

등속조인트 외륜 열간단조의 금형수명 향상을 위한 단조공정 유한요소해석

김용조[#]

(# 경남대학교 기계공학부)

FE Analysis of Forging Process for Improving Tool Life in Hot Forging of CV Joint Outer Race

Yohng-Jo Kim[#]

(Received 18 March 2014; received in revised form 23 April 2014; accepted 2 May 2014)

ABSTRACT

During the hot forging process, the most common cause of tool failure is wear. Tool wear results in the gradual loss of part tolerances, after which eventually the tool must be replaced or repaired. In order to maximize the lifetimes of forging tools, it is important to investigate the wear mechanisms of these tools. In this study, the hot forging of the outer race of an automotive constant-velocity joint was analyzed by a finite element method to investigate the wear distribution, especially the amount and location of the maximum expected wear damage, using Archard's wear model, which was modified considering the forging temperature. Forging analyses were carried out after modifying blocker forging tools based on established versions. The modified blocker tools resulted in an increase in the tool life up to 31% with a finisher punch.

Key Words : Hot Forging(열간단조), Wear(마멸), Archard Wear Model(아차드 마멸모델), Tool Life(금형수명), CV Joint(등속조인트), Outer Race(외륜)

1. 서 론

자동차 등속조인트(CV joint)는 외륜(Outer race), 내륜(Inner race) 및 볼(Ball) 등으로 정밀하게 결합되어 있으며 외륜의 치수정밀도는 차량의 안정성과 직결된다. 외륜은 6개의 볼 홈(Ball groove)을 가지고 있는데 부품의 특성상 아주 정밀한 치수가 요구된다. 이를 열간 단조할 때 최종 단조품의 치수오차를 최소화하는 단조공정 및 금형의 개발이

필요하다. 산업현장에서 열간단조품의 치수공차는 볼 홈과 샤프트(Shaft) 부분에서 0.5mm까지 요구하고 있다. 따라서 단조금형의 설계는 공정설계와 더불어 정교하게 이루어져야 하고, 또한 금형의 치수변화로 인한 교체시기의 결정을 예측하는 것은 생산 측면에서 매우 중요하다.

열간단조에서 금형수명을 단축시키는 주된 원인으로서는 열적 피로(Thermal fatigue), 소성변형 및 마멸 등이 있으며, 이 중에서 마멸은 금형 파손에 가장 중요한 요인으로 금형수명의 70% 이상의 영향을 미치고 있다.^[1]

금형의 수명평가에 대해서는 많은 연구자들이

[#] School of Mechanical Engineering, Kyungnam University
E-mail : yohngjo@kyungnam.ac.kr

아차드 마멸모델(Archard wear model)을 기초로 하여 마멸의 정량적 평가를 하였다.^[2,5] 최근 등속조인트의 단조해석에 관한 연구^[6,7]에서 Park^[6]은 단조품의 치수정밀도 향상을 위한 다공정 냉간단조에 대해 해석하였고, Iwama^[7]는 온간단조에서 금형수명 향상을 위한 윤활조건을 제시하였다. Lee^[8]는 트랜스미션 외륜의 온간단조 금형의 마멸에 관해 유한요소해석 하였다. 그러나 외륜의 열간단조 해석 및 금형수명을 평가한 연구는 거의 볼 수가 없으며, 산업현장에서는 시행착오적인 설계방식에 의해 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 등속조인트 외륜의 열간단조에서 금형의 수명을 향상시키는 최적 금형형상을 결정하고자 마멸모델을 기초로 하여 유한요소해석 하였다.

