

논문

선박용 프로펠러 주조시 수축결함 제어용 압탕가열장치 적용

문현준[†] · 김정섭 · 박태동 · 이동조 · 윤석환 *

현대중공업 산업기술연구소
*현대중공업 프로펠라생산부

Application of the Riser Heating Equipment to Control Shrinkage defects for Casting of the Propeller

Hyeon-Jun Mun[†], Chung-Sup Kim, Tae-Dong Park, Dong-Jo Lee, and Seog-Hwan Yun*

Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries. CO., LTD., Ulsan, 682-792 Korea
*Propeller Production Dept, Hyundai Heavy Industries. CO., LTD., Ulsan, 682-792 Korea

Abstract

An integrated riser heating equipment has been developed to control shrinkage defects originated from casting of a marine propeller. The integrated riser heating equipment is composed of up/down moving parts, heating power source parts and an integrated controller. Heat capacity putting into the riser was calculated quantitatively on the base of a heat transfer analysis, which consisted of the establishment of heating model and the theoretical analysis for heat transfer. The riser heating equipment was evaluated through arc heating and electro-slag heating method. With the results, the arc type heating method was selected by considering high thermal efficiency, inexpensive cost, and convenient workshop. This equipment improves the quality of a propeller casting and the poor working environment.

Key words : Propeller casting, Riser heating equipment, Shrinkage defect, Arc heating, Electro -slag heating, Riser heat flux modeling.

(Received January 19, 2008 ; Accepted March 20, 2008)

1. 서 론

금속 주조에 있어서 주형내의 용탕은 대기와 가까이 있는 부분부터 열을 쉽게 빼앗기므로 응고가 먼저 발생하게 된다. 응고가 방향성을 가지고 주물의 하부에서부터 상부로 순차적으로 진행될 경우는 수축시 용탕의 체적 감소가 있더라도 문제가 없으나, 주물 외부가 먼저 응고되고 내부가 가장 늦게 응고된다면 내부에 수축공(shrinkage porosity)이라는 주조결함이 발생하게 된다. 따라서 주조시 수축공 결함을 제어하기 위해서는 방향성 응고(directional solidification)를 유도하는 것이 필요하며, 이를 위하여 압탕(riser)에서의 온도관리는 무엇보다도 중요하다.

프로펠러 주조 역시 응고시의 수축결함에 따른 제품의 결함이 문제가 되고 있다. 이를 방지하기 위해 주조부 상단에 압탕부를 설치하여 응고시 수축으로 인한 부족한 용탕을 추가 주입하여 제품부로 공급하고 있으며, 압탕의 용탕이 용융 상태로 있을 수 있도록 온도를 관리하고 있다. 이와 같이 압탕의 온도를 일정온도 이상으로 관리하기 위해 적용되었던 방법으로는 주형에 용탕이 주입된 상태에서 압탕에 용탕을 추가 주입하거나, 추가 용탕주입이 불가능할 경우는 용탕 상부에 발열체를 투입하여 압탕의 온도를 높이는 방법이 적용되어 왔다.

프로펠러 주조에서 주로 문제가 되고 있는 것은 제품의 보스

상면이나 내경에서 발견되는 수축공에 의한 결함이며, 발생된 결함부에 대해 그라인딩(grinding)으로 제거한 후, 보수 용접(repair welding)작업을 해야 하므로 많은 작업공수가 투입되고 있는 실정이다. 또한 압탕의 온도를 유지하거나 높이기 위하여 투입되는 보온재와 발열체는 공장 내부의 공기를 오염시켜 작업환경을 저해하는 문제점이 있었다.

이와 같은 문제점을 해결하고 주조에 따른 압탕의 온도관리를 효율적으로 수행하기 위해 전용장치를 이용한 열 관리의 필요성이 요구되었다. 장치에 의해 열을 공급하는 방법에는 아크가열(Arc Heating)방법과 일렉트로 슬래그 가열(ESHT: Electro Slag Heating) 방법 등이 있으며, 아크 가열방식은 압탕에 보온재가 투입된 상태에서 용탕 위에 직접 아크를 발생시켜 열을 공급하는 방식이고, 일렉트로 슬래그 가열은 플럭스의 저항열을 이용하여 열을 공급하는 방식이다[1][2].

