

내 치형 드럼클러치의 냉간 단조 공정 설계

박상수*, 김병민#, 이정민*

Process Design of Cold Forging for Drum Clutch with Inner Tooth Component

Sang Soo Park*, Byung Min Kim# and Jung Min Lee*

ABSTRACT

A drum clutch which is a main part for the automatic transmission of auto-mobiles has been manufactured by grob threading and machining. The tooth shape of the drum clutch manufactured by machining has lower dimensional accuracy than that by pressing and its machining needs the enormous cost at plant investment. Thus, this study was designed to develop cold forging process and to improve the productivity and dimensional accuracy. In this work, variables affecting dimensional accuracy were first determined, then cold forming process design according to each variables was performed by FE simulation. Optimal process was suggested on the basis of analytical results.

Key Words : Drum clutch(드럼클러치), Finite element method(유한요소법), Process design(공정설계), Cold forging(냉간 단조)

1. 서론

현재 자동차 등에 쓰이는 고정밀도와 강도를 필요로 하는 기어는 호빙, 셰이핑 및 웨이빙과 같은 절삭가공에 의해서 생산되고 있으나, 최근 기어의 제조에 있어서 생산성을 높이는 방법으로 전조, 압출 및 단조 등의 소성가공에 의한 기어의 성형법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁶ 소성가공은 생산성이 높고, 재료 소비율과 개당 생산비가 낮으며 또한 제품의 기계적 성질이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 최근에는 상품의 경쟁력강화 요구에 대한 부응으로 고부가가치의 소성가공기술의 개발

이 가속화되고 있다. 냉간단조 공정은 위의 조건들을 충족시키면서 고정도화를 이룰 수 있는 뛰어난 성형기술이라고 볼 수 있다.⁷⁻⁸ 또한 두꺼운 판재를 이용한 정밀단조기술은 프레스 가공에 의한 높은 생산력과 경량화에 따른 생산비용 저감이 가능하기 때문에 적용범위가 널리 확대되고 있다.

본 연구의 제품인 드럼클러치는 그동안 국산화되지 못하여 전량을 수입에 의존하였으나, 최근 치형 성형 전 단계의 딥 드로잉(deep drawing) 가공제품을 수입한 후 그로브(grob)전조 및 절삭가공에 의하여 치형부를 성형하여 제품을 생산하고 있다. 그러나 기계가공에 의한 치형성형은 프레스 가공법에

접수일: 2004년 7월 2일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

* 부산대학교 정밀기계과 대학원

교신저자, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

E-mail bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3074

비해 생산성이 크게 떨어지며, 막대한 초기 비용이 소요되고, 제조단가가 높다는 단점이 있다.⁹⁻¹⁰ 따라서 클러치류에 대한 치형부 냉간단조 공정을 개발하여 작업능률 및 생산성을 획기적으로 향상시키고 또한 제품의 고경도화를 실현하여 경쟁력을 높일 필요가 있다.

본 논문에서 사용된 제품은 Fig. 1과 같은 자동변속기의 핵심부품인 드럼 클러치이고, 재원은 Table 1에 나타내었다. 드럼 클러치는 내경부의 치수 정밀도를 요하는 제품으로 오차범위 내에 들지 않을 경우, 내경의 동심도 및 직각도 오차에 의해 동력 전달시 진동 및 소음이 발생하고, 내경부 치수 공차로 인해 축의 진동 발생을 유발한다.

따라서 본 논문에서는 드럼클러치의 치수 정밀도에 영향을 미치는 변수를 선정하여 유한요소해석을 수행하였고, 결과로 드럼 클러치 치형성형을 위한 냉간단조 공정을 제시하고자 한다.

