

〈논 문〉

## 다구치 직교배열을 이용한 평면변형률 장출실험용 금형의 최적설계

김영석\* · 하동호\*\* · 한수식\*\*\*

(1997년 2월 24일 접수)

### Optimization of the Tool Geometry of PSST Using Taguchi's Orthogonal Matrix

Y. S. Kim, D. H. Ha and S. S. Han

**Key Words :** Plane Strain Punch Stretching Test(평면변형 장출실험), Tool Optimization(공구 최적화), Finite Element Analysis(유한요소해석), Taguchi's Orthogonal Matrix(다구치 직교배열)

#### Abstract

Recently, the plane strain punch stretching test(called PSST) has been developed and used successfully in the evaluation of the press formability of automotive steel sheets. In this paper, the optimum punch geometry of the original PSST tool was investigated by the FEM analysis. The punch length, crown and corner radius are chosen to be optimized according to the Taguchi's experiment technique with the  $L_4$  orthogonal array.

#### 1. 서 론

자동차사의 제조공정-프레스, 조립, 도장, 검사-에 있어서 프레스공정은 자동차 제조를 위한 첫 공정으로 이 공정에서의 품질 확보는 후속 공정에 큰 영향을 미친다. 따라서, 이 공정에서의 완벽한 품질보증을 위해 도입되는 강판에 대해 제조업체에 가공성을 보증하도록 요구하고 있는 실정이다.

지금까지는 종래의 Erichsen 방법에 의한 제조강판에 대한 가공성 보증이 이루어지고 있으나 이 방법은 아연도금 강판, 고강도 강판 등의 신기능 강판을 자동차업계에서 사용하기 시작하면서 그 효용성이 크게 떨어지고 있는 실정이다. 따라서 보다

신뢰도가 있는 보증기술의 확립에 대한 요구가 높아지고 있다.<sup>(1~7)</sup>

이러한 요구에 부응하여 새로운 품질보증기술로서 평면변형 장출실험기술(Plane Strain Punch Stretching Test, PSST)이 개발되어<sup>(8~11)</sup> 자동차용 강판의 제조현장에 적용이 추진되고 있다. 평면변형 장출실험은 시편의 파단시 한계높이를 이용하여 스템핑 성형성을 통계적으로 평가할 수 있고, 그 결과는 스템핑 실적과 잘 일치하고 있다. 또한, 초음파 두께측정기를 이용하여 파단면 근방의 두께를 정밀측정하면 재료의 한계변형률을 정확히 예측할 수 있는 특징을 가지고 있다.<sup>(12)</sup> 그러나, PSST 기술이 공인된 시험기술로서 인정받기 위해서는 동일한 재료와 실험조건에 대해서 항상 같은 결과를 도출할 수 있는 실험의 안정성과 재현성이 확보되어야 한다. 기존의 고속 PSST 실험에서는 시편의 파단이 편치어게 곡률과 시편의 대칭중앙부에서 동

\*회원, 경북대학교 기계공학과

\*\*회원, 경북대학교 대학원

\*\*\*포항제철(주) 기술연구소

시에 발생하여 평면변형하에서 성형성 평가가 이루어진다. 하지만, 재료의 평면변형에 대한 면밀한 조사가 필요한 경우에 행해지는 저속실험속도(50 mm/min이하)에서는 시편의 파단이 펀치에게 곡률부에서 먼저 발생하여 시편의 내칭중앙부로 전파되어 가는 양상이 나타나고 있어 펀치에게 곡률이 작아질수록 펀치에게 곡률부의 과대 압힘변형에 의한 재료의 성형성의 과소평가 경향이 증가할 것으로 예상된다. 그러므로, 현재 사용되고 있는 PSST에 대해서 보다 안정하고 재현성이 우수한 실험결과를 유도하기 위해 금형조건에 대한 면밀한 재검토를 통해 우수한 최적 금형형상을 확보하도록 하는 것이 선결조건이라 할 수 있다.

