

자동차 휠 너트용 냉간단조 금형에서 인서트링과 보강링의 최적 설계에 관한 연구

이권수¹ · 김기엽² · 안용식[#]

Study on the Optimum Design of the Insert Ring and Shrunk Ring of the Cold Forging Die for an Automotive Wheel Nut

K. S. Lee, G. Y Kim, Y. S. Ahn

(Received February 2, 2018 / Revised March 5, 2018/ Accepted March 28, 2018)

Abstract

In order to increase the lifetimes of cold forging dies, insert rings are generally used. In this study, an insert ring and shrunk ring of the flange upsetting die were designed for the cold forging of an automotive wheel nut. The Stress distribution occurring in the die during forging was simulated using a commercial finite element analyzing program. The effects of the fitting interference and inclined angle of the insert ring on the compressive stress of the die inside were also investigated. The simulated data were compared with the real lifetimes of the forging dies. The maximum compressive stress acting on the edge of a forging die should have the most influence on die lifetime, an idea which could help develop the die design with the longest lifetime. The design of the most optimal forging die with the longest lifetime is made possible by analyzing the maximum inner pressure and principal stress between the shrunk ring and insert ring.

Key Words: Cold Forging, Die Design, Insert Ring, Lifetime

1. 서 론

자동차단 냉간단조(multi-stage automatic cold forging)의 궁극적인 목표는 양질의 제품을 경제적인 방법으로 대량생산하는 것이다. 모든 냉간 단조품은 금형의 수명과 정도에 의해서 품질 수준이 결정되므로 최적의 공정 및 금형수명이 원가 경쟁력에 있어서 가장 중요한 요소가 된다. 단조는 품질과 가격을 동시에 만족시킬 수 있는 공법이고, 근래에는 소재 기술, 포머단조 기술, 정밀 밀폐단조 기술 등이 발전하여 고부가가치 제품의 대량 생산이 가능해져 가격 경쟁력이 확보되었다.[1] 소형 제품에 비해 대형 제품의 경우 특히 성형 시 내부의 코너부, 단차

부, 바닥면 부위에 높은 접촉 면압이 발생되어 마모, 소성변형으로 금형수명이 저하되거나 조기 파손이 발생한다. 금형수명을 향상시키기 위해서는 보강링을 이용한 금형 인서트를 예압하는 방법이 사용되고 있는데, 예압하지 않을 경우, 성형 시 금형내부의 면압에 의해 원주방향(circumferential) 응력성분이 인장상태로 되어 금형의 파손이 발생하기 쉽다.

예압 금형(prestressed die)을 설계하는 데에 있어서 전통적인 방법은 후벽원통(thick walled cylinder)의 해석인 Lamé의 식(Lamé's equation)[2]을 이용하여 접촉압력을 구하고, 최적 분할 직경비, 최대 허용내압 및 간섭량(interference)을 구하여 보강링에 적용시켜 금형 내부의 응력변화를 예측하여 적용하는 것이다. 이는 치수 결정에 있어 사용하기 편하고 간단하기 때문이다. 정밀한 냉간 단조품을 얻기 위해 금형설

1. 부경대학교 재료공학과

2. 한국 폴리텍대학 대구캠퍼스

Corresponding Author : Dept. of Materials Sci. and Eng., Pukyong National University, E-mail: ysahn@pknu.ac.kr

계에 있어서 금형내면에 작용하는 정확한 압력을 구하는 것이 필요하므로 성형 중 금형내면에 작용하는 압력을 측정하는 연구들이 계속 진행되고 있다. 그 외 Wang[3] 등은 후방압출공정에서 컨테이너 벽면에 작용하는 내압을 알아내기 위해 QPT(quartz piezoelectric transducer)를 이용한 실험과 해석을 수행하였으며, Sadeghi[4] 등은 축대칭 부품의 단조공정에 따른 치수 정밀도에 관하여 이론상의 예측과 실험을 수행하였다.

