

고장력강의 구멍 확장 실험을 이용한 자동차부품 설계연구

박병철¹, 배경운¹, 구선모², 장승현², 홍성훈², 김영석[#]

A Study of Automobile Product Design using Hole Expansion Testing of High Strength Steels

B. C. Park, K. U. Bae, S. M. Gu, S. H. Jang, S. H. Hong, Y. S. Kim

(Received July 1, 2010 / Revised September 29, 2010 / Accepted September 30, 2010)

Abstract

Current need of weight reduction in automotive part increases the application for high strength steel (HSS). The various types of high strength steels have been used to produce chassis part, control arms and trailing arms for weight reduction and increasing of fatigue durability such as dual phase steel (DP) and ferrite bainite steel (FB). But, DP and FB steels have proven to show inferiority in durability as well as press formability. Edge cracking occurred often in flange forming and hole expansion processes is the major failure encountered. This paper discussed the behavior of edge stretchability of high strength steel of DP and FB steels. Experimental works have been conducted to study the effect of punch clearance and burr direction on hole expansion ratio (HER). Also finite element simulation (FEM) has been performed to clarify the mechanism of flange crack and support the experimental results on HER of DP and FB steels. It was simulated the whole process of blanking process following by hole expansion process and ductile fracture criterion named the modified Cockcroft-Latham model which was used to capture the fracture initiation. From the hole expansion tests and FEM simulation studies it was concluded that ferrite bainite steel showed better stretch-flangeability than dual phase steel. It was attributed to the lower work hardening rate of ferrite bainite steel than dual phase steel at the sheared edge.

Key Words : High Strength Steel, Hole Expansion Ratio, Punching Clearance, Formability, Automotive Chassis Parts

1. 서 론

지구 온난화에 따른 환경문제로 인하여 최근 자동차 경량화에 대한 요구가 증대되고 있다.

자동차 경량화에 대한 요구는 차량 배기 가스에 의한 대기오염 및 지구 온난화 방지를 위한 환경적 측면과 경량화에 따른 차량 승차감, 조정성, 가속성능 등의 향상을 위한 성능적 측면으로 대두되고 있다. 특히 최근에는 과거 차량과는 달리 자동차의 안전과 편의성을 위한 각종 부가장

비 들이 많이 장착됨에 따라 자동차 무게의 증가 요소가 더욱 증가되고 있으며, 안정성 향상을 위한 각종 충돌법규의 강화에 따른 고안전 차량부품에 대한 요구도 증가되고 있다[1].

자동차 샤시부품은 엔진을 지지하고 노면진동을 흡수 전달하며 충돌 시 운전자를 보호하는 대표적인 보안부품이며 최근 경량화 요구 증대에 따라 소재 및 구조적 변화를 통해 많은 개선이 진행되고 있다. 소재적인 개선은 주로 부품 소재의 강도를 증가시킨 고강도강 적용 및 알루미늄

1. 화신기술연구소
2. 경북대학교 기계공학과
교신저자: 경북대학교 기계공학과,
E-mail: caekim@knu.ac.kr

과 같은 높은 비강도를 가진 비철금속계 소재를 적용한 연구가 주로 진행되고 있으며 특히 고강도강 적용 개발은 알루미늄과 같은 비철 금속계 부품이 소재 원가상승에 따른 코스트 문제로 양산 적용이 제한적임에 비해 전 차종에 대한 범용 적용이 가능하다는 점에서 상대적으로 높은 확대가 기대되고 있다.

국내 스틸계 샤시부품은 주로 고용강화형 소재인 SAPH 계열의 열연강판 주종으로 인장강도 370~440MPa 급이 주로 사용되어 양산되고 있다. 그리고 개발되고 있는 스틸계 샤시부품은 경량화와 원가를 반영하여 서브프레임(Subframe)은 신율을 보완한 DP 강(Dual Phase Steel) 590MPa 을 암(Arm)류는 구멍 확장성(Hole Expansion)을 보완한 FB 강(Ferrite Bainite Steel) 540MPa/590MPa 을 점진적으로 사용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 샤시용 고장력강 부품 암(Arm) 개발을 위해 기존 열연강판 대신 540MPa~ 590MPa 급 열연강 적용을 목표로 연구개발 결과이다. 자동차 샤시부품 암(Arm)류의 제작 과정에 있어 구멍확장공정으로 제조되는 플랜지(Flange)부 및 버링(Burring)부는 암(Arm)의 피로 성능과 차량 안전에 많은 영향을 미치는 부분이다.

