

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.7.721>

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

열간자유단조와 링롤링공법을 이용한 풍력발전기용 도아프레임 개발

권용철* · 강종훈**† · 김상식***

* (재)경남테크노파크, ** 중원대학교, ***경상대학교

A Door Frame for Wind Turbine Towers Using Open-Die Forging and Ring-Rolling Method

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

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

(Received November 3, 2014 ; Revised May 14, 2015 ; Accepted May 19, 2015)

Key Words: Door Frame(도아프레임), Open Die Forging(자유단조), Forging Method(단조공법), Wind Turbine Tower(풍력발전기 타워), Finite Element Analysis(유한요소해석), Cost Saving(원가절감)

초록: 풍력 발전기용 기계부품은 주로 자유단조 공법을 통하여 제조된다. 본 연구는 풍력발전기용 타워 부품인 도아프레임의 제조하기 위한 발전된 단조공법에 관한 연구이다. 개발된 단조공법의 장점은 원소재 회수율을 높임에 따라 원소재 투입량을 줄임으로 제조원가를 낮춘다. 기존의 단조공법은 유압프레스를 이용하여 단조작업이 이루어지며 최종제품과 단조품의 형상 차이로인하여 많은 부분이 가공으로 제거된다. 하지만 제안된 단조공법은 열간 자유단조와 링롤링공법을 통하여 원소재 회수율을 높이게 된다. 새로운 공법의 유효성은 링롤링 블랭크의 치수와 밀접한 관련이 있기 때문에 유한요소해석을 통하여 블랭크의 치수를 최적화 하였다. 유한요소해석을 통하여 얻은 단조품의 치수는 시제품 생산을 통하여 검증하였다.

Abstract: The mechanical components for wind turbines are mainly manufactured using open-die forging. This research introduces an advanced forging method to produce the door frame of the tubular wind turbine tower. The advantages of this new forging method are an increase in the raw material utilization ratio and a reduction in energy cost . In the conventional method, the door frame is hot forged with a hydraulic press and amounts of material are machined out because of the shape difference between the forged and final machine products. The proposed forging method is composed of hot forging and ring rolling processes to increase the material utilization ratio. The effectiveness of this new forging method is deeply related to the ring rolled blank dimension before the final forging. To get the optimal ring rolled blank, forged shape prediction using the finite element analysis method was applied. The forged dimensions produced by the new forging method were verified through the first article production.

1. 서 론

신재생에너지 산업의 발달에 따라 풍력부품의 수요는 지속적으로 증가하고 있으나, 부품 생산이 보편화 됨에 따라 원가 경쟁력의 재고가 요구되고 있다. MW급 풍력발전기에 대부분 적용되는 타워

의 종류는 관형타워(Tubular tower)로 철판을 롤링하여 원형관을 만든 후 일정길이 단위로 플렌지를 이용하여 고정하는 방식이다. Fig. 1의 도아프레임(Door frame)은 타워의 출입구 역할을 하며 응력집중을 견디도록 원형관의 철판보다 두껍게 설계된다.⁽¹⁾

본 연구에서는 도아프레임의 단조공정에 있어 원소재 절감과 에너지 효율을 향상시키는 방법을

† Corresponding Author, jhkang@jwu.ac.kr
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

제시 하였다. 새로운 단조공법은 유압식 프레스와 링롤링을 이용하여 블랭크를 생산한 후 유압 프레스로 최종 형상에 근접하도록 성형하는 방법이다. 성형되는 제품은 기존 공정에 비하여 체적량이 적어 단조품의 중량을 줄일 뿐만 아니라 열간단조의 가열효율과 단조품의 기계적 성질 향상을 동시에 이룰 수 있다. 자유단조에 있어 형상 및 품질의 최적화를 통한 원가절감에 대한 연구는 지속적으로 이루어져 왔다. Dudra 등⁽²⁾은 자유단조에 있어 다른 금형과 빌렛 형상을 이용한 금속 유동(Metal flow)의 흐름에 대하여 연구하였고, Chol,⁽³⁾ Kim,⁽⁴⁾ Choi,⁽⁵⁾ Knap 등⁽⁶⁾은 유한요소법을 이용하여 자유단조 제품의 형상을 최적화하기 위한 연구를 수행하였다. 또한 최근에는 대형단조품의 가장 큰 문제인 내부 품질향상과 관련하여 내부 결함 압착과 단조품의 내부조직 예측에 대해서도 지속적인 연구가 이루어지고 있다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 본 연구의 최종제품의 치수정밀도와 직접적인 관련이 있는 링롤링 블랭크의 치수 설계에 대하여 Shivquri, Johnson, Kim 등⁽¹¹⁻¹⁴⁾에 의하여 연구되어 왔다.