또한 Nielsen[5] 등은 금형의 수명향상 및 단조품의 치수 정밀도 확보를 위해서 스트립와운드 컨테이너를 사용하여 피로손상의 감소와 냉간 단조 공정 중 금형의 반경방향 변형을 감소시키는 연구를 수행하였으며, Groenbaek[6] 등은 금형인서트를 예압하는 접촉압력을 일정하지 않은 반경방향의 간섭량에 따라 최적화한 OPTI-FIT 컨테이너를 이용하여 축방향의 예압이 가능하도록 함으로써 전장압출 공정에 적용하였다. 이와 같은 연구들은 전통적인 보강링의 효과와 축방향의 예압력을 복합적으로 부가하여 금형의 수명을 향상시키고자 한 것이다. 보강링으로 예압된 금형의 설계에 있어서 여러 연구가 진행되어 왔지만 Lamé의 식을 이용한 보강링의 치수결정 방법[8~9]을 가장 많이 사용하고 있다.

본 연구에서는 실제 현장에서 생산중인 자동차 wheel nut용 냉간단조 금형의 수명을 극대화시키기 위하여 보강링을 사용하면서 최종 금형의 예비성형 조건으로 금형 인서트를 설계 하였고, 보강링의 열박음 압입공차와 압입각도 등의 변수들이 실제 공정에 적용될 때 발생할 수 있는 금형 내부의 응력 변화를 상용유한요소 해석 프로그램인 DEFORM을 이용해서 예측하였으며, 그 해석결과를 실제 공정에 적용하여 각 변수에 따른 금형수명을 비교 하였다. 또한 금형수명에 미친 영향인자를 비교분석 함으로써 금형의 제작 시 최적의 설계를 할 수 있는 이론적 근거를 마련하고자 하였다

2. 시험방법

본 연구에서는 냉간단조용 소재로 저탄소 보론강(51B20)을 사용하였으며, 인서트링(insert ring) 소재로 초경합금(GTi50), 그리고 보강링(shrunk ring)은 공구강(SKD-61)을 사용하였다. 51B20 강은 성형성이 우수하며 최종제품의 기계적 성질이 기존에 사용하던

S45C와 유사하면서 소재가격이 상대적으로 저렴하여 S45C에 비해 wheel nut 소재로서 더 우수하다는 것이 선행 연구[7]에서 검증되었다.

Table 1에서는 본 연구에 사용된 인서트 링과 보강링, workpiece 소재들의 기계적·물리적 특성을 나타내고 있다.

Table 1 Mechanical properties of used materials for work pieces

Material	Hardness (HRC)	Young's Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)
GTi50	88	570	3,960	3,600
SKD-61	56	212	1,720	1,550
51B20	78	204	434	359

Fig. 1에서는 보론강(51B20)소재를 사용하여 Bolt former 5단 장비에 의해 휠 너트의 각 단계별 냉간단조 공정품이 제조되는 과정을 나타내고 있다. 각 공정은 1st 면취성형, 2nd 후방압출, 3rd 육각부 업셋팅, 4th 육각머리부 후방압출 및 5th 플랜지 외경 업셋팅 공정 등 총 5 Step 성형공정으로 이루어져 있다.



Fig. 1 5-step sequence for forming a wheel nut

본 연구에서는 금형수명에 미치는 변수로서 4th 육각머리부 후방압출 공정의 대변치수(opposite side size)를 31.40-31.65 mm의 범위에서 0.05 mm씩 단계적으로 변화시켜 먼저 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM에 의해 금형 내부에 작용하는 유효응력값을 구하였다. 또한 인서트 다이의 압입각도(inclined angle)를 2~6° 범위에서 변화시켜 압입 시 인서트 링 및 보강링에 부하되는 응력값을 구하고 실제 공정에 적용하여 금형의 수명을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 보강링과 인서트링의 설계

냉간 단조금형설계의 경우 보강링의 예압을 고려하여 분할직경비를 결정하는데, 최대 내압이 작용할 때 인서트링과 보강링이 동시에 항복하는 조건과 인서트링은 취성이 매우 강한 초경합금이므로 원주 방향의 응력이 압축에서 인장으로 변하는 상태를 항복조건으로 설정하였다[8-9]. 이 두 조건과 Lamé의 식을 이용해서 분할 직경비를 계산하였다.