판재 성형공정 중 하나인 홀 플랜징(Hole Flanging) 성형은 구멍을 확장시키면서 구멍주위에 플랜지(Flange)를 만들어 구멍 주위의 강도 및 설계상의 목표를 충족시키기 위한 공정 중 하나이다. 홀 플랜징 성형의 경우와 같이 구멍을 확장시키는 공정의 경우에 재료의 성형을 고려하기 위하여 구멍 확장 실험(Hole Expansion Test)을 수행하여 구멍 확장비(Hole Expansion Ratio, HER)를 측정하게 된다[2,3].

홀 플랜징 공정에는 구멍을 제조하기 위한 공정으로 레이저 가공(Laser Cutting), 펀칭(Punching) 등이 선행되므로 재료의 성형 성을 파악하고자 구멍 확장 실험을 수행할 경우 기존의 인장실험과는 달리 구멍제작에 따른 효과를 고려해야 한다. 따라서 실험 과정은 좀더 복잡할 수밖에 없으므로 유한요소 해석을 이용하여 구멍 확장 실험 중 구멍주위의 균열을 예측하여 문제점을 해결할 필요가 있다.

재료의 구멍 확장 비를 연성과파괴기준(Ductile Fracture Criterion)을 적용한 유한요소해석을 통하여 예측하고자 한 연구들이 진행되어 왔으나[4, 5],

펀칭으로 제작된 구멍주위의 결함을 유한요소 해석으로 고려하는데 어려움이 있기 때문에 레이저 가공과 같이 전단면만 고려하여 해석하였다. 유한요소 해석으로 펀칭 제작된 구멍 즉 롤오버(Rollover), 전단면(Shearing Zone), 파단면(Fracture Zone), 버(Burr)등이 고려된 구멍의 확장 비를 구하기 위하여 구멍 확장비에 대한 펀칭 효과의 고찰이 선행되어야 한다[6, 7, 8].

이를 위하여 본 연구에서는 구멍 확장 시험기를 통하여 레이저 가공과 펀칭조건으로 만들어진 구멍을 갖는 재료에 대해서 원추형 펀치에 의한 확장시험을 수행하였다. 펀칭조건인 경우에는 펀칭 클리어런스(Punching Clearance)와 재료의 재질을 달리하여 구멍 확장비에 미치는 영향을 알아 보았다. 또한 연성과파괴조건과 연계한 유한요소해석[9]을 통하여 구멍 확장비를 예측하였고 실험결과와 비교하였다.

본 연구를 통해 확보된 샤시용 고강도 열연강판소재 제 특성 데이터 및 성능평가 결과는 향후 샤시부품 경량화를 위한 고강도강의 확대 적용에 많은 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 고장력강의 성형성 평가

2.1 열연소재

자동차용 열연소재는 냉각방식에 따라 결정되는 미세 구조로 분류된다. 페라이트-페어라이트 강(Ferrite-Pearlite Steel)은 SAPH(Steel Automobile Press Hot rolled) 계열의 열연강판으로 인장강도 370~ 440MPa급이 사용되고, 페라이트-마르텐사이트 강(Ferrite-Martensite Steel)은 DP(Dual Phase)계열의 열연강판으로 인장강도 590Mpa급이 사용되고, 페라이트-베이나이트강(Ferrite -Bainite Steel)은 FB (Ferrite-Bainite)계열의 열연강판으로 인장강도 540~590MPa급이 사용되는데 DP강과 FB강은 780MPa 급도 양산적용 하기 위하여 선행 연구를 하고 있다. DP강이 FB강 대비 같은 인장강도에서 연신율이 상대적으로 높고, HSLA(High Strength Lower Alloy)강은 DP강, FB강 대비 인장강도가 낮은 강종으로 성형성이 좋아 자동차용 열연소재로 많이 사용하고 있는 재료이다.

