

무인헬기용 티타늄 합금 로터 그립의 열간성형해석

이성철*, 공재현*, 허관도#

Hot Forging Analysis of Rotor Grip with Titanium Alloy for Unmanned Helicopter

Seong-Chul Lee*, Jae-Hyun Kong*, Kwan-Do Hur#

(Received 9 March 2011; received in revised form 6 April 2011; accepted 11 April 2011)

ABSTRACT

Rotor grip is used as a component of rotor system in unmanned helicopter. Instead of usual machining, hot forging process has been considered to improve its proof stress against repeated loading conditions and crash in the farm-field. Die design and forming analysis have been performed according to the conditions such as billet volume, flash, cavity filling, and the distribution of damage during the forming by using FE analysis. In the results of analysis, the possibility of structural failure in the model has not been found because its maximum effective stress is much lower than yield strength of the titanium alloy. In the forging die design, flash has been allowed because of low production in the industrial field. Preform design was studied by using FE-analysis, and its optimal dimension was obtained in the hot forging of rotor grip with titanium alloy.

Key Words : Rotor Grip(로터 그립), Unmanned Helicopter(무인 헬리콥터), FE-analysis(유한요소해석), Preform Design(예비 성형체 설계), Hot Forging(열간 단조)

1. 서 론

항공 산업은 모든 분야의 최첨단 기술을 결집하여 이루어진 종합산업으로서, 타 산업의 기술개발을 선도할 뿐만 아니라, 이 분야에서 개발된 기술은 각 산업분야로 급속히 파급, 확산됨으로써 한 국가의 첨단 기술 확립에 크게 공헌할 수 있는 산업이다. 최근 항공기 재료에 관한 연구에서 구조재는 비행체

의 경량화에, 그리고 엔진재료는 효율성 향상에 주안점을 두고 있다^[1]. 이에 따라 구조재의 경량화를 위한 알루미늄 및 구조용 티타늄 합금의 기계적 물성 향상 연구가 주로 진행되고 있으며, 티타늄 및 티타늄 합금은 비교적 낮은 밀도와 높은 비강도 그리고 우수한 내식성을 가지고 있어 우선으로 항공·우주용 재료로서 개발되어 가장 널리 사용되어 왔다^[2]. 티타늄 합금 중에서 가장 많이 사용되고 있는 합금은 Ti-6Al-4V 합금으로, 전체 생산량의 50% 정도를 차지하고 있으며, 항공·우주 분야에 약 80%가 사용되고 있다.

본 연구에서는 티타늄 합금 중 가장 많이 사용되

* 동의대학교 대학원 기계공학과

교신저자 : 동의대학교 기계공학과

E-mail : kdhur@deu.ac.kr

는 Ti-6Al-4V 합금을 사용하여 무인헬기부품 중 하나인 로터 그립에 대한 열간 단조성형 해석을 수행하였다. 본 해석을 위해 상용 FE 해석 도구인 DEFORM을 사용하였다.

로터 그립은 블레이드를 요크와 연결하여 축을 고정시키는 역할을 하는 부품으로, 엔진으로부터 발생하는 진동과 거대한 로터의 회전에 수반되는 진동 및 피로 파괴 등을 이겨내도록 설계되어야 한다. 또한, 고 하중에 따른 부품 안전성 및 항공기로서의 특수성에 따른 고 신뢰성을 만족해야 하며, 모든 부품의 경량화가 절실히 요구된다. 따라서 최소의 중량으로 요구 성능을 만족하기 위한 강성 설계가 매우 중요하다. 하지만, 이러한 항공기 구조용 부품은 공정설계 및 금형설계의 설계지침과 경험이 많지 않으므로 해석적인 평가에 의해 제품 불량을 최소화하는 연구가 필요하다.

