

# 다구찌기법을 이용한 자동차용 드럼 클러치 허브 제조를 위한 예비성형체의 최적화

김승규\*, 박영철#, 박준홍\*\*

## Optimization of Pre-form for Manufacturing of Automobile Drum Clutch Hub Products Using Taguchi Method

Seung-Gyu\*, Young-Chul Park#, Joon-Hong Park\*\*

(Received 11 November 2010; received in revised form 1 December 2010; accepted 9 December 2010)

### ABSTRACT

The drum clutch investigated in this study is formed in 5 forming steps, which are 1st deep drawing, 2nd deep drawing, restriking, embossing, and Grob™ processes. Dimensional accuracy of the final products greatly depends upon how much more accurate pre-form is manufactured in the previous forming processes before the Grob™ process. The deep drawing, restriking and embossing processes in which the pre-form is formed are very important and decisive steps. Thus in some cases, excessive strain by these operations causes dimensional inaccuracy and cracks initiated from the base and wall of the product. Process variables such as the punch shapes both of 1st and 2nd deep drawing, and punch angle were selected to evaluate the deformation characteristics. The optimum parameters were determined from forming simulations using commercial FEM codes, DEFORM and Tauchi method, specifically developed for metal forming simulation. Finally, experiments for the whole drum clutch forming processes were carried out to verify the optimized forming parameters and the analytical results.

**Key Words :** Deep Drawing(딥 드로잉), Drum Clutch Hub(드럼클러치허브), FE Simulation(유한요소해석), Pre-form(예비 성형체), Design of Experiment(실험계획법), Taguchi Method(다구찌 기법)

### 1. 서 론

현재 자동차 기어 및 클러치 등과 같이 회전 운동

을 위한 부품들은 고정밀도, 고강도, 고내구성을 요구한다. 이를 위해 전조, 압출, 단조 등의 소성가공에 의한 부품 성형 방법에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 소성가공은 생산성이 높고, 재료 소비율과 생산단가가 낮고, 제품의 기계적 성질 또한 우수하다는 장점을 가지고 있다. 최근에는 상품의 경쟁력강화 요구에 대한 부응을 위한 고부가가치의 소성가공기술 개발이 가속화되고 있는 추세이다. 그 중 표면적이 두께에 비해 무한히 넓은 소재, 즉 박

\* 동아대학교 대학원 기계공학과

# 교신저자 : 동아대학교 기계공학과

E-mail : parkyc67@dau.ac.kr

\*\* 동아대학교 신소재가공정공정개발연구센터

판소재를 이용한 원통형 용기의 성형을 위한 딥드로잉(Dep Drawing)가공은 소성 가공 중에서도 치수정밀도 및 성형하중의 측면에서 높은 난이도를 요구한다. 이에 대해 많은 기초이론에 의거한 실험 및 유한요소해석(FEM)을 이용한 다양한 연구를 통해 기술발전이 이루어지고 있다.<sup>[1-3]</sup> 본 연구에서는 현재 프로그레시브 금형(Progressive Die)에서 생산되는 드럼 클러치 허브 예비성형체(Pre-form)에 대하여 완성차 업체가 요구하는 정밀한 제품을 생산하기 위한 새로운 예비성형공정을 다구찌 기법을 이용하여 제안하고자 하였다. 이는 기존의 딥드로잉 공정에서 최고의 난제로 제기되는 바닥면 코너 충전(Corner Filling) 문제를 해결하여 드럼 클러치 허브의 최종 제품 정밀도 향상에 기여할 것으로 사료된다.

## 2. 드럼클러치 성형 공정

드럼 클러치 제품은 Fig. 1과 같이 1단계에서 딥드로잉 성형공정을 이용하여 원통형 허브를 가공하고 2단계에서 그로브(Grob™, Grob, Inc.) 전조 및 절삭가공에 의하여 치형을 생산한다. 이 중 1단계 원통형 허브의 벽면 두께 분포가 일정하지 않고 바닥면의 코너필링이 이루어지지 않을 경우 2차 가공 즉 치형 가공 시 제품의 원주방향으로의 크랙(Crack)이 발생하는 치명적인 결함을 야기할 수 있다. 박판(Sheet metal) 딥드로잉 가공에서도 제품의 두께 분포가 가장 중요한 문제이므로 이에 대한 많은 연구가 이루어졌다.