본 연구에서는 선박용 프로펠러 주조시 압탕의 온도 관리를 효율적으로 수행하기 위해 열손실이 발생하는 압탕부의 열해석 모델을 수립하여 이론적인 열 해석 방법을 제시하고[3], 이를 토대로 이동성이 용이한 프로펠러 주조 전용 압탕가열장치를 개발하고자 하였다. 또한 개발된 장치를 이용해 가열시험을 수행함으로써 대형 선박용 프로펠러 제작시 가장 적합한 가열법을 선정하고자 하였다. 압탕가열장치에 대한 기초 시험을 토대로

[†]E-mail : joymoon@hhi.co.kr

최종적으로 선정된 가열법에 의해 대형 프로펠러 주조에 적용하였으며, 그 결과로서 제품의 보스면과 압탕 경계면의 수축결합 여부를 확인하였다.

2. 프로펠러 주조 압탕 해석

2.1 제작공정 및 압탕부의 형상

선박용 프로펠러의 재질은 청동(IACS CU3)을 주조제로 니켈, 알루미늄이 함유되어 있다. 비중은 7.6 g/cm^3 , 수축율은 약 8% 정도이며, 시멘트나 후판 사형주조로 제작한다. 주조 제작공정은 시멘트 사형에 의한 주형 제작, 프로펠러 본 주형과 중자 및 압탕 설치, 주형의 습기를 제거하기 위한 건조, 주조를 위한 용탕 주입과 이에 따른 압탕의 온도관리, 응고 후 주형해체의 순으로 진행된다. 전체 공정 중에서 프로펠러 응고에 따른 제품 내 수축 결함을 방지하기 위하여 압탕의 온도관리공정이 가장 중요하고, 공정관리에 많은 시간과 작업공수가 소요되고 있다.

프로펠러 압탕부 형상에 대해 본 주형과 압탕 주형, 정반과의 설치 관계를 Fig. 1에서 나타내었다. 압탕은 호선별 다양한 설계사양으로 인해 제품의 크기와 치수가 다르기 때문에 압탕의 형상도 그에 따라 다양하게 제작하고 있다. 프로펠러를 제작하기 위해 주형에 주입되는 용탕의 중량은 20톤에서 130톤에 이르며, 압탕의 중량은 4톤에서 11톤 정도이다. 또한 압탕의 크기는 최대 기준 외경이 2000 mm, 높이는 650 mm, 중자의 내경은 1000 mm 정도이다.

