP980) : (a) full edge bent shape (b) strain distribution of part

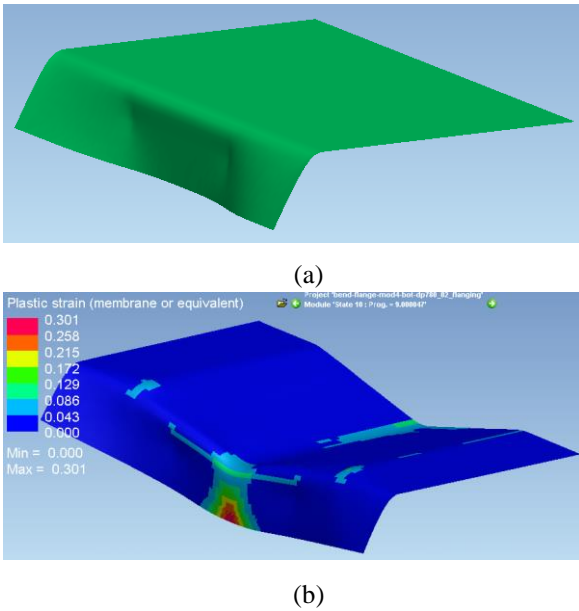


Fig. 5 Stretch flange test after partial bending (DP980) : (a) partial edge bent shape (b) strain distribution of part

가장자리 전체를 플랜지 굽힘한 후 Fig. 4(b)과 같이 시편 양단을 블랭크 홀더로 고정하면서 굽힘을 실시하였다. 시편 가장자리 가운데 부분에는 신장 플랜지 변형 모드가 발생하였으나 블랭크 홀더로 고정된 부분에도 변형이 집중되어 크랙이 발생하는

것으로 나타났다. 그래서 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 시편 가운데 부분 일부만 플랜지 굽힘하고 시편 양단을 고정하면서 굽힘을 실시하는 방법으로 변경한 결과 Fig. 5(b)와 같이 시편 가장자리 가운데 부분에는 신장 플랜지 변형 모드가 발생하고 블랭크 홀더로 고정된 부분은 변형 집중이 완화되어 크랙 발생을 방지할 수 있었다. Fig. 6에는 시편의 주변형률 분포와 파단 발생 부분의 변형률 조합 (FLD 상의 흰색 표시 부분)을 FLD 선도에서 나타내었다. 플랜지 가장자리 부분에는 단축 인장 변형 모드가 발생하는 것을 알 수 있다. 펀치 행정이 증가함에 따라 Fig. 7에 나타난 것과 같이 가장자리 부분의 주변형률이 증가됨을 알 수 있어 제안된 방법이 직선 전단 시편으로 신장 플랜지성을 평가할 수 있는 시험법 중의 하나가 될 수 있음을 알 수 있다.

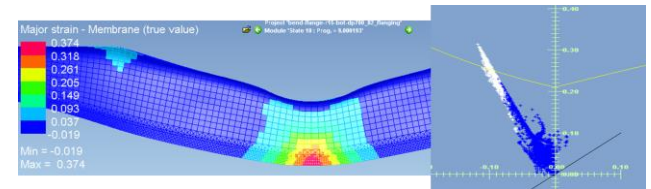


Fig. 6 Major strain distribution of specimen after stretch flange test with partial bending (DP980)

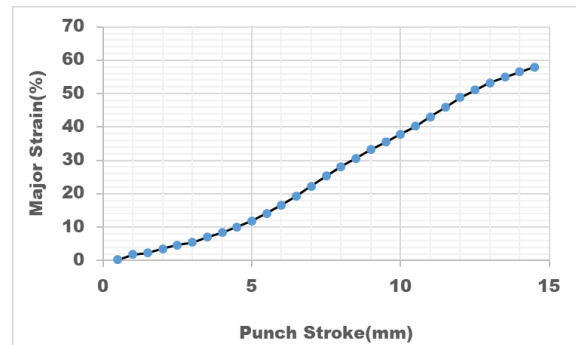


Fig. 7 Major strain of edge center with respect to punch stroke (DP980)

2.2 실험 및 결과 분석

해석 결과를 바탕으로 하여 한번의 행정에서 시편 가운데 부분을 일부 굽힘하여 플랜지를 성형하는 작업과 플랜지 부분에 굽힘과 인장 변형을 추가하는 작업을 순차적으로 실시할 수 있는 신장 플랜지 시험 금형을 Fig. 8과 같이 설계하고 제작하였다.