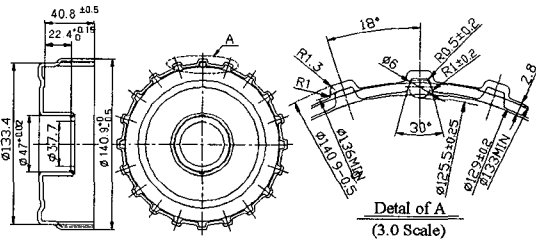


Fig. 1 Dimension and shape of drum clutch

Table 1 Spec. of drum clutch (unit : mm)

Item	Spec	Tolerance
Pitch circle	ø136.0	MIN ø136.0
Addendum circle	ø140.9	ø140.4 ~ ø140.9
Dedendum circle	ø129.0	ø128.8 ~ ø129.2
Face width	28.0	-
Number of teeth	20개	-
Thickness	3.2	MIN 1.2

2. 드럼클러치(Drum clutch) 성형해석

2.1 해석 모델 및 조건

본 연구의 성형해석을 위해 강소성유한요소해석 코드인 DEFORM 3D를 사용하였다. 해석조건은

Table 2에 나타내었다. 초기 예비성형체는 이전 단계에서 8단계에 걸쳐 딥 드로잉된 형상으로, Fig. 2에 시뮬레이션을 위한 예비성형체(a)와 금형(b, c)의 형상을 나타내었다. 실제 해석에 사용된 예비성형체와 금형의 형상은 대칭성을 고려하여 1/40 단면을 사용하였다.

드럼 클러치의 소재는 드로잉 강판용인 SAPH 3.2t이며, 소재의 기계적 성질을 확보하기 위해 KS B 0801(5호) 규격으로 MTS(Material Test System)에서 인장시험을 수행하였으며, 탄성계수, 인장강도, 항복강도 및 연신율 등을 Table 3에 정리하였다.

Table 2 Conditions for FE simulation

Conditions	Values
Material of tools	SKH 51
Material of workpiece	SAPH
Punch speed(mm/s)	1.0
Friction(m)	0.1

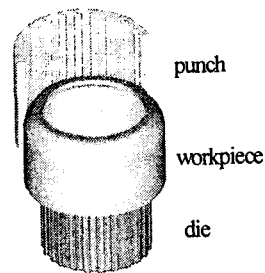


Fig. 2 3D Models of workpiece and tools

Table 3 Tensile test results of SAPH steel

Properties	Experiment data
Yield Strength	283MPa
Tensile Strength	487MPa
Young's Modules	38.305GPa
Elongation	38%
SAPH : $\bar{\sigma} = 555.78 (\bar{\epsilon})^{0.1481} (MPa)$	

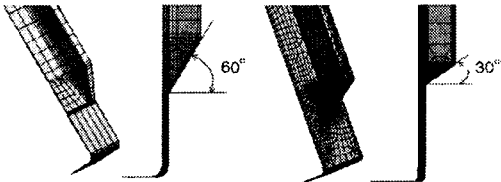
2.2 공정변수 선정

공정변수 선정은 치형부 치수정밀도, 성형하중

및 변형저항에 가장 많은 영향을 주는 인자로서 펀치 도입부 각도(approach angle)와 형상을 선정하였고, 내·외측 재료유입 방향에 따라 두께 감소율(TRR : Thickness Reduction Rate)을 적용하여, 내치형부의 충만성과 성형하중을 평가하였다.

2.2.1 펀치 도입부 각도

초기 펀치 유입시 재료유동, 성형하중, 치형 형상에 영향을 미치는 펀치 도입부의 각도에 따른 경향을 파악하기 위해 Fig. 3과같이 도입부 각도를 30°와 60°의 2가지 경우를 공정변수로 선정하였다. 이 때 펀치도입부 형상은 주저형으로 하였다.

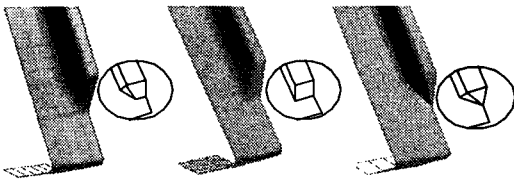


(a) Approach angle 30° (b) Approach angle 60°

Fig. 3 3D modelling of punch

2.2.2 펀치 도입부 형상

시뮬레이션을 통해 재료의 충만성 및 성형하중, 변형양상이 가장 우수한 펀치 도입부 형상을 제시하기 위해 Fig. 4에 주저형(declined cylinder type), 원추형(cylinder type), 창형(spear type)의 3가지 펀치의 도입부 형상을 나타내었고, 각 형상에 따라 해석을 수행하였다.