PSST 금형형상에 대한 최적화를 위해서는 다수의 금형을 가공하여 반복실험에 의존할 수 있으나 대안으로는 최근 가상해석용으로 널리 이용되고 있는 유한요소 시뮬레이션(FE simulation)<sup>(13-15)</sup>을 이용하는 것이 좋은 방법이 된다. 또한 제조현장에서 강건품질을 얻기 위해 사용하고 있는 실험계획법을 이용하면 최적화를 위한 반복제산의 횟수를 크게 줄일 수 있으며, 또한 여러 변수들의 인자의 영향을 정량적으로 평가할 수 있기 때문에 실험 계획법으로 널리 알려져 있는 다구치의 직교배열실험법<sup>(16,17)</sup>은 좋은 도구가 될 것이다.

본 연구에서는 PSST 공정의 FEM 해석을 수행하였고, 금형형상중에서 펀치에게 곡률반경, 펀치 크라운, 펀치길이 등을 변수로 하여 다구치(Taugchi)의 L<sub>4</sub> 직교배열 실험에 의해 이들 변수가 평면변형 거동에 미치는 영향을 평가하여 최적 금형형상을 도출하였다. FEM 해석에서 금형 및 판재에 대한 유한요소 분할은 HyperMesh를 이용하여 모델링하였고, 동적양해법(explicit dynamic method)을 채용하고 있는 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP를 이용하여 PSST 공정을 해석하였다.

## 2. PSST 공정의 유한요소해석

PSST 공정을 간단히 나타내면 Fig.1과 같다,

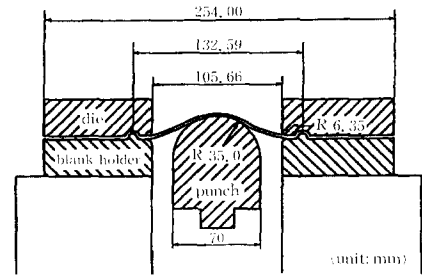


Fig. 1 PSST tool geometry

PSST에서는 적당한 폭을 가진 사각시편의 전 부분에 평면변형 장출변형을 확보하기 위해 특별히 고안된 실린더형 펀치가 사용된다. PSST는 길이 180 mm의 일정한 폭을 갖는 시편을 고정비드를 가진 다이와 홀더 사이에 위치시키고, 298.9 kN의 충분한 힘을 가하여 길이방향으로 재료의 유입이 없도록 한후 특별히 고안된 실린더형 펀치를 이용하여 시편에 평면변형상태에서 파단이 발생할 때까지 수직방향으로 10 mm/s의 속도로 펀치를 진행시키 행해진다. 이때 재료의 성형성은 시편이 파단할 때까지의 한계높이로 평가한다. 시편의 파단시 한계높이를 이용하여 스템핑 성형성을 통계적으로 평가할 수 있고, 그 결과는 스템핑 실적과 잘 일치하고 있다. 또한, 초음파 두께측정기를 이용하여 파단면 근방의 두께를 면밀히 측정하면 재료의 한계 변형률을 정확히 예측할 수 있다. 따라서, 유한요소해석 공정도 실험공정을 따라 행하였다. FEM 해석에 이용한 재료는 CQ(steel sheet for commercial quality)이며, Table 1에 시편의 기계적 성질을 나타내었다. 해석에서 재료의 소성이방성은 수직이방성 대해서 Hill의 구 이방성이론에 의해 표현하였다.

