

로우암 프레스 성형 조건의 최적화를 위한 CAE 기술의 적용

김영석* · 이택근** · 김성태***
(2000년 1월 6일 접수)

Application of CAE Technique for the Optimization of Press Forming Condition of Low Arm

Y. S. Kim, T. K. Lee and S. T. Kim

Abstract

In this study, optimization for press forming condition of low arm was performed with explicit dynamic FEM code, Pam-Stamp. FEM simulation was coupled with the Taguchi's experiment technique having three design variables - friction coefficient, plastic anisotropy parameter, and blank shape - which are chosen to be optimized. The simulation results were compared with those of experiment. We found out the change of blank shape among these three design variables is very effective in optimizing press forming condition of low arm. In addition, the modified blank shape shows high yield ratio of slitting coil.

Key Words : FEM, Low Arm, Taguchi's Experiment Techinque, Optim.ization of Press Forming Condition

1. 서 론

자동차의 샤시 중에서 서스펜션 부품은 자동차의 주행 안전성과 조향성에 있어서 중요한 역할을 하고 있어서 구조적으로 안전성이 확보되어야 한다. 최근 차체의 경량화와 더불어 서스펜션 부품의 경우도 경량화를 위한 알루미늄 재료 혹은 고강도 강판의 채용 등이 검토되고 있다. 현재 알루미늄 재료의 주조에 의한 부품의 개발이

연구되고 있으나 제조단가가 높아 고급 차를 제외하고는 당분간 사용이 어려울 것으로 생각된다. 반면 서스펜션 부품에 고강도 강판의 사용은 경량화 측면뿐만 아니라 현재의 프레스 가공기술을 활용할 수 있다는 측면에서 우선적으로 고려되고 있다.^(1,2)

현재 프레스 공정에 유한 요소 해석(Finite Element Analysis, FEA)^(1~3)을 적용한 공정설계가 널리 행해지고 있으나 고강도 강판의 경우에 대해서는 성형성과 기계적

* 경북대학교 기계공학부
** 경북대학교 기계공학부 대학원
*** (주) 화신

물성에 대한 충분한 데이터가 확보되어 있지 않고, 가공 불량에 대한 대책이 충분히 확립되어 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 고강도화와 경량화 되어 가고 있는, 스펀션 부품 중 로우 암(low arm)을 대상으로 PAM-STAMP⁽⁴⁾의 해석을 위한 전처리방법으로 금형에 대한 NC CAD 데이터를 FEMB를 이용하여 유한 요소 모델링 하였고, PAM-STAMP 해석을 통해 성형특성을 파악 또한 프레스 공정에 대한 FEM 해석과 다구치의 직교배열실험법을 이용하여 프레스 성형품질에 미치는 주요 인자들의 영향을 정량화 함으로써 로우 암 부품에 대한 최적 프레스 가공 조건을 확립하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 전처리

실제 로우 암의 생산 공정은 ① 제1 드로잉, ② 트리밍·피어싱, ③ 제1 커팅, ④ 제2 드로잉, ⑤ 제2 커팅으로 크게 5공정으로 나뉘지만 본 연구에서는 제품 형상의 대부분이 결정되면서 주요 드로잉 불량이 발생하여 문제가 되는 제 1드로잉 공정만 해석 대상으로 하였다. NC 가공을 위한 금형 형상을 IGES(Initial Graphics Exchange Specification) 파일 형태로 하여 유한요소 모델러인 FEMB에서 유한요소 메쉬를 생성하였고, 좋은 해석 결과를 얻기 위해 요소를 적응 재분할(adaptive remesh) 기능을 이용하여 국부적으로 수정하였다. 실제 프레스 공정에서는 차체 좌우의 로우 암이 트랜스퍼 프레스에서 동시에 가공되나 본 해석에서는 오른쪽 제품의 가공 공정만을 해석하였다. 펀치와 블랭크 홀더는 수정된 유한 요소 모델을 기초로 금형의 형상으로부터 읍셋

