

가용 성형한계영역을 이용한 스템핑 공정의 효율적 설계방법

An Effective Design Method of Stamping Process by Feasible Formability Diagram

차승훈¹, 이찬주¹, 이상곤², 김봉환³, 고대철⁴, 김병민⁵✉
 Seung-Hoon Cha¹, Chan-Joo Lee¹, Sang-Kon Lee², Bong-Hwan Kim³, Dae-Cheol Ko⁴
 and Byung-Min Kim⁵✉

1 부산대학교 대학원 정밀가공시스템 (Precision Manufacturing Systems Division, Pusan National Univ.)

2 부산대학교 PNU-IFAM 국제공동연구소 (PNU-IFAM Joint Research Center, Pusan National Univ.)

3 진주산업대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Jinju National Univ.)

4 부산대학교 ILIC (Industrial Liaison Innovation Cluster, Pusan National Univ.)

5 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3074

Manuscript received: 2009.5.6 / Revised: 2009.6.24 / Accepted: 2009.7.16

In metal forming technologies, the stamping process is one of the significant manufacturing processes to produce sheet metal components. It is important to design stamping process which can produce sound products without defect such as fracture and wrinkle. The objective of this study is to propose the feasible formability diagram which denotes the safe region without fracture and wrinkle for effective design of stamping process. To determine the feasible formability diagram, FE-analyses were firstly performed for the combinations of process parameters and then the characteristic values for fracture and wrinkle were estimated from the results of FE-analyses based on forming limit diagram. The characteristic values were extended through training of the artificial neural network. The feasible formability diagram was finally determined for various combinations of process parameters. The stamping process of turret suspension to support suspension module was taken as an example to verify the effectiveness of feasible formability diagram. The results of FE-analyses for process conditions within fracture and wrinkle as well as safe regions were in good agreement with experimental ones.

Key Words: Stamping Process (스템핑 공정), Feasible Formability Diagram (가용 성형한계영역), Blank Offset (블랭크 오프셋), Blank Holding Force (블랭크 홀딩력), FE-Analysis (유한요소해석), Artificial Neural Network (인공신경망), Turret Suspension (터릿스펜션)

1. 서론

현대 산업에 폭넓게 사용되고 있는 스템핑 공정(stamping process)은 금속 판재를 이용하여 다양하고, 비교적 복잡한 형상의 제품을 제조하는 공정으로써 저렴한 소재, 성형된 제품의 높은 강도 및 대량 생산성 등의 큰 장점을 가지고 있다. 하지만, 대부분은 제조 공정 중에 큰 소성변형을 수

반하게 되어 판재의 파단 및 주름과 같은 결함이 발생하는 문제가 있다.

스템핑 공정은 블랭크 형상(blank shape), 블랭크 홀딩력(blank holding force), 드로우비드 형상(draw-bead shape), 금형과 재료간의 마찰 특성 등 여러 가지 공정변수들의 영향을 받는 성형공정이다. 이와 같은 공정변수들은 스템핑 공정에 복합적인 영향을 끼치기 때문에 최적의 공정변수를 결

정하는 것은 매우 어려운 실정이다.^{1,2}

최근 스템핑 공정에 대한 연구는 이러한 공정 변수를 효과적으로 설정하기 위한 방법들이 주로 연구되어 왔다. Son³ 등은 유한요소해석을 이용하여 각 절점이 변형하는 동안 전체의 경로 길이에 대한 초기 속도의 비로서 초기 블랭크 형상을 예측하였는데, 사각드로잉, 오일팬 등과 같은 비교적 간단한 형상에 국한되어 적용되었다. Bac⁴ 등은 형상 비드를 고려하여 해석하는 경우 많은 계산시간이 소요되므로, 이를 해결하기 위하여 등가 드로우비드 모델을 이용하여 드로우비드 형상에 대한 드로우비드력을 계산하였다. 해석방법의 유효성을 검증하기 위해 차체 부품(automotive panel)의 스템핑 공정에 적용하였으나, 플랜지부의 변형양상을 정확히 구현하기 어렵다는 단점이 있다. Oguz⁵ 등은 두 개의 블랭크 홀더를 사용하여 블랭크 홀더의 위치, 상형 패드의 위치 및 비드 형상을 결정하기 위하여 유한요소해석, 반응표면법, 유전자알고리즘을 이용하였고, Wei⁶ 등은 스템핑 공정에 영향을 끼치는 공정변수를 조절 가능한 유효인자인 드로우비드 위치, 블랭크 홀딩력과 잡음인자인 가공경화지수, 항복강도, 마찰계수를 고려한 반응표면법을 이용하여 차체 부품의 최적 설계를 수행하였다. Liu⁷ 등은 파단, 주름, 불충분한 스트레칭, 두께 감소율 등과 같은 여러 가지 목적함수를 동시에 만족할 수 있는 블랭크 홀딩력과 드로우비드력을 최적화하는 방법을 제시하였다. 그러나 위에서 언급한 대부분의 방법들은 다양한 공정변수 조합에 대한 해석이 필요하므로 해석시간과 비용이 많이 소요되는 문제가 있으며, 산업현장의 설계자가 최적의 공정변수를 결정하는데 다소 어렵고 복잡한 문제가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 스템핑 공정의 가용 성형한계영역(feasible formability diagram)을 이용하여 파단 및 주름과 같은 결함없는 차체 부품을 빠르고 효과적으로 성형하기 위한 효율적인 공정설계 방법을 제시하는데 있다. 임의의 스템핑 공정에 대한 가용 성형한계영역을 설정하기 위하여 유한요소해석(FE-analysis) 및 인공신경망(artificial neural network)을 이용하였다. 본 연구에서 제시한 설계방법을 터릿스스펜션(turret suspension)의 스템핑 공정설계에 적용해 보았으며, 실험결과와의 비교를 통해 그 타당성을 검증해 보았다.

