

## 연성파괴를 고려한 6각 피팅 너트 예비성형체 설계

김동환\* · 이정민\*\* · 김병민\*\*\*

(2004년 1월 30일 접수)

### Design of Hexagonal Fitting Nut Preform Considering a Ductile Fracture

D. H. Kim, J. M. Lee and B. M. Kim

#### Abstract

In the multi-stage former, a manufacture of hexagonal fitting nut was generated in a defective products about 70~80% in the industry field. Products generated in defects manufactured to be a machining about 60%. Additional process increased a product cost and decreased a product rate. Therefore, it is important to predict and design a preform reducing defective products in the early stage of process design. So in the study Defects for manufacturing hexagonal fitting nut verified a cause through the finite element simulation. To reduce a defective generation. a preform designed and a designed preform verified through the finite element simulation. In conclusion, a generated defects when a hexagonal fitting nut manufactured should reduce if a round dimension of preform reduced and a part of opposition angle distributed in plenty a volume.

**Key Words** : Hexagonal Fitting Nut, Ductile Fracture, Multi-stage Former, Preform Design, FE-analysis

#### 1. 서 론

상온에서의 금속성형공정은 소재의 손실을 최소화하고 기계적 성질 및 치수정도가 우수한 제품의 성형이 가능하다. 특히 냉간가공은 가공속도가 빠르고 성형 장비가 간단하므로 생산성을 향상시켜 대량 생산이 가능하게 하므로 생산 단가의 저하와 함께 제품의 경쟁력을 강화시킬 수 있다. 그러나 열간에 비해 냉간에서의 금속의 성형은 높은 가공경화에 의한 성형 하중의 증가와 소재의

큰 변형에 의한 소재 내·외부에 국부적인 결함을 가져오게 되고, 이러한 결함으로 인해 제품의 품질 저하 및 제품 생산단가 상승의 원인이 된다. 냉간 금속성형공정에서의 대표적인 결함에는 내부 중심축 선상에서의 변형 이력에 의한 연성파괴나 불안정한 유동에 의한 유동결함과 같은 내부결함과, 냉간 압출공정에서 소재의 길이가 짧을 경우 펀치와 접촉하는 끝부분에 발생하는 파이프(piping) 결함 같은 외부결함으로 구분할 수 있다.<sup>(1)</sup> 특히, 연성파괴에 의한 제품의 결함은 소재에 가해지는

\* 전주국제대학교 자동차공학과  
\*\* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원  
\*\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

변형이 소재의 변형한계를 초과하게 될 경우 발생하게 되고, 연성파괴는 변형한계가 열간에 비해 냉간에서 훨씬 작기 때문에 냉간가공 공정 중에 파괴가 많이 발생한다.<sup>(2)</sup> 그러므로 냉간가공 중에 연성파괴가 발생하지 않도록 공정 설계 단계에서 미리 예측하고 성형 중에 결함이 발생하지 않도록 하는 예비성형체의 형상 및 금형 설계가 요구되고 있다.

냉간 금속성형공정에서 결함을 예측하기 위해서 많은 연구들이 진행되고 있다. Wifi<sup>(3)</sup> 등은 유한요소 해석을 통해 연성파괴에 대한 여러 성형 한계식을 적용하여 체적 성형의 성형한계에 대하여 연구하였고, 박<sup>(4)</sup> 등은 유한요소해석을 통하여 유동결함을 예측하고, 유동결함을 방지하기 위한 공정설계에 대해서 연구하였으며, Kim<sup>(5)</sup> 등은 유한요소법과 신경망을 이용한 금속성형공정의 예비성형체 설계 방법을 제시하였다.