무인헬기가 제자리 비행 시 요구되는 필요한 조건을 구속조건으로 선택하고, 설계 모델의 안정성을 위해 기본적으로 필요한 질차인 구조 해석을 하였다. 이 로터 그립의 구조적인 평가에서는 로터 블레이드의 고속 회전에 의한 원심력과 고속 회전 시 로터 블레이드에 발생하는 양력에 의한 굽힘응력에 저항하는 허용 강도와 유효 변형률의 분포를 고려한다. 로터 그립의 열간 단조성형에서는 생산량을 고려하여 정밀금형 대신에 플라시가 발생하는 형태의 단조 금형을 구성하고, 유한요소해석을 통하여 로터 그립의 열간 성형 시에 적절한 예비 성형체를 선정하고, 금형의 온도 및 성형속도에 대한 영향을 해석하고자 한다^[3-10].

2. 로터 그립의 설계

2.1 로터 그립의 형상설계

무인헬기용 로터 그립은 2개의 같은 형상으로 한 짝으로 구성되며, 한쪽 끝은 요크와 연결되고, 또 다른 한쪽 끝은 로터 블레이드와 결합에 필요로 하는 부품이다. Fig. 1은 티타늄 합금으로 제작하기 위한 로터 그립의 형상설계로서 Fig. 1(a), (b)는 각각 제품 전면과 뒷면을 나타낸 것이고, Fig. 1(c)는 체결요소에 의해 조립된 형상을 나타낸 것이다.

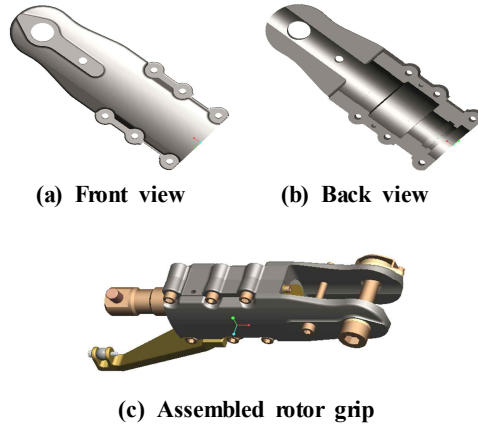


Fig. 1 Geometry of rotor grip

2.2 로터 그립 구조해석

구조해석을 위해 상용 FE 해석 도구인 ANSYS 12.0을 사용하였다. 설계된 로터 그립의 하중 조건 설정에서, 회전수는 개발 무인헬기의 제자리 비행 시 필요한 회전수가 830rpm이므로 이를 기준으로 하여 이보다 높은 회전에서도 견딜 수 있도록 1000rpm의 회전수를 설정하고, 회전 중심축은 로터 그립에서 무인 헬기에 설계된 요크의 중심까지 거리인 180mm로 설정하여 해석을 수행하였다. 로터 블레이드와 그립부가 연결되는 부분에는 블레이드가 고속 회전 시 발생하는 원심력에 의한 하중으로 11,000N을 적용하였다. 이때 고속 회전에 의해 로터 블레이드에 수직으로 작용하는 양력에 의한 하중은 588N을 구하여 적용하였다. 이와 같은 하중 조건을 Fig. 2에 나타내었다.

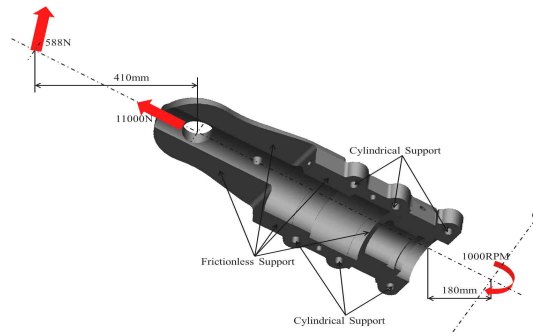


Fig. 2 Load and boundary condition for structure-analysis

설정된 조건들은 단조용 금형을 설계하기 전 최종적으로 설계된 제품의 구조적 안정성을 평가하기 위한 것으로 실제 제품에 가해지는 요인들을 해석적 조건들로 설정한 것이다.

