

선박 중형엔진용 일체형 Crankshaft 단조장치에 관한 연구

박승희* · 윤성만* · 신상엽* · 박래원** · 박종국** · 이응기** · 김대두**

(1998년 11월 23일 접수)

A Study of Forging Equipment for One Body Crankshaft of Medium Sized Marine Engine

S.H.Park, S.M.Yoon, S.Y.Synn, L.W.Park, J.K.Park, E.G.Lee and T.D.Kim

Abstract

The purpose of this research is for the development of a new type forging equipment, H.C.G. (Hyundai Continuous Grain-Flow), by using two virtual build-up tools, rigid viscoplastic FEM and downsized plasticine experiment. This forging equipment consists of consecutive horizontal and vertical pressure while the traditional forging method consists of only vertical pressure. Therefore, high quality crankshafts can be forged with this method as it can maintain a continuous grain flow. The factors considered in the development of equipment are die geometry for flawless deformed shape, die reaction forces, stress/strain distributions and continuous material flow. We carried out several numerical simulations and downsized plasticine experiments for the proper design of the forging equipment. The validity of those simulation results is confirmed by checking with the actual test results. Based on these simulation results, the proper design of the H.C.G. forging equipment is enabled.

Key Words : Crankshaft, Offsetting, Upsetting, Stress, Finite Element Method, Continuous Grain Flow, Plasticine

1. 서 론

선박 및 발전기용 디젤엔진의 크랭크샤프트(Crankshaft)는 실린더의 가스 폭발력과 관성력을 반복적으로 받으며 고속회전을 하기 때문에 높은 응력과 진동을 받는 중요한 핵심부품이다. 크랭크샤프트는 저어널(Journal), 웹(Web), 핀(Pin), 플랜지(Flange)의 4개 부분으로 구성되어 있으며, 일부 주조공법으로 제작되는 것을 제외하

고는 단조공법으로 제작되는 것이 대다수이므로, 최근에는 크랭크샤프트의 물리적 및 기계적 성질을 향상시키기 위한 단조공법의 개발이 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 크랭크샤프트의 제작에 이용되고 있는 대표적인 단조공법에는 자유단조(Open die forging)공법과, 기존에 존재하는 프레스(Press)에 특수장치를 장착하여 연속입자흐름(C.G.F. : Continuous Grain Flow)을 갖도록 하여 크랭크샤프트의 특성을 향상시킨 RR이나 T.Rut 단조공

* 현대중공업(주) 기술개발본부 마부리연구소
** 현대중공업(주) 엔진사업본부 생산기술부

법등의 형단조(Closed die forging)공법이 있다.^(1~4) 수요의 측면에서 점차 요구되어지는 크랭크샤프트의 형태가 다양해지고 있기 때문에 단조기술의 측면에서도 여러 종류의 크랭크샤프트를 단조할 수 있는 새로운 단조장치의 기술 개발이 절실히 요구되고 있다. 그중에서도 선박 중형 엔진용 일체형 크랭크샤프트의 경우는 단조장치 및 전용 장비의 부재로 인하여 국내에서는 생산되지 못한 제품이다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 선박 중형엔진용 일체형 크랭크샤프트를 생산하기 위해서 초기 투자비를 최소화하면서도 프레스에서의 탈착이 용이하고, 소재를 한번 가열하여 연속적으로 단조할 수 있는 H.C.G.(Hyundai Continuous Grain-Flow) 단조장치 개발을 목적으로 수행된 내용들에 대하여 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 H.C.G. 단조장치의 원리

H.C.G. 단조장치의 원리는 Fig.1과 같은 전체적인 단조장치의 모습으로 설명될 수 있다. H.C.G. 단조장치는 두가지의 연속공정으로 크랭크 스톱(Crank throw)를 단조하게 구성 되어있다.

첫번째 단조공정은 수평 단조공정으로 가열된 소재를 H.C.G. 단조장치의 측면 고정부(Side support)에 고정시킨 후 프레스의 수직힘을 이용하여 상부 금형(Upper

press die)을 수직방향으로 이동시킴으로써 옆면이 기울어져 있는 측면 금형(Side press die)이 수평방향으로 이동됨에 따라 소재를 업셋팅(Upsetting)함으로써 원형의 소재를 타원형의 형태로 단조하게 된다.