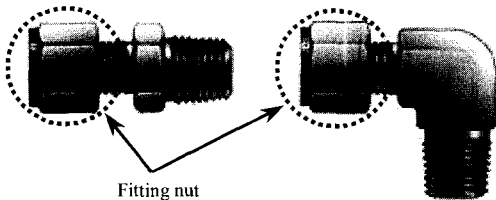


Fig. 1 Hexagonal fitting nut

본 연구에서는 6각 피팅 너트를 대상으로 하여 제품 성형 시 발생하는 표면의 결함에 대하여 연구하였다. 6각 피팅 너트는 Fig. 1과 같이 파이프나 엘보와 같은 기계부품을 체결하는 기계 요소로 널리 사용되고 있는 제품으로 대각과 대변의 길이차를 가지고 있으며, 성형 시 이로 인해 불균일한 소재 유동이 발생하고, 대변에서 대각으로 소재 유동이 과다하게 발생하면 대변의 중심축 상에서 표면이 갈라지는 결함이 발생한다. 또한, 결함이 발생하지 않더라도 제품 표면의 미세한 크랙들이 제품 내벽에 존재하여 제품 강도 및 수명을 저하시키는 원인으로 작용한다. 이러한 결함에 의한 제품의 불량은 전 제품의 70~80%에서 발생하며, 그 중 60% 정도는 결함이 발생한 부분을 기계 가공하여 제품을 생산하고 있기 때문에 이로 인한 재료 손실 및 추가 공정에 따른 경제적인 부담으로 제품 단가를 상승시키고 생산성을 저하시키게 된다. 따라서 본 연구의 목적은 결함이 발생하는 6각 피팅 너트 성형 공정에 유한요소해석을 수행하여 결함의 원인 및 결함을 줄이기 위한 예비성형체 설계변수

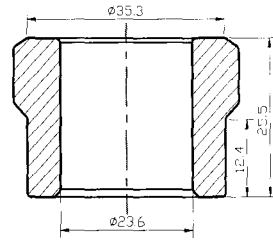


Fig. 2 The shape and dimension of a hexagonal fitting nut

에 대한 영향을 파악하고, 이를 바탕으로 예비성형체를 재설계하는데 있다.

## 2. 결함의 발생 및 원인 파악

### 2.1 6각 피팅 너트 성형 시 결함의 발생

본 연구의 대상제품인 6각 피팅 너트는 최소 대각의 길이가 40.3mm이고, 대변의 길이가 36.0mm이며, 높이가 25.5mm인 제품으로 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 6각 피팅 너트의 소재는 SM15C이며 소재에 대해 압축실험을 수행하여 다음과 같은 응력-변형률 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 774.04 \bar{\epsilon}^{0.1} (MPa) \quad (1)$$

소재와 금형간의 마찰은 원소재를 인산염 피막처리 후 본드 루베(bond rube) 윤활 처리를 하여 전단 마찰 상수 값(m)은 0.1이었다.

6각 피팅 너트의 기존 생산 공정은 5단으로 구성된 냉간 단단 포머(multi-stage former)에 의해 제조되어진다. 6각 피팅 너트를 성형하기 위한 공정 순서는 먼저, 치수

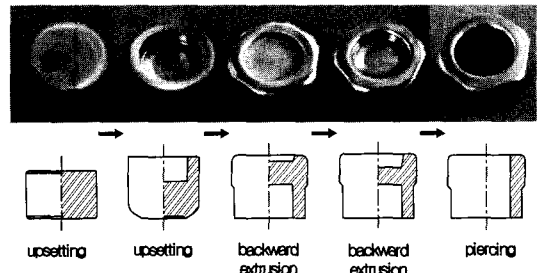


Fig. 3 Processes sequences of fitting nut

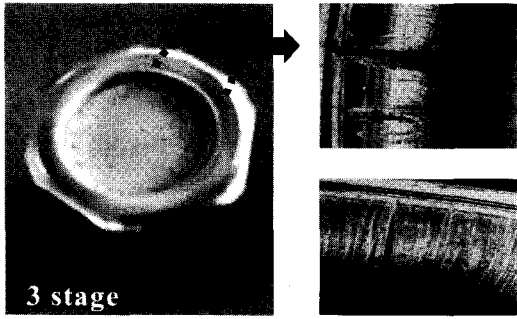


Fig. 4(a) Defects appeared on product after 3 stage process photographed a microscope(100 scale)

