

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.2.221>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

자유단조공법을 통한 중공형 메인샤프트 제조공정에 관한 연구

권용철* · 강종훈**† · 김상식***

* 경남테크노파크, ** 중원대학교, *** 경상대학교

Study on Manufacturing Process of Hollow Main Shaft by Open Die Forging

Yong Chul Kwon*, Jong Hun Kang**† and Sang Sik Kim***

* Shipbuilding & Marine Energy Center, GyeongNam Technopark, ** Jungwon Univ.,
*** Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received July 24, 2015 ; Revised October 31, 2015 ; Accepted December 7, 2015)

Key Words: Hollow Main Shaft(중공형 메인샤프트), Open Die Forging(자유단조), Flow Stress(유동응력) Wind Power Generator(풍력발전기), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 풍력발전기에서 메인 샤프트는 로터허브와 증속기를 연결하는 중요 부품 중 하나이며 주로 자유단조공법을 통하여 제조된다. 하지만 고 MW급 이상의 메인샤프트는 중량을 감소시키기 위하여 중공형 설계가 이루어지며 주조공법을 이용하여 제조되고 있다. 본 연구의 목적은 중공형 메인샤프트를 단조공법을 이용하여 생산할 수 있는 제조공정을 개발하는 것이다. 자유단조 공법의 공정설계 방법에 따라 중실형과 중공형 메인샤프트를 제조하기 위한 단조공정을 각각 설계하였다. 설계된 공정의 성형가능성을 확인하기 위하여 온도, 변형률 속도에 따른 유동응력을 열간압축실험을 통하여 구한 후 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통하여 단조업계에서 통상 행해지는 중실형 단조공법의 온도 및 변형률 등의 관리인자와 제안된 중공형단조공법의 인자를 비교하여 성형가능성을 예측하였다. 시제품 제작을 통하여 중공형 형상을 원소재회수율, 내부품질, 형상 및 치수 등에서 높은 생산성으로 제조가 가능함을 확인하였다.

Abstract: The main shaft is one of the key components connecting the rotor hub and gear box of a wind power generator. Typically, main shafts are manufactured by open die forging method. However, the main shaft for large MW class wind generators is designed to be hollow in order to reduce the weight. Additionally, the main shafts are manufactured by a casting process. This study aims to develop a manufacturing process for hollow main shafts by the open die forging method. The design of a forging process for a solid main shaft and hollow shaft was prepared by an open die forging process design scheme. Finite element analyses were performed to obtain the flow stress by a hot compression test at different temperature and strain rates. The control parameters of each forging process, such as temperature and effective strain, were obtained and compared to predict the suitability of the hollow main shaft forging process. Finally, high productivity reflecting material utilization ratio, internal quality, shape, and dimension was verified by the prototypes manufactured by the proposed forging process for hollow main shafts.

1. 서 론

최근 풍력발전기술의 개발동향은 대용량화, 경량화 및 모델의 다양화 추세이다. 현재 주력기종인 1.5~3MW급 모델이 5~7MW급까지 대형화 추세이며, 국내외 풍력 발전기 업체에서는 개발 완

료하였거나 개발 진행 중에 있다. 발전용량의 증대로 인해 부품들의 크기와 중량이 증가하고 있고 원가적인 측면과 너셀의 중량을 감소시키기 위하여 메인샤프트에 큰 구멍이 있는 형태(중공형)로 설계되고 주조공법으로 개발되고 있어 기존의 구멍이 없는 형태(중실형)의 단조공법은 경쟁력이 낮아지고 있다. 따라서 경제성이 있는 대용량 풍력 메인샤프트(Main shaft)를 제작하기 위

† Corresponding Author, jhkang@jwu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

해 내부에 구멍이 있는 중공형 메인샤프트 제조 공법의 개발이 요구되고 있다. 풍력발전기용 기계요소부품들은 통상 열간 자유단조공정으로 제조된다. 풍력발전기에서 메인샤프트는 Fig. 1과 같이 로터허브(Rotor hub)의 회전동력을 기어박스(Gear box)에 전달하는 핵심 기계부품이며 발전기용 단일 부품 중에서 가장 큰 중량을 차지한다.⁽¹⁾

높은 전달하중 능력을 가지는 메인샤프트를 중공형 제품으로 성형하기 위해서는 자유단조와 형단조의 복합공정을 통하여 단조품의 중량을 최소화하여 주조품에 준하는 가격경쟁력을 확보함과 동시에 높은 내부품질을 구현하여 내구수명 보증을 위한 연구가 필요하다.

