

초고강도 강판 성형 시의 스프링백 해석 및 금형 소재 적합성 검토

오인석¹ · 윤동렬² · 조준행² · 이명규³ · 김현영⁴ · 김형종^{4#}

Analysis of Springback and Die Material Suitability in the UHSS Sheet Forming Process

I. S. Oh, D. Y. Yun, J. H. Cho, M. G. Lee, H. Y. Kim, H. J. Kim

(Received May 8, 2020 / Revised June 1, 2020 / Accepted June 17, 2020)

Abstract

In this study, formability and springback behavior of 1.5 GPa grade ultra-high strength steel (UHSS) sheet were predicted through the finite element simulation, and structural stability of the forming dies was verified by the coupled forming-structural analysis. Uniaxial tension and uniaxial tension-compression tests were performed to obtain experimental data for modeling the springback properties of the sheet material. The springback values predicted by simulation were compared with those from actual measurements. The results calculated from the kinematic hardening model were found to be much more accurate than those from the isotropic hardening model. Deformation of the forming die and springback of the product were calculated by the coupled forming-structural analysis. The higher the strength of the die material, the smaller the surface displacement of the die and the springback of the product. The internal stresses of the dies made of three materials, FC300, FCD550 and STD11 were compared with the yield stress of each material. The results provided a basis for determining the most suitable material for each part of the die set. As a result, simulation techniques have been established for predicting formability and springback in the UHSS sheet forming process.

Key Words: Ultra-high-strength steel, Springback, Coupled Forming-structural Analysis, Die Material, Kinematic Hardening, PAM-STAMP

1. 서 론

자동차 산업에서 최근 10여 년간 차체 경량화 관련 이슈에 많은 관심이 집중됨에 따라 기술개발도 상당한 수준까지 이루어졌다. 그 산업적 배경으로는 우선 Euro 6와 같은 배출가스 규제가 여러 나라에서 시행되면서 자동차 회사들이 이 기준에 맞는 연비

를 충족하기 위하여 차체를 더 가볍고 얇은 부품으로 교체할 수밖에 없는 데다, 자동차 충돌 안전성을 위한 미국과 유럽의 규제가 강화되고 있어 차체의 강성도 향상시켜야 하는 상황을 들 수 있다. 이러한 두 가지 상반된 조건을 충족하기 위하여 차체의 경량화와 구조적 강건화를 동시에 추구해야 하는 것이 제조사가 직면한 과제가 되었다.

연비와 안전성은 자동차 매출과 직결되어 있으므로 경량화는 제조사의 존폐에까지 연결된 문제라 하여도 과언이 아니다. 이 문제의 해결책으로 비강도가 높은 초고강도강(ultra-high-strength steel, UHSS) 소재의 개발과 적용이 점점 확산되고 있다. 또한,

1. 강원대학교 대학원 융합시스템공학과, 학생

2. 세원물산(주), 대리

3. 서울대학교 재료공학부, 교수

4. 강원대학교 기계의용공학전공, 교수

Corresponding Author: Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University, 1 Gangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Korea, E-mail: khjong@kangwon.ac.kr, ORCID ID: 0000-0002-0486-5648

2019년도부터 전세계적으로 친환경 차량인 전기차의 성장세가 뚜렷하다. 내연기관 없이 배터리를 사용하여 1회 충전으로 최대의 주행거리를 얻기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 환경의 변화로 차체 경량화 연구는 더욱 고도화되고 있는 추세이다.

특히, 1.5 GPa 이상의 인장강도를 가진 구조용 부품을 제조할 수 있는 열간판재성형(hot press forming, HPF) 공법이 소개된 이후 상당한 기술적 진보가 이루어져 널리 적용되고 있다. 이 공법은 소재 가열을 통해 성형성을 높이고, 성형 후 금형 내에서 급냉처리로 1.5 GPa 이상의 높은 강도를 가진 제품을 생산할 수 있다. 소재로는 이 공정에 특성화된 보론강(boron steel)이 주로 사용된다. 그러나 열간판재성형 공정은 고온에 견뎌야 하는 고가의 장비, 긴 제조공정, 가열챔버나 냉각장치 등 부가적인 제조설비, 가열-냉각에 의한 제품 품질의 산포 등 많은 문제가 수반되므로 성형성과 고강도를 얻기 위한 시간적, 금전적 손실이 냉간판재성형 공정에 비해 크다[1, 2].