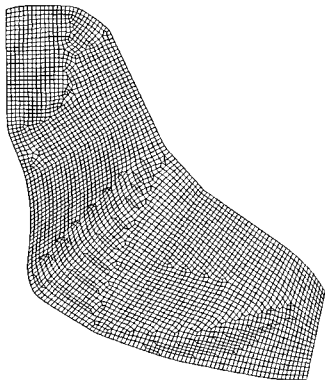


Fig. 1 FE mesh discretization of blank

하여 모델링 하였다. 블랭크에 대한 유한 요소 모델은 본 연구실에서 소유하고 있는 3차원 측정기를 이용하여 실제 사용중인 블랭크를 기준으로 외곽 형상을 측정하여 IGES 파일로 만든 후 역시 FEMB에서 메쉬를 4mm의 크기로 생성한 후 요소를 국부적으로 수정하였다(Fig.1). 이런 일련의 전처리 작업을 거친 후 다이, 펀치, 블랭크, 블랭크 홀더의 유한요소 모델을 NASTRAN 파일로 변환한 후 PAM Generis로 넘겨 경계조건 및 공정 조건을 입력하고 PAM-STAMP Solver에서 해석을 하였다.

2.2 해석 모델 및 조건

유한요소해석에서는 실제 금형에서처럼 비드가 없는 조건으로 해석하였고 블랭크의 자중은 고려하지 않았다. Fig. 2는 해석을 위한 블랭크와 금형의 유한 요소 모델 배치를 나타낸다. 펀치, 금형, 블랭크 홀더는 강체로 취급하였으며, 블랭크는 박판의 두께 방향으로 3개의 적분점을 갖는 Belytschko-Tsay 쉘요소로 모델링 하였다. 본 연구에서는 전체 계산 소요시간과 계산의 정밀도 확보를 고려하여 펀치 속도를 10m/sec로 하였다. 금형-블랭크, 펀치-블랭크의 접촉조건에서는 Lagrangian 접촉 조건을 이용하였으며, 블랭크-블랭크 홀더의 접촉조건에서는 Penalty 접촉조건을 이용하였다.

Table 1은 블랭크 재료인 SAPH38P의 기계적 특성을 나타낸 것이다.

복잡한 금형형상을 효율적으로 모델링 하기 위해서 적응 요소 재분할 기능을 이용하여 블랭크 홀더, 금형와

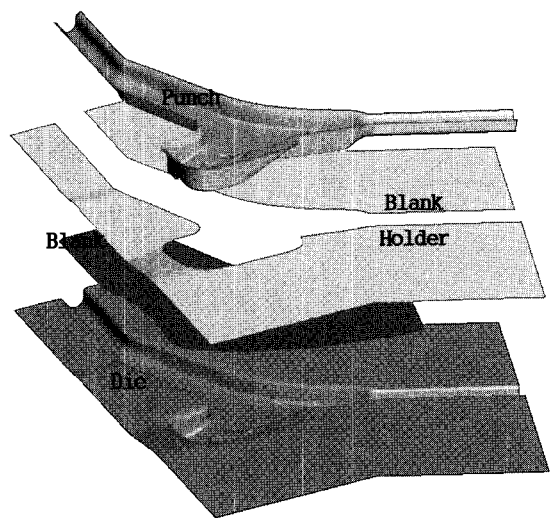


Fig. 2 Tool position of FE model

Table 1 Properties of tested material

| SAPH38P ($\bar{\sigma} = 629.60 \bar{\epsilon}^{-0.184}$) | | Plastic tangent modulus / Plastic stress | |
|--|---------|--|----------------------|
| | | Tangent modulus | Plastic stress (GPa) |
| Item | Value | 3.265 | 0.319 |
| Density | 7.8e-06 | 1.738 | 0.363 |
| Young's modulus | 210 | 0.987 | 0.412 |
| Yield stress(GPa) | 0.277 | 0.638 | 0.444 |
| Poisson's ratio | 0.3 | 0.482 | 0.468 |
| Thickness(mm) | 2.3 | 0.393 | 0.488 |
| Lankford coef. for normal anisotropy | 1.030 | 0.312 | 0.519 |