대형 단조품에 있어 최종 제품에 가까운 단조 형상을 위한 연기 위한 연구는 실험과 해석적인 방법을 통하여 검증하는 방법으로 수행 되어왔다.⁽²⁻⁸⁾ 대형단조품의 품질에 지대한 영향을 미치

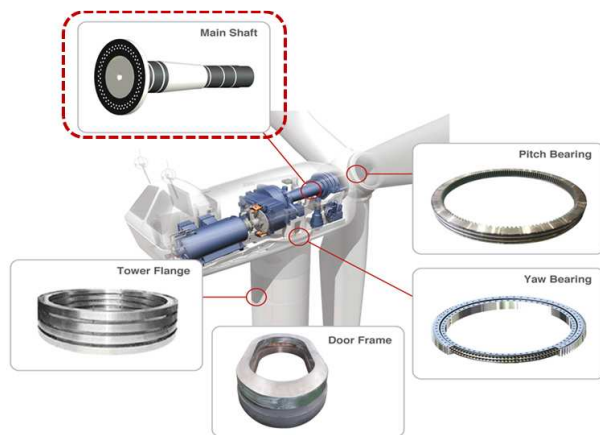


Fig. 1 Main shaft of wind power generator

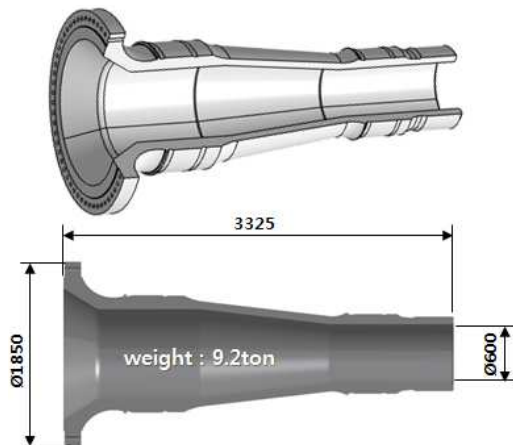


Fig. 2 Final machined 3MW class hollow main shaft shape and dimension

는 내부결함은 원소재 내에 잔존하는 공극 및 비금속 개재물성 결함, 대형 제품의 질량 효과에 의한 기계적 특성 미달, 공정 설계로 인한 접힘 및 치수 문제 등이 주를 이루고 있다. 이러한 대형단조품의 내부품질을 해결하기 위한 연구로는 대형 강괴의 공극 압착에 대한 해석 및 실험,^(9,10) 자유 단조 시 하중, 금속 유동, 응력분포, 변형률 분포 등을 해석적인 접근법을 통하여 예측한 결과들이 대표적이다.⁽¹¹⁻¹⁷⁾

본 연구에서는 3MW급 풍력발전기용 메인샤프트(Fig. 2)에 대하여 중공형 성형공법 개발을 위해 실험, 해석 및 시제품 제작을 수행하였다. 단조공정설계는 중실형과 중공형 샤프트를 생산하기 위하여 자유단조업계의 설계 방법에 따라 진행되었다. 설계된 단조공정을 해석하기 위하여 원소재(Casted material)에 대한 고온 압축실험(Hot compression test)을 수행하여 유동응력을 구하여 성형해석을 각각 실시하였다. 또한 중공형 제품의 시제품 제작을 통한 유한요소해석결과를 검증하였고, 중실형과 중공형의 원가 경쟁력 비교를 통하여 제안된 공법의 경제성을 검증하였다.

2. 신제조 공법 설계

건전한 단강품의 제조를 위해서는 단조 설계 시 고려되어야 할 변수들이 있다. 그 중에서 주조공정에서 생성된 공극(Cavity)은 자유단조공정 동안에 충분한 단조비를 통해 압착을 하여야만 건전한 제품으로 제조될 수 있다. Lee 및 Kwon^(9,10)은 열간 자유단조공정 동안에 공극압착의 거동을 분석하기 위해 제작된 소형 잉곳트(SCM440)의 내부공극을 X선 회절분석기로 측정, 내부 및 외부공극을 동일하게 모델링을 하여 열간 업셋팅 시험을 수행하였다. 그 결과 공극 압착의 임계한계변형률을 0.6 이상이라고 제시하였다. 따라서 본 연구에서도 최종단조 후 내부공극의 제거 기준을 동일하게 적용하여 해석결과를 분석하였다.

본 연구에서는 3MW급 중공형 메인샤프트를 제조하기 위하여 중공형 단조공정을 설계하였다. Table 1에 메인샤프트의 중실형 샤프트 제조방법과 중공형 샤프트 제조 방법을 비교하였다. 중실형 제조방법은 통상 개별로 주조된 잉곳트(Ingot)를 원소재로 사용하여 가열한 후 단련비를 부여하기 위하여 업셋팅과 코킹 작업을 실시한

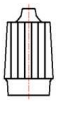
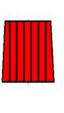
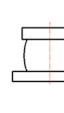
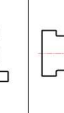
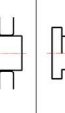
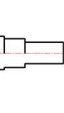
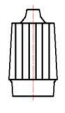
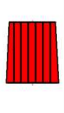
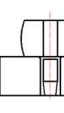

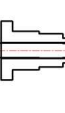
다. 재가열 후 최종 형상을 얻기 위하여 코킹 또는 금형작업 실시하는 것이 일반적이다.

중공 샤프트 제조를 위하여 설계된 공정은 잉곳트 소재를 이용하여 단련비를 부과하기 위한 업셋팅을 실시한 후 내경을 성형하기 위하여 피어싱 공정을 추가하였다. 내경이 형성된 제품은 코킹을 실시할 수 없으므로 멘드렐을 이용한 파이프성형(Pipe forging)을 통하여 필요한 형상을 성형한다. 재가열을 실시한 후 최종형상을 구현하기 위한 금형과 내경부를 지지하기 위한 멘드렐을 이용하여 최종 형상작업을 수행하도록 설계하였다.

2.1 고온 물성 실험

본 연구에 사용된 원소재는 일반구조용강에 사용되는 42CrMo4(SCM440 상당소재)이다. 풍력발전기용 부품에 가장 많이 사용되는 소재이며, 그 밖에도 피치베어링, 요 베어링 등에 적용되고 있다. 소재가 가지고 있는 고온물성은 금속성분에 따라 다르며, 열간 유동응력(Flow stress)을 획득하기 위해 고온압축실험을 수행하였다. 시편 채취는 동일한 화학성분을 가진 연주재(Round bar)의 중심부에 위치한 등축정대 부위에서 시험편을 채취하였고, 가공된 시편 사이즈는 Ø8 × 10 이다. 적용된 실험 조건은 온도(1000, 1100, 1200, 1250 °C), 변형률 속도(0.1, 1, 10/sec), 압하율 50%로 시험을 수행하였다. 시험조건 중 0.1/sec에 대한 시험결과를 대표적으로 Fig. 3에 도시하였다. 측정된 유동응력은 해석 시 적용하였다.

Table 1 Manufacturing process comparison of solid and hollow type main shaft

Current process					
1	2	3	4	5	6
Raw material	Heating	Upsetting	1 st Cogging	2 nd Cogging	Flange forging
					
Suggested process					
1	2	3	4	5	
Raw material	Heating	Upsetting & Piercing	Pipe forging	Flange forging	
					

2.2 중실형 단조공정의 해석

중공형 성형공법에 대한 해석결과의 타당성과 효과를 비교하기 위하여 동일한 3MW급 메인샤프트 제품에 대하여 중실형 단조공정을 설계하였다. 설계된 공정은 자유단조업계에서 통상적으로 이루어지는 성형공정으로 Table 1(단조공정도)와 같다. Table 2의 조건에 따라 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

본 해석에 적용된 원소재의 총중량은 42.7ton, 본체(Body) 중량이 32.2ton인 잉곳트를 사용하여 공정설계를 하였다. 중실형 메인샤프트 공정 설계를 보면 Fig. 4와 같이 단조 전 잉곳트의 불건전부인 압탕(Hot top) 및 저부(Bottom well)를 절단한 모델을 이용하여 초기 가열온도 1250°C로 업셋팅(Upsetting) 및 단계별로 길이 늘리기 작업(Cogging)을 진행한다. 각 공정별 최대 하중을 보면 업셋팅 공정에서 가장 높은 하중이 작용함을

Table 2 Simulation condition of hollow main shaft

Temperature	material	1250°C
	die	300°C
Press velocity	40mm/sec	
Friction coefficient with die	0.8	
Heat transfer coefficient	with die	2000W/m ² /°C
	with air	10W/m ² /°C
Upsetting ratio	2.2U	
Height reduction per 1 pass during cogging	100mm	

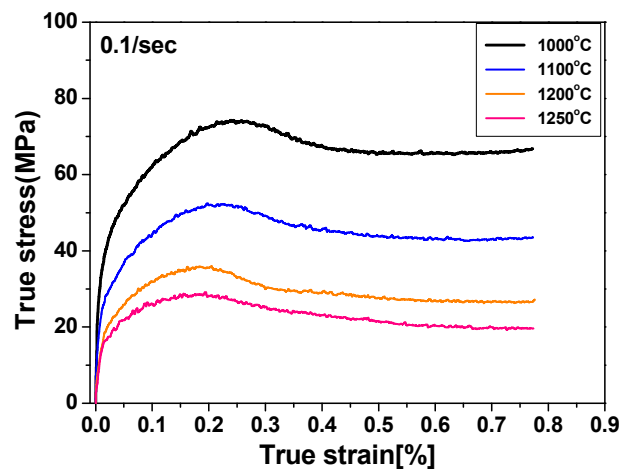


Fig. 3 Flow stress-strain curves according to the temperature and strain rate by compression test

알 수 있으며, 온도 분포는 2차 코킹 공정에서 최소 온도 781°C 가 확인되었다. 또한 최종단조 후의 유효 변형률(Effective strain)의 분포를 확인한 결과 6.10 ~ 16.03mm/mm 임을 알 수 있다.

2.3 중공형 단조공정의 해석

Table 1에 도시한 중공형 공정순서에 따라 3MW급 중공형 메인샤프트 단조공정을 Fig. 5에 나타내었다. 대형 단조품은 원소재가 제조원가의 50% 이상 차지하기 때문에 공정 설계에 따라서 제조원가는 큰 차이가 난다.

따라서 중공형 단조공정은 초기 원소재의 투입 중량을 줄여 재료회수율을 증대시켜 메인샤프트를 성형함과 동시에 내부 공극 미압착 발생을 억제하기 위하여 임계한계변형률 0.6mm/mm 이상을 만족하도록 설계되었다.

본 공정에 사용된 잉고트의 총 중량은 32.5ton, 본체 중량은 25.4ton 이며, 중실형과 비교하였을 때 9.8ton의 중량을 감소시켰다. 중실형 단조공정은 업셋팅 공정까지는 기존 공정과 동일하며, 이

후 편치금형을 사용하여 피어싱(Piercing) 공정을 통해 소재의 중심부에 홀을 성형한 다음 멘드렐(Mandrel)를 삽입 후 길이 늘리기 작업을 수행하는 것이 큰 차이이다. 그 후 금형을 이용하여 플랜지부를 성형하면서 내경부의 치수를 결정하도록 설계하였다. 단조공정과정에서 초기가열을 포함하여 총 3번에 걸쳐 1250°C 로 가열하였고, 프레스 속도는 실 공정과 동일한 조건 40mm/sec 으로 하였다. 본 공법에서 가장 중요한 단조공정이 파이프 단조(Pipe forging) 공정으로 중심부의 구멍으로 인해 내경부 온도가 빠르게 하강함에 따라 금형을 각 부위별로 달리 사용하였다. 즉 일반적으로 자유단조에서 사용되는 평 다이(Flat die)만을 사용하여 해석을 수행한 결과 샤프트 끝단부에서 피쉬테일(Fishtail)로 인해 최종제품의 치수에 영향이 미치는 것을 확인하였다.

이러한 피쉬테일 현상을 제거하기 위하여 공정과 위치에 따라 다른 금형을 사용하였다. Fig. 6은 파이프 단조 시 사용된 금형 및 단조공정을 나타내었다.

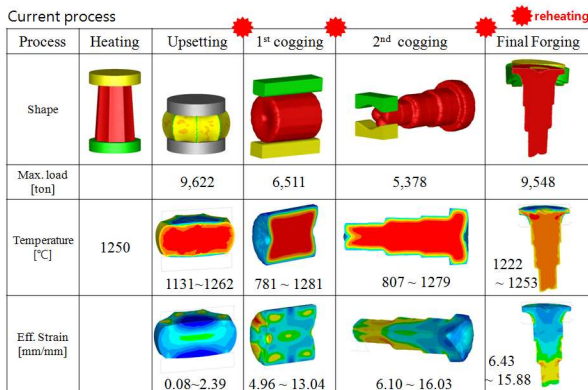


Fig. 4 FE-Analysis results of the solid type forging process

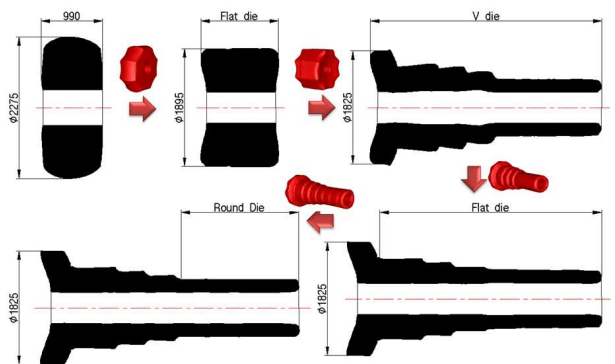


Fig. 6 Flow chart and used die during pipe forging process

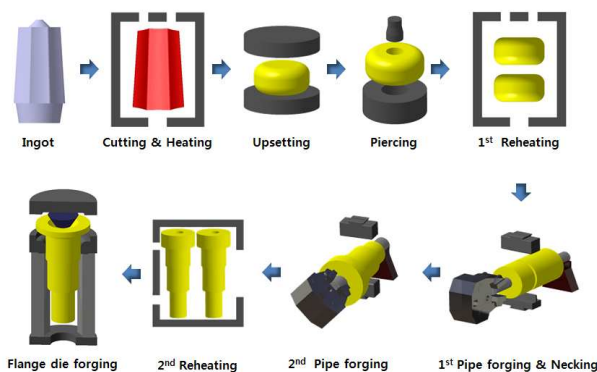


Fig. 5 Forging process design for hollow type

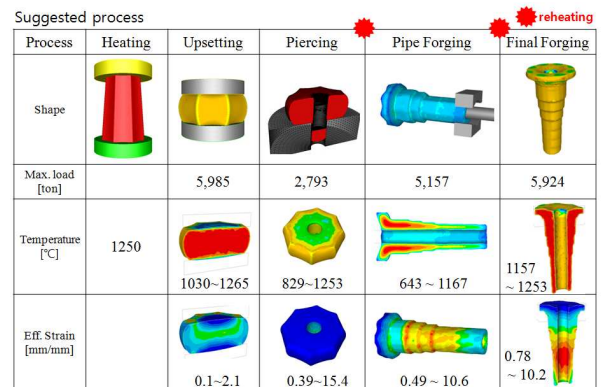


Fig. 7 FE-Analysis results of the hollow type forging process

중공형 단조공정에서 업셋팅은 2.2U의 단련비를 가지며, 피어싱은 Ø400의 펀치로 내경을 성형한다. 그 다음으로 1250℃로 재가열한 후 최종 제품의 가공여유 100mm가 되도록 파이프 단조를 실시한다. 이때 파이프 단조의 성형부 온도가 750℃ 이하이면 연신율이 낮아짐에 따라 표면 및 내부에 크랙이 발생될 수 있어 750℃ 이상의 온도가 유지되어야 한다. 그 후 최종 제품으로 금형을 이용하여 메인샤프트의 플랜지부에 대해서 형단조를 실시하여 단조를 완료한다. 단조 공정 성형성과 온도 및 결함 등을 예측하기 위하여 소재는 강점소성체(Rigid visco-plastic model)로 다이와 펀치는 강체(Rigid body)로 가정하고 강점소성 유한요소법을 적용하였고, 상용 해석프로그램인 FORGE™-2011을 사용하였다. 해석결과 각 공정별 최대 하중은 업셋팅 5,985ton, 피어싱 2,793ton, 파이프 단조 5,157ton 및 최종 단조 5,924ton으로 6,500ton 유압 프레스의 능력으로 성형이 가능함을 확인하였고, 성형온도 및 변형률에서 결함으로 의심할 만한 특이점을 확인할 수 없었다.

최종적으로 유한요소해석으로 계산된 제품의 치수를 분석하기 위해 Fig. 8과 같이 단조 설계도

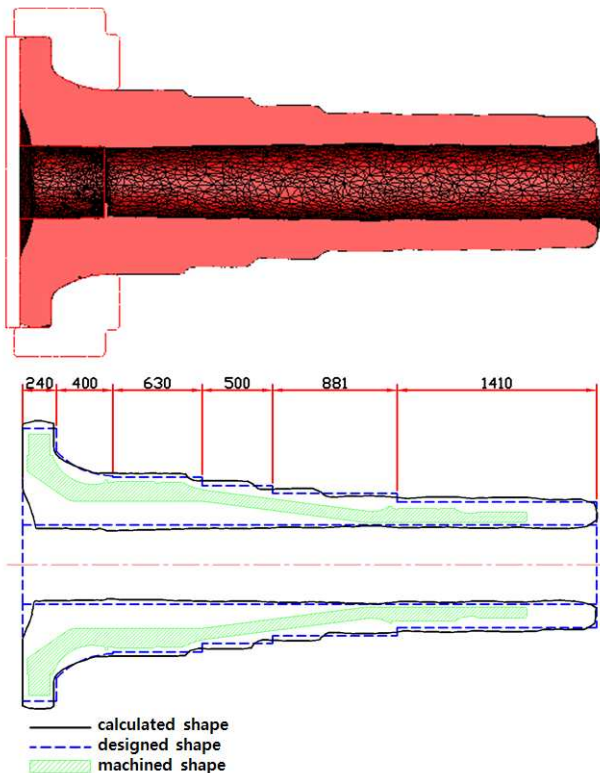


Fig. 8 Profile comparison for calculated, forging designed and final machined shape

면 및 최종제품의 형상을 비교 분석하였다. 결과에서 알 수 있듯이 단조도면 기준 대비 거의 유사하게 계산되었으며, 최종제품 대비 기계가공시 여유치 35mm를 충분히 확보 가능함을 확인하였다. 또한 제안된 공정에 따라 성형할 경우 최소 유효 변형률이 0.78mm/mm 이상임으로 대형 단조품에 흔히 나타나는 주조성 내부결함이 잔존하는 것 또한 제거됨을 예측하였다.

3. 중실형 단조공정의 검증

3.1 시제품 제작

유한요소해석을 통해 설계된 중공형 메인샤프트의 단조공정을 검증하기 위해 시제품을 제작하였다. Fig. 7과 같이 각 공정별 제조는 해석결과의 기준으로 시제품을 제작하였으며(Fig. 9), 조건은 해석과 동일하게 프레스 속도 40mm/sec, 1차 업셋팅 2.2U 단조비, 2차 파이프 공정 시 압하량은 100mm 길이방향 이동간격은 200mm로 Fig. 6의 공정설계에 따라 금형을 적용하였다. Fig. 10에 최종 단조된 단강품의 형상을 도시하였다.

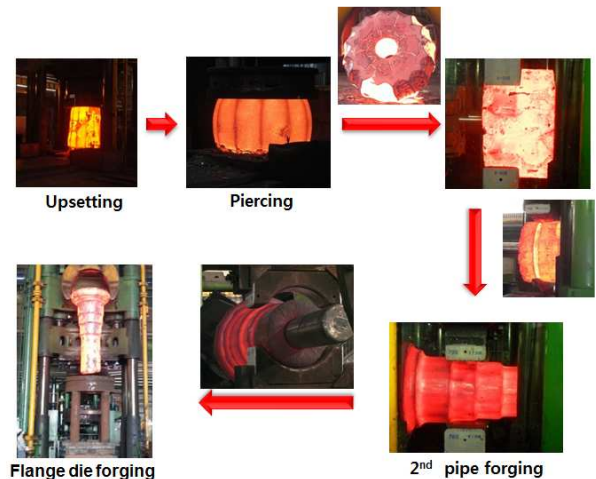


Fig. 9 Prototype forging process by suggested forging method



Fig. 10 Final forged hollow main shaft after flange die forging

중공형 메인샤프트의 최종 단조품에 대해 초음파 탐상검사를 통하여 내, 외부에 유해한 결함이 존재하지 않음을 확인하였다. 이는 생산성 측면에서도 기존 중실형에 비하여 가열횟수를 1회 줄여 성형하여도 내부결함을 제어할 수 있는 변형을 부과할 수 있음을 의미한다.

3.2 고찰

중실타입과 중공타입의 메인샤프트에 대하여 단조공정 설계와 유한요소해석을 각각 실시하고 중공형 제품에 대하여 시제품을 생산하였다. 제작된 단조품의 치수 및 내, 외부 결함에 대해 육안 및 초음파 탐상검사 등을 통하여 검증하였다. 또한 Fig. 9와 Fig. 10의 제조공정 및 최종 단조품을 통하여 해석 결과와 실작업 공정이 동일하게 변형됨을 확인할 수 있어 제안공정의 생산 안정성을 검증하였다.

중공형 제품의 단조공정의 개발은 메인샤프트가 대형화됨에 따라 주조공법에 상당하는 원가경쟁력을 가지기 위함이다. 제안된 중공형 단조공법을 원가적인 측면에서 정량적으로 비교한 결과를 Table 3에 나타내었다. 중공형 공법은 중실형에 비해 원소재 투입 중량 26% 감소, 재료회수율 약 6.7% 증대, 단조공정 동안 가열 횟수가 기존 공정 대비 1회 감소되었다. 전체적인 생산원가는 원소재 비용이 절감에 따라 26% 정도 감소함을 알 수가 있다. 이때 내경이 성형됨에 따른 가공 시간 감소, 중량 감소에 따른 단조 가열 시간 및 열처리 가열 시간 감소 등은 원가비교에 고려하지 않았다.

Table 3 Cost analysis for forging processes

	Solid type	Hollow type	Effect
Material utilization ratio	21.54%	28.30%	6.7% ↑
Raw material weight (1,100krw/kg)	42,700kg 46,970,000krw	32,500kg 35,750,000krw	26% ↓
Final forged weight	32.87ton	25.47ton	23% ↓
Manufacturing costs	100%	74%	26% ↓

4. 결 론

본 연구에서는 풍력발전기용 3MW급 중공형 메인샤프트에 대하여 경제성과 생산성을 향상시킨 단조공법을 제안하였으며, 공법의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석과 시제품 제조를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공정설계와 유한요소해석 결과를 통하여 중공형 단조공정은 중실형 공정에 비하여 가열횟수를 1회 줄였음에도 유효 변형률이 주조공정에서 생성된 내부결함이 제거되기 위한 한계 유효 변형률 0.6mm/mm 이상임을 확인하였다.

(2) 제안된 공법의 타당성 검증을 위해 시제품 2기를 제작하여 표면결함, 내부 결함 및 치수 부족에 의한 결함 및 단조품의 치수가 유한요소해석과 일치함을 확인하였다.

(3) 중공형 성형공법을 이용할 경우 원소재 투입량을 26% 절감할 수 있으며, 원가절감을 통해 기존 단조공정 및 주조품에 비해 원가경쟁력이 상대적으로 높은 공정임을 확인하였다.

참고문헌 (References)

- (1) Manwell, J.F. and Rogers, A.L., 2002, *Wind Energy Explained : Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons LTD, 308~313.
- (2) Dudra, S.P. and Im, Y.T., 1990, "Investigation of Metal Flow in Open-Die Forging with Different Die and Billet Geometries," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 21, No. 2, pp. 143~154.
- (3) Choi, S.K., Chun, M.S. and Van Tyne, C.J., 2006, "Optimization of Open Die Forging of Round Shapes Using FEM Analysis," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 172, No. 1, pp. 88~95.
- (4) Kim, D.Y., Kim, Y.D., Kim, D.K. and Kim, J.D., 2003, "A Study on the Open Die Forging Preform Shape of Crank Throw for Large Ship Engines," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 191~194.
- (5) Choi, S.K., Kim, W.T., Chun, M.S. and Moon, Y.H., 2003, "Effect of Process Parameters on Cylindrical Open Die Forging," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 221~224.
- (6) Knap, M., Kugler, G. and Palkowski, H., 2004, "Prediction of Material Spreading in Hot Open-Die

- Forging," *Steelres. Int.*, Vol. 75, No. 6, pp. 405~410.
- (7) Tamura, K., Akiyama, M. and Tajima, J., 2005, "Optimization of Anvil Design for Ensuring Dimensional Precision of Forged Round Billet Without Forging Defects by Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis," *J. Eng. Sci.*, Vol. 219, pp. 461~475.
- (8) Tamura, K. and Tajima, J., 2004, "Optimization of Open-Die Forging Process Design to Ensure Homogeneous Grain Size Refinement of Cast Structures by Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis," *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 218, No. 9, pp. 931~946.
- (9) Lee, Y.S. and Kwon, Y.C., 2007, "Analysis on Void Closure Behavior During Hot Open Die Forging," *Advanced Mat. Research*, Vol. 26-28, pp. 69~72.
- (10) Kwon, Y.C. and Lee, Y.S., 2007, "A Study on Cavity Closure Behavior During Hot Open Die Forging Process," *Trans of the Materials Processing*, Vol. 16, No. 4, pp. 293~298
- (11) Hatta, T. and Yoshida, H., 2011, "Application of Numerical Simulation Technology to Microstructure Control in Opendieforging," *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, Vol. 52, pp. 970~974.
- (12) Shivpuri, R. and Eruc, E., 1993, "Planning and Simulation of the Ring Rolling Process for Improved Productivity," *Int. J. Mach. Tools and Manuf.*, Vol. 33, No. 2, pp. 153~173.
- (13) Johnson, W. and Needham, G., 1968, "Experiments on Ring Rolling," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 10, pp. 95~113.
- (14) Kim, N.S., Machida, S. and Kobayashi, S., 1990, "Ring Rolling Simulation by the Three Dimensional Finite Element Method," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 30, No. 4, pp. 569~577.
- (15) Kim, K.H., Suk, H.G. and Huh, M.Y., 2007, "Development of the Profile Ring Rolling Process for Large Slewing Rings of Alloy Steels," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 187-188, pp. 730~733.
- (16) Cho, J.R. and Bae, W.B., 1998, "Analysis of the Cogging Process for Heavy Ingots by Finite Element Method and Physical Modelling Method," *J. of Materials Processing Technol*, Vol. 80-81, pp. 161~165.
- (17) Aksakal, B. and Osman, F.H., 2008, "Determination of Experimental Axial and Sideways Metal Flow in Open Die Forging," *Materials & Design*, Vol. 29, pp. 576~583.