2. 마멸 모델

단조금형의 수명평가에는 아차드 마멸모델^[9]이 널리 적용되고 있다. 이 모델에서는 마멸계수 및 재료의 경도는 일정한 상수로 취급되지만 열간단조에서 금형은 높은 온도 환경에서 사용되기 때문에 본 연구에서는 온도 및 마멸계수를 온도의 함수로 다음과 같이 수정된 식을 사용한다.

$$Q = \frac{k(T)PL}{3H(T)} \quad (1)$$

여기서 Q 는 마멸체적(mm^3), k 는 마멸계수, P 는 접촉면의 수직압력(kg_f/mm^2), L 는 미끄럼 길이(mm), H 는 접촉면의 경도(Hv)이다. 단조 횟수 n 일 때 총 마멸량에 대해서는 식 (1)을 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$W_n = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^n \left[k(T) \frac{P}{H(T)} v_s \Delta t \right]_j \quad (2)$$

v_s 는 접촉면의 미끄럼 속도(mm/s)이다. 연삭 마멸모델(Abrasive wear model)에 의하면 경한 금형에 상대적으로 연한 소재가 미끄러지면서 금형

Table 1 Parameters for Eqs. (3) and (4)

Parameter in wear coefficient			
C_o	C_1	C_2	C_3
-0.0073	3.64E-05	-5.36E-08	2.44E-11
Parameter in hardness			
A	T_o	V	d_h
0.488754	893.6039	77.12673	480.760
			50.130

재를 연삭마멸 시키므로 마멸계수는 단조소재와 관계없이 금형재의 종류와 마찰 정도에 따라 결정된다^[10]. 온도의 함수로서 마멸계수와 경도는 실험 데이터를 문헌^[10]에서 인용하여 커브 피팅한 결과 각각 다음과 같은 식을 얻었다.

$$k(T) = C_o + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 \quad (3)$$

$$H(T) = C_h \exp\left(\frac{d_h}{T}\right) \left\{ A \tanh\left(\frac{T_o - T}{V}\right) + (1 - A) \right\} \quad (4)$$

여기서 T 는 절대온도(K)를 나타내며, 각 식에 표시한 상수는 Table 1에 나타내었다. T_o 는 연성-취성 전이온도, d_h , V , A 등은 재료에 따라 결정되는 상수들이다.

3. 금형형상의 변경

등속조인트 외륜의 열간단조공정은 빌렛의 가열, 옆셋 단조, 블로커 단조 및 피니셔 단조로 구성되어 있으며 Fig. 1과 같다. 빌렛의 가열 공정은 표시에서 생략하였다.

기존 공정 및 금형에 의해 발생하는 단조결함으로는 (1) 블로커 단조품에서 발생한 버(Burr)가 피니셔 공정 후 하우징(Housing) 끝단에서의 겹침(Folding), (2) 블로커 금형에서 소재 셋팅 자리가 단조품의 샤프트 표면에 나타나는 주름 모양의 결합(Flow mark), (3) 불 흠의 편치부에 지나친 마멸로 인한 제품의 치수불량 등이 있다(Fig. 2). 이러한 결함을 해소하고 금형의 수명을 향상시키는 금형의 최적 형상을 제시하고자 한다.

