

# 선박용 프로펠러 주조시 주형 지그 최적화

박상철<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>거제대학교 조선해양공학과

## Optimization of Flask Fixtures for Marine Propellers Castings

Sang-Chul Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Koje College

**요 약** 본 연구는 프로펠러 주조시 사용되는 지그를 개선하기 위하여 수행된 것으로, 주조시 주형을 지지하는 강관 지그에 발생하는 응력을 실험적, 해석적인 방법을 사용하여 평가한 결과 주형의 높이방향 변형을 방지하기 위하여 사용된 수직 지그는 작용하는 응력수준이 낮고 주형 상부 지지대에 추가적으로 하중을 가하고 있기 때문에 주형에 적용할 필요가 없다. 또한 주형의 회전을 방지하기 위하여 수평방향으로 설치한 측면 강관 지그도 작용하는 응력수준이 낮아 부착할 필요가 없으며, 주형 모서리 부분에 설치한 강관 지그는 압축력이 크게 작용하는 상부 주형 강관 지그를 제외하고 하부 주형에 설치된 강관 지그는 적용할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

**Abstract** This work has been performed to evaluate the strength of fixtures, which were attached to outer surface of propeller flask to prevent transient movement during filling and cooling stages at Ni-Al-Bronze casting of large marine propellers. Experimental work was carried out to evaluate forces exerted on flask fixtures by measuring strain changes of fixtures due to thermal expansion and contraction during casting processes. Numerical analyses were also made to verify the experimental results and finally to evaluate the validity of arrangement of flask fixtures for casting of marine propellers.

**Key Words** : Propeller, Flask, fixture, Casting, Heat transfer, Stress & strain measurement

### 1. 서 론

최근 국내 조선산업의 경쟁력이 전 세계적으로 크게 향상되어 선박생산량이 크게 증가함에 따라 선박의 추진 장치인 프로펠러에 대한 수요도 더불어 크게 증가하고 있다. 선박용 대형 프로펠러는 주형 제작 및 설치, 주형 건조, 중차 및 압탕 설치[1], 용탕 주입 및 응고, 주형 해체와 같은 일련의 작업과정에 의해 제작되는데, 이러한 주조작업에서 주형에 용탕 주입시 용탕의 유출 및 주형의 움직임을 방지하기 위하여 관습적으로 많은 지그를 사용하여 주형을 고정하고 있다.

주형에 용탕이 충전되기 시작하면 용탕의 열에너지가 주위로 전달되어 주형은 팽창, 수축을 하게 되며 이 과정에서 주형의 변형을 제어하기 위하여 주형의 측면, 끝부

분 모서리에 대형 강관을 부착하여 고정하고, 상/하부 주형을 합형한 경계부분은 충진에 따른 용탕의 분출을 방지하기 위하여 소형 바(bar) 형태의 지그를 합형면에 따라 부착하여 주조작업을 수행하고 있다.

강관 지그는 크기가 크고 무거워서 운반, 설치 및 제거 시 많은 작업시간과 작업자의 안전에 문제가 발생하고 있으며, 소형 지그는 설치 개수가 너무 많아 설치 및 제거에 너무 많은 작업시간이 소요되어 주조작업의 능률을 향상시키는데 큰 걸림돌로 작용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 고정 지그를 개선하기 위하여 용탕의 충진 및 응고시 지그에 발생하는 응력을 실험적인 방법과 수치적인 방법을 사용하여 평가하고 이를 토대로 적절한 고정 지그를 적용하여 작업환경 개선과 주조작업의 능률을 향상시키고자 하였다.

\*Corresponding Author : Sang-Chul Park

Tel: +82-10-8535-1397 email: scpark@koje.ac.kr

접수일 12년 06월 08일 수정일 12년 08월 07일

게재확정일 12년 08월 09일

## 2. 실험방법

### 2.1 주조작업

선박용 대형 프로펠러는 일반적으로 Fig. 1과 같은 격자형 철구조물과 시멘트로 구성된 상부, 하부 주형을 각각 제작하여 건조, 합형한 후 중자 및 작업대 설치가 완료되면 가열로에서 가열된 용탕을 레이들(ladle)을 사용하여 주형 옆에 설치된 저장소(pouring basin)에 임시 저장한 후 용탕이 안정화되면 스톱퍼(stopper)를 개방하여 Fig. 2와 같이 하부범으로 용탕을 주형 내부로 충전하여 생산하고 있다.

