 논문

주철금형주조용 도형재의 적용성 평가

서금희 · 김기영[†] · 문병문 *

한국기술교육대학교 에너지 · 신소재 · 화학공학부, *한국생산기술연구원 주조공정연구그룹

Evaluation on the Applicability of Refractory Coatings to Metal Mold for Cast Iron

Kum-Hee Seo, Ki-Young Kim[†], and Byung-Moon Moon*

School of Energy, Materials and Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 330-708, Korea

*Liquid Processing & Casting Technology R/D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-800, Korea

Abstract

A series of refractory mold coatings were applied to cast iron specimens, and their resistances to wear and spalling were investigated. Tests were carried out with own made measures, and also a calculation was tried for the comparison of a part of results like spalling. Worn width by scrubbing the indenter on the coating layer increased significantly at high temperature. Temperature increasing rate across the specimen when the coating side was exposed to 1,000°C was in the range of 14.5~75.8°C/sec-mm, and specimens with thicker coating layer showed lower temperature increase. Severe spalling of coated layer was observed after heating the specimen, and it was able to confirm by calculation using a commercial code.

Key words : Refractory mold coating, Cast iron, Wear, Spalling.

(Received March 23, 2012 ; Accepted June 22, 2012)

1. 서 론

사형 주형의 경우는 용융금속을 주입하면 주물사 입자 사이로 용융금속이 침투하거나, 주형 표면사와 소착을 일으키므로 이를 방지하기 위하여 도형재를 사용하며, 주형이 금형인 경우는 금형과의 용착 방지, 급냉 방지 등의 목적으로 다양한 도형재를 사용한다 [1]. 특히 원심주조에서는 중력가속도 배수가 40~100 g 정도로, 금형에 걸리는 압력이 매우 크므로 금형에의 용착이 일어나는 경우가 많고, 응고한 원심주조품을 금형으로부터 빼낼 때 도형층이 박리하기 쉽다. 이를 극복하기 위한 도형재의 구비 성질은 도포된 도형재가 박리하지 않을 것, 열전도성이 낮아서 용착이 일어나기 어려울 것 등이다. 따라서 용도에 적합한 도형재의 개발은 지속적으로 이루어지고 있다 [2-5].

도형재는 주물의 생산성에 직결되는 것으로 한번 도형으로 몇 개의 주조품을 생산하는가 하는 것이 중요하다. 도형재의 도포회수가 많으면 그만큼 생산의 사이클타임이 길어지고 또한 자재 소모도 많기 때문이다. 따라서 금형주조에서는 통상적으로

오래 견딜 수 있는 기본도형을 한 후에, 매 회 또는 2~3회 주입 시 마다 작업도형을 실시하여 소기의 목적을 달성하고 있다.

도형재의 평가방법은 도형재의 고유물성시험과 주형적용성시험으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 한국생산기술연구원에서 개발한 주철 금형주조용 도형재의 금형적용성시험을 위하여 내구성 및 전열성 평가방법 및 장치를 고안 및 제작하여 도형층의 마모시험 및 전열시험을 실시하였다.

2. 실험 방법

2.1 도형재 도포

인산염을 기본으로 한 도형재로, 도형기재는 알파 크리스토팔라이트(α -cristobalite)와 퀴츠(quartz)의 혼합분말이며, 점결제로 85% 인산을 사용하였고, 첨가제로 질산알루미늄과 회석재로는 증류수를 사용하였다. 도형재의 도포 조건은 Table 1에 나타내었다. 시편은 도형 전에 시편 표면을 금강사로 샌드블래스팅하

[†]Corresponding author: Ki-Young Kim

[Tel: +82-41-560-1323, E-mail: simha@kut.ac.kr]

Table 1. Coating thickness of specimens.

Sample No.	Thickness of basic coating(mm)
1	0.04
2	0.11
3	0.17
4	0.06
5	0.15
6	0.06
7	0.11
8	0.22

고 나서 200~250°C로 예열한 후 스프레이 도형을 실시하고, 300°C에서 약 1시간 동안 안정화처리를 하였다. 시편 1번에서 5번은 #60 금강사로, 6번에서 8번은 #120 금강사로 블래스팅 처리한 후 도형을 실시하였다. 도형은 기초도형 1~3회를 하거나, 기초도형 후 작업도형을 실시하는 등 8가지로 변화를 주어 제작하였다. Table 1은 시편 별 도형두께를 나타낸다. 샌드블래스팅 시 사용한 금강사 입자에 따른 시편의 표면조도는 #60 금강사 사용 시에는 평균 4.3 μm , #120 금강사 사용 시에는 평균 3.4 μm 이었다.