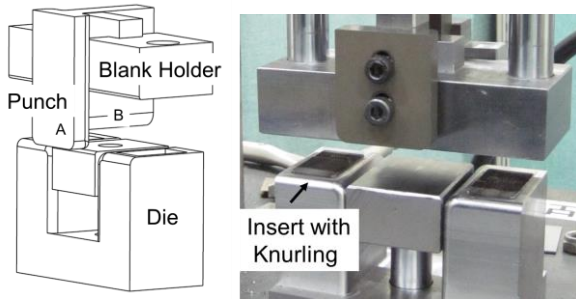
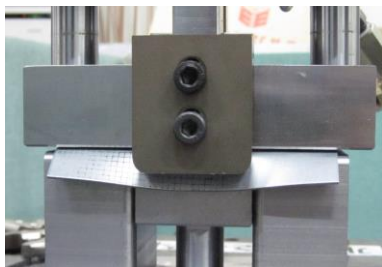


Fig. 8 Schematic and photo of test die for stretch flangeability test

시험 중에 시편을 고정하여 인장 변형이 발생할 수 있도록 하기 위하여 하부 다이 상면에 톱니형으로 널링 가공한 인서트를 설치하였다. 시험에 사용되는 시편 크기는 120 mm x 90 mm 이며 부분 굽힘된 플랜지 높이는 15mm 이다. 시편을 하부 다이 상면에 올려 놓고 블랭크 홀더로 플랜지 부분을 가압하면서 펀치를 하강하면 Fig. 9(a) 에 나타낸 것과 같이 Fig. 8 의 펀치의 A 부분에 의하여 가운데 부분이 부분 굽힘되어 플랜지가 형성된다. 그 이후 계속하여 펀치를 하강하면 Fig. 9(b) 에 나타낸 것과 같이 Fig. 8 의 펀치의 B 부분에 의하여 시편의 가운데 부분은 인장과 굽힘 변형을 받게 된다.



(a)



(b)

Fig. 9 Stretch flange test with developed tool (DP980) : (a) partial edge bending (b) stretch flanging

구멍 확장 시험법과 제안된 시험법을 각각 이용하여 DP590 1.0t 와 DP980 1.0t 소재의 신장 플랜지성을 평가하고 그 결과를 서로 비교하였다. 두 시험법 모두 다이 간극을 10%로 하여 전단하였으며 각각의 시험 조건에 대하여 5 번씩 실험을 실시하였다. 구멍 확장 시험의 경우, 구멍 크기는 10 mm 로 하였고 개발된 시험법과 유사하게 구멍 주위가 평면을 유지하면서 변형하도록 하기 위하여 원통형 펀치를 이용하여 실험하였다. 실험 후 시편의 형상을 Fig. 10 에 나타내었다. 크랙 발생후 구멍 지름을 압연 방향에 대하여 0 도와 90 도 방향에 대하여 각각 측정하여 그 평균값으로 HER 값을 계산하였다. 제안된 시험법의 경우, 파단 부위의 변형을 측정하기 위하여 시편 표면에 레이저 마킹 장비를 이용하여 일반적으로 FLD 측정에 사용되는 것과 동일한 2.5mm 크기의 사각 그리드를 표시한 후 시험을 실시하였다. Fig. 11 에는 실험 후 시편의 형상을 나타내었다. 신장 플랜지성 값은 참고문헌[6]과 동일하게 크랙을 제외한 그리드 사이의 거리를 Fig. 12 에 나타낸 화상투영기를 이용하여 측정하였다. 신장 플랜지성에 대한 압연 방향의 영향을 확인하기 위하여 전단선을 압연 방향과 나란한 경우와 압연 방향에 직각인 경우에 대하여 시편을 준비하여 실험을 실시하였다.