두번째 단조공정은 크랭크 스톱의 형상을 단조하는 것으로 위의 수평단조가 이루어진 상태에서 연속적으로 핀 형성용 금형(Divider die)을 상부 금형(Upper press die)에 부착하여 프레스의 수직방향으로의 힘을 이용 오프셋팅(Offsetting)함으로써 크랭크 스톱을 형단조하는 과정으로 되어 있다. 이러한 단조공정을 반복 수행하여 여러개의 크랭크 스톱으로 형성된 하나의 크랭크샤프트를 제작할 수 있게 된다.

2.2 H.C.G. 단조장치의 특징

종래부터 사용되어 온 자유단조 방법에 의한 선박 중형 엔진용 크랭크샤프트의 제작공정은 다음과 같다. 먼저 슬래브(Slab)를 가열하여 자유단조로 일정 반경을 갖는 둥근형태의 크랭크 스톱으로 단조 한다. 냉각후 예비 가공 공정(Pre-machining)을 거쳐 개개의 둥근형태의 크랭크 스톱을 재가열 한 후 트위스트(Twist)하여 번갈아가며 기계가공함으로써 최종형태의 크랭크샤프트를 완성하게 된다.

따라서, 재료손실과 기계가공에 따른 비용상승을 초래하게 되며, 크랭크샤프트의 최종 형상이 기계가공으로 성형되기 때문에 핀과 저어널 및 웹을 따라 연속입자흐름이 형성되지 않아 크랭크샤프트의 중요한 특징인 피로강도가 매우 약하게 된다. 아래의 표 1은 여러 가지의 단조장치에 대한 특징과 H.C.G. 단조장치와의 특징을 비교한 것이다.

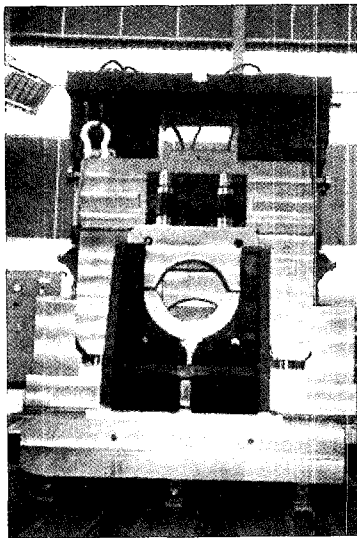


Fig. 1 H.C.G. forging equipment

Table 1 Characteristics of forging equipment

Forging Method	Quality				Operation Efficiency	Adopting Country
	Metal Flow	Fillet	Fatigue Strength	Dimension Precision		
Free Forging	△	△	△	△	○	Japan
RR Forging	◎	◎	◎	◎	△	France/ Japan
TR Forging	◎	◎	◎	◎	△	Germany/ Japan/U.S.A./ Korea
H.C.G. Forging	◎	◎	◎	◎	◎	Korea (H.H.I. Corp.)

notes) ◎ : good, ○ : normal, △ : bad

2.3 모사실험

2.3.1 개요

여러개의 크랭크 스톱으로 구성된 선박 중형엔진용 일체형 크랭크샤프트 단조품을 제작하기 위한 단조작업은 전체 단조공정에서 가장 중요한 작업이다. 이에 대한 타당성을 분석하기 위해서 상온에서 고온의 강과 유사한 물리적 성질을 갖는 플라스틱인(Plasticine)을 이용하여 소재를 축소하여 제작하고, 축소 제작한 목형을 이용하여 단조작업을 수행하였다.⁽⁶⁾ Fig.2는 축소된 목형들의 전체적인 모습을 나타낸 것으로 단조장치는 크게 상부와 하부로 구성하였다.

