



내마모 합금주강의 2 캐비티 사형주조 기술을 적용한 초대형 굴삭기 무한궤도형 트랙슈 부품의 최적 주조 방안 설계

박동환^{a,*}, 이창희^b, 박철우^b

Design of Optimal Casting Method for Track Shoe Parts of Super-large Excavator Caterpillar using Two-cavity Sand Casting Technology of Wear-resistant Alloy Cast Steel

Dong-Hwan Park^{a,*}, Chang-Hee Lee^b, Cheol-Woo Park^b

^a Department of AI Digital Manufacturing Convergence Research, Gyeongbuk Technopark

^b Dongil Metal Co., Ltd.

ARTICLE INFO

Article history:

Received	13	January	2025
Revised	22	February	2025
Accepted	1	March	2025

Keywords:

Optimal casting
Excavator caterpillar
Track shoe parts
2 cavity
Sand casting

ABSTRACT

This study aims to develop two-cavity track shoe parts with an extended lifespan by applying sand casting technology using wear-resistant alloy cast steel. This approach reduces manufacturing costs while enhancing product durability. Previously, track shoe parts produced using single-cavity sand casting technology faced issues related to limited product lifespan, leading to frequent replacements and increased costs. Additionally, quality concerns have emerged due to these factors. To address these challenges, the two-cavity design was introduced to improve fluidity, thereby enhancing both product life and cost efficiency. Furthermore, the casting method for track shoe parts in two-cavity sand casting was optimally designed through casting solidification analysis. In particular, the size and position of the chill densener were modified to prevent shrinkage defects in the lug section of the track shoe parts.

1. 서론

무한궤도형 굴삭기는 일반적인 차량 바퀴에 비해 접지면적이 크고 지면과의 마찰도 커서 습지, 모래, 자갈 등 열악한 지형에서 밀리지 않고 굴삭기를 운반하도록 하는 장점이 있는 반면, 험난한 지형에서 운행되기 때문에 하부주행체 부분이 빠르게 마모되는 특징을 가진다. 트랙슈 부품(track shoe parts)은 굴삭기 무한궤도의 일부분으로 바퀴를 감싸고 있는 체인으로 중장비의 신발과 같은 역할을 한다. 즉, 무한궤도형 굴삭기의 구동방식은 동력원에 의해

스프라켓을 회전시키고 회전력이 트랙슈에 전달되어 구동되는 방식이다. 특히, 트랙슈의 러그는 스프라켓의 회전력을 전달받는 부위로 내부 결함이 없어야 한다.

굴삭기에 장착되는 무한궤도형 트랙슈 부품은 부식과 마모가 심하여 파손이 발생하면 부품 교체 시에 장시간이 소요된다. 이를 개선하기 위하여 내마모 합금주강 소재를 적용한 고수명의 트랙슈 부품 개발이 요구된다. 합금주강은 강도 또는 내식성, 내열성 및 내마멸성 등을 향상시키기 위하여 보통 주강에 합금 원소를 첨가한 주강이다. 내마모 합금주강은 기계적 성능과 내식성 등의 개선

* Corresponding author. Tel.: +82-54-330-8052

E-mail address: pdh@gbtp.or.kr (Dong Hwan Park).

을 위하여 탄소 이외에 망간(Mn), 니켈(Ni), 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo) 등을 첨가하여 기계적 성질을 개선한 주강으로 열처리가 가능하다^[1-6].

사형(sand mold) 주조는 주물사와 점결제를 이용하여 만든 주형에 용융 금속을 주입한 후 응고시켜 원하는 모양의 제품을 얻는 방법이다^[7-9]. 주물사는 모래, 점토 및 수분을 주성분으로 하여 주형제작에 사용되는 혼합사를 말하며, 점결제(binder)는 주물사의 입자와 입자를 결합시켜 주형이 쉽게 제작될 수 있도록 한다. 또한, 경화제는 결합을 촉진시켜 주형 강도를 증가시키는 역할을 한다. 즉, 사형주조는 모래를 이용하여 제품의 형상을 만들기 때문에 복잡한 형상의 제품 제작이 가능하며 다품종 소량생산에 적합하나, 제품의 표면조도와 기계적 성질이 다소 떨어지는 단점이 있다.

Jin^[10]은 대형 원통형의 잠수함 마스트 커버 부품을 니알브론즈(Ni-Al-Cu) 합금 재질의 사형주조 공정을 적용하여 주조 응고해석과 주조 방안설계를 진행하고, 마스트 커버 금형의 게이트는 45° 간격으로 8개의 타워형 게이트를 원형으로 설계하였다. 하지만, 본 연구는 대형 굴삭기의 직사각형 트랙슈 부품을 내마모 합금주강 재질의 사형주조 공정을 적용하여 주조 응고해석과 주조 방안 설계를 진행하였다.