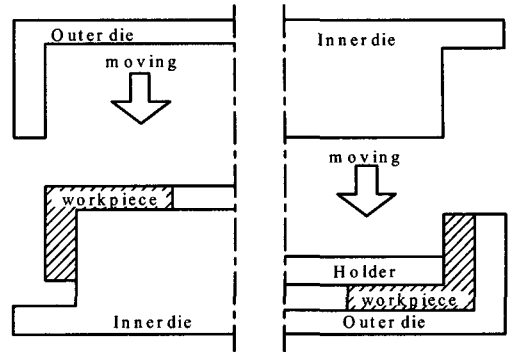


(a) Declined cylinder type (b) Cylinder type (c) Spear type

Fig. 4 3D Modeling of punch

2.2.3 재료의 유동방향 및 두께 감소율

재료의 유동 방향은 Fig. 5과 같이 외측에서 내측으로의 유동(Type A)과 내측에서 외측으로의 유동(Type B)을 선정하였다. 두께 감소율은 Table 4와 같이 두 가지(Case I, Case II)를 적용하였고, 편



Outflow direction(type A) Inflow direction(type B)

Fig. 5 Direction of metal flow

치 도입부 각도는 60°, 펀치 도입부 형상은 주저형으로 성형해석을 수행하였다.

재료의 유동에 따른 두께 감소율의 적용은 Fig. 6에 나타난 T₁, T₂, T₃ 부분에 각각 적용하였고, 두께 감소율(TRR)의 계산은 아래의 식으로 표현된다.

$$TRR = \frac{T - T_i}{T} \times 100 \quad (1)$$

여기서, T : 변형전의 두께

T_i : 변형후의 두께를 나타낸다.

재료 유동방향에 따른 예비성형체의 크기는 제품에 두께 감소율을 역으로 계산하여 결정했다.

Table 4 Thickness reduction rate

TRR Case	T1	T2	T3
I	28.1%	0.0%	53.1%
II	28.1%	12.5%	53.1%

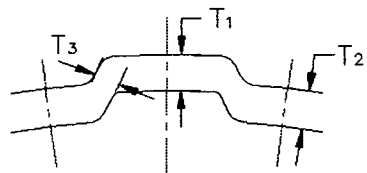
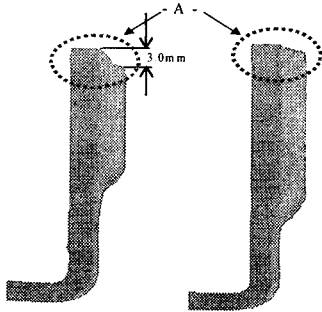


Fig. 6 Thickness reduction part

3. 결과 및 고찰

3.1 펀치 도입부 각도

Fig. 7은 펀치 도입부 각도에 따른 성형해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7의 (a)에 나타난 바와 같이 도입부 각도가 30°일 때 치형 끝단부 A에서 3mm의 치형 불균일을 보였다. 하지만 Fig. 7 (b)와 같이 도입부 각도가 60°일 경우는 재료의 유입 및 치형 끝단의 높이 차가 양호하게 유지됨을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 펀치 도입부 각도에 대한 성형하중 그래프로, 도입부 각도가 30°일 때 소재의 유동이 어려워 금형에 과도한 하중이 작용한다. 반면에 도입부 각도가 60°일 경우는 초기 소재 유입이 쉬워 하중이 400kN으로 작게 나타났다.