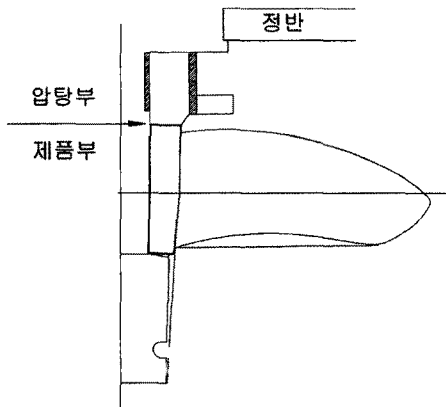


Fig. 1. Schematic diagram of riser and base frame

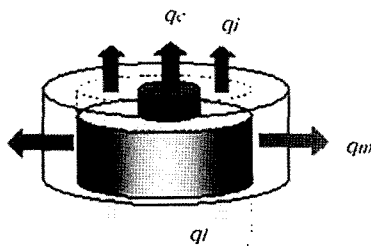


Fig. 2. Model of riser for calculating heating output flux

2.2 프로펠러 압탕의 열방출 해석

압탕 온도관리에 필요한 투입 열량을 산출하기 위하여 먼저 열방출 이론해석을 통해 압탕의 열손실을 계산하였다. 이 열손실은 외부에서 공급해야만 하는 최소 투입열량이다. 열방출 이론해석은 프로펠러의 크기가 가장 큰 형상을 기준으로 하였으며, 해석의 단순화를 위해 몇 가지 사항을 가정하였다. 열손실은 용탕 내부, 주형틀, 중심축 및 상부 표면의 4곳으로 방출된다고 가정하였으며, 용탕 상부 단열재 표면은 상온에 가까운 온도를 나타낼 것이므로 이 면에서의 복사 열손실은 무시하였다. 최대 열유속(Heat Flux)에서의 열손실을 구하기 위해 용탕 상부표면은 1080°C , 압탕부 밑면에서의 용탕 온도는 완전히 고체상태인 1060°C 로 가정하였으며, 주형틀은 원래 원형 모양이지만 평면으로 펼쳐졌다고 가정한 상태에서 열손실 분석을 수행하였다. Fig. 2는 압탕부에서 발생하는 열손실 정도를 계산하기 위해 나타낸 모델 형상이다.

따라서 총 열손실량, q_{tot} 은 식 (1)에 나타낸 바와 같다.

$$q_{tot} = q_l + q_m + q_i + q_c \quad (1)$$

대부분의 열손실은 열전도(heat transfer) 이론에 의해 해석하였으며, 중자를 통한 대기로의 열손실은 전도 열전달과 복사 및 대류 열전달의 합이 같아야 한다. 그래서 시행오차법에 의해 중자내부의 온도를 먼저 산출한 뒤, 계산된 결과로서 열손실량을 산출하였으며, 이를 식 (2)에 나타내었다. 변수 k 는 열전도도(W/mK)이며, Δx 는 단면두께(mm), ΔT 는 온도차($^\circ\text{K}$), A 는 단면적(mm^2)이다.

$$q_c = q'' \times A, \quad q'' = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

압탕 열손실을 분석한 결과, 용탕 내부 제품으로의 열손실이 가장 많았으며, 중자를 통한 대기로의 열손실, 주형틀을 통한 대기로의 열손실, 압탕 상면을 통한 대기로의 열손실의 순으로 열손실이 적은 것으로 나타났다. 열손실을 구할 때, 적절한 조건을 가정하였으나, 실제 열손실은 이와는 차이가 있을 수 있다. 복사 등의 열전달 모드와 정확한 측정 데이터가 없이 대부분 가정에 의해서 계산된 점을 고려하여 안전계수(α)를 부가하여 최종적으로 압탕에서의 투입 요구열량을 산출하였다.

따라서 변수가 고려된 압탕에서의 총 투입 요구열량(P_{tot})은 식 (3)과 같다.

$$P_{tot} = \alpha \times q_{tot} \quad (3)$$

- q_l : 용탕 내부 제품으로의 손실
- q_m : 주형틀을 통한 대기로의 손실
- q_i : 압탕 상면을 통한 대기로의 손실
- q_c : 중자를 통한 대기로의 열손실

2.3 열원장치 용량계산

압탕의 온도관리는 압탕에서 방출된 열량만큼 열을 투입해주어야 압탕의 온도가 일정온도 이상으로 유지 된다. 프로펠러의 크기에 따라 압탕의 크기가 다르기 때문에 이에 따라 방출열량도 다르게 산출되고, 투입열량도 이에 맞게 공급해 주어야 압탕의 온도가 일정하게 유지된다고 할 수 있다.

투입 열량은 열손실 이론 해석을 통하여 구해진 값을 참고하여 장치의 대수, 효율, 투입전류, 전압을 선정하였다. 열원장치에서의 압탕에 가열하는 총 투입열량(P_h)은 식 (4)에 나타내었다.

$$P_h = N \times \eta \times A \times V \quad (4)$$

- N : 장치의 대수
- η : 장치의 효율
- A : 투입전류
- V : 투입전압

따라서 주입중량을 기준으로, 총 투입 요구열량과 열원장치를 사용하여 투입하는 총 투입열량을 비교하여 손실되는 열량보다 공급하는 열량이 많아야 한다. 이것은 결국 $P_h > P_{tot}$ 가 될 수 있도록 압탕가열장치의 전극수와 전류 및 전압을 결정해야 한다.

