

실험계획법을 이용한 휠 디스크의 다단판재성형 공정 설계

이명균*·오수익**

Design for the multistage sheet metal forming of wheel disks by Design of Experiment

Myeong-Gyun Lee and Soo-Ik O

Abstract

There is a strong industrial demands for the development of light-vehicle to improve fuel efficiency. It is more effective to reduce weight of the parts directly driven by an automobile engine. So the saving in weight of wheels which is operated by an automobile engine improve fuel efficiency more than other parts. There are many step of sheet metal forming in fabricating automotive wheel, so that it is difficult to design process and tools of multi-stage stamping. Traditionally, design process and tools have depended on the experience of skilled workers and it has done by trial and error methods. However, it needs too much costs and time. Taguchi methods has an advantage of the number of required experiments and reliability compared with trial and error method. In this study, Taguchi methods and response surface methods are applied to design process and tools of automotive wheel. As a result, the principal variables are selected and process conditions are optimized.

Key Words : Design of Experiments, Taguchi Methods, Response Surface Method, Plastic Deformation, Sheet Metal Forming, Multi-step Forming

1. 서 론

자동차 공업에서 광범위하게 사용되고 있는 판재성형은 인장, 굽힘, 드로잉 등의 다양한 조합으로 판재에 큰 소성변형을 일으켜 비교적 복잡한 형상을 얻어내는 방법으로 형상이 복잡해질수록 찢어짐이나 주름이 발생하기 쉽기 때문에 일반적으로 한 공정보다는

여러단계의 공정을 거쳐 성형이 이루어진다. 그러나 블랭크, 다이, 펀치, 블랭크 홀더의 형상, 접촉 조건, 마찰, 펀치 속도 등과 같은 수많은 인자들이 결과에 미치는 영향을 정확히 예측하기가 어렵기 때문에 원하는 구조적 특성을 가진 최종 성형물을 만들어내기 위한 공정 및 금형을 설계하는 것이 결코 쉬운 일이 아니다.

* 서울대 대학원
** 서울대 기계항공공학부

전통적으로 판재성형의 공정이나 금형 설계는 그 제품에 대해 숙련된 개인의 경험을 바탕으로 시행착오법을 통하여 인자들을 변경시키는 방식으로 행해져왔다. 이러한 방식은 비용과 시간이 많이 소모되고, 개인의 주관이 너무 많이 개입되기 때문에 설계 기준과 방법이 다양하고 노하우가 전달되지 않고 단절되는 문제점이 있다. 따라서, 좀더 효율적이고 일반적인 금형설계기법의 정립이 필요하지만 판재성형에 대해서는 전무한 실정이다.

본 논문에서 설계 대상으로 선택한 자동차용 휠 디스크는 일반적으로 강판을 소재로 여러 단계의 판재성형공정을 거쳐 생산되는 부품으로 최종 형상에서부터 한단계씩 역추적해가는 방식으로 각 단계의 금형을 설계한다. 본 논문은 휠 디스크의 최종 형상을 만들기 위한 중간 금형을 설계하기 위한 방법을 제시하고자 하는데 그 목적이 있다. 기존 휠 디스크의 예와 현장 기술자의 경험을 바탕으로 주어진 최종 형상과 재질에 대한 설계 기준과 설계변수, 제한조건 등을 결정하고, 다구치 방법론을 사용하여 성형성이 취약한 부분의 두께변화를 목적함수로 각 변수들의 목적함수에 대한 민감도를 평가하여 변수의 수를 줄이고, 반응표면법으로 목적함수를 최소화하는 변수들의 최적조합을 찾아내는 방법을 사용하였다.

2. 실험계획법

실험계획법은 해결하고자 하는 문제에 대하여 최적의 해석법과 실험법의 선정 및 실험을 어떻게 행하면 좋은가를 계획하는 것으로 어떤 인자가 큰 영향을 미치는지, 검출된 인자가 어느 정도의 영향을 미치고 이러한 인자들의 최적 조건을 선정, 확인하는 데 사용된다.