본 연구에서는 이러한 선행연구에서 자유단조의 치수예측을 통한 원소재 절감을 도모할 뿐만 아니라, 최종 단조 단계에서 추가적인 변형을 부가하여 기계적 성질 향상을 구현함으로써 원가 절감과 품질향상을 동시에 이루고자 하였다.

2. 새로운 단조공법의 제안

도아프레임 제작을 위한 일반적인 공정은 Fig. 2(a)와 같이 슬래브(Slab) 및 잉곳트(Ingot) 소재

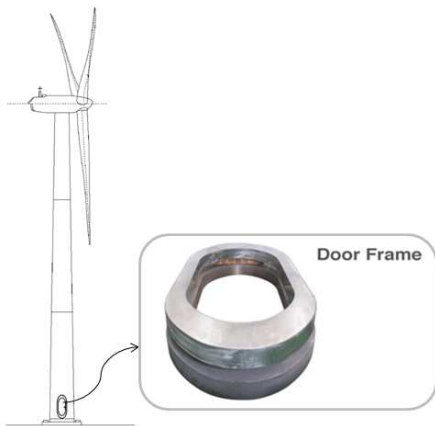


Fig. 1 The door frame of wind turbine tower

를 이용하여 업셋팅(Upsetting)과 코깅(Cogging)공정을 거쳐 도아프레임 치수 확보가 가능한 평판 모양으로 단조작업이 진행 된다. 단조 작업, 냉각, 화염절단과 노멀라이징(Normalizing) 열처리를 실시 한 후 기계가공으로 최종의 치수를 얻는다. 이러한 기존 공정은 단조소재의 내측과 외측을 상당부분 가공으로 제거해야 함으로 원소재 회수율(Raw material utilization ratio)이 낮을 뿐만 아니라 단조와 열처리를 위한 가열공정의 에너지 소모가 많은 단점이 있다. 그리고 최종 도아프레임의 크기가 클 경우 슬래브 소재를 사용하지 못하고 잉곳트 소재를 사용해야 함으로 잉곳트의 불건전부 제거에 따른 15% 이상의 추가적인 원소재 손실이 발생하게 된다.

기존 공법의 문제점을 개선하고 최종 제품에 보다 근접한 단조품을 생산하기 위한 단조공법을 Fig. 2(b)에 나타내었다. 그림과 같이 최종 제품에 근접한 형상으로 단조품을 생산하기 위하여, 도넛 형상의 블랭크(Donut shaped blank) 단조를 실시한 후 1250℃로 재가열을 실시하고 링롤링을 통해 원형의 링을 제작한다. 제작된 원형링을 유압프레스를 이용하여 반경방향으로 성형을 하면 Fig. 2(b)와 같은 최종 도아프레임에 근접한 치수의 단조제품을 얻을 수가 있다. 성형된 제품은 공냉으로 냉각 후 노멀라이징 열처리를 실시하고 기계가공을 통하여 최종 치수로 완성된다.