2.4 압탕 관리시간 해석

프로펠러 압탕의 온도관리는 제품부 위에 위치하고 있는 압탕부 밑면에서 최소한 높이 100 mm 이상까지 옹고되었을 때를 기준으로 완료하게 된다. 따라서 압탕의 온도 관리는 압탕부를 제품부와 절단했을 때, 제품부의 수축공 유무에 따라 주조결합여부가 판별되기 때문에 아주 중요한 공정이다. Fig. 3은 생산에 적용되었던 데이터로 압탕에 용탕을 1차 추가주입 후, 주입중량에 대한 압탕 관리시간을 분석한 것이다. 일반적으로 1차 추가 주입까지의 시간은 7시간이며, 1차 추가 주입 후 압탕의 온도관리 시간은 주입중량에 따라 6시간에서 33시간 정도가 소요되고 있다.

Fig. 3에서와 같이 주입중량이 커짐에 따라 압탕의 관리시간도 그 만큼 길어짐을 알 수 있다. 선형화 영역에서 벗어난 데이터도 있으나, 보다 정량화 된 데이터로 활용하기 위하여 선형적으로 해석하였으며, 분석된 데이터를 이용하여 압탕의 온도관리에 소요되는 총 관리시간을 예측할 수 있었다.

3. 전체 시스템 구성

압탕가열장치는 승강장치, 통합 제어반, 열원장치로 구성된다. 구성된 장치는 승강장치 1대와 열원장치 2대, 분전반 및 통합 제어반 1대로 구성되어 있고, 이동식 승강장치가 주형의 정반 위에서 압탕을 가열하는 방식으로 되어 있다. Fig. 4는 정반 위에 설치되어 있는 압탕가열장치를 보여주고 있다.

장치의 특징으로는 하나의 승강장치에 두 대의 헤드가 운용될 수 있도록 헤드가 개별로 구성되어 있으며, 각 헤드는 승강작용을 하는 수평 암에 부착되어 있다. 압탕의 가열위치에 세팅하기 위해서 헤드부는 전후 방향으로 수동으로 움직일 수 있고, 일반 AC모터에 의해 상하 승강작용을 하도록 구성되어 있다. 수

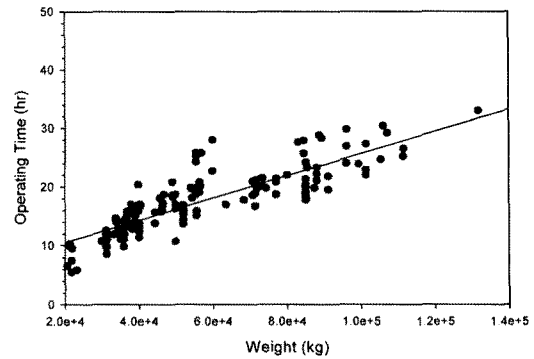


Fig. 3. Relationship between management time to riser and pouring weight



Fig. 4. Overview of riser heating equipment

평 암은 보관과 이동의 편리성을 위하여 힌지를 중심으로 180도 회전하는 방식으로 되어 있으며, 이동시 핀으로 고정하는 구조로 되어 있다. 또한 압탕에서 발생하는 열을 차단하기 위하여 수평 암과 헤드 하부에 방열판이 설치되어 있고, 헤드부 탄소전극봉 클램프부는 통전에 따른 과도한 열발생을 차단하기 위하여 공압에 의해 냉각되는 구조로 되어 있다.

통합 제어장치는 열원장치와 승강장치의 제어의 통합성을 위하여 구성된 것으로 2대의 열원장치와 1대의 승강장치를 제어한다. 통합 제어장치는 장치의 가열상태 및 통전 전류, 전압에 대한 정보를 통합적으로 관리하며, 보조조작반을 통하여 승강장치를 조작할 수 있도록 구성되어 있다. 열원장치의 제어는 각 열원장치에서 자체 제어모드에 의해서, 또는 보조조작반을 통해 장치 전체를 제어할 수 있도록 겸용으로 되어 있다.

열원장치는 압탕 상부표면에 직접적으로 열량을 공급하는 장치로서 지속적으로 열을 공급할 수 있도록 연속사용이 가능한 사용을 100% 장치로 설계되었으며, 장치의 이동이 빈번하여 내구성 있게 제작하였다. 압탕에 대한 열공급은 탄소전극봉의 아크 발생 열에 의해 이루어지며, 탄소전극봉의 소모에 따른 아크길이의 변화를 자동으로 검출하여 전극의 간격을 제어하는 기능을 가지고 있다.

