 논문

알루미늄 용탕 보온용기의 단열재 적층구조 변경을 통한 보온성 향상

황준선 · 강충길[†]

부산대학교 대학원 정밀가공 시스템전공, 부산대학교 기계공학부 정밀정형 및 금형가공센터

Thermal Insulation Improvement by Laminated Adiabatic Structure Change in Holding Furnace with Molten Aluminum Alloy

June-Sun Hwang and Chung-Gil Kang[†]

Precision Manufacturing System Division, Graduate School, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea
School of Mechanical Engineering, Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing,
Pusan National University, Pusan 609-735 Korea

Abstract

Recently, aluminium usage in the automobile industry has been increased cause of its lightweight. The aluminium has a melting-solidification process in producing line and another melting process was needed in manufacturing process. Two times of melting process for making ingot and casting not only makes the loss of time and money but contaminates the air with Sox, Nox. For this reason, the holding furnace with laminated adiabatic material was developed. This holding furnace can deliver the molten aluminium directly to the industry needing molten aluminium. Recent holding furnace has above 15°C/h of cooling rate and that causes solidification of molten aluminium. The ANSYS software was used to analysis the heat transfer. The adiabatic materials were laminated with optimized arrangement and holding furnace shape was changed with optimized modelling by ANSYS analysis for reducing the cooling rate of molten aluminium in holding furnace.

Key word : Holding furnace, Laminated adiabatic structure, Thermal insulation, Temperature reduction.

(Received July 11, 2011 ; Accepted October 21, 2011)

1. 서 론

현재 중공업, 전자부품 분야 등의 산업 분야에 있어서 가장 중요한 과제중의 하나는 경량화를 만족하면서 고 기능성을 갖춘 부품의 생산과 개발이라 할 수 있다. 이러한 요구에 따라 주요 부품에 사용되는 강판 및 강재를 대신할 마그네슘과 알루미늄 같은 다양한 경량화 소재가 개발되어 점차 그 적용 범위가 증가하고 있다. 경량 소재 중 마그네슘 합금의 경우 폭발위험성 및 산화성의 문제가 해결되지 않아 현재 알루미늄의 수요가 급증하고 있다[1-2].

알루미늄의 수요가 증가하고 있는 가운데 알루미늄의 직공급에 관한 관심이 고조되고 있다[3]. 현재의 알루미늄 제조 공정은 원재료를 용해하여 인곳을 만들고 이것을 최종수요자에 공급하면 최종수요자는 그 인곳을 재 용해하여 제품을 성형하는 공정으로 이루어져 있다. 이러한 과정에서 많은 비용과 시간을 소요하여 효율성 및 생산성이 떨어져 업체에 손실을 끼치고 있으며 또한 재 용해 과정에서 Sox, Nox와 같은 오염물질이 발생하여 환경오염의 우려도 커지는 실정이다.

이러한 가운데 알루미늄 용해 업체에서 합금을 용해한 후 알루미늄 용탕을 직접 최종수요자에게 공급하는 보온용기가 고

안 되었다. 이러한 보온용기를 통하여 용탕을 직공급 함으로써 비용, 시간을 절약할 수 있게 되었고 환경오염 문제도 개선할 수 있다. 현재 몇몇 업체에서 이러한 보온용기를 사용하고 있지만 기존의 보온용기는 제작자의 경험에 의해 제작 되었으며 그에 따른 열 전달 해석 및 연구가 충분히 이루어 지지 않았다. 이러한 이유로, 현재 사용되는 보온용기는 보온성이 좋지 않아 원하는 지역까지 알루미늄 용탕을 이송하는 중에 온도저감을 유발하는 문제가 발생하고 있다. 또한 단열재 적층구조에 대한 연구 및 기존 모델링 개선에 대한 연구가 부족하다.