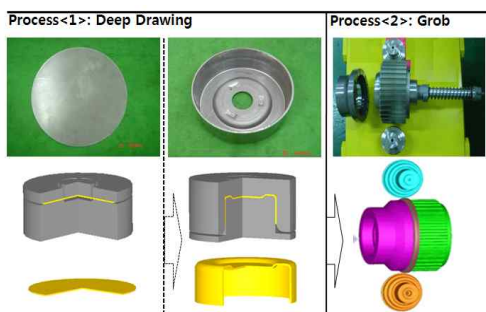


Fig. 1 Process layouts for forming the Drum clutch

그 중 Abe<sup>[4]</sup>, Kim<sup>[5]</sup> 등의 연구를 통해 금형의 소재 도입부 형상이 제품 두께 분포 및 변화에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있다.

## 3. 드럼클러치 허브의 성형해석

### 3.1 성형 해석 조건

본 연구를 위한 성형해석에는 강소성 유한요소해석 코드인 DEFORM™ -2D가 사용되었고 해석 조건은 Table 1에 나타내었다. 해당 제품의 소재는 자동차 클러치 부품 류 생산에 대표적으로 사용되는 드로잉 강판 SAPH 3.0t이며, 인장시험을 통해 확보한 소재의 기계적 성질은 Table 2에 정의된 것과 같다.

Table 1 Condition for FE-simulation

Simulation Conditions	Data
Punch Speed	1.0mm/s
Friction	0.1
Number of element	1020
Number of simulation step	1486

Table 2 Tensile test results of SAPH

Properties	Experiment data
Yield Strength	290MPa
Tensile Strength	448MPa
Toung's Modulus	40.011GPa
Elongation	39%

### 3.2 성형 해석

드럼 클러치 허브의 성형은 소재의 유동 양상을 고려하여 Fig. 2와 같이 2 단계에 걸쳐 진행되며, 일반적인 딥드로잉 공정에서의 펀치와 다이의 위치와 역할이 바뀐 역드로잉 방법을 사용하였다. 이에 따

른 공정변수의 선정은 최종 제품이 요구하는 치수 정밀도, 성형하중 및 변형저항에 가장 많은 영향을 주는 인자인 첫 단계 공정에서의 펀치 및 다이의 소재 도입부 형상<sup>4-5)</sup>으로 선정하였다. Fig. 3은 각각의 다른 소재도입부 형상 즉 1단의 테이퍼를 가진 형상(a), 라운드를 가진 형상(b), 분할된 테이퍼(c)를 가진 3가지 형상에 의한 2단계 딥드로잉 공정에서 사용되는 3가지의 예비성형체(Pre-form) 형상을 나타낸다.

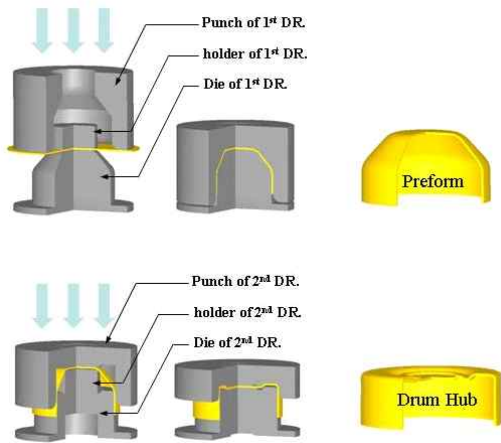


Fig. 2 Process layouts for forming the Drum clutch

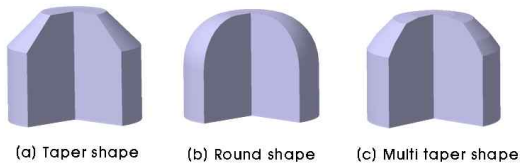


Fig. 3 Shapes of Pre-form for 1st Deep drawing process

### 3.3 성형 해석 결과

Fig. 4는 1단계 딥드로잉 공정에 따른 3가지 예비성형체 형상에 따른 2단계 딥드로잉 공정에서의 변형 양상을 나타낸다. 1단의 테이퍼를 가진 형상(a)의 경우 중심부 바닥면 부분의 소재가 제품 벽면 부위로 유동되어 요구되는 치수정밀도를 향상시키지만 변형양상에서 굴곡이 심하여 폴딩(folding)이 심하게 발생한다.