(a) Approach angle 30° (b) Approach angle 60°

Fig. 7 FE simulation results for punch approach angles

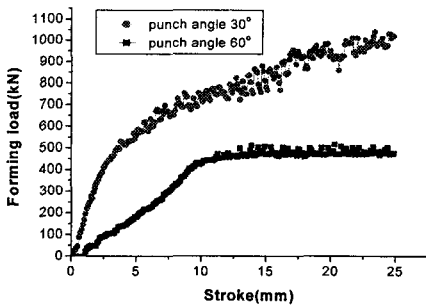
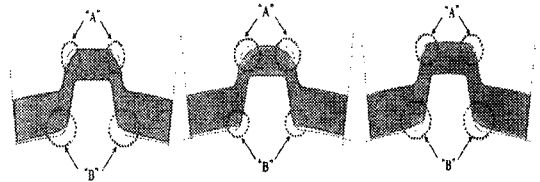


Fig. 8 Load-stroke curves for punch approach angle

3.2 펀치 도입부 형상

펀치 도입부 형상에 대한 해석은 앞서 수행한 펀치 도입부 각도를 60°로 선정하였다. 해석결과는 Fig. 9와 Table 5에 나타내었듯 주저형 (a)에서 내측 코너 B부분의 충만성이 오차 0.155mm로 가장 양호하게 나타났고, 외측 코너 A부분은 0.374mm로 가장 크게 나타났다. 원추형(b)과 창형(c)의 경우는 내측 코너 부분의 충만성이 허용오차 0.2mm를 넘어선 0.27mm, 0.25mm로 각각 나타났다. 성형하중은 Fig. 10에서 알 수 있듯 창형의 경우 400kN 정도로 작게 나타났다.



(a) Declined cylinder (b) Cylinder (c) Spear type

Fig. 9 Simulation results for each punch head type

Table 5 Comparison of unfilling according to each punch head type

Type Section	Declined cylinder	Cylinder type	Spear type
A unfilling(mm)	0.374	0.214	1.172
B unfilling(mm)	0.155	0.273	0.25

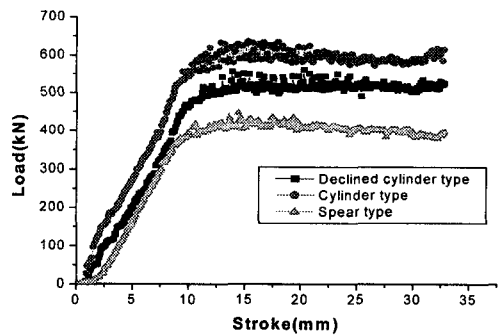


Fig. 10 Load-stroke curves of punch head shape

3.3 재료의 유동방향

외측에서 내측으로의 재료유동(Type A)은 Fig. 11과 같이 바깥 코너부는 완전히 충만된다. 하지만 내측 코너부는 0.54mm 이상으로 크게 나타났고, Fig. 12와 같이 길이 방향으로 14.7mm 늘어났다. 또한 끝단 A부분의 치형이 불균일하게 나타났다. 결과적으로 Type A는 내측 코너부의 충만성 보다 길이 방향으로 늘어나는 성형특성이 두드러지기 때문에 치형의 양호한 정밀도를 얻을 수 없었다.

다음으로 내측에서 외측으로의 재료 유동(Type B)에 대한 성형해석 결과는 Fig. 13의 Case I의 경우 내측 코너의 미충만 영역의 크기가 0.155mm이고, 외측 코너의 미충만은 0.374mm로 내측은 양호하나 외측의 미충만 영역은 크게 나타났다. Case II의 경우는 내측 코너부는 충만되어 성형성이 좋으나 외측 코너부는 0.289mm의 미충만 현상이 나타났다. 성형하중의 경우는 Fig. 14와 같이 두께 감소율 Case II의 경우가 Case I보다 약 1000kN 정도 크게 나타났다. 이는 T2부의 두께 감소율을 적용하여 내측부의 충만성은 좋으나 성형하중이 크게 나와 펀치의 강도 및 수명에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

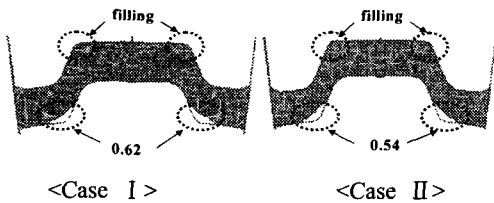


Fig. 11 Comparison of teeth-filling according to outflow direction process (Type A)