2. 가용 성형한계영역에 의한 스템핑 공정설계

2.1 공정설계 절차

본 연구에서 제안하는 가용 성형한계영역은 유한요소해석과 인공신경망을 이용하여 설정하였으며, 결함없는 차체 부품을 성형하기 위한 스템핑 공정설계에 적용하였다. Fig. 1 에 가용 성형한계영역을 설정하기 위한 절차 및 이를 이용한 스템핑 공정설계 방법을 나타냈으며, 다음과 같은 절차에 따라 수행된다.

- Step 1) 최종 제품의 트림라인(trim line)을 고려하여 목표 외곽선(target contour)을 설정한다.
- Step 2) Ls-dyna 를 이용하여 사각형상의 초기 블랭크에 대한 예비적인 성형해석을 수행한다.
- Step 3) Ls-dyna 후처리과정(postprocessor; Dynaform)의 역설계 기법을 이용하여 초기 블랭크를 예측한다.⁸
- Step 4) 형상 오차가 만족할 때까지 Step 3)을 반복적으로 수행한다.
- Step 5) 설정된 초기 블랭크 형상을 기준으로 프레스 가용용량을 고려하여 블랭크 홀딩력의 수준을 결정하고, 최외곽 다이페이스를 고려하여 초기 블랭크 외곽선에서 등간격으로 블랭크 오프셋(blank offset)의 수준을 결정한다.
- Step 6) Step 5)에서 설정한 공정변수 조합에 대하여 성형해석을 수행한다.
- Step 7) 성형해석 결과 및 성형한계선도(forming limit diagram)를 이용하여 주름 및 파단에 대한 특성치(characteristic value; CV)를 계산한다.
- Step 8) 인공신경망 학습을 통하여 미해석 공정변수 조합에 대한 특성치를 예측한다.
- Step 9) 모든 공정변수 조합에 대한 특성치를 바탕으로 파단영역, 주름영역 및 안전영역을 규정하는 가용 성형한계영역을 설정한다.
- Step 10) 가용 성형한계영역을 이용하여 주어진 스템핑 공정에 유용한 공정변수 조합을 선정한다.

2.2 블랭크 형상설계

본 연구에서는 초기 블랭크 형상설계를 위하여 Ls-dyna 후처리과정의 역설계 기법을 이용하였다. 먼저 목표 외곽선을 제품의 트림라인을 고려하여 제품의 외곽선에서 등거리만큼 떨어진 위치에 설

정하였다.

판재성형해석 상용프로그램인 Ls-dyna 를 이용하여 사각형상의 초기 블랭크에 대하여 성형해석을 수행하였다. 초기 블랭크 외곽선의 절점에서 목표 외곽선에 위치하는 절점들의 변형 경로를 고려하여, 수정된 블랭크 외곽선에 위치하는 절점들을 예측하였다. 이와 같은 과정을 블랭크 외곽선 전체에 적용하면 수정된 블랭크 외곽선을 묘사하는 절점들을 얻을 수 있다. 초기 블랭크 형상을 설계하기 위해 Fig. 2 와 같이 목표 외곽선 넓이, A_T 와 성형된 외곽선 넓이, A_D 에 대한 편차를 목표 외곽선 넓이로 나눈 최소화 함수(minimization object function), $g(x)$ 를 도입하였으며, 식(1)과 같이 표현될 수 있다.⁹