2.2 도형층 내구성 시험

금형 적용성 시험은 표준화된 방법이 없으므로, 각 경우를 가장 가깝게 예측할 수 있는 방법을 고안하여 시험하는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 도형층의 내구성 및 전열성을 평가하기 위하여 40 × 130 × 5 mm의 주철 판상 시편에 도형층을 도포한 시편에 대해서 다음과 같은 방법으로 실험하였다.

주조가 1회 끝난 후 주물을 금형으로부터 방출시킬 때 도형층에는 전단력이 가해져서, 도형층이 떨어져 나가기 쉬운데, 이를 평가하기 위하여 Fig. 1과 같은 장치를 고안하였다. 실제로 주물을 금형으로부터 방출시킬 때의 온도를 실현하기 위하여 가열로를 부착하여 시편을 가열한 후 왕복마모시험을 하였다. 내구성은 도형층 상부를 구형(직경 10 mm) 또는 켜기형(폭 5 mm)의 압자로 하중을 가하여 왕복시키면서 도형층의 마모양상을 관찰하여 평가하였다. 하중은 800~1,500 g, 시험온도는 상온과 350°C이었다. 일정 하중에서 일정 회수를 왕복마모시킨 후 도형층 표면의 마모 폭 등을 관찰하는 방법과, 일정 하

Fig. 1. Wear test on the coating layer.

Fig. 2. Measurement of temperature increase across the coating layer.

중에서 도형재 아래의 금속 면이 노출될 때까지의 회수를 측정하는 방법으로 하였다. 일정회수 마모는 상온에서는 25회 연속 실시하였고, 350°C에서는 가열시간을 10분, 냉각시간을 30초로 하여 4회로 마모를 시키는 것을 한 사이클로 해서 총 6회를 실시하였다.

2.3 도형층 전열성 시험

전열성 시험은 Fig. 2와 같이 로를 1000°C로 유지한 후 도형층이 있는 면을 하부의 로쪽으로 10분 동안 노출시키면서 도형층 반대쪽의 금속면의 온도를 측정, 기록하여 도형층의 전열성을 평가하였다. 온도의 측정은 900°C까지 측정이 가능한 비접촉식 적외선 온도계를 사용하였다.

2.4 전열 및 박리 계산

도형층 온도는 상용 전열계산 프로그램을 이용하여 계산하고 측정치와 비교하였다. Fig. 3은 전열계산 모델인데, 실험에서도 측면은 단열이 되게 하였으므로 4절점 사각형 요소를 이용, 2차원으로 계산하였다. 계산에 이용한 코드는 범용 구조해석코드인 MSC-MARC이었으며, Table 2와 같은 물성치를 사용하여 계산하였다.

Fig. 3. Calculation models for (a) temperature increase and (b) spalling.

Table 2. Properties for the temperature calculation of coated specimens.

Properties	Coated layer	Cast iron
Elastic modulus(N/m ²)	See Table 3	1.57×10^{11}
Poisson's ratio		0.26
Density(kg/m ³)	2,320	6,700
Thermal expansion coeff.(1/K)	0.49×10^{-6}	10.3×10^{-6}
Thermal conductivity(W/m·K)	1.5	63
Specific heat(J/kg·K)	20°C	890
	1,000°C	1,140
		540

3. 실험결과 및 고찰

3.1 내구성

Fig. 4는 상온에서 800 g의 하중으로 켜기형 압자를 이용하여 25회 왕복 마모시킨 후의 도형층 표면과, 시편을 350°C에서 10분 동안 가열하고 30초 냉각시킨 후 800 g의 하중으로 구형 압자를 이용하여 4회 왕복 마모시키는 과정을 6회 반복한 경우의 도형층 표면을 나타낸다. 도형층의 마모 폭은 상온에서는 Fig. 4에서와 같이 5번 도형재가 1~1.5 mm 정도로 시편에 따라서 큰 차이를 나타내지 않았다. 350°C에서의 시험결과는 상온에서와 달리 전체적으로 마모 폭이 증가하였는데, 고온에서 도형재의 접착력이 약화되었기 때문으로 보인다. 4 및 5번 시편이 마모폭이 좁았는데, 이는 4 및 5번 시편에만 실시한 작업도형의 효과 때문으로 보인다.

Fig. 5는 상온에서 하중을 각각 0.8, 1.3 및 1.5 kg으로 하였을 때와 350°C에서 하중을 0.8 kg으로 하여 왕복마모시켰을

Fig. 4. Worn surfaces after scrubbing at room temperature and 350°C.

Fig. 5. Number of scrubbing to reveal the bare metal surface at 25 and 350°C.

때, 시편에서 금속부가 노출되는 회수를 나타낸 것이다. 이 회수가 많다는 것은 그만큼 도형층이 기계적인 힘에 견디는 능력이 큰 것을 의미한다. 4 및 5번 시편을 제외하고는 2회 이하의 마모에서 금속부가 노출되었는데, 4 및 5번 시편은 기초도형 위에 작업도형을 실시한 것으로 이에 의한 효과로 보인다. 기초도형만 실시한 3 및 8번 시편은 작업도형을 실시한 4 및 5번 시편보다 도형층의 두께는 두꺼웠으나, 시편이 노출되는 회수는 2회로 짧게 나타났는데, 이로부터 도형층의 두께를 두껍게 하는 것보다는 작업도형을 실시하는 것이 고온에서의 마모에 더욱 효과가 있음을 알 수 있다.

3.2 전열성

전열성은 시편의 도형한 쪽을 1000°C에 10분간 노출시키면서 시편의 금속 쪽 뒷면의 온도상승 추이로 평가하였다. 도형재에 따른 가열 시의 온도 상승은 1번 시편이 가장 크고, 3번 시편이 가장 작았는데, 상승온도는 550~600°C의 범위에 있었

Fig. 6. Temperature increasing rate of each specimen across the specimen when the coating side was heated.

Fig. 7. Spalling of coating layer after heating.

다. 도형재의 두께가 모두 다르므로 온도 상승속도는 도형재 두께 당의 속도로 구하였다. Fig. 6은 도형재 1 mm 당 온도 상승 속도를 나타낸 것으로, 도형재 1 mm 당 온도 상승 속도는 $14.5\sim75.8^{\circ}\text{C}/\text{sec}\cdot\text{mm}$ 의 범위에 있으며, 3, 5 및 8번 도형재의 온도 상승속도가 가장 작게 나타났다. 이들 시편의 도형층 두께는 각각 0.17, 0.15 및 0.22 mm로 단열성이 좋은 도형층의 두께가 두꺼울수록 전열속도는 작음을 알 수 있다. 한편 시편 가열 후에 도형층을 관찰한 결과, Fig. 7과 같이 일부 시편에서 도형층의 박리가 심하게 일어나는 것이 확인되었다. 특히 도형층의 두께가 두꺼운 경우에 심하게 일어났다.

3.3 박리의 확인

도형재의 박리를 확인하기 위해 범용구조해석코드인 MSC-MARC를 이용하여 박리 계산을 하였다. 경계조건은 Fig. 3(b)와 같이 입력하였는데, 도형재와 시편이 붙어 있다는 것을 구현하기 위해 도형재 상단에서 아래 방향으로 20 N의 하중을

Table 3. Estimated elastic moduli and Poisson's ratios of the coating layers with temperature.

Temperature($^{\circ}\text{C}$)	Elastic modulus, $\times 10^{10}$ (N/m 2)	Poisson's ratio
27	4.42	0.103
177	4.51	0.105
327	4.60	0.108
477	4.66	0.110
627	4.72	0.112
777	4.76	0.114
927	4.78	0.114
1077	4.82	0.116
1227	4.85	0.117
1377	4.89	0.118

걸었다. 도형재의 정확한 물성치는 알 수 없기 때문에 탄성계수와 포와송 비는 SiO_2 의 물성치의 60%로 입력하였는데, 온도에 따른 입력치는 Table 3과 같다.

도형층의 주된 역할 중의 하나가 주입 직후 용탕과의 열전달을 조절하는 것이므로, 도형층과 주물 간의 열전달계수가 매우 중요하다 [6-9]. 열전달계수는 전열시험 시 얻은 온도측정치를 기준으로 역문제 기법으로 구하였다. 도형층과 시편사이의 열전달계수는 $1,500 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 로 하였고, 도형재 상단부는 Fig. 8과 같이 시간에 따른 열전달계수의 변화를 고려하여 계산하였다.