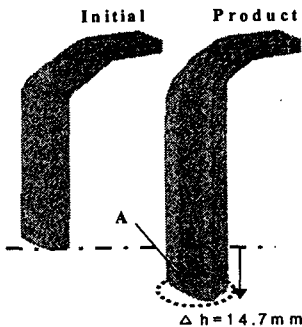


Fig. 12 Analytical results of outflow direction process (Type A)

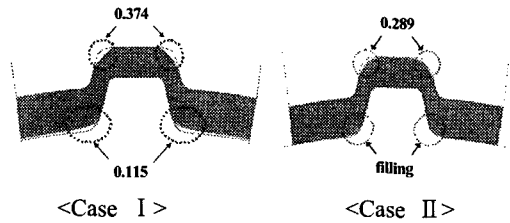


Fig. 13 Result of teeth-filling according to inflow direction process (Type B)

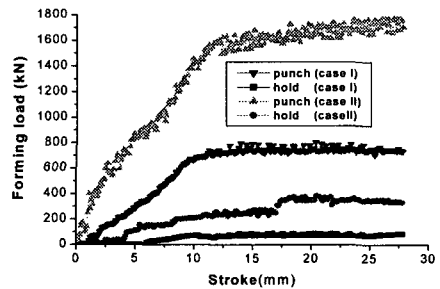


Fig. 14 Load-stroke curves of inflow direction process (Type B)

4. 최적공정 설계

4.1 드럼 클러치의 최적공정 설정

앞서 선정된 공정변수에 대한 성형해석 결과를 바탕으로 드럼 클러치의 치형 성형 공정을 설계하였다.

먼저 펀치 도입부 각도 30°일 때는 소재의 유입이 어려워 치형 끝단부의 소재가 불균일하게 나타났고 하중 역시 높게 나타났다. 60°의 경우는 치형 높이뿐만 아니라 하중도 500kN으로 적절하게 나타났다. 따라서 펀치 도입부 각도는 60°로 선정하였고, 펀치의 형상에 대한 공정변수의 성형해석 결과는 성형하중과 내·외측 코너의 채움 양상을 비교 검토한 결과 주저형의 펀치 형상이 가장 안정적인 것으로 판단되어 펀치의 각도 60°인 주저형 펀치를 선정하였다.

다음으로 재료의 유동방향에 대한 해석결과 중

Type A는 치형의 내·외측 코너 부의 충만보다 치형의 길이가 늘어나는 현상이 크므로 정밀도를 얻기 힘들다. 따라서 충만성이 양호하게 나타난

Type B를 선택하고, 두께 감소율은 성형하중이 적은 Case I으로 결정하였다. 그리고 치수정밀도를 높이기 위해 사이징(sizing) 공정을 추가하여 드럼 클러치의 최적 공정설계를 하였다.

Table 6과 Fig. 15는 앞서 수행한 해석결과를 바탕으로 드럼 클러치의 최적 공정을 나타내었다.

Table 6 Process design conditions for inner toothed drum clutch

Variable Process	Punch angle	Punch shape	Metal flow	TRR
Process I (Tooth forming)	60°	Declined cylinder	Type B	T1:28.1 T2:0.0 T3:53.1
Process II (Sizing)	60°	Declined cylinder	Type B	T1:8.7 T2:12.5 T3:13.3

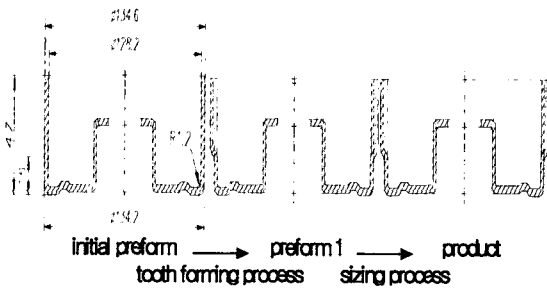


Fig. 15 Optimum process of drum clutch

4.2 드럼 클러치의 공정해석 결과

설계된 공정의 성형해석 결과는 Fig. 16과 같이 내측 코너는 완전히 채워졌고, 외측 코너는 0.15mm로 허용오차 범위 내에 들어 비교적 양호한 치형의 치수정밀도를 얻을 수 있었다. 성형하중은 Fig. 17과 같이 800kN 정도로 적당하게 나타났다. 성형 완료 후의 형상과 실제 제작 제품의 비교결과는 Fig. 18에 나타내었다. 제작된 제품의 형상은 해석결과와 일치함을 알 수 있다.