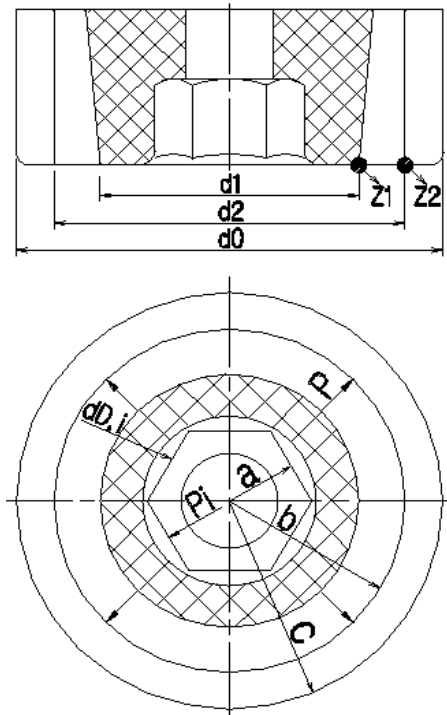


Fig. 2 Schematic of insert ring and doubly shrunk die for Flange Upsetting

<기호 설명>

Pi = Inner pressure

Sy1 = Yield strength of die insert

Sy2 = Yield strength of inner shrink ring

Sy3 = Yield strength of outer shrink ring

d_{di} = Inner die diameter

E = Modulus of elasticity

P' = Pi/S_{y1}, Ratio of inner pressure to yield strength of die insert

K_r = S_{y1}/S_{y2}, Ratio of yield strength

K_r = S_{y2}/S_{y3}, Ratio of yield strength

d₁ = Interface diameter between insert and inner shrink ring

d₂ = Interface diameter between inner and outer shrink ring

d₀ = Outer diameter of assembly

Z₁ = Absolute interference at d₁

Z₂ = Absolute interference at d₂

Q = Total diameter ratio

Q₁ = diameter ratio of die insert

Q₂ = diameter ratio of inner shrink ring

Q₃ = diameter ratio of outer shrink ring

δ = interference amount

ν = Poisson's ratio of the insert material

Fig. 2는 인서트링을 포함한 두 개의 보강링의 열박음 상태의 금형과 끼워맞춤을 할 경우 접촉면에서의 반경 치수를 나타내고 있다. 실제 열박음 후의 접촉면의 반경을 알 수 없으므로 각각의 초기 직경으로 먼저 설정하고 간섭량의 조절은 외경을 연삭하는 것이 간단하다. 따라서 링의 내경에 간섭량을 더한 값으로 외경을 설정하였다. 보강링에 작용 가능한 접촉압력 P는 다음과 같다.

$$P = \frac{E\delta (b^2 - a^2)(c^2 - b^2)}{b \cdot 2b^2(c^2 - a^2)} \quad (1)$$

위 식의 간섭량(δ)은 다음 식으로 구한다.

$$\delta = \frac{b\delta}{E} \left(\frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} + \nu \right) + \frac{bp}{E} \left(\frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} - \nu \right) \quad (2)$$

인서트링의 내부에 원주방향 인장응력이 없는 보강링 조립 시 두 보강링의 분할 직경비, 압입 공차를 구해 인서트 금형과 보강링의 설계는 최대 허용내압이 작용할 수 있도록 직경을 분할하고 최대 허용내압이 작용할 때 보강링의 내면이 항복 조건을 만족할 수 있도록 끼워맞춤 공차를 부여한다. 결정된 금형의 분할 직경비로 분할 직경을 구하고 간섭량의 변화에 따른 체결 과정 중 금형 인서트를 포함한 각각의 링의 항복여부를 체크하였다. 이때 바깥에서 안쪽으로 체결한다는 가정하에 수행하였다. 각 링이 체결된 후 내압과 외압이 0인 상태로 모든 링이 체결된 후 소재의 변형에 의해 작용하는 내압에 대해 안전한 최대 간섭량을 결정하였다.

$$d_1 = d_{Di}/Q_1, \quad d_2 = d_1/Q_2, \quad d_0 = d_{Di}/Q \quad (3)$$

$$Q_1 = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{1/k_1 + 1/k_2}{P'} - 1 \right)} \quad (4)$$

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{k_1 P'}, \quad Q_3 = Q_2 \sqrt{k_2 P'}, \quad Q = Q_1 Q_2 Q_3 \quad (5)$$