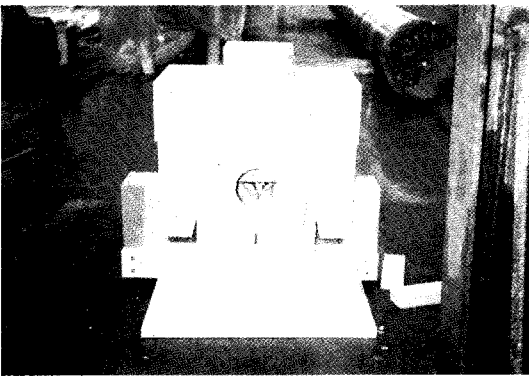


Fig. 2 Plasticine mock-up equipment

2.3.2 실험 내용

크랭크 스톱의 모사실험은 H.C.G. 단조장치를 이용한 크랭크 스톱 단조공정에 대한 타당성을 확인하여 금

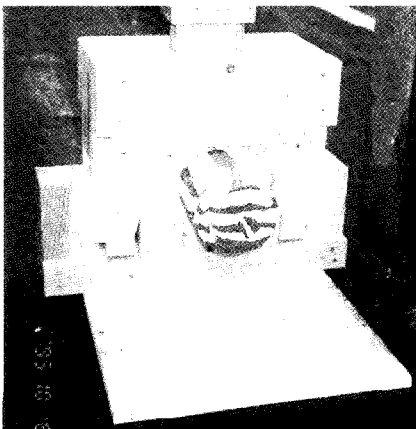


Fig. 3 Operation of plasticine mock-up equipment

형의 형상 설계에 반영하기 위해서 수행하였다.

Fig.3은 상부금형을 아래로 이동시키면서 측면 금형을 수평이동시켜 소재의 원형부분을 타원형의 형태로 단조작업을 실시한 후, 핀 성형용 금형을 이용하여 수직방향으로 소재의 중심부위를 단조함으로써 크랭크 스톱의 핀(Pin) 부위를 형성하는 작업을 나타낸 것이다. Fig.4는 위와 같은 단조공정을 통하여 얻은 첫 번째 크랭크 스톱의 단조된 모습을 나타낸 것이다.

Fig.5는 연속 단조하여 얻은 크랭크샤프트의 모습을 전체적으로 나타낸 것이다.

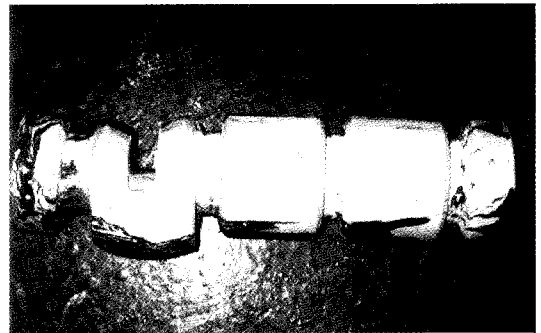


Fig. 4 The completion of forging 1st Crank Throw

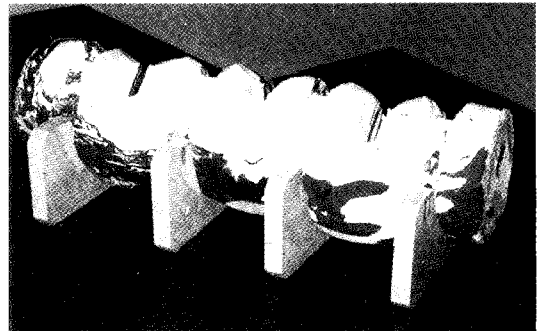


Fig. 5 The final forge pattern

2.3.3 결과 및 고찰

플라스틱인과 목형을 이용한 모사실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

크랭크 스톱의 단조작업시 소재에 압축(Compression)력과 굽힘(Bending)력이 강하게 작용하여 형상이 매우 급격하게 변화됨으로 인하여 길이방향으로의 연신량이 크게 발생할 가능성이 있다는 것을 예측할 수 있었다.

모사실험을 통하여 크랭크 스톱이 단조되는 부위에서

압축(Compression)력과 굽힘(Bending)력이 큰 값을 갖게되어, 연속적인 크랭크 스톱 단조시 소재 전체가 길이 방향으로 휘어지는 현상이 발생할 가능성을 예측할 수 있었다.

모사실험을 통하여 H.C.G. 단조장치를 이용한 크랭크 스톱의 단조공정에서는 크랭크 스톱의 체적과 H.C.G. 단조장치안의 금형들 사이의 체적이 같아질 수 있게 형상을 설계함으로써 소재의 저어닐(Journal) 부위에서 나타나는 길이방향의 연신량을 줄일 수 있음을 예측할 수 있었다.