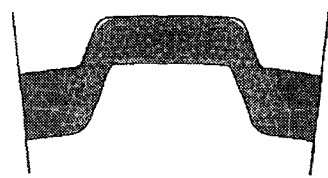


Fig. 16 Result of FE simulation (tooth-filling)

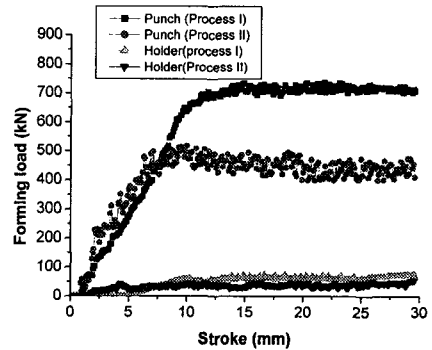
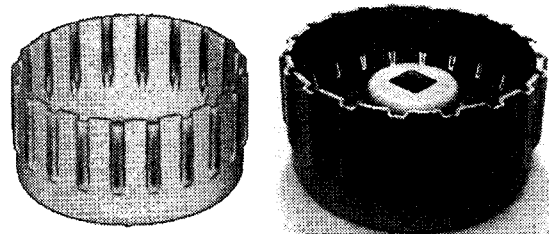


Fig. 17 Load-stroke curves for cold forging processes of the drum clutch



(a) Result of simulation (b) Production

Fig. 18 Comparison of Production Shape with Simulation Result

5. 금형강도 해석

금형의 강도해석 방법은 Deform에서 성형해석 시 하중이 가장 높은 스텝(step)에서 수행하였다. 이때 소재에서 금형으로 작용하중의 적용방법¹¹⁾은 금형의 각 노드(node)에 작용하는 하중과 금형의 요소(element) 데이터를 Ansys 5.5에 입력하여 해석하였다.

본 연구에 사용된 금형의 재료는 높은 면압을 받는 냉간 가공에 적용되고 있는 SKH 51종을 사용하였으며, SKH 51종의 기계적 물성치는 Table 7과 같다.

Table 7 Mechanical properties of SKH51

Material	HRC	Young's modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Poisson's ratio
SKH 51	63~65	230	2250 ~ 2450	0.3

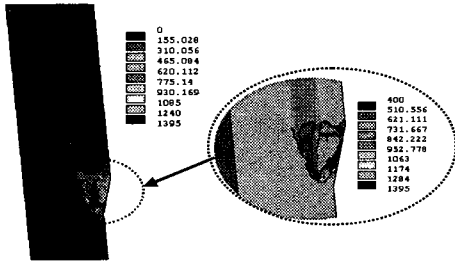


Fig. 19 Distribution of effective stress (punch)

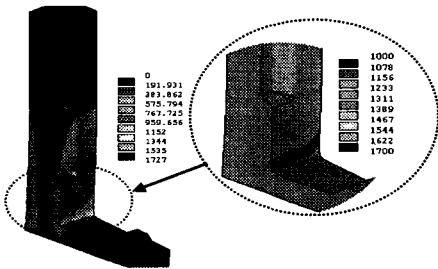


Fig. 20 Distribution of effective stress (die)

펀치와 다이의 강도해석은 Process I 공정에서 하중이 높은 부분인 스트로크 10mm 인 지점에서 해석을 실시하였다. Process I 공정에서 금형의 강도 해석을 실시한 이유는 Process II보다 Process I의 하중이 더 높아 금형에 인가되는 하중이 더 크고, 금형의 파손 역시 작용하중이 큰 공정에서 발생하기 때문이다. 해석결과는 Fig. 19와 같이 펀치가 받는 최대 압력은 펀치 도입부에서 1395MPa로 계산되었으며, 다이의 경우 Fig. 20에 보였듯 드럼 클

