

무인헬기용 요크 성형을 위한 공정 설계

허관도#, 김기성*, 천세영**

Process Design for Yoke Forming of Unmanned Helicopter

Kwan-Do Hur#, Ki-Sung Kim*, Se-Young Chun**

(Received 31 July 2009; received in revised form 7 October 2009; accepted 2 November 2009)

ABSTRACT

Yoke is a part of rotor in unmanned helicopter. It was transferred power of engine to the rotor. It has been usually produced by machining and used wastefully material. And it has been considered to improve its proof stress against repeated loading of the products. Therefore we studied Forging process for satisfaction of these ability and process design for yoke forming has been studied by using FE analysis. Die design and forming analysis have been performed according to the conditions such as billet volume, flash control, cavity filling, and the distribution of damage in the products. In the comparison between die forging processes, side punch effects has been investigated by considering billet dimensions.

Key Words : Yoke forming(요크성형), Unmanned helicopter(무인 헬리콥터), FE-analysis(유한요소해석)

1. 서 론

무인헬리콥터용 알루미늄 요크는 메인 로터를 연결하는 일종의 회전 압 홀더로서, 엔진으로부터 발생된 동력을 로터에 전달하는 역할을 한다. 요크는 엔진으로부터 발생하는 진동, 긴 로터 블레이드의 회전력에 발생하는 진동과 이에 대한 피로에 의해 파손될 수 있다. 고 하중에 따른 부품 안전성 및 항공기로서의 특수성에 따른 고 신뢰성을 만족해야 하며, 부품의 경량화가 또한 절실히 요구되므로 최소 중량으로 요구 성능을 만족하기 위한 강성 설계가 매우 중요하다.

기존의 요크는 절삭가공으로 제작되어 재료의 낭

비와 피로와 고 하중에 대한 신뢰성을 만족하지 못하는 경우가 발생하였다. 이러한 성능을 만족하기 위하여 단조가공을 활용하여 재료의 특성을 향상시키면서 안전성을 높이는 효과를 얻고자 한다.

단조가공을 하기 위해서는 우선 재료의 선택, 제품의 기하학적 형상과 정밀도 및 제조수량 등에 따라서 적절한 금형을 설계 및 제작하는 것이 필수적으로 수반되어야 한다.

특히 본 연구에서는 강도향상에 따른 요크의 수명 연장을 위해 단조 금형을 설계한다. 성형 중 재료의 유동성을 좋게 하여 완제품의 윤곽곡선 등에 의한 금형의 공동부에 재료유입이 원활히 진행될 수 있도록 예비 성형체의 설계가 이루어진다.

그리고 일반적인 상/하 직선운동에 의한 성형 구조의 금형에 의한 공정설계와 완제품에 가까운 성형을 위한 금형 구조에 의한 공정설계를 도입하여 재료의 절감효과를 비교평가 한다.

* 동의대학교 대학원 기계공학과

교신저자 : 동의대학교 기계공학과

E-mail : kd hurl@deu.ac.kr

** 한국폴리텍 7대학

2. 요크의 설계

2.1 요크의 형상설계

열간 단조공정을 수행하기 이전에 단조성형 용이성, 제품의 기능성 및 형상을 함께 고려하여 재료의 유입이 용이하도록 윤곽곡선 및 표면을 스캔하여 단조모델을 확정하고 시뮬레이션 결과를 토대로 열간 단조성형을 위한 설계를 실시하였다. Fig. 1은 기능적으로 요구되는 요크의 기하학적 형상이다. 여기서 구멍요소들은 금형에 의한 성형공정에서 배제하여 금형의 단순화를 꾀한다. 그리고 단조공정이 용이하도록 원활한 금속유동을 위해 홈 제거, 직선면부 및 모서리부를 부드러운 곡선 형태로 처리하고 적절한 필렛(Fillet)반경, 코너반경 및 빼기구배 등을 이용한다.



