

# 대형로타샤프트의 관성마찰용접 공정해석 및 기계적 특성 평가 Inertia Friction Welding Process Analysis and Mechanical Properties Evolution of Large Rotor Shaft

\*정호승<sup>1</sup>, #조종래<sup>2</sup>, 오종석<sup>3</sup>, 김응남<sup>3</sup>, 최성규<sup>4</sup>, 하만영<sup>5</sup>

\*H. S. Jeong<sup>1</sup>, #J. R. Cho(cjr@hhu.ac.kr)<sup>2</sup>, J. S. Oh<sup>3</sup>, E. N. Kim<sup>3</sup>, S. G. Choi<sup>4</sup>, M. Y. Ha<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 롤스로이스대학기술센터, <sup>2</sup> 한국해양대학교 기계정보공학부, <sup>3</sup> 현대중공업 엔진기계사업본부, <sup>4</sup> 케이에스피 기술연구소, <sup>5</sup> 부산대학교 기계공학부

Key words : Inertia friction welding, Thermo-visco-plastic, Rotor shaft, Mechanical properties, Fatigue, Heat treatment, Tempering

## 1. 서론

현재 개발하고자 하는 대형 디젤엔진 터보차저용 로타샤프트는 직경 620mm 디스크와 직경 140mm 샤프트로 구성되어 있다. 디스크와 샤프트의 직경이 매우 다르므로 자유 단조에 의해 제작을 한다면 많은 소재, 제작시간, 단단 단조공정 등에 의해 많은 공정비용이 소요되지만 마찰용접을 통해 제작을 한다면 제작 비용을 획기적으로 줄일 수가 있다. 마찰용접은 일반적인 용접에 비해 좋은 용접성과 효율을 가지고 있으며 또한 경제적, 기술적으로 측면에서 많은 이점이 있기 때문에 항공, 자동차 기계부품 등으로 산업 현장에서 많이 사용되고 있다.

본 연구의 목적은 대형 디젤엔진용 로타샤프트 마찰용접공정에 대한 열접소성 유한요소해석을 수행하여 다양한 마찰용접 공정변수들이 마찰용접 공정에 미치는 상관관계에 대하여 분석을 하는 것이다. 또한 마찰용접 후 기계적 특성을 향상시키기 위해 다양한 열처리를 시행하고 기계적 특성을 평가하여 열처리 조건에 따른 기계적 특성 변화를 분석하는 것이다.



Fig. 1 Model shape of rotor shaft using turbo charge

## 2. 로타 샤프트 공정 해석 및 기계적 특성 평가

### 2.1 마찰용접 공정해석

마찰용접은 두 재료에 압력을 가한 상태에서 상대회전 운동을 주어 마찰접촉부위에 발생하는 마찰열을 이용하여 접합하는 방식이며 마찰용접 동안 접촉부에서는 열발생과 변형이 발생한다. 그러므로, 열전달 및 대변형 해석이 가능한 전용 프로그램인 DEFORM-2D 를 이용하여 열접소성 유한요소해석을 수행하고자 한다.

플라이휠 에너지, 1 차 가압력, 2 차 가압력에 대한 공정 변수들과 소재의 물리적 특성인 열전달계수, 고온유통용력을 이용하여 관성마찰용접 공정해석을 수행하였다. 본 연구에 사용된 소재의 화학조성은 Table 1 에 나타내었다. Table 2 에서 제시된 플라이휠 에너지, 1 차 가압력, 2 차 가압력 등의 다양한 공정변수들의 조건을 사용하여 마찰용접 공정해석을 수행하였다.

해석에 사용된 소재의 직경은 140mm 이며 마찰부위의 형상이 원통형이므로 축대칭 해석을 하였다.

Table 1 Chemical composition of SFCMV1

Elements	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
w.t(%)	0.22 -0.3	0.4 -0.7	0.35 -0.8	Max. 0.5	1.0 -1.5	0.7 -1.3

Table 2 Simulation parameter condition of inertia welding process

Parameter	Simulation case				
	1	2	3	4	5
Flywheel energy (N-mm)	5.5E9	5.5E9	5.5E9	6.0E9	5.2E9
Friction force (N)	1.2E6	1.4E6	1.6E6	1.6E6	1.6E6
Upset force (N)	2.4E6	2.1E6	2.4E6	2.4E6	2.4E6

### 2.2 기계적 특성 평가

접합부에서는 열영향부가 발생하므로 기계적 특성을 향상시키기 위해 2 가지 열처리 조건을 수행하였다. 첫번째는 마찰용접 전 모재에 대하여 담금질(950℃) 후 뜨임(690-720℃) 열처리를 한 후 마찰용접을 시행하고, 마찰용접 후 응력 완화(650℃) 열처리(S.R)를 수행하였으며, 두번째 조건은 마찰용접 후 담금질(950℃) 후 뜨임(690-720℃) 열처리(Q-T)를 수행하였다.