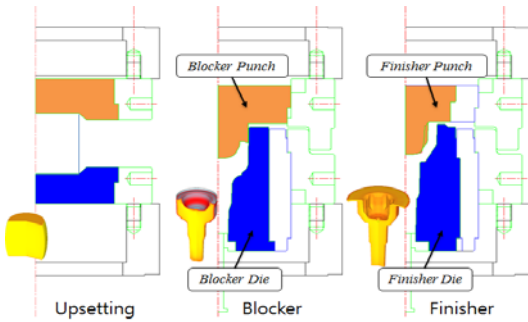


Fig. 1 Schematic of hot forging die-sets for CV joint outer race

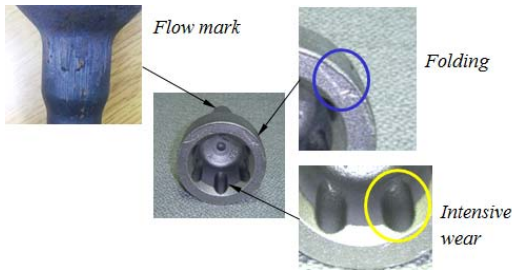


Fig. 2 Main defects from established forging process

피니셔 금형은 최종단조품의 형상을 결정하기 때문에 금형형상의 변경은 블로커 금형에서만 가능하다. 블로커 및 피니셔 공정에서 소재의 변형 유동은 전방압출부와 후방압출부로 나눌 수 있으며, 전방압출은 샤프트를 생성하고, 후방압출은 하우징에서 일어난다. 전방압출은 다이의 마멸에 큰 영향을 미치고, 후방압출은 펀치의 마멸에 직접적인 영향을 미친다. Fig. 3은 현재 산업현장에서 사용하고 있는 열간단조의 블로커 단조품의 형상과 수정된 형상을 나타낸다. 기존의 블로커 형상(Case A)은 피니셔 형상과 함께 Fig. 3(a)에 표시하였으며, 블로커 형상에서는 소재 안착의 정확성을 높이기 위해 다이측에 약간의 단(Step)이 있다. 블로커 형상의 변경을 두 가지 방향으로 시도하였는데 후방압출을 증대시키는 형상(Case B)과 전방압출을 증대시키는 형상(Case C)으로 수정하였다.

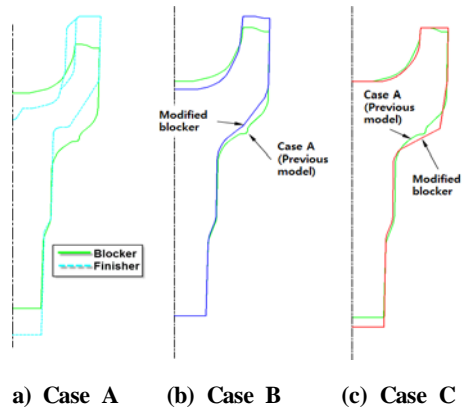


Fig. 3 Modification of blocker forging die-sets

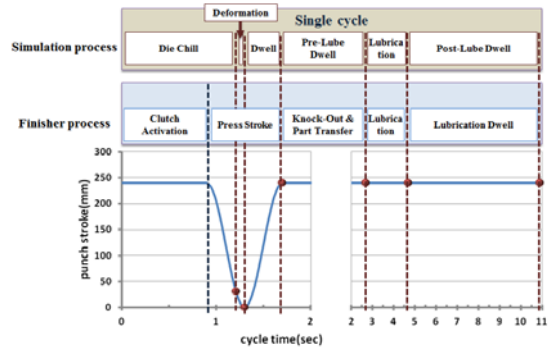


Fig. 4 Timing of finisher forging process

블로커 공정에서 생성된 샤프트의 길이가 부적절하면 피니셔 공정에서 샤프트의 미충진이 발생할 수 있기 때문에 최종단조품의 성공여부는 블로커 금형의 설계에 달려 있다. 또한 최종단조품의 치수정밀도는 금형의 교체시기, 즉 금형수명을 결정한다. 최종 단조품을 생산하는 피니셔 공정의 금형형상은 변경할 수 없으며 다만 블로커 공정의 금형형상을 변경하여 피니셔 금형의 수명을 향상시키는 금형형상을 제시한다.

유한요소해석을 위해 기존의 단조공정을 분석한 결과 전체 공정 시간은 약 11초이며, 피니셔 공정에 대한 시간 및 펀치의 행정(Stroke)을 Fig. 4에 나타내었다. 앞셋 단조 및 블로커 단조에 대한 시간 분석 결과의 표시는 생략하였다.

4. 유한요소해석

유한요소해석은 식 (2)~(4)를 기초로 하여 수행하게 되며 단조 횡수에 따른 마멸량을 구할 수 있다. DEFORM™-2D/3D를 사용하였으며 빌렛의 열해석, 앞셋 단조, 블로커 및 피니셔 단조공정에 대해 수행하였다. 단조공정해석은 단조품의 축 대칭성을 고려하여 1/6의 형상에 대해 수행하였다.

4.1 재료

빌렛은 AISI 1055이고 금형 재료는 열간 공구강 H13이다. 빌렛은 지름 60mm, 길이 107mm이고, 열 합수로서의 유효응력은 DEFORM에서 제공하고 있는 동일 재료의 것을 사용하였다. 금형 재료의 초기 경도값은 577 Hv이다.