한편, 냉간성형 공정에 사용되는 강판의 경우에도 철강회사들의 지속적인 기술개발로 그 강도가 점점 향상되어 왔다. 최근 인장강도가 1 GPa을 넘는 이른바 ‘기가스틸(giga steel)’도 개발되어 그 적용범위가 급속도로 확대되고 있다. 2013년에는 일본의 자동차 브랜드에서 최초로 1.2 GPa급 소재를 사용하여 냉간판재성형 공정으로 B필라 양산에 성공한 바 있다. 현재 1.5 GPa급 소재를 냉간성형에 적용하는 단계까지 이르렀으며, 열간성형에서와 거의 같은 수준의 강도를 가진 제품을 제조할 수 있을 것으로 예상되고 있다. 만약 1.5 GPa급 소재로 냉간성형이 가능하다면 비싸고 복잡한 열간성형을 대체할 수 있겠지만, 냉간 공정에서는 강도가 높은 소재일수록 스프링백은 커지고 성형성은 나빠지는 문제를 해결해야 하는 어려움이 따른다[3, 4].

본 연구에서는 1.5 GPa급 소재로 자동차 크로스멤버 제품을 냉간성형할 때 문제가 될 것으로 예상되는 점을 공정 시뮬레이션을 통해 미리 해결하는 데 초점을 맞췄다. 첫째, 낮은 성형성과 높은 스프링백의 예측, 둘째, 고강도 소재의 성형 시 발생할 수 있는 금형 파손 문제에 관한 선행 기준 제시에 목표를 두고 성형공정 및 스프링백 보정 해석을 수행하였다. 또한, 성형공정과 금형구조의 연계해석을 수행하여 성형 시 발생하는 금형 변형과 내부응력

을 계산하고, 금형 변형이 제품의 스프링백에 미치는 효과를 확인하였다. 그 분석을 토대로 해당 공정에 알맞은 금형 재질을 선정하는 등 공정설계와 금형설계의 적합성을 분석하였다. 본 연구를 위해 상용 유한요소해석 소프트웨어 PAM-STAMP®[5]를 사용하였다.

2. 성형공정 해석

Fig. 1은 본 연구 대상 제품의 형상과 그 성형공정의 개념도이다. 프레스에 고정된 하형(lower die) 위에 소재를 장착하고 그 중앙부를 하부패드(lower pad)로 고정된 후 상형(upper die)이 닫히는 공정으로 진행된다. 패드에 작용하는 하중은 80 ton이다.

소재는 두께 1 mm의 SPFC1470Y 강판이며, 인장-압축 시험으로 얻은 응력-변형률 그래프는 Fig. 2와 같다. 이 시험 데이터로부터 해석에 필요한 물성 변수들을 구하였다.

유한요소해석에서 요소는 판재성형에 적합한 셸(shell) 타입을 사용하였고, 요소 크기는 적용 요소세분화 기능을 사용하여 1 mm까지 감소되도록 설정하였다. 중력 처짐, 성형, 스프링백의 순서로 다중 연결 해석을 진행하였다. 제품 성형에 가장 문제가 될 스프링백의 해석 정확도를 높이기 위하여 Yoshida-Uemori 이동경화(kinematic hardening, KH) 모델[6, 7]을 사용하였으며, 등방경화(isotropic hardening, IH) 모델을 사용한 경우와 성형성, 스프링백 등의 결과를 비교하였다.

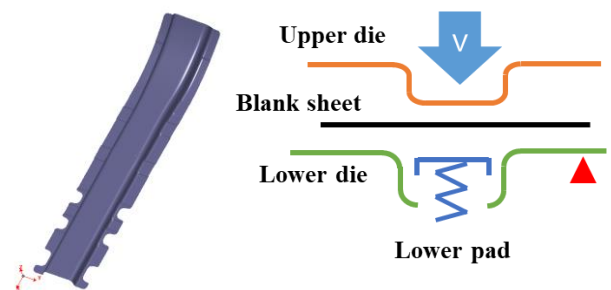


Fig. 1 Cross-member product to be analyzed and schematic of its forming process

2.1 성형성 확인

SPFC1470Y 재료는 최대 연신율이 9% 정도에 불과하여 파단이 쉽게 발생한다. 성형 해석의 결과는

Fig. 3과 같으며, 바닥 부분의 두께감소율이 11%를 넘어 파단기준을 초과하였다. 이동경화와 등방경화 모델이 서로 유사한 성형 거동을 보였으며, 실물에서도 성형해석에서 예측한 것과 동일한 위치에서 파단이 발생하였다. 파단 부위의 형상 반지름이 2 mm로 너무 작은 것이 문제라 판단하고 3 mm 형상으로 변경하여 파단 문제를 해결하였다. Fig. 4는 이렇게 수정한 금형을 사용하여 파단 없이 성형한 제품의 사진이다.