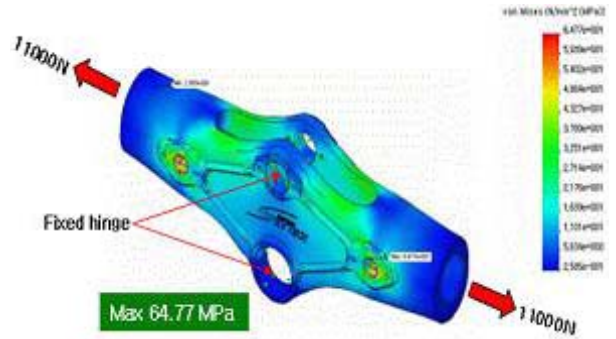
Fig. 1 Geometry of yoke

2.2 요크의 구조해석

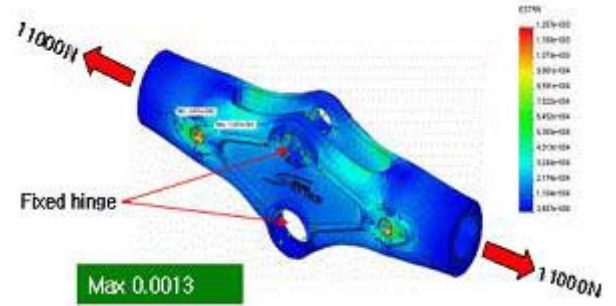
제품의 안전성을 평가하고 부품에 작용하는 하중과 응력 분포를 확인하여 설계 변경 여부를 판단하기 위해 구조해석을 실시하였다. 구조해석 시에 초기조건은 무인헬리콥터의 자체무게와 탑재중량을 합한 전체중량을 부양하는데 필요한 로터의 고속회전 시 발생하는 원심력 11000N이다. 이 조건을 Fig. 2의 요크 양쪽 슬롯(slot)에 표시하고 있다. 그리고 요크의 가운데 두 홈은 힌지에 의한 구속조건으로 설정하여 Fig. 2와 같이 구조해석 결과를 얻었다. 제품에 사용된 소재는 Al7075-T6이며, 재료의 성질은 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Mechanical properties of Al7075-T6

| Materials | Range | Unit |
|-------------------------------|---------|-----------------|
| Modulus of Elasticity | 7.2e10 | N/m^2 |
| Poisson's ratio | 0.33 | - |
| Ultimate Tensile Strength | 5.7e8 | N/m^2 |
| Tensile Yield Strength | 5.05e8 | N/m^2 |
| Thermal expansion coefficient | 2.36e-5 | $1/K$ |
| Thermal Conductivity | 130 | $W/(m \cdot k)$ |



(a) Von-mises stress



(b) Effective-strain

Fig. 2 FE-analysis of the yoke

3. 단조성형공정

3.1 초기 빌렛 및 금형

초기 빌렛은 열간 단조공정 시 적절한 금형 층진 및 금형 마모를 줄이고, 플래시로 인한 재료의 손실

을 고려한다. 단조공정에 사용된 모델의 순수체적은 $266,044mm^3$ 이때, 플래시 체적을 5~10%고려한 조건으로 초기 빌렛을 부피에 따라 직경 및 길이 변수로 설정하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 3은 열간 단조공정을 위한 초기 빌렛이며, 단면의 직경(D)은 각각 46,48,50mm 3종류이며, 길이(L)는 직경에 대하여 체적일정조건으로 설정하였다. 최소 단면의 직경을 46mm로 제한한 것은 그 이하의 직경에서는 단조품의 전체 길이인 190mm에 상당하거나 그 이상으로 빌렛의 길이가 설정되어 금형구조의 단순성에 부적합하여 직경의 최소값으로 결정하였다.

금형의 구조는 성형 시에 하중을 줄일 수 있고 재료유동을 원활히 할 수 있도록 플래시의 발생이 가능한 단순구조의 밀폐형으로 구성하였다. Fig. 4는 이 금형을 나타낸 것으로, 상/하 대칭을 이루는 두벌의 금형으로 되어있다.

3.2 성형해석 조건

Table 2에 나타낸 초기 빌렛을 이용하여 소재의 초기 온도는 $450^{\circ}C$ 이고 금형의 온도는 $200^{\circ}C$ 로 하여 열간 단조성형 해석을 수행하였으며, 해석시간의 단축을 위하여 소재의 L/2크기를 이용하였다. Fig. 4에서 상형은 $0.1mm/s$ 의 이동속도로 소재를 가압하며 상형이 하형과 접촉하는 시점에서 성형이 완료되도록 하였다.

Table 2 Dimensions of the billet

| Billet No. | Add volume of preform | | Diameter (D) mm | Length (L) mm | Volume (V) mm^3 |
|------------|-----------------------|---------|--------------------|------------------|----------------------|
| | % | mm^3 | | | |
| 1 | +5 | 279,346 | 46 | 168 | 279,200 |
| 2 | | | 48 | 154 | 278,672 |
| 3 | | | 50 | 142 | 278,816 |
| 4 | +10 | 292,648 | 46 | 176 | 292,495 |
| 5 | | | 48 | 162 | 293,148 |
| 6 | | | 50 | 149 | 292,561 |