구조해석을 위한 Ti-6Al-4V 합금의 물성치는 Table 1에 나타내었다. Table 2는 티타늄 합금 로터 그립의 구조해석 결과를 나타낸 것이다.

Table 1 Properties of Ti-6Al-4V alloy

| Properties | Range | Unit |
|-----------------------|-------|------|
| Density | 4.43 | g/cc |
| Modulus of elasticity | 113.8 | GPa |
| Poissons ratio | 0.342 | - |
| Tensile strength | 950 | MPa |
| Yield strength | 880 | MPa |

Table 2 Results of structure analysis

| | |
|-------------------------------|-------------|
| Max. equivalent stress(MPa) | 2.2424 |
| Max. equivalent strain(mm/mm) | 1.9704e-005 |
| Max. principal stress(MPa) | 1.8183 |
| Max. shear stress(MPa) | 1.2927 |
| Max. total deformation(mm) | 8.8408e-005 |
| Safety factor | >10 |

그리고 변위 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 로터 그립에서 요크와 블레이드에 필요한 커넥팅 로드용 작은 직경 부근에서 해석된 값들이 크게 분포되는 현상을 나타내고 있지만, 매우 작은 변형으로 안전한 구조임을 알 수 있다.

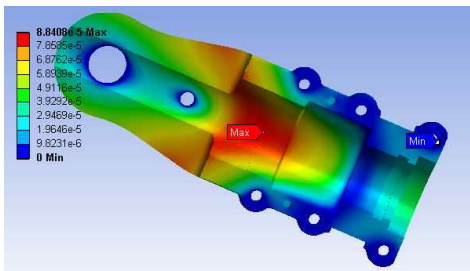


Fig. 3 Distributions of deformation in FE structure-analysis

3. 열간성형해석

3.1 금형설계

Fig. 4는 최종 형상의 로터 그립에서 드릴 구멍을 제거하고 직선면부 및 모서리 부를 부드러운 곡선 형태로 처리하여 구성한 단조용 모델이다.

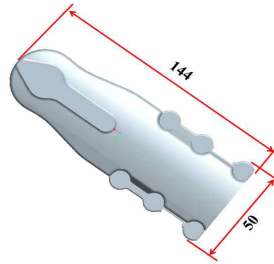


Fig. 4 Modified model for hot forging

열간 단조 공정을 이용하여 그립을 성형할 때, 소재 유동 시 미충전 방지 및 성형 편리성을 고려하였다. 이와 같은 모델을 성형하기 위한 금형이 Fig. 5이다. 금형은 Fig. 4의 모델 형상을 기준으로 역설계하고, 분할 선을 기준으로 하여 상·하 금형으로 구성하였다. 금형 내부의 직접 접촉 때문인 충격 방지 및 성형 하중을 줄이면서 원활한 충전을 유도하고, 또한 생산량을 고려하여 플래시가 발생하는 금형으로 설계하였다. 단조의 용이성과 소재의 원활한 유동을 고려하여 단조 금형은 제품의 넓은 면을 설계 기준으로 활용하였다.

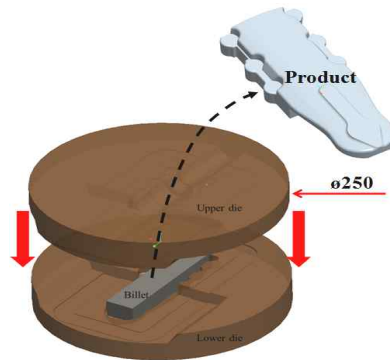


Fig. 5 Die model of rotor grip for hot forging

이처럼 구성된 열간 금형에서 로터 그립을 성형할 시에 결함이 없는 단조품이 나올 수 있는 예비 성형체 설계를 위하여 FE 해석을 실시한다. 해석에 사용된 물성치는 Table 1을 적용하였다.