PSST 공정의 금형 및 판재에 대한 유한요소 모델링은 HyperMesh를 이용하였으며, PAM-STAMP의 입력형식으로는 PAM-crash format을 이용하였다. 요소는 3개의 적분점을 갖는 쉘요소를 이용하였으며, 금형은 강체로 취급하였다. 변형의 대칭

Table 1 Mechanical properties of tested material

| Mate-rial | t(mm) | K(MPa) | $\epsilon_0$ | n value | R value |
|-----------|-------|--------|--------------|---------|---------|
| CQ        | 0.82  | 527    | 0.0052       | 0.24    | 1.72    |

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$$

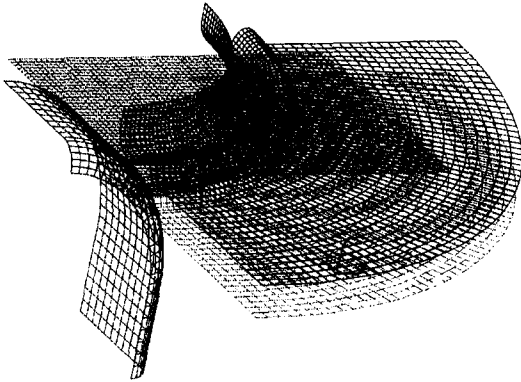


Fig. 2 Finite element model for PSST simulation

성에 의해 전체 모델의 1/4만을 고려하였고, Fig. 2에 그 유한요소 모델을 나타내었다.

해석에서 금형과 재료의 접촉부에서의 쿠름 마찰 계수는 펀치와 시편 사이에는 0.25, 홀더 빗 다이와 시편 사이에는 0.1을 사용하였고, 시편의 폭은 126 mm로 고정하였다.

### 3. 직교배열실험

#### 3.1 품질특성과 최소화할 목적함수의 선정

PSST 금형에 의한 실험시에 실험에 대한 신뢰도를 높이기 위해 시편의 전면에 걸쳐 평면변형률 ( $\epsilon_2=0$ )를 확보하는 것이 필요한데 이는 시편의 전면에서 부변형률의 편차,  $\Delta\epsilon_2=0-\epsilon_2$ 를 최소화함으로써 달성할 수 있다. 따라서, 이 문제는 smaller-the-better(망소특성) 형태의 문제가 되며, 시편 파단부분에서의 부변형률의 편차의 절대치로 품질특성을 정하였다. 그리고, 최소화할 목적함수로서 S/N ratio( $\eta$ , signal to noise ratio)로는 다음 값을 택하였다.

$$\eta_i = -10 \log(\Delta\epsilon_2^2) \quad (1)$$

위의 식을 최소화하는 것은 시편이 장출변형되어

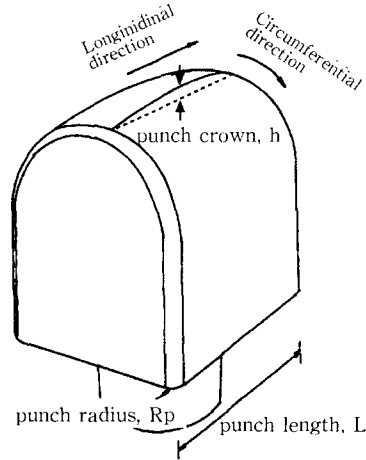


Fig. 3 Definition of punch crown

가는 중에 부변형률의 편차를 최소화하여  $\epsilon_2=0$  상태에서 시편이 파단됨으로서 완전한 평면변형상태에서의 파단을 보장하는 조건을 찾는 것이다.

#### 3.2 제어인자와 수준의 결정

PSST에서 평면변형조건을 확보하기 위한 주요 제어 인자로는 설계변수(금형변수)와 공정변수이다. 그러나, 본 연구에서는 PSST 실험에서 펀치의 기하학적인 구축에 의해서 시험편에 파단이 발생하도록 하기 위해 최적화하여야 할 변수로서는 펀치의 형상만을 주로 대상으로 하였다.