$$g(x) = \left(\frac{A_T - A_D}{A_T} \right)^2 \quad (1)$$

$g(x)$ 의 수렴판정 값으로 10^{-3} 을 사용하여, 편차면적이 블랭크 면적의 0.1%이내가 되었을 때 초기 블랭크로 결정하였다.⁹

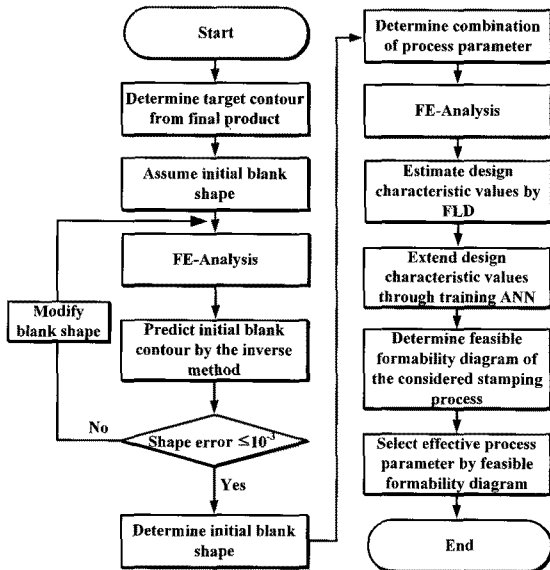


Fig. 1 Flow chart for determination of feasible formability diagram in stamping process

2.3 가용 성형한계영역 작성

2.2 절에서 결정된 초기 블랭크 형상을 기준으

로 블랭크 홀딩력 및 블랭크 오프셋과 같은 공정변수를 선정하고, 선정된 공정변수 조합에 대한 성형해석을 수행하였다. 2.1 절에서 언급한 바와 같이 블랭크 홀딩력은 생산현장의 프레스 용량을 고려하여 설정하였으며, 블랭크 오프셋은 다이페이스트를 고려하여 초기 블랭크로부터 균일하게 증가시켰다. 선정된 공정변수 조합에 대한 성형해석 결과와 성형한계선도를 바탕으로 파단 및 주름에 대한 특성치를 정량적으로 평가하였다.

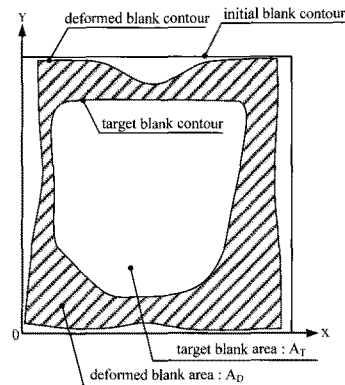


Fig. 2 Calculation of the difference area between the target contour and deformed blank contour

파단 및 주름에 대한 특성치를 정의하기 위하여 Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 주변형률(major strain)과 부변형률(minor strain)의 조합에 의해 파단 및 주름을 규정하는 성형한계선도를 이용하였다¹⁰. 성형한계선도에서 파단 및 주름을 표시하는 경계영역을 함수로 표현하면 다음의 식(2)와 같다.

$$\varepsilon_1 = \pi_F(\varepsilon_2), \quad \varepsilon_1 = \pi_W(\varepsilon_2) \quad (2)$$

여기서, ε_1 은 주변형률이고, ε_2 는 부변형률이다. 안전 여유량, s 를 고려하여 파단 및 주름을 표시하는 경계영역을 함수로 표현하면 다음의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_F(\varepsilon_2) &= \pi_F(\varepsilon_2) - s \\ \phi_W(\varepsilon_2) &= \pi_W(\varepsilon_2) + s \end{aligned} \quad (3)$$

성형해석으로부터 각 요소의 파단에 대한 특성치를 계산하기 위하여 다음의 식(4)를 이용하였다.

$$f_{\epsilon_F}^e = (\epsilon_1^e - \phi_F(\epsilon_2^e)) \text{ for } [\epsilon_1^e > \phi_F(\epsilon_2^e)]$$

$$f_{\epsilon_F}^e = 0 \text{ for } [\epsilon_1^e \leq \phi_F(\epsilon_2^e)] \quad (4)$$

식(4)를 이용하여 파단영역에 있는 각 요소의 주변형률값과 그 요소에 대한 파단 경계의 주변형률값의 차이로 파단에 대한 정량적인 특성치가 계산될 수 있다. 유사한 방법으로 각 요소의 주름에 대한 특성치를 계산하기 위하여 다음의 식(5)을 이용하였다.