2.4 유한요소해석 기법을 이용한 이론해석

2.4.1 개요

유한요소해석 기법을 이용한 이론해석은 미국의 S.F.T.C(社)가 개발한 소성가공 전용 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 DEFORM S/W를 이용하였다.⁽⁷⁾ H.C.G. 단조장치의 단조용 금형의 적합성 및 단조시 소재의 변화들에 대한 여러 가지 이론적인 해석을 수행하였다.

2.4.2 DEFORM S/W의 적용 이론식

DEFORM S/W는 다음과 같은 강점소성식을 사용하고 있다.

$$\text{평형 방정식 : } \sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{적합 방정식 : } \dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \dot{\epsilon}_v &= u_{i,i} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{구성 방정식 : } \sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{경계조건 : } \sigma'_{ij}n_i &= F_j \quad \text{on } S_F \\ u_i &= U_i \quad \text{on } S_U \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 σ_{ij} 와 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 각각 변형재료의 응력과 변형률 속도를 나타내고 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 재료의 유효응력과 유효 변형률 속도를 나타내고 있는데 각각 $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})}$

와 $\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})}$ 로 정의되며, F_j 는 재료의 경계면에 걸리는 힘을, U_i 는 경계에서의 변형속도를 나타내고 있다.

(1) ~ (4)식에 변분법을 적용하여 다음과 같은 약형

(Weak form)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_V \left(\frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \right) \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV \\ - \int_{S_F} t_i \delta u_i dS = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

V 와 S 는 각각 체적과 표면적을 나타내고, K 는 페널티 상수를 나타낸다.

DEFORM S/W에서 사용하는 접촉조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[v] \cdot n = 0, \quad [t] = 0 \quad (6)$$

여기서 v 와 t 는 속도와 트렉션 벡터이며 n 은 접촉면에 수직인 단위벡터이다. 접선방향의 트렉션은 마찰법칙을 만족하여야 한다.

(6)식을 변분법으로 나타내면

$$\int_S K_i \Delta v_n \delta \Delta v_n dS + \int_S t_s \delta \Delta v_s dS = 0 \quad (7)$$

여기서 Δv_n 은 수직방향으로 들어가는 속도이고, Δv_s 는 접선방향으로 미끄러지는 속도이며 t_s 는 마찰응력이다.

2.4.3 해석 방법

H.C.G. 단조장치는 대칭으로 구성되어 있으므로 전체의 1/4만을 해석대상으로 하였다. 소재는 일반 탄소강인 AISI 1045강으로 하였으며, 변형률 속도는 0.1~100, 변형률은 0.1, 온도 1100℃에서의 고온 유효응력은 $\bar{\sigma} = 93.015 \bar{\epsilon}^{0.125}$ MPa로 가정하였다.

소재는 소성체(Plastic)로, 금형은 강체(Rigid)로 가정하였다. 오프셋팅(Offsetting) 단조공정에 대한 이론 해석은 핀 형성용 금형이 측면 금형의 가운데로 수직 하강하면서 크랭크 스톱의 편부위를 형성하는 전체 공정을 100 단계로 나누고, 핀 형성용 금형의 하강 속도를 10 mm/sec로 설정함으로써 실제 작업조건과 유사하게 하였다.

2.4.3 결과 및 고찰

실제 단조작업 공정을 모델링한 오프셋팅(Offsetting) 단조공정을 3차원 이론 해석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig.5는 3차원 이론해석을 위해서 전체의 1/4 초기 모델 형태를 나타낸 것이다.

Fig.6~Fig.8은 오프셋팅(Offsetting) 단조공정에 따른 소재의 최대 주응력, 변형률 분포, 변형률속도 분포의 변화 양상을 여러각도에서 분석한 결과를 나타낸 것이다.

이상의 크랭크 스로우 핀부위 성형공정인 오프셋팅(Offsetting) 단조공정을 이론해석하여 소재가 핀 형성용 금형에 의해서 변형될때의 전체적인 경향을 파악할 수 있었고, 모사실험의 결과와도 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

특히, 오프셋팅(Offsetting) 단조 공정이 진행됨에 따라서 핀 형성용 금형과 소재의 접촉부위, 하부금형에 접촉된 소재의 부위에 압축응력 및 변형률이 크게 발생됨을 알 수 있었다.