3. 롤링 블랭크의 설계

제안된 공법으로 도아프레임을 제조하기 위해서는 링형상 소재의 치수 선정이 필요하다. 링제품의 치수는 본 연구에서 제안하는 공법의 효과를 결정하는 중요한 인자로서 최적의 링롤링 블랭크 치수를 결정하는 기법이 요구된다. 링롤링

1	2	3	4	5	6
Material	Heating	Forging	Cutting	Normalizing	Machining

Fig. 2(a) Conventional forging method of door frame

1	2	3	4	5	6	7
Material	Heating	Forging	Heating.Rolling	Forging	Normalizing	Machining

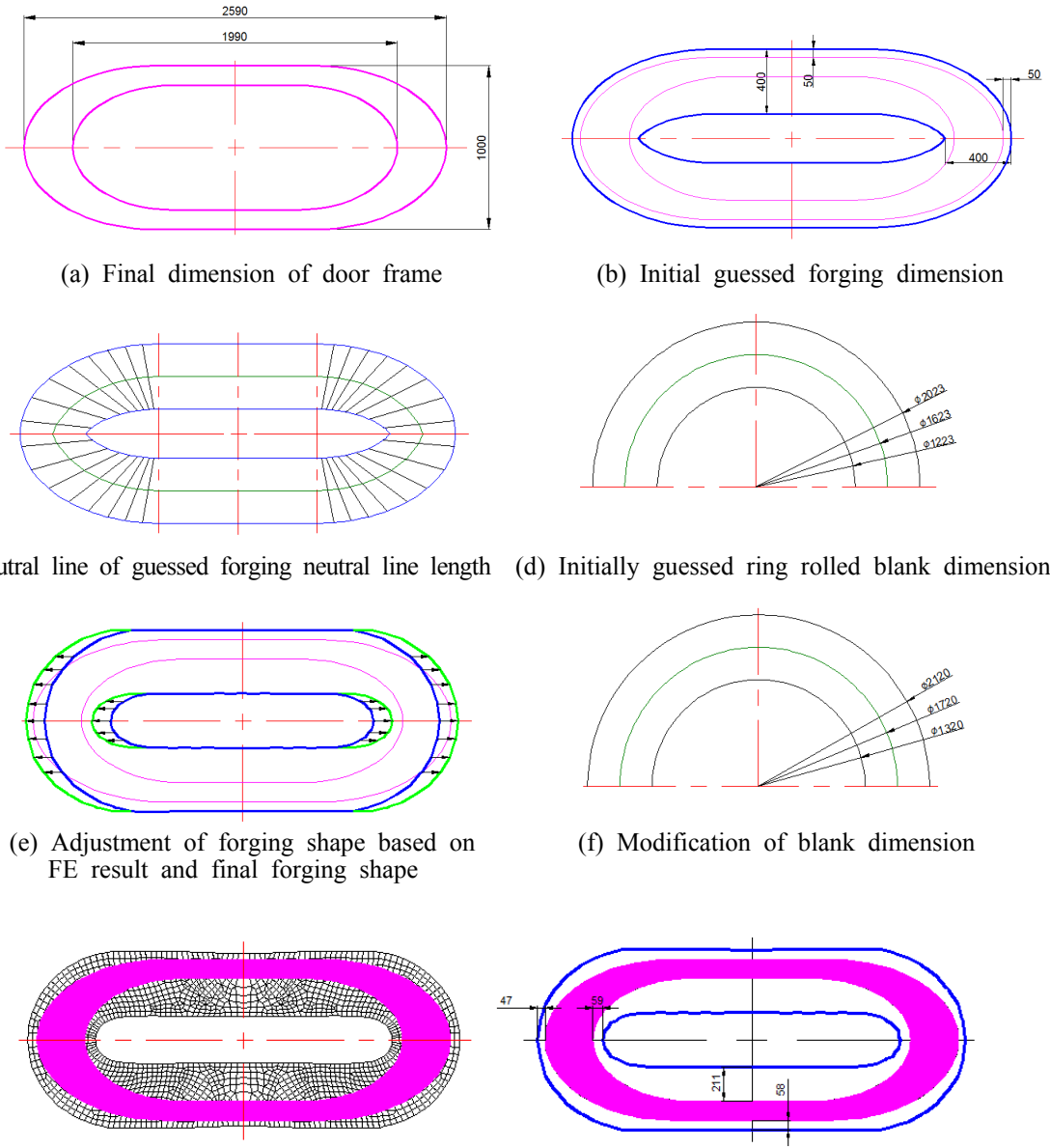
Fig. 2(b) Suggested forging method of door frame

제품의 치수를 구하는 일반적인 방법은 최종제품으로 가공이 가능한 최종 단조형상이 되도록 반복적인 유한 요소해석을 실시하여 예측이 가능하지만 설계시간이 과도하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 원소재 절감을 최대화 하고 설계시간을 단축하기 위하여 최종 제품의 단조형상에 대하여 초도 예측(Initial guessing)을 실시하고 중립선의 길이가 동일한 원형링을 도출한 후 유한요소 해석을 수행함으로써 원소재 절감율과 설계 시간 단축시키는 기법을 제시하였다.