Fig. 10 Specimen after hole expansion test with cylindrical punch(DP980)



Fig. 11 Specimen after stretch flanging test with developed tool(DP980)

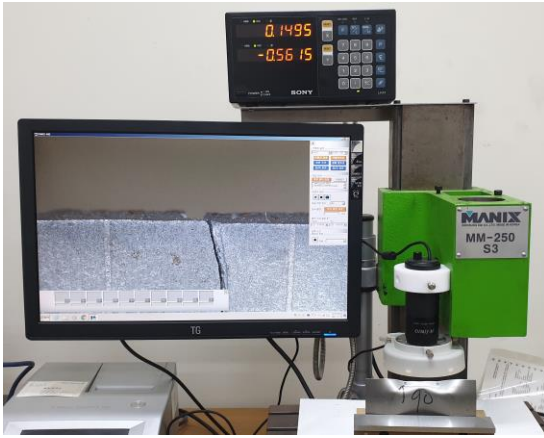


Fig. 12 Device for grid measurement

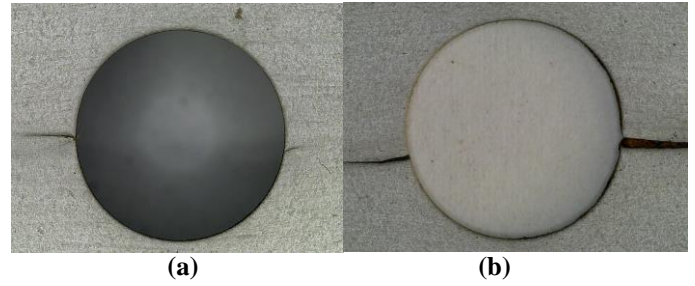


Fig. 15 Photo of hole and crack after hole expansion test: (a) DP590 (b) DP980

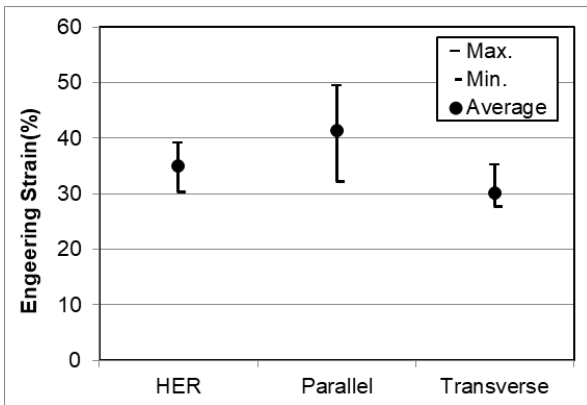


Fig. 13 Stretch flangeability test results with different test methods and conditions (DP590)

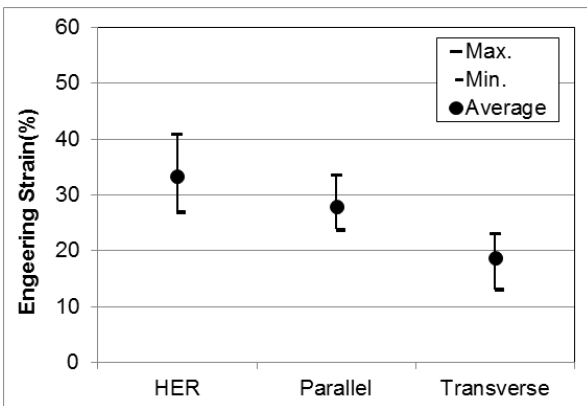


Fig. 14 Stretch flangeability test results with different test methods and conditions (DP980)

인 경우에 대하여 시편을 준비하여 실험을 실시하였다. 각각의 소재에 대하여 HER 값과 크랙 부분의 변형률(신장 플랜지성 값)을 측정하여 Fig. 13 와 Fig. 14 에 나타내었다

DP590 과 DP980 모두, 개발된 시험법으로 측정된 신장 플랜지성 값은 압연 방향에 나란한 경우가 압연 방향에 수직인 경우에 비하여 더 높은 값을 나타내었다. 이러한 시험 결과는 압연에 따른 소재 조직 방향을 고려한다면 당연한 결과라 할 수 있다.

그리고 성형성이 우수한 DP590 이 DP980 에 비하여 더 높은 신장 플랜지성 값을 나타내었다. DP590 의 경우 HER 값은 압연 방향에 수직인 경우와 나란한 경우의 신장 플랜지성 값의 중간 값에 가까운 값을 나타내었다. 그러나 DP980 의 경우 HER 값은 압연 방향에 나란한 경우의 신장 플랜지성 값보다도 높게 나타났다. 이와 같이 소재에 따라 서로 다른 경향을 나타내는 이유는 소재 강도 차이와 HER 측정 방법 때문으로 판단된다. Fig. 15 와 Fig. 16 은 DP590 과 DP980 의 구멍 확장 시험 후 크랙 부위를 나타내었다. 두 경우 모두 크랙이 압연 방향으로 발생한 것을 알 수 있다. 크랙 크기는 DP980 의 경우가 DP590 의 경우에 비하여 더 큰 것을 알 수 있다.

구멍 확장 시험중, 구멍의 원주 방향으로 인장력이 발생하게 되며 소재의 강도가 높을수록 크랙 발생 직전에 작용되고 있는 인장력은 더 클 것이다. 이러한 인장력 차이에 의하여 강도가 높은 소재가 낮은 소재에 비하여 크기가 더 큰 크랙을 만들게 된다. HER 값 계산을 위한 지름 측정시 크랙을 포함하고 있고 초기 구멍 크기가 10mm 밖에 되지 않아 크랙 크기가 HER 값에 미치는 영향이 커서 DP980 의 경우 Fig. 14 와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

만약 HER 계산시 이러한 크랙의 크기를 고려한다면 DP980 의 경우도 DP590 과 유사한 경향을 나타낼 것으로 생각된다.

4. 결론

직선형 시편으로 신장 플랜지성을 평가할 수 있는 시험법을 제안하고 이를 고강도강에 적용하여 기존 HER 시험 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한 요소 해석 결과, 개발된 시험법이 시편 가장 자리에서 시편 내부로 갈수록 크기가 점점 작아지는 변형 구배를 갖는 신장 플랜지 변형 모드를 구현함을 알 수 있었다.

(2) 개발 시험법으로 신장 플랜지성에 대한 압연 방향의 영향을 분석한 결과, 압연 방향으로의 신장 플랜지성이 압연 직각 방향으로의 신장 플랜지성에 비하여 우수한 것으로 나타났다.

(3) 구멍 확장 시험시 크랙 크기가 작았던 DP590 의 경우 HER 값은 압연 방향 신장 플랜지성과 압연 직각 방향 신장플랜지성의 평균 값과 유사한 결과를 나타내었다.

(4) 구멍 확장 시험시 크랙이 크게 나타난 DP980 의 경우 HER 값은 압연 방향 신장 플랜지성 보다 크게 나타나 HER 값 계산시 크랙의 크기를 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다.

(5) 유한 요소 해석 및 실험 결과, 개발된 시험법이 소재의 신장 플랜지성 평가법 중의 하나가 될

수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(2019104127)

REFERENCES

- [1] H. Kohei, K. Shinjiro, S. Kazuhiro, 2013, JFE Technical Report, No. 18, pp 80~88
- [2] P. Sartkulvanich, B. Kroenauer, R. Golle, A. Konieczny, T. Altan, 2010, Finite Element Analysis of The Effect of Blanked Edge Quality Upon Stretch Flanging of AHSS, CIRP Annals - Manufacturing Technol., Vol. 59, pp 279-282, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.108>
- [3] P. Larour, J. Freudenthaler, A. Grünsteid, K. Wang, 2014, Proc. IDDRG 2014, Paris, France, pp 187~193
- [4] A. Mackensen, M. Golle, R. Golle, H. Hoffmann, 2009, Proc. IDDRG 2009, Golden, USA, pp 547~558
- [5] M. Feistle, R. Golle, W. Volk, 2015, Proc. 48th CIRP Conf. on MANUFACTURING SYSTEMS, Elsevier, Procedia CIRP 41, pp 1078 – 1083
- [6] S. S. Han, H. Y. Lee, 2019, Study on Deformation Characteristics of Hole Expansion Test and Its Applicability, Trans. Mater. Process., Vol. 28, No. 3, pp 154-158, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2019.28.3.154>