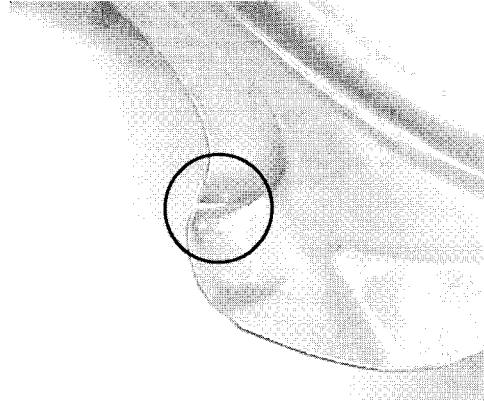


Fig. 3 Critical region for forming failure

폼 파단 부분에서의 두께방향 변형률 편차의 절대치를 택하였다. 따라서, 최소화할 목적함수로서 S/N ratio(η , signal to noise ratio)로는 다음 값과 같다.

$$\eta_i = -10 \log (\Delta \epsilon_i^2) \quad (1)$$

펀치의 곡선부와 직선부의 메쉬(mesh) 크기를 조절하여 제한된 요소수 내에서 최대한 실제에 가까운 제품 형상을 표현하고자 하였으며, 최종 수정된 메쉬의 한 변의 길이가 2mm가 되도록 하였다. 이 크기는 블랭크와 접촉하는 금형과 펀치의 곡률 부분을 고려할 때 로우 암의 가공과정을 표현하기에 적절한 크기이다.

3. 직교 배열 실험

3.1 품질 특성과 최소화할 목적 함수의 선정

제조 현장에서 안정된 품질을 얻기 위해 사용하고 있는 실험계획법을 이용하면 공정의 최적화를 위한 반복 계산의 횟수를 크게 줄일 수 있으며 또한 여러 변수들의 인자의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 다구치의 직교배열(Taugchi's orthogonal array) 실험법⁽⁵⁻⁸⁾은 대표적인 실험계획법으로 널리 알려져 있는 좋은 방법 중의 하나이다. 직교배열 실험법의 적용에 있어서는 먼저 최적화 하여야 할 목적함수를 선정하여야 한다. 본 연구에서는 로우 암의 프레스 가공공정에서 가공불량 발생을 억제하기 위한 최적 조건을 구하는 것을 목적으로 한다. 이것은 제품불량 발생에 대한 척도로 평가되는 임계부위(Fig. 3)의 두께변형률 ϵ_f 을 최소화하는 것으로 달성할 수 있다.

이 문제는 smaller-the-better(망소특성)형태의 문제가 된다. 본 연구에서는 최적화하여야 할 품질 특성으로 제

3.2 제어 인자와 수준의 결정

판재 프레스 가공에 있어서 가공성에 영향을 미칠 수 있는 인자들은 재료 고유의 인장특성, 마찰 등 공정변수와 금형 형상에 대한 설계변수등 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 공정변수로는 마찰계수(μ), 재료변수로는 이방성 계수(r), 그리고 설계변수로는 블랭크의 모양(blank shape)을 성형품질에 영향을 미치는 주요 인자로 택하고, 다구치의 직교배열실험에 따른 유한요소 해석을 통하여 각 인자들의 영향을 정량화하고 제조공정을 최적화하였다. 여기서 설계변수로 블랭크의 모양을 택한 것은 실제 로우 암의 제1드로잉 공정 후 트리밍 공정에서 많은 재료가 절단되어 스크랩으로 처리되고 있는 것을 고려하여, 재료의 수율향상에 대한 부수적 효과뿐 아니라 큰 블랭크 사용할 때 재료의 유입저항이 너무 커져서 발생하는 국부적 파단을 줄일 수 있을 것으로 기대되어 선정된 것이다.

계산의 효율화를 위해 한 인자에 대한 수준은 3으로 택하였다. Fig. 4, 5, 6은 블랭크의 형상인자에 대한 3수준의 형상차이를 도시한 것이다. 본 연구에서는 다구치의 직교배열로 4개의 제어인자와 3수준을 갖는 문제에 대해 적합한 Table 2와 같은 L_{16} 직교배열을 선정하였다. 여기서 인자4는 고정된 변수(dummy variable)로 블랭크를 금형에 셋팅하는 위치를 나타낸다.

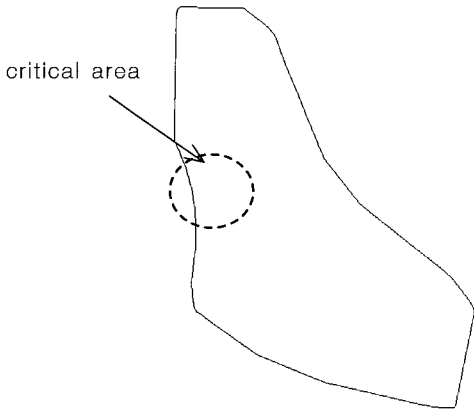


Fig. 4 Original blank shape

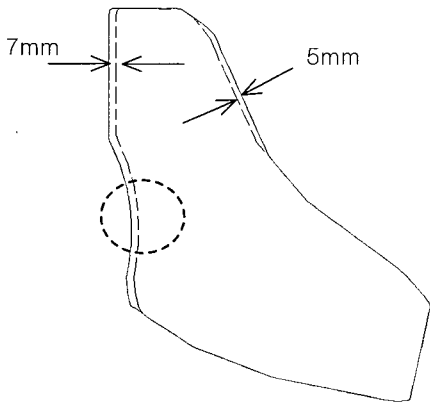


Fig. 5. Modified blank shape marked by dashed line (shape 1)

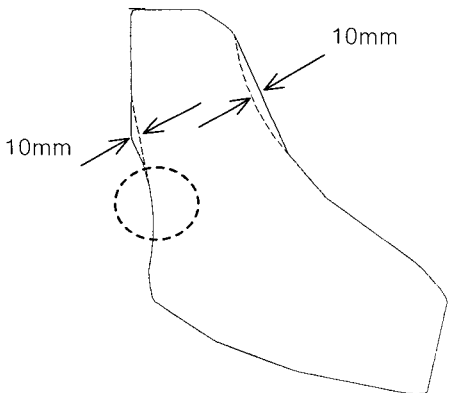


Fig. 6 Modified blank shape marked by dashed line (shape 2)

Table 2 Taguchi's L_9 orthogonal array for simulation

| Exp No. | A (μ) | B (r) | C (Blank shape) | D (Position) |
|---------|-------------|------------|-----------------|---------------|
| 1 | 1 (0.1) | 1 (1.0) | 1 (origin) | 1 (origin) |
| 2 | 1 (0.1) | 2 (1.3) | 2 (shape1) | " |
| 3 | 1 (0.1) | 3 (1.6) | 3 (shape2) | " |
| 4 | 2 (0.15) | 1 (1.0) | 2 (shape1) | " |
| 5 | 2 (0.15) | 2 (1.3) | 3 (shape2) | " |
| 6 | 2 (0.15) | 3 (1.6) | 1 (origin) | " |
| 7 | 3 (0.2) | 1 (1.0) | 3 (shape2) | " |
| 8 | 3 (0.2) | 2 (1.3) | 1 (origin) | " |
| 9 | 3 (0.2) | 3 (1.6) | 2 (shape1) | " |