2.2 스프링백 및 금형 보정

스프링백은 소재 강도에 대체로 비례하므로 초고강도강의 경우 특히 치수정밀도에 미치는 영향이 심각하다. 따라서 스프링백의 정확한 예측과 필요시

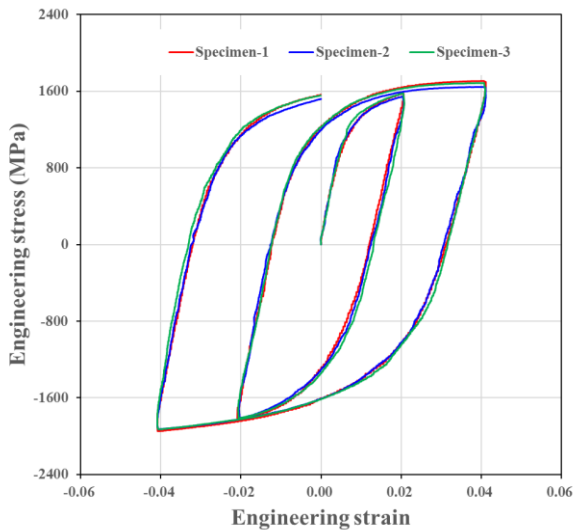


Fig. 2 Tension-compression behavior of SPFC1470Y sheet

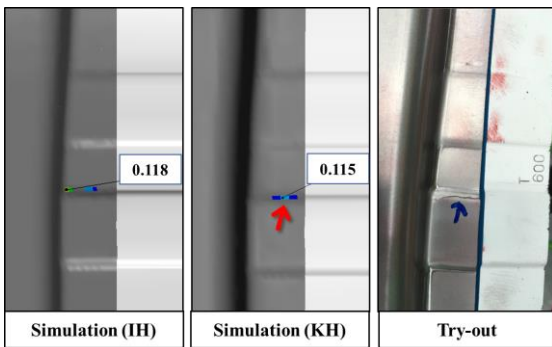


Fig. 3 Comparison between FEA and try-out results

금형 보정을 위한 해석적 방법이 시간적, 금전적 절약을 위해 활발히 적용되고 있다.

Fig. 5는 성형 후 본 제품 전용 지그에서 스프링백 양을 측정하는 사진이다. 성형 제품에 표시된 네 군데 위치에서 바닥을 기준으로 제품 끝단까지의 높이를 재고 있다. Fig. 6는 이렇게 측정된 결과를 해석 결과들과 비교하여 보여준다. 스프링백이 가장 큰 끝단 A를 제외하면 Yoshida-Uemori 이동경화 모델을 사용한 해석 결과는 실제 측정값 기준 평균 5.3%의 오차율로 거의 일치하나, 등방경화 모델을 사용한 해석 결과는 실험값과 평균 41.0%의 큰 오차율을 나타내었다. 본 연구의 대상 소재가 자동차용 강판 중 가장 높은 강도를 가지고 있기 때문에 두 경화 모델 간의 차이가 극명하게 드러난 것으로 보인다.