따라서, 본 연구에서는 저속 PSST 실험에서도 펀치어깨 곡률부에서 시편의 파단발생이 번지 일어나지 않도록 억제하면서 동시에 시편의 전면에 걸쳐 평면변형 파단이 발생하도록 펀치형상을 최적화하기 위해서 금형형상에 대한 제어인자로는 펀치어깨 곡률반경  $R_p$ , 펀치크라운  $h$  그리고 펀치길이  $L$ 을 취하였다. Fig. 3에 펀치크라운에 대한 정의를 나타낸다. 또한 계산의 효율화를 위하여 한 인자에 대한 수준은 2를 선택하였다. 따라서 3개의 제어인자와 2수준을 갖는 문제에 대한 다구치 직교배열은

Table 2 Taguchi L4 orthogonal array for PSST simulation

| Case | A(Punchcrown) | B(Punch corner radius) | C(Punchlength) |
|------|---------------|------------------------|----------------|
| 1    | 1(0)          | 1(5)                   | 1(35)          |
| 2    | 1(0)          | 2(6)                   | 2(36)          |
| 3    | 2(1)          | 1(5)                   | 2(36)          |
| 4    | 2(1)          | 2(6)                   | 1(35)          |

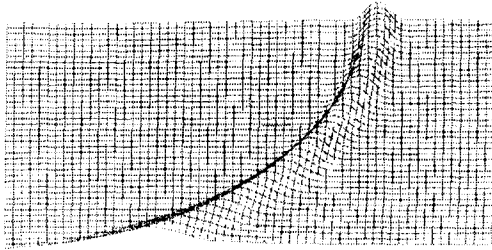


Fig. 4 Deformed shape of blank holding state

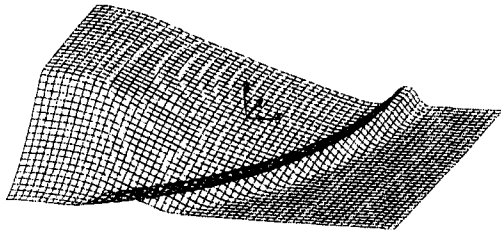


Fig. 5 Deformed shape at punch stroke of H=18 mm

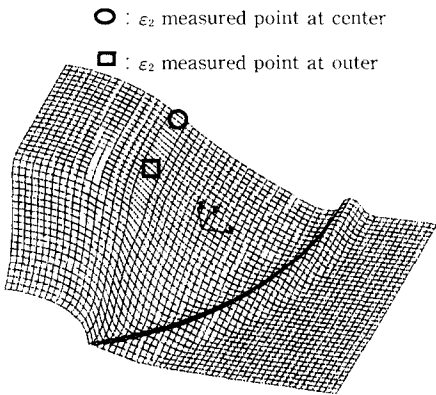


Fig. 6 Deformed shape at punch stroke of H=34 mm

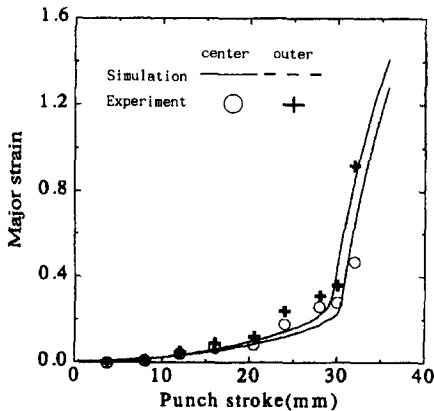


Fig. 7 Development of major strain at the critical two area versus punch stroke in the case 1

Table 2와 같이  $L_4$ 이다.

그리고, 다구치 적교배열실험후 확인실험을 실시함으로써 제어인자들 사이의 교호작용의 존재여부를 파악할 수 있다. 만일, 최적조건 하에서 예측된 응답이 측정치와 일치하지 않는다면, 이는 곧 교호작용이 크게 작용한다는 것을 의미한다. 만일 양자가 잘 맞으면, 교호작용은 별로 중요하지 않고 다구치 적교배열실험이 적절했음을 의미한다.