3.2 사각 봉 예비 성형체에 의한 성형

Fig. 5와 같이 구성된 금형에 적합한 예비 성형체 형상 결정을 위해 우선 단면적이 일정한 사각 봉재를 선택하고, 길이, 높이 및 폭을 변수로 설정하고 다구치 직교배열표를 활용하여 나타낸 것이 Table 3이다. 이때 제조품의 총 길이를 고려하여 소재는 길이 146mm와 높이 22mm가 넘지 않도록 구성한 것이다.

Table 3 Designed variables in straight-rectangular preform

| Case | Length(L) | Height(H) | Width(W) |
|------|-----------|-----------|----------|
| | mm | mm | mm |
| 1 | 140 | 22 | 11 |
| 2 | 142 | 20 | 12 |
| 3 | 144 | 18 | 13 |
| 4 | 146 | 16 | 15 |
| 5 | 140 | 22 | 12 |
| 6 | 142 | 20 | 13 |
| 7 | 144 | 18 | 14 |
| 8 | 146 | 16 | 16 |
| 9 | 140 | 22 | 13 |
| 10 | 142 | 20 | 14 |
| 11 | 144 | 18 | 16 |
| 12 | 146 | 16 | 17 |
| 13 | 140 | 22 | 14 |
| 14 | 142 | 20 | 15 |
| 15 | 144 | 18 | 17 |
| 16 | 146 | 16 | 19 |

예비 성형체 결정을 위한 열간성형 해석 시에 조건들은 소재 온도 1,000℃, 금형 온도 700℃로 상·하 금형의 온도를 같게 적용하였다. 상형은 소재의 유동 응력을 고려하여 1mm/s의 일정한 속도로 설정하였다. 소재의 외부에는 열전달 조건을 적용하여 대기 및 금형에서 열전달이 일어나도록 설정하였다. 상형이 하형과 접촉하는 시점에서 성형 해석이 완료 되도록 하였으며, 해석 시 두 금형에서 발생하는 간

섭 오차는 최대 0.0001mm로 설정하였다.

Table 3에 의한 성형에서는 Fig. 6(a), (b)와 같이 플래시 발생이 충분히 이루어지는데도 모든 조건에서 미충전 현상이 발생하였다. 이는 로터 그립(Fig. 1 참조)의 형상을 보면 로터 블레이드를 고정시키는 부분의 두께가 로터 그립이 서로 결합하는 부분에 비해 상대적으로 얇은 것을 고려하지 않고 예비 성형체의 형상을 단면이 일정한 사각 봉의 형상으로 설정하였기 때문이라 판단된다.

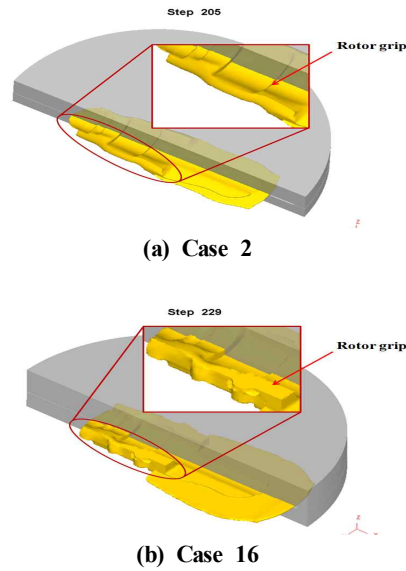


Fig. 6 Under filling phenomena in hot forging of straight-rectangular preforms

3.3 계단형의 예비 성형체에 의한 성형

앞 절에서 성형 해석한 결과, 소재의 유동이 로터 그립의 전반부 쪽에 집중이 되어 있고, 모든 조건에서 로터 그립의 결합부인 부분에 미충전이 발생하여 성형이 제대로 이루어지지 않았다. 예비 성형체의 형상을 단조품의 형상과 유사하게 그립 체결부와 로터 블레이드와 연결부의 두께를 다르게 하여 설계 변경한 모델을 Fig. 7에 나타내었다. 로터 블레이드를 고정시켜주는 부위의 두께 (H₁)는 단조품의 두께를 고려하여 14mm로 고정시켰다. 이는 앞에서 수행한 성형 해석에서 플래시의 분포가 블레이드의 체결