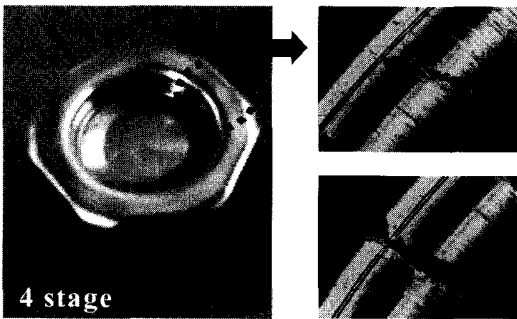


Fig. 4(b) Defects appeared on product after 4 stage process photographed a microscope(100 scale)

정밀도와 편치의 편심을 방지하기 위해 1공정에는 업세팅 공정으로 성형하고, 2공정에서는 1공정 성형 시 성형되지 않는 절단면에 대한 편치의 파손 방지 및 치수 정밀도를 위한 업세팅 공정과 후방압출 공정을 혼합하여 성형한다. 3공정과 4공정에서는 6각 피팅 너트의 6각 형상을 성형하기 위해 후방압출 공정으로 성형하고, 마지막 5공정에서 피어싱하여 최종 제품을 성형한다. Fig. 3에 6각 피팅 너트의 성형공정 및 공정 후 성형된 제품을

나타내었다.

기존의 성형공정으로 제품의 성형실험을 수행한 후 각 공정에 대한 성형된 제품을 100배 현미경 촬영을 하여 6각 피팅 너트의 표면을 관찰하였다. Fig. 4는 3, 4 공정의 후방압출 공정 후 제품을 관찰한 사진이다. 6각 피팅 너트의 표면을 100배 확대해 보면, 3공정 후부터 대변의 중심축 상으로 미세한 크랙이 발견되는 것을 관찰할 수 있었으며, 3공정 후 제품의 표면에서 미세한 크랙들이 성장하여 4공정에서는 표면의 파손을 야기하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 6각 피팅 너트의 표면에 발생하는 결함의 원인을 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하였다.

## 2.2 유한요소해석에 의한 결함 예측

6각 피팅 너트 성형 시 나타나는 표면결함을 해석하기 위해서 상용 강소성 유한요소해석 코드인 DEFORM 3D<sup>(6)</sup>를 사용하였다. 결함의 원인을 규명하기 위해서 초기 소재의 직경이 28.0mm이고 높이가 30.6mm인 소재를 사용하였으며, 대칭축이 6개이므로 1/12단면으로 기존의 공정대로 성형해석을 수행하였다.(Fig. 5) 수행한 결과 결함이 발생한 3공정 후 유효 변형률 및 유효 응력 분포는 Fig. 6(a)에 나타나듯이 결함이 발생한 부분이 다른 부위에 비해 국부적으로 큰 값이 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 6(b)는 Kobayashi<sup>(7)</sup>등이 제안한 연성과 피 수치에 대한 해석 결과 및 소재 유동 속도에 대한 해석 결과이다. 그림에서 보듯이 결함이 발생한 부분에 집중적으로 큰 연성과 피 수치가 나타나는 것을 알 수 있었으며, 결함이 발생하는 부분의 최대 연성과 피 수치는 0.2311이었다. 또한, 소재가 대각 부분에서 상대적으로 큰 유동이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 6각 피팅 너트의 성형 시 발생하는 표면 결함은 6각 너트의 형상을 성형하는 3공정 성형 시 대변의 중심축 상을 기준으로 대각 방향으로 소재유동이 발생하고, 상대