러치 바닥부에서 1727MPa으로 집중적으로 나타났다. 그러나 펀치와 다이 모두 항복강도 2250MPa 이하이므로 구조적으로 안정함을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구는 드럼 클러치의 내치형부 성형공법을 확립하는데 목적을 두고, 내치형부 치수정밀도 및 성형하중에 영향을 미치는 펀치 도입부 각도 및 형상, 재료유동 방향과 그에 따른 두께 감소율을 공정변수로 선정하였으며, 이 공정변수에 따른 유한요소 시뮬레이션을 수행하였고, 시뮬레이션 결과를 비교 검토하여 최적의 공정변수를 결정하고, 드럼 클러치의 치수 정밀도를 높일 수 있는 공정설계를 하였다. 연구 결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 펀치 도입부의 각이 30°의 경우는 재료의 유동이 어려워 하중이 높게 부여되고 치형 끝단부의 형상이 불균일하게 나타났으며, 60°의 경우는 성형하중, 내측 코너의 충만성과 치형 끝단의 형상이 비교적 양호하게 나타났다.
- (2) 펀치 도입부 형상에 대해서는 주저형의 경우가 내측부의 재료 충만성이 좋고 외측 코너는 공정 추가시 충만성이 양호할 것으로 판단된다. 원주형의 경우 성형하중이 높고, 내측 코너의 충만성이 나빠 공정수를 늘리더라도 오차범위 내에 들기 어려울 것으로 판단된다. 펀치 도입부가 창형일 때는 하중이 가장 낮으나 재료 충만성이 매우 나쁘다. 따라서 주저형의 펀치 형상을 드럼 클러치를 성형하기에 가장 적당한 펀치 형상으로 선정하였다.
- (3) 재료의 유동방향이 외측에서 내측방향의 경우, 치형 내측 코너부의 충만성 보다는 길이 방향으로 들어나는 성형 특성이 두드러지게 나타나 치형 끝단이 불균일하게 성형되었다. 내측에서 외측방향으로의 경우는 치형 끝단이 비교적 균일하게 나타났고, 치형 내측 코너의 충만성은 두께 감소율을 적용한 공정추가로 내치형부의 정밀도가 양호함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Dohmann, F. and Traudt, O., "Metal Flow and Tool Stress in Cold Forging of Gear Components," Proc. 2th ICTP, Vol. II, pp. 1081-1089, 1987.
2. Izumisawa, M., "Estimation of Forging Load by Upper Bound Approach-Study on Hot Forging of Straight Bevel Gears," J. of Jstp, Vol. 18, No. 193, pp. 92-100, 1977.
3. Kim, D. H. and Kim, B. M., "Preform Design of the Bevel Gear for the Warm Forging using Artificial Neural Network," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 36-43, 2003.
4. Fujikawa, S., Yoshioka, H. and Shimamura, S., "Cold and Warm Forging Applications in the Automative Industry," J. Mater. Process. Technol., Vol. 35, pp. 317-342, 1992.
5. Abdul, N. and Dean, T., " An Analysis of the Forging of Spur Gear Forms," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 2, pp. 113-121, 1986.
6. Meidert, M., Knoerr, M., Wesphal, K. and Altan, T., "Numerical and Physical modelling of cold forging of bevel gears," Journal of Mat. Proc. Tech., Vol. 33, pp. 75-93, 1992.
7. Tomov, B. I. and Gagov, V. I., "Modeling and description of the near-net-shape forging of cylindrical spur gears," Journal of Materials processing Technology, Vol. 92-93, pp. 448-449, 1999.
8. Kurt, Lange, "Modern metal forming technology for industrial production," Journal of Materials processing Technology, Vol. 71, pp.2-8, 1997.
9. Yang, T. S., "Full film lubrication of deep drawing," Tribology International, Vol. 32, pp. 89-96, 1999.
10. Takuda, H., Mori, K., Masachika, T., Yamazaki, E. and Watanabe, Y., "Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 143-144, pp. 242-248, 2003.
11. "DEFORM Use's Manual V4.1," Scientific Technologies Corporation, 1995.