2.1 다구치방법론

다구치 방법론은 직교배열표를 이용한 실험계획법을 말하는 것이다. 직교배열표는 인자들간에 직교성을 갖도록 실험의 횟수와 변수 및 레벨의 배치를 표시하고 결과를 나타낸 표로 인자의 수가 많을 경우 각 인자의 조합 중에서 주인공과 있을 것 같은 교호작용만 선택하여 실험을 실시하여 최소한의 실험 횟수로 전조합 실시법(full factorial experiment)과 유사한 결과를 얻을 수 있다.

2.2 반응표면법

반응표면법(response surface analysis)은 여러 개의 독립변수 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 가 복합적인 작용을 함으

로써 반응변수 y 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 분석방법이다. 일반적으로 반응표면은 이차 회귀모형을 구하는 것이 유용할 경우가 많은데 이차회귀모형을 구하는 방법에는 3수준 요인 배치법, 3수준계 일부실시법, 중심합성계획, 중심합성회전계획법 등이 있다.

3. 휠 디스크 성형 공정

휠 디스크는 최종 제품은 여러 단계를 거쳐 만들어 지지만 구멍을 제외한 최종 형상은 일반적으로 두, 세번의 드로잉 공정으로 완성된다. 이러한 공정수는 재질의 성형성에 의해 좌우된다. 본 논문의 모델은 성형성이 떨어지는 고장력 강판을 사용하였다. Fig. 1은 공정을 순서대로 도시한 그림이다.

첫번째공정은 제조 공정 중에서 제일 중요하다고 할 수 있는 2차 드로우를 위한 예비 공정으로 3차 드로우에서 필요한 체적을 한번의 공정으로 성형하기 보다는 예비공정을 두어 2차 드로우의 성형성을 보다 좋게 하기 위한 공정이다. 두 번째 공정은 디스크 형상을 위한 체적을 확보하기 위한 공정으로 이 공정에서 디스크는 구조적 기능을 담당하는 내측부와 외형 디자인을 중시하는 외측부로 나뉘게 된다

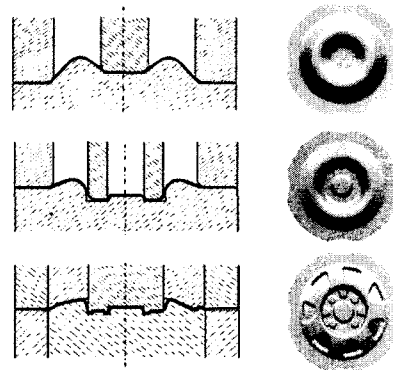


Fig. 1 Stages of wheel disc forming process

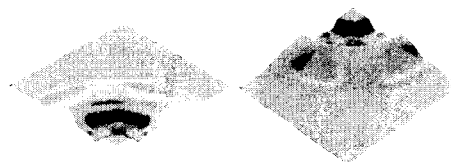


Fig. 2 Weak Section at 3rd stamping

4.2차드로우금형설계

4.1 해석 모델 및 실험 계획

Fig 2.는 최종형상에서 색이 짙은 부분은 성형성이 가장 취약한 부분을 표시한 그림이다. 내측부와 모서리부가 찢어질 가능성이 가장 높게 나타난 두 부분을 각각 최적화 대상으로 선정하고, 내측 반경부분 3점, 모서리부분 2점을 조정불가능변수, 두께 변화를 목표특성치로 선정하였다. 목표특성치에 대한 S/N비는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_i = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right)$$

여기서 y_{ij} 는 실험번호 i 에 대하여, 조정불가능변수 수준이 j 일때 측정된 목표특성치를 말한다.

Fig. 3는 2차 드로우의 금형의 형상 변수를 도시한 그림이다. 제한조건으로 부피조건을 적용하면 r_1, h_2, θ_1 사이엔

$$l_1 (\sec \theta_1 + \tan \theta_1) + 2r_1 \tan \left(\frac{\theta_1}{2} + \frac{\pi}{4} \right) + h_2 = C$$

의 관계식이 성립한다. 상수 l_1 은 73.5mm, C 는 3번째 드로우에서 외측부의 단면 길이로 105mm이다. 따라서 전체 변수는 $r_1, r_2, r_3, r_4, h_1, \theta_1$ 의 6개이고, 각각 3수준으로 설정하였다. $\theta_1-r_1, \theta_1-r_3, r_1-r_3$ 사이엔 상관관계변수를 설정하였다.