그러나, 변형률 속도 분포는 단조 초기에는 핀 형성용 금형과의 소재의 접촉부위에서 크게 발생되며, 단조가 진행됨에 따라서 소재가 하부의 금형에 접촉되어 변형률 속도가 감소되었음을 알 수 있었다. 이상의 결과로부터 고온의 소재가 단조공정중에 금형 내부에서 어떻게 변화하는 지에 대해서 예측할 수 있었을 뿐만아니라, 금형 내부에서 소재의 변형 상태를 분석함으로써 소재의 체적에 대한 적합성도 예측할 수 있었다.

따라서, H.C.G. 단조공정에서 가장 중요한 크랭크 스로우를 단조하는 공정을 이론적으로 검증함으로써 단조공정에 대한 타당성을 분석할 수 있었다.

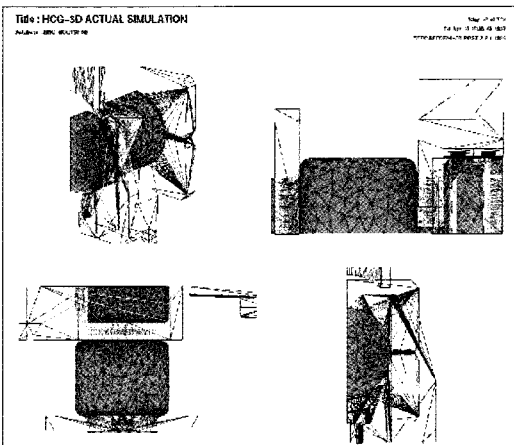
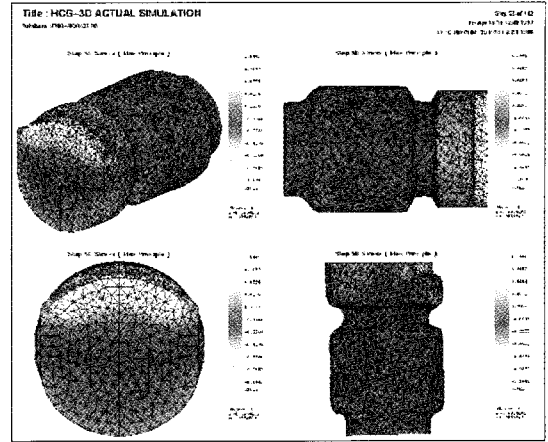
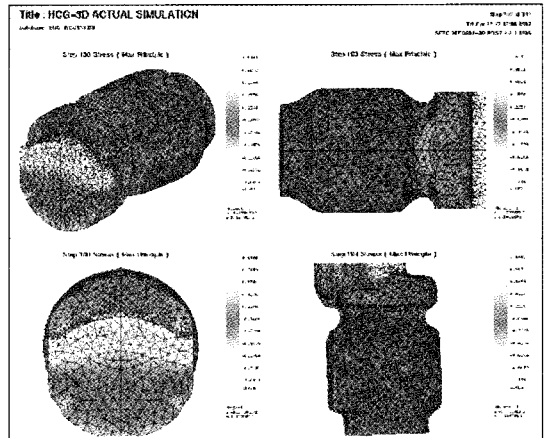