본 연구에서는 4종류의 열연 고장력강판 소재인 인장강도 440MPa의 SAPH440, 인장강도 540MPa의 FB540, 인장강도 590MPa의 FB590/ DP590로 연구를 수행하였다.

Table 1 Tensile properties of tested materials

Materials	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	n	R_m
SAPH440 2.3t	350	441	29	0.119	1.07
FB540 2.3t	490	543	25	0.125	0.98
FB590 2.9t	530	615	21	0.107	0.93
DP590 2.3t	450	685	26	0.183	1.04

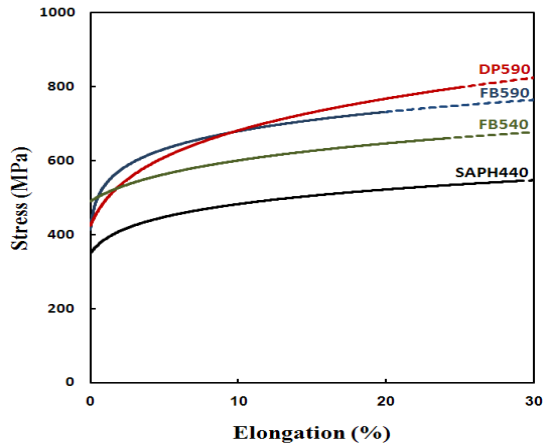


Fig. 1 Stress-strain test curves of HSS

Table 2 Failure strain at tensile tests

Materials	$(\bar{\epsilon}_f)_{uniaxial}$
FB590 2.9t	0.682
DP590 2.3t	0.614

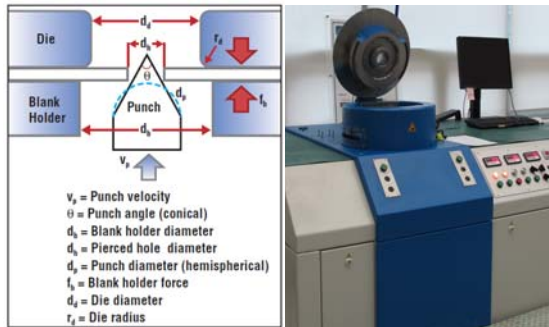


Fig. 2 Hole expansion test and its machine

2.2 인장 실험

고강도강의 사시부품 적용을 위하여 소재의 신율 및 성형성 저하로 인해 양산적용이 제한적일 수밖에 없었다. 그러나 최근 국내에서도 금속의

조직을 제어하여 소재 강도향상 외에도 신율 및 성형성을 확보한 변태강화형 고강도강이 국내 철강사에서 확대 개발됨에 따라 사시부품에 확대 적용이 되고 있다. Table 1 는 본 연구에 사용된 소재의 인장실험을 통하여 특성을 비교한 자료로, 4 종류의 소재를 두께 2.3t 와 2.9t 의 항복강도, 인장강도, 파단연신율, 평균 이방성계수를 나타내고 있다. Fig.1 은 Table 1 소재의 인장실험 결과값으로 DP590 이 인장강도 대비 항복강도가 낮은 대표적인 저항복비형 물성을 나타내고, FB590 대비 소재의 스프링백 및 성형성이 향상된 강재이다.

Table 2 는 유한요소해석을 통한 구멍 확장비의 예측에 사용한 수정 Cockcroft-Latham 식의 계수를 측정하기 위해 사용한 인장실험(Table 1)에서 측정 한 파단 변형률을 나타내었다.

3. 구멍 확장 실험

3.1 실험방법

구멍 확장실험은 기초구멍 직경은 10mm 로 하고 시편크기는 가로 세로 각 135mm 로 하였고, 구멍 확장비에 대한 영향을 파악 하기 위하여 SAPH440, FB540, FB590 및 DP590 의 4 강종을 레이저 가공과 펀칭으로 제작 하였다. 펀칭으로 가공한 시편은 클리어런스를 2%, 9%, 13.5% 및 22.5%로 하여 총 5 종의 조건으로 실험 하였다.

