

# 대형마찰용접을 이용한 로타샤프트 제조공정개발

정호승<sup>1</sup>, 조종래<sup>#</sup>, 이낙규<sup>2</sup>, 박희천<sup>3</sup>, 최성규<sup>3</sup>.

## Process Development of Rotor Shaft using a Large Friction Welding

H. S. Jeong, J. R. Cho, N. K. Lee, H. C. Park, S. K. Choi

### Abstract

Inertia welding is a solid-state welding process in which butt welds in materials are made in bar and in ring form at the joint face, and energy required for welding is obtained from a rotating flywheel. The stored energy is converted to frictional heat at the interface under axial load. The quality of the welded joint depends on many parameters, including axial force, initial revolution speed and energy, amount of upset, working time, and residual stresses in the joint. Inertia welding was conducted to make the large rotor shaft for low speed marine diesel engine, alloy steel for shaft of 140mm. Due to different material characteristics, such as, thermal conductivity and flow stress, on the two sides of the weld interface, modeling is crucial in determining the optimal weld geometry and parameters. FE simulation was performed by the commercial code DEFORM-2D. A good agreement between the predicted and actual welded shape is observed. It is expected that modeling will significantly reduce the number of experimental trials needed to determine the weld parameters.

**Key Words** : Inertia welding(관성마찰용접), Rotor shaft(로타 샤프트), Process parameter(공정변수), Finite element method(유한요소법)

### 1. 서론

우리나라의 조선산업은 현재 세계 1위의 조선 강국이며 선박용 디젤엔진 생산 또한 70% 정도로 세계 1위를 차지하고 있다. 선박용 엔진 부품의 대부분은 국산화 되었음에 불구하고 터보 차저 등은 국산화 되지 못하고 있다. 터보 차저의 부품인 로타샤프트는 전량 수입 또는 반가공품 상태로 들여와 가공 후 조립하는 형태로 생산하고 있다. 로타샤프트는 플랜지부와 샤프트부의 직경이 너무 달라서 일체형으로 성형하기가 힘들다. 또한 반가공품 형태로 만들면 소재비와 가공비가 많아진다. 그래서 플랜지부와 샤프트부를 각각 성형한 후 마찰용접으로 일체형을 만들면 소재 및 가공

비용을 상당히 줄일 수 있다. 또한 디젤엔진의 고부가가치 부품인 고성능 터보차저에 대한 국산화를 할 수 있다. 마찰용접은 두 재료에 압력을 가한 상태에서 상대운동을 주어 발생하는 마찰열을 이용하여 고상상태(solid state)로 접합하는 방식이다. 마찰용접은 일반 용접에 비하여 열영향부(HAZ)의 범위가 좁는 등 여러 가지 장점을 가지고 있어 자동차, 전기, 조선, 화학, 원자력 등의 산업에서 우수한 특성을 활용하여 광범위하게 사용되고 있다[1]. 또한 수치해석을 이용한 이종재료 마찰용접 해석에 대한 연구[2]와 다양한 소재에 대한 마찰용접 공정변수에 따른 실험과 기계적 특성을 평가하고 이를 바탕으로 최적의 마찰용접 조건을 구하는 연구가 진행되고 있다[3-8].

1. 부산대학교 기계기술연구소  
2. 한국생산기술연구원 디지털성형공정팀  
3. (주)케이에스피 기술연구소  
# 한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail:cjr@hhu.ac.kr

디젤엔진용 로타 샤프트 마찰용접공정에 대한 열점소성 유한요소해석을 수행하여 다양한 공정 변수들이 열간형단조 공정과 마찰용접 공정에 미치는 상관관계에 대해 연구를 하였다.

## 2. 공정해석

### 2.1 열간 형단조 공정

디젤엔진용 로타 샤프트 일체형 제조를 하기 위해선 먼저 마찰용접 공정과 플랜지부 단조공정이 있다. 플랜지부의 직경은 620mm 이고 샤프트부의 직경은 140mm 이다. 형상이 너무 다르기 때문에 플랜지부 열간형단조를 위해서 금형형상과 초기 소재형상을 설계하였으며 이를 바탕으로 성형성과 하중 예측을 하였다.