부에 집중적으로 발생하여 생긴 그림 체결부에 소재의 충전이 잘되게 하기 위함이다. 그림 체결부와 블레이드 고정부의 길이 비가 3.5 : 4인 것을 고려하여 소재의 길이(L_1 , L_2)를 결정하였으며, 길이 변화에 따른 체적을 고려하여 두께(H_2)를 결정하였다. Table 4는 이들 설계조건과 함께 성형해석 결과를 나타낸 것이다.

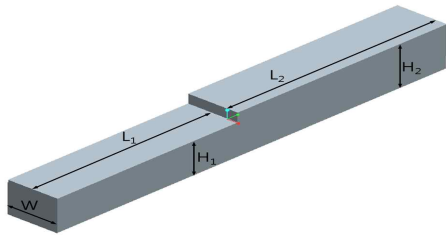


Fig. 7 Two-step model for preform

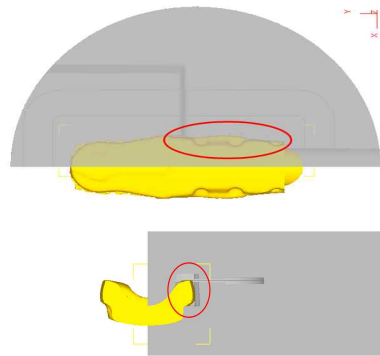
Table 4 Designed variables in two-step preform

| Case | Length | | Height | | Width (W) | Load (kN) | Under-fill (%) | |
|------|--------|-------|--------|-------|-----------|-----------|----------------|-------|
| | L_1 | L_2 | H_1 | H_2 | | | | |
| | mm | | mm | | mm | | | |
| 1 | 72 | 62 | | | 18 | 16 | 1586.2 | 16.00 |
| 2 | 73 | 63 | | | 20 | 15 | 1412.2 | 15.25 |
| 3 | 74 | 64 | | | 21 | 14 | 1127.1 | 17.62 |
| 4 | 75 | 65 | | | 24 | 13 | 1221.4 | 15.82 |
| 5 | 72 | 62 | | | 21 | 16 | 2264.7 | 7.68 |
| 6 | 73 | 63 | | | 22 | 15 | 1891.1 | 9.99 |
| 7 | 74 | 64 | | | 23 | 14 | 1644 | 12.65 |
| 8 | 75 | 65 | 14 | | 27 | 13 | 1877.4 | 9.09 |
| 9 | 72 | 62 | | 23 | 16 | 3067.6 | 3.33 | |
| 10 | 73 | 63 | | 25 | 15 | 3074.8 | 2.86 | |
| 11 | 74 | 64 | | 28 | 14 | 3642.5 | 1.40 | |
| 12 | 75 | 65 | | 29 | 13 | 2520.5 | 4.62 | |
| 13 | 72 | 62 | | 26 | 16 | 4905.4 | 0 | |
| 14 | 73 | 63 | | 27 | 15 | 4552.6 | 0.16 | |
| 15 | 74 | 64 | | 31 | 14 | 5022.8 | 0 | |
| 16 | 75 | 65 | 34 | 13 | 5202.7 | 0 | | |

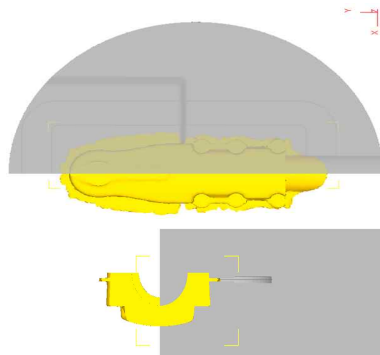
Fig. 8은 2단 예비 성형체를 이용한 성형해석 결과들의 일부를 나타낸 것으로서, Fig. 8(a), (c)에서 로터 그림이 결합되는 부분 즉, 원으로 표시된 부분에 미충전 현상이 나타난다. 그러나 Fig. 8(b), (d),

(e)에서는 미충전이 발생하지 않은 상태를 확인할 수 있다.