$$f_{\epsilon_W}^e = (\epsilon_1^e - \phi_W(\epsilon_2^e)) \text{ for } [\epsilon_1^e < \phi_W(\epsilon_2^e)]$$

$$f_{\epsilon_W}^e = 0 \text{ for } [\epsilon_1^e \geq \phi_W(\epsilon_2^e)] \quad (5)$$

따라서, 전체 요소에 대한 파단 및 주름의 특성치는 식(4)와 (5)를 이용하여 식(6)으로 표현될 수 있다.

$$CV_F = \sqrt{\frac{\sum (f_{\epsilon_F}^e)^2}{n}}, \quad CV_W = \sqrt{\frac{\sum (f_{\epsilon_W}^e)^2}{n}} \quad (6)$$

여기서, CV_F 는 파단에 대한 특성치, CV_W 는 주름에 대한 특성치, n 은 $\epsilon_1^e \geq \phi_W(\epsilon_2^e)$ 조건을 만족하는 요소의 수를 나타낸다.

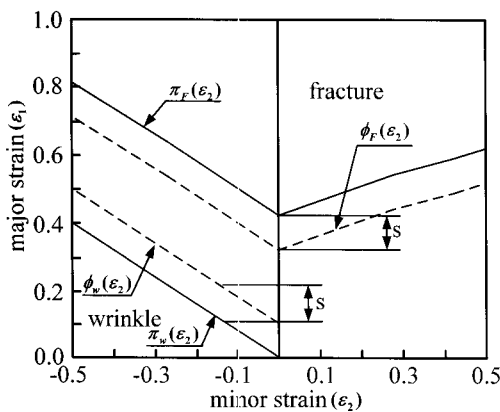


Fig. 3 Definition of characteristic value based on FLD

전체의 공정변수 조합에 대한 특성치를 예측하기 위하여 인공신경망을 이용하였다. 고려된 공정변수 조합과 파단 및 주름에 특성치를 각각 입력 데이터와 목적값으로 이용하여 신경망 프로그램을

학습시킨 후, 미해석 공정변수 조합에 대한 특성치를 예측하였다. 이로부터 전체 공정변수 조합에 대한 파단, 주름 및 안전영역을 나타내는 가용 성형한계영역을 설정하였다. 가용 성형한계영역에서 안전영역의 판단기준은 안전 여유량을 고려하여 파단 및 주름의 특성치가 10^{-1} 이내에 존재하는 영역으로 설정하였다.

3. 터릿서스펜션에 대한 설계기법 적용

3.1 물성치 평가

가용 성형한계영역을 이용한 스탬핑 공정설계 방법의 유용성을 검증하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 서스펜스 모듈을 지지하는 차체 부품인 터릿서스펜션의 공정설계에 적용해 보았다. Fig. 4(b)와 같이 터릿서스펜션은 좌우 비대칭 형상이며, 최대 드로잉 깊이가 110mm 이므로 제품의 측면에 발생할 수 있는 파단의 제어가 중요한 문제임을 알 수 있다.

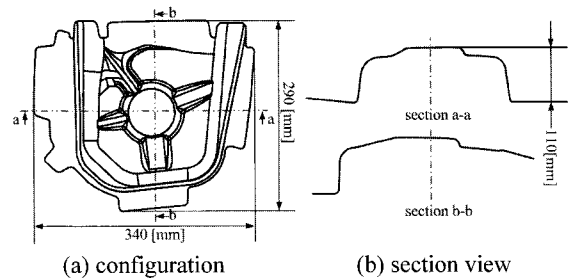


Fig. 4 Configuration and detailed section view of turret suspension

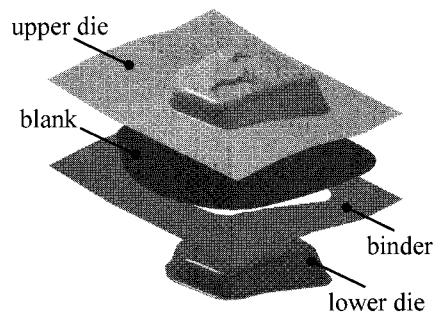


Fig. 5 FE-modeling for stamping of turret suspension

성형해석을 위한 유한요소모델을 Fig. 5 에 나타내었다. 사용된 재료는 열간 압연 강판인 APFH440

이며, 기계적 성질을 평가하기 위하여 인장실험을 수행하였다. 인장실험을 위해 두께 2.2t 의 초기 강판으로부터 압연방향에 0°, 45°, 90° 방향으로 KS B 0801 규격의 시험편을 가공하였다.