### 2.2 마찰용접 공정

마찰용접동안 열발생과 변형이 일어나기 때문에 열전달과 변형거동해석이 동시에 요구되므로 대변형해석에 사용되는 상용 프로그램 DEFORM-2D 를 이용하여 열점소성 유한요소해석을 수행하였다. 관성마찰용접을 하기 위해서는 플라이휠 에너지, 1 차 가압력, 2 차 가압력에 대한 공정 변수들의 조건 및 소재의 물리적 특성인 열전달계수, 고온유동응력에 대한 특성을 알아야 한다. Table 1 에서 제시된 플라이휠 에너지, 1 차 가압력, 2 차 가압력 등의 다양한 공정변수들의 조건을 사용하여 마찰공정 해석을 하였다. Table 2 는 열전달해석에 사용된 경계조건들이다.

해석에 사용된 소재의 직경은 140mm 이며 마찰부위의 형상이 원통형이므로 축대칭으로 해석하였다. 본 연구에 사용된 소재의 화학조성은 Table 3 에 나타내었다.

식 (1)는 플라이휠 에너지를 표현하는 수식이며 식 (2)는 플라이휠 관성모멘트를 표현하는 수식이다.

$$E = \frac{I\omega^2}{2} \quad (1)$$

$$I = Mr^2 \quad (2)$$

여기서 E 는 플라이휠 에너지(N-mm), I 는 플라이휠 관성모멘트(N-mm-s<sup>2</sup>),  $\omega$  는 각속도(rad/sec), M 은 플라이휠 질량(kg), r 은 플라이휠 반경(mm)이다.

Table 1 Simulation parameter condition for inertia welding process

Simulation condition	Process parameters		
	Flywheel energy (N-mm)	1st force (N)	2nd force (N)
1	5.5E9	1.2E6	2.4E6
2	5.5E9	1.4E6	2.4E6
3	5.5E9	1.4E6	2.1E6
4	5.5E9	1.6E6	2.4E6

Table 2 Thermo-mechanical process parameter for FE simulation

Item	Value	Unit
Room temperature	20	°C
Convection coefficient	0.1	N/mm/sec/°C
Lubricant heat transfer coefficient	10	N/mm/sec/°C
Emissivity	0.7	-

Table 3 Chemical composition of SFCMV1

Elements	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
Value	0.22	0.5	0.71	0.21	1.24	0.74

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 열간형단조 공정해석

Fig. 1은 플랜지부 열간단조공정 해석결과이다. Fig. 1(a)는 열간단조공정 후 변형율을 나타내며 Fig. 1(b)는 단조하중을 나타낸다. 플랜지부의 초기 소재형상과 금형형상이 플랜지부 열간형단조공정에 만족함을 알 수 있었다.

### 3.2 마찰용접 공정해석

Fig. 2는 Table 1의 다양한 공정변수 조건들에 의해서 공정시간에 대한 해석 결과를 나타내었다. Fig. 3은 마찰공정 후 두 소재의 온도분포와 업셋 공정 후 온도분포를 도시하였다. Table 4는 해석결과를 나타내었다. 해석조건 1과 3의 경우 플라이휠 에너지와 2차 가압력은 같고 1차 가압력이 상대적으로 큰 경우 압하량이 많아지며 공정시간은 짧아진다. 해석조건 2와 3의 경우 1차 가압력은 같고 2차 가압력이 상대적으로 큰 경우 공정시간은 비슷하며 압하량은 많아진다. Table 1에서 제시

된 공정변수들이 적용된 마찰용접 공정해석은 Case 4의 공정조건이 짧은 시간에 많은 압하량을 가지며 좋은 해석결과를 얻었을 수 있었다.

