

알루미늄 다이캐스팅 임펠러 블레이드의 뒤틀림 최소화를 위한 공정 설계

Process Design for Warping Minimization of Aluminum Die Casting Impeller Blade

* #김대용¹, 추인호², 박성형³, 김지훈¹

* #D. Kim¹(daeyong@kims.re.kr), I. H. Choo², S. H. Park³, J. H. Kim¹

¹ 한국기계연구원 부설 재료연구소, ² 마그마 엔지니어링 코리아, ³ 일광정밀

Key words : Aluminum die casting, Impeller blade, Warping minimization, Process design, Numerical simulation

1. 서론

조선 산업은 가장 중요한 기간 산업으로 1999년 이후로 선박 발주량 기준으로 세계 1위의 자리를 구축하고 있으나, 다른 산업과 마찬가지로 부품 소재 기술은 선진국에 비해 85% 수준에 머무르고 있으며, 가격적인 측면에서는 저렴한 인건비를 바탕으로 한 중국의 급 성장세에 추격당하고 있는 형편이다. 따라서, 현재 조선 부품 산업은 기술 개발을 통한 고 품질화 뿐만 아니라, 중국과의 인건비 차이를 극복할 수 있는 원가 절감 노력을 경주해야 하는 입장이다. 선박용 송풍기에 장착되는 임펠러 블레이드는 장시간 회전하며 선박 내부, 특히 엔진 룸의 공기를 외부로 배출하는 기능을 수행하는 부품이다 (Fig. 1). 종래에는 알루미늄 중력 주조 공법으로 임펠러 블레이드가 생산되었으나 최근 알루미늄 다이캐스팅 공법으로 전환함으로써 원가 절감을 이루고자 하는 연구가 진행 중이다. 다이캐스팅 공법은 생산성이 높아 중력 주조 공법 대비 15% 이상의 원가 절감을 이룰 수 있다. 이 밖에도 다이캐스팅 품은 표면이 매끄럽고 치수 오차가 적어 후 가공량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 임펠러에 블레이드를 장착 시에 회전 균형을 맞추기 위하여 사용하는 무게 추의(주로 납을 사용) 양을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있다. 반면에 다이캐스팅 공법은 용액주입 시 유동이 빠르고 응고 또한 빠르게 이루어 지기 때문에 임펠러 블레이드와 같이 제품의 두께가 두껍고 뒤틀려 있는 형상의 경우 내부에 기포나 수축에 의한 결함이 발생하거나 열변형에 의한 뒤틀림이 발생할 소지가 매우 높다. 기포와 수축의 의한 결함과 열변형에 의한 뒤틀림을 줄이기 위해서는 정교하고 체계적인 주조 금형과 주조 방안을 포함하는 주조 공정의 최적화가 이루어져야 한다.

블레이드가 임펠러에 체결되는 목부위는 내구성이 요구되는 부위로 내부 결함이 ASTM 4급 이하로 관리되고 있다. 이는 게이트 방안과 주조 방안을 최적화 함으로써 해결할 수 있는데[1-2], 그 결과로 도출된 금형도면을 Fig. 2에 도시하였다. 블레이드의 뒤틀림은 유량 효율과 밀접한 관련이 있으므로 3mm이하로 관리되고 있다. 본 연구에서는 다이캐스팅 임펠러 블레이드의 열변형에 의한 뒤틀림을 최소화하기 위한 최적화 주조 공정을 도출하고자 하였다.