용탕의 합금성분은 Ni-Al-Bronze로서 항복강도 250MPa (N/mm<sup>2</sup>), 인장강도 610MPa, 연신율 16%, 비중 7.6g/cm<sup>3</sup>, 수축율 8%이며 화학성분은 Table 1에 나타내었다.



[그림 1] 프로펠러 하부 주형 형상  
[Fig. 1] Configuration of lower propeller flask



[그림 2] 프로펠러 주조과정  
[Fig. 2] Casting process of a propeller

### 2.2 현장실험

주조작업시 용탕의 충전 및 응고에 따른 주형의 팽창과 회전을 고정하기 위하여 주형에 지그를 부착하고 있다. 충전이 시작되면 용탕 열에 의하여 철구조물 주형은 팽창, 수축을 하게 되며 이에 따라 주형에 부착된 지그에

는 응력이 작용하게 된다. 이러한 응력의 변화를 평가하기 위하여 실제 현장 주조작업시 실험을 수행하였다. 실험대상은 날개 4개, 직경 9,900mm, 피치 6,606mm, 주입중량 91.6톤인 프로펠러이며 주조시 용탕의 출탕온도는 1,240℃, 주입온도는 1,130℃, 충전 완료시간은 충진이 시작된 후 약 8분, 탈사까지는 약 3~4일이 소요되었다.

주조시 시간이 경과함에 따라 지그에 작용하는 응력의 변화는 스트레인 게이지(strain gauge)를 사용하여 측정하였으며, 스트레인 게이지는 프로펠러 주형이 cyclic symmetry이므로 4개의 날개 주형 중에 1곳에 집중하여 Fig. 3과 같이 지그 중앙부 표면에 부착하였다. 변형률 변화는 Fig. 4에 나타난 strain indicator를 사용하여 주형에 용탕이 주입되기 시작한 때부터 충진이 완료된 후 냉각이 서서히 진행되어 냉각이 완료되는 약 70시간 동안 일정한 시간간격으로 측정하였으며, 이 때 시간이 경과함에 따라 지그에 작용하는 응력은 측정된 변형률로부터 다음과 같은 계산식  $\alpha_x = E \cdot (\epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_y) / (1 - \nu^2)$ ,  $\alpha_y = E \cdot (\epsilon_y + \nu \cdot \epsilon_x) / (1 - \nu^2)$ , ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ : x, y방향 strain, E: Young's modulus,  $\nu$ : Poisson ratio)을 사용하여 평가하였다[2].

[표 1] Ni-Al-Bronze 합금의 화학성분(%)  
[Table 1] Chemical compositions of Ni-Al-Bronze alloy(%)

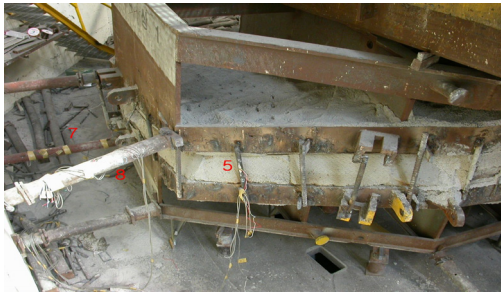
Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Zn	Sn	Pb
78.0	9.3~9.5	4.6~4.9	4.6~4.9	0.7~1.2	~0.5	~0.03	~0.02



(a) 스트레인 게이지 #1, #2, #3



(b) 스트레인 게이지 #6



(c) 스트레인 게이지 #7, #8

[그림 3] 주형에 부착된 스트레인 게이지  
[Fig. 3] Strain gauges attached on the outer surface of flask fixtures