인장실험으로부터 소재의 항복강도는 247.87MPa, 인장강도는 435.07MPa, 강도계수는 720.13MPa 및 가공경화지수는 0.15 로 평가되었다. 소재의 이방성 계수(lankford vlaue)는 인장실험에서 균일 연신 구간까지 인장을 가한 후 소재의 표점 거리와 폭 방향 치수변화를 측정하여 구하였으며, R_0 는 0.50, R_{45} 는 0.87 및 R_{90} 은 0.62 였다.

APFH440 의 성형한계선도를 작성하기 위하여 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200mm 로 시험편을 가공하였고, 실시간 변형을 측정장비인 Aramis¹³ 에서 인식할 수 있도록 강판 표면에 전용 스프레이를 뿌렸다. TTM(Tokyo Testing Machine)에서 제작한 만능 판재성형 시험기를 이용하여 소재가 파단될 때까지 스트레치 실험을 수행하고 파단 부위의 변형률은 Aramis 를 통해 실시간 측정하였다. 측정된 변형률에서 파단이 발생하는 경계영역으로 Fig. 6 과 같이 APFH440 의 성형한계선도를 작성하였다.

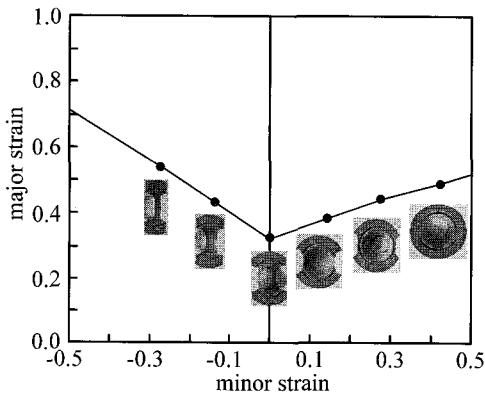


Fig. 6 Forming limit diagram for APFH440 of 2.2t

3.2 초기 블랭크 설계

초기 블랭크 설계를 위하여 먼저 가로 560mm, 세로 500mm 인 사각 블랭크를 이용하였다. 목표 외곽선은 트림라인과 금형 캐비티(cavity)로 유입되는 플랜지부를 고려하여 제품 외곽선으로부터 균일하게 30mm 만큼 떨어진 위치에 설정하였다. 초기 블랭크 홀딩력은 성형하중의 1/3 인 30ton 을 적용하였으며,¹¹ 마찰계수(friction coefficient)는 0.13 으로 설정하였다.¹²

설계 단계에서의 초기 블랭크 외곽선과 변형된 블랭크 외곽선을 Fig. 7 에 나타내었다. 성형 후 블랭크 외곽선의 위치를 나타낸 Fig. 7(a)에서 목표 외곽선 밖으로 플랜지가 많이 남아있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 수정된 블랭크를 적용한 성형해석 결과를 나타내고 있으며, 변형된 블랭크 외곽선이 목표 외곽선에 거의 근사한 초기 블랭크 형상을 얻을 수 있었다.

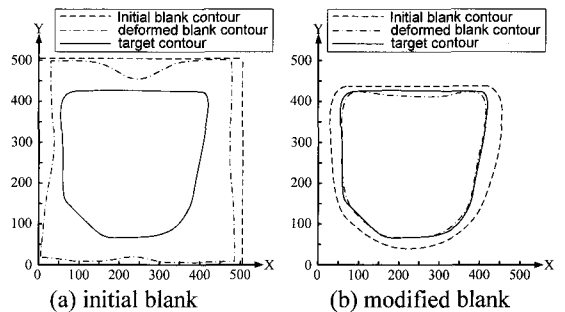


Fig. 7 Design of the initial blank for stamping of turret suspension

3.3 스템핑 공정설계

3.2 절의 초기 블랭크 형상을 이용하여 터릿서스펜션의 스템핑 공정설계를 수행하였다. 생산현장의 프레스 가용용량을 고려하여 최대 블랭크 홀딩력은 50ton 으로 설정하였고, 최대 블랭크 오프셋은 최외곽 다이페이스를 고려하여 30mm 로 설정하여 성형해석을 수행해 보았다.