계산 후 각 위치별로 온도 및 변위를 기록하였는데, 그 위치는 Fig. 9와 같다. Fig. 10은 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것으로 측정치와 계산치가 거의 같음을 알 수 있다. Fig. 11은 박리가 일어났는지를 확인하기 위하여 y방향의 변위를 측정 한 것으로, 약 5초 후부터 금형과 도형층이 분리되어 갭(Fig. 11의 ▲표시선)이 생성됨을 알 수 있다. 따라서 금열에 의하여 도형층이 금형으로부터 박리될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 시간에 따른 등변형도 및 등온도도를 나타낸 것으로 오른쪽 상부의 도형층이 박리되고 있음을 알 수 있다. 시

Fig. 8. Heat transfer coefficient between the coated layer and surrounding air.

Fig. 9. Measuring positions for displacement and temperature.

Fig. 10. Temperature change with time at the backside of specimen.

Fig. 11. Displacements of specimen and coating layer with time.

간의 경과에 따라서 금형의 크기가 커지는 것은 변위의 확대 배율을 100배로 고정하고 금형의 열팽창을 고려하여 그렸기

때문이다.

4. 결 론

주철금형주조용 도형재의 적용성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 도형층의 마모 폭은 상온보다 350°C에서 증가하였는데, 도형층의 두께를 두껍게 하는 것보다는 작업도형을 실시하는 것이 고온에서의 마모에 더욱 효과가 있음을 알 수 있었다.
- 2) 상온에서 하중을 0.8, 1.3 및 1.5 kg으로 하였을 때와 350°C에서 하중을 0.8 kg으로 하였을 때 왕복 마모 후 도형재 별로 금속부가 노출되는 회수는 작업도형까지 실시한 시편이 도형두께가 두꺼운 시편보다 많게 나타났다.
- 3) 시편의 도형한 쪽을 1000°C에 10분 간 노출시킨 결과, 시편의 금속 쪽 뒷면의 상승온도는 550~600°C의 범위에 있었다.
- 4) 온도 상승속도는 14.5~75.8°C/sec·mm의 범위에 있었으며, 도형두께가 두꺼운 시편의 온도상승속도가 느린 것으로 나타났다.
- 5) 시편 가열 후에 일부 시편에서는 도형층의 박리가 심하게 일어났는데, 상용 소프트웨어를 이용한 계산을 통하여 도형층이 금형으로부터 박리될 수 있다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국기술교육대학교 교내 연구비 및 지식경제부 청정생산기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

Fig. 12. Deformation of coating layer with time after heating (100×).

참고문헌

- [1] ASM International, ASM Handbook, Vol. 15 (1988) 601-603
- [2] A. A. Golovnya and I. V. Matveenko: Litejnoe Proizvodstvo, "Experience on refractory coatings using with a filler of technogenic origination for foundry molds and cores", 4 (2002) 12
- [3] M. Joyce, M. Rebros and S. Ramrattan: International Journal of Metalcasting, "Adapting more progressive refractory coating measurement controls", 2(2008) 29-39
- [4] M. Jin, M. Fan, B. Zhang, Y. Wu and J. Wang: Special Casting and Nonferrous Alloys, "Application of Diatomite Coating in Centrifugal Casting Nodular Cast-iron Tube with Thermal Mold Method", 31 (2011) 67-69
- [5] H. Jafari, M. H. Idris, A. Ourdjini, H. R. B. Rad, S. S. K Ardestani and V. Ahmadshoar: Advanced Materials Research, "Effect of mould runner and coating on graphite nodule characteristics and hardness of thin wall ductile iron", 264-265 (2011) 266-271
- [6] K. Nyamekye, D. Askeland, S. Wei, R. C. Voigt, R. P. Pischel, W. Rasmussen and C. Ramsay: Trans. AFS, "A Review of Permanent Mold Coatings and Their Effect on Heat Transfer in the Mold", 102 (1994) 869-876
- [7] S. Wei, J. Dillingham, M. Jiranek, K. Nyamekye, C. W. Ramsay, D. R. Askeland and R. Pischel: Trans. AFS, "Influence of Mold Coating on Heat Transport in Permanent Mold Casting Process", 104 (1996) 251-262
- [8] M. N. Turgut, M. N. Demir, M. H. and F. Yigit: Advanced Materials Research, "Effect of mold coating on shell morphology in solidification", 445 (2012) 325-330
- [9] E. Guo, Q. Zheng and T. Jing: Materials Science Forum, "Numerical simulation of solidification of thick-wall stainless steel pipe in horizontal centrifugal casting process", 706-709 (2012) 1427-1432