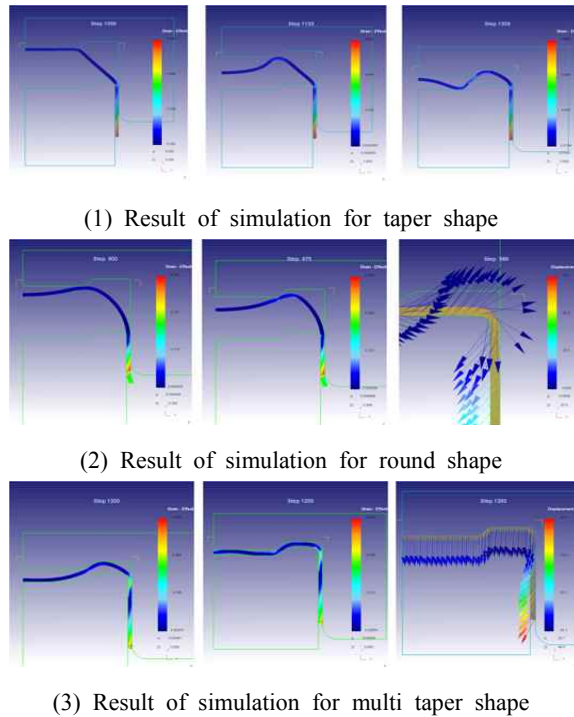


Fig. 4 Results of FE simulation for 2<sup>nd</sup> Drawing

이는 잔류응력을 발생시켜 추후 치형 가공 시 제품의 결함으로 이어질 가능성이 높으므로 드럼 클러치 허브 성형방법으로 적합하지 않다. 두 번째 라운드를 가진 형상(b)의 경우에는 제품 바닥의 코너부위에서 단유선(Metal flow)이 분할되어 최종적으로 두께 감소의 원인이 되므로 역시 성형방법으로는 적합하지 않다.

이에 반해 분할된 테이퍼를 가진 형상(c)의 경우 적절한 소재의 유동 분포로 인하여 중요시되는 제품 코너부위 치수를 만족하며 폴딩 등의 문제점도 야기시키지 않으므로 3가지 형상 중 가장 적합한 형상임을 알 수 있다.

## 4. 예비성형체의 최적 설계

### 4.1 다구찌 방법의 적용

1단계 딥 드로잉 공정 시 펀치와 다이의 소재도입부 형상에 의한 결과를 2단계 딥 드로잉 공정에서의 예비성형체로 정의하였다. 각 형상에 기인한 2단계 공정을 해석하고 검토한 결과 적합한 예비성형체의 형상은 Fig. 5와 같이 다중 테이퍼를 가진 형상이라는 것을 알 수 있었다. 이때의 형상 치수는  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ , R1, R2의 5개의 변수로 표시될 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 정확한 예비성형체의 형상 치수 선정을 위해 다구찌 기법(Taguchi method)을 이용하였다.

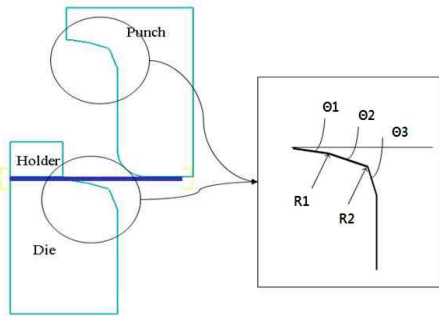


Fig. 5 The design variables of pre-form for 2nd drawing

다구찌 기법은 제어할 수 있는 영향력이 큰 설계 변수를 직교배열표를 이용하여 자료를 얻고 이 결과로부터 SN(Signal-to-Noise)비를 분석함으로써 최적값을 선정하는 것이다. SN비는 목적함수의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도로서 분산 예측값에 대한 모평균 제곱에 대한 예측값의 비로 나타낸다. 다구찌 방법의 모든 단계는 산포를 줄이는 방향이다. 산포를 줄이는 것은 SN비를 높이는 것과 같다. SN비는 문제에 따라 망목(Nominal the best), 망소(Smaller the better), 망대(Larger the better) 특성으로 정의된다.<sup>[6-7]</sup> 딥드로잉 가공으로 성형된 드럼 클러치 허브는 2차 가공을 통하여 허브 벽면에 치형을 생성하게 된다. 이 때 잔류응력을 최소화하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구의 성형공정에서는 성형하중과 소재 변형에 따른 유효응력과 유효변형률이 적을수록 좋은 망소특성으로 정의할 수 있다. 이 때 SN비는 다음의 식 (1)과 같다.