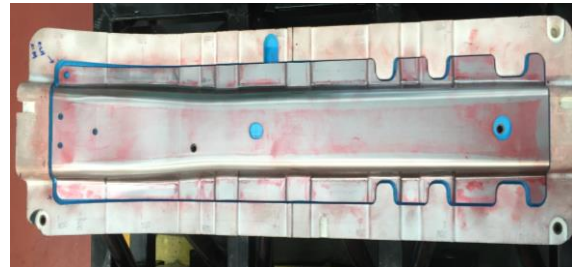


Fig. 4 Try-out results after die correction

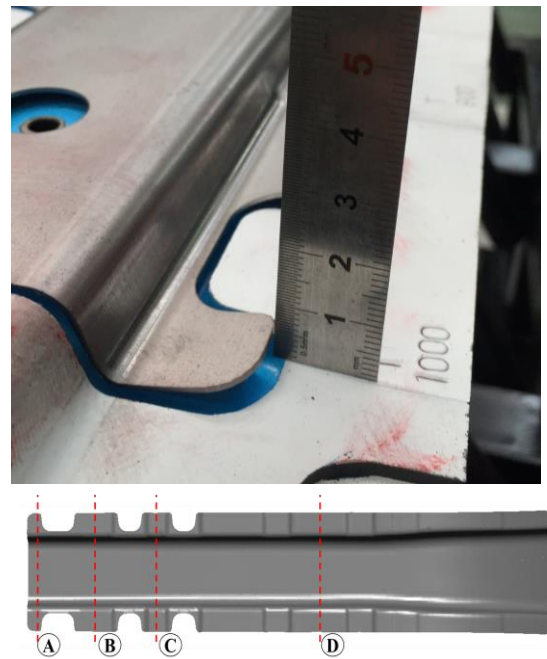


Fig. 5 Measurement of springback

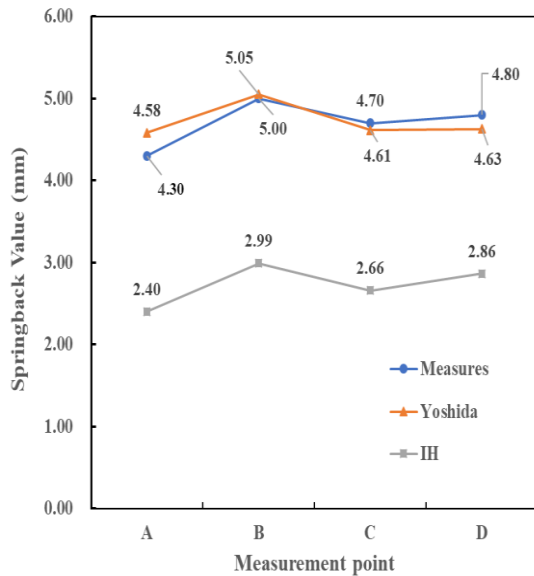


Fig. 6 Comparison of springback between FEA and measurement

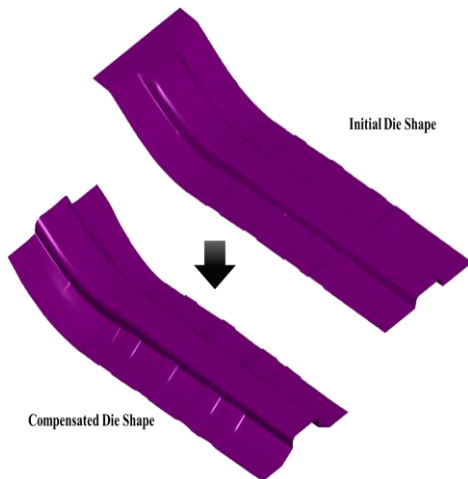


Fig. 7 Compensated die shape

이후 PAM-STAMP의 금형 자동보정 기능을 활용하여 스프링백을 보정할 수 있는 금형 형상을 제안하였다. 이 기능은 스프링백이 발생한 변위만큼 금형 치수를 반대로 보정함으로써 스프링백 후 목표 설계된 형상을 얻고자 하는 방법이다. 프로그램이 자동적으로 금형을 수정하여 원하는 제품 치수를 얻을 때까지 반복한다. 4회의 스프링백 보정을 거쳐 최종적으로 제안한 금형의 형상은 Fig. 7과 같다. 이 금형을 사용하였을 때 목표 형상에 1 mm 오차 이내로 부합하는 결과를 얻어 제품화에 성공하였다.

3. 성형공정-금형변형 연계해석

3.1 연계해석 설정

초고강도강의 프레스 공정은 소재의 낮은 성형성과 큰 스프링백 외에도 또 다른 문제가 있다. 1.5 GPa급 소재의 경우 금형 재료보다 강도가 높기 때문에 금형 재료의 선택이 적합한지 확인할 필요가 있다. 금형 표면을 강체로 설정하여 성형공정을 해석하는 기존 방식에 금형의 탄(소)성 변형에 의한 표면 형상 변화를 실시간으로 업데이트하여 연계해석을 수행할 수 있도록 유한요소 프로그램이 최근 개선되었다[8].

Fig. 8은 성형공정과 금형변형의 연계해석 방법을 설명하는 그림이다. 그 절차를 요약하면,

(1) 기존 방식대로 금형 표면을 강체 셀로 표현하여 성형공정 해석 일부를 진행한다.

(2) 이때 계산된 소재와 금형 간의 반력을 금형 솔리드 모델에 하중조건으로 입력하여 구조해석을 수행한다.

(3) 금형 구조해석을 통하여 계산된 금형의 변형 형상에 따라 금형 표면을 수정하고 다시 다음 단계의 성형공정 해석을 진행한다.

(4) 금형 표면 형상 업데이트는 해석 시간과 비용을 고려하여 전체 성형공정 동안 적절한 시간 간격으로 여러 차례 반복할 수 있다.

솔리드 요소를 사용하여 성형해석과 금형 구조해석을 한꺼번에 해석할 수도 있지만, 그 방법은 수렴성과 해석시간을 고려할 때 채택하기 어려운 수준이므로 본 연구에서와 같은 연계해석 방식이 합리적이라고 판단된다.

한편, 기존의 다른 연구에서 성형해석이 끝난 후 최종 반력을 금형 구조해석에 반영하여 일방향으로 한번만 재해석한 사례는 있으나, 본 연구에서는 두 가지 해석 사이에 수정된 금형 형상 데이터가 수시로 공유되는 것이 다른 점이라 할 수 있다. 본 연구에서는 상형다이가 0.5mm 이동할 때마다 데이터 공유가 되도록 설정하였다[9-11].