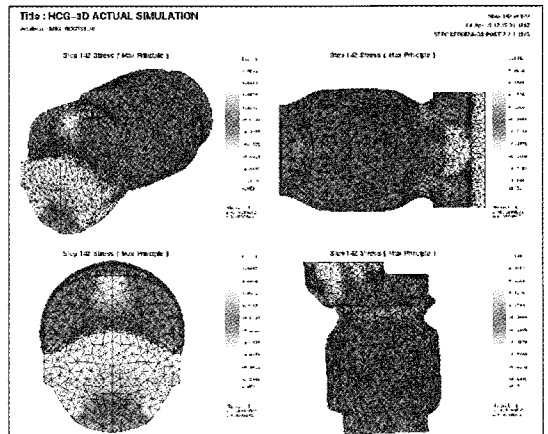
Fig. 5 Quarter section model



(a) 1 step

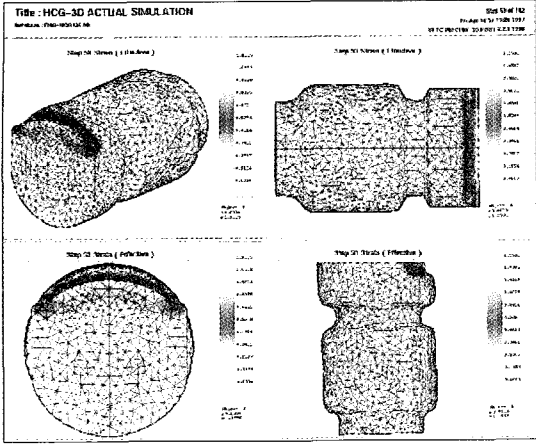


(b) 2 step

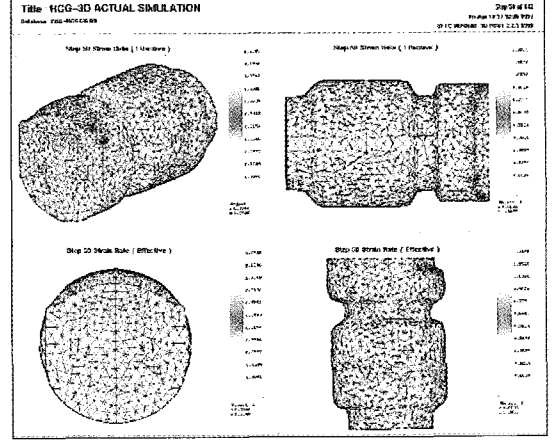


(c) 3 step

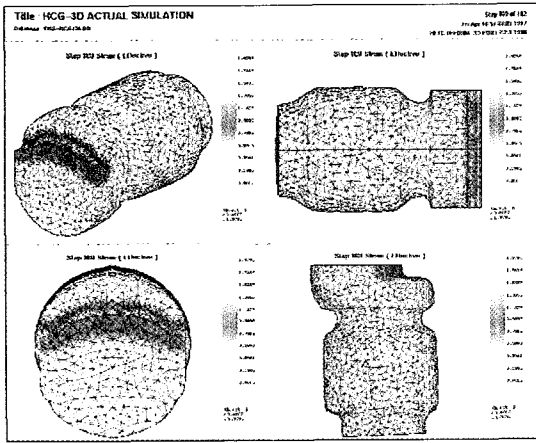
Fig. 6 Predicted maximum principal stress distributions