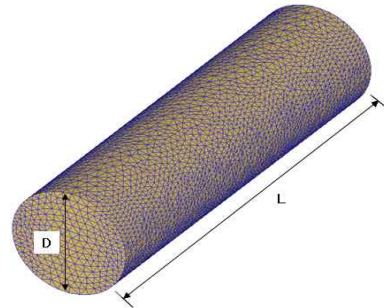


Fig. 3 Type of billet for forging



Fig. 4 Die model for forging of yoke

3.3 단조금형의 설계 개선

앞에서의 단조금형은 상/하 펀치를 가지는 단순한 구조를 이용한 방법으로 높은 강성을 가지는 안정된 제품을 만들기 위한 방법이었다. Fig. 5는 Fig. 4와 달리 복잡한 구조를 고려하더라도 금형 개선에 따른 재료 절감 효과와 완성품의 접근성을 위해 금형을 개선하였다. 새로운 금형은 기존 구조에 사이드 펀치를 접목한 것으로 1차 성형은 상/하 금형에 의한 수직가압 과정과 2차 성형은 사이드펀치를 이용하여 측면을 재차 가압하는 과정으로 이루어져 있다. 측면 펀치 부는 금형의 수직 이동방향과 수평 이동방향의 간섭을 고려하여 설계되었으며, 단조품의 길이방향에 있는 금형의 돌출부(protection)는 헬리콥터 블레이드와의 연결부인 원형 홀의 초기가공을 용이하게 하기 위하여 설계하였다.

3.4 개선된 금형에 의한 성형해석

사이드 펀치를 이용한 단조성형은 두 번의 성형공정을 이용하여 1차 성형은 상부금형의 수직 가압 과정이며, 2차 성형은 측면의 사이드 펀치가 소재를 재차 가압하여 성형한다. Fig. 6은 단조금형에 대한 성형공정 순서를 나타낸 것이다.

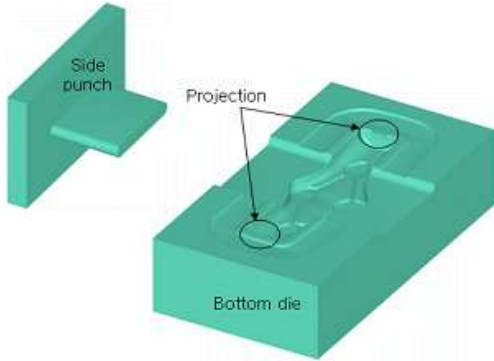
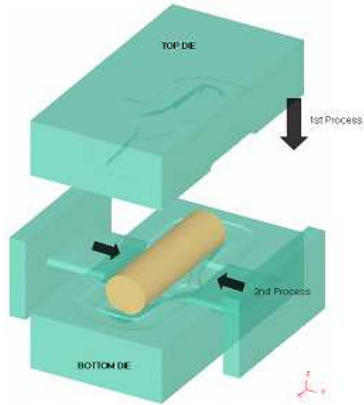
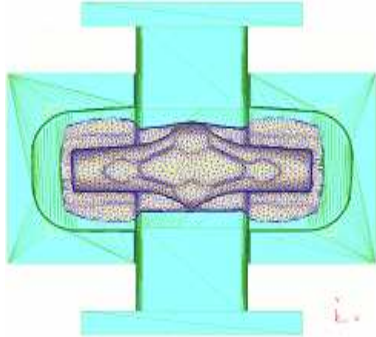


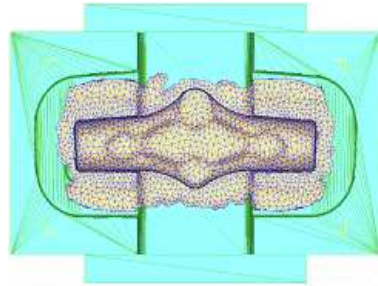
Fig. 5 Forging die with side punch for yoke forming