3.1 링롤링 블랭크의 설계

Fig. 3(a)는 본 연구의 대상인 2MW급 풍력용 도아프레임의 최종 가공품의 치수를 나타내고 있으며 두께는 140mm 이다. 도아프레임은 장축 방향의 폭이 두껍고 단축 방향의 폭이 얇은 타원과 유사한 형상을 가진다. 이러한 도아프레임의 특징을 반영하여 링롤링 블랭크 설계시 장방향의 두께를 기준으로 단조여유치를 부여하여야 한다. Fig. 3(b) ~ Fig. 3(g)는 링롤링 블랭크의 최적화 설계를 통하여 최종제품을 구현하기 위한 수순을



(g) FE-analysis and verification of the dimension of FE-analysis result

Fig. 3 Ring rolled blank dimension decision procedure

도식적으로 나타내고 있다. 최종 단조품을 예측하는 방법은 Fig. 3(a)의 가공완성 치수에서 가공을 위한 여유를 내, 외경면으로 각각 부과하면 Fig. 3(b)와 같은 최종 단조 형상을 예측 할 수 있다. 가공여유는 프레스의 정밀도, 단조 종료온도 및 단조제품의 형상 난이도에 따라 경험적으로 결정되는데 본 연구에서는 외, 내측면에서 각각 50mm로 설정하였다.

예측된 단조형상으로부터 링롤링치수를 Fig. 3(c)와 같이 원형링에서 최종 단조형상으로 성형시 중립선의 길이 변화가 없다는 가정하에 중립선의 길이가 동일한 링롤링 형상을 Fig. 3(d)와 같이 얻을 수 있다. 중립선의 계산은 Fig. 3(c)와 같이 곡선부의 곡률의 중심에서 각도를 등분하여 내측과 외측 접점의 중간지점을 연결하여 구할 수 있다. 구하여진 중립선을 원형으로 환산한 후 단조제품의 살두께를 고려하여 내, 외경으로 각각 읍셋하면 Fig. 3(d)의 링롤링 단조품을 추측할 수 있다.

1차 예측된 원형링 치수를 이용하여 유한요소 해석을 수행하면 최종 단조형상과의 차이를 확인할 수 있으며, 해석결과에서 얻어진 곡선부의 윤곽선이 최종단조형상을 가공할 수 있는 여유를 확보하도록 Fig. 3(e)와 같이 장방향으로 단조형상을 이동하여 2차 해석을 위한 링롤링 블랭크의 중립선 길이를 구할 수 있다. 얻어진 중립선 길이를 이용하여 최종 링롤링 블랭크 치수를 Fig. 3(f)과 같이 선정한다.

Fig. 3(f)의 링롤링 블랭크를 이용하여 유한요소 해석을 실시하면 Fig. 3(g)와 같이 최종제품의 가공여유가 내, 외측으로 확보된 단조품을 얻을 수 있다. 만약 내, 외측의 가공여유의 차가 클 경우 Fig. 3(e)에서 Fig. 3(g)를 다시 수행하여 더 정밀한 예측값을 구할 수 있다.

3.2 유한요소해석

도아프레임은 S355NL(EN10225-3) C 0.18% 저탄소강 소재를 사용하며, 유한요소해석을 위한 경계조건을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 링 포밍 공정 후의 형상 변화를 검증하기 위하여 링롤링 공정 후 링 포밍 단조공정에 대해서만 유한요소해석을 수행하였다.