구멍 확장 실험은 Fig. 2 구멍 확장 실험기와 같이 시편을 장착하여 버 방향은 위로하고, 다이 모서리 반경(r_d)은 5mm, 다이 내경(d_d)은 50mm, 펀치 원추각도(θ)는 60°로 하여 구멍 확장실험시 펀치 상승 속도(v_p)는 10mm/min 이고, 블랭크홀더 하중(F_b)은 10ton 으로 실험을 수행 하였다.

구멍 확장비는 초기 구멍의 직경과 최종 파단 시 구멍의 직경비로 식(1)과 같다.

$$\lambda = \frac{D_h - D_o}{D_o} \times 100 \quad (1)$$

λ : Hole expansion ratio (%)

D_o : Original hole diameter (10mm)

D_h : Hole Diameter after fracture (mm)

3.2 구멍 확장비

구멍 확장실험의 기초구멍을 10mm 로 레이저와 펀칭으로 제작 시 가공 후 구멍 주위의 가공경화

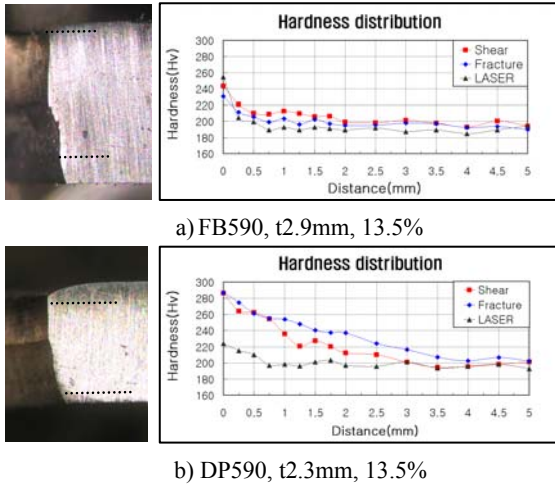


Fig. 3 Blanked edge shapes and micro-hardness profiles of the FB590 and DP590

(Work hardening)의 차이를 Fig. 3 에서와 같이 알 수 있다. FB590 과 DP590 소재 기초구멍의 레이저 가공 및 13.5% 클리어런스 펀칭 끝단부의 미소경도(Micro-hardness)를 측정결과로 레이저가공 구멍은 가공 시 열 영향으로 끝단부의 0.5mm~0.75mm 까지 모재보다 높은 경도 값을 나타내고, 펀칭 구멍은 가공경화로 FB590(a)은 전단면부 2.0mm 파단면부 0.75mm, DP590(b)은 전단면부 3.0mm 파단면부 4mm 까지 모재보다 높은 경도 값을 나타내고 있다. FB590 과 DP590 의 레이저가공 시 끝단부의 열영향부 깊이는 유사하나, 펀칭 구멍은 가공경화로 DP590 이 FB590 보다 전단면부는 1.0mm 파단면부는 3.25mm 모재경도보다 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

고장력강관의 구멍 확장 실험은 원추 펀치가 상승하면서 구멍이 확장됨에 따라 구멍 바깥 쪽에서부터 파단이 발생된다. Fig. 4 는 FB590 2.9t 소재를 레이저 가공한 경우와 펀칭 클리어런스를 각각 2%, 9%, 13.5%, 22.5%로 한 경우의 구멍 확장 실험 결과이다. HER 값이 레이저 가공으로는 143%이고, 펀칭 가공으로는 클리어런스가 13.5%와 22.5%에서 101%~102%로 가장 높다. Fig. 5 는 DP590 2.3t 를 Fig. 4 의 FB590 과 같은 조건으로 구멍 확장 실험결과로 HER 값이 레이저 가공으로는 116.4% 이고, 펀칭 가공으로는 클리어런스가 13.5%에서 58.7%로 가장 높다. 각각의 실험 데이터는 동일 조건 하에서 5 회 반복 실험하여 평균값을 택하였다. 이 두 실험결과에서 유사한 인장강도(590MPa 이상)를

