

# 다구치 실험계획법을 이용한 임펠러 블레이드 다이캐스팅의 내부 결함 최소화

김대용<sup>1, #</sup> · 추인호<sup>2</sup> · 이영선<sup>1</sup> · 김상우<sup>1</sup>

## Internal Defect Minimization of Die Cast Impeller Blade Using Taguchi's Design of Experiment

D. Kim, I. H. Choo, Y. S. Lee, S. W. Kim

(Received January 25, 2010 / Revised February 2, 2010 / Accepted February 9, 2010)

### Abstract

A die cast impeller blade has been developed in the effort on cost reduction in marine equipment industry. The purpose of this work is to optimize the die casting process using Taguchi's design of experiment for minimizing the internal defect of the die cast impeller blade. The experiments were preformed using the numerical simulation based on the L<sub>18</sub> orthogonal array. As a results, the internal defect size of the die cast impeller blade for optimal design was controlled less than 1mm.

**Key Words** : Impeller Blade, Die Casting, Internal Defect, Taguchi's Design of Experiment, Numerical Simulation

### 1. 서 론

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 바탕으로한 중국의 급성장세에 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 엔진룸의 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. 이밖에도 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 제품의 두께가 두꺼울 경우 내부에 기포나 수축에 의한 결함이 발생할 소지가 매우 높다. 블레이드가 임펠러에 체결되는 목 부위는 내구성을 요구하는 부위로 내부 결함이 2mm이하로 관리되고 있다. 그

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹  
2. 마그마 엔지니어링 코리아  
# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹,  
E-mail: daeyong@kims.re.kr

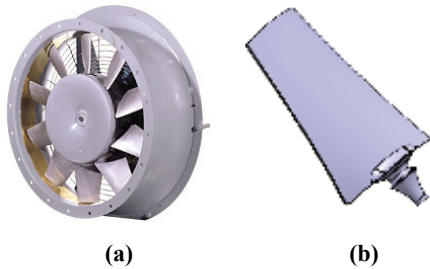


Fig. 1 Example of (a) an axial flow fan and (b) an impeller blade

러나 목 부위의 지름이 최대 80mm로 내부 결함을 줄이기 위해서는 정교하고 체계적인 주조 금형과 주조 방안을 포함하는 주조 공정의 최적화가 이루어져야 한다.

다이캐스팅 경우 시행착오와 같은 반복적인 방법으로는 공정 변수들이 공정에 미치는 영향을 신뢰성 있게 확보하기가 힘들다. 따라서 다이캐스팅 공정 최적화 문제에 실험 계획법(design of experiment, DOE)과 같은 강건설계 틀이 적용되고 있다[1~6]. 이는 실험 계획법이 고려하고자 하는 공정 변수들이 다이캐스팅 공정에 미치는 영향과 각 공정변수들의 최적 조건을 최소한의 실험만으로 신뢰성 있게 도출해 낼 수 있는 방법을 제공하기 때문이다. 특히 다구치 실험계획법[7~8]은 가장 널리 알려진 강건 설계 틀의 하나로서 자연의 유일한 해를 찾으려는 목적보다는 품질과 비용의 최적해를 구하려는 의도에서 출발된 것이며 제품 설계에서 가장 저렴한 생산가로 가장 안정적이고 신뢰성이 높은 성능을 주는 인자의 조합을 찾는 데 이용된다.

본 연구에서는 다이캐스팅 임펠러 블레이드의 목 부위 내부 결함을 최소화하고 품질의 안정성을 확보하기 다구치 실험계획법을 이용하여 최적화된 주조 공정을 도출하고자 하였다.

## 2. 다구치 실험 계획

다구치 실험계획법을 이용한 최적화 설계를 위해서는 제어 인자(또는 설계 인자, control factor)의 선정, 잡음 인자(noise factor)의 선정, 그리고 출력 반응 함수(output response function)의 식 정의 및 특성 정의의 과정이 필요하다.

임펠러 블레이드의 목 부위 결함을 최소화하기 위한 제어 인자로는 문제 부위의 내부 결함 생

Table 1 Definition of control factors

	Control factor	Unit	Geometry
A	Overflow	-	
B	Thickness of Gate 1 (G1)	mm	
C	Thickness of Gate 2 (G2)	mm	
D	Thickness of Gate 3 (G3)	mm	
E	Width of Gate 1 (G1)	mm	
F	Flow rate in cooling channel	l/min	
G	Off time in cooling channel	sec	
H	Pressure time	sec	

Table 2 Levels of control factors

Control factor	Level 1	Level 2	Level 3
A	O	X	-
B	1.5	3.0	4.5
C	0.0	1.5	3.0
D	1.5	3.0	4.5
E	30	32	34
F	0.3	0.6	1.0
G	0	35	70
H	(5)+1	(5)+6	(5)+11

성에 가장 영향을 많이 미치는 인자들을 미리 검토하여[9] Table 1과 같이 선택하였고, 최적화를 위한 제어 인자의 수준은 Table 2와 같이 정의하였다. 제어 인자에서 ‘A’인자인 오버플로우는 2 수준 인자로, 존재 유, 무로 설정하였으며, 나머지 7가지 인자는 3 수준 인자로 설정하였다. ‘B’와 ‘D’인자는 각 게이트 G1과 게이트 G3의 두께로써, 1.5mm에서 4.5mm까지 변화 시켰다. ‘C’는 게이트 G2의 두께로써, 0.0mm에서 3.0mm까지 변화 시켰다. 값이 0.0mm인 경우는 게이트가 단락되는 경우를 의미한다. ‘E’는 게이트 G1의 폭에 대한 변화이다. ‘F’와 ‘G’는 후속부에 위치한 냉각채널의 유량과 유지 시간이다. 이 변화량은 게이트의 냉각시간에도 영향을 끼치는 인자로 인식된다. ‘H’는 보압 유지 시간으로, 6초에서 16초까지 변화 시켰다.

잡음 인자로는 주조 공정시 환경요인으로 작업장의 온도를 선택하였고 계절을 고려하여 15, 20, 30℃로 설정하였다.

목 부위의 결함이 비정상 유동에 따른 공기 포집에 의한 기공(air porosity)과 응고 시 발생하는 수축공(shrinkage)에 의해 생성된다고 판단하고 기공과 수축공의 영향을 동시에 고려할 수 있는 출력 반응 함수를 찾고자 하였는데, 본 연구에서는 주조 공정 전산 모사 시 출력 값으로 얻을 수 있는 기포 포집량(air entrapment)와 잔류 액상량(retained melt)에 가중치를 고려하여 식 (1)과 같이 출력 반응 함수를 정의하였다.

$$y = w_1x_1 + w_2x_2 \quad (1)$$

여기서  $x_1$ 는 기포 포집량을  $x_2$ 는 잔류 액상량을 의미하며  $w$ 는 각각의 가중치를 나타낸다. 본 연구에서는 내부 결함에 기포 포집량과 잔류 액상이 동등하게 영향을 미친다고 가정하여  $w_1$ 과  $w_2$ 를 모두 0.5로 하였다. 출력 반응 함수의 정의 영역은 Fig 2에 도시된 대로 내부 결함 문제 부위로 설정하였다. 최적화 특성은 출력 반응 함수  $y$ 를 최소화하는 망소 특성으로 하였다. 다구치 실험계획법에서 망소 특성에서 사용된 S/N 비(signal to noise ratio)는 식 (2)와 같이 정의 된다. 잡음 인자  $n$ 개에 대한 출력 반응 함수  $y_i (i=1\sim n)$ 에 대해서,

$$S/N \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{1}{\bar{y}^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

여기서,  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$  이고  $\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}$  이다.

제어 인자로 2수준 1인자와 3수준 7인자가 고려되었으므로 최적화를 위한 직교표는 Table 3과 같이  $L_{18} (2^13^7)$ 를 사용하였다. 직교표에서 실험은



Fig. 2 The domain defined for the output response function

Table 3 Experimental plan using  $L_{18}$  orthogonal array

NO	A	B	C	D	E	F	G	H
1	o	1.5	0	1.5	30	0.3	0	1
2	o	1.5	1.5	3	32	0.6	35	6
3	o	1.5	3	4.5	34	1.0	70	11
4	o	3	0	1.5	32	0.6	70	11
5	o	3	1.5	3	34	1.0	0	1
6	o	3	3	4.5	30	0.3	35	6
7	o	4.5	0	3	30	1.0	35	11
8	o	4.5	1.5	4.5	32	0.3	70	1
9	o	4.5	3	1.5	34	0.6	0	6
10	x	1.5	0	4.5	34	0.6	35	1
11	x	1.5	1.5	1.5	30	1.0	70	6
12	x	1.5	3	3	32	0.3	0	11
13	x	3	0	3	34	0.3	70	6
14	x	3	1.5	4.5	30	0.6	0	11
15	x	3	3	1.5	32	1.0	0	11
16	x	4.5	0	4.5	32	1.0	35	1
17	x	4.5	1.5	1.5	34	0.3	35	11
18	x	4.5	3	3	30	0.6	70	1

전산 모사 해석으로 수행하였으며 주조공정 상용 해석 프로그램인 MagmaSoft [10]를 사용하였다.

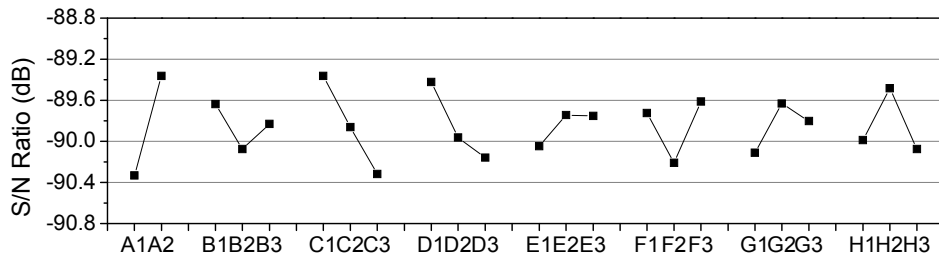
### 3. 최적화 결과

직교표의 각 실험 조건에 대하여 전산 모사 해석을 수행한 결과를 Table 4에 정리하였다. 최적화 사양을 선정하기 위하여 직교표 실험 결과를 토대로 계산된 각 제어 인자에 대한 S/N 비와 평균값의 반응 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 최적화 특성이 망소 특성이므로 S/N 비를 최대화 하는 인자를 최적 인자로 선정하였으며, 최종적으로 얻은 최적사양을 Table 5에 정리하였다. 최적 사양으로 선정된 설계안 중 특이한 사항은 게이트 G2의 경우는 단락 되었을 경우 내부 결함 제거에 유리함을 알 수 있었다.

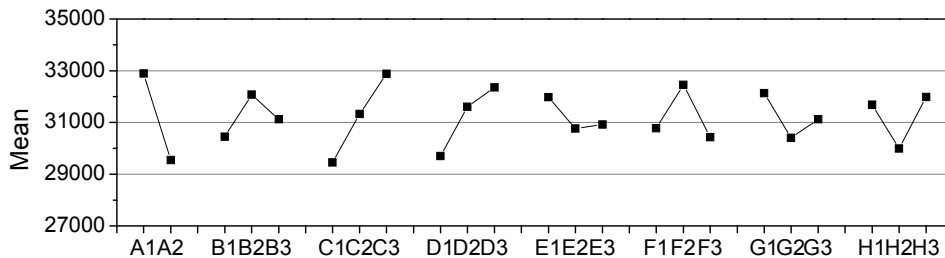
반응 그래프로부터 얻은 최적사양에 대하여 S/N비와 평균값에 대한 추정값( $\eta$ )을 계산하고, 최적사양에 대해 주조 공정 전산 모사 해석을 수행하여 그 값을 확인, 검증하였다. 아울러 다구치 방법에 의한 최적사양 선정 방법의 효과를 산출하기 위해서 그 값을 전 문가가 초기 설계한 사

Table 4 Results of L<sub>18</sub> orthogonal matrix

NO	15 °C		20 °C		30 °C		S/N ratio (dB)	Mean (mm <sup>3</sup> )
	Air entrapment (mm <sup>3</sup> )	Retained melt (mm <sup>3</sup> )	Air entrapment (mm <sup>3</sup> )	Retained melt (mm <sup>3</sup> )	Air entrapment (mm <sup>3</sup> )	Retained melt (mm <sup>3</sup> )		
1	1353.9	59960.1	1353.9	59918.1	1353.9	59960.1	-89.73	30650.0
2	3606.7	59341.1	3606.7	59395.2	3606.7	59343.7	-89.96	31483.3
3	8007.9	61259.6	8007.9	61259.6	8007.9	61259.6	-90.79	34633.7
4	5762.4	58623.3	5762.4	58620.2	5762.4	58750.0	-90.16	32213.5
5	4789.2	64828.5	4789.2	64828.5	4789.2	64828.5	-90.83	34808.8
6	9338.5	60863.2	9338.5	60863.2	9338.5	60868.7	-90.91	35101.8
7	263.4	61658.9	263.4	60982.8	263.4	62132.7	-89.81	30927.5
8	3159.4	63019.7	3159.4	63019.7	3159.4	63019.7	-90.39	33089.6
9	211.2	66104.8	211.2	66099.6	211.2	66122.5	-90.41	33160.1
10	360.4	56871.3	360.4	56871.3	360.4	56871.3	-89.13	28615.8
11	298.5	51433.1	298.5	51441.2	298.5	51440.0	-88.26	25868.3
12	6038.7	56932.2	6038.7	56903.2	6038.7	56903.2	-89.96	31475.8
13	584.6	52917.3	584.6	52637.5	584.6	52645.0	-88.52	26658.9
14	15837.0	54216.8	15837.0	54222.9	15837.0	54216.8	-90.89	35027.9
15	5024.7	52282.9	5024.7	52281.7	5024.7	52294.0	-89.14	28655.4
16	1019.9	54318.8	1019.9	54316.8	1019.9	54316.8	-88.84	27668.7
17	1890.7	53421.7	1890.7	53417.0	1890.7	53413.5	-88.84	27654.1
18	13730.9	54176.2	13730.9	54176.2	13730.9	55973.8	-90.70	34253.2
T	-	-	-	-	-	-	-89.85	31319.2