해석에 사용된 소프트웨어는 상용소성가공해석 프로그램인 DEFORM™-3D를 사용하였다. 해석 조건은 빌렛은 강점소성체(Rigid-visco-plastic model)로 금형은 강체(Rigid body)로 가정하여 강점소성

유한요소법을 적용하였다. 또한 링롤링 완료 후 블랭크의 표면 평균온도는 950℃ 정도이며 유압 프레스로 즉시 이송되어 롤링방향의 수직방향으로 성형된다. 성형 후 단조제품의 평탄도를 위하여 링단조의 직각방향으로 금형을 이용하여 단조 작업을 수행한다.

Fig. 5의 수순에 따라 예측된 최종단조제품의 중

Table 1 Material properties and process conditions for FE Analysis

Description	Value
Material	EN10025 S355NL
Billet temperature	950℃
Die temperature	100℃
Punch velocity	20mm/sec
Material model	Viscoplastic
Interfacial heat coefficient	0.7W/m℃
Material properties	Calculated by JMatPro

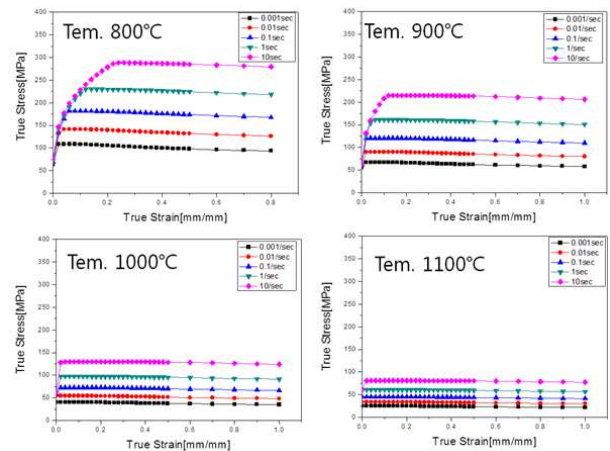


Fig. 4 Flow stress of S355NL calculated by JMatPro

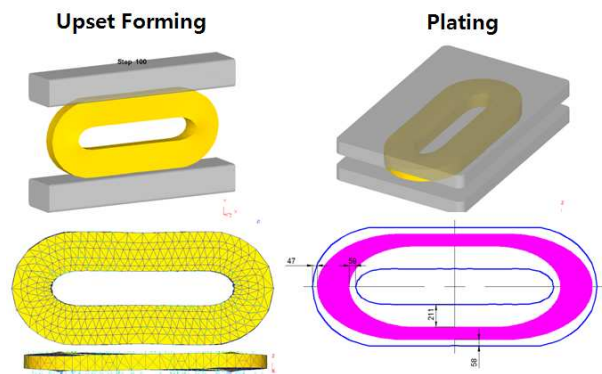


Fig. 5 FE Analysis results for new forging process

립선의 길이는 약 5100mm로써 이와 동일한 길이의 중립선의 직경은 $\phi 1623\text{mm}$ 이다. 살두께 400mm를 고려하면 $\phi 2023 \times \phi 1223$ 의 원형링이 된다. 이를 이용하여 유한요소해석을 통한 단조품 형상은 Fig. 3(e)와 같으며 외측의 길이는 2557mm로 최종제품의 가공여유를 만족할 수 없다. 최종제품의 여유를 만족시킬 수 있도록 곡률부분을 이동하여 구해진 단조품의 형상에서 중립선의 길이를 구하면 5405mm로, 이를 이용하여 링롤링 블랭크의 치수를 계산하면 Fig. 3(f)와 같이 $\phi 2020 \times \phi 1320$ 를 구할 수 있다.

예측된 링롤링 블랭크를 이용한 해석 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 해석결과에서 링 포밍 공정에서 밴딩 부위에 치수가 증가되는 현상이 확인되었고, 후공정인 평탄작업 후 가공여유를 확인한 결과 외측부위의 가공여유는 47mm, 내측은 58mm로 대형 제품의 치수 편차를 고려하여 만족할 만한 수준의 치수를 얻을 수 있다.