4. 적용시험 및 결과

4.1 가열방법 적용시험

압탕 가열장치의 열원 가열방식을 결정하기 위해 압탕과 유

사한 간이 주형을 이용하였으며, 각 가열방식에 따른 용탕내 온도변화를 확인하였다. 시험한 가열방식으로는 일렉트로 슬래그 가열 및 아크방식의 가열이며, 장치의 기본성능을 파악 후 일렉트로 슬래그 가열 적용을 위한 플럭스 적용시험을 추가 수행하였다. 각 가열방식에 따른 기본 데이터를 확보하기 위해 시험은 동일한 크기의 주형을 선정하고, 가능한 동일 조건에서 시험하고자 하였다. 가열방법 시험은 자연냉각인 무열원, 아크 가열, 일렉트로 슬래그 가열 3 종류이며, 각 가열방식에 따라 가열 성능 및 열손실에 따른 용탕의 온도구배를 파악하고자 하였다.

임시 주형에 주입된 용탕은 1톤이고, 시험을 위한 평균 가열시간은 5~6시간이다. 시험조건은 아래 Table 1과 같으며, 가열 시험중인 모습을 Fig. 5에 나타내었다.

일렉트로 슬래그 가열방법을 적용하기 위해서는 가장 중요한 변수가 플럭스이다. 플럭스는 탄소전극봉과 용탕사이에서 슬래그 그화 되어 저항체 역할을 하면서 발생하는 저항열을 아크방식과는 달리 보다 넓은 범위의 용탕에 공급하는 방식이다.

그래서 일렉트로 슬래그 가열을 적용하기 위해서는 무엇보다도 프로펠러 재질에 맞는 플럭스의 준비가 요구되었으며, 본 가열법 적용을 위해 준비된 몇 가지의 플럭스가 시험되었다. 플럭스의 주요 성분은 SiO₂, Al₂O₃, CaO, CaF₂ 등으로 이루어져 있고, 적용금속에 따라 부가적으로 필요한 성분들이 첨가된다. 플럭스는 용해온도를 기준으로 저온 및 고온용으로 구분되어 시험되었다.

가장 양호한 현상을 보인 플럭스는 저전류 영역에서 아주 안정된 상태로 가열되었으나, 300A 이상의 높은 전류에서는 슬래그 층이 파괴되는 불안정한 현상을 나타내었다. 또한 저전류 영역에서도 장시간 경과할 때에는 슬래그 층이 파괴되어 아크가 불안정하게 나타났다. 가열하는 동안 플럭스는 계속적으로 슬래그화 되어 많은 양이 소모되었으며, 다량의 흙이 연속적으로 발생되었다.

아크 가열방식은 탄소전극봉과 용탕사이의 아크에 의해서 열을 공급하는 방식이므로 일렉트로 슬래그 가열 방식과는 다르게

플럭스를 사용하지 않고 보온재가 사용된다. 보온재의 특성은 용탕의 상부에서 열손실을 차단하는 역할을 하는 것으로 보온과 발열기능에 중요한 역할을 하고 있다. 금속성분을 포함하고 있는 보온재를 사용할 경우, 아크 발생은 보온재의 위에서 아크가 발생하여 아크열이 용탕으로 충분히 전달되지 못하였으나, 금속성분이 없는 보온재를 적용한 결과, 전극과 용탕 사이에서 아크가 안정되게 발생되어 열투입 효율이 높았다. 그러나 보온재의 성분 특성에 의해 가열시간이 오래 경과하면 탄소전극봉 밑에 덩어리가 석출되어 아크 가열이 불안정해지는 현상이 나타났으며, 이때는 덩어리를 제거해 주어야 아크가 안정되어 용탕에 열을 정상적으로 공급하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 임시주형에서 실시한 여러 가지 가열시험법의 적용에 따른 용탕의 냉각온도 선도를 나타내고 있다. 초기에 일렉트로 슬래그 가열방식이 자연냉각의 무열원 조건보다 온도가 낮은 것은 플럭스의 용해과정에서 많은 열을 플럭스 용해에 빼앗긴 것이 원인으로 추정되며, 무열원의 상태보다도 용탕의 온도가 급격히 낮아짐을 알 수 있다. 또한 초기에 무열원 방식보다 아크 가열방식이 낮은 온도로 시작되고 있는데, 이것은 임시주형에 용탕 주입시간 차이에 따라 용탕의 초기 온도 차이 등의 원인으로 추정된다. 아크 가열에 의해 계속 용탕에 열이 투입되는 경우, 액상에서 고상으로 상변화가 일어나는 응고점 이후부터는 가열에 따른 열투입 효과가 나타나 용탕의 온도가 무열원보다 높아지는 것을 알 수 있다.