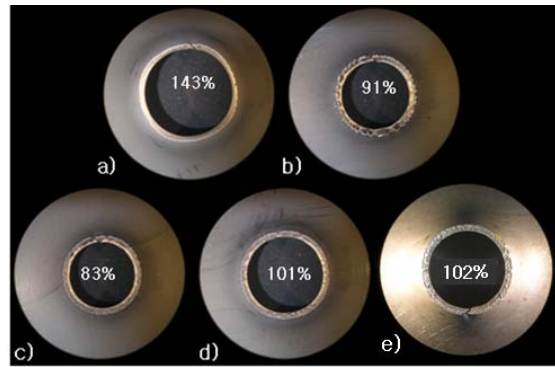


Fig. 4 Typical fractures of FB590 2.9mm materials observed in hole expansion test for various clearances: a) Laser b) 2% c) 9% d) 13.5% e) 22.5%

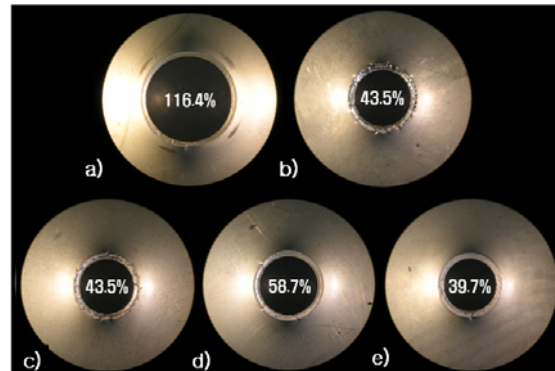


Fig. 5 Typical fractures of DP590 2.3mm materials observed in hole expansion test for various clearances: a) Laser b) 2% c) 9% d) 13.5% e) 22.5%

보유한 소재라도 13.5%의 클리어런스 기준으로 FB590 이 DP590 보다 HER 값이 42%더 높은 것은 소재 제작 시 조건에 따라 구멍확장성이 달라지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 소재의 비 방향을 위로 하여 구멍 확장 실험한 결과를 나타낸다. 그림으로부터 구멍을 레이저 가공한 소재가 가장 높은 구멍확장비를 가지며 펀칭 가공한 경우는 클리어런스의 증가에 따라 전체적으로 구멍확장비가 증가하는 경향을 보인다. DP590 의 경우는 13.5%의 클리어런스의 소재가 상대적 높은 HER 값을 갖고 22.5%의 클리어런스에서 구멍확장비가 감소하는 이유에 대해서는 소재의 파단면에 대한 정밀한 분석이 필요할 것으로 생각된다.

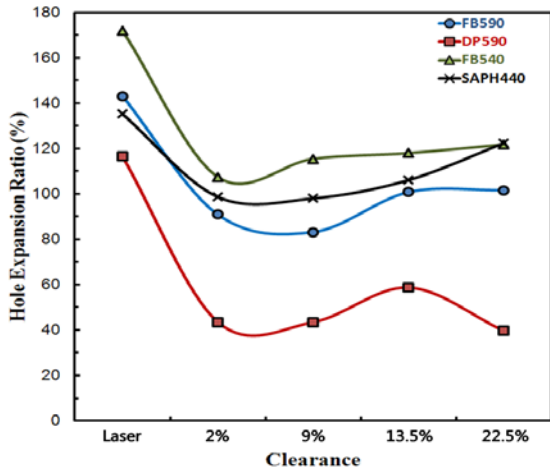


Fig. 6 HER values and clearance changes for four different materials

이상의 실험결과로부터 현장에서 타발금형 제작 시 사용하는 클리어런스는 8%~9%를 주로 사용하는데, 홀 플랜징(Hole Flanging) 가공을 받는 재료의 경우는 소재에 따라 다소 차이는 있을 수 있으나 HER 값이 높은 13.5%의 클리어런스로 가공하는 것이 유리하다고 판단할 수 있다.

또한 Fig. 7 에서와 같이 DP590 이 파단 연신율이 FB540 과 동등 수준이지만 가공성화특성이 DP590 강이 더 커서 성형한계선도(forming limit diagram, FLD)로 평가하는 장출 성형성이 더 우수하지만[10], HER 값은 FB590 보다 40% 정도 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 파단연신율과 가공성화특성은 구멍 확장성과 상관성이 크지 않은 것으로 판단된다.

4. 구멍 확장 유한요소해석

4.1 유한요소모델링

재료의 편칭공정 및 구멍 확장공정의 유한요소 해석을 위해 DEFORM 2D V9.0 을 이용하였으며 파단 발생이 예상되는 부위의 요소를 작게 분할하여 파단면의 특성이 반영되도록 하였다. 사용된 요소는 4 절점 축대칭 요소이며 요소 개수는 2000 개이다

Fig.8 는 금형 클리어런스를 재료 두께의 13.5% 인 편칭공정에 대한 대표적인 유한요소 해석 모델을 나타내었다

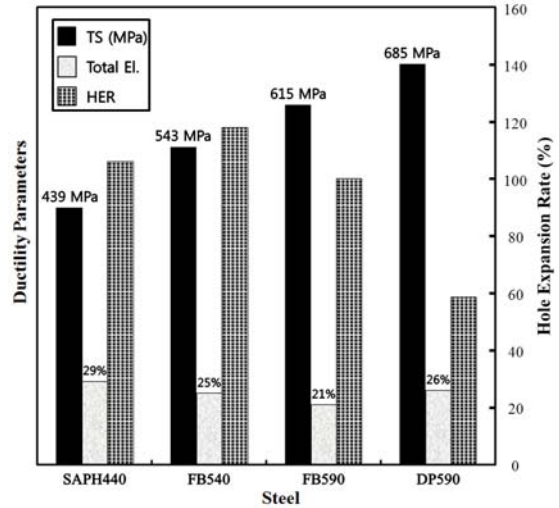


Fig.7 Relationship between HER and tensileproperties for four different materials

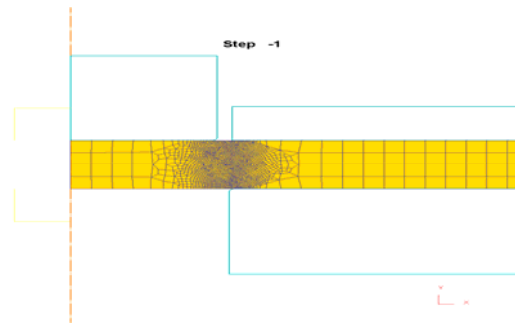


Fig. 8 FEM modeling for punching test

4.2 유한요소해석 결과

재료의 구멍 확장비를 평가하기 위한 유한요소 해석에 있어서 다양한 클리어런스에 대한 편칭공정을 먼저 해석한 후 원추각도 60°인 원추형상의 공구를 이용한 구멍 확장실험을 해석하였다. 편칭공정에서의 재료의 편칭공정 및 구멍 확장공정에서 발생하는 재료의 파단을 유한요소 해석하기 위한 재료의 파단조건으로는 수정 Cockcroft-Latham 에 의한 다음의 연성파단조건식을 이용하였다.

$$I = \frac{1}{A} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

여기서 σ^* , $\bar{\sigma}$, $\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}_f$ 는 각각 최대 주응력, 등

가응력, 등가변형률, 과단변형률이다.

본 연구에서는 기본적으로 Hill 의 1948 년 이방성 항복조건식을 사용하지만 실험에 사용한 대부분의 재료에서 평균 이방성계수는 약 1.0 값을 가지기 때문에는 식(2)는 다음과 같이 나타내진다.

$$A = (\epsilon_{1f})_{tensile} \quad (3)$$

따라서 식 (3)으로부터 재료상수 A 는 재료의 단축인장에서의 과단변형률과 같다.

Fig. 9 에 펀칭공정 및 구멍 확장공정의 해석 예를 나타내었다. 유한요소해석은 펀칭 공정에서 가공된 판재의 버 방향을 위로 한 구멍 확장실험만을 대상으로 하였다.

실제 유한요소 해석에서는 재료의 전단공정에서 과단발생 예상부위의 요소에서 I 값을 추적하여 I 값이 1.0 에 달한 경우에 재료가 과단된 것으로 하여 전단공정을 수행한다. 또한 펀칭 가공 후의 재료를 이용하여 구멍확장실험 해석을 수행할 때는 전단부위의 요소가 주로 원주방향으로 단축인장 변형상태에 있기 때문에[3] 전단면에 있는 요소의 원주방향 변형률이 Table 2 에 나타난 인장 실험에서 측정된 과단 변형률에 달한 경우에 홀부에서 과단이 발생한 것으로 하여 구멍 확장비를 계산하였다.

Fig. 10 은 FB590 소재에 대해서 클리어런스를 2%, 9%, 13.5%, 22.5%로 실험한 HER 값과 유한요소해석에서 구한 HER 값을 비교한 결과이다. 유한요소해석 결과로부터 클리어런스가 증가할수록 구멍확장비가 증가하다가 22.5%에서 HER 값이 감소하는 경향을 잘 나타내고 있으나, 실험결과와 같이 클리어런스가 22.5% 에서 13.5%와 유사한 HER 값을 나타내는 현상은 충분히 재현하였다고 볼 수 없다.

5. 결론

본 연구에서 구멍 확장비에 미치는 영향을 알아보기 위하여 구멍작업을 레이저 가공과 펀칭가공시 클리어런스를 2%, 9%, 13.5%, 22.5%로 하여 실험을 수행하였고, 유한요소해석에 연성파괴기준을 적용하여 구멍 확장 과정에서 재료의 과단을 예측하고 이를 실험결과와 비교하였다. 또한 재질을 SAPH440, FB540, FB590, DP590 의 4 종 고장력강을 이용하여 다음과 같은 결과를 확인할 수 있다.

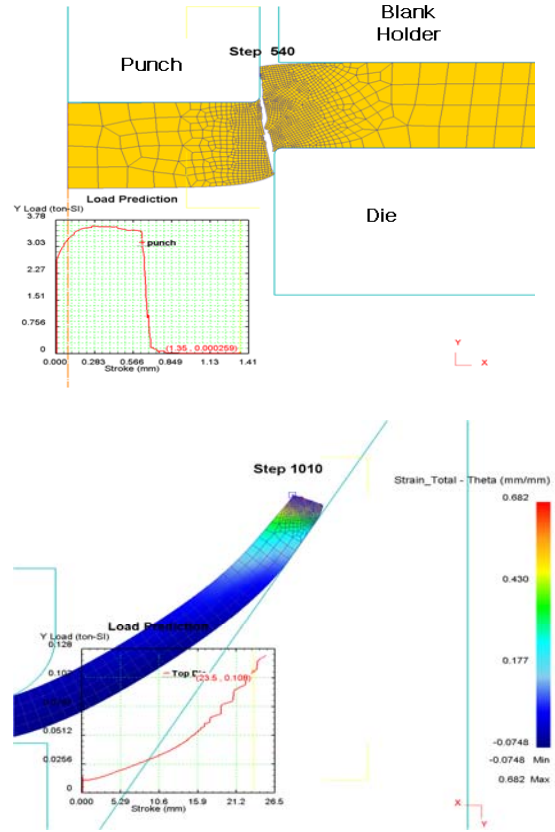


Fig. 9 FEM simulation results for punching and hole expansion tests

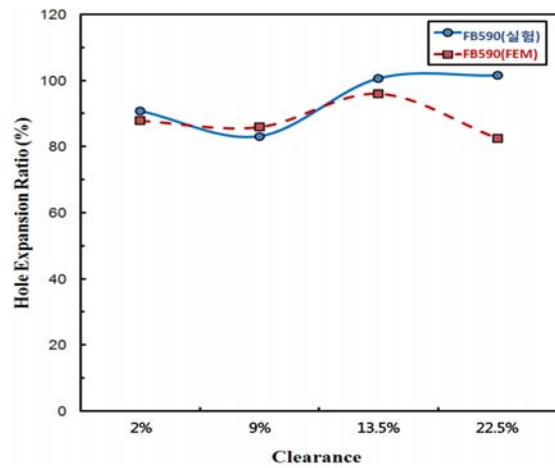


Fig.10 Comparisons of FEM results and experiments for various clearances (FB590)

(1) 홀 플랜징성형에는 소재별로 차이가 있을 수 있으나 FB540, FB590 과 DP590 은 HER 값이 가장 높은 13.5%의 클리어런스로 펀칭 가공하는 것이 유리하다고 판단할 수 있다.

(2) DP590 소재는 파단연신율이 저장도강인 FB540 대비 동등수준의 성형성을 나타내고, 구멍 확장성인 HER 값은 FB590 보다 40% 낮은 값을 갖는다는 것을 고려하면 파단연신율은 구멍 확장성과 상관성이 크지 않다고 생각된다.

(3) FB590 이 DP590 보다 구멍확장성인 HER 값이 높은 것은 소재 제작시 조건으로 변화된 조직 차이로 펀칭 끝단부의 미소경도측정 결과에서와 같이 가공경화영역이 FB590 이 작아 균열이 상대적으로 늦게 일어나 HER 값이 높게 나타나는 것으로 판단 할 수 있다.

(4) FB590 에 대한 유한요소해석 결과는 클리어런스가 2%에서 13.5% 까지는 HER 값이 상승하는 실험결과를 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 22.5%의 클리어런스에서는 상이한 결과가 나타나는데 이는 향후 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

(5) DP 강보다 FB 강이 구멍 확장성인 HER 값이 높아, 높은 홀 플랜징 성형을 요구하는 제품인 자동차 샤시부품 암(Arm)류 및 휠 허브(Wheel Hub) 는 FB 강 소재를 적용하는 것이 유리하다고 판단 할 수 있다.

본 연구 결과를 바탕으로 자동차 샤시부품의 신뢰성을 높여 고강도강 적용가능성에 대해 기초 자료가 될 것 이고, 또한 스틸계 경량 샤시부품 개발 효과를 올리며 소재의 고강도화와 경량화에 일조할 수 있기를 기대한다.

후 기

본 연구에 도움을 주신 현대자동차 금속재료 연구팀과 현대제철 자동차응용연구팀의 구멍 확

장 실험을 위하여 장비를 지원해주신 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] W. S. Lee, T. W. Kwon, Y. R. Cho, D. U. Kim, 2004, Development of automotive chassis parts by application of hot rolled high strength steel, KSAE 2004 Autumn Conf., pp. 1476~1481.
- [2] Alex A. Konieczny, T. Henderson, 2007, Product Design Considerations for AHSS Displaying Lower Formability Limits in Stamping-With Sheared Edge Stretching, Great Designs in Steel Seminar.
- [3] J. S. Lee, Y. K. Ko, H. Huh, H. K. Kim, S. H. Park, 2005, Development of the technique for prediction of the hub-hole crack with the punching effect, KSTP 2005 Autumn Conf., pp. 362~365.
- [4] H. Takuda, K. Mori, H. Fujimoto, N. Hatta, 1999, Prediction of forming limit in bore-expanding of sheet metals using ductile fracture criterion, J. Mater. Process. Tech., Vol. 92~93, pp. 433~438.
- [5] M. Soderberg, 2006, Finite element simulation of punching, MASTER'S THESIS of Lulea University
- [6] N. Mole, B. Stok, 2009, Fine element simulation of sheet fine blanking process, Int. J. Master Form 2009, Vol. 2, pp. 551~554.
- [7] N. Hatanaka, K. Yamaguchi, N. Takakura, T. Iizuka, 2003, Simulation of sheared edge formation process in blanking of sheet metals, J. Mater. Process. Technol. 140(2003), pp. 628~634.
- [8] P. Picart, V. Lemiale, A. Touache, J. Chambert, 2005, Numerical simulation of the sheet metal blanking process, VIII International Conference on Computation Plasticity.
- [9] Y. S. Kim, Mechanics of Plastic Deformation, Theory of Engineering Plasticity (2010).
- [10] POSCO, Automotive Steel Data Book 2010.