위의 결과를 통하여 제안된 링롤링 블랭크 설계기법은 2회의 유한요소해석을 통하여 만족할 만한 수준의 블랭크 치수를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 신공법의 검증

4.1 시제품 제작

제안된 공법의 타당성을 검증하기 위하여 S355NL SIAB 소재를 이용하여 실제 작업을 진행하였다. 링롤링 제품의 치수는 유한요소해석에 적용된 OD(2120) × ID(1320) × T(200)의 치수를 이용하였다. 링롤링을 위한 도넛형상의 블랭크를 생산하기 위하여 Fig. 6(b)와 같이 1250℃로 가열한 후 단련 공정을 진행 하였다. 링 포밍 공정을 진행하기 위해 1차 단조된 제품을 재가열하여 Fig. 6(c)와 같이 링롤링 공정을 수행한 후, Fig. 6(d)와 같이 링 포밍을 실시하였다. 링 포밍 전 링롤링 블랭크의 표면온도는 900 ~ 950℃로 분포하는 것으로 측정되었다. 실제제품에서도 계산치와 동일하게 단조 후 내경부 R 부에 두께가 커지는 변형 현상이 발생되었다. 평탄 작업을 진행하여 Fig. 6(e)와 같은 최종 단조품을 제조하였다.

4.2 단조품의 치수측정

단조 성형된 제품의 위치별 치수를 확인하기 위하여 Fig. 7과 같이 12 points에서 두께, 폭 및 장방향 외측

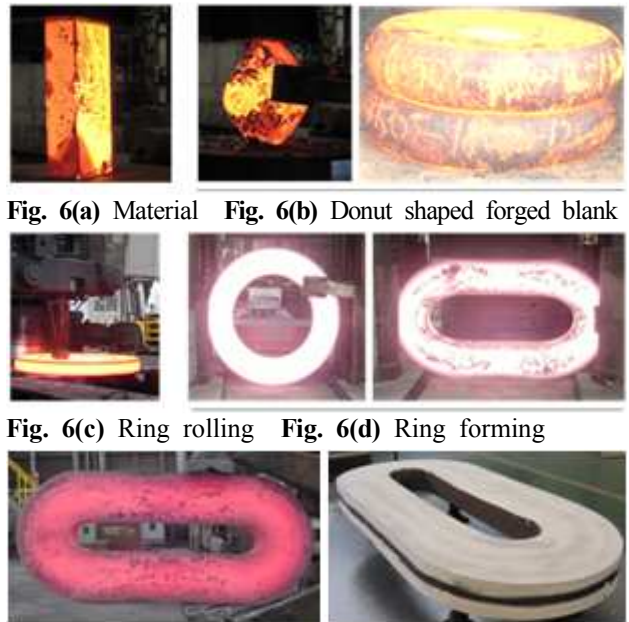


Fig. 6(a) Material Fig. 6(b) Donut shaped forged blank

Fig. 6(c) Ring rolling Fig. 6(d) Ring forming

Fig. 6(e) Forming shape Fig. 6(f) Dimension inspection

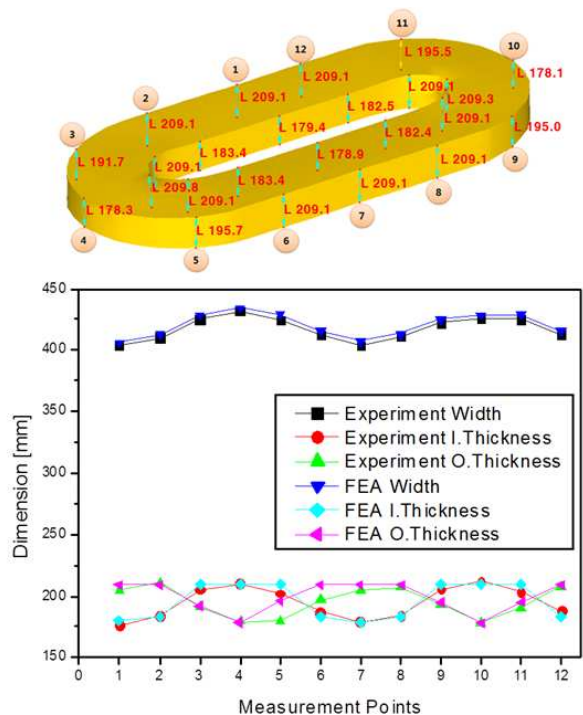


Fig. 7 Dimension comparison of analysis and inspection

길이를 측정하였다. 측정방법은 Fig. 5(f)와 같이 대형 단조품의 치수 측정방법으로 사용되는 정반 마킹법을 이용하였다. 측정결과 장방향 외측길이는 2692mm와 1872mm에 근접한 결과를 얻었다. 또한 단방향의 유한요소해석상의 길이는 1116mm였으나 실제 측정결과는 1122mm로 정밀한 치수 관리가 가능함을 확인 하였으며, 실 제품 적용 허용공차는 ±1% 내외로 단조

Table 2 Cost analysis for forging processes

Class	Material cost	Heating cost	Press	Rolling	Forging cost
Conv. Process	\$3720 4,650kg	\$371	\$260	-	\$4351
New Process	\$2680 3,350kg	\$348	\$400	\$260	\$3688
Diff.	\$1040 (-28%)	-\$23 (-6%)	\$140 (54%)	\$260	\$663 (-18%)

품 치수를 관리하고 있다. 측정된 결과와 유한요소해석을 통한 예측치를 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 초도 생산품의 치수 측정 결과를 통하여 제안 공법을 통한 단조품의 치수는 유한요소해석을 통하여 정밀하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