(a) Forging processes

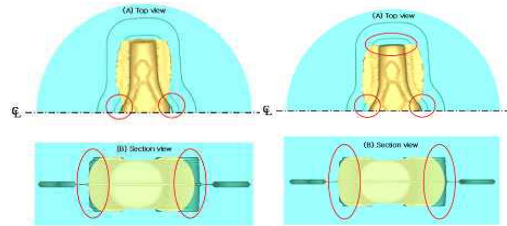


(b) 1st process



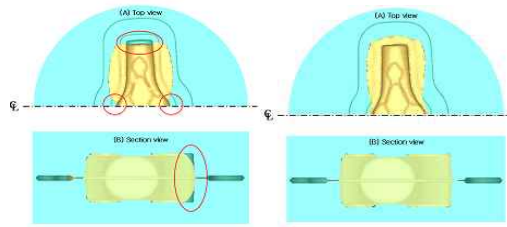
(c) 2nd process

Fig. 6 Deformation of yoke



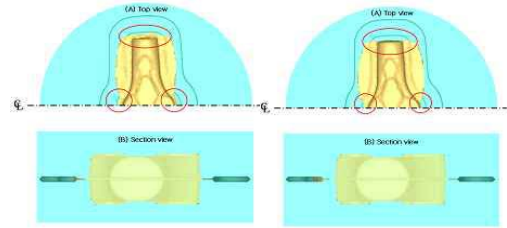
(a) $D46 \times L168$

(b) $D48 \times L154$



(c) $D50 \times L142$

(d) $D46 \times L176$



(e) $D48 \times L162$

(f) $D50 \times L149$

Fig. 7 The effects of billet dimensions in the metal flow

4. 결과 및 고찰

요크의 구조해석 결과에서 최대 등가응력 값은 64.77Mpa로 재료의 항복응력 값인 505Mpa와 비교

하여 매우 적은 값으로 제품과피에 대한 위험이 없는 것을 알 수 있다. 변형해석결과 최대 변형률은 0.0013으로 고정 핀 홀 주위에 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 고정 핀 홀에 최대 등가응력 및 최대 변형률이 발생하는 것은 응력 집중이 발생하여 나타난 것으로 본다.

빌렛의 초기 성형 없이 금형의 추가적인 해석 및 가공과 예비성형체 복잡화 대신에 단순 형상의 빌렛과 체적증대, 소량의 제품생산 목적에 부합하도록 설계를 하였다.

초기 빌렛의 체적 조건에 따른 성형해석 결과는 Table 2에 나타난 조건에 따라서 성형 해석 하였으며, 각각의 최종 성형단계에서 소재 유동상태와 미충진 상태를 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7의 (a),(b),(c) 경우, 해석에 사용된 조건은 Table 2의 Billet No. 1,2,3에 해당하여 요크의 체적 266,044mm³에 플래시 발생을 고려하여 5%의 체적을 추가한 조건이다. Billet No. 1,2,3은 모든 조건에서 성형 시 미충진이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7의 (d),(e),(f)의 경우, 해석에 사용된 조건은 Table 2의 Billet No. 4,5,6에 해당하며 플래시를 고려하여 10%의 체적을 추가한 조건이다. 해석결과 Billet No. 5,6의 조건에서 플래시부의 발생이 제품 밖에서 완전히 이루어지지 못하고 플래시가 아주 얇고 불완전한 외각을 형성하므로 성형 시 결함이 발생할 것을 예측할 수 있다. 반면에 Billet No. 4의 경우는 가장 우수한 성형상태이므로 이 조건이 가장 적합하다고 판단한다.

사이드 펀치를 가지는 개선된 단조 금형에 의한 성형 해석에서는 최종 요크 형상을 고려하여 측면 펀치가 없는 금형에서의 단조품 체적의 88.5%인 $D42 \times L170mm$ 크기의 빌렛을 사용하였다. 이때 Fig. 8은 단조품을 DEFORM-3D에서 Boolean작업 기능을 통해 제품과 플래시부로 나누어서 표시한 것이고, 성형결과 제품에 결함없이 최종 요크의 형상에 근접하게 성형이 이루어졌다.

Fig. 9의 단조성형 해석 결과 사이드 펀치를 이용하여 단조 성형한 요크는 국부넉킹발생 한계값인 손상(Damage)값과 단면 변화율에 따른 유효변형률의 전체적인 분포는 가공 시 제거될 부분인 제품의 플래시부에서만 나타난다.

이 경우 빌렛은 총체적 235,525mm³으로 측면 펀치가 없는 금형 조건에서 설계한 빌렛 $D42 \times L170mm$ 의 체적에 비례, 전체 19.5%의 소재 절감효과를 가지며, 요크 부분만을 고려하였을 때 13.1%정도 재료 절감효과를 얻을 수 있다.

Fig. 10에 나타내었듯이 1차 금형의 수직성형 공정에서 930kN이 발생하고 사이드 펀치에 의한 2차 수평 가압성형고정에서는 200kN이 발생하므로 사이드 펀치에 의한 영향은 상형 금형에 비해 작은 수준이다.