변수가 6개이고 각각 3수준이므로 $L_{27}(3^{13})$ 직교배열표가 선택되었다. 각 변수들의 수준별 수치를 Table 1.에 도시하였다.

4.2 해석 및 분석

변수들의 목표특성치에 대한 영향을 검토하고 변수를 검토하기 위해 S/N비를 사용하였다.

Table 2.는 내측 반경부의 각 변수 수준에 대한 S/N비를 나타낸 표이다.

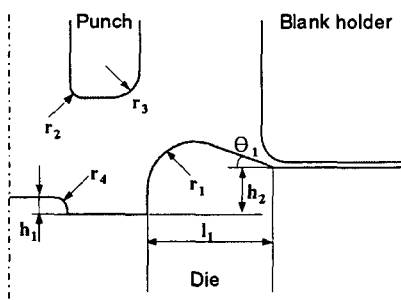


Fig. 3 Shape variables of 2nd draw

Table 1. Variables and level of 2nd draw

변수	Level1	Level2	Level3
θ_1	15°	25°	35°
h_1	6mm	10mm	14mm
r_1	10mm	20mm	30mm
r_2	2mm	6mm	10mm
r_3	6mm	15mm	24mm
r_4	2mm	4mm	6mm

반경부분의 성형성에 영향을 미치는 변수는 r_1, r_4, h_1, θ_1 이며, r_3 과 r_2 는 영향력이 작은 변수로 선정되었다. 직교배열표상의 상관관계변수와 r_3, r_2 와 상관관계가 있다고 추정되는 변수와의 반응표 검토결과 r_2, r_3 는 다른 변수와 연관되어서도 목표특성치에 미치는 영향이 비교적 적다고 결론내려진다.

Table 3.은 모서리부분의 각 변수 수준에 대한 S/N비를 나타낸 표이다.

모서리부의 성형성에 영향을 미치는 변수는 r_1, r_2, r_3 이다. 상관관계변수와 반응표를 통하여 각각의 변수간의 상관관계는 존재하지만 다른 변수와의 상관관계는 존재하지 않는다고 결론내려진다.

반경부분에서 r_1, r_4, h_1, θ_1 에 대해 반응표면법을 이용한 회귀분석을 통하여 목적함수의 회귀 모형을 구하였다. 목적함수는 두께변화의 평균으로 하였다.

Table 2. S/N ratio of variables in inner section

변수	Level1	Level2	Level3	Max-Min
θ_1	13.129	13.019	15.316	2.297
r_1	15.466	13.035	12.650	2.816
r_3	14.966	13.261	13.878	1.705
h_1	11.312	13.891	16.261	4.949
r_2	14.335	14.280	12.848	1.487
r_4	12.367	13.843	15.254	2.887

Table 3. S/N ratio of variables in inner section

변수	Level1	Level2	Level3	Max-Min
θ_1	13.037	12.386	12.792	0.651
r_1	14.295	12.625	11.592	2.703
r_3	13.570	12.101	12.372	1.469
h_1	12.499	13.001	12.715	0.502
r_2	13.452	12.466	12.298	1.154
r_4	12.984	12.776	12.455	0.529

$$f(r_1, r_4, h_1, \theta_1) = 0.1733 + 0.0152\theta_1 + 0.0005 r_1 - 0.0036 h_1 - 0.0409 r_4 + 0.0013 r_1 r_4 - 0.0002 r_1 h_1 - 0.0006 r_4 h_1 - 0.0005 r_4 \theta_1 - 0.0003 h_1 \theta_1 + 0.0011 r_4^2 + 0.0004 h_1^2 - 0.0002 \theta_1^2$$

모서리부에서 구한 회귀모형은 다음과 같다.

$$g(r_1, r_2, r_3) = -0.0387 + 0.0094r_1 + 0.0037r_2 + 0.0166r_3 + 0.0003r_1r_2 - 0.0003r_1r_3 - 0.0001r_2r_3 - 0.0001r_1^2 - 0.0004r_2^2 - 0.0002r_3^2$$

이다.