4.2 유한요소해석 조건

빌렛과 금형의 초기온도는 각각 1200°C와 105°C로 적용하였다. 실제 금형과의 비교를 위해 단조 속도, 재료와 금형의 재질, 냉각조건 등은 단조현장의 조건과 동일하게 적용하였으며 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Conditions for FE analysis of forging processes

Initial billet (mm)		∅60×107
Workpiece initial temperature (°C)		1200
Tooling initial temperature (°C)		105
Environment temperature (°C)		20
Contact of die and billet (mm)		≤0.0001
Hardness of tool (HRC)		54
Constant shear friction		0.3
Forging press	Total stroke (mm)	240
	Ram speed (stroke/min)	48

5. 결과 및 고찰

5.1 금형 온도의 변화

피니셔 금형에서 마멸이 가장 높게 나타나는 곳은 펀치이며 Fig. 5에 표시한 바와 같이 외륜의

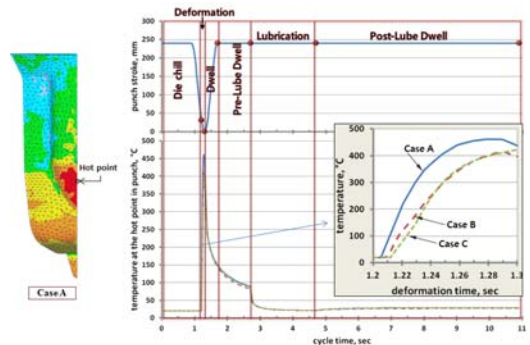


Fig. 5 Temperature at the hot point of finisher forging punch

볼 홈의 생성 시작 부분이다. 공정 중에 상승하는 온도의 경향을 살펴보면, 금형형상 Case A의 경우가 상당히 높은 온도를 보이고 있고 최대 461°C까지 상승하였다. Case B와 Case C의 경우에는 각각 414°C와 421°C로 나타났으며 Case A에 비해 상당히 낮은 온도상승을 보인다. 단조 중 온도의 상승이 낮은 것은 상대적으로 금형의 열연화(Thermal softening) 현상이 둔하다고 할 수 있으며 작은 마멸량을 기대할 수가 있다.

5.2 마멸해석 결과

최종 단조품의 품질에 직접적인 영향을 미치는 피니셔 금형의 치수 정밀도를 유지하기 위해서는 마멸량을 정확히 평가하여야 한다. 단조품의 정밀도에 영향을 미치는 인자 중에 마멸이 70% 이상을 차지하기 때문에 본 연구에서는 마멸을 중심으로 금형의 수명을 평가하였으며, 각 금형 형상에 따른 마멸량을 비교분석하였다. 유한요소해석에서 예측되는 마멸량을 Fig. 6~8에 나타내었다.

블로커 금형의 마멸에 대해서 Case A의 경우를 살펴보면 접촉면 미끄럼 속도와 접촉 압력이 높은 부위에서 발생함을 알 수 있다. Fig. 6은 Case A의 블로커 금형에 대한 1회 단조 사이클의 마멸량을 나타낸 것이다. 펀치에서는 최대 56μm, 다이에서는 268μm의 마멸량을 보이고 있는데 다이측에서 전방압출 미끄럼 속도가 펀치부에 비해 높기 때문이다. 최종 단조품의 치수정밀도는 피니셔 금형의