* Case of Exp. No. 1 means the actual press forming condition in stamping shop

4. 결과와 고찰

Fig. 7, 8, 9는 Table 2에서 대표적인 경우인 실험 1, 2, 3의 유한 요소 해석결과로 재료의 변형후의 형상을

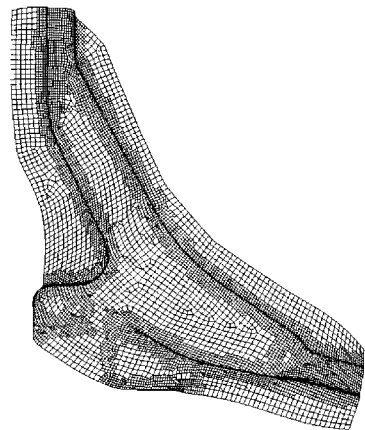


Fig. 7 Deformed mesh shape of EXP 1

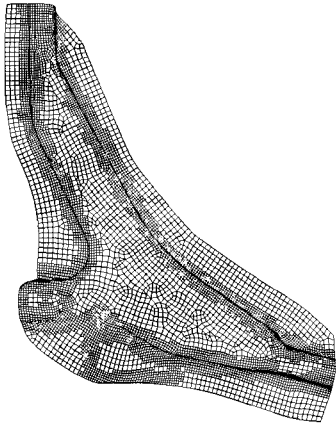


Fig. 8 Deformed mesh shape of EXP 2

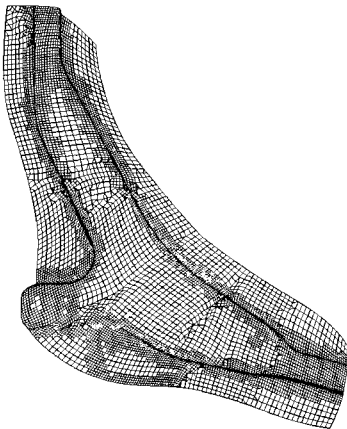


Fig. 9 Deformed mesh shape of EXP 3

나타낸다. 각 경우에 대한 유한요소 해석을 통해 파단 위험이 있는 임계부위에서 평가된 두께방향 변형률로부터 계산한 목적함수 값을 이용하여 각 인자의 수준 변동에 따른 목적함수의 변화를 보여주는 평균분석(Analysis of Mean, ANOM) 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 알 수 있듯이 마찰계수(μ)는 1 수준, 이방성 계수(r)는 3 수준, 블랭크 모양(blank shape)은 3 수준에서 목적함수의 최적화가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)의 결과도 Table 3에 함께 나타내었다. 이와 같이 분산분석을 하는 목적은 목적 함수에 미치는 각 인자의 영향에 대한 상대적 크기를 결정하고 오차를 고려하여 그 정도를 평가하는데 있다. 각각의 인자에 대해 3 수준으로 결정되

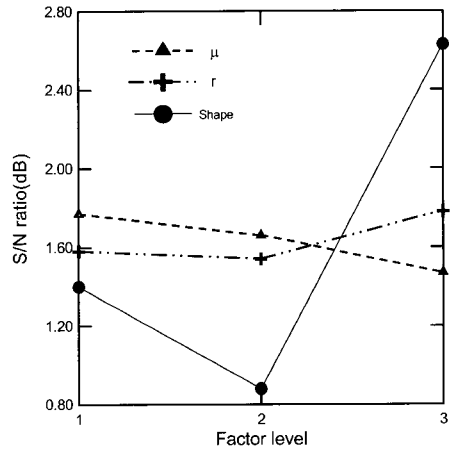


Fig. 10 The factor effects on the variation of the S/N ratio

Table 3 ANOM and ANOVA table for the simulation

| Factor | Average η by level (dB) | | | Degree of freedom | Sum of squares | Mean square | F ratio |
|--------------|------------------------------|------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | | | | |
| A | 1.77 ^a | 1.66 | 1.47 | 2 | 0.138 | 0.069 | |
| B | 1.58 | 1.54 | 1.78 ^a | 2 | 0.099 | 0.050 | |
| C | 1.40 | 0.88 | 2.63 ^a | 2 | 4.846 ^b | 2.423 | 40.9 |
| D | | | | | | | |
| Error | | | | 0 | | | |
| Total | | | | 6 | 5.083 | | |
| Pooled error | | | | (4) | (0.237) | (0.0593) | |

- (1) Overall mean of η is 1.63dB.
- (2) ^aIndicate the optimum level
- (3) ^bIndicate the sum-of-squares added together to estimate the pooled error sum of squares, shown in parentheses
- (4) The F ratio is calculated by using the pooled error mean square

는 제곱합(sum of square)과 F ratio는 다음의 식(2)와 식(3)에 의해 계산된다.

Sum of square for each factor =

$$3(m_{j_1} - m)^2 + 3(m_{j_2} - m)^2 + 3(m_{j_3} - m)^2 \quad (2)$$

$$F = \frac{n_j}{P_e} \quad (3)$$

여기서, m 은 $m = 1/9 \sum \eta_i = 1.63 (dB)$ 로, 9회 해석결과로부터 계산되는 η_i 의 평균값이다. 또한 m_{j_i} 는 $m_{j_i} = 1/3 \sum (\eta_j)_i$ 로 주어지는 j 인자에 대해 i 수준 ($i = 1, 2, 3$)에서의 평균 η 값이고, n_j 는 평균 제곱(mean square)이며 P_e 는 풀링된 오차(pooled error) 평균제곱을 나타낸다.