이 제품의 성형을 위하여 고려하는 금형 재료는 FC300, FCD550, STD11의 3종이며, 각 재료의 기계적 물성은 Table 1과 같다. FC300, FCD550, STD11의 순서로 강도와 내마모성 등이 높아지며 재료 단가 또한 올라간다. 금형은 하형, 상형 및 하부패드 등 세 부분으로 되어 있으며, 하형의 경우 중앙에 패드가 위

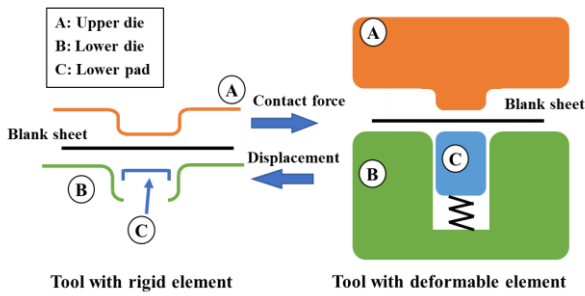


Fig. 8 Coupled forming-and-structural analysis

Table 1 Mechanical properties of tool materials

Properties	FC300	FCD550	STD11
Young's modulus (GPa)	150	178	207
Poisson's ratio	0.25	0.25	0.30
Yield strength (MPa)	228	375	1,034
Tensile strength (MPa)	350	586	1,158

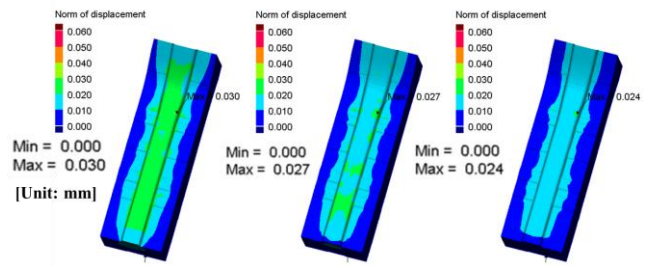
치하기 때문에 좌우 양쪽으로 나뉘어서 프레스에 장착된다.

3.2 금형 변형 및 응력 분석

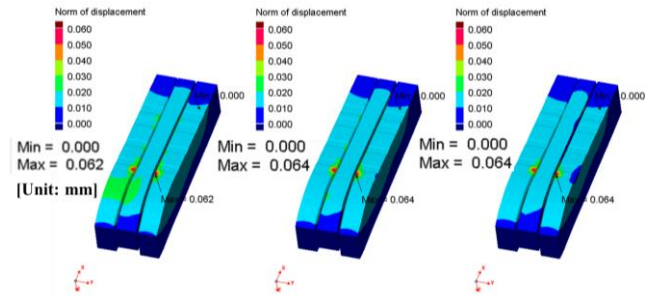
세 가지 금형 재료에 대하여 각각 연계해석을 수행한 결과, 재료별로 금형 표면의 변위와 유효응력 (von Mises stress) 등에 차이가 있었다. 본 해석에서는 실제 공정에서와 같이 금형이 완전히 닫히고 4 ms를 기다리는(holding) 공정으로 구현하였다.

Fig. 9는 해석이 끝난 후 금형 표면의 최종 변위 분포를 보여주고 있다. 상형과 하부패드는 전체적으로 0.03 mm 이하의 작은 변위를 보였으나, 하형 코너부에서는 상당히 큰 변위가 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 10은 프레스 공정에 따른 하형의 최대 변위값의 변화를 금형 재료별로 비교한 그래프이다. 금형이 닫히는 순간 최대 변위가 발생하였으며, FC300, FCD550, STD11의 순서로 각각 0.259, 0.227, 0.197 mm의 값을 나타냈다. 이후 금형 닫힘이 유지되는 동안 변위가 복귀하여 재료 간의 차이가 미미해졌다. 이는 해석 최종 시점의 결과만으로 판단해서는 안 된다는 것을 의미한다.

Fig. 11은 금형 소재별 스프링백 양의 차이를 보여 준다. 금형을 강체로 모델링한 결과를 기준으로 그 차이를 계산하였다. 금형의 탄성계수와 항복강도가



(a) Upper die (FC300, FCD550, STD11, from left)



(b) Lower die and pad (FC300, FCD550, STD11, from left)