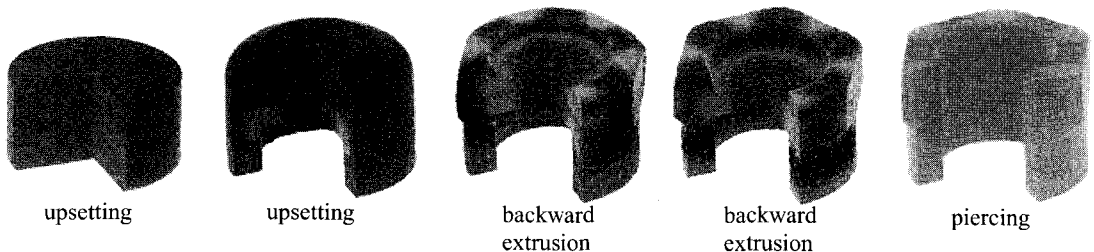


Fig. 5 Results of FE-simulation for fitting nut

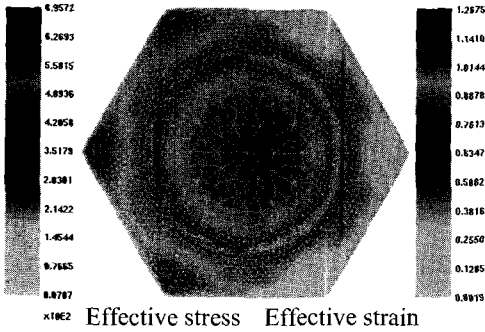


Fig. 6(a) Distributions of effective stress and strain

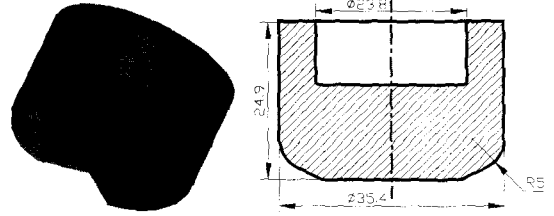


Fig. 7 The shape and dimensions of preform in the 3rd conventional process

기존의 공정에서의 예비성형체 곡률부 치수는 5mm이므로 예비성형체 곡률부 치수에 대한 연성파괴 수치의 영향을 파악하기 위해 예비성형체 곡률부 치수를 0, 2, 8mm 변화하여 3공정의 성형해석을 수행하였다.

해석 결과 예비성형체의 곡률부 치수가 작을수록 최대 연성파괴 수치는 낮아지는 것을 알 수 있었다. Fig. 8은 예비성형체 곡률부 변화에 대한 연성파괴 수치의 변화를 나타내었다. 그러나 예비성형체의 곡률부 치수가 0, 2mm일 경우에는 연성파괴 수치는 저하되나 성형 시 소재가 급형의 외각으로 플래시(flash)가 발생하였다. Fig. 9는 예비성형체곡률부 치수가 2mm일 경우에 발생하는 플래시를 나타내었다. 이러한 플래시의 발생은 6각 피팅 너트 급형을 밀폐형 단조로 제작했을 경우 펀치도 6각 형상으로 제작되어야 되므로 급형가공비의 증가 및 성형 시 펀치의 편심에 의해 급형의 파손의 우려가 있기 때문에 개방형 단조로 제작되어진다. 그러므로 이러한 급형 제작상의 한계로 인해 예비성형체의 곡률부의 치수 변화에 의한 연성파괴 수치의 감소도 한계를 가지고 있으며, 그 한계이하에서는 플래시가 발생하여 제품의 성형이 되

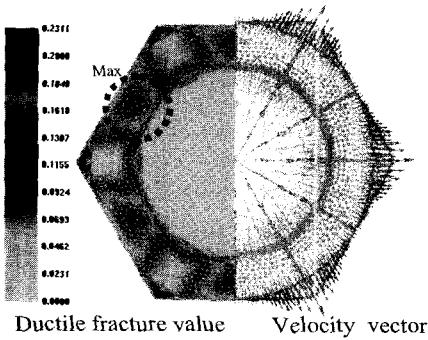


Fig. 6(b) Distributions of ductile fracture value and velocity vector

적으로 큰 소재의 유량이 양쪽 대각 방향으로 유동하기 때문에 대변에서의 변형에너지가 변형한계를 초과하여 연성파괴에 의한 결함이 발생하는 것으로 판단되었다.

따라서, 제 3공정 성형 시 연성파괴에 의한 결함을 방지하기 위해서는 3공정 예비성형체의 설계변수 영향 파악 및 소재 유동 조절을 통한 변형에너지를 감소시킬 수 있는 예비성형체의 재설계가 요구된다.

### 3. 예비성형체 설계

#### 3.1 3공정 예비성형체 설계 변수의 영향

3공정 후방압출 성형 시 연성파괴 수치를 낮추기 위해서는 예비성형체 설계변수에 대한 영향 파악이 필요하다. Fig. 7에 기존의 3공정 예비성형체를 나타내었다. 본 연구에서는 3공정 예비성형체의 설계변수 중에 변형에 영향을 미치는 설계변수로 예비성형체 곡률부 치수로 선정하였다.

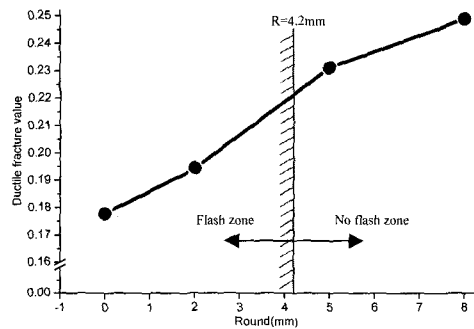


Fig. 8 Ductile fracture values with round variance

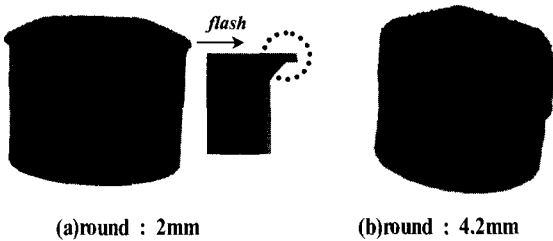


Fig. 9 The deformation shape in the 3<sup>rd</sup> process

지 않는 것을 알 수 있었다. 해석결과로부터 곡률부 치수에 따른 플래시 체적은 0mm인 경우 약 550mm<sup>3</sup>, 2mm인 경우 약 305mm<sup>3</sup>로 나타났고, 신경망<sup>(5)</sup> 학습 결과 곡률부가 4.2mm인 경우 플래시가 없음을 예측할 수 있었으며, 검증 해석을 통하여 예비성형체 곡률부 치수가 4.2mm 이상이 되면 플래시가 발생하지 않고 동시에 연성파괴 수치를 최소로 함을 알 수 있었다.(Fig.9(b)) 예비성형체 곡률부가 4.2mm일 때 최대 연성파괴 수치는 0.2236이었다.

### 3.2 3공정 예비성형체의 재설계

6각 너트 형상을 성형하기 위해 소재 유동의 불균일로 인한 변형에너지의 증가로 연성파괴가 발생하기 때문에 본 연구에서는 소재 유동을 균일하게 조정하기 위해서 예비성형체의 형상을 미리 대각이 성형될 부위에 소재 체적을 많이 분배하고, 대변에는 상대적으로 작은 소재 체적을 분배하는 예비성형체 형상을 제시하였다. 제시된 예비성형체의 형상은 Fig. 10과 같이 대각이 성형되는 부위의 꼭지점으로부터 대변을 성형하는 부위까지 30°의 각도로 체적을 배분하였으며, 설계된 예비성형체 형상에서 곡률부 치수를 변화시켜 플래시가 발생하지 않고 연성파괴 수치가 가장 작은 최적의 예비성형체 형상을 얻기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 해석 조건은 예비성형체의 곡률부 치수를 플래시가 발생하지 않는 최적의 예비성형체 곡률부 조건인 4.2mm를 기준으로 2,

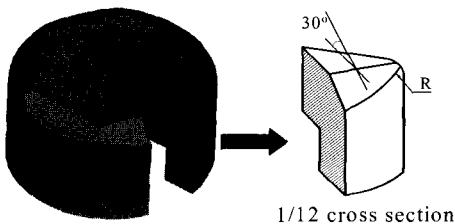


Fig. 10 A shape of redesign preform

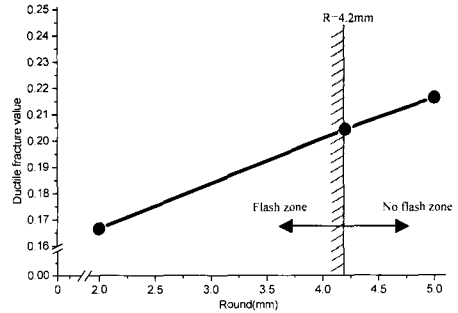


Fig. 11 Ductile fracture values with preform variance

5mm로 선정하였다. 선정된 조건으로 새롭게 설계된 예비성형체에 대해 해석을 수행한 연성파괴 수치의 변화는 Fig. 11에 나타내었다. 연성파괴 값이 가장 작은 성형조건은 대각에서 대변으로 30°의 각을 주어 체적을 배분하고 곡률부 치수가 2mm인 경우인 것으로 나타났으나, 역시 성형 시 플래시의 발생으로 인해 제품이 성형되지 않는 것을 유한요소해석으로 알 수 있었다. 따라서 플래시가 발생하지 않고 연성 파괴 값이 가장 작은 경우는 대각에서 대변으로 30°의 각도로 체적을 배분하고, 곡률부의 값이 4.2mm로 예비성형체를 설계한 조건임을 알 수 있었다. 이 조건에 대한 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 기존의 공정에 비해 속도 분포가 대각에서 작아지는 것을 알 수 있었으며, 최대 연성파괴 수치는 0.2044로 낮아지는 것을 알 수 있었다.

### 3.3 결과 및 고찰

6각 피팅 너트 성형 시 발생하는 연성파괴에 의한 결함을 줄이기 위해 유한요소해석을 통하여 예비성형체의 곡률부 치수 변화에 대한 연성파괴 수치의 변화를 해석

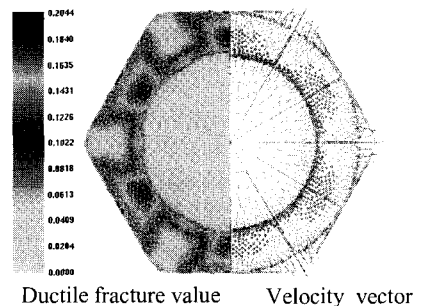


Fig. 12 Results of FE analysis for redesigned preform (Distributions of ductile fracture value and velocity vector)

하였다. 해석 결과 예비성형체의 곡률부 치수가 작을수록 연성 파괴 수치가 낮아지는 것을 알 수 있었으나, 곡률부 치수가 4.2mm 미만인 조건에서는 플래시가 발생하여 성형이 되지 않기 때문에 연성 파괴 수치를 최소로 하는 예비성형체의 곡률부 치수는 4.2mm인 것을 알 수 있었다. 이 때 연성 파괴 수치는 0.2236으로 기존의 예비성형체의 곡률부의 치수가 5mm일 때의 연성 파괴 수치인 0.2311 보다 감소하지만 결함의 발생을 크게 저하시킬 수 없는 것으로 판단되었기 때문에 3공정 예비성형체를 재설계하였다.

