

## 선박엔진용 캠의 열간 성형공정설계

염종택<sup>1, #</sup>, 김지훈<sup>1</sup>, 김정한<sup>1</sup>, 홍재근<sup>1</sup>, 이재식<sup>2</sup>

### Hot Forming Design of a CAM for Vessel Engine

J. T. Yeom, J. H. Kim, J. H. Kim, J. K. Hong, J. S. Lee

#### Abstract

The hot forming process of a CAM for vessel engine was designed by finite element (FE) simulation and experimental analysis. An aim of process design was to achieve the near-net shaped CAM forgings by hot forging process. Based on the compression test results of the low alloy steel, deformation processing map was generated using the superposition approach between the dynamic materials model (DMM) and flow stability and/or instability criteria. From the processing map, the initial heating temperature was determined as 1200°C. FE analysis was simulated to predict the formation of rolling defects and deformed shape with different forging designs. Optimum process design suggested in this work was made by comparing with the CAM for vessel engine manufactured by actual forging process.

**Key Words** : CAM, Vessel Engine, Process Design of Hot Forming, Near-Net Shape, Finite Element Simulation, Processing Map

#### 1. 서론

선박엔진용 캠(CAM)은 강한 면압 및 높은 충격 하중에 노출되어 있고, 전달마력이 크기 때문에 중량물이 필요하며, 또한, 회전수가 고속이므로 대형품임에도 불구하고 초정밀도의 가공이 요구되는 선박엔진용 핵심부품이다. 이러한 선박엔진용 캠(CAM)이 대형화됨에 따라 가격 경쟁력 측면에서 국내 제조업체는 일본과 유럽 등의 국외업체에 뒤처지고 있어, 국내에서는 수입에 의존하고 있기 때문에 기술의 종속성을 탈피함과 함께 독자적인 기술확보가 절실히 요구되고 있다. 이러한 대형 캠부품의 수입 의존도가 증가하는 직접적인 이유는 대형화에 따라 생산단가에서 원소재 가격 의존성이 높아지며, 이로 인해 개발과정에서 단조 및 열처리시 조직불균일, 균열 등 불량 발생 경우 막대한 손해를 야기할 수 있고, 정밀가공상의 어려움이 극대화되기 때문이다. 따라서, 이러

한 제조상의 문제점을 극복하기 위해서는 원소재 절감을 위한 단조 금형과 공정설계 및 개발과 함께 가공손실을 최소화할 수 있는 저비용 생산기술 즉, Near-net shape 성형기술의 개발이 시급하다.

현재, 국내에서 선박엔진용 캠을 제조하는 단조 공정은 배기캠 및 연료캠 모두 외각형상에 맞춘 금형을 이용하여 소재를 채운 후 샤프트와 연결되는 홀부분은 모두 산소절단에 의해 제거하는 방법을 이용하고 있다. 이 경우 홀부분을 산소절단하고 남은 중량만큼 소재손실이 있으며, 캠이 대형화됨에 따라 이러한 소재손실은 더욱 크게 나타나게 된다. 이러한 소재손실을 최소화하기 위해서는 단조공정후 피어싱(piercing)공정을 수행하여 샤프트와 연결되기 위한 캠의 홀부분을 직접적으로 성형함으로써 소재손실을 최소화하기 위한 공정설계가 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 열간 단조중 선박엔진용 캠소재의 성형성 평가를 통한 단조구간 선정과 함께 단조 및 피어싱 공정조건에 따른 변형과 손상분포의

1. 재료연구소, 특수합금연구그룹

2. ㈜성도

# 교신저자: 재료연구소, E-mail:yjt96@kims.re.kr

해석을 통해 최적의 공정조건 및 금형설계가 이루어졌으며, 실제 단조공정 및 피어싱공정을 통해 본 연구에서 수행된 공정 및 금형설계를 검증하였다.

## 2. 선박용 캠 소재의 고온 성형성 평가

### 2.1 고온 성형성 평가

선박엔진용 캠 소재인 Cr-Mo강에 대한 고온 성형성을 분석하고, 공정변수에 따른 미세조직적 변화를 조사하기 위하여 고온압축시험이 수행되었다. 고온 압축시험은 지름 8mm, 길이 12mm인 원통형 시편을 활용하여, 850 ~ 1250°C의 온도구간과 변형속도 0.001 ~ 10s<sup>-1</sup>에서 진변형량 0.7정도까지 압축하였다. 그림 1은 Cr-Mo강에 대한 0.1s<sup>-1</sup> 변형속도에서 얻어진 여러 온도별 응력-변형률곡선을 나타낸 것으로, 900°C의 온도조건부터 가공연화(flow softening)현상이 관찰되며, 이는 이 온도구간부터 동적재결정이 발생함을 나타내는 것이다.