Fig. 9 Distribution of displacement on the die surfaces

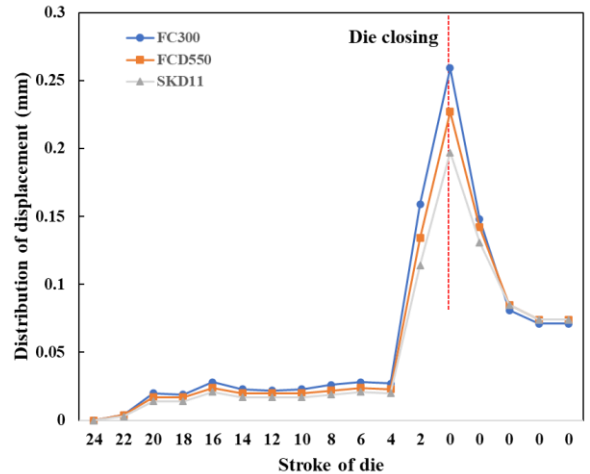


Fig. 10 Variation of the maximum displacement on the lower die

가장 낮은 FC300 소재가 0.057mm로 가장 큰 차이를 보였고, 강도가 가장 큰 STD11 소재가 0.012mm로 가장 작은 차이를 보였다. 미량이지만 금형 재질이 제품의 스프링백에 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 12의 유효응력 분포를 살펴보면 최대값은 역시 최대 변위를 나타냈던 하형의 같은 위치에서 발

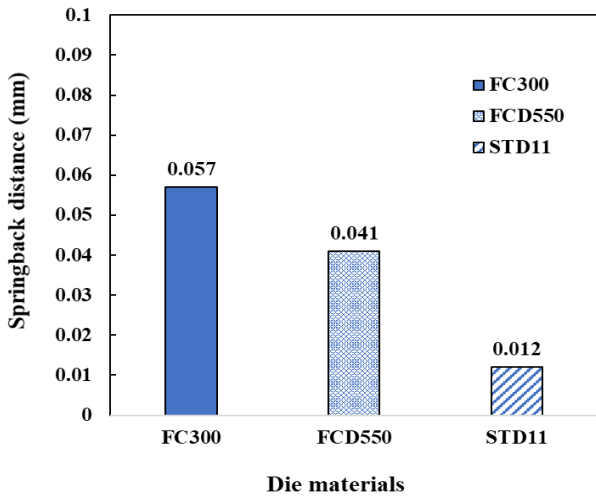


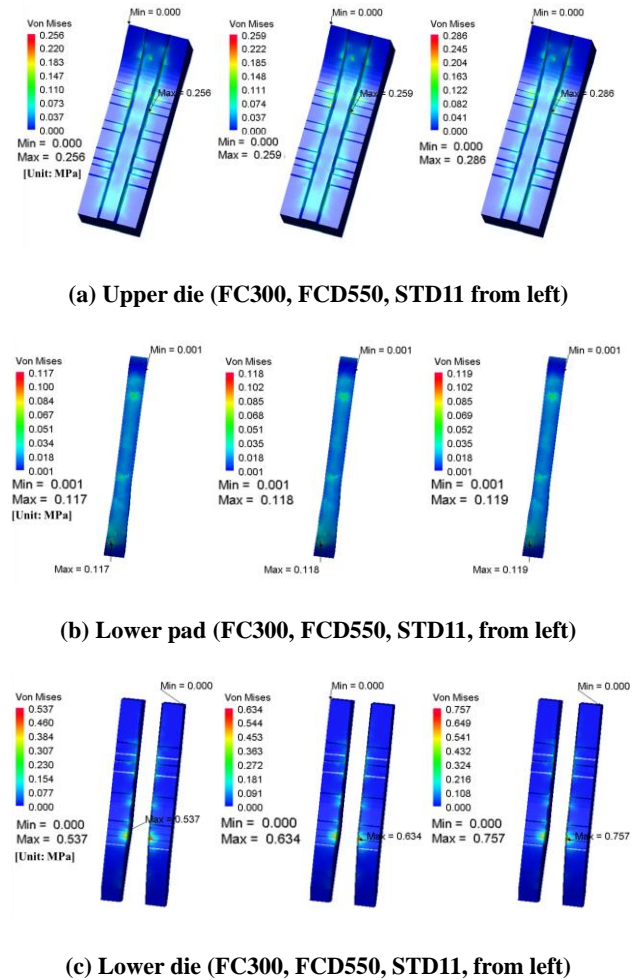
Fig. 11 Springback value for each die material compared with the result from rigid die model

생함을 알 수 있다. 금형 재료별로 최대 응력의 차이가 있는데, 이는 탄성계수(Young's modulus)의 차이 때문인 것으로 분석된다. 즉, 변위나 변형률 값은 재료별로 큰 차이가 없으므로, 응력은 결국 탄성계수의 크기에 거의 비례하는 것으로 생각할 수 있다.