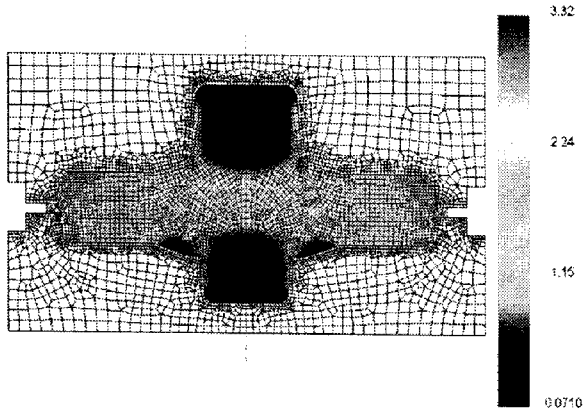


Fig. 1(a) Strain distribution and deformation shape after forging of flange part

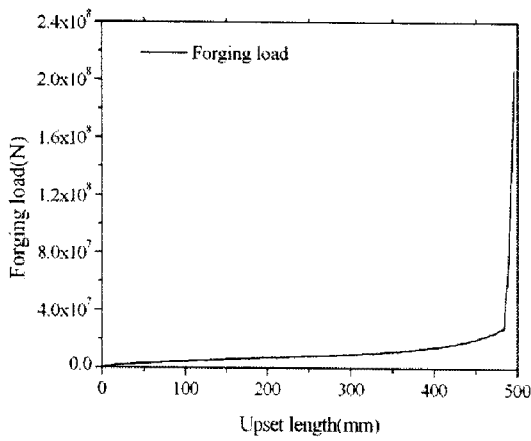


Fig. 1(b) Displacement versus forging load curve for closed die forging

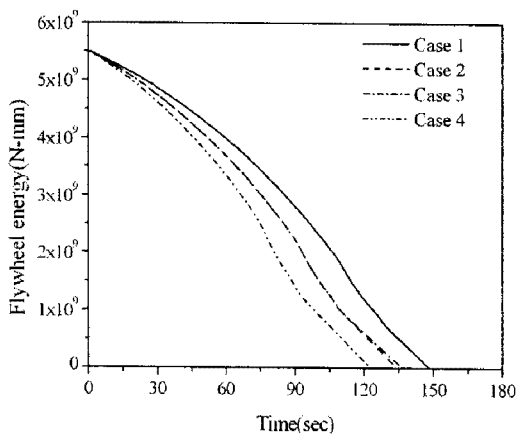


Fig. 2(a) Flywheel energy versus time curve

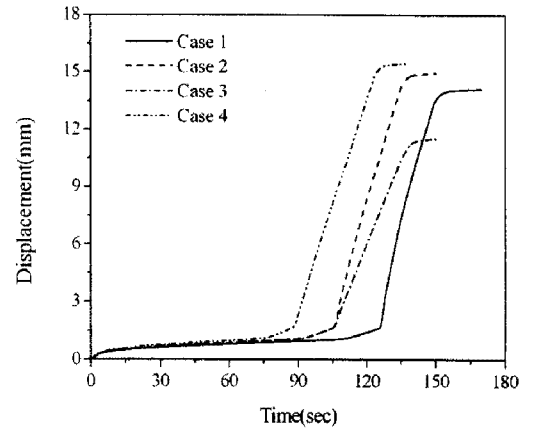


Fig. 2(b) Upset length versus time curve

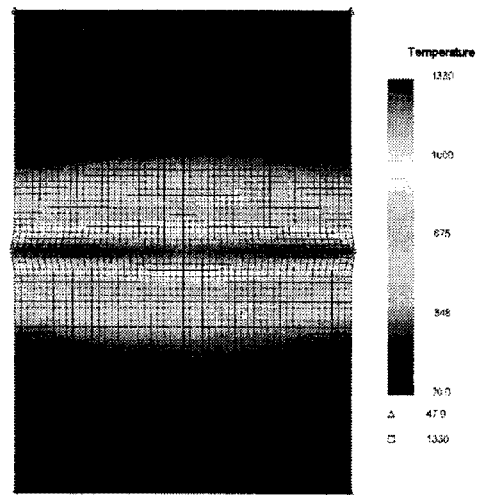


Fig. 3(a) Deformation shape and distribution of temperature after friction phase step