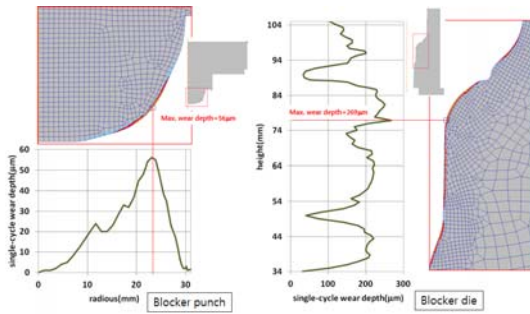
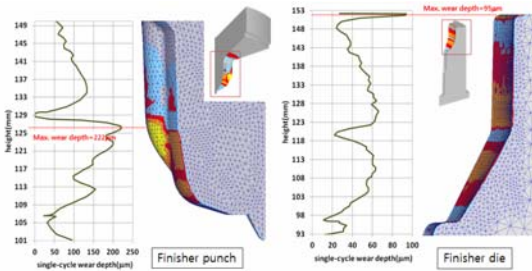
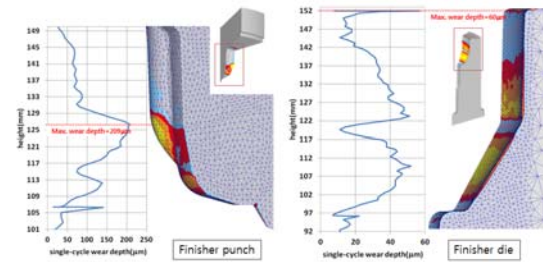


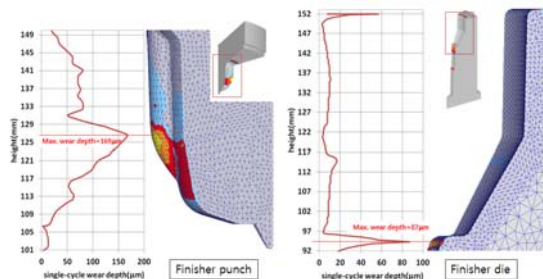
Fig. 6 Wear depth in blocker die-set (Case A)



(a) Case A

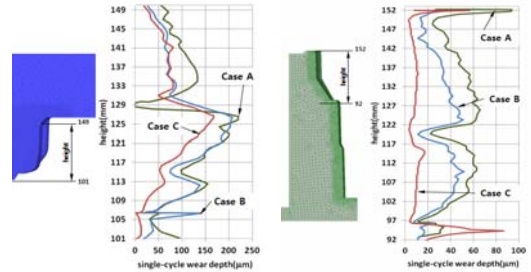


(b) Case B



(c) Case C

Fig. 7 Wear depth in finisher forging die-set



(a) Finisher punch

(b) Finisher die

Fig. 8 Comparison of wear depth in finisher die-set

정밀도에 의해 결정되기 때문에 이를 기준으로 금형의 교체시기를 정하는 것이 일반적이다. 따라서 피니셔 금형의 마멸을 정밀 분석하고 이를 기준으로 금형 수명을 평가하였다.

Fig. 7(a)는 기존(Case A)의 피니셔 금형에 대한 마멸량을 나타낸 것이다. 펀치에서 최대 $222\mu\text{m}$, 다이에서는 $95\mu\text{m}$ 로 나타났다. 그리고 Case B에 대한 피니셔 금형의 마멸량은 Fig. 7(b)에 표시하였으며 펀치에서는 $209\mu\text{m}$, 다이에서는 $60\mu\text{m}$ 의 최대 마멸량을 보이고 있다. 이는 블로커 금형의 하우징 부분에서 후방압출을 약간 높였기 때문이다. 기존의 금형 형상에 비해 개선된 점을 발견할 수 있다.

Fig. 7(c)는 Case C의 경우 피니셔 금형에 대한 마멸량을 나타낸 것이며 펀치에서 마멸량은 최대 $169\mu\text{m}$, 다이에서는 $87\mu\text{m}$ 로 나타났다. Case B에 비해 펀치의 마멸량이 작다. 이는 블로커 금형 형상을 Case B에 비해 전방압출 유동을 약간 높였기 때문이라 생각된다.

Fig. 8에는 3가지 경우의 피니셔 금형에 대한 마멸량을 함께 나타내었다. Case C의 경우가 펀치와 다이 양쪽에서 마멸량이 가장 작게 나타난 것을 확인할 수 있다. 따라서 기존의 블로커 금형 형상을 Case C와 같이 하우징의 형상보다는 샤프트의 형상을 변경함으로써 금형수명을 향상시킬 수 있는 방안을 모색할 수 있었다.