본 논문에서는 유한요소해석과 실험을 통하여 보온용기의 최적 단열재 적층구조를 찾고 현재 사용되는 보온용기의 보온성이 취약한 부분을 파악하여 모델링을 개선함으로써 기존의 보온용기의 보온성을 향상시키고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 기존 보온용기의 특성 파악

본 연구에서는 통상적으로 국내에서 다이캐스팅용 원재료로 많이 사용되는 ALDC12종을 대상 합금으로 설정하였으며 연구에서 사용된 알루미늄 합금의 조성은 Table 1에 나타내었다.

[†]E-mail : cgkang@pusan.ac.kr

Table 1. Chemical composition of ALDC12.

Chemical composition (wt%)							
Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Al
2.73	10.99	0.144	0.83	1.12	0.156	0.08	remanant

(a) Schematic drawing

(b) Measurement point

Fig. 1. (a) Schematic drawing and (b) photograph of holding furnace and the temperature measurement point at later works.

또한 기존에 사용되던 보온용기의 모델링 및 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 1-9의 위치는 보온로 표면의 온도를 측정할 위치를 나타낸다.

기존 보온용기의 열 전달 특성 및 관련 물성치를 역추적하기 위하여 기존 보온용기의 단열재 및 용탕의 온도 흐름을 파악하기 위한 실험을 하였다. 보온용기에 5개의 열전대를 설치한 후 용탕을 부어 보온용기의 단열재 사이사이의 온도를 측정하고 용탕의 온도는 열전대를 용탕의 중심부에 고정하여 측정하였다. 열전대가 삽입된 위치 및 단열재 종류는 Fig. 2에 나타내었다.

온도측정에는 데이터 로거(TDS-602)와 k-type 열전대가 사용되었다. 온도 측정 실험을 하기 전 2시간 동안 보온용기 안쪽 분위기 온도를 800°C도 유지하는 예비 가열을 하였다. 그 후 710°C의 온도로 출탕된 알루미늄 용탕을 보온용기에 부은 후 150분 동안 단열재 사이에 삽입된 열전대로 온도를 측정하였다.

단열재 사이의 온도 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 5개 지점에서 온도의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 초기의 710°C 용탕을 주입하였기 때문에 열전대 1번 위치에서의 온도는 약 4000초 정도까지 증가하였으며, 나머지 열전대 2, 3 지

Fig. 2. Temperature measurement point for heat insulation furnace.

Fig. 3. Temperature distribution of measured point in the heat insulation at Fig. 2 (Pouring temperature: 710°C).

점의 온도는 시간의 증가와 더불어 다소 상승하는 것을 알 수 있다.

보온성 향상을 위해서는 용탕 쪽의 단열재의 온도가 높게 유지되고 바깥쪽의 단열재 온도는 낮게 유지되는 것이 유리하다. 기존의 보온용기는 Fig. 3의 4번, 5번 측정 위치에서 볼 수 있듯이 외벽에서 불과 51 mm 떨어진 곳의 온도가 300°C, 31 mm 떨어진 곳의 온도가 160°C로 매우 높으며 이는 보온성 하락의 원인이 되기 때문에 이를 보완하기 위해 단열재 적층순서를 바꾸어 이를 보완하고자 하였다.

용탕의 온도 측정 실험은 단열재 온도 측정 이후에 진행하였고, 단열재 온도 측정 실험에서와 같이 2시간의 예열 시간 후 740°C의 용탕을 보온용기에 부은 후 4시간 동안 온도를 측정하였고 그 결과를 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

초기 40분까지 냉각속도가 매우 빠르나 그 이후에는 냉각속도가 안정화되었다. 4시간 동안 온도를 측정한 결과 용탕

Fig. 4. Temperature of the molten aluminum in the heat insulation furnace (Pouring Temperature: 740°C).

중심의 온도는 735°C에서 677°C까지 냉각 되었다. 평균적으로 14.5°C/h의 냉각속도로 냉각되었다. 이송시간 및 상, 하차 시간을 포함하여 약 5시간 정도의 시간이 소요된다고 가정할 때 72.5°C 정도의 온도 하락이 예상되고 710°C에서 출탕시 638.5°C까지 하락하여 소재의 응고 현상이 일어날것으로 예상된다.