여기서 d_1 은 inserts 다이와 보강링 1 사이의 경계면 직경이고 d_2 는 보강링 1과 2 사이의 경계면 직경 그리고 d_0 는 보강링 2의 외경을 나타내고 있다. 본 연구에서 $k_1=2.32$, $k_2=1$, $P'=0.58$ 이므로 $Q_1=0.49$, $Q_2=0.52$, $Q_3=0.34$ 가 되고 따라서 Q 는 0.087이 된다. 이 값을 이용하면 d_1 , d_2 는 각각 65.1 mm 및 125.19 mm 가 되고, 아래 식을 이용하여 최대 내압을 견딜 수 있는 간섭량 Z_1, Z_2 를 구하면

$$Z_1 = \frac{d_1 \cdot S_{y1}}{E} \frac{1+Q^2}{1-Q_2^2 Q_3^2} P' \quad (6)$$

$$Z_2 = \frac{d_2 \cdot S_{y2}}{E} \frac{1}{K_2 - P' Q_1^2} \quad (7)$$

$Z_1 = 0.263$, $Z_2 = 0.417$ 이 된다. 이렇게 구한 inserts 링 및 보강링의 직경 d_1, d_2 과 간섭량 Z_1, Z_2 를 적용하여 DEFORM 프로그램으로 해석하였다. 결정된 금형의 분할 직경비로 분할 직경을 구하고 간섭량의 변화에 따른 체결 과정 중 금형 inserts를 포함한 각각의 링의 항복여부를 체크하였다. 이때 바깥에서 안쪽으로 체결한다는 가정 하에 수행하였다.

3.2 육각 플랜지 대변치수에 따른 영향

본 연구에서 wheel nut의 금형응력해석을 위해 범용적으로 사용되는 소성변형 강소성 유한요소 해석 도구인 DEFORM-3D를 사용하였다. 초기 소재 및 금형은 Catia를 사용하여 모델링하고 STL File로 저장하여 3차원 요소를 분할 생성하고 응력 해석을 수행하였다. 펀치와 다이면에서는 마찰조건이 일정하고, 금형의 속도 등은 모든 공정에 동일하게 적용하였다. inserts링과 보강링 접촉면 사이에 정수전단마찰(Constant Shear friction)이 작용하는 것으로 하였으며 마찰계수는 0.1로 선택하고 메쉬에서 요소 수는 35,000개로 지정하였다. 펀치와 다이의 정지거리는 8.5 mm가 되면 멈추도록 하였다. 육각

플랜지 금형 형상은 대각 부분 기준으로 1/6 모델링하여 해석하였다. 시뮬레이션에 적용된 금형재료는 Carbide(24% Cobalt) std를 선택하였고 소재는 실험에 사용된 52B20 보론강과 유사한 기계적특성을 가지고 있는 AISI-5120, Cold [70-1450F(20-800c)]를 사용하였다.

Fig. 3은 4th 금형 inserts링의 육각 플랜지 부위의 opposite side distance (대변길이)를 31.50 mm로 하여 inserts링 내부에 미치는 내부응력분포 해석 결과를 나타내고 있으며 최대 내부 압력은 머리부의 모서리를 따라 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 해석한 결과 이 조건에서 작용하고 있는 최대 내부 압력은 $P'=2,090\text{MPa}$ 이었다.

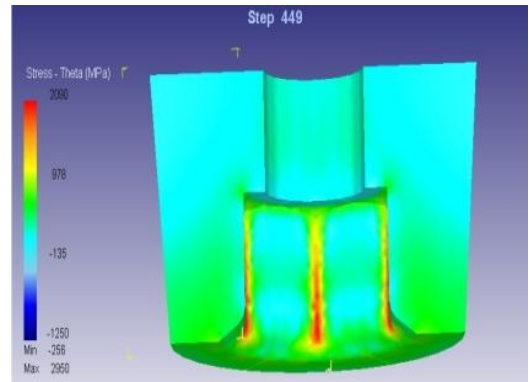


Fig. 3 Simulated result showing the inner pressure on the insert ring of 4th die at the opposite side distance of 31.50 mm

최종단계 금형인 5th 금형의 최대 내부압력에는 4th 금형의 설계조건이 가장 큰 영향을 미치며, 이 중 육각 플랜지 대변길이가 가장 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 대변길이를 31.40~31.65 mm 범위에서 단계적으로 변화시킨 값을 적용하여 최대 내부 압력값을 해석하였으며, 실제 금형을 제작하여 단조시 성형 살채움을 비교 조사하였다. Fig. 4에서는 4th 금형 inserts링 육각플랜지의 대변길이에 따른 5th 금형 inserts링의 최대 내부 압력(max. inner pressure) 값의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보면 대변길이가 증가함에 따라 압력이 증가하고 있으며 특히 대변길이 31.55 mm를 초과하면서 최대 내부압력이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