열처리된 마찰접합부의 기계적 특성을 평가하기 위하여 인장, 경도, 피로, 미세조직시험을 하였다. 광학현미경을 이용하여 마찰접합부의 열영향부에 대한 미세조직변화를 관찰하였다. 인장시험을 통해 항복, 인장 강도 및 연신율 등의 기계적 특성을 평가하였다. 마이크로 비커스경도계를 이용하여 경도를 측정하였다. 피로시험은 로타리 밴딩시험기를 사용하여 1×10<sup>5</sup>-1×10<sup>7</sup> 사이클 범위에서 수행하였다.

## 3. 해석 및 시험 분석

### 3.1 마찰용접 공정해석 분석

Fig. 2 는 Table 1 의 다양한 공정변수를 적용하여 공정해석 결과를 나타내었다. 해석조건 1 과 3 의 경우 플라이휠 에너지와 2 차 가압력은 같고 1 차 가압력이 상대적으로 큰 경우 압하량이 많아지며 공정시간은 짧아짐을 알 수 있었다. 해석조건 2 와 3 의 경우 1 차 가압력은 같고 2 차 가압력이 상대적으로 큰 경우 공정시간은 짧아지고 압하량은 많아짐을 알 수 있었다. 해석조건 4 의 경우는 플라이휠 에너지가 상대적으로 커므로 압하량이 많아짐을 알 수 있다. 마찰용접 공정해석 결과, Case 3 의 공정조건이 짧은 시간에 적당한 압하량을 가지며 좋은 해석결과를 얻었을 수 있었다.

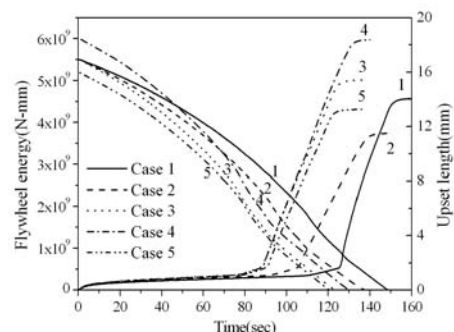
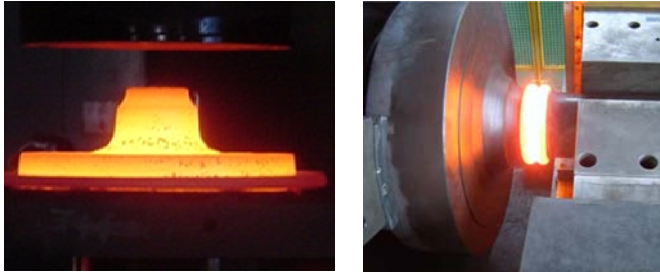


Fig. 2 Flywheel energy and displacement curve versus time

### 3.2 로타샤프트 시제품 제작

열간 형단조를 이용하여 플랜지부를 제작하였다. 또한 공정해석 조건 Case 3을 적용하여 플랜지와 샤프트에 대하여 마찰용접을 수행하여 시제품을 제작하였다. Fig. 3(a)는 열간 형단조, Fig. 3(b)는 마찰용접 공정을 보여주고 있다.

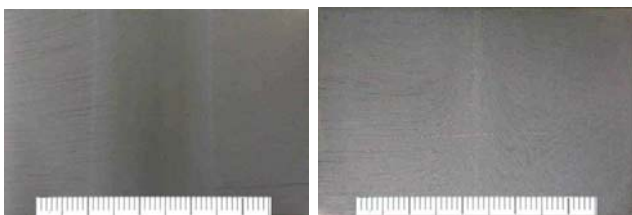


(a) hot closed die forging process (b) friction welding process  
Fig. 3 Manufacture processing of rotor shaft using friction welding and hot closed die forging

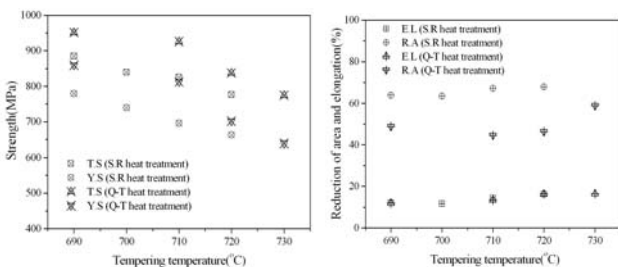
### 3.3 기계적 특성 시험 분석

마찰용접에 의해 제작된 시제품에 대하여 다양한 열처리된 시험편을 이용하여 기계적 특성을 평가하였다.