2.2 기존 보온용기 온도 해석

보온용기의 열 전달 해석을 하기 위해서 열 물성치가 필요하였다. 열 전달 계수를 구하기 위해 기존의 보온용기 단열재 사이에서 측정한 온도 및 용탕 온도의 분포를 이용하여 역 추적 하였다.

해석은 보온용기의 단면인 2D 모델로 실행 되었다. 각각의 단열재의 물성치를 입력하기 위하여 UG Software를 이용하여 2D에 적합한 평면으로 각각의 단열재 및 구성파트를 모델링 하였다. 이러한 모델링 후에 ANSYS에서 import하여 각각의 파트들을 불러온 뒤 파트의 접촉 열 저항을 고려한 열 전달 해석이 가능하도록 모델링을 하였다.

열 전달 계수를 역추적하기 위하여 실험에서는 Fig. 2와 같이 다섯 지점에서의 단열재 온도를 측정하였는데 해석에서도 이를 모사하고자 하였다. 열 전달 해석 시 해석이 종료될 때까지 다섯 지점에서 온도를 연속적으로 산출하였고 이 지점은 실험에서 온도를 측정한 곳과 같은 지점이다. 온도 해석은 ANSYS software를 이용하였으며 예열시간, 예열온도, 초기 단열재 온도, 초기 용탕온도 등의 온도 값을 온도측정 실험에서와 동일하게 설정 하였다[4-5].

열 전달 해석 결과의 온도분포 경향이 실험결과에 최대한 근접하도록 반복적인 해석 및 결과 비교를 통하여 Fig. 6과 같이 열 전달 해석과 온도 측정 실험(Fig. 2)의 온도 분포가 유사하도록 하는 물성치를 찾을 수 있었고 이 때 얻어진 물성치가 실제 보온용기에 사용된 단열재의 물성과 유사할 것이라고 가정하고 연구를 진행하였다. 이에 해당하는 열 물성치는 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 ρ 는 단열재의 밀도, c 는 비열, k 는 열 전달계수를 나타낸다.

Table 2. Material properties from analysis results.

	ρ (kg/m ³)	C (J/kgK)	K (W/mk)
Ladle castable	2150	700	0.09
Ladle castable 2			0.07
Heat insulation board	600	800	0.055
Heat insulation board 2			0.007
Heat insulation panel	230	800	0.005
Ceramic paper	192	1046	0.03
Ceramic wool	500	900	0.01
BTU - Block	192	837	0.35
High strength castable	2900	700	2.4

2.3 단열재 적층 구조 변경 및 평가

기존의 보온용기 온도 해석 결과 용탕중심에서 외벽으로의 열 전달이 잘 이루어져 용탕의 냉각속도가 15°C/h 이상이 되었다. 이를 개선하고자 주어진 단열재 조합을 가지고 적층 순서를 변경하여 모델링 하였다. 접촉하는 부분인 레들용 캐스타블을 제외한 단열보드, 단열판넬, 세라믹 페이퍼의 적층 순서를 변경 하였고 6가지의 적층 방법을 Fig. 5에 나타내었다.

열 전달 해석 시간을 줄이기 위하여 Fig. 5에 도시된 6가지의 적층 배열은 전체 보온용기의 1/4 크기로 모델링 되었으며 또한 최적의 적층배열을 찾기 위한 연구에서 Fig. 5의 1/4 모델이 사용되었다. 이 해석에서는 2시간의 예열시간과 5시간의 이송시간이 고려되었으며 복사 열 에너지는 고려하지 않고 전도 열 전달만을 고려하였다.

기존의 모델링인 Case 1의 경우 제안된 다른 조합들보다 외벽쪽의 온도가 높다는 것을 Fig. 7의 해석 결과로 알 수 있다. 기존의 모델의 경우 단열이 잘 안되어 해석 시 측정된 5

Fig. 5. 6 kinds of lamination method.