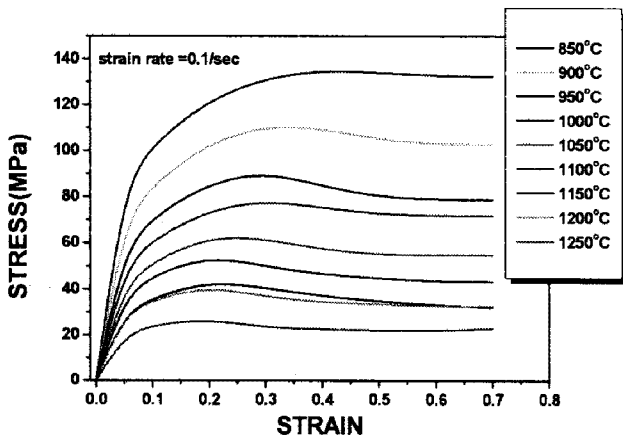


Fig. 1 Strain-stress curve at different temperatures and strain rate of 0.1s<sup>-1</sup> for Cr-Mo steel.

### 2.2 변형공정지도

Cr-Mo강의 최적 단조조건을 도출하기 위해 동적재료모델(Dynamic Materials Model)[1]을 활용한 변형공정지도가 작성되었다. 동적재료모델에서 성형조건을 결정하기 위한 기준으로 에너지 분산효율(Efficiency of dissipation,  $\eta$ )을 활용하며, 결국, 이 효율치가 높은 구간이 최적의 성형구간으로 결정되게 된다.

$$\eta = 2m / (m + 1) \quad (1)$$

본 연구에서 고온압축시험으로부터 얻어진 유동곡선과 조직관찰로부터 Cr-Mo강에 대한 변형공정지도가 완성되었고, 이러한 변형공정지도로부터 최대 에너지효율치를 나타낸 영역은 1200°C의 온도부근과 0.1s<sup>-1</sup>의 변형속도조건으로, 결국 이러한 영역이 동적 재결정에 의한 결정립 미세화가 가장 활발한 최적의 성형구간으로 평가되었다.

## 3. 선박용 캠의 열간 단조공정 설계

### 3.1 선박용 캠의 하부 금형설계

그림 2는 본 연구에서의 금형 및 공정설계를 목표로 하는 배기캠의 형상을 나타낸 것으로, 배기캠과 샤프트가 연결되는 홀의 직경은  $\phi 200$ mm이다.

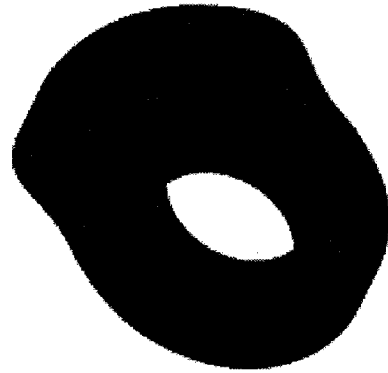


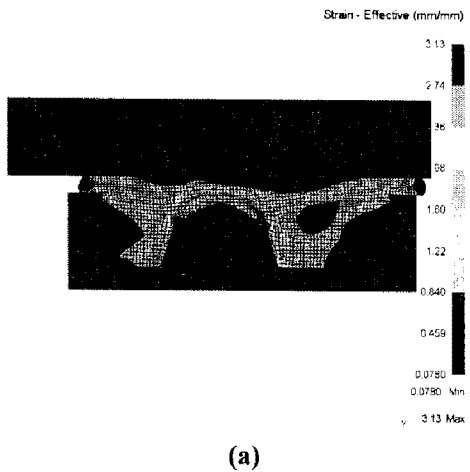
Fig. 2 Schematic illustration of exhaust CAM for vessel engine

기존에 선박엔진용 캠의 단조는 외각형상을 고려한 금형을 이용하여 초기 원통형 빌렛을 연속 단조로 채운 후 샤프트와 연결되는 홀부분은 산소절단에 의해 제거하는 방법을 이용하였다. 이 경우 홀부분이 모두 제거되어야 하기 때문에 상당한 소재손실을 가지게 된다. 이러한 기존 공정을 개선하기 위하여 배기캠의 홀을 함께 단조하기 위한 방법론을 제시하고자 하였다. 가장 먼저 시도된 방법으로, 하부금형에 펀치형태의 분리형 금형을 준비한 후 기존 단조공정과 동일하게 형상 금형에 소재를 채우는 공정을 수행하고, 그 후 피어싱공정을 거쳐 홀부분을 형성시키는 공정으로 배기캠의 Near-net shape공정을 수행하고자 하였다. 그림 3은 1차 설계방안을 기초로, 유한요소 해석을 수행한후 최종단계에서 얻어진 변형량과 손상분포를 나타낸 것이다. 이때 유한요소해석은 배기캠의 옆면을 기준으로 평면변형(plane strain)조

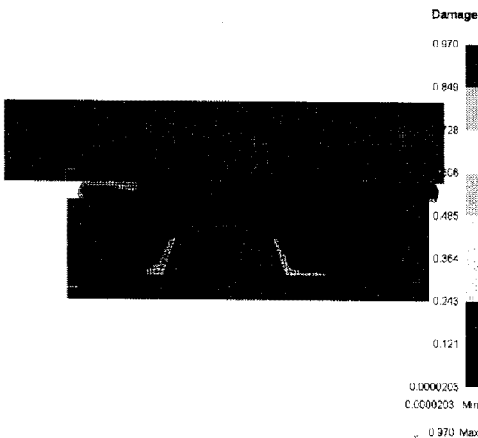
건으로 해석하였고, 손상을 계산하기 위해서 수정 Cockcroft-Latham 기준[2]이 활용되었다.

$$D_{crit} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_{max}$ 는 최대 주응력이며,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형량,  $\bar{\epsilon}_f$ 는 유효 파괴변형량을 나타낸다.



(a)



(b)

Fig. 3 Simulation results of the first process design for exhaust CAM; (a) Strain and (b) damage distributions

유한요소해석결과에서 알 수 있는 바와 같이 하부금형에 펀치형태의 분리형 금형과 함께 성형을 수행한 결과, 과도한 변형이 하부 펀치 모서리 부위에서 나타나며, 이 부위의 손상은 거의 1에 가까운 것으로 해석되었다. 이러한 결과는 결국

이 부위에서 접힘(fold)이나 균열 등의 결함이 발생할 수 있는 가능성이 높다는 것을 의미한다. 따라서, 이러한 국부적인 부위의 결함발생 및 비대칭형상에서 초래되는 문제점을 극복하기 위한 방법으로 하부금형에 펀치가 포함되지 않은 금형설계가 수행되었다. 그림 4는 1차 선박엔진용 캠의 성형공정설계를 수정·보완한 것으로, 피어싱공정에서 구속이 있는 경우와 없는 경우에 대한 공정설계 및 해석이 함께 수행되었다. 공정해석시 소재의 가열온도는 1200°C, 금형온도는 150°C로 가정하여 해석하였다.

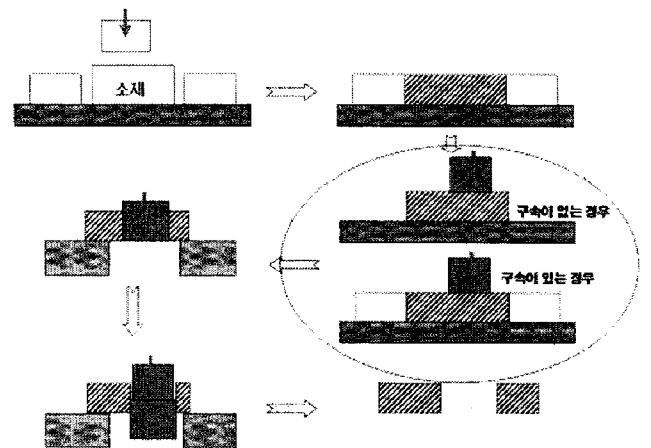


Fig. 4 Improved process design for exhaust CAM

배기캠의 1단계공정인 하부금형에 빌렛을 채우는 단조공정시 변형량과 손상분포의 해석 결과를 살펴보면, 단조가 이루어지는 초기에는 500톤이하의 하중이 걸리는 것으로 해석되었고, 다만, 플래시가 형성되어 단조가 계속되는 순간에 3,000톤 이상의 하중이 형성되는 것으로 해석되었다. 또한, 변형량분포의 해석결과는 일부 표면에 플래시가 형성되는 부분을 제외하고, 변형량분포(최대변형량: ~2.0)가 균일함을 알 수 있었고, 플래시부분을 제외한 거의 대부분의 영역이 0.1정도의 낮은 손상분포를 나타내었다. 결국, 이러한 결과는 수정된 성형공정설계안의 1단계 단조공정에서 큰 문제없이 성형이 가능한 것을 의미한다.

### 3.2 선박용 캠의 피어싱공정설계

선박용 캠의 피어싱공정은 과거에 수행된 열간 단조방법에서 추가적으로 수행되는 공정으로, 피어싱시 하부금형의 구속이 있는 경우(Case I)와 없는 경우, 그리고 구속이 없는 경우에 피어싱공정시 하부 바닥부분이 막혀있는 경우(case II)와 개방

된 경우(case III)에 대한 해석이 수행되었다.

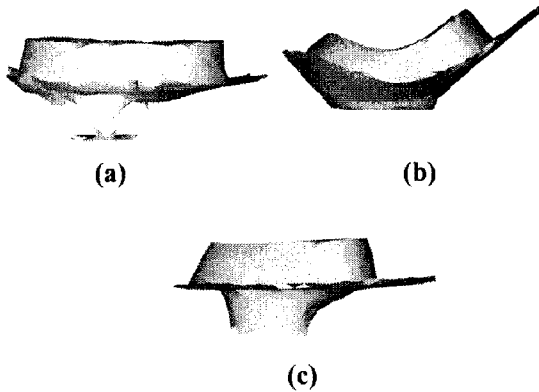


Fig. 5 Deformed shapes obtained at different process designs; (a) case I, (b) case II and (c) case III.

그림 5는 피어싱공정의 각 조건별(case I, case II, case III)로 해석된 최종성형을 나타낸 것이다. 하부금형의 구속이 있는 상태에서 피어싱공정을 수행한 경우(Fig. 5(a))와 구속이 없는 경우에서 하부 바닥부분이 개방된 경우(Fig. 5(c))는 소재의 굽힘(bending)현상이 심하지 않은 반면, 하부금형의 구속이 없으면서 하부 바닥부분이 막혀있는 경우(Fig. 5(b))는 소재의 굽힘변형이 상당히 크게 형성되는 것을 알 수 있다. 그러나, case I의 경우 피어싱공정에서 약 2,000톤이상의 하중이 요구되는 것으로 해석되었고, 반면 case III의 경우 피어싱공정시 약 400톤정도의 하중이 요구되는 것으로 해석되었다. 따라서, 하중최소화 및 균일변형측면에서 case III가 최적의 피어싱공정조건인 것으로 판단된다.

### 3.3 FE 공정설계의 검증

본 연구에서 제안된 선박엔진용 캠의 Near-net shape 열간성형공정설계의 검증을 위하여 실제 선박엔진용 캠의 열간성형이 수행되었다. 열간성형에 활용된 프레스는 500톤 유압프레스를 활용하였고, 소재가열온도는 약 1200°C로 앞서 언급된 공정설계 방안에서 열간단조 및 피어싱공정이 수행되었다. 그림 6은 실제 성형된 배기캠과 해석으로부터 얻어진 형상을 비교한 것이다. 실제 성형된 배기캠의 외관 및 조직을 관찰한 결과 성형결함이 없는 건전한 성형품임을 확인할 수 있었

고, 결국 본 연구에서의 선박엔진용 캠의 열간 성형 및 피어싱공정설계가 성공적으로 이루어진 것으로 판단되었다.

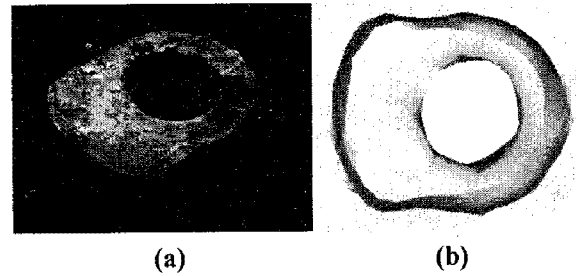


Fig. 6 Comparison of (a) the actual exhaust CAM and FE simulation results

## 4. 결론

본 연구에서는 선박엔진용 배기캠에 대한 Near-net shape 열간성형공정설계를 수행하였으며, 여러 설계방안에 따른 유한요소해석을 적용한 결과, 하부쪽에 펀치가 포함되지 않은 금형을 활용하여 소재를 금형에 채우는 단조공정후 하부금형의 구속이 없이, 하부바닥부분을 개방하여 피어싱할 경우가 하중 및 변형측면에서 최적의 공정설계인 것으로 해석되었으며, 최적 공정설계 방안에서 따라 실제 배기캠 열간성형을 수행한 결과, 건전한 성형품을 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지역산업기술개발사업(지식경제부)의 일환으로 수행되었으며 (과제번호:70002966), 연구비지원에 감사드립니다. 또한, 열간성형공정에 도움을 주신 ㈜BIM 관계자분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Y. V. R. K. Prasad and T. Seshacharyulu, 1998, Modelling of hot deformation for microstructural control, Int. Mater. Rev., Vol. 43, No. 6, pp. 243-258..
- [2] C. M. Sellars, W. J. McG Tegart, 1972, Hot workability, Int. Metall. Rev., Vol. 17, pp. 1-24.