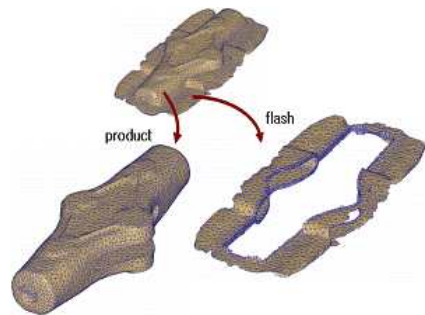
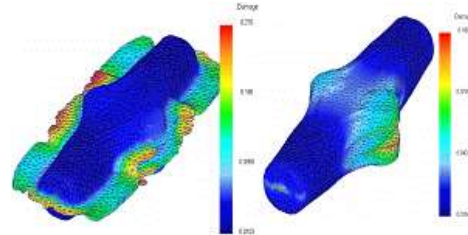
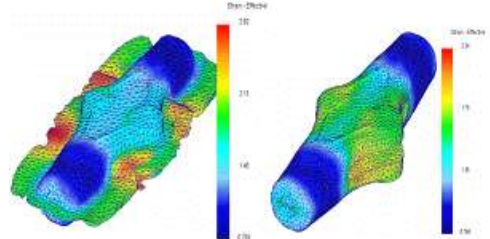


Fig. 8 Deformed material at the final process



(a) Distribution of the damage in the forging process



(b) Distribution of the effective strain in the forging process

Fig. 9 Simulated results in the dies with side punch

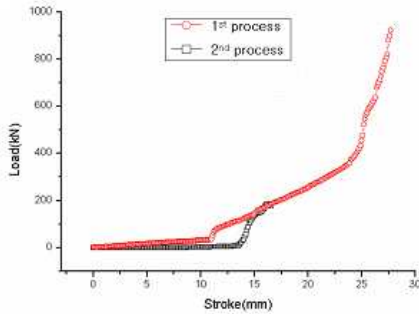


Fig. 10 Load-stroke diagram

5. 결론

무인헬기용 요크의 성능을 개선하기 위해 단조 성형 가능성 및 제품형상의 구조해석을 실시하고 단조 공정을 설계하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구조적 안정성 및 강도를 평가한 결과 최대 등가 응력값이 64.77Mpa로 재료의 항복강도 505Mpa의 약 13%에 해당하는 낮은 등가응력으로 구조적 안정성을 확인하였다.
2. 단조품의 체적 266,044mm³보다 10%많은 체적의 빌렛 중에서 D42×L176mm의 빌렛이 금형의 공동부에 재료의 유입이 완전히 이루어져 적절한 것으로 확인하였다.
3. 빌렛 D42×L170mm에서 단조성형해석 결과 국부넉킹 발생 한계값을 나타내는 손상(Damage)값은 최대 0.1, 단면 변화율에 따른 유효변형률은 최대 2.2로 전체적인 분포는 후가공 시 제거될 부분인 단조품의 플래시부에 나타남을 알 수 있다.
4. 사이드 펀치를 이용한 단조 금형에 대한 빌렛의 최적 설계로 일반적인 금형을 이용한 성형결과와 비교하였을 때 19.5%의 소재절감효과를 가져오며, 요크 부분만을 고려하였을 때 13.1%의 소재절감효과를 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- (1) C. C. Chen and S. Kobayasi, 1978, "Rigid-plastic finite element analysis offing compress, Application of Numerical Method To Forming Process", ASME, AMD.Vol.28
- (2) T. Altan, S. I. Oh and H. J. Gegal, 1983, Metal Forming : Fundamentals and Application, ASM, MetalsPark,OH44073.
- (3) S. M. Hwang , S. Kobayashi, 1986, "Preform design in disk forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 3, pp 231-243.
- (4) Yoon, J. H , Yang, D. Y., 1990, "A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using a Remeshing Technique", Int. J. Mech. Sci., Vol. 132, pp 277.
- (5) Knoeer, M., and Altan, T., 1992, "Application of the 2D Finite Element Method to Simulation of Cold-Forging Processes", J. of Material Processing Technology, Vol. 35, pp 275-302.
- (6) J. P. Tang, S. I. Oh, AFD, 1998, "An Automated Forging Design System", 16th of NAMRC, pp55-62.
- (7) D.M.C. Santos, 2005, "The development of 3D models through rapid prototyping concepts", J. of materials processing technology, Vol. 168, pp.270-272.
- (8) You-Min Huang, 2005, " CAD/CAE/CAM integration for increasing the accuracy of mask rapid prtotyping system", Computers in Industry, Vol. 56, pp. 442-456.
- (9) C. Henrard, 2005, "Comparison of FEM simulations for the incremental forming process", Advanced Materials Research, Vols.6-8, pp. 533-540.
- (10) M. Thome, 2005, "Metal flow and die filling in coining of micro structures with and without flash", Advanced Materials Research, Vols.6-8, pp. 631-638.