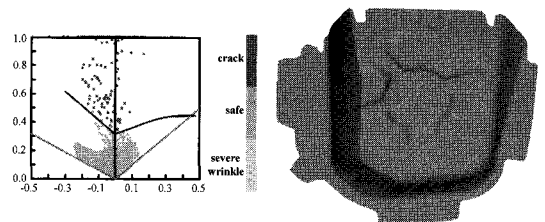


Fig. 8 Result of FE-analysis for stamping of turret suspension(BHF: 50ton, blank offset: 30mm)

성형해석 결과를 나타낸 Fig. 8 에서 터릿서스펜션의 스템핑 공정동안 최종 제품에 주름은 발생하지 않으나, 파단이 발생함을 확인할 수 있다. 따라서 파단없는 제품을 성형하기 위하여 본 연구에서는 블랭크 홀딩력과 블랭크 오프셋을 공정변수로 선정하였다. 블랭크 홀딩력은 프레스 용량을 고려

하여 최소 블랭크 홀딩력 20ton 및 최대 블랭크 홀딩력 50ton 을 기준으로 등간격으로 설정하였고, 블랭크 오프셋은 최외곽 다이페이스를 고려하여 최대 30mm 를 기준으로 설정하였다. 본 연구에서는 공정변수가 2 개이므로 모든 공정변수 조합을 고려하였고, 만약 3 개 이상의 공정변수가 고려될 경우 실험계획법을 활용하여 실험 횟수를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.^{3,5} 각 설계변수 조합에 대하여 유한요소해석을 수행하였으며, 해석결과와 FLD 를 바탕으로 파단 및 주름에 대한 특성치를 계산하여 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Results of FE-analysis in stamping of turret suspension

Trial no.	Process parameters		FE-analysis	
	BHF	blank offset	CV _F	CV _w
1	20	30	0.0000	0.1043
2	20	20	0.0000	0.1036
3	20	10	0.0000	0.1083
4	20	0	0.0000	0.1137
5	30	30	0.0000	0.1000
6	30	20	0.0000	0.1016
7	30	10	0.0000	0.1030
8	30	0	0.0000	0.1086
9	40	30	0.8130	0.0892
10	40	20	0.0010	0.0905
11	40	10	0.0001	0.0985
12	40	0	0.0000	0.1024
13	50	30	0.9014	0.0875
14	50	20	0.7689	0.0885
15	50	10	0.7446	0.0913
16	50	0	0.0000	0.0958

미해석 공정변수 조합에 대한 특성치를 예측하기 위하여 인공신경망을 이용하였다. 실험계획법의 직교배열표 상의 공정변수 조합과 파단 및 주름에 대한 특성치를 입력데이터로 하여 인공신경망을 학습시킨 후, 미해석 공정변수 조합에 대한 특성치를 예측하였다. 예측된 파단 및 주름의 특성치가 10⁻¹ 이내에 포함되는 공정변수 조합을 안전영역으로, 나머지 공정변수 조합에 대해서는 주름 및 파단에 대한 영역으로 설정하였다. 이러한 방법으로 설정된 가용 성형한계영역을 Fig. 9 에 나타

내었다. Fig. 9 에서 블랭크 홀딩력과 블랭크 오프셋이 증가할수록, 주름영역은 감소하지만 파단영역이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 소재가 급형캐비터로 유입될 때 블랭크 홀딩력 및 블랭크 오프셋의 증가로 인한 마찰력 증가로 과도한 인장력이 발생하기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다.

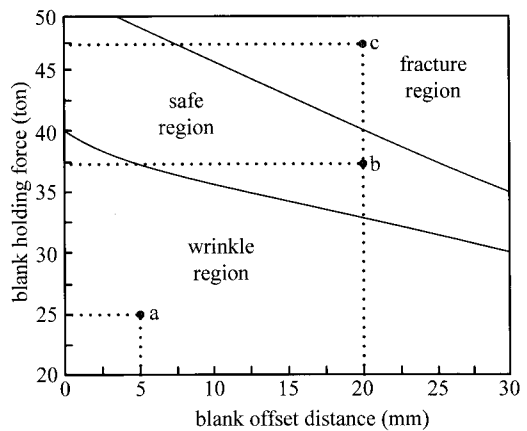


Fig. 9 Feasible formability diagram for stamping of turret suspension

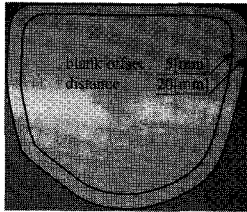
이상의 결과로부터 본 연구에서 설정한 가용 성형한계영역을 이용하면 생산현장의 프레스 용량, 급형의 마모, 소재의 트림량 등을 고려하여 최종 제품에 파단 및 주름이 발생하지 않는 블랭크 형상 및 블랭크 홀딩력과 같은 공정변수를 안전영역 내에서 효율적으로 선택 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 터릿서스펜션의 스템핑 실험