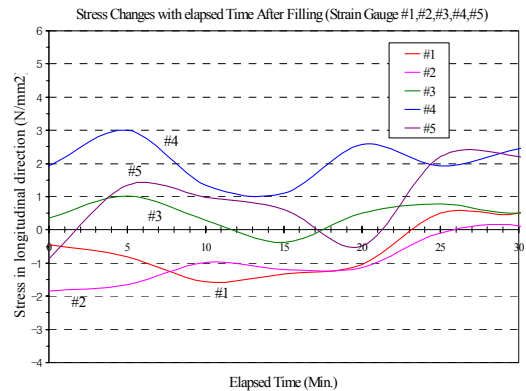


[그림 4] 변형률 측정 장비  
[Fig. 4] Strain indicator for measurement

### 2.3 실험결과

우선 주형 내부로 용탕이 주입되기 시작하여 30분이 경과할 때까지 용탕의 충전 및 응고에 의하여 지그에 발생하는 응력의 변화를 평가하였다. 시간이 경과함에 따라 상부, 하부 주형의 경계부분을 고정된 지그에 작용하는 길이방향 응력 변화를 Fig. 5에 나타내었으며 그림에서 -는 압축, +는 인장응력이 작용한다는 것을 의미한다. 용탕 주입시 주형에 작용하는 하중은 용탕에 의한 열하중과 용탕이 충전되는 과정에서 주형에 작용하는 동적인 하중 그리고 충진이 완료된 후 용탕 표면이 응고되기 전까지 주형면에 작용하는 정수압으로 나눌 수 있다. 그러나 주형의 높이가 높지 않고 용탕이 충전되면 바로 표면에서 냉각이 진행되므로 용탕에 의한 정수압은 영향이 없으며 또한 충진이 주형 하부로부터 서서히 진행되기 때문에 용탕이 주형에 가하는 동적인 압력은 무시할 수 있다. 실험결과에 의하면 충진이 완료된 후 시간이 경과함에 따라 주형에 부착된 지그에 작용하는 응력수준은  $-1.9 \sim 2.4 \text{N/mm}^2$ 로 낮고 열전달에 의하여 용탕 표면이 먼저 응고되기 시작하므로 지그가 파손되어 용탕이 주형

외부로 유출되는 일은 없다는 것을 알 수 있다. 또한 상부 구조물에 하중을 추가적으로 가하여 주형의 수직방향 변위를 구속하고 있으므로 상/하부 주형의 경계부분을 고정된 지그는 적용할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

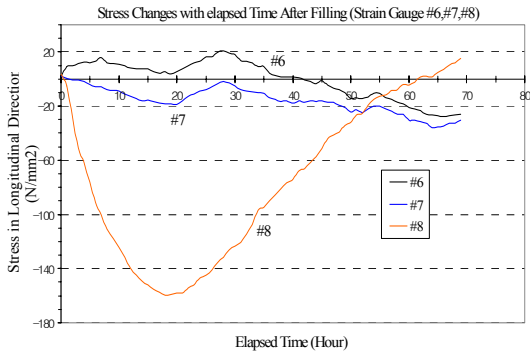


[그림 5] 주조후 시간에 따른 지그 응력변화  
[Fig. 5] Longitudinal stress changes at fixtures with elapsed time after filling

한편 용탕의 충전 및 응고시 주형의 움직임을 구속하기 위하여 주형 날개마다 측면부에 1개, 끝부분 모서리에 상, 하 각각 2개씩 총 5개, 전체 20개의 강관 지그를 사용하여 주형을 지지하고 있다. 이러한 강관 지그에 용탕의 충전 및 응고에 따라 발생하는 변형률 변화를 측정하였으며 측정된 값을 응력으로 환산하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 주형 측면에 수평하게 부착된 강관 지그(strain gauge #6)에는 처음에 인장응력이 작용하다가 시간이 충분히 경과하면 압축응력이 작용하게 되며 전체적으로 낮은 수준,  $-24.5 \sim 19.6 \text{N/mm}^2$ 의 길이방향 응력이 작용함을 알 수 있다. 측면 강관 지그는 직경 114.3mm, 두께 4.5mm, 길이 2m이상이 되어 지그 설치 및 제거작업으로 생산성 저하 및 안전성에 문제가 발생하고 있는 것을 고려하면 측면부에 강관 지그를 부착할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

반면에 주형 끝부분 모서리에 부착된 강관 지그(strain gauge #7, #8)는 응고가 진행됨에 따라 주형은 열전달에 의하여 팽창하게 되고 이에 따라 파이프 지그에는 압축 응력이 작용하게 된다. 이러한 압축응력은 부착된 상, 하부 지그에 따라 다르며 하부 주형에 설치된 강관 지그(strain gauge #7)에는  $-37.2 \sim 0 \text{N/mm}^2$ 의 압축응력, 상부 주형에 설치된 강관 지그(strain gauge #8)에는  $-160.7 \sim 14.7 \text{N/mm}^2$ 의 압축, 인장응력이 작용함을 알 수 있다. 즉 용탕 충진이 시작되어 약 20시간 경과한 시점에 상부 주

형에 설치된 강관 지그에 Table 2와 같이 최대 25.4톤의 압축력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 이러한 압축력은 용탕의 열에너지가 시간이 경과함에 따라 주형으로 전달되어 주형이 팽창함으로써 강관 지그에 압축력이 작용하게 된 것으로 이로서 주형에 용탕이 충전되는 과정에서 발생하는 여러 요소에 의한 영향은 크지 않은 것을 알 수 있다.