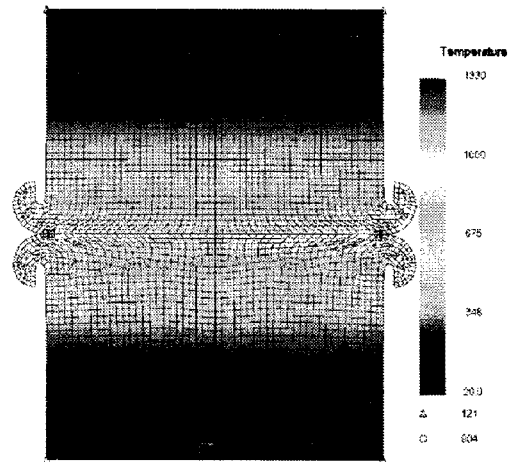
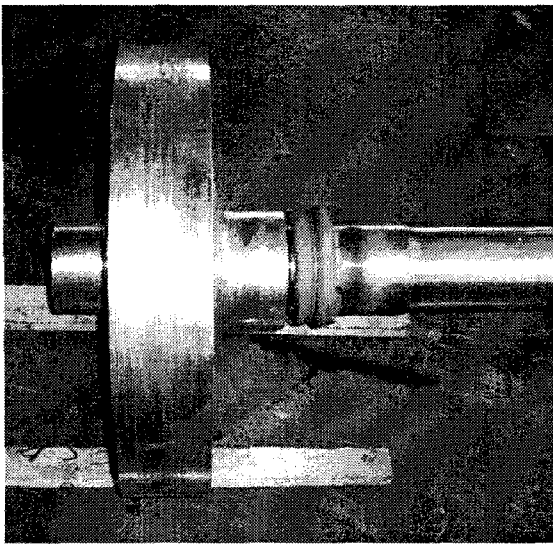


Fig. 3(b) Deformation shape and distribution of temperature after upset phase step

**Table 4 Simulation results for inertia welding process  
( $\varnothing$  140mm)**

Simulation condition	Process parameters			
	Friction time (sec)	Upset Length (mm)	Total time (sec)	Total upset length (mm)
1	125	1.62	150	14.1
2	105	1.65	138	14.9
3	105	1.65	140	11.5
4	87.5	1.67	125	15.1

플랜지부의 직경은 620mm 이고 샤프트부의 직경은 140mm 인 플랜지부를 열간형단조 하였다. 또한 실제작한 플랜지부와 샤프트를 이용하여 해석에서 구한 마찰용접 공정변수를 이용하여 대형 마찰용접을 이용하여 시제품을 제작하였다.



**Fig. 4 Rotor shaft shape using friction welding**

#### 4. 결론

SFCMV1 소재를 이용하여 선박용 대형 디젤엔진 터보차저의 부품인 로타샤프트( $\varnothing$  140mm)에 대하여 열점소성 유한요소법을 이용하여 이종 마찰용접 공정해석을 수행하여 공정변수에 대한 성형 조건 한계 및 범위를 확인하였으며 이를 바탕으로 시제품을 제작하였다.

(1) 1차 가압력이 상대적으로 큰 경우 압하량이 많으며, 공정시간은 짧아진다. 2차 가압력이 상대적으로 큰 경우 공정시간은 비슷하며 압하량은 많아짐을 알 수 있었다.

(2) 실제 플랜지와 샤프트를 이용하여 대형마찰용접을 이용하여 시제품을 제작하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 부품소재기술개발사업에 의하여 지원되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H.S. Jeong and T. Shinoda, Fundamentals and Basic Application of Friction Welding, Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, 1997.
- [2] 조현수, 서성재, Inconel 713C 와 SCM 440 의 마찰용접, Journal of KWS, 제 15 권, 제 6 호, pp. 564~570, 1997.
- [3] A.Z. Sahin, B.S. Yibas, M. Ahmed, J. Nickel, Analysis of the Friction Welding Process in Relation to the Welding of Copper and Steel Bar, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 82, pp. 127~136, 1998.
- [4] 김의환, 민택기, 인코넬 합금과 스테인레스 강의 마찰용접 특성 연구, 한국공작기계학회논문집, 제 10 권, 제 2 호, pp. 73~78, 2001.
- [5] P.D. Sketchly, P.L. Threadgill, I.G. Wright, Rotary Friction Welding of a Fe3Al based ODS alloy, Materials Science and Engineering, A329-331, pp. 756~762, 2002.
- [6] H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, Tensile Properties and Fracture Locations of Friction-stir-welded Joints of 2017-T351 Aluminum Alloy, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp. 692~696, 2003.
- [7] A.A.M.d. silva, A. Meyer, J.F.d. Santos, C.E.F. Kwietniewski, T.R. Strohaecker, Mechanical and Metallurgical Properties of Friction welded TiC Particulate Reinforced Ti-6Al-4V, Composites Science and Technology, Vol. 64, 1495~1501, 2004.
- [8] 박희천, 정호승, 조종래, 이낙규, 오중석, 한명섭, 이종재료 마찰용접에 의한 초내열합금 대형 배기밸브 스피들 개발, 한국마린학회지, 제 29 권, 제 8 호, pp. 891~898, 2005.