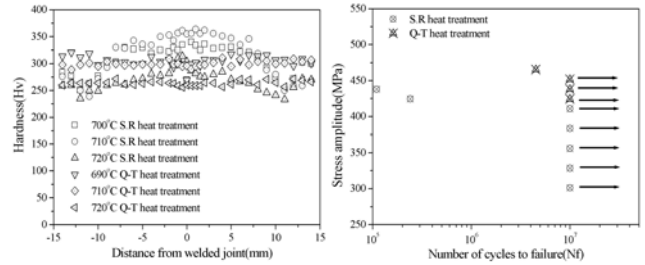
Photo 1은 마찰접합부 단면의 미세조직을 보여준다. S.R 열처리 경우 24mm 깊이의 열영향부가 관찰되었으며 Q-T 열처리 경우 3mm 깊이의 열영향부가 관찰되었다. 담금질 열처리에 의해 열영향부의 미세조직이 변화가 되었음을 알 수 있었다. Fig. 4(a), 4(b)는 다양한 열처리된 시험편에 대한 인장시험 결과를 보여준다. 인장강도, 항복강도, 연신율은 Q-T 열처리된 시험편이 S.R 열처리된 시험편보다 기계적 특성이 우수함을 알 수 있었다. 인장, 항복강도는 뜨임 열처리 온도가 증가할수록 강도가 감소하고, 연신율은 온도가 증가할수록 증가함을 알 수 있었다. Fig. 4(c)는 마찰용접부의 경도시험 결과를 나타낸다. Q-T 열처리 경우 균일한 경도를 나타내지만 S.R 열처리 경우 비균일한 경도를 나타낸다. 특히 열영향부에서 Q-T 열처리 조건보다 경도가 낮아짐을 알 수 있었다. Fig. 4(d)는 마찰접합부의 S-N 곡선을 보여준다. 시험편의 열처리는 Q-T와 S.R 열처리에서 720°C 뜨임 온도를 적용하였다. Q-T 열처리 조건의 경우 최대 피로강도는  $1 \times 10^7$ 에서 450MPa을 나타냈으며 S.R 열처리 조건보다 피로강도가 우수함을 알 수 있었다.



(a) stress relieving heat treatment (b) Q-T heat treatment  
Photo 1 Microstructures of welded joint part



(a) strength distribution (b) elongation and reduction of area distribution



(c) hardness distribution (d) fatigue distribution  
Fig. 4 Material properties test results for welded joint

## 4. 결론

대형 디젤엔진 터보차저에 사용되는 대형 로타샤프트를 공정비용을 줄이기 위해 마찰용접공정을 통해 제작하였다. 열점소성 유한요소법을 이용하여 마찰공정해석을 수행하고 마찰용접 공정에 대한 최적 공정변수에 대하여 연구를 하였으며 시제품 제작 및 다양한 열처리 공정을 통해 기계적 특성을 평가하였다.

1. 최적 마찰공정조건을 알기 위해 다양한 공정변수에 대하여 유한요소법을 이용하여 공정해석을 수행하였으며 해석을 통해 공정변수의 영향을 알 수 있었다. 엽셋 길이는 엽셋 하중 및 플라이 휠 에너지 증가와 함께 증가하였다.
2. 로타샤프트 시제품은 관성 마찰용접과 플랜지 열간단조 공정을 통해 제작하였다. 공정해석 결과로부터 도출된 최적 공정변수를 적용하여 관성마찰용접을 수행하였으며 공정해석 결과와 실험을 통해 잘 일치함을 알 수 있었다.
3. 시제품의 플래쉬 두께 및 열영향부 관찰을 통해 공정해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.
4. 시제품에 대하여 2 가지의 열처리를 수행하였으며 마찰접합부에 대하여 인장, 경도, 피로, 미세조직 등 기계적, 금속학적 특성을 평가하였다. 인장, 항복 강도, 연신율, 피로 특성은 Q-T 열처리된 시험편이 S.R 열처리된 시험편보다 좋았으며 또한 균일한 경도를 나타내었다. 또한 Q-T 열처리에 의해 접합부의 열영향부는 관측이 되지 않았지만 S.R 열처리의 경우 열영향부가 관측되었다. 그러므로 Q-T 열처리된 접합부가 실험 결과로부터 좋은 기계적 특성을 가짐을 알 수 있었다.

## 후기

이 논문은 2008년도 부산대학교 박사후연수과정사업 및 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. K20702000013-07E0200-01310). 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. H.S. Jeong, J.R. Cho, H.C. Park, Development of Dissimilar Inertia Welding Process of Large Superalloy Spindle, Key Engineering Materials, vol. 1. Vol. 345-346, (2007), 1429-1432.
2. Richard Moat, Mallikarjun Karadge, Michael Preuss, Simon Bray, Martin Rawson, Phase transformations across high strength dissimilar steel inertia friction weld, Journal of Materials Processing Technology, 204, (2008), 48-58.
3. A. Abdollah-Zadeh, T. Saeid, B. Szgari, Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints, Journal of Alloys and Compounds, 460, (2008), 535-538
4. ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating.