

◆ 특집 ◆ 양동열 교수님 헌정세션 특집

마찰용접을 이용한 대형선박 터보차저용 이종 로타샤프트 개발

Development of Large Rotor Shaft for Marine Turbo Charger Using Friction Welding with Dissimilar Materials

문광일¹, 전종원², 정호승³, 조종래^{1,✉}, 최성규⁴
Kwang-Il Moon¹, Jong-Won Jeon², Ho-Seung Jeong³, Jong-Rae Cho^{1,✉}, and Sung-Gyu Choi⁴

¹ 한국해양대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University)
² 한국해양대학교 수중운동체특화연구센터 (Underwater Vehicle Research Center, Korea Maritime and Ocean University)
³ (주)페스코 연구개발팀 (Research and Development Team, Pessco)
⁴ (주)케이에스피 기술연구소 (Research and Development Team, KSP)
✉ Corresponding author: cjr@kmou.ac.kr, Tel: +82-51-410-4298

Manuscript received: 2016.2.25. / Revised: 2016.3.15. / Accepted: 2016.3.16.

Solid state joining techniques are increasingly applied in a wide range of industrial applications. Friction welding is a solid state welding technique that is used to join similar or dissimilar materials. In this study, friction welding was applied to rotor shaft composed of a disk and a shaft. The disk and shaft were manufactured by hot forging and rolling, respectively. The aim of the study was to predict the structural characteristics during hot forging and friction welding process for rotor shaft of turbo charger. The structural characteristics were determined by heat input and heat affected zone (HAZ) during a short cycle time. Thus, transient FE analysis for hot forging and friction welding was based on heat transfer. The results were used to predict structural characteristics during hot forging and friction welding processes. The prototype of rotor shaft was manufactured by the result-based process parameters.

KEYWORDS: Friction welding (마찰용접), Hot forging (열간단조), Finite element analysis (유한요소 해석), Rotor shaft (로타샤프트)

1. 서론

전세계적으로 지구 온난화 문제가 대두됨에 따라 선박용 디젤 엔진의 고효율화가 요구되고 있으며, 친환경 고효율 에너지 및 동력 시스템의 개발도 많은 관심을 받고 있다.

우리나라는 조선 강국이며 디젤엔진의 생산 또한 70% 정도로 세계 1위를 차지하고 있다. 하지만

디젤엔진의 고효율을 위한 핵심기술인 터보차저 등은 수입에 의존하고 있다. 터보차저는 배기가스의 열에너지를 이용하여 디젤엔진에 공기를 과급함으로써 실린더의 압력을 증가시켜 출력을 증가시키는 장치이다. 터보차저의 부품인 로타샤프트는 디스크부와 샤프트부로 구성되어 있으며, 고속 회전체로 우수한 기계적 성질이 요구된다.¹⁻³ 현재 로타샤프트는 형단조 공법으로 강도가 높은 고비

용의 소재를 적용하여 일체형으로 제작되고 있다. 하지만 디스크부와 샤프트를 강도가 높은 소재를 사용하여 일체형으로 성형할 경우, 우수한 기계적 성질을 확보할 수 있지만 직경이 너무 달라 일체형으로 성형하기엔 어려우며 소재의 낭비가 심한 단점이 있다.

마찰용접을 사용해 디스크부와 샤프트부를 따로 성형하면 가공 비용을 상당히 줄일 수 있으며, 고성능 터보차저에 대한 국산화를 할 수 있다. 마찰용접은 두 재료에 압력을 가한 상태에서 상대운동을 주어 발생하는 마찰열을 이용하여 고상상태로 접합하는 방식이며, 열영향부 (HAZ)가 좁아 자동차, 조선, 원자력 등의 산업에서 광범위하게 사용되고 있다. 또한 마찰용접은 서로 다른 재료로도 성형이 가능하므로, 샤프트를 일반강으로 만들 수 있어 원재료비도 많이 삭감할 수 있다.

예전부터 마찰용접에 대한 연구는 실험적으로 많이 수행되어왔으며, 현미경을 통해 재료 특성을 관찰하는 등 미시적 관점의 연구가 많이 있다.⁴⁻¹⁰ 최근에는 최적화에 대한 연구도 진행되었다.¹¹ 또한 유한요소 해석을 이용해 마찰용접 공정 동안 발생하는 변형 및 온도분포를 예측하고 이를 실험과 검증하는 연구도 많이 진행되었다.¹²⁻¹⁵

본 연구에서는 먼저 로타샤프트 디스크부의 형상변수를 정의하였고, 유한요소 해석을 이용해 열간단조 공정시 형상변수에 따른 단조하중을 예측하였다. 그 후에 성형된 디스크부와 샤프트부에 대한 마찰용접 해석을 수행하였다. 공정변수를 다르게 하여 업셋 길이 및 공정시간의 경향성을 확인하였고 마찰용접의 적용 가능성을 검토하였다.

모든 유한요소 해석은 해석의 효율성 및 정확성을 높이기 위해 2차원 축대칭 모델을 적용하였으며, 상용 프로그램인 DEFORM-2D를 사용하였다.

2. 디스크부의 열간단조 공정 해석

2.1 열간단조 공정 개요 및 경계조건

로타샤프트의 디스크부는 일체형 형단조로 성형되며, 단조하중을 줄이기 위해 본 연구에서는 열간단조를 고려하였다. 초기 업셋팅 이후 소재의 예비성형체에 대한 형상변수를 정의하였으며, 형상변수에 따른 단조하중을 비교하고자 하였다.

단조 공정의 경계조건은 하부 금형은 고정되어 있고, 상부 금형이 압하하도록 적용하였다. 금형 및 소재 간의 열전달이 고려되어야 하므로, 상부

Table 1 Chemical composition of ST13T

Elements	C	Si	Mn	Cr	Mo
Value (%)	0.21	0.34	0.45	11.4	0.96

Table 2 Shape parameters of preform

Shape parameters	Level				
	1	2	3	4	5
D (mm)	340	350	360	370	380
T-F (mm)	5	6	7		

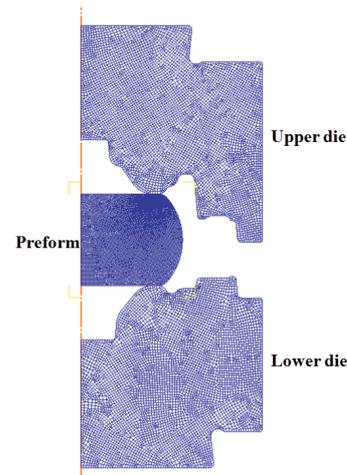


Fig. 1 FE model for hot forging process

및 하부 금형 모두 요소를 생성하였다. 실제 단조 공정시 소재는 고온에서 약 1시간 정도 유지되므로 소재의 온도는 1200°C를 적용하였고, 금형은 300°C의 온도를 적용하였다. 금형 및 소재 간의 마찰계수는 윤활이 없는 상태로 0.3을 적용하였으며, 사용된 유한요소 모델은 Fig. 1에 나타내었다.

로타샤프트 디스크의 소재는 기계적 성질이 뛰어난 고급 마르텐사이트강 ST13T를 사용하였으며, 재료의 화학조성은 Table 1에 나타내었다.

2.2 형상변수 정의

적용한 형상변수는 소재 예비성형체의 직경 (D) 및 플래쉬의 두께 (T-F)로 선정하였으며, 사용한 값은 Table 2에 나열하였다. 소성 변형이므로, 모든 해석 모델은 체적이 동일하도록 설계하였다.