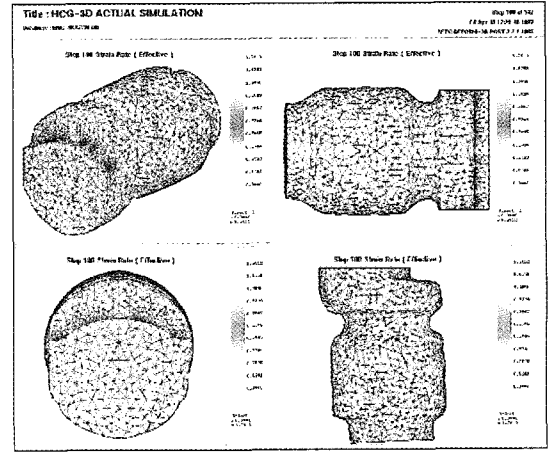
(a) 1 step



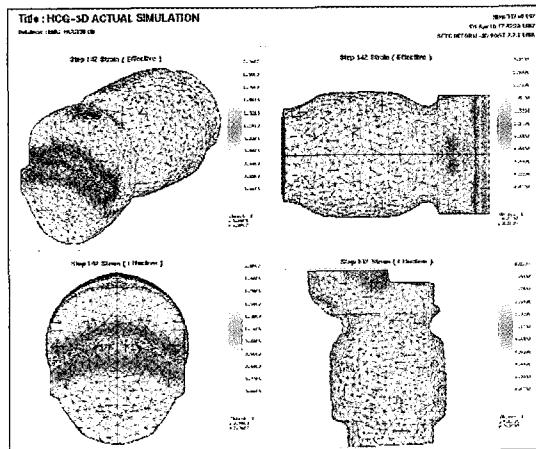
(a) 1 step



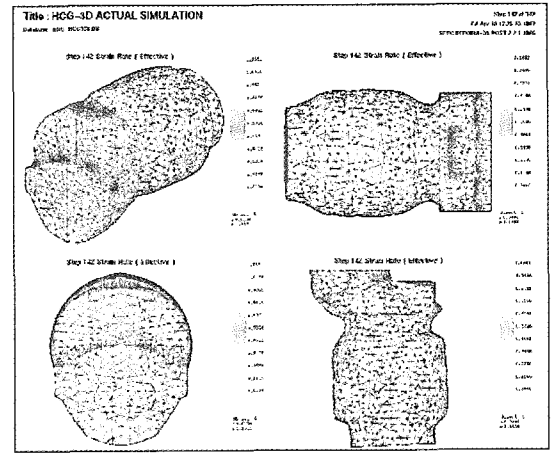
(b) 2 step



(b) 2 step



(c) 3 step



(c) 3 step

Fig. 7 Predicted strain distribution

Fig. 8 Predicted strain rate distribution

2.5 실제품 시험단조

실제품 시험 단조의 목적은 H.C.G. 단조장치의 작동상태 및 실제 제품을 단조할 때의 문제점을 발견하고, 이를 개선함으로써 작업성을 높이기 위해서 시행하였다. 특히, 이를 위해서 크랭크 스로우를 연속적으로 단조함으로써 H.C.G. 단조공법의 작업성을 검토하고, 단조된 크랭크 스로우의 형상이 모사실험과 이론해석에서 예측한 형상과 일치하는지의 여부를 파악하는데 주안점을 두고 실시하였다.

실제품 시험단조에 대한 공정은 Fig.9~Fig.13에 연속적으로 나타내었다. Fig.9는 가열로에서 가열된 소재를 이동하는 모습을 나타낸 것이고, Fig.10은 프레스의 매니플레이터(Manipulator)로 소재를 잡고있는 모습을 나타낸 것이다. Fig.11은 H.C.G. 단조장치에 소재의 단조할 부위를 정확히 위치시키는 모습을 나타낸 것이다. Fig.12는 H.C.G. 단조장치를 이용하여 소재를 단조하는 모습을 나타낸 것이다. Fig.13과 Fig.14는 크랭크 스로우를 단조완료후에 전체적인 크랭크샤프트의 모습과 가공후의 완제품을 나타낸 것이다. Fig.15는 크랭크 스로우 단조후 기계가공치수와의 차이를 나타낸 것으로, 단조품과 완성