4.3 제안공법의 원가비교

제안 공법과 기존 공법으로 생산된 도아프레임의 제조원가를 Table 2 에 나타내었다. 원가 계산은 도아프레임을 생산하기 위해 필요한 원재료비, 에너지비용, 성형작업 비용을 고려하였다. 신공법으로 생산할 경우 원소재비는 28% 감소하지만, 링롤링과 프레스 작업 횟수가 증가함에 따라 에너지비용과 프레스, 링롤링 작업비용이 증가하였다. 공정수와 가열횟수가 증가하여도 원소재 비용이 절감됨에 따라 전체적인 생산원가는 감소함을 알 수가 있다.

5. 결 론

풍력발전기용 도아프레임의 단조형상을 최종가공형상에 근접하게 성형하여 제조원가를 절감을 위한 단조공법을 제안하였다. 제안공법을 유한요소해석과 시제품 생산을 통하여 다음과 같은 결론에 얻었다.

(1) 신단조공법의 효율성을 극대화 하기 위하여 링롤링 블랭크 치수의 최적화가 필요하다. 최적화를 위한 유한요소해석 횟수를 줄이기 위한 링롤링 블랭크 설계 기법을 제안 하였다.

(2) 제안된 기법을 통하여 링롤링 블랭크 치수 추론과 유한요소해석을 2회 실시한 후 적용 가능한 최종 단조형상을 결정할 수 있음을 확인하였다.

(3) 제안된 단조공법과 링롤링 블랭크 치수의 타당성을 검증하기 위하여 시험생산을 실시하였

으며, 유한요소 해석과 일치하는 변형유형과 치수를 확보할 수 있음을 확인하였다.

(4) 제안된 단조공법의 원가계산을 통하여 원소재 투입량을 28% 절감할 수 있으며, 추가 단조, 롤링 및 가열비용을 포함하더라도 18%의 원가절감을 이룰 수 있음을 확인하여 제안된 공법의 타당성과 효과를 검증하였다.

후 기

본 연구는 “산업통상자원부,” “한국산업기술진흥원,” “동남지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사업”으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Manwell, J.F. and Rogers, A.L., 2002, *Wind Energy Explained : Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons LTD, pp. 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) Hatta, T. and Yoshida, H., 2011, "Application of Numerical Simulation Technology to Microstructure Control in Open die forging," *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, Vol. 52, pp. 970~974.
- (11) 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.
- (12) Johnson, W. and Needham, G., 1968, "Experiments on Ring Rolling," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 10, pp. 95~113.
- (13) 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.
- (14) 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.