두 식이 모두 r_1 을 포함하므로 r_1 에 변수 범위내 변수값들을 대입시키면서 변수들에 대한 최적조합을 구하였다. 변수들의 경계값을 벗어나지 않는 범위 내에서 두 목적함수 값이 최소화되는 값들을 구하면 $[r_1, r_2, r_3, r_4, h_1, \theta_1] = [25, 6, 15, 6, 10, 25]$ 이다.

5.1 차드로우금형설계

5.1 해석 모델 및 실험 계획

2차 드로우에서 구해진 금형을 위한 1차 드로우의 금형형상을 설계한다. 2차 드로우에서 성형성이 취약한 부분은 Fig. 3에서 r_2 와 r_3 에 접촉되는 부분이다. 특히 r_2 접촉부분에서 두께 변화가 심하게 일어난다. 따라서, 목표특성치는 r_2 접촉부분에서의 두께 변화로 선정하였다.

Fig. 4는 금형형상변수를 도시한 그림이다. 여기서 L계열 변수는 2차 드로우에서의 접촉조건을 만족시키기 위해서 $L_1=45\text{mm}, L_2=95\text{mm}, L_3=155\text{mm}$ 로 선정하였다. 따라서 상수는 θ_1, θ_2, R_1 의 3개로 선정하였다.

1차 드로우에서 확보되는 단면길이는

$$L = l_1(1 - \sec\theta_1) + l_2\sec\theta_2 + \{ \sec\theta_1 + \sec\theta_2 \} - r \left\{ 2 \tan \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - (\theta_1 + \theta_2) \right\}$$

로 정의된다. 다음 공정들에서의 성형성을 확보하고, 주름을 방지하기 위해 L은 2차 드로우 단면길이 80~95%의 제한조건을 설정하였다. 3수준의 변수가 3개이므로 직교배열표로 $L_9(3^4)$ 를 선정하였다. 변수의 범위를 정하기 위해 해석을 시행한 결과 θ_1 의 값이 45° 에서 50° 인 부근에서부터 1차 드로우의 성형성이 나빠졌다. 따라서 θ 의 값은 20° 에서 50° 사이에서 3수준을 선정하였다.

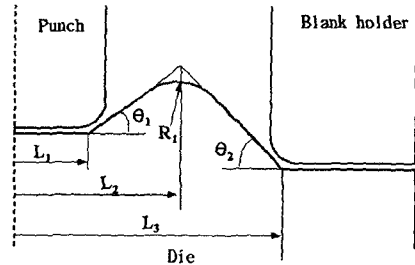


Fig. 4 Shape variables of 1st draw

5.2 해석 및 결과 분석

Table 5는 각 변수의 수준별 S/N비를 나타낸 표이다. 목표 특성치에 대해서 θ_1 과 θ_2 에 비해 R_1 은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타나지만, 반응표를 이용하여 상호작용을 검토하면 θ_2 와 상호작용이 있는 것으로 판단되므로 R_1 도 설계 대상에 포함된다.

Table. 5에서 각 변수의 수준이 3수준일 때가 최적 조건으로 나타나지만 이 조합에서는 전체 길이 대비 단면 길이가 제한조건을 초과하여 부피 조건을 만족하지 못한다. 따라서 S/N비가 크게 되는 Level2와 Level3사이에서 최적 조합이 있을 것으로 추정되므로 θ_1 과 θ_2 를 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 3수준으로 나누어서 구한 회귀식은 다음과 같다.

$$f(\theta_1, \theta_2, R_1) = 0.023 + 0.012\theta_1 + 0.0005R_1 + 0.0234\theta_2 - 0.0243R_1 - 0.0004R_1\theta_1 - 0.0001\theta_1\theta_2 - 0.0002\theta_2R_1 - 0.0004\theta_1^2 - 0.0003\theta_2^2$$

θ_1, θ_2, R_1 는 각각 $35^\circ, 45^\circ, 45\text{mm}$ 으로 선정되었다.