Fig. 9 Moving round bar from heating furnace

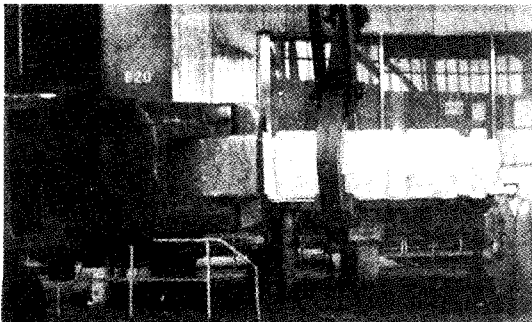


Fig. 10 Catching round bar by Manipulator

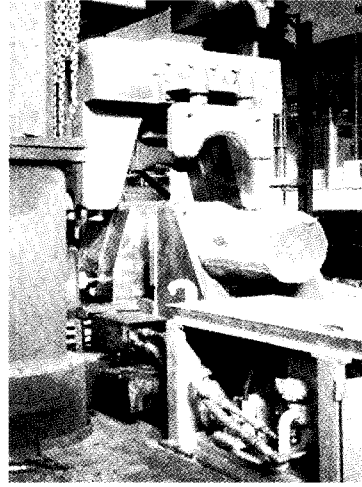


Fig. 11 Inserting round bar into H.C.G forging equipment

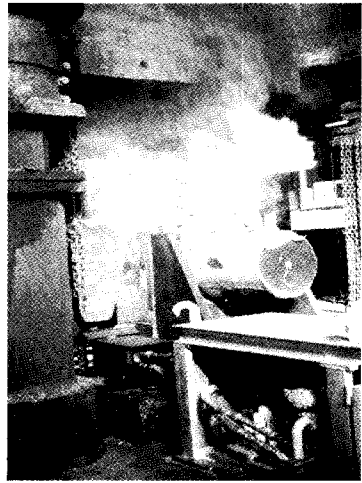


Fig. 12 Operation of H.C.G forging equipment



Fig. 13 The final forging result

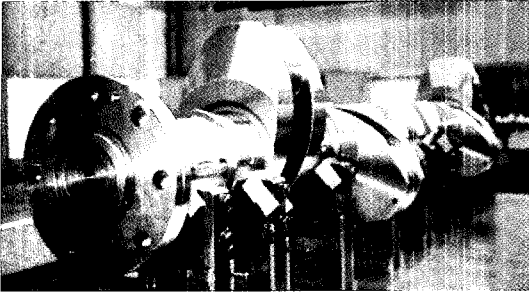


Fig. 14 The final product of crankshaft

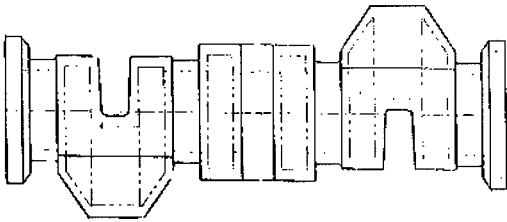


Fig. 15 Schematic drawing of crankshaft

품의 기계가공여유를 확인하였으며, 단조품에 대한 적합성을 확인할 수 있었다.

이상의 결과로부터 모사실험 및 이론해석의 결과를 토대로 실시된 H.C.G. 단조장치에 의한 실제품 시험단조에서 한번의 가열로 연속적인 단조작업이 가능하여 경제적인 단조장치임을 확인 하였다. 또한, 제품의 치수에 근접하게 형단조함으로써 기계가공 시간이 절감되었고, 요구되는 충분한 강도를 얻을 수 있었다.

3. 결 론

본 연구를 통하여 기존의 프레스에 특수 형단조 장치를 장착하여 프레스의 수직방향 힘을 수평과 수직방향의 힘으로 변환시켜 연속적인 형단조 작업을 수행할 수 있는 H.C.G. (Hyundai Continuous Grain-Flow) 장치를 독자적으로 개발하였으며, 이러한 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 플라스틱인(Plasticine)을 이용한 모사실험을 실시하여 단조과정중 소재의 형상변화를 관찰할 수 있었다. 이를 이용하여 금형의 형상을 수정하여 원하는 형상의 제품을 얻을 수 있었으며, 이러한 모사실험은 대형의 형단조 금형 설계시 유용한 도구로 사용될 수 있음을 확인하였다.

(2) 강소성 유한요소법을 이용하여 단조공정의 이론해석을 수행함으로써 형단조 공정중의 재료와 금형의 취약부분을 예측할 수 있었고, 이를 금형 설계에 반영하여 원하는 강도의 제품을 얻을 수 있었다.

(3) H.C.G.(Hyundai Continuous Grain-Flow) 단조장치를 이용하여 경제적인 측면에서 가격 경쟁력이 있고, 생산적인 측면에서 원가절감에 기여할 수 있는 선박중형엔진용 일체형의 크랭크샤프트 단조품을 제작할 수 있었다.

후 기

본 논문에 게재된 "선박 중형엔진 크랭크샤프트 제작용 형단조장치"는 한국산업기술진흥협회와 매일경제신문사가 공동으로 주관하는 "TR-52 장영실상" 1999년 3월 11일 제 14주에 선정된 기술이며, 현재 형단조장치에 대한 특허 심사가 진행중에 있다.

참 고 문 헌

- (1) T.Rut, Multi-connector Equipment for Forging Crankshafts and Upsetting Bar Stock by the TR-Method, Pergamon Press, Elmsford, N.Y., 1968.
- (2) T.Rut, Verfahrn zum Schmieden von Kurbelwellen Ind. Anz., Nr 34., 1969.
- (3) T. Rut, New Forging Processes for Conventional Presses, Forge Fair '91, Cincinnati Convention Center, 1991.
- (4) A New Forging Method for Crankshafts, Bars, Machinery, Vol.76, No.6, 1970.
- (5) MAN-B&W Quality Specification ID No. A1602502-9.
- (6) R.L. Bondnar, D.C. Ronemus, B.L. Branfitt and D.C. Shah, "Physical Modeling of Hot-Deformation Processes Using Plasticine", I&SM, pp35-46, Aug., 1986.
- (7) S.I. Oh, et. al., "Capabilities and Applications of FEM code DEFORM; the perspective of the developer", J. Mat. Proc. Tech., 1991.