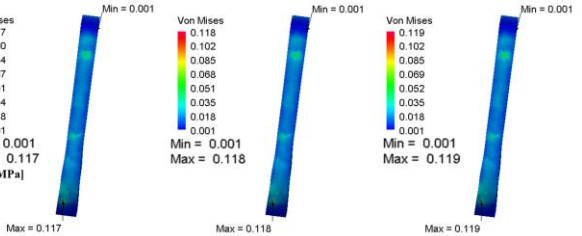
Fig. 13은 금형의 소성변형이나 심한 마모, 또는 파손까지 야기할 수 있는 가능성을 확인하기 위하여 재료별, 금형별로 최대 유효응력을 해당 재료의 항복응력과 비교한 것이다. 패드를 제외한 다른 금형은 재료에 따라 항복응력을 넘는 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 각 금형에 대하여 안전하게 적용할 수 있는 재료를 Table 2와 같이 정리하였다. 모든 금형에 강도나 내마모성이 가장 우수한 재료를 사용한다면 안전상으로는 아무 문제가 없겠지만, 대신 재료비나 기계가공 및 열처리 비용이 높아진다. 그러므로 본 개발 제품의 성형에 사용할 금형 재료로 상형에는 FCD550, 하부패드에는 FC300, 하형에는 STD11의 조합이 가장 합리적이라는 결론을 얻었다.

성형-구조 연계해석을 활용한 결과, 냉간프레스 성형공정에서 우려되는 금형의 안전성을 확인하였다. 이 해석기법은 향후 다른 종류의 초고강도강이나 비철금속 성형용 금형설계에도 활용성이 높을 것이라 전망된다. 본 연구를 통해 연계해석이 성형공정에서 금형의 안정화를 위해 선행되어야 함을

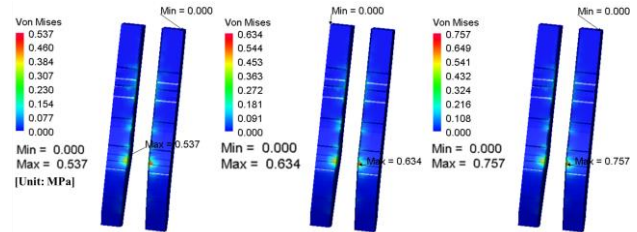
확인하였고 그 평가의 기준을 정립하였다.



(a) Upper die (FC300, FCD550, STD11 from left)



(b) Lower pad (FC300, FCD550, STD11, from left)



(c) Lower die (FC300, FCD550, STD11, from left)

Fig. 12 Distribution of von Mises stress

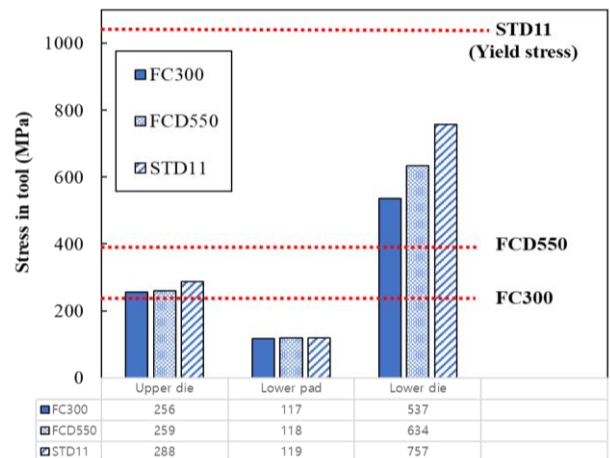


Fig. 13 Maximum stresses of each tool compared with its yield stress

Table 2 Acceptable and optimal material for each die part (● optimal, ○ acceptable, × not acceptable)

Material	FC300	FCD550	STD11
Upper die	×	●	○
Lower pad	○	○	○
Lower die	×	×	●

4. 결론

본 연구에서는 1.5GPa급 초고강도강 소재의 성형 공정 해석을 통하여 성형성과 스프링백을 예측하고 실제 시제품과 비교하였다. 또한, 성형공정-금형변형 연계해석을 통하여 금형의 변형 정보를 지속적으로 공정해석에 반영하는 해석기법을 시도하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) SPFC1470Y 소재의 성형공정 해석에서 등방경화 모델과 Yoshida-Uemori 이동경화 모델을 각각 사용했을 때의 결과를 서로 비교하였다. 소재의 연신을 9% 기준으로 두 가지 경화 모델 모두 파단이 발생하는 것으로 예측되었으며, 실제 시제품에서도 같은 위치에서 파단이 발생하여 성형성 예측의 정확도를 확인하였다. 파단 부위의 금형 모서리 반지름을 2 mm에서 3 mm로 수정하여 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 스프링백 양에 대한 성형해석 결과는 시제품 측정값과 비교할 때 등방경화 모델은 41%에 달하는 차이를 보였으나, Yoshida-Uemori 이동경화 모델은 5.1%의 작은 오차를 보였다. 이로부터 초고강도강의 스프링백 예측에는 이동경화식을 사용하여야 더 정확한 예측이 가능하다는 결론을 얻었다.