일반적으로 알려진 바에 의하면 일렉트로 슬래그 가열법이 아크 가열방식보다 열투입 효율이 높다고 알려져 있었다. 이에 근거해서 일렉트로 슬래그 가열법을 적용하기 위해 여러 가지의 플럭스를 준비하여 임시주형에 적용시험을 실시하였으나, 실험결과 제한된 전류용량의 사용과 과도한 흙, 플럭스의 과다한 소비, 저효율적인 열투입을 등의 결과를 얻을 수 있어서 현장 적용에는 한계성이 있는 것으로 나타났다. 이와는 다르게 열투입 효율이 낮을 것으로 예측된 아크 가열방식은 임시주형 시험에서 주형의 온도를 일정온도 이상으로 장시간 유지시켜 더 효율적인 것으로 나타났다.

Table 1. Experimental conditions for test

구분	시험 조건	비고
ARC	400 A × 30 V, 1전극	보온재
ESHT	300 A × 20 V, 1전극	플럭스



Fig. 5. Simulation test to select a proper heating method

4.2 생산 적용시험

임시주형에 대한 시험 결과를 바탕으로 압탕의 온도관리를 위해 아크 가열방식을 적용하여 압탕에 열을 투입하였다. 압탕의 온도 관리시간과 압탕에 투입해야 할 열량은 분석된 이론에 근거하여 산출하였으며, 압탕가열장치에 의한 열투입은 2전극 혹은 3전극으로 모두 가능하였다.

현재 생산되는 프로펠러는 주입중량 20톤에서 130톤에 이르고 있으며, 점차 대형화되어 가는 추세이다. 생산되는 전체 프로펠러에 대해서 분석한 결과, 2전극으로 가열할 때 약 220 A에서 420 A까지 범위의 전류가 필요하고, 3전극일 경우 200 A 정도에서 290 A까지 범위의 전류를 투입하면 압탕 가열조건을 만족하는 것으로 분석되었다.

생산 적용시험은 주입중량 131톤 제품에 대하여 실시하였으며, 해석된 압탕의 총 열손실량에 안전계수 1.5를 주어 산정한 총 투입 요구열량이 18.6 KW 이었다. 이에 대해 열원장치 2전극으로 420 A × 42 V의 열량을 공급할 때, 압탕에 요구되는 투

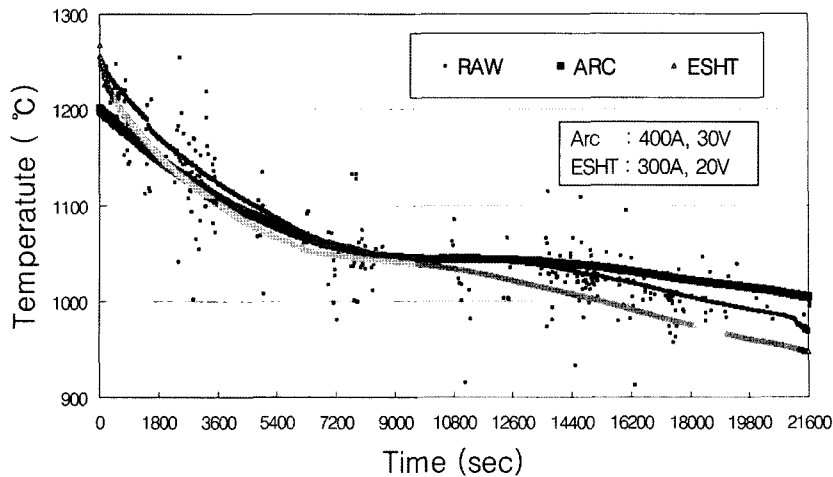


Fig. 6. Temperature variation of the melt with elapsing time for each heating method