Table 3의 분산분석 결과를 보면 인자 C(블랭크 모양)는 전체 제곱합(total sum of squares)에 대하여 $(4.846/5.083) \times 100 = 95.34\%$ 의 영향을 미치고 A인자(마찰 계수, μ)와 B인자(이방성계수, r)를 합한 것은 4.66%의 영향을 준다. 변수들 중에서 블랭크 모양의 수준 변동에 따라 목적 함수의 값이 가장 크게 바뀌는 것을 알 수 있다. 이는 블랭크 모양이 여러 가공 공정 인자들 중에서 재료의 성형성에 가장 큰 영향을 미치는 것을 의미한다 (Fig. 10).

상기 분석결과, 최적인자의 조건이 $A_1B_3C_3D_1$ 이므로 최적조건에서의 η_{opt} 는 Table 3의 평균분석의 결과로부터 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_{opt} &= m + (m_{C_3} - m) \\ &= 1.63 + (2.63 - 1.63) \\ &= 2.63 (dB) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, m 은 η 의 전체평균, m_{C_3} 는 C인자가 3 수준인 경우의 η 평균이다. A와 B인자에 의한 제곱합(sum of square)은 작고, 분산분석에서 오차로 포함시켰기 때문에 이 값은 η_{opt} 의 계산에 포함시키지 않았다.

직교배열실험에서 최적의 인자조건을 찾고 이 조건에서의 해석결과를 예측한 후에 이와 같은 조건에서 실험을 하고, 그 결과를 예측한 값과 비교하여 그 값이 거의 비슷하다면 직교배열실험을 통해 여러 인자가 η 에 미치는 영향을 알아보는 것이 적절하였다고 할 수 있다.

본 해석의 경우는 최적인자의 조건이 Table 2의 세 번째 경우(case 3)와 일치하기 때문에 추가적인 실험은 필요치 않으며, 이 때 예측 오차는 0.31이다. η_{opt} 의 95% 신뢰한계는 $\pm 2\sigma = \pm 0.6$ 으로 예측오차가 신뢰구간에 포함되므로 PAM-STAMP의 성형해석에서 얻은 결론은 타당하다고 할 수 있다. 실제 로우 암의 프레스 가공공정을 나타내는 case 1과 다구치 직교배열실험에 의해서 얻은 최적 성형 조건인 case 3의 경우에 임계

부위에서 계산된 변형률 분포를 SAPH38P 재료의 성형 한계선(FLC)⁽⁹⁾과 함께 Fig. 11에 각각 나타내었다.

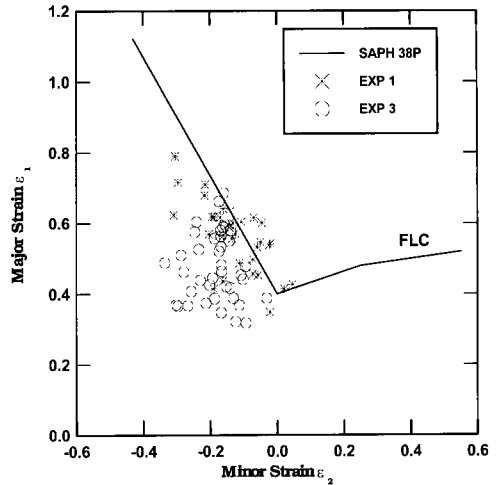


Fig. 11 FLC and strain distribution of EXP 1

그림에서 알 수 있듯이 case 3인 조건에서는 case 1인 조건보다 임계부위의 변형률 분포가 안전한 상태에 있어 성형조건이 향상되었음을 확인 할 수 있었다. 이는 case 3의 경우에 동일한 마찰조건에서 성형에 가장 많은 영향을 미치는 블랭크의 모양이 개선되었고, 재료의 이방성 계수도 높은 값을 갖기 때문에 보다 안정성형이 가능하였던 것으로 생각된다.