(3) 초고강도강 소재의 성형에서 금형의 변형을 고려하기 위하여 프레스 공정이 진행되는 동안 수십 차례에 걸쳐 금형의 표면형상 변화 정보를 성형 공정 해석에 반영하는 성형공정-금형변형 연계해석을 수행하였다. 그 결과 금형 소재별로 공정 진행에 따라 변형되는 양상에 차이가 있었다. 연계해석으로 금형 변형을 고려할 때, 금형을 강체로 모델링한 해석과 비교하여 제품의 스프링백 양이 0.057~0.012 mm 더 크게 계산되었으며, 금형 소재의 강도가 높을수록 금형 표면의 변위와 제품의 스프링백 양이 더 작은 결과를 나타냈다. 하지만 본 연구에서는 그 차이가 측정기기의 오차보다 작은 수준이라 금형의

보정을 고려할 수준이 되지 않는 않았다. 제품의 크기가 큰 대형 판넬에서 그 효과가 더 확실하게 보여질 것으로 사료된다.

(4) 서로 다른 항복강도를 가진 FC300, FCD550, STD11 등 3종의 금형용 재료를 상형, 하형 및 하부패드에 적용했을 때 성형공정에서 발생하는 금형 각부의 변위와 내부응력을 비교 분석하였다. 재료별로 응력은 큰 차이를 보였으며, 이는 탄성계수의 차이 때문인 것으로 보인다. 한편, 재료별 항복강도와 금형별 최대 유효응력 수준을 비교할 때, FC300는 최대 응력이 낮은 하부패드에만 적합한 것으로, 그리고 FCD550은 상형과 하부패드에 적합한 것으로 판단되었다. 또한, 항복강도가 가장 높은 STD11은 모든 금형에 사용이 가능함을 확인하였다. 그러므로 금형 제작비용을 함께 고려할 때 본 개발 제품의 성형에 사용할 금형 재료로 하부패드에는 FC300, 상형에는 FCD550, 하형에는 STD11의 조합이 가장 합리적이라는 결론을 얻었다.

REFERENCES

- [1] G. H. Shim, J. H. Kim, B. M. Kim, 2016, Springback Prediction of Tailor Rolled Blank in Hot Stamping Process by Partial Heating, Trans. Mater. Process., Vol. 25, No. 6, pp. 396~401. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2016.25.6.396>.
- [2] H. S. Choi, W. S. Lim, C. G. Kang, B. M. Kim, 2011, A Local Softening Method for Reducing Die Load and Increasing Service Life in Trimming of Hot Stamped Part, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 6, pp. 427~431. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2011.20.6.427>.
- [3] S. C. Park, T. Park, Y. Koh, D. Y. Seok, T. Kuwabara, N. Noma, K. Chung, 2013, Spring-back Prediction of MS1470 Steel Sheets Based on a Non-linear Kinematic Hardening Model, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 6, pp. 303~309. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2013.22.6.303>.
- [4] J. S. Song, K. T. Youn, J. Y. Heo, C. D. Park, Y. H. Kim, 2018, Effect of Slide Motion Control and Friction Characteristics on Formability of Ultra High Strength Steel, Trans. Mater. Process., Vol. 27, No. 2, pp. 107~114. <https://doi.org/10.5228/KSTP2018.27.2.107>.
- [5] PAM-STAMP, ESI-GROUP, <http://www.esi-group.com>

- [6] F. Yoshida, T. Uemori, 2002, A Model of Large-strain Cyclic Plasticity Describing the Bauschinger Effect and Work-hardening Stagnation, *Int. J. Plast.*, Vol. 18, No. 5-6, pp. 661~686. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00050-X).
- [7] Chih-Yi Chang, Ming-Hsiung Ho, Ping-Chen Shen, 2014, Yoshida-Uemori Material Models in Cyclic Tension-Compression Tests and Shear Tests, *J. Eng. Manufacture*, Vol. 228, No. 2, pp. 245-254. <https://doi.org/10.1177/0954405413499011>.
- [8] Y.T.Keum, I.H.Ahn, I.K.Lee, M.H.Song, S.O.Kwon, and J.S.Park, 2005, Simulation of Stamping Process of Automotive Panel Considering Die Deformation, *Numisheet2005*, pp.90~95. <https://doi.org/10.1063/1.2011199>
- [9] M. J. Song, Y. T. Keum, 2006, Forming Analysis of Automotive Fender Panel Considering Die Deformation, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 5, pp. 387~394.
- [10] K. H. Kang, J. H. Kwak, S. B. Bae, S. H. Kim, 2017, Design Guideline for Press Tool Structure of Ultra-high Strength Steel Part with Shape Optimization Technique, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 26, No. 6, pp. 372~377. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.2.372>.
- [11] J. S. Park, H. J. Choi, S. H. Kim, 2014, Improvement in Prediction Accuracy of Springback for Stamping CAE Considering Tool Deformation, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 6, pp. 380~385. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.6.380>.