2.3 해석 결과

일반적으로 열간단조 공정시 재료의 변형으로 인한 소성열이 발생하며 열전달에 의한 온도 변화

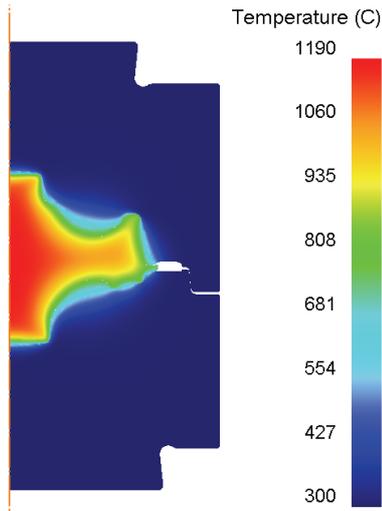


Fig. 2 Distribution of temperature after hot forging

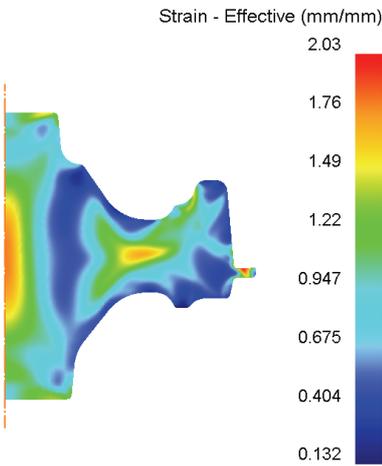


Fig. 3 Distribution of strain after hot forging

가 소재의 유동에 직접 영향을 주게 되므로, 본 연구에서는 열전달을 고려한 해석을 진행하였다.

모든 해석 모델들은 미충진 없이 최종형상을 성형하였다. Fig. 2는 최종형상의 온도 분포를 나타내며, 상부 및 하부 금형과 넓은 면적으로 접하는 외각부분에서 열전달이 많이 일어나 중심부보다 온도가 낮아진 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 최종형상의 변형률 분포를 나타내며, 외각의 곡면부는 성형 이후에 변형률의 상승이 거의 없음을 확인할 수 있다. 제품의 성형성에 도움을 주는 플래쉬 부분은 성형시 높은 하중을 유발하며, 그 하중으로 인해 높은 변형률이 발생함을 알 수 있다.

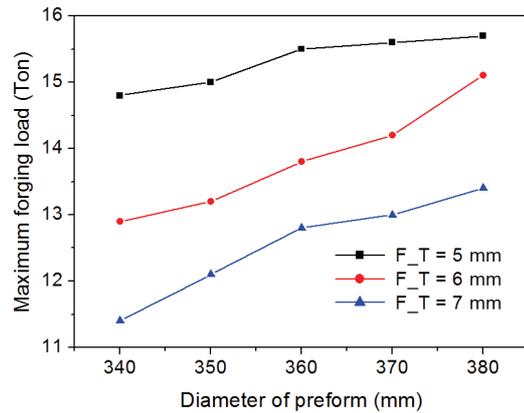


Fig. 4 Maximum forging load according to D and T-F

예비성형체의 직경 및 플래쉬의 두께에 따른 최대 단조하중의 결과는 Fig. 4와 같다. 예비성형체의 직경이 커질수록 금형과 열전달되는 양이 많아지며, 그로 인해 단조하중 또한 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 플래쉬의 두께가 얇아질수록 단조하중이 많이 증가되며, 성형성이 보장된다면 플래쉬의 두께는 두꺼운 것이 하중 측면에서 많은 이점을 가진다는 것을 확인할 수 있다.

3. 로타샤프트의 마찰용접 공정 해석

3.1 마찰용접 공정 개요 및 경계조건

유한요소법을 이용해 마찰용접의 공정 해석을 진행하였으며, 해석을 통해 공정변수의 경향성 및 마찰용접의 실현 가능성을 확인하고자 하였다.

본 연구에 적용된 로타샤프트 디스크의 직경은 430 mm이며 접합부는 샤프트의 직경과 같은 95 mm이다. 또한 이중 소재로 디스크는 기계적 성질이 우수한 고급 마르텐사이트강 ST13T를 사용하였으며, 샤프트는 일반강 SNCM439를 사용하였다.

디스크와 샤프트는 서로의 마찰에 의해 열을 유발하며, 발생한 열은 각각의 소재내부로 전도 열전달 현상을 유발한다. 또한 외부 공기와 접촉된 부분은 대류 열전달이 발생한다.

마찰용접 공정은 마찰단계와 압하단계로 구분하였다. 마찰단계에서 상부 금형은 상부 소재와 함께 플라이휠 에너지에 의해 일정한 회전이 가해지고, 하부 금형은 하부 소재와 함께 정적 상태에서 일정한 1차 가압력을 가한다. 이 때 두 소재의 접촉면에서는 마찰열이 발생하고, 온도의 상승에 의해 마찰면에서 국부적인 변형이 생긴다. 플라이

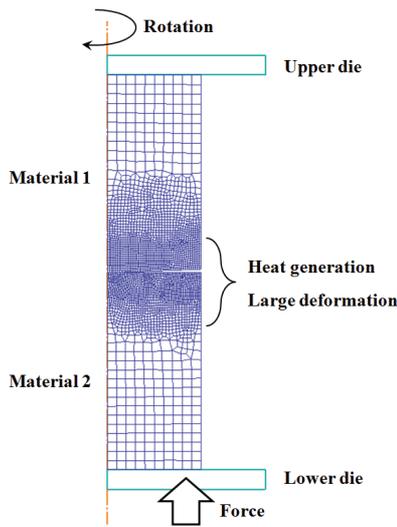


Fig. 5 FE model for friction welding process

Table 3 Process parameters of friction welding process

Process parameters	Level		
	1	2	3
E (N·mm)	4.9e9	8.1e9	12.1e9
F ^{1st} (N)	1.0e6	1.2e6	1.4e6
F ^{2nd} (N)	1.6e6	1.8e6	2.0e6

회 에너지는 아래의 식으로 계산된다.

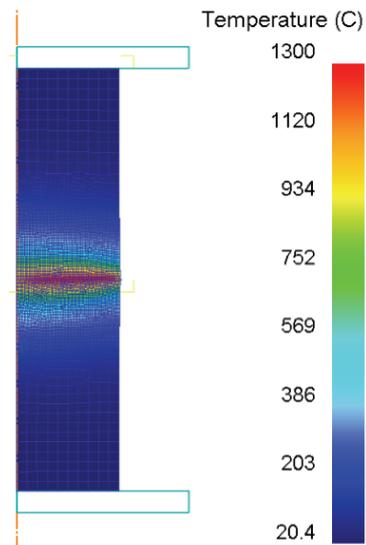
$$E = \frac{I\omega^2}{2} = \frac{mr^2\omega^2}{2} \quad (1)$$

여기에서 E는 플라이휠의 에너지, I는 관성모멘트, ω는 각속도, m은 질량, r은 반경을 의미한다.

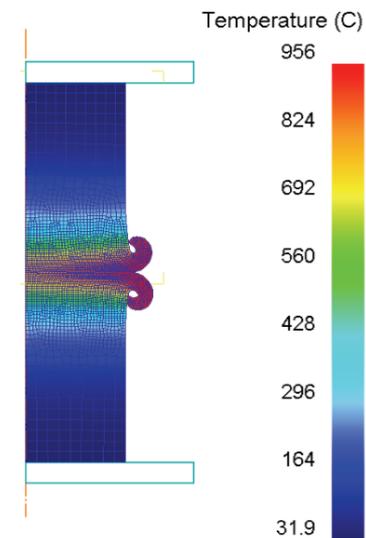
두 소재에 균일하게 마찰가능한 열이 발생하면 압하단계로 진행되며, 1차 가압력 보다 큰 2차 가압력을 적용해 플라이휠의 회전을 정지시킴과 동시에 두 소재를 접합시킨다. Fig. 5는 마찰용접 공정의 유한요소 모델 및 경계조건을 나타낸다.

3.2 공정변수 정의

유한요소 해석에 사용된 마찰용접의 공정변수는 상부 금형의 플라이휠 에너지 (E), 1차 가압력 (F^{1st}) 및 2차 가압력 (F^{2nd}) 총 3개로 정의하였으며, Table 3에 나열하였다. 2차 가압력이 1차 가압력보다 낮을 경우, 접합면에서 충분한 열이 발생하지 않아 성형이 불가능하므로, 모든 변수는 2차 가압력이 1차 가압력보다 크도록 선정하였다.



(a) After friction step



(b) After forge step

Fig. 6 Deformation shape and distribution of temperature

3.3 해석 결과

마찰용접 공정은 마찰단계와 압하단계로 구분되므로, 해석의 결과도 구분하여 정리하였다. Fig. 6은 마찰용접 공정 후 두 소재의 온도분포를 나타낸다. 마찰단계에서 두 소재는 마찰에 의해 열이 발생하며, 단계가 종료되면 1300°C의 고온이 균일하게 분포됨을 확인할 수 있다. 압하단계에서 두 소재는 마찰용접되며 열영향부가 비교적 좁은 범위로 나타남을 확인할 수 있다.

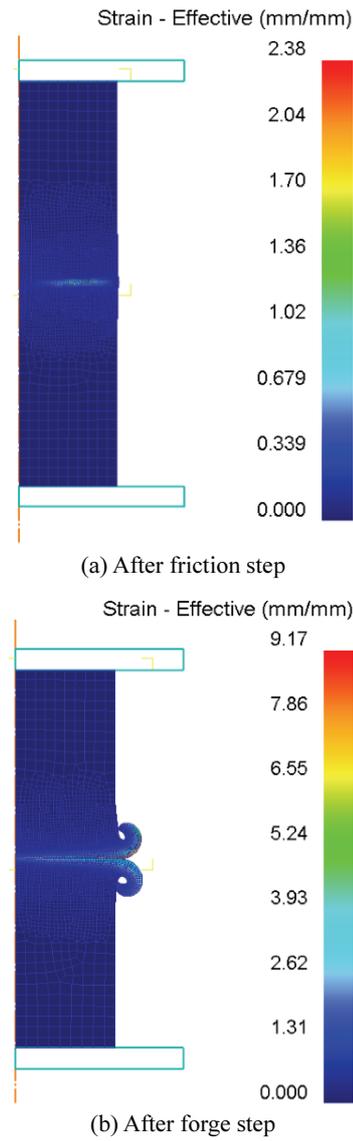


Fig. 7 Distribution of effective strain

Fig. 7은 변형률의 분포를 나타내며 두 소재의 접합부에 마찰단계부터 좁은 영역으로 변형이 발생하기 시작한다. 압하단계가 진행되면서 초기의 변형이 성장하며, 최종단계가 되더라도 변형이 발생하는 범위가 상당히 좁음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 공정변수에 따른 업셋 길이 및 시간 이력을 나타낸다. 본 연구에서 제작 장비의 최소 업셋 길이는 17 mm 이며, 이를 기준으로 플라이휠의 에너지가 낮을 경우와 2차 가압력이 작은 경우는 성형이 불가능함을 알 수 있다.

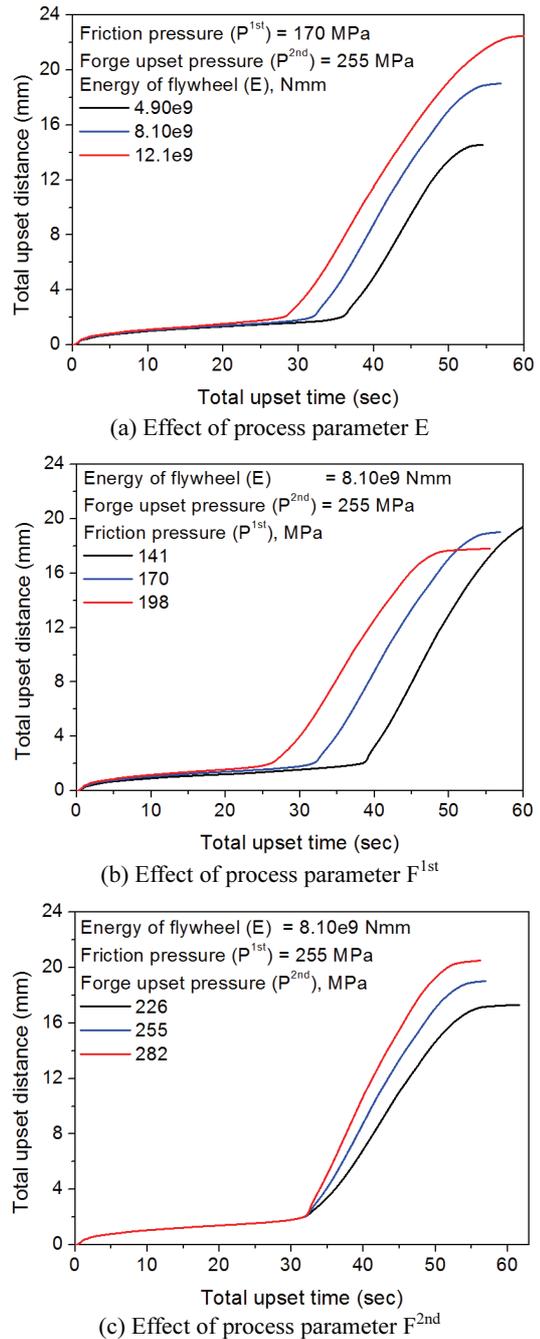


Fig. 8 Total upset distance with regard to process parameters

동일한 1차 및 2차 가압력 조건에서 플라이휠의 에너지가 증가할수록 마찰시간이 감소되며, 전체 소재의 변형량은 증감됨을 확인할 수 있다. 그

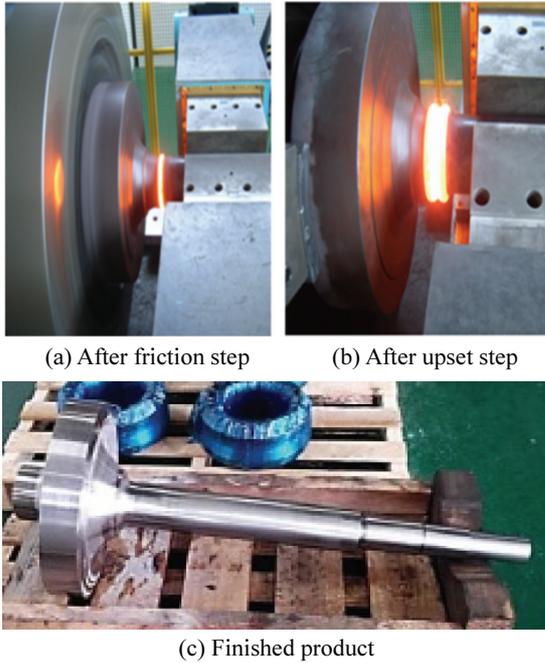


Fig. 9 Prototype of rotor shaft using welding process

리고 플라이휠의 에너지 및 2차 가압력이 동일한 조건에서는 1차 가압력이 증가할수록 마찰시간이 상당히 감소함을 확인할 수 있다. 또한 플라이휠의 에너지 및 1차 가압력이 동일한 조건에서는 2차 가압력이 증가할수록 전체 마찰 용접 공정 시간은 감소하며, 전체 소재의 변형량은 증가됨을 알 수 있다.

마찰용접 해석 결과로부터, 정의한 모든 공정 변수는 공정시간, 변형량 등에 영향을 미치는 인자임을 확인하였다. 또한 각각의 공정변수들은 인자간의 교호 작용이 거의 없으므로, 설계한 공정 조건에 맞게 적절한 변수의 선정이 필요할 것으로 예상된다.

4. 로타샤프트의 시제품 제작

본 연구의 결과를 바탕으로, 마찰용접의 공정 변수를 선정하였으며 시제품을 제작하였다. Fig. 9는 디스크의 직경 430 mm, 스피들의 직경 95 mm의 로타샤프트 마찰용접 시제품 형상을 나타낸다.

시제품의 디스크, 샤프트 및 용접부에서 항복강도, 인장강도 및 비커스 경도를 측정하였으며, 결과는 각각 Table 4와 Fig. 10에 나타내었다.

Table 4 Process parameters of friction welding process

Location		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Disk	Test	886	1,035
	Spec.	≥800	≥950
Welding region	Test	749	901
	Spec.	≥550	≥700
Shaft	Test	809	961
	Spec.	≥735	≥900

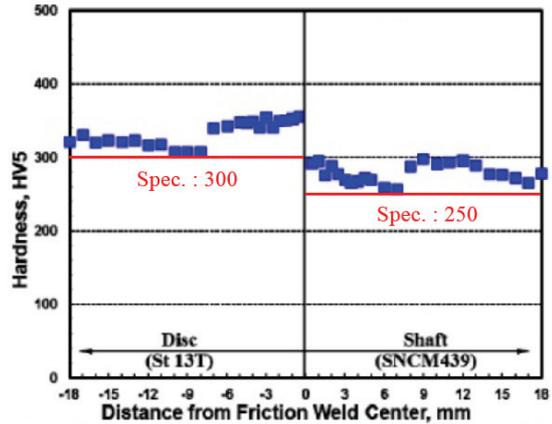


Fig. 10 Hardness distribution of rotor shaft

항복강도 및 인장강도는 인장시험을 통해 측정하였으며, 총 5번의 시험을 진행하였다. 디스크부 및 샤프트부는 모두 요구되는 사양을 만족하였다. 관심영역인 용접부의 요구되는 사양은 항복강도 550 MPa 이상, 인장강도 700 MPa 이상이며 시제품은 이 사양을 충분히 만족함을 확인할 수 있다.

비커스 경도 또한 측정하였으며, 비커스의 경도는 디스크 및 샤프트 부분에 한해서 측정하였다. Fig. 10은 위치에 따른 경도의 값을 나타내며, 가운데에 있는 세로축은 용접부를 의미한다. 결과로부터, 디스크부 및 샤프트부 모두 사양을 충분히 만족함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 디스크의 직경 430 mm, 스피들의 직경이 95 mm인 대형형선박 터보차저용 로타샤프트의 열간단조 공정 및 마찰용접 공정에 대해 연구를 진행하였으며, 결과는 아래와 같다.

(1) 디스크부의 예비성형체로부터 형상변수를 정의하였고, 금형과 소재 간의 열전달 및 마찰을

고려한 열간단조 해석을 진행하였다.

(2) 열간단조 해석의 결과로부터, 예비성형체의 직경이 클수록 금형과 열전달이 많이 되어 하중이 크게 발생하며, 플래쉬의 두께가 얇을수록 하중이 크게 발생함을 알 수 있었다. 즉, 단조하중을 줄이기 위해서는 예비성형체의 직경이 작아야 하고, 플래쉬의 두께가 두꺼워야 함을 예측할 수 있다.

(3) 마찰용접은 마찰단계와 압하단계로 구분되며, 공정변수는 이를 고려하여 플라이휠의 에너지, 1차 가압력 및 2차 가압력으로 정의하였다.

(4) 플라이휠의 에너지가 클수록 마찰시간이 감소하며, 소재의 변형량은 증가한다. 또한 1차 가압력이 증가될수록 마찰시간이 상당히 감소함을 확인하였다. 2차 가압력이 증가될수록 전체 공정시간은 감소하며, 소재의 변형량은 증가됨을 확인하였다.