프레스 가공공정의 직교배열 가상해석에 의한 결과의 타당성을 확인하기 위해서 원래 블랭크 형상(original blank shape)과 최적 성형조건을 나타내는 개선된 블랭크 형상(blank shape 2)을 이용한 프레스 가공 실험을

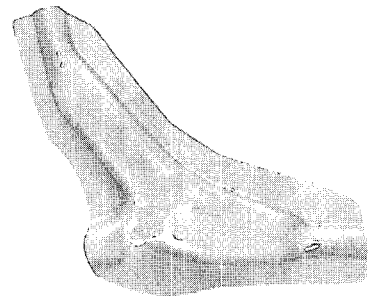


Fig. 12 Deformed photo of the original blank shape in experiment

수행하였다. 실험 전에 임계부위 주위에 지름 2.55mm,

피치 3mm의 원형 그리드를 예칭하여 실제 프레스 가공 공정에 투입하여 가공 실험한 후, 변형된 그리드를 마스터 그리드(master grid)와 함께 디지털 카메라로 촬영하여 본 연구실에서 개발한 변형률 측정 프로그램을 이용하여 주변형률과 부변형률을 측정하였다.

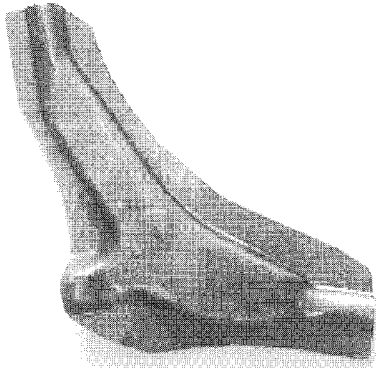


Fig. 13 Deformed photo of the blank shape 2 in experiment

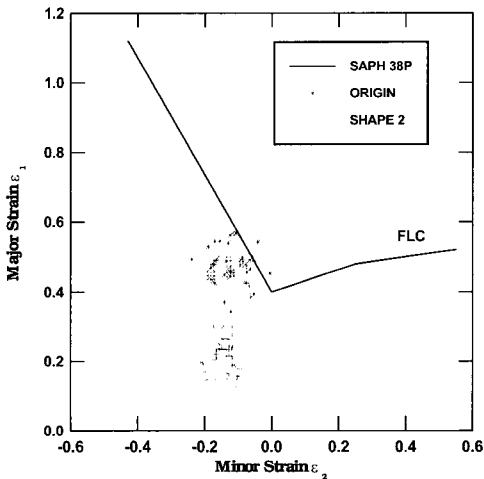


Fig. 14 FLC and strain distribution of the original blank shape and the blank shape 2 in experiment

Fig. 12와 13은 각각의 경우에 대한 성형된 시편의 형상을 나타내고, Fig. 14는 각각의 경우에 임계부위에서 측정된 변형률 분포를 나타낸다.

원래 블랭크 형상의 경우는 일부 영역에서 통상의 성형한계 선의 밖 발생영역에 변형률이 존재하고 있으나, 개선된 블랭크의 경우는 성형한계선 밑의 안전영역에 변형

률이 존재하고 있어 개선된 블랭크의 경우에 가공성이 향상되고 있음을 확인하였다. 그러나 원래 블랭크형상의 경우도 성형한계도 위에 변형률이 존재하고 있음에도 불구하고 실제 프레스 가공 실험에서는 파단이 발생하지 않았다. 이는 로우 암의 프레스 가공시 임계부위의 변형 경로가 단순 비례부하경로를 따르지 않아 Hecker의 방법⁽¹⁰⁾에 따라 도출한 성형한계선과 최종 상태에서 평가한 변형률 분포를 비교한 것에 의한 차이에 기인한 것으로 판단된다. 이 부분에 대해서는 추후 연구가 필요하다.

한편 개선된 블랭크 형상의 경우는 원래의 블랭크 형상과 비교하면 개선된 블랭크 형상이 원래의 블랭크 형상보다 크기가 작아졌으므로 블랭크 제품의 수율(yield ratio) 향상이 기대되는 부수적인 효과가 있다. 로우 암 블랭크를 슬리팅 폭이 660mm인 코일에 복열 배열(double array) 하는 경우에 원래 블랭크 형상과 개선된 블랭크 형상의 수율을 본 연구실에서 개발한 auto-nesting 프로그램⁽¹¹⁾으로 계산한 결과, 원래 블랭크 형상의 경우는 수율이 74.16%이었으나, 개선된 블랭크 형상의 경우는 수율이 75.2%으로 약 1%가 넘는 수율의 향상을 보이고 있다.