Fig. 6. The transient temperature comparison with experiment result and calculated result by ANSYS.

Fig. 7. Temperature distributions along the thickness from ceramic paper to middle of holding furnace castable.

개의 지점에서 전체적으로 높은 온도 분포를 보이는 반면 Case 2의 경우 55 mm 지점에서의 온도가 Case 1에 비하여 200°C 이상 낮은 결과를 얻었고 그 외 측정 지점에서도 다른 적층 방법 보다 상대적으로 온도가 낮았다. 이는 낮은 열 전달 계수를 가지는 단열 판넬이 보온용기 안쪽에 위치하면서 중심 부에서 외부로의 열 전달을 막기 때문으로 판단된다. 이러한 이유로 Case 2가 가장 단열 효과가 좋은 것으로 분석되었고 Case 2를 최적의 단열 조합으로 채택하였다.

2.4 모델링 변경을 통한 보온성 향상

단열재 적층에 따른 열 전달 해석의 결과와는 독립적으로 기존의 단열재 조합인 Case 1에 대한 보온용기의 열 전달 해석 결과 Fig. 8에 나타난 것과 같이 보온용기의 외부 중 용탕 배출구 부분의 온도가 가장 높아 열 전달이 가장 많이 일어난 것으로 조사되었다. 용탕 배출구 부분의 단열재 적층이 적합하지 않아 보온성이 취약한 것으로 판단되었고 이를 보완하고자 배출구 부분의 내부 단열재 적층 각도를 변경함으로써 단열재를 추가로 적층하여 보온성을 향상시키고자 하였다. 열 전달 해석은 기존해석과 같이 2시간의 예열 후 5시간의 열 전달을 고려하였고 모델링 변경을 통한 보온성 향상을 평가하기 위하

Fig. 8. Temperature of surface of holding furnace shown Fig. 1(b).

(a) Existing model and heat analysis result

(b) Developed model and heat analysis result

Temp. of existing model					Temp. of developed model				
column	1	2	3	4	column	1	2	3	4
1	686	686	686	677	1	684	684	683	662
2	686	686	686	680	2	684	683	682	667
3	686	686	685	683	3	683	683	681	673
4	685	685	685	684	4	683	682	681	678
	rows					rows			

Fig. 9. Temperature from result of heat transfer analysis (a) Existing model (b) Developed model.

여 12 지점의 온도를 조사하였다. 모델링이 변경된 보온용기의 온도해석 결과 및 온도측정 결과와 함께 개선전의 온도측정 결과를 Fig. 9에 정리하였다.

(a) 3rd column of Fig. 9

(b) 4th column of Fig. 9

Fig. 10. Temperature distributions of 3rd column and 4th column of holding furnace at Fig. 9.

기존 보온용기 안에 담겨 있는 용탕 배출 부분의 용탕 온도는 용탕중심의 온도보다 약 21°C 낮게 나타났다. 실제 보온용기를 운송을 하는 조건에서는 차량 운행시의 진동 및 노면에서의 충격 등으로 용탕의 열 전달이 더욱 활발해 질것이며 용탕냉각 속도에 미치는 영향도 더 커질 것으로 예상된다. 반면 수정된 모델링의 경우 용탕중심부의 온도와 배출구 부분의 온도차이는 약 9°C 정도로 기존의 보온용기와 비교하여 용탕 배출구 부분 보온성이 향상되었음을 알 수 있다. 해석결과를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 또한 Fig. 9의 3열과 4열에 해당하는 온도 분포를 Fig. 10에 도시하였다. 3열의 경우 4개 행에서의 측정 온도가 크게는 5°C 작게는 3.5°C의 온도가 기존의 보온용기보다 높게 측정 되었다. 반면 보온성이 취약했던 4열의 경우 기존의 보온용기보다 배출구 부분은 약 15°C, 바닥 부분은 약 7°C 높게 측정 되었다.