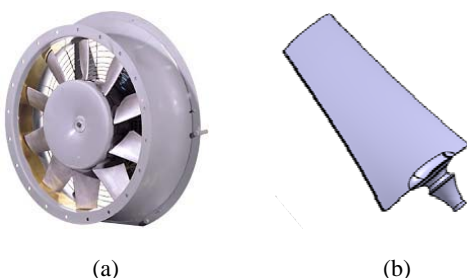


Fig. 1 Example of (a) an axial flow fan and (b) an impeller blade

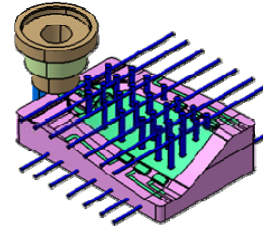


Fig. 2 Layout of die set for aluminum die casting impeller blade

2. 다구치 실험 계획

다이캐스팅 임펠러 블레이드의 열변형에 의한 뒤틀림 최소화를 위하여 다구치 실험계획법[3-9]을 이용하여 열변형에 영향을 미치는 다이캐스팅 공정 조건을 최적화하였다. 열변형에 미치는 제어인자로는 저속구간 이동시간, 냉각수 유량, 주입온도, 냉각수 유지 시간, 사출유량(고속), 취출 시간, 스프레이시간, 에어블로우 시간의 8 개 변수를 선정하였고, 각 제어인자 수준을 아래 Table 1 과 같이 정의하였다. 최적화를 위한 반응함수는 Fig. 3 에서와 같이 d1, d2, d3 와 d4 의 위치에서의 응고 후 뒤틀림 변형량으로 설정하였고 4 개 위치에서의 변형 산포를 잡음 인자로 선정하였다. 변형량은 작으면 작을 수록 좋으므로 반응특성은 망소 특성으로 하여 망소특성에 해당하는 S/N 비 정의를 사용하였다. 제어인자로 2 수준 1 인자와 3 수준 7 인자가 고려되었으므로 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교 배열표가 사용되었다. 직교 실험은 수치 해석을 통하여 이루어졌으며 주조공정 해석프로그램인 Magmasoft [11]이 이용되었다.

Table 1 Control factors and levels

Control factor	Unit	Level		
A Moving time of plunger (at low speed range)	sec	0.3167	0.5167	-
B Flow rate of cooling water	ℓ /min	0.3	0.6	1.0
C Furnace temperature	℃	630	650	670
D Holding time of cooling water	sec	5	25	45
E Flow rate (at high speed range)	cm ³ /s	15,904	19,085	22,266
F Die opening time	sec	35	40	45
G Spraying time	sec	0.5	1.0	1.5
H Air blowing time	sec	2	4	6



Fig. 3 Measured positions of output response

3. 최적화 결과

다이캐스팅 취출 시부터의 응고가 열변형에 주된 영향을 미친다고 가정하고 취출 시부터 응고 되는 과정에서의 응력해석을 통하여 변형율을 계산하여 열변형 정도를 계산하였다. 직교배열표 대로 계산한 변형량을 아래 Table 2 에 나타내었다. 직교배열표를 기준으로 하여 평균값과 S/N 비를 구하여 반응그래프를 그린 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. S/N 가가 최대화 되는 사양 A2, B3, C1, D3, E1, F3, G1, H3 이 최적 사양으로 선정되었다. 열변형에 가장 영향을 많이 미치는 인자는 냉각수 유지 시간과 취출 시간이었다. 최적사양에 대하여 직교표 실험결과로부터 예측된 평균값은 1.36mm 이며 S/N 비는 -3.45 이었다. 검증을 위하여 최적사양에 대하여 재해석을 수행하여 열변형 양을 계산하였으며 초기사양(전문가가 초기 선정한 사양, A2, B1, C3, D3, E1, F1, G2, H1)과 비교하였다. 그 결과를 Fig. 5 에 도시하고 Table 3 에 정리하였다. 재해석 결과의 값이 그리 크지 않으므로 직교배열표 실험이 비교적 오차없이 잘 수행되었음을 확인할 수 있었다. 또한 초기 사양대비 최적사양의 열변형량이 2.29mm 에서 1.47mm 로 감소함을 알 수 있었다. 특히 가장 변형량이 큰 d1 에서의 변형량이 초기사양의 경우 4.50mm 에서 최적사양의 경우 2.35mm 으로 대폭 감소하였다. 이는 목표 변형량 3.0mm 을 만족하는 조건이었으므로 본 연구에서 열변형 최소화를 위한 주조 공정 최적화가 적절히 이루어 졌음을 확인 하였다.

Table 2 Results of L₁₈ orthogonal matrix

Experimental number	Measured positions				Mean (mm)	S/N (dB)
	d1	d2	d3	d4		
1	4.406	2.597	1.511	1.453	2.492	-9.09
2	4.149	2.134	1.243	1.226	2.188	-8.24
3	2.723	1.824	1.119	1.054	1.680	-5.35
4	3.542	2.238	1.374	1.268	2.105	-7.43
5	3.100	2.036	1.255	1.170	1.890	-6.41
6	4.147	1.934	1.177	1.144	2.100	-8.07
7	2.603	1.779	1.077	1.025	1.621	-5.02
8	3.887	1.842	1.113	1.090	1.983	-7.53
9	4.000	2.405	1.480	1.371	2.314	-8.35
10	3.671	1.977	1.149	1.145	1.985	-7.29
11	3.526	2.315	1.387	1.298	2.131	-7.50
12	3.882	2.231	1.473	1.310	2.224	-8.01
13	4.161	2.031	1.212	1.185	2.147	-8.17
14	2.832	1.796	1.142	1.056	1.706	-5.54
15	3.737	2.398	1.444	1.354	2.233	-7.94
16	2.408	1.636	1.012	0.956	1.503	-4.34
17	4.012	2.337	1.484	1.350	2.296	-8.31
18	3.762	1.965	1.157	1.147	2.008	-7.44