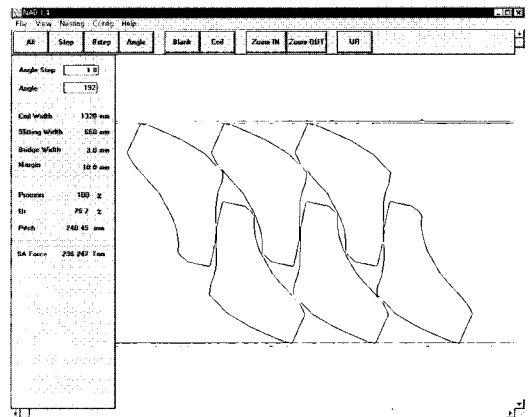


Fig. 15 Optimum layout of blank shape 2 to give maximum yield ratio by auto-nesting program⁽¹¹⁾

따라서 본 연구에서 대상으로 한 로우 암의 프레스 가공공정에서 블랭크 형상의 최적화는 가공성 향상뿐만 아니라 원자재의 수율향상에 따른 원가절감에도 크게 기여할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 고강도 화와 경량화 되어 가고 있는, 서스펜션 부품을 대상으로 PAM-STAMP에 의한 성형 해석과 직교배열 실험을 연계한 CAE 기술을 적용하여 프레스 가공 공정의 최적화를 꾀하였다. 본 연구를 통해 이를 바탕으로 다구치의 직교배열실험과 같은 효과적 계획실험법을 유한요소해석기술과 연계하면 프레스 성형품질에 미치는 주요 인자들의 영향을 정량화 할 수 있음을 보였다. 본 연구 결과 여러 인자들 가운데 블랭크 모양이 로우 압의 프레스 가공성에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 이러한 CAE 기술을 바탕으로 설계단계에서 유한 요소법을 사용한 프레스 성형 시뮬레이션으로 성형성을 사전에 평가하여 트라이아웃 단계에서의 시행착오와 생산과정에서의 불량을 줄일 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 1999년도 두뇌한국 21사업의 연구비 지원에 의해 행해졌으며 이에 관계자 제위께 감사드린다

참 고 문 헌

- (1) 이동녕, 양동렬, 김용환 편, 1996, "자동차부품 제작 기술의 진보", 한국소성가공학회.
- (2) 오수익, 금영탁, 김형중 편, 1998, "박관성형기 술의 현재와 미래", 한국소성가공학회.
- (3) 김영석, 1998, "소성역학", 경북대학교 기계공학부.
- (4) Pam System International, 1998, "PAM-STAMP SOLVER MANUAL", PSI the Software Company of ESI Group.
- (5) Phadlke, M.S. and Taguchi, G., 1987, "Selection of quality characteristics and S/N ratio for robust design", Conference Record, GLOBECOM 87 Meeting, IEEE Communications Society, Tokyo, Japan, pp.1002~1007.
- (6) 김호성의 5명, 1992, "강건설계를 이용한 품질 공학", 民英社.
- (7) 박성현, 1998, "현대실험계획법", 民英社.
- (8) 이종원, 1989, "Taguchi 방법에 의한 실험계획", 자동차공학회지, Vol. 11, No. 6, pp. 3~16.
- (9) 강건제연구부 가공연구실, 1994, "성형한계도 매뉴얼", 산업과학기술연구소
- (10) Ghosh, A.K., Hecker, S.S., and Keeler, S.P., 1984, "Sheet metal forming and testing", Workability Testing Techniques, G.E. Dietered., ASM, Metals Parks, Ohio, pp.125~195.
- (11) 김영석, 손현성 서상구, 1999, "스탬핑 블랭크의 효율적 배치를 위한 소프트웨어 개발", 대한기계학회 논문집 A, 제 23권 제 8호, pp.1380~1387.