(5) 해석 결과로부터, 모든 공정변수는 마찰용접 공정의 결과에 영향을 미치는 인자임을 확인하였으며, 본 연구의 공정변수를 적용하여 최종적으로 시제품을 제작하였다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 중소기업혁신개발사업(과제번호: 2014-0152-02)에 의하여 지원되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Jeong, H.-S., Cho, J.-R., Oh, J.-S., Kim, E.-N., Choi, S.-G., et al., "Inertia Friction Welding Process Analysis and Mechanical Properties Evaluation of Large Rotor Shaft in Marine Turbo Charger," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 11, No. 1, pp. 83-88, 2010.
2. Das, A. S. and Dutt, J. K., "Reduced Model of a Rotor-Shaft System Using Modified SEREP," *Mechanics Research Communications*, Vol. 35, No. 6, pp. 398-407, 2008.
3. Lee, J. K., "Design and Operation Possibility of the Automatic Dynamic Balancer for the High Speed Rotating Chuck at the Friction Welding," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 18, No. 6, pp. 148-158, 2001.
4. Polami, S. M., Reinhardt, R., Rethmeier, M., and Schmid, A., "Joint-Site Structure Friction Welding Method as a Tool for Drive Pinion Light Weighting in Heavy-Duty Trucks," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 9, pp. 1921-1927, 2014.
5. Hazra, M., Rao, K. S., and Reddy, G. M., "Friction Welding of a Nickel Free High Nitrogen Steel: Influence of Forge Force on Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion Resistance," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 90-100, 2014.
6. Prashanth, K. G., Damodaram, R., Scudino, S., Wang, Z., Rao, K. P., et al., "Friction Welding of Al-12Si Parts Produced by Selective Laser Melting," *Materials & Design*, Vol. 57, pp. 632-637, 2014.
7. Anand, K., Barik, B. K., Tamilmannan, K., and Sathiya, P., "Artificial Neural Network Modeling Studies to Predict the Friction Welding Process Parameters of Incoloy 800h Joints," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, No. 3, pp. 394-407, 2015.
8. Mercan, S., Aydin, S., and Ozdemir, N., "Effect of Welding Parameters on the Fatigue Properties of Dissimilar AISI 2205-AISI 1020 Joined by Friction Welding," *International Journal of Fatigue*, Vol. 81, pp. 78-90, 2015.
9. Kimura, M., Fuji, A., and Shibata, S., "Joint Properties of Friction Welded Joint between Pure Magnesium and Pure Aluminium with Post-Weld Heat Treatment," *Materials & Design*, Vol. 85, pp. 169-179, 2015.
10. Ma, H., Qin, G., Geng, P., Li, F., Fu, B., et al., "Microstructure Characterization and Properties of Carbon Steel to Stainless Steel Dissimilar Metal Joint Made by Friction Welding," *Materials & Design*, Vol. 86, pp. 587-597, 2015.
11. Ajith, P., Barik, B. K., Sathiya, P., and Aravindan, S., "Multiobjective Optimization of Friction Welding of UNS S32205 Duplex Stainless Steel," *Defence Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 157-165, 2015.
12. Schmicker, D., Persson, P.-O., and Strackeljan, J., "Implicit Geometry Meshing for the Simulation of Rotary Friction Welding," *Journal of Computational Physics*, Vol. 270, pp. 478-489, 2014.
13. Iracheta, O., Bennett, C., and Sun, W., "A Sensitivity Study of Parameters Affecting Residual Stress Predictions in Finite Element Modelling of the Inertia Friction Welding Process," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 71, pp. 180-193, 2015.
14. Bennett, C., "Finite Element Modelling of the Inertia Friction Welding of a CrMoV Alloy Steel Including

- the Effects of Solid-State Phase Transformations,”
Journal of Manufacturing Processes, Vol. 18, pp. 84-
91, 2015.
15. Yang, X., Li, W., Li, J., Xiao, B., Ma, T., et al.,
“Finite Element Modeling of the Linear Friction
Welding of GH4169 Superalloy,” Materials & Design,
Vol. 87, pp. 215-230, 2015.