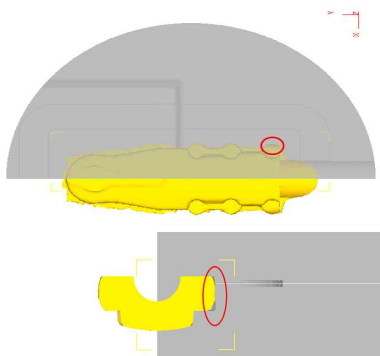
Table 4에서 미충전이 발생하지 않는 조건 중에서 하중이 가장 작은 조건은 case 13이다.



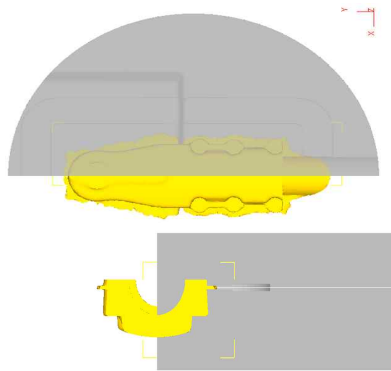
(a) Preform case 1



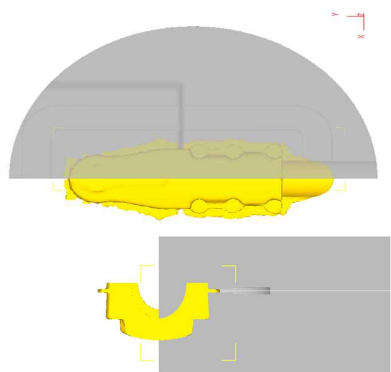
(b) Preform case 13



(c) Preform case 14



(d) Preform case 15



(e) Preform case 16

Fig. 8 Flow patterns in two-step preforms

Fig. 9는 성형 전과 성형 후의 소재 단면적 변화를 알아보기 위해 15개의 내부 단면으로 나누어 설정한 것을 나타낸 것이다. 이에 대하여 예비 성형체 조건들 중에서 13, 14, 15 및 16 경우에 대한 각각의 단면에 대한 변화율을 Fig. 10에 나타내었다. 예비 성형체 9번 단면이 성형되면서 확대가 크게 되어 가장 큰 변화율을 나타내고 있다. 그 외는 약 $\pm 30\%$ 범위 이내에서 변화함을 알 수 있다.

유한요소해석 분포 값에 의한 결과 값을 정리한 결과 미충전이 발생하지 않으며 플래시의 발생률과 유한요소해석 분포 값이 상대적으로 작은 값을 보이는 case 13을 예비 성형체 최적 조건으로 결정할 수 있다.