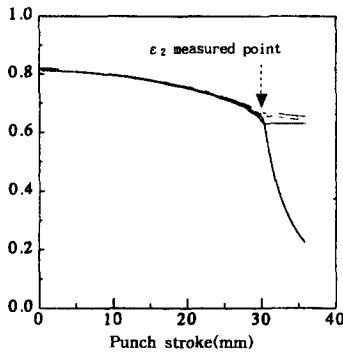
### 3.3 실험의 수행

해석은 Table 2의 다구치 적교배열에 따라 범용 스탬핑 공정해석 소프트웨어인 PAM\_STAMP를 이용하여 수행하였다.

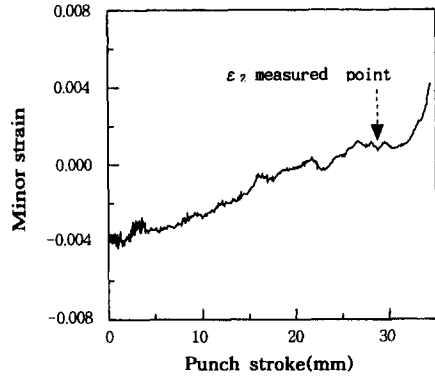
PSST의 해석결과로부터 대표적인 시편의 형상을 단계별로 Fig. 4~Fig. 6에 걸쳐 나타내었다. Fig. 4는 블랭크 홀딩상태를, Fig. 5는 펀치가 18 mm진행한 상태를, Fig. 6은 펀치가 34 mm진행했을 때의 시편의 변형된 형상을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 시편의 길이방향으로 일부에서 유한요소가 심하게 늘어나고 또한 상대적으로 폭방향으로는 변형이 거의 일어나고 있지 않음을 알 수 있는데, 이로써 시편에는 평면변형상태에서 변형집중에 의한 파단이 일어나고 있음을 알 수 있다.

$L_4$  적교배열표중에서 대표적인 경우로 case 1에 대한 유한요소해석과 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림은 시편의 대칭중심부(center)와 펀치어깨 곡률반경부(outer)에서의 펀치높이에 따른 주변형률의 변화를 나타낸 것으로, 시편의 대칭중심부와 펀치어깨 곡률반경부에서 주변형률이 서로 다르게 발전하는 것을 볼 수 있다. 또한 펀치코너부의 주변형률이 중심부의 주변형률보다 더 크게 증가하므로 코너부에서 크랙이 먼저 발생할 수 있다는 것을 해석결과로부터 알 수 있으며, 이것은 시편의 변형 형상으로도 확인할 수 있다. 해석결과, 두 지점에서 측정된 주변형률의 변화 및 차이는 실험결과와 잘 일치하고 있어 본 연구에서 행한 유한요소해석은 타당한 것으로 사료된다.

시편의 대칭중심부에서 파단 발생시의 주변형률 펀치의 측정은 Fig. 8(a)에 나타낸 펀치높이에 따른 변형집중부 근처 요소들에 대한 두께변화 곡선에서 재료의 파단과 동시에 파단부에 근접한 요소에서 응력이 제하되어 두께변화가 더 이상 일어나지 않는 시점<sup>(11)</sup>에서의 펀치 진행높이를 측정하여 Fig. 8(b)에서 그 시점에서의 주변형률을 측정하였



(a) Thickness



(b) Minor strain

Fig. 8 Thickness and minor strain versus punch stroke in the case 1

Table 3 Matrix experiment of PSST simulation with the L<sub>4</sub> orthogonal array

| Exp. No. | Column number and factor assignment |        |       | Observation of minor strain |        |
|----------|-------------------------------------|--------|-------|-----------------------------|--------|
|          | A (h)                               | B (Rp) | C (L) | ε <sub>2</sub> (%)          | η (dB) |
| 1        | 1                                   | 1      | 1     | 0.0012                      | 58.42  |
| 2        | 1                                   | 2      | 2     | 0.0015                      | 56.48  |
| 3        | 2                                   | 1      | 2     | 0.0005                      | 66.02  |
| 4        | 2                                   | 2      | 1     | 0.0003                      | 70.46  |

(1) Smaller-the-better type :  $\eta \text{ (dB)} = -10 \log_{10} (\Delta \epsilon_2)^2$

다.

#### 4. 결과와 고찰

각 경우에 측정된 부변형률의 편차로부터 망소특성 문제에 대해 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다. 각 인자의 수준변동에 따른 목적함수의 변화를 보여주는 평균분석(Analysis of Mean, ANOM) 결과는 Table 4와 같고, 이 결과를 Fig. 9에 도시하였다.

표에서 알 수 있듯이 펀치크라운(h)은 2수준, 펀치어깨 곡률(Rp)은 2수준 그리고 펀치길이(L)는 1 수준에서 펀치금형의 최적목적함수가 얻어짐을 알 수 있다. 그리고, 이들 변수 중에서 펀치크라운의 수준변동에 따라 목적함수의 값이 크게 바뀌는 것을 알 수 있다.

분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)의 결과도 Table 4에 나타내었다. 각각의 인자에 대해 2수준으로 결정되는 제곱합(sum of square)과 F ratio는 각각 식 (2), 식 (3)에 의해 계산된다.

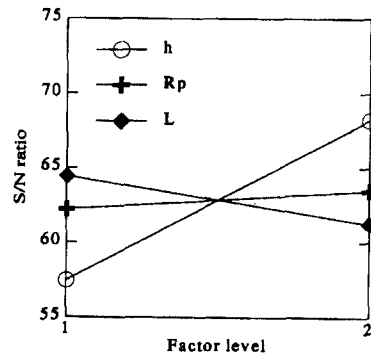


Fig. 9 Plot of factor effects on PSST tool optimization

$$2(m_{j_1} - m)^2 + 2(m_{j_2} - m)^2 \tag{2}$$

$$\frac{n_j}{P_e} \tag{3}$$

여기서,  $m$ 은  $m = 1/4 \sum \eta_i = 62.845 \text{ (dB)}$ 로 정의

**Table 4** ANOM and ANOVA table for the PSST simulation

| Factor<br>F-ratio | Average $\eta$ by level (dB) |                    | Degree of<br>freedom | Sum of<br>squares | Mean<br>square |      |
|-------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|----------------|------|
|                   | 1                            | 2                  |                      |                   |                |      |
| A                 | 57.45                        | 68.24 <sup>a</sup> | 1                    | 111.624           | 111.624        | 6.34 |
| B                 | 62.22                        | 36.47 <sup>a</sup> | 1                    | 2.344             | 2.344          |      |
| C                 | 64.44 <sup>a</sup>           | 61.25              | 1                    | 15.264            | 15.264         |      |
| Error             |                              |                    | 0                    |                   |                |      |
| Total             |                              |                    | 3                    | 129.232           |                |      |
| Pooled error      |                              |                    | (2)                  | (17.608)          | (17.608)       |      |

(1) Overall mean of  $\eta$  is 62.845 dB. (2) <sup>a</sup>Indicate the optimum level. (3) <sup>b</sup>Indicate the sum-of-squares added together to estimate the pooled error sum-of-squares, shown in parentheses. The F-ratio is calculated by using the pooled error mean square

되는 4회 실험결과로부터 계산되는  $\eta_i$ 의 평균값이고,  $m_{ji}$ 는  $m_{ji}=1/2\sum(\eta_{ji})_i$ 로 주어지며,  $j$ 인자에 대해  $i$ 수준( $i=1,2$ )에서의 평균  $\eta$ 값이고,  $n_j$ 는 평균제곱(mean square)이며,  $P_e$ 는 풀링된 오차(pooled error) 평균제곱을 나타낸다.