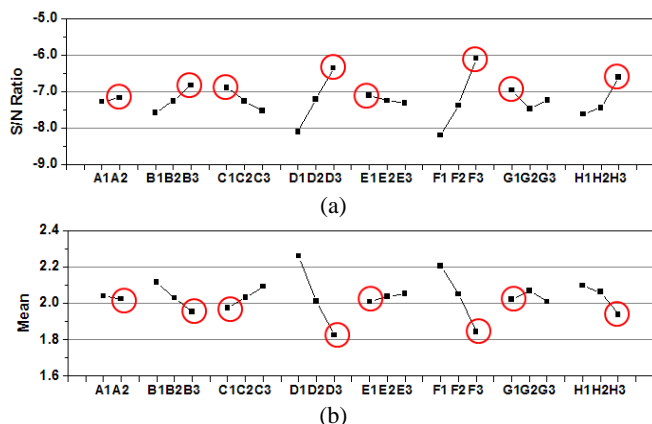


Fig. 4 Main effect plots of (a) S/N ratio and (b) mean value in response graph

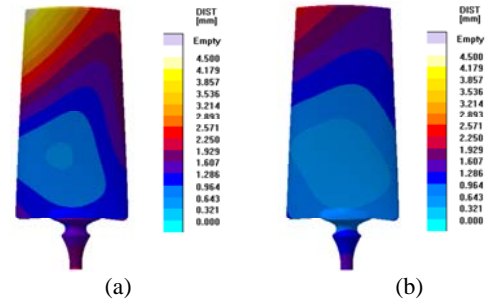


Fig. 5 Comparison of warping amount: (a) initial and (b) optimum design

Table 3 Confirmation analysis

	Estimation		Confirmation	
	S/N	Mean	S/N	Mean
Initial	-	-	-8.80	2.29
Optimum	-3.45	1.36	-4.13	1.47
Gain	-	-	4.67	0.82

4. 결론

송풍기용 임펠러 블레이드의 원가 절감을 위한 다이캐스팅 공법 적용에 있어서 열변형을 최소화하기 위한 공정 최적화 연구를 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 임펠러 블레이드 다이캐스팅 주조 공정 개발에 있어서 열변형 최소화하기 위한 공정 최적화 방법으로 다구치 실험계획법을 제시하였고, 수치해석을 통하여 공정을 최적화하였다.
- (2) 열변형 최소화를 위한 최적 주조 공정 조건은 A2, B3, C1, D3, E1, F3, G1, H3이었다. 특히, 냉각수 유지 시간과 취출 시간이 열변형에 영향을 가장 많이 미침을 확인하였다.
- (3) 다구치 실험계획법을 통하여 최적화를 수행한 결과 열변형을 3mm로 이하로 제어하였다.

참고문헌

1. 정순규, 추인호, 이정환, 김대용, “임펠러 블레이드용 다이캐스팅 금형의 게이트 방안 설계, 한국소성가공학회 춘계 학술대회 논문집, 435-436, 2009
2. 김대용, 추인호, 박성형, 이영선, “Taguchi 실험계획법을 이용한 다이캐스팅 임펠러 블레이드의 금형 설계”, 한국소성가공학회 금형가공 심포지움, 71-60, 2009
3. Syrcos, G. P., “Die Casting Process Optimization Using Taguchi Methods”, J. Mater. Proc. Technol., **135**, 68-74. 2003.
4. Wu, D. H. and Chang, M. S., “Use of Taguchi Method to Develop a Robust Design for the Magnesium Alloy Die Casting Process, Mater. Sci. Eng. A, **379**, 366-371. 2004.
5. Verran, G. O., Mendes, R. P. K., and Dalla Valentina, L. V. O., “DOE Applied to Optimization of Aluminum Alloy Die Castings”, J. Mater. Process. Technol., **200**, 120-125. 2008.
6. Sun, Z., Hu, H., and Chen, X., “Numerical Optimization of Gating System Parameters for a Magnesium Alloy Casting with Multiple Performance Characteristics”, J. Mater. Process. Technol., **199**, 256-264. 2008.
7. Tsoukalas, V. D., “Optimization of Porosity Formation in AlSi₉Cu₃ Pressure Die Castings using Genetic Algorithm Analysis”, Mater. Design, **29**, 2027-2033. 2008.
8. Taguchi, G., “Introduction to Quality Engineering”, McGraw-Hill, New York, 1998.
9. Wu, Y. and Wu, A., “Taguchi Methods of Robust Design”, ASME, New York, 2000.
10. MagmaSoft (version 4.4), Release Notes and Manual., 2006.