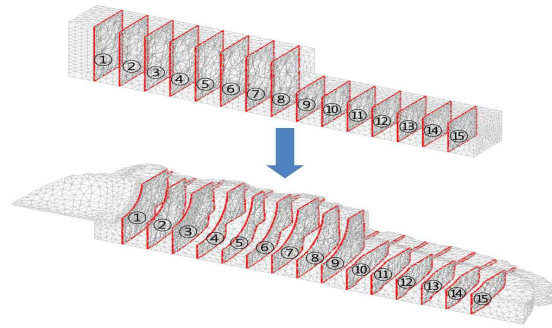


Fig. 9 Deformation of cross-sectional area

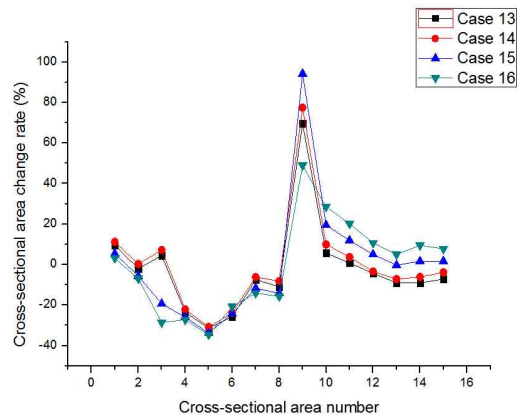


Fig. 10 Variation of cross-sectional area in two-step preforms

4. 금형온도에 따른 성형해석

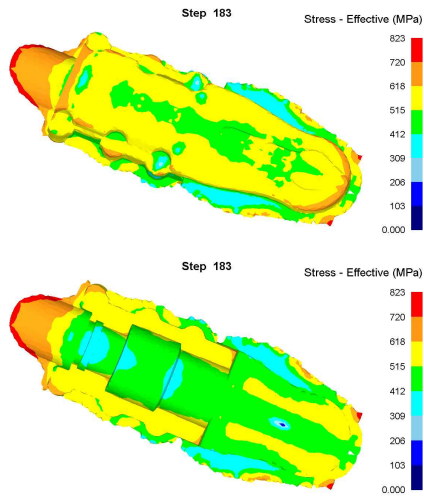
예비 성형체는 앞서 해석하여 도출된 결과 중 최적의 예비 성형체 형상으로 결정된 2단 예비 성형체 case 13을 사용하였다. 소재 온도는 $1,000^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 두고, 상·하부 금형의 온도를 300°C , 500°C , 700°C 와 800°C 로 하였을 때 해석결과를 비교한다.

Table 5 결과에서 등가 응력은 700°C 결과 대비 300°C 로 성형하였을 때는 104%, 500°C 로 성형하였을 때는 49%의 등가 응력 상승이 발생하고, 오히려 800°C 에서는 약 7% 감소결과를 보인다.

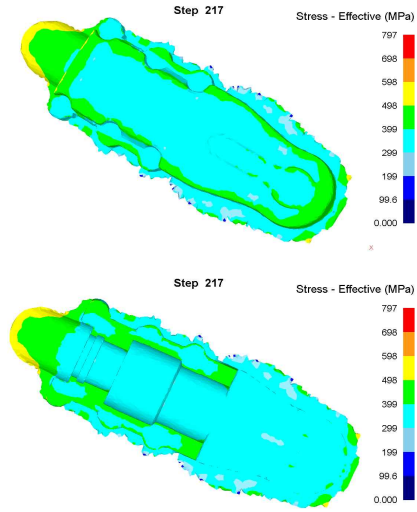
Table 5 Results of FE analysis for temperature variation of the dies

| | 300℃ | 500℃ | 700℃ | 800℃ | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Rate of waste Volume(%) | 6.90 | 6.87 | 6.90 | 4.34 | |
| Max. effective strain(mm/mm) | 11.26 | 9.33 | 8.45 | 11.11 | |
| Max. effective stress(MPa) | 768.77 | 560.81 | 375.27 | 348.53 | |
| Max. damage | 1.10 | 3.06 | 1.03 | 1.06 | |
| Temperature (℃) | Min. | 383.76 | 524.23 | 699.99 | 772.64 |
| | Max. | 919.54 | 888.34 | 938.51 | 996.42 |

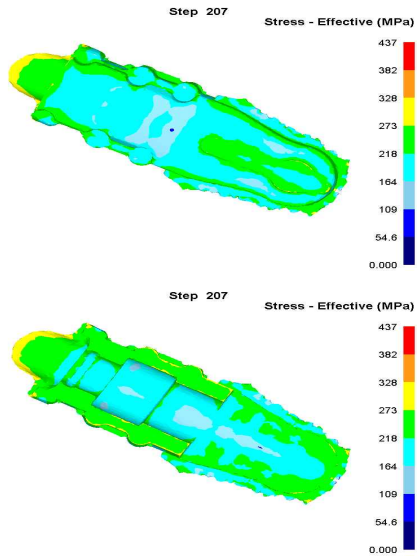
재료의 유동 중에 Crack이 발생하는 손상 값은 700℃에서 1.03으로 최소이다. 그런데 금형과 소재의 온도차이가 작아지면 소재 낭비 비율도 낮아지는 결과를 보인다. 이 결과들에서 적어도 금형 온도는 700℃ 이상으로 하는 것이 효과적임을 알 수 있다. Fig. 11은 소재온도 1,000℃ 조건에서 금형 온도 변화에 따른 열간성형 시 등가 응력 분포를 나타낸 것이다.