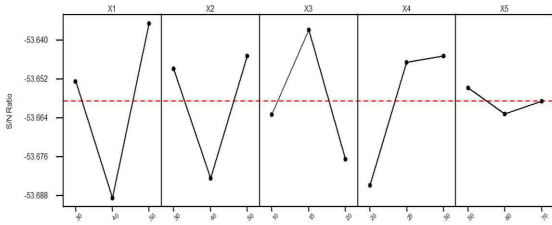


Fig. 6 Main effect plot for maximum stress

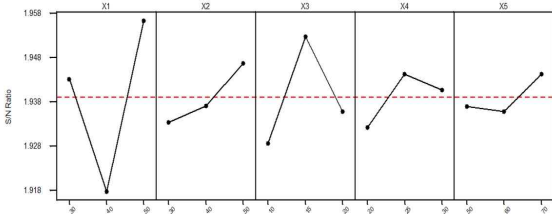


Fig. 7 Main effect plot for maximum strain

일반적인 민감도 해석은 SN비에 대한 분산분석(Analysis of variance)을 이용해서 SN비에 유의한 영향을 주는 설계변수 수준을 평가한다. 최적 수준은 다시 확인 실험을 통해 최적이라고 추정된 값과 비교하여 재현성을 평가하고 시험조건을 표준화 한다. 본 연구에서는 예비실험을 성형해석으로 대체하였고, 표준직교배열표(Table of orthogonal array) L27에 5개의 공정변수 X1=R1, X2=R2, X3=θ1, X4=θ2, X5=θ3를 고려하였다. Table 3은 5개의 공정변수와 3수준 범위를 나타내고, Table 4는 표준직교배열표 L27에 따른 실험결과 즉 성형해석 결과를 나타낸다. Fig. 6과 Fig. 7은 5가지 주요 공정변수에 대한 SN비에 대한 주효과(Main effect)를 표시한 것이다. SN 비에 대한 주효과는 분산분석과 비교해서 정확한 인과관계를 구하기 위한 것이 아니라 반응값의 입력효과와 나머지 효과로 분해하여 두 효과의 비를 설계평가에 이용하기 위한 것이다.

검토결과 Round radius R1 (X1), Round radius R2 (X2), Multi taper angle θ1 (X3)은 3수준으로 증가할 수록, Multi taper angle θ2 (X4), Multi taper angle θ3 (X5)는 1수준으로 감소할 수록 반응값의 특성이 좋아진다. 따라서 Fig. 5의 R1, R2, θ1, θ3을 증가하고, θ2를 감소하면 성형품의 최대 응력과 최대 변형률이 감소할 수 있음을 알 수 있다.

Table 5 Process parameter affecting the FE-simulation

Process Parameter	Effect			Deviation	Percentage Contribution %	Rank
	Level 1	Level 2	Level 3			
X1	-50.6425	-50.6785	-50.6245	0.0539	30	1
X2	-50.6386	-50.6724	-50.6346	0.0378	21	4
X3	-50.6526	-50.6265	-50.6664	0.0399	22	2
X4	-50.6745	-50.6365	-50.6345	0.0399	22	2
X5	-50.6445	-50.6526	-50.6485	0.0081	5	5
total	-	-	-	0.1796	100	-

Table 5는 SN비를 이용한 성형해석에 대한 공정변수의 수준별 효과를 계산한 것이다. 여기서 수준차(Deviation)는 공정변수의 수준별 효과의 최대값과 최소값의 차이이고, 기여율은 전 수준차의 합에 대한 백분율(Percentage contribution)로 나타낸 것이다. 기여율 계산에 따라 드럼클러치 허브 성형에 가장 영향을 많이 미치는 공정변수는 Fig. 5의 R1, θ1, θ2라는 것을 알 수 있다. 그리고 공정변수의 최적 조건은 Fig. 5의 R1=50mm(3수준), R2=50mm(3수준), θ1=20°(3수준), θ2=20°(1수준), θ3=70°(1수준)이다.

## 4.2 재현성 평가

재현성 평가는 선택된 공정변수로부터 기대되는 반응값을 예측한다. SN비에 가장 좋은 효과를 주는 공정변수를 선택하고 다른 공정변수의 몇몇 조합으로부터 SN비를 예측한다. 그러므로 결측값 처리가 분석결과에 얼마나 영향을 미치는지 평가할 수 있다. 다음으로 선택된 수준으로 실험을 수행하여 예측된 결과와 일치되는 지 확인한다. 만약 예측한 반응값과 실험값이 불일치하면 결측값 및 교호작용, 순수 실험의 오차가 있다고 가정할 수 있다. SN비 예측값을  $\mu$ 로 나타내면 다음 식 (2)와 같다.