[그림 6] 주조후 시간에 따른 지그 응력변화  
[Fig. 6] Longitudinal stress changes with elapsed time (strain gauge #6, #7, #8)

[표 2] 충전후 발생하는 최대 길이방향 응력  
[Table 2] Max. longi. stresses after filling

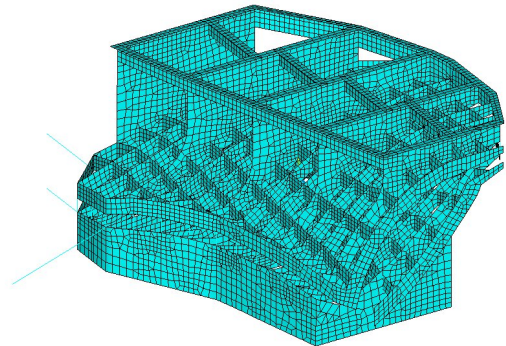
	Strain gauge no.	최대응력 (N/mm <sup>2</sup> )	최대 작용력(Ton)
주형 측면	6	-24.5	-3.87
	7	-37.2	-5.89
	8	-160.7	-25.44
상, 하 주형 경계면	1	36.2	2.61
	2	76.4	5.51
	3	78.4	5.51
	4	37.2	2.68

주형과 강관 지그는 서로 연속체가 아니고 임시로 고정, 연결되어 있기 때문에 용탕의 열하중이 강관 지그로 직접 전달되는 양은 적으며, 작업자의 작업성을 고려하면 강관의 크기로 인하여 생산성 향상 및 안전에 어려움이 있으므로 위의 실험결과에 따라 압축력이 크게 작용하는, 상부 주형에 연결된 2개의 강관 지그(strain gauge #8)를 제외하고 하부 주형에 연결된 2개의 강관 지그는 적용할 필요가 없다는 것을 알 수 있다. 한편 상부 주형의 강관 지그에는 비교적 높은 최대응력(160.7N/mm<sup>2</sup>)이 작용하나 강관의 인장강도(SGP 강관, 인장강도 294N/mm<sup>2</sup> 이

상)에 비해 작으므로 안전하다고 할 수 있으며 일정 시간 동안 높은 압축응력이 작용하므로 주형을 설치할 때 주의할 필요가 있다.

### 3. 수치해석

프로펠러 주형에 용탕이 충전 완료된 후 주형으로 열이 전달됨에 따라 주형은 팽창 및 냉각과정을 동반하며 이 때 주형에 발생하는 온도분포 및 열응력을 수치적인 방법으로 평가하였다[3,4,5]. 수치해석은 유한요소해석 범용프로그램인 ANSYS를 사용하여 열전달, 열응력 해석을 수행하였으며[6,7], 프로펠러 형상이 반경 위치에 따라 곡률과 두께가 다르기 때문에 주형을 형상화하기가 쉽지 않으나 해석을 단순화하기 위하여 plate, beam 요소를 사용하여 Fig. 7과 같이 강관 지그를 포함하는 프로펠러 주형을 강구조물로 모델링하였다. 열응력해석은 충전이 완료된 프로펠러 용탕이 체적이 크고 냉각이 완료되기까지 오랜 시간이 소요되기 때문에 정상상태로 가정하여 uncoupled thermal analysis를 수행하였다.



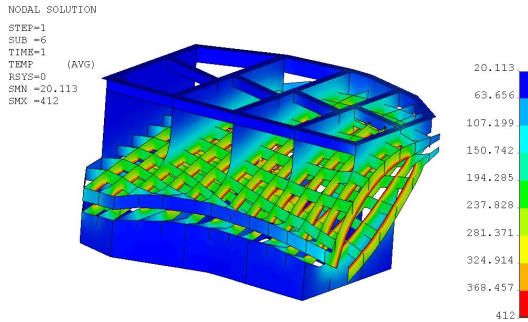
[그림 7] 프로펠러 주형 유한요소해석 모델  
[Fig. 7] Finite element analysis model for flask and fixtures