(a) 300℃



(b) 500℃



(c) 800℃

Fig. 11 Dependence of die temperature on the distribution of effective stresses

5. 결 론

산업용 무인헬리콥터에 사용되는 로터 그림을 티타늄 합금으로 플래시가 발생하는 금형을 사용하여 열간성형 시에 결합이 없는 성형품을 얻을 수 있는 최적의 예비 성형체를 설계하여 성형 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 플래시가 발생하는 열간 금형으로 티타늄 합금의 로터 그림을 성형하기에 적합한 예비 성형체 형상은 단면이 일정한 사각 봉재에서는 항상 미충전이 발생하여 그 적용이 불가하였고, 계단 형의 예비 성형체로 미충전이 없는 성형이 가능하였다.
2. 소재 온도 1,000℃, 금형 온도 700℃, 성형속도 1mm/s 조건에서 얻어진 최적 예비 성형체 치수는 L₁ 72mm, L₂ 62mm, H₁ 14mm, H₂ 26mm, W₁ 16mm이다.
3. 소재 온도는 일정하게 두고 금형 온도를 변화시킬 경우에, 등가 응력은 700℃ 결과 대비 300℃로 성형하였을 때는 104%, 500℃로 성형하였을 때는 49%의 등가 응력 상승이 발생하고, 800℃에서는 약 7% 감소결과를 보인다. 손상 값은 700℃에서 1.03으로 최소이다. 그런데 금형과 소재의 온도차이가 작아지면 소재 낭비 비율도 낮아지는 결과를 보인다. 이 결과들에서 적어도 금형 온도는 700℃ 이상으로 하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고문헌

1. H. W. Rosenberg, "The science, Technology and Application of Titanium," R. I. Jaffee and N. E. Promisel, Pergamon Press, New York, pp. 851, 1970.
2. R. R. Boyer, O. N. Senkov, and F. H. Froes, "Recent Titanium Developments, Synthesis of Lightweight Metals III," F. H. Froes, C. M. Ward-cose, P. G. McCormick and D. Eliezer(Eds),

- The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 21-23, 1999.
3. C. C. Chen and S. Kobayasi, "Rigid-plastic finite element analysis of forming process, Application of Numerical Method To Forming Process," ASME, AMD. Vol. 28, 1978.
4. T. Altan, S. I. Oh, and H. J. Gegal, "Metal Forming : Fundamentals and Application," ASM, MetalsPark, OH44073, 1983.
5. Hwang, S. M., S. Kobayasi, "Preform design in disk forging," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 3, pp. 231-243, 1986.
6. Yoon, J. H., Yang, D. Y., "A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using a Remeshing Technique," Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, pp. 277-291, 1990.
7. M. Knoeer, and T. Altan, "Application of the 2D Finite Element Method to Simulation of Cold-Forging Processes," J. of Material Processing Technology, Vol. 35, pp. 275-302, 1992.
8. J. P. Tang, S. I. Oh, AFD, "An Automated Forging Design System," 16th of NAMRC, pp. 55-62, 1998.
9. Santos, D. M. C., "The development of 3D models through rapid prototyping concepts," J. of Materials Processing Technology, Vol. 168, pp. 270-272, 2005.
10. M. Thome, "Metal flow and die filling in coining of micro structures with and without flash," Advanced Materials Research, Vol. 6-8, pp. 631-638, 2005.