본 연구 범위에서 측정된 최대 내압이 2,500 MPa며 이것은 inserts링 소재인 초경합금 GTi50의 항복

강도 3,600 MPa 보다 낮으므로 인서트링 소재가 충분히 견딜 수 있는 조건이다. 하지만 단조 시 공정품의 성형이 완성될 수 있다면 링에 부하되는 응력이 작을수록 금형의 수명에 좋은 영향을 미친다. 따라서 실제 금형을 제작하여 육각 플랜지 업셋팅한 후 대변치수에 따른 공정품의 대각 충전율(filling rate)을 조사하였으며 그 결과를 table 2에 나타내고 있다.

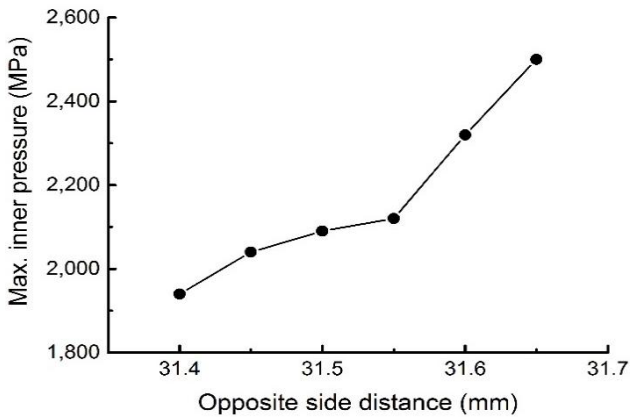


Fig. 4 Maximum inner pressure varying with opposite side distance

Table 2 Filling rate according to opposite side distance

Opposite edge/side distance	35.4/31.40 [mm]	35.9/31.45 [mm]	36.5/31.50 [mm]
opposite angle shape			
Filling rate	96.2%	97.5%	99%

도표에서 보면 대변길이가 31.40 mm 와 31.45 mm 일 때는 최종 공정품의 대각 충전율이 각각 96.2, 97.5% 정도의 수준으로 대각이 미형성된 결과가 나왔으나, 31.50 mm 일 때는 100%에 가까운 대각 충전율이 발생되면서 대각형성이 가장 양호하게 나타났다. 즉 4th 금형 인서트 링의 대변치수가 31.50 mm 일 때 피단조재의 성형이 완전히 이루어진다는 것을 알 수 있으며 이것은 Fig. 4에서 최대 내압이 급격하게 상승하기 직전의 치수이다. 따라서 해석만으로도 최대 내압의 변화를 분석하면 최적의 대변치

수를 구하는 것이 가능하다고 생각되며, 더 이상 큰 대변치수를 가지는 것은 내부압력을 높여 금형 수명만 감소시킬 뿐 의미가 없을 것이다. 이러한 경향은 다른 금형에서도 적용 가능하다고 생각된다.

3.3 보강링의 압입 각도에 의한 영향

Table 3에서는 인서트링과 보강링 사이의 압입각도 2° ~ 6° 범위에서 각각 설계된 5th 금형을 가지고 해석한 결과를 나타내고 있다. 그림들을 보면 보강링과 인서트링의 접촉면에서 최대응력이 발생하고 있다. 도표에서의 압축응력값은 인서트링의 육각모서리 부분에서 발생하는 peak 압축응력이며 이것과 최대 주응력은 압입각도가 커짐에 따라 증가하고 있다. 압입각도 6° 일 때는 최대 주응력이 1,870 MPa이므로 보강링으로 사용된 공구강 SKD-61종의 인장강도(1,720 MPa)를 초과하고 있다. 실제 압입각도 6° 로 제작된 보강링을 끼워맞춘 결과 수직크랙(vertical crack)이 발생하여 실제 공정에는 적용할 수 없었다.