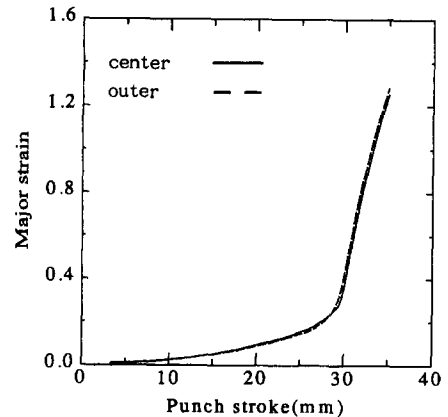
Table 4의 분산분석결과를 보면 인자 A(핀치크라운, h)는 전체 제곱합(total sum of squares)에 대하여  $111.624/129.232=86.4\%$ 의 영향을 미치고 B인자(핀치어깨 곡률반경, Rp)와 C인자(핀치길이, L)를 합한 것은 13.6%의 영향을 미친다.

이와 같이 분산분석을 하는 목적은 목적함수에 미치는 각 인자의 영향에 대한 상대적 크기를 설정하고 오차를 고려하여 그 정도를 평가하는데 있다. 상기 분석결과, 최적인자의 조건이  $A_2B_2C_1$ 이었다. 따라서 최적조건에서의  $\eta_{opt}$ 는 Table 3의 평균분석의 결과로부터 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_{opt} &= m + (m_{A_2} - m) \\ &= 62.845 + (68.24 - 62.845) \\ &= 68.24(\text{dB}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $m$ 은  $\eta$ 의 전체평균,  $m_{A_2}$ 는 A인자가 2수준인 경우의  $\eta$ 의 평균이다. B와 C인자에 의한 제곱합(sum of square)은 작고, 분산분석에서 오차로 포함시켰기 때문에 이들에 따른 개선양은 최적조건에서의  $\eta$ 에 포함시키지 않았다.

직교배열실험에서 최적의 인자조건을 찾고, 이 조건에서의 실험결과를 예측한 후에 이와 같은 조건에서 실험을 하고 그 결과를 예측한 값과 비교하여 예측한 값과 실험에서 비교한 값이 거의 비슷하



**Fig. 10** Development of major strain at the critical two area versus punch stroke in the case 4

다면 실험이 여러 인자가  $\eta$ 에 미치는 영향을 알아 보는데 적절하였다고 할 수 있다.

본 실험의 경우는 최적인자의 조건이 Table 2의 네번째 경우(case 4)와 일치하기 때문에 추가적인 실험은 필요치 않다.  $\eta_{opt}$ 의 신뢰한계는  $\pm 2\sigma = \pm 5.04$ 로 신뢰도 95%를 가지며, 신뢰구간은 [65.72, 70.76]이다. 그러므로, 네번째 경우(case4)의 경우는 오차 2.22로  $\eta_{opt}$ 에 대해 95% 신뢰구간에 포함된다. 따라서 수치실험에서 얻은 결론은 타당하다고 할 수 있다.

Fig. 10은 Table 2의 case 4에 대한 유한요소해석 결과로 시편의 대칭중심부와 핀치어깨 곡률반경부에서 측정할 주변형률 증가량은 다른 경우와 비교하면 Fig. 10의 경우가 두 위치에서 거의 같은 크기로 증가하고 있기 때문에 약간의 시간차이는



(a) Experiment with the conventional punch



(b) Experiment with the optimized punch

Fig. 11 Comparison of deformed shapes in experiment

있어도 거의 동일한 시기에 평면변형하에서 파단에 달할 것이라 예상된다. 따라서, 본 연구의 목표인 시편의 전 영역에서 파단에 동시에 또는 가능하면 시편의 대칭 중심부에서 파단이 먼저 발생하여 외주로 전파되어 가는 형태가 보다 잘 이루어질 것으로 사료된다.