(a)



(b)

Fig. 3 Main effect plots of (a) S/N ratio and (b) mean value in response graph

**Table 5 Control factors for initial and optimum design**

Control Factor	Initial		Optimum	
	Level	Value	Level	Value
A	1	O	2	X
B	1	1.5	1	1.5
C	2	1.5	1	0.0
D	1	1.5	1	1.5
E	3	34	2	32
F	1	0.3	3	1.0
G	1	0	2	35
H	1	(5)+1	2	(5)+6

**Table 6 Confirmation analysis**

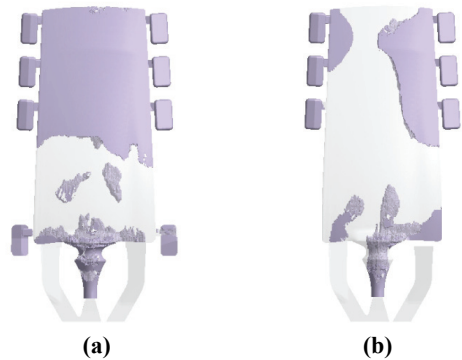
	Estimation		Confirmation	
	S/N (dB)	Mean	S/N (dB)	Mean
Initial	-89.9	31342.8	-89.9	31117.9
Optimum	-87.3	22205.7	-87.9	24894.9
Gain	2.6	-	2.0	-

양과 비교하였다. 초기사양과 최적사양에 대한 추정값은 직교표의 실험 결과를 근거로 하여 다음 식 (3)~(4)와 같은 선형식을 이용하여 계산하였다.

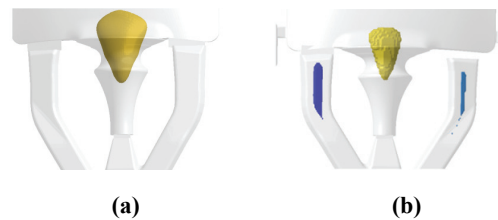
$$\eta_{initial} (S/N \text{ or Mean}) = A1 + B1 + C2 + D1 + E3 + F1 + G1 + H1 - 7T (S/N \text{ or MEAN}) \quad (3)$$

$$\eta_{optimum} (S/N \text{ or Mean}) = A2 + B1 + C1 + D1 + E2 + F3 + G2 + H2 - 7T (S/N \text{ or MEAN}) \quad (4)$$

여기서 T는 직교표 실험 전체에 대한 평균값이다. 초기사양과 최적사양에 대한 추정값과 확인값은 Table 6에서 비교되었다. 추정값과 확인값이 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 다구치 방법에 의해 선정된 최적 설계 사양이 신뢰할 만하다는 것을 보여주는 것이다. 초기사양과 비교하였을 때 최적사양의 S/N 비와 평균값이 우수하여 목표한 대로 최적화가 이루어 졌음이 확인 되었다. 특히 최적사양의 S/N 비의 경우 초기 사양 대비 2.0dB 이득 값을 보였는데, 이는 최적 사양이 품질 산포에도 강건한 설계임을 의미한다. 이는 Fig. 4-5를 통해서도 확인할 수 있는데 초기