$$\mu = \bar{T} + (X_i^{Level} - \bar{T}) \tag{2}$$

### 4.3 최적조건 해석 결과에 대한 분석

3단계 테이퍼를 가지는 1단계 딥드로잉 금형의 소재도입부 형상 제안으로 제품 코너부 치수를 만족하였고, 다구찌 기법에 의해 수행 결과 최대유효응력, 최대유효변형률을 최소화하는 형상 치수를 선정하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 하지만 Fig. 8의 확대 그림 A를 살펴보면 제품 코너부위는 목표치수를 만족하지만 벽면 두께 분포의 경우 일정하지 않은 구간이 있음을 확인 할 수 있다. 이는 Fig. 5의 공정변수 중 R2의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 현재의 최적 조건은 3수준에 의한 R2=50mm으로 설계되었지만 이보다 더 큰 값을 적용하여야 한다는 의미이다. 이는 성형시험을 위한 금형제작 시 반영되어야 할 것이다.

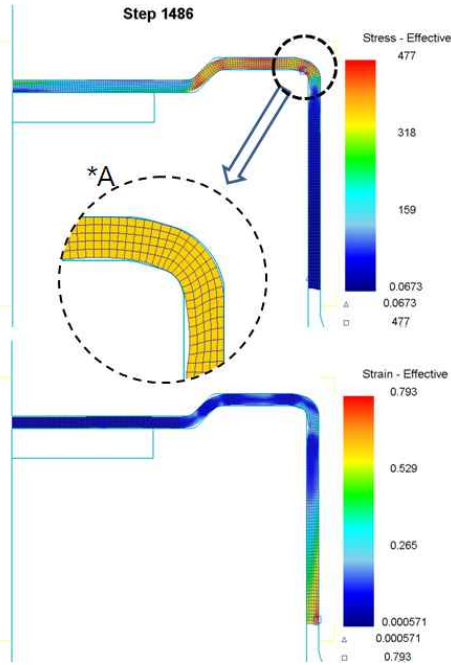


Fig. 8 Effective stress and strain of FE-Simulation for optimal result

여기서  $\bar{T}$ 는 전체 평균,  $X_i^{Level} - \bar{T}$ 는 각 변수의 최적 수준에서 좋아지는 효과를 의미한다.<sup>[8]</sup> 최적값을 구하기 위해 앞서 도출된 최적 조건을 적용하여 다시 한 번 성형해석을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 최대유효응력은 477MPa, 최대유효변형률은 0.793이다. 이를 이용한 최적값의 SN비와 식 (2)를 이용한 예측값의 비교를 Table 6에 나타내었다. 비교 결과 오차가 1%미만이므로 재현성이 있다고 판단된다. 이상의 조건을 최적값으로 선정하고 1단계 딥드로잉 금형의 소재도입부 형상을 제안하였다.

Table 6 Comparison between prediction and optimal results

Result	Optimal value	Predicted value	Error (%)
SN ratio	-50.5601	-50.6544	0.1%

### 5. 성형 시험

다구찌기법을 적용한 형상최적화에서 드림클러치 허브 성형을 위한 2단계 딥드로잉 공정에서의 예비 성형체 형상 즉 1단계 딥드로잉 금형의 소재도입부 형상은 Fig. 5와 같고 이때 최적의 치수는 R1=50mm, R2=50mm,  $\theta_1=20^\circ$ ,  $\theta_2=20^\circ$ ,  $\theta_3=70^\circ$ 가 적합한 것을 알 수 있었다. 하지만 Fig. 8의 해석 결과 벽면 두께 분포가 다소 일정하지 않음이 확인 되어 공정변수 중 R2의 치수를 증가시켜야 함을 확인 하였다. 이에 가공한계가 허락하는 범위 내에서 경험적으로 치수를 증가시켜 금형을 제작하고 성형시험을 수행하였다. Fig. 9에 성형시험의 결과인 각 단계의 공정품을 나타내었다. Fig. 10은 제품의 최종 제품의 단면을 나타내며, A~H 부분의 치수를 측정하여 실제 해석 결과와 비교하여 Table 7에 나타내었다. 성형시험의 전체 결과 해석 및 시제품 주요치수의 전체 오차는 마찰조건, 블랭킹 홀더(Blanking holder) 조건 등이 정확히 규명되지 않은 점을 감안할 때 상당히 양호한 결과라고 판단된다. 특히 제품의 바닥면 코너 치수 "E"부분의 경우는 가공 전 원판의 두께가 3.0임을 감안할 때 오히려 증가했음을 알 수 있다. 이는 일반적인 딥드로잉 공정에서 제품 바



닥의 코너부위가 얇아지는 문제점을 본 논문의 연구를 통해 극복했음을 알 수 있다. 앞서 문제되었던 "F" 부분의 치수차이는 금형 수정을 통하여 개선할 수 있었다.