연성 파괴의 원인이 6각 너트 형상을 성형할 때 소재의 불균일한 유동으로 인한 변형 에너지의 증가로 판단되었기 때문에 소재의 유동을 균일하게 할 수 있는 예비성형체 형상을 제시하였다. 예비성형체의 형상은 대각이 성형될 부분에 대변이 성형될 부분보다 상대적으로 많은 체적을 배분하는 형상으로 재설계하여 유한요소해석을 통해 연성 파괴 수치의 변화를 검토하였다. 해석 결과 소재 유동을 고려하여 체적을 배분한 예비성형체가 기존의 예비성형체보다 연성 파괴 수치가 낮아지는 것을 알 수 있었으며, 플래시가 발생하지 않는 최적의 예비성형체 형상은 대각에서 대변으로 30°의 각도로 체적을 배분하고, 곡률부 치수가 4.2mm일 때 0.2044로 낮아지는 것을 알 수 있었다. 따라서, 재설계된 예비성형체는 기존의 예비성형체에 비해 연성 파괴에 의한 표면 결함을 저하시킬 수 있는 것으로 판단되었다.

### 결론

본 연구에서는 기계부품 요소로 널리 사용되는 6각 피팅 너트의 성형 시 발생하는 결함에 대해 유한요소해석을 통해 결함 발생 원인을 규명하였다. 또한 예비성형체의 설계변수에 대한 결함의 영향을 파악하고 이를 근거로 결함을 방지할 수 있는 예비성형체의 형상을 제시하였으며, 제시된 예비성형체를 유한요소해석을 통해 검증하였다. 이상의 과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3공정 예비성형체의 설계 변수인 예비성형체의 곡률부의 치수를 작게하면 연성 파괴 수치가 감소하지만 곡률부 치수가 4.2mm 이상일때 플래시의 발생없이 정형의 제품의 성형이 가능한 것을 알 수 있었다.

(2) 대각이 성형되는 부위에는 체적을 많이 배분하고, 대변이 성형되는 부위에는 상대적으로 체적을 적게 분배하기 위해 30°의 각도로 예비성형체 형상을 설계하였을 때 유한요소해석을 통해 연성 파괴 수치가 크게 감소되어

지는 것을 알 수 있었으며, 다단 포머에 의한 6각 피팅 너트 성형 시 표면 결함을 줄일 수 있을 것으로 사료되었다.

### 참고 문헌

- (1) T. Okamoto, T. Fukuta and H. Hagia., 1997, "Material Fracture in Cold Forging-Systematic Classification of Working Methods and Types of Cracking in Cold Forging," ASTM, pp. 216~226.
- (2) 박종진, 이영석, 1997, "소성가공을 위한 연성 파괴 조건에 대한 고찰," 대한기계학회논문집, 제21권, 제7호, pp. 1021~1029.
- (3) A. S. Wifi, A. Abdel-Hamid and N. El-Abbasi., 1998, "Computer-aided Evaluation of Workability in Bulk Forming Processes," J. Mater. Process. Technol., Vol.77, pp. 285~293.
- (4) 박종남, 김동환, 김병민, 2002, "자동차용 허브 클러치의 유동제어에 관한 실험적 연구," 한국소성가공학회지, 제11권, 제2호, pp. 430~438.
- (5) D. H. Kim, D. J. Kim and B. M. Kim., 1999, "The Application of Neural Networks and Statistical Methods to Process Design in Metal Forming Processes," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 15, pp. 886~984.
- (6) DEFORM User's Manual V4.1, 1995.
- (7) S. Kobayashi., 1970, "Deformation Characteristics and Ductile Fracture of 1040 Steel in Simple Upsetting of Solid Cylinders and Rings," Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, Vol. 92, pp. 391~399.
- (8) D. J. Latham and M. G. Cockroft., 1996, "The Effect of Stress System on the Workability of Metals," NEL Report No. 213.
- (9) J. J. Park, N. Rebelo and S. Kobayashi., 1983, "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 1, pp. 71~79.
- (10) B. S. Kang, N. S. Kim and S. Kobayashi., 1990, "Computer-aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No. 2, pp. 139~151.