2.5 보온성 검증 실험

단열재 적층 방식과 제안된 모델링을 각각 적용하여 보온용기를 제작하였다. 또한 용탕 중심의 온도를 측정하여 Fig. 11에 도시하였다. 용탕공급업체의 사정상 용탕 출탕 온도와 측정

Fig. 11. The result of temperature measurement at both of improved and existing holding furnace.

유지시간이 다르나 실험에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되며 용탕 온도 측정 실험에서 출탕온도는 기존 보온용기와 개선된 보온용기의 온도 측정 실험에서 각각 735°C, 748°C로 13°C의 온도차이가 있었다. 200분의 온도 측정 결과 온도 차이는 35°C로 측정되었으며 이에 따른 보온용기의 냉각속도는 기존의 모델과 개발된 모델이 각각 14.72°C/h, 9°C/h로 계산되었다.

이러한 온도 측정의 결과로 개선된 모델은 이전의 모델의 냉각속도보다 약 5.7°C/h 향상된 것을 알 수 있다. 710°C의 용탕을 출탕하여 5시간동안 운송할 경우 기존의 보온용기는 응고하여 업체에 납품이 불가하지만 본연구에서 제시한 보온로 구조는 15°C정도의 온도저감이 개선되어 향후 산업현장에서 이용이 확대될 것으로 기대된다.

3. 결 론

현재 용해한 알루미늄 용탕을 최종사용자에게 직공급하기 위해 보온용기가 사용되고 있다. 업체의 다양화 및 안정적인 용탕 공급을 위해 보온성 향상이 요구되고 있다. 기존 보온용기의 열 전달 해석 및 모델링 개선을 통해 보온성을 향상 시키고자 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존에 사용되는 단열재의 적층 순서를 변경한 6가지 모델을 제안하였고 이에 따른 열 전달 해석결과 Case 2와 같은 적층 순서를 가지는 보온용기가 최적의 적층 조합을 가짐을 알 수 있었다.

2) 기존 보온용기의 열 전달 해석을 수행하고 이를 통해 보온성이 취약한 부분의 모델링을 수정하였다. 보온용기 외부의 모델링은 현장의 pouring 각도에 맞게 설계된 것이기 때문에 내부의 각도를 수정하여 단열재를 추가 적층할 수 있었고 이를 통해 보온성을 향상 시켰다.

3) 보온성 검증 실험을 통하여 개선된 모델이 기존 보온용기의 냉각속도보다 약 5.7°C/h 낮게 나타났다. 이로써 AI 용탕을 710°C로 출탕할 경우 5시간의 운송시간을 확보할 수 있게 되었다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비에 의하여 연구되었으며 본 연구를 위하여 많은 도움을 주신 Hyundai-Kia Motors와 NGV 에도 감사를 전합니다.

참고문헌

- [1] C. G. Kang, J. C. Choi, W. B. Bae: J. of KSPE “Semi-Solid Forming, Casting and Forging Technologies of Lightweight Materials”, 17 (2000) 7-21
- [2] A. R. Khoei, D. T. Gethin, I. Masters: Journal of Materials Processing Technology “Design Optimization of Aluminum Recycling Process Using Taquchi Technique”, 127 (2002) 96-106
- [3] J. Y. Park, S. H. Choi, P. H. Yun, E. S. Kim: J. of KFS “Design and Evaluation of High Insulation Ladle for Carrying Aluminum Molten Metal”, 30 (2010) 115-120
- [4] Shinichiro, Fujikawa, Yukiyoishi, Kitamura and Saburo, Shimamura, J. Mat. Proc: Application of numerical methods for the aluminum casting/forging process”, 27 (1991) 93-110
- [5] S. S. Park, B. M. Kim C. G. Kang: J. of KSPE “Analysis of Temperature of Molten Aluminum Holding Furnace and Stress of Substructure Frame”, 22 (2005) 129-136