Fig. 9 Photograph of pilot products from all process



Fig. 10 Section view of Drum Clutch Hub and location of dimension measurement

Table 7 Comparison of thickness measurement between FE simulation and test product

	Result of FE simulation	Result of testing	DIFF
A	2.8530	2.95	+0.0970
B	2.8517	2.99	+0.1383
C	2.8546	2.80	-0.0546
D	2.8869	2.86	-0.0269
E	3.2125	3.18	-0.0325
F	2.8365	2.92	+0.0835
G	3.0213	3.00	-0.0213
H	3.1210	3.02	-0.1010

## 6. 결론

본 논문은 자동차용 클러치 드럼허브의 2단계 딥드로잉 성형 시 최종제품의 바닥면 코너 치수 감소를 극복할 수 있는 예비성형체 형상을 제안하였다. 이에 따른 1단계 딥드로잉 금형의 하부 다이와 상부펀치의 소재 도입부 형상이 제품의 코너 두께 및 잔류응력에 미치는 영향에 대해 연구하였고, 다구찌기법을 이용하여 형상치수의 최적조합을 선정하였다. 이상의 공정 설계 결과를 이용하여 금형제작 및 성형시험을 수행하여 양호한 제품을 얻을 수 있었으며, 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 최종 제품의 치수 정밀도, 소재 변형양상, 잔류응력 등을 고려할 때 2단계의 딥드로잉 가공에서 첫 번째 단계의 딥드로잉 가공 결과 생성되는 예비성형체는 3부분으로 분할된 테이퍼를 가지는 형상이 적합하다.
2. 분할된 테이퍼 형상에 의한 소재 도입부를 이용한 딥드로잉 공정 시 각 지점의 코너반경과 경사각도가 제품 완성도에 미치는 영향의 민감도가 높으므로 적절한 코너반경, 경사각도의 예측 및 설계가 중요하다.
3. 예비성형체의 코너반경과 경사각도를 공정 변수로 두고 다구찌 기법에 의해 최적값을 효과적으로 도출할 수 있었다. 도출된 결과는 일반적인 딥드로잉 공정 시 필연적으로 발생하는 문제점 즉 바닥면 코너 치수 감소를 효과적으로 극복하였다고 판단된다.
4. 본 논문에서 제시한 공정 변수의 최적값에 의한 드럼 클러치 허브의 성형해석 시 제품 두께분포가 일정하지 않은 부분이 발생하였다. 성형 시험을 통하여 일정 부분 개선하였지만 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 동아대학교 학술 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Park, J. N., Kim, D. H. and Kim, B. M., "Experimental Investigation on the Flow Control of Hub Clutch for Automobile," Transaction of Materials Processing, Vol. 11, No. 5, pp. 430-438, 2002.
2. Hussain, P. B., Cheon, J. S., Kwak, K. Y., Kim, S. Y. and Im, Y. T., "Simulation of Clutch-hub Forging Process using CAMPform," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 123, pp. 120-132, 2002.
3. Lee, J. M., Kim, B. M. and Kang, C. G., "A Study on the Cold Ironing Process for the Drum Clutch with Inner Gear Shapes," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 640-650, 2006.
4. Abe, Y., Mori, K. and Ebihara, O., "Optimization of the Distribution of Wall Thickness in the Multistage Sheet Metal Forming of Wheel Disks," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125, No. 126, pp. 792-797, 2002.
5. Kim, H. K. and Hong, S. K., "Fem-based Optimum Design of Multi-Stage Deep Drawing Process of Molybdenum Sheet," Journal of Materials Processing Technology, Vol.184, Issues 1-3, pp.354-362, 2007
6. Lim, P. and Yang, G. E., "Optimal Cutting Condition of Tool Life in the High Speed Machining by Taguchi Design of Experiments," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.8 No.4, pp 59-64, 2006
7. Chun, S. H. and Go, T. J., "Study on the dynamic stiffness variation of boring bar by Taguchi Method," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.8 No.3, pp 98-104, 2009
8. Back, S. H., Hong, S. H., and Joo, W. S., "Optimization of Process Parameters for Mill Scale Recycling Using Taguchi Method," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.25 No.2, pp 88-95, 2008