Table 3 The FE Analysis result of the insert dies with different inclined angles

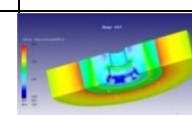
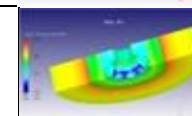
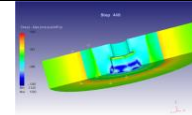
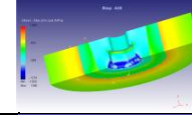
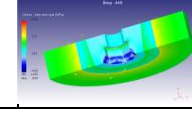
Inclined angle	Figures	Compressive Stress (MPa)	Max. principal stress(MPa)
2°		-1,070	991
3°		-1,190	1,010
4°		-1,220	1,300
5°		-1,280	1,360
6°		-1,360	1,870

Table 4는 각도 2° - 5° 범위에서 각각 설계된 금형을 가지고 실제 공정에 적용하여 금형의 수명을 측정한 결과를 나타내고 있다. 도표에서 보면 파단

되지 않는 범위에서 가장 높은 압축응력을 나타내었던 5° 일 때의 금형수명(N_f)이 가장 높았으며 이것은 압입각도 2° 일 때보다 N_f 가 10 배 이상 향상된 수치이다. 따라서 금형설계 시 해석에 의한 압축응력 값이 인장강도를 넘지 않는 범위에서 최대의 압입각도를 가지게 설계하면 최적의 금형수명을 획득할 수 있을 것이다.

Table 4 Total number of forged products by using insert dies with various inclined angles until fracture

Angle	2°	3°	4°	5°	6°
N_f	30,000	70,000	160,000	350,000	fracture

Fig. 5 에서는 최종 5th 플랜지 외경 업셋팅 시 육각부와 경사진 플랜지 외경이 연결되는 급격한 곡선변화를 가진 모서리부분에 응력집중이 발생하여 금형마모를 촉진시켜 파손된 부위를 나타내고 있다.



Fig. 5 Fractured area of insert ring of 5th die

4. 결론

차량용 휠 너트 냉간단조를 위한 금형의 보강링과 인서트 링의 대변치수 및 압입각도를 설계하였으며, 이때 보강링과 인서트링에 가해지는 최대 압축응력값과 최대 주응력값을 FEM PROGRAM인 3D DEFORM으로 해석하였다. 금형은 5단계로 설계되었으며 각 금형의 육각플랜지 모서리에 최대의 내부응력이 가해지고 있었다. 5th final 금형 직전의 예비성형 단계(4th)에서 대변의 길이가 증가함에 따라 최대 내부응력은 상승하며 그 상승폭이 급속히 커지기

직전의 대변길이가 충진율 및 단조공정에 가장 적합한 치수이었다. 인서트링과 보강링의 접촉면에서 발생하는 최대주응력은 압입각도가 커질수록 증가하며 최대주응력이 보강링의 인장강도를 넘지 않는 범위에서 최대값을 가질 때 즉 압입각도가 5° 일 때 최종금형의 수명이 가장 우수하였다.

REFERENCES

- [1] M.C.Lee, M.S.John, 2008, Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Multi-Stage Automatic Cold Forging Processes by Combined Analyses of Two-Dimensional and Three-Dimensional Approaches, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No.3, p. 155.
- [2] A.C. Ugural, S.K. Fenster, 1995, Advanced Strength and Applied Elasticity, Third Edition, Prentice Hall
- [3] X.W. Wang, H.G. Chang, C.J. Wang and M.Y.Lee, 1987, Experimental and Theoretical Determination of Container, Adv. Tech. of Plasticity, Vol, pp. 539~544.
- [4] M.H.Sadeghi and T.A. Dean, 1991, Analysis of Dimensional Accuracy of Precision Forged Axisymmetric Components, Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 205, pp. 171~178.
- [5] E.B. Nielsen and J. Groenbaek, 1995, Improved Service Life Conditions for Cold-Forging Die Inserts Through the use of High-Stiffness Stripwound Containers, Proc. Solihull, UK, pp. 51~57.
- [6] J. Groenback and E.B. Nielsed, 1997, Stripwound Containers for Combined Radial and Axial Prestressing, J. Mater. Process. Technol., Vol. 71, pp. 33~35.
- [7] K.S.Lee, and Y.S.Ahn, 2017, Study of a Forging Process for the Application of Boron Steel for Automotive wheel. nut Material, J. of Korean Soc. for Power System Eng., Vol, pp. 41~47.
- [8] Y.B.Kim, 1977, Compression manufacturing die
- [9] K.Lange, 1985, handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, Inc., pp. 1580~1590.