**Fig. 4 The air entrapment for (a) initial and (b) optimum design**



**Fig. 5 The amount of retained melt for (a) initial and (b) optimum design**

사양과 최적사양에 대해서 기체 포집과 잔류 액상에 대한 양상을 전산 모사 해석 결과 초기 사양에 비해 최적 사양에서 현저히 감소되었음을 확인할 수 있다. Fig. 4는 임펠러 블레이드 목부위에서 기체가 완전히 고립되는 최초 순간을 보여준다. 초기사양의 경우 임펠러 체결부에서 기체가 고립될 때의 용액주입 공정 시간은 1377ms이고 충전율이 52.5%인 것에 비하여 최적사양의 경우 용액주입 공정 시간이 1396ms이고 충전율이 75.0%이었는데, 이는 최적사양이 목부위에서 기포에 의한 내부 결함이 생성될 확률이 적음을 나타낸다. 아울러 Fig. 5에서 도시된 대로 충전 완료 후 잔류 액상의 양 또한 초기 사양 대비 최적 사양이 적은 것을 확인할 수 있다.

최적사양으로 설계된 금형의 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 실제 다이캐스팅 공법으로 제작한 임펠러 블레이드의 목부위 결함 양상을 Fig. 7에 나타내었다. 초기사양으로 주조한 임펠러 블레이드 경우 최대 내부 결함 크기가 약 5mm 인데 반해 최적사양으로 주조한 경우 최대 내부 결함 크기가 약 1mm 이하로 관찰되었고, 이로써 주조 공정의 최적화가 적절히 이루어 졌음을 확인할 수 있었다.

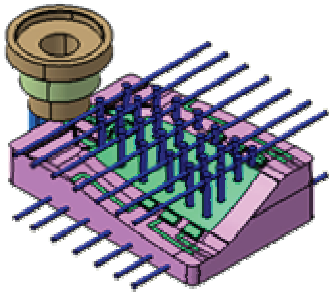
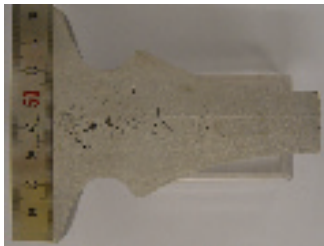


Fig. 6 Layout of die set for optimal design



(a)



(b)

Fig. 7 The cross section of defect zone in die cast impeller blade for (a) initial design and (b) optimal design

#### 4. 결 론

조선 송풍기용 임펠러 블레이드의 원가 절감을 위한 다이캐스팅 공법 적용에 있어서 다구치 실험계획법을 이용한 주조 공정 최적화 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 임펠러 블레이드 다이캐스팅 주조 공정 개발에 있어서 목 부위 내부 결함을 최소화하기 위한 방안으로 다구치 실험계획법을 제시하였다.

(2) 다구치 실험계획법을 통하여 최적화를 수행

한 결과 목부위의 내부 결함 크기가 1mm로 이하로 제어 되었다.

(3) 최적 주조 공정 조건은 A2, B1, C1, D1, E2, F3, G2, H2이었고 특히, 게이트 G2의 경우는 막는 것이 내부 결함 최소화 측면에 유리함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] W. J. Jeong, H. P. Yoon, S. K. Hong, I. M. Park, 2000, Optimal gating system design of escalator step die casting part by using Taguchi method, J. Kor. Foundrymen's Soc., Vol. 20, pp. 97~103
- [2] G. P. Syrcos, 2003, Die casting process optimization using Taguchi methods, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 135, pp. 68~74.
- [3] D. H. Wu, M. S. Chang, 2004, Use of Taguchi method to develop a robust design for the magnesium alloy die casting process, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 379, pp. 366~371.
- [4] G. O. Verran, R. P. K. Mendes, L. V. O. Dalla Valentina, 2008, DOE applied to optimization of aluminum alloy die castings, J. Mater. Process. Technol., Vol. 200, pp. 120~125.
- [5] Z. Sun, H. Hu, X. Chen, 2008, Numerical optimization of gating system parameters for a magnesium alloy casting with multiple performance characteristics, J. Mater. Process. Technol., Vol. 199, pp. 256~264.
- [6] V. D. Tsoukalas, 2008, Optimization of porosity formation in  $AlSi_9Cu_3$  pressure die castings using genetic algorithm analysis, Mater. Design, Vol. 29, pp. 2027~2033.
- [7] G. Taguchi, 1998, Introduction to Quality Engineering, McGraw-Hill, New York.
- [8] Y. Wu, A. Wu, 2000, Taguchi Methods of Robust Design, ASME, New York.
- [9] S. K. Chung, I. H. Choo, J. H. Lee, D. Kim, 2009, Gate design to reduce porosity in high pressure die cast impeller blade, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., Incheon, South Korea, pp. 435~436.
- [10] MagmaSoft(version 4.4), 2006, Release Notes and Manual.