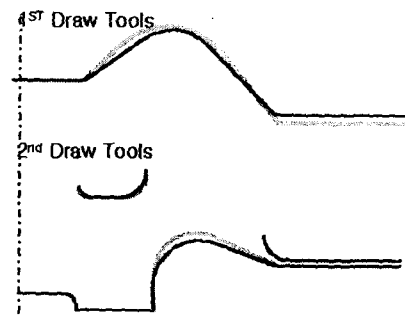


Fig. 5 Die lines by DOE and Conventional methods

5.3 실험계획법과의 비교

Fig 5는 전통적이 방법에 의해 설계된 금형과 실험계획법을 사용하여 설계한 금형을 함께 도시한 그림이다. Fig 6. 와 Fig 7.은 실험계획법을 통해 제시된 금형 모델의 해석 결과와 같은 형상을 가진 시행착오법에 의해 만들어진 실제품의 두번째 공정과 최종 제품에서 초기두께 3.2mm에 대한 두께 분포를 휠의 바깥쪽에서부터 중심지점까지 각각 비교하여 도시한 그림이다.

결과를비교해보면 실험계획법을 사용한 모델이 2차 성형에서 최소두께가 2.35mm로 시행착오법을 사용한모델의 2.13mm보다 약 10%, 3차 성형에서는 모서리부에서 2.73mm로 2.35mm보다 16%정도 좋은 결과를 보이지만, 중심부에서는 2.3mm로 2.62mm에 비해 13%정도 얇은 것으로 보아 실험계획법이 기존방법에 비해 우수하다고는 할 수 없

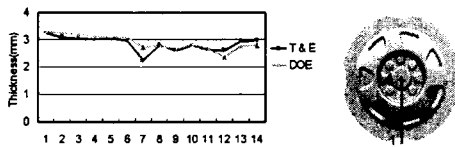


Fig. 6 Thickness distribution of 2nd draw

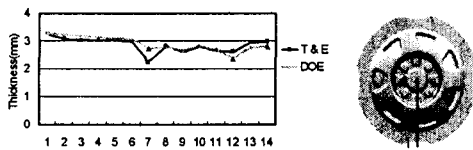


Fig. 6 Thickness distribution of 3rd draw

다. 그러나 두 방법의 설계가 전체면에 비슷한 성향의 두께분포를 가진다. 그러므로 ,적절한 변수 선정과 제한 조건이 적용된 실험계획법을 이용하는 기법이 실제 설계에 반영되어 완벽한 최종 설계에 적용될 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 판재성형공정에서 시행착오법을 대체할 수 있는 방법으로 실험계획법을 사용하였다. 현장에서의 경험과 기존 모델의 데이터베이스를 바탕으로 적절한 제한조건과 변수의 종류 및 변수값들의 범위를 정하고, 다구치 방법론과 반응표면법을 적절히 사용함으로써 원하는 조건을 만족시키는 모델을 설계하였다. 해석을 통한비교 결과 시행착오법에 의해 설계된 모델이 실제 검증된 설계과 비슷한 두께분포 경향을 가지면서, 전체적으로 고른 두께 분포를 갖는 방향으로 성형성이 개선되었다. 실험계획법을 이용하여 시제품을 제시하고, 변수들간의 상호관계를 미리 조사함으로써 시행착오법에 투입되는 비용과 시간을 줄이고, 좀 더 체계적인 설계가 가능하다. 그러므로 ,적절한 변수 선정과 제한 조건이 적용된 실험계획법을 이용하는 기법이 실제 설계에 반영되어 완벽한 최종 설계에 적용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Glen Stuart Peace 1995, Taguchi Methods: A Hands-On Approach, Addison-Wesley Publishing
- (2) Arora, Jasbir S, 1989, Introduction to optimum design , McGraw-Hill
- (3) 임명준, 1993, 최신실험계획법,형설출판사
- (4) 프레스 성형난이 핸드북,박광관성형기술연구회
- (5) Y. Abe, K. Mori, O. Ebihara, "Optimization of the distribution of wall thickness in the multistage sheet metal forming of wheel disks", Journal of Material Processing Technology; 125-126 ,2002, 792-797