Fig. 11은 기존 펀치금형과 최적설계된 펀치금형을 이용한 프레스 실험결과이다. Fig. 11(a)은 기존 펀치금형을 사용한 것이다. 크랙이 펀치 곡률부근에서 먼저 발생하여 시편 대칭부쪽으로 전파한 것을 확인할 수 있다. 그러나, 최적설계된 펀치를 사용한 경우, Fig. 11(b), 크랙의 형상을 보면 크랙이 펀치어깨 곡률과 시편의 대칭중심에서 거의 동시에 발생한 것으로 생각된다. 이 결과는 다구치 직교배열로부터 얻어진 최적금형에 대한 유한요소 해석결과(case 4)와 잘 일치한다. 이로부터 본 논문의 다구치 직교배열을 이용한 최적설계 과정이 적절하였음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 PSST 공정에서 펀치금형에 대한 FEM 해석과 다구치  $L_4$  배열을 이용한 민감도해석을 적용하므로 펀치의 변수중 펀치크라운이 평면변형 확보에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알게 되었다. 또한 펀치크라운(h) 1 mm, 펀치어깨 곡률반경(Rp) 6 mm, 펀치길이(L) 35 mm에서 펀치형상

을 최적화하여 평면변형의 신뢰성을 예측오차 95% 신뢰구간 안에 들어올 수 있게 펀치금형을 최적화하였다.

## 후 기

본 연구는 포항제철(주)의 위탁연구지원에 의해 이루어졌으며, 이에 관계 제위께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 김영식, 박기철, 1992, "판재성형성 평가 및 응용기술," 산기연 워크숍자료, pp. 68~99.
- (2) Park Keechul and Kim Youngsuk, 1995, "Effect of Material Properties and Process Variables on Stamping Formability of Steel Sheet," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 51, pp. 64~78.
- (3) Hecker, S. S., 1975, "Simple Technique for Determining Forming Limit Curve," *Sheet Metal Industries*, Vol. 51, pp. 671~676.
- (4) Keeler, S. P., 1965, "Determination of Forming Limits in Automotive Stamping," *SAE paper*, No. 650535.
- (5) Goodwin, G. M., 1968, "Application of Strain Analysis to Sheet metal Forming Problems in the Press Shop," *SAE paper*, No. 680095.
- (6) Sang, H. and Nishikawa, Y., 1983, "A Plane

- Strain Tensile Apparatus," *J. Metals*, Vol. 35, No. 2, pp. 30~33.
- (7) Ayres, R. A., et al., 1979, "Evaluating the GMR Limiting Dome Height test as a New Measure of Press Formability near Plane Strain," *J. Applied Metalworking*, Vol. 1, No. 1, pp. 73~82.
- (8) 김영석, 김기수, 1993, "평면변형장출 실험기술의 개발," 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1132~1137.
- (9) Kim Youngsuk and Park Keechul, 1994, "A Plane Strain Punch Stretching Test for Evaluating Stamping Formability of Steel Sheets," *Metal Trans.*, Vol. 25, pp. 2199~2205.
- (10) 김영석, 박기철, 1994, "평면변형장출 시험기술의 안정성에 관한 연구," 대한금속학회지, 제32권, 제1호, pp. 74~79.
- (11) Kim Youngsuk, Han Soosik and Park Chundal, 1996, "Finite Element Simulation of the Plane Strain Punch Stretching Test," *Proceeding of 19th IDDRG Biennial Congress*, pp. 295~304.
- (12) 김영석, 남재복, 1993, "평면변형장출실험을 이용한 스탬핑 성형성 평가," 한국자동차공학회지, 제15권, 제2호, pp. 121~129.
- (13) 김권희, 1990, "판재 성형용 프레스 금형설계를 위한 유한요소법의 응용," 대한기계학회지, 제30권, 제3호, pp. 231~236.
- (14) 강신유, 김현영, 1996, "자동차 충돌해석용 프로그램 개발(I)," 자동차공학회지, 제18권, 제4호, pp. 50~53.
- (15) PAM-STAMP User's Manual, 1996.
- (16) Phakdke, M. S., 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall International Eds.
- (17) 이종원, 1989, "Taguchi 방법에 의한 실험계획," 자동차공학회지, 제11권, 제6호, pp. 3~16.