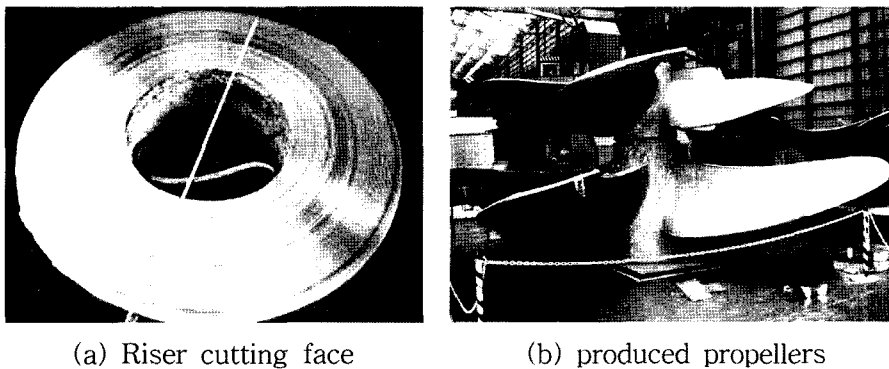


Fig. 7. Shape of the riser cutting face and propellers after riser heating by equipment

입 열량보다 열원장치에서 투입하는 열량이 보다 높게 산출되었으며, 선정된 조건을 압탕가열장치에 적용하였다.

Fig. 7에서는 압탕가열장치의 적용에 의해 압탕의 온도가 관리되어 주조된 프로펠러 제품들(b)을 보여주고 있으며, 압탕부 절단 단면(a)은 수축공의 결함이 없는 아주 양호한 주조 단면형상을 보여주고 있다.

5. 결 론

프로펠러의 주조시 품질 및 열악한 현장 작업조건을 개선하기 위하여 압탕에 열을 지속적으로 공급할 수 있는 압탕가열장치를 개발하고자 각종 시험을 수행하였으며, 그 결과로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선박용 프로펠러 주조시 압탕의 온도관리를 위해 수작업이 아닌 자동적으로 제어되는 압탕가열장치를 개발하였으며, 장치는 승강장치, 열원장치와 통합 제어반으로 구성하였다.
2. 압탕의 열손실에 따른 모델을 수립하였으며, 압탕 크기에 따른 열손실에 대해 이론 해석을 수행하여 투입되어야 하는 열량을 정량적으로 산출하였다.
3. 압탕에 열을 투입하는 방식으로 일렉트로 슬래그 가열방

식과 아크 가열방식을 검토하였으며, 그 결과로서 높은 열효율, 저렴한 재료비 및 작업 관리가 편리한 아크 가열방식을 선정하였다.

4. 기존의 주조공정 중 추가 압탕이나 발열체에 의한 압탕의 온도관리 방법은 작업이 어려울 뿐만 아니라 위험하고 작업환경이 열악하였다. 개발된 전용장치의 적용으로 기존 방식에 비해 주조시 문제가 되었던 수축 결함, 압탕 관리에 따른 보온재와 발열체에 의한 환경오염 및 작업환경을 획기적으로 개선하였다.

참 고 문 헌

- [1] Y. H. Lee, C. O. Choi : KFS, "The Heating Method of the Riser Using Electro Slag Process for Steel Castings", Vol. 9, (1989) 7-11.
- [2] C.W. Ryu, T.G. Lim : RIST, "Development of Quality Control Technologies for Electro-Slag Remelting Process", Vol. 15, (2001) 442-449.
- [3] C. K. Jung, S. W. Jun, H. W. Nam, K. S. Han : KSME, "Numerical Modeling of Heat Transfer for Squeeze Casting MMCs", Vol. 26, (2002) 2104-2113.