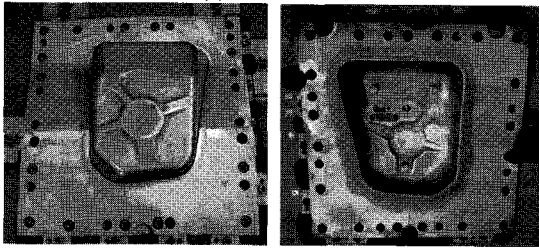
Fig. 9 에 나타낸 가용 성형한계영역의 타당성을 검증하기 위하여 터릿서스펜션의 스템핑 실험을 수행하였다. 터릿서스펜션의 스템핑 실험은 가용 성형한계영역 상에서 주름, 파단 및 안전영역을 검증할 수 있는 조건하에서 수행되었다. 터릿서스펜션의 스템핑 실험을 위한 조건을 Fig. 9 에 a, b, c 로 나타내었다.

초기 블랭크는 Fig. 10(a)와 같이 판재재단용 레이지 절단기를 이용하여 준비하였고, 변형을 측정 장비인 Argus¹³ 에 인식될 수 있도록 표면을 아세톤으로 세척한 후, 그리드 마킹(grid marking)을 하였다. 그리드 간격은 2mm 이고 반지름은 0.5mm 이

다. 실험에 사용된 프레스는 최대 용량이 300ton 이며, 최대 블랭크 홀딩력은 50ton 으로 제한되어 있다. Fig. 10(b)와 (c)에 터릿서스펜션 스템핑 실험에 사용된 상·하부 금형을 나타내었다. 스템핑 실험 후, 제품은 Argus 프로그램에서 인식할 수 있도록 다양한 각도로 촬영하였다. 촬영된 결과를 바탕으로 프로그램을 이용하여 주변형률과 부변형률 값으로 변환하였다.



(a) initial blank



(b) upper die

(c) lower die

Fig. 10 Initial blank and die set for experiment of turret suspension

Fig. 9 의 a 조건은 블랭크 오프셋 5mm, 블랭크 홀딩력 25ton 으로 가용 성형한계영역에서 주름영역에 있으며, 실험결과를 나타낸 Fig. 11(a)에서 볼 수 있듯이 좌측 하단부에 주름이 발생하였다. Fig. 9 의 b 조건은 블랭크 오프셋 20mm, 블랭크 홀딩력 37ton 으로 가용 성형한계영역에서 안전영역에 있으며, Fig. 11(b)와 같이 결함없는 제품을 성형할 수 있었다. 또한 Fig. 9 의 c 조건은 블랭크 오프셋 20mm, 블랭크 홀딩력 47ton 으로 가용 성형한계영역에서 파단영역에 있으며 Fig. 11(c)와 같이 좌측 측벽부에 파단이 발생하였다. 이상의 실험결과로부터 본 연구에서 제시한 가용 성형한계영역은 최종 제품의 결합유무를 매우 잘 예측함을 확인할 수 있다.

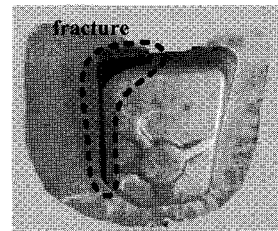
해석결과와 실험결과와의 정량적 비교를 위해 Fig. 12 에 Fig. 9 의 b 조건에서 측정된 변형률 분포와 성형해석으로 구한 변형률 분포를 나타내었다. Fig. 12(a)와 (b)에서 최대 주변형률은 실험과 해석결과 모두 우측 하단부에 나타났으며, 그 값의 범

위는 0.643~0.563 였다. Fig. 12(c)와 (d)에서 최소 부변형률은 실험과 해석결과 모두 좌·우측 하단부에 나타났으며, 그 값의 범위는 -0.353~-0.283 으로 나타났다. 이는 코너부의 유동에 의해서 소재에 압축력이 작용하였기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다. 또한 Fig. 12 에서 전체적인 변형률 분포 값이 실험과 해석결과가 상당히 유사함을 관찰할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 가용 성형한계영역에 대한 실험 및 해석결과가 상당히 잘 일치함을 확인할 수 있으며, 가용 성형한계영역에 의한 스템핑 공정설계 방법은 일반적인 차체 부품의 공정설계에 효율적으로 적용될 수 있다고 판단된다.