충진이 완료된 후 온도분포가 정상상태에 도달했을 때 주형 구조물 내부 전체 모서리에 초기 열하중을 가하여 열응력해석을 수행하였으며, 해석결과로 Fig. 8(a)에 정상상태에서의 온도분포, Fig. 8 (b)에 용탕의 충전 후 냉각 과정에 주형에 발생하는 전체 변형양상을 나타내었다. 해석결과 온도분포와 변형양상은 별다른 특징 없이 열팽창에 의한 변형양상을 나타내고 있으며, 강관 지그에 작용하는 반력을 평가한 결과 측면 강관 지그(strain gauge #6)에는 2.31톤, 주형 모서리 하부에 부착된 강관 지그(strain gauge #7)에는 -4.72톤 그리고 상부에 부착된 파이프 지그(strain gauge #8)에는 -14.5톤이 작용함을 알 수

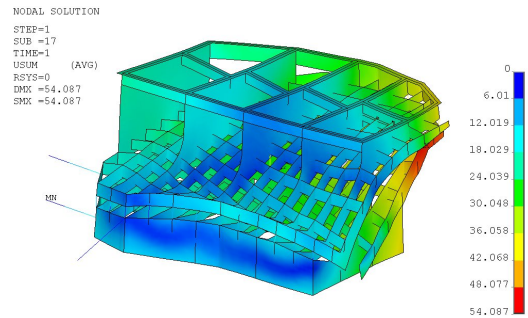


있다. 이를 실험결과와 비교해 보면 주형 상부에 부착된 강관 지그(strain gauge #8)에 작용하는 압축력에서 다소 차이가 발생하고 있으나 다른 강관 지그에서는 실험결과와 유사한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

용할 필요가 있으나, 주형 하부에 설치한 강관 지그는 적용할 필요가 없다.



(a) 온도분포



(b) x, y, z방향 변위

[그림 8] 프로펠러 주형 유한요소해석 결과  
[Fig. 8] Finite element analysis results for flask and fixtures

#### 4. 결론

프로펠러 주조시 주형을 고정하기 위하여 사용되는 지그를 최적화하기 위하여 실험적, 수치적인 방법을 사용하여 타당성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

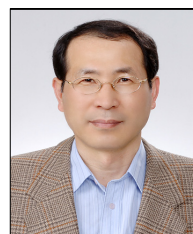
- 1) 용탕의 유출을 방지하기 위하여 사용된 지그는 주조시 작용하는 최대 응력이  $2.4\text{N/mm}^2$ 로 낮기 때문에 주형에 부착할 필요가 없다.
- 2) 주형의 회전을 방지하기 위하여 주형 측면에 설치된 강관 지그에는 냉각시 최대  $24.5\text{N/mm}^2$ 의 응력이 작용하며, 생산성을 고려하면 적용할 필요가 없다.
- 3) 주형 모서리 부분에 설치한 지그에서 압축응력이 크게 작용하는 주형 상부에 설치한 강관 지그는 적

#### References

- [1] H.J.Mun, C.S.Kim, T.D.Park, D.J.Lee and S.H.Yun : "Application of the Riser Heating Equipment to Control Shrinkage Defects For Casting of the Propeller", The Korea Foundry Society, Vol. 28, pp. 32-36, 2008.
- [2] Y.H.Jang, J.J.Yin and Y.S.Sur: "Optimization of Thermal Deformation in Probe Card", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 11, pp. 4121-4128, 2010.
- [3] S.M.Lee and W.J.Lee : "Finite Element Analysis on Thermomechanical Behavior of a Marine Propeller Casting in the Sand-Casting Process", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 13, pp. 388-394, 2005.
- [4] C.K.Jung, S.W.Jung, H.W.Nam and K.S.Han : "Numerical Modeling of Heat Transfer for Squeeze Casting of MMCs", Transaction of The Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 26, pp. 2104-2113, 2002.
- [5] J.S.Lee, S.H.Kim : "Thermal Analysis of Continuous Casting Welding-Coated Mold", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 2, pp. 7-12, 2001.
- [6] ANSYS Users' Manual Version 8.1, 2007.
- [7] Introduction to Heat Transfer, F.P.Incropera & D.P. De Witt, John Wiley & Sons Inc., 2007.

박 상 철(Sang-Chul Park)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과(조선공학석사)
- 1998년 3월 : 오하이오주립대학교 용접공학과(용접공학박사)
- 1987년 12월 ~ 2008년 8월 : 산업기술연구소 수석연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 거제대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

용접공학, 주조공학, 열탄소성 수치해석