5.3 금형수명 평가

마멸모델에 기초하여 유한요소 해석한 결과를 바탕으로 금형의 수명은 치수공차 0.5mm를 기준으로 평가하였으며 Table 3과 같다.

금형의 수명 평가에서 펀치에 대해서는 Case B의 경우 기존의 금형 형상(Case A)에 비해 약 6.2%, Case C는 31.4% 향상되었다. 그리고 다이에 대해서는 각각 57.7%, 8.6%로 향상되었다. 제품의 특성상 볼 홈의 내면은 높은 정밀도가 요구되는 부분이기 때문에 펀치의 수명이 높은 것이 유리하다고 할 수 있다. 따라서 유한요소해석결과에 의하면 블로커의 형상은 Case C의 경우와 같이 블로커 금형 형상을 수정하는 것이 바람직하다.

6. 결론

본 연구에서는 등속조인트 외륜의 열간단조 금형 수명을 평가하기 위해 마멸모델을 기초하여 유한요소해석 하였으며, 기존의 금형을 중심으로 금형 수명을 향상시킬 수 있는 금형형상의 수정을 통해 수명을 평가하였다. 실제 단조에 사용된 금형의 형상 측정치와 비교한 결과, 기존의 블로커 금형의 형상에 대해 샤프트의 전방압출을 약간 증대시키고 하우징의 형상을 약간 두텁게 변경한 것(Case C)이 기존 금형형상에 비해 펀치는 31.1%, 다이는 8.6%의 수명을 향상시킬 수 있었다. 열함수로 수정된 마멸모델을 기초로 한 금형 수명 예측의 수치해석은 단조 현장에서 금형의 교체시기를 결정하는 데 매우 유용한 수치해석 기술이 될 것으로 예상된다.

Table 3 Finisher tool life (cycle)

Tool type	Case A	Case B	Case C
Punch (dimensional allowance 0.5mm)			
Simulation	2252	2392	2959
Worn punch	3000	-	4300
Die (dimensional allowance 0.5mm)			
Simulation	5285	8333	5741
Worn die	5300	-	6400
Dimensional tolerance (mm)			0.5

후기

이 논문은 2011년도 경남대학교 연구년 연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Tanaka, T., et al, "Prediction of Hot Forging Die Life Using Wear and Cooling", R&D Review of Toyota CRDL, Vol. 40, pp. 43-49, 2005.
2. Behrens, B.-A., "Finite Element Analysis of Die Wear in Hot Forging Processes", Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 305-308, 2008.
3. Choi, C., Groseclose, A., Altan, T., "Estimation of Plastic Deformation and Abrasive Wear in Warm Forging Dies", J. of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 1742-1752, 2012.
4. Abachi, S., Akkok, M., Gokler, M. I., "Wear Analysis of Hot Forging Dies", Tribology International, Vol. 43, pp. 467-473, 2010.
5. Kim, D. H., Lee, H. C., Kim, B. M., Kim, K. H., "Estimation of Die Service Life against Plastic Deformation and Wear During Hot Forging Processes", J. of Material Processing Technology, Vol. 166, pp. 372-380, 2005.
6. Park, K. S., VanTyne, C. J., Moon, Y. H., "Process Analysis of Multistage Forging by Using Finite Element Method", J. of Material Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 596-590, 2007.
7. Iwama, Y., Morimoto, Y., "Die Life and Lubrication in Warm Forging", J. of Material Processing Technology, Vol. 71, pp.43-49, 1997.
8. Lee, R. S., Jou, J. L., "Application of Numerical Simulation for Wear Analysis of Warm Forging Die", J. of Material Processing Technology, Vol. 140, pp. 43-48, 2003.
9. Archard, J. F., "Contacts and Rubbing of Flat Surfaces", J. of Applied Physics, Vol. 24, pp. 981-988, 1953.

10. Choi, C. H., "A Study on Life Estimation of a Hot Forging Die", PhD Dissertation, Kyungnam University, 2008.