(a) "a" condition of Fig. 9

(b) "b" condition of Fig. 9



(c) "c" condition of Fig. 9

Fig. 11 Turret suspension produced by experiment

5. 결론

본 연구에서는 가용 성형한계영역을 이용한 스템핑 공정의 효율적인 설계방법을 제시하였으며, 유한요소해석과 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 결함없는 차체 부품의 성형을 위하여 유한요소해석 및 인공신경망을 이용하여 고려된 공정변수 조합에 대한 가용 성형한계영역을 작성하였다. 본 연구에서 제시한 가용 성형한계영역은 고려된 공정변수 조합에 대한 파단, 주름 및 안전영역을 규정할 수 있었다.

2) 가용 성형한계영역을 이용한 스템핑 공정설계 방법을 터릿서스펜션에 적용하여 실험 및 해석

결과를 비교함으로써 그 유효성을 검증할 수 있었다.

3) 본 연구에서 제시한 설계방법을 이용하면 생산현장의 프레스 용량, 금형의 마모, 소재의 트림량 등을 고려하여 최종 제품에 파단 및 주름이 발생하지 않는 공정변수를 가용 성형한계영역의 안전영역 내에서 효율적으로 선택하여 공정설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

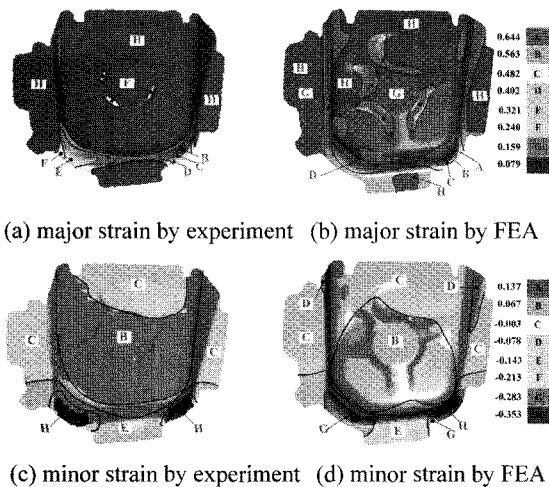


Fig. 12 Comparison between experiment and FE-analysis for stamping of turret suspension under "b" condition of Fig. 9

후 기

지식경제부의 지역산업기술개발사업(과제번호: 70001519-2008-02)과 지식경제부와 한국기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Yang, K. E., Jang, D. K. and Lee, H. G., "Recent press forming technology and research trends," Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, No. 2, pp. 30-37, 2002.
2. Ko, H. H., Jung, D. W., Ahn, H. G., Lee, C. H., Ahn, B. I. and Moon, W. S., "A study of tool planning for forming analysis in REF SILL OTR-R/L autobody panel stamping process," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 118-124, 2006.

3. Son, K. C. and Shim, H. B., "Optimal blank shape design using the initial velocity of boundary nodes," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 134, No. 1, pp. 92-98, 2003.
4. Bae, G. H., Song, J. H., Huh, H., Kim, S. H. and Park, S. H., "Simulation-based prediction model of the draw-bead restraining force and its application to sheet metal forming process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 123-127, 2007.
5. Oguz, K. and Bulent, E., "Automated desing methodology for automobile side panel die using an effective optimization approach," Materials and Design, Vol. 28, No. 10, pp. 2665-2672, 2007.
6. Wei, D., Cui, Z. and Chen, J., "Optimization and tolerance prediction of sheet metal forming process using response surface model," Computational Materials Science, Vol. 42, No. 2, pp. 228-233, 2008.
7. Liu, W. and Yang, Y., "Multi-objective optimization of sheet metal forming process using pareto-based genetic algorithm," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 208, No. 1-3, pp. 499-506, 2008.
8. Engineering Technology Associates Inc., "Dynaform-PC User's manual Version1.0," Engineering Technology Associates Inc., 2001.
9. Kim, J. Y., Kim, N. S. and Huh, M. S., "Optimum blank design of an automobile sub-frame," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 101, No. 1, pp. 31-43, 2000.
10. Hillmann, M. and Kubli, W., "Optimization of sheet metal forming processes using simulation programs," Proceedings of the Numisheet 99, Vol. 1, pp. 287-292, 1999.
11. Eshel, G., Barash, M. and Johnson, W., "Automatic generation of process outlines of forming and machining processes," ONR Contract No. 83 K0385 Final Report, Vol. 5, 1986.
12. Nine, H. D., "Draw bead forces in sheet metal forming," Proc. of Mechanics of Sheet Metal Forming, Material Behavior and Deformation Analysis, pp. 179-211, 1978.
13. ARAMIS & ARGUS commercial software. GOM, <http://www.gom.com/>