기존 사형주조 기술을 적용한 무한궤도형 트랙슈 부품은 1 캐비티(cavity)로 제작되어 원가절감 문제가 대두되고, 주조 방안 설계에서 유동성 개선이 요구되었다. 이를 개선하기 위하여 무한궤도형 트랙슈 부품을 2 캐비티로 제작하여 원가절감이 가능하고, 주조 방안 설계에서 유동성을 개선하여 품질 향상을 도모하였다. 즉, 기존 1 캐비티로 작업 시에 생산성 저하로 인하여 원가 상승 요인이 발생하며, 유동성을 개선하기 위하여 런너의 라운드 부위를 크게 하여 2 캐비티의 유동성 향상을 도모하였다.

따라서, 본 연구는 제조원가 절감과 수명연장이 가능한 내마모 합금주강 소재의 사형주조 기술을 적용하여 2 캐비티의 무한궤도형 고수명 트랙슈 부품을 개발하고자 한다. 즉, 2 캐비티 사형주조 기술을 적용한 무한궤도형 트랙슈 부품을 개발하는 것으로 주조 방안 설계에서 유동성을 개선하여 제품 품질을 향상하고 원가절감을 도모하였다.

2. 주조 방안 설계 및 제작

2.1 주조 방안 설계 및 제작

사형주조 공정은 목형을 설계 제작하고, 이 목형으로 주물사를 이용하여 주형을 만들어 용융 금속을 주입하는 공정으로 정밀주조보다 주형제작 기간이 짧고 비용이 적게 투입되는 장점이 있으나, 표면 조도가 좋지 않고 가공여유가 많은 단점이 있다. 사형주조 방안 설계는 제품 상부에 압탕부를 설정하고, 압탕 높이는 제품

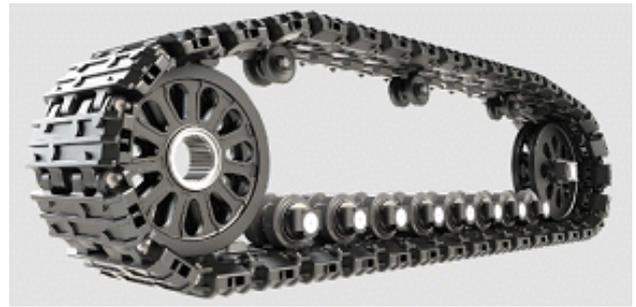


Fig. 1 Track shoe parts for super-large excavator caterpillar

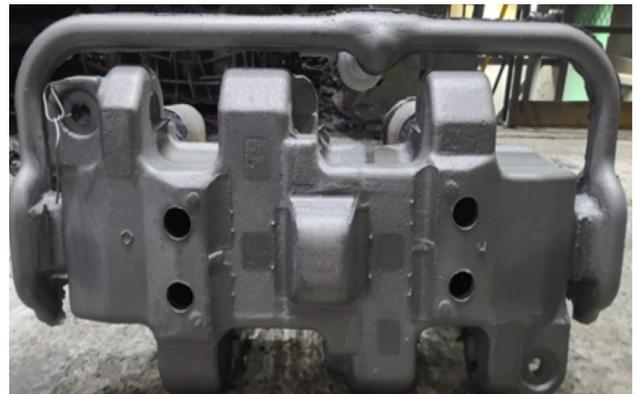
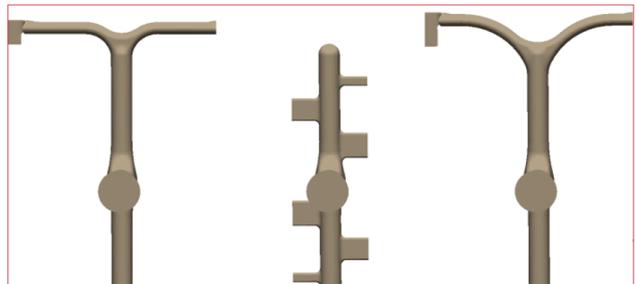


Fig. 2 1 cavity casting process product of track shoe parts for super-large excavator caterpillar



(a) Type 1 (b) Type 2 (c) Type 3

Fig. 3 Runner methods of track shoe mold for super-large excavator caterpillar

높이의 1/2 이상으로 설계하여 발열 슬리브를 부착하는 구조로 설계하였다. Fig. 1은 대형 굴삭기용 무한궤도형 트랙슈 부품을 보여준다. 무한궤도(caterpillar tracks)는 2개 이상의 바퀴와 그 둘레에 두른 판을 사용하는 무한궤도 차량에 사용되는 추진 방식으로 굴삭기 하부에 있는 트랙 또는 무한궤도라 불리는 장치로 주요 부품은 스프라켓, 롤러, 아이들러, 트랙슈 등으로 구성되어 있다.

Fig. 2는 대형 굴삭기용 무한궤도형 트랙슈의 1 캐비티 주조공정 제품을 보여준다. 1 캐비티 사형주조 기술을 적용하여 무한궤도형 트랙슈 부품을 생산하므로 제조원가 상승 요인이 되었다. 이를 개선하기 위하여 2 캐비티의 주조 방안으로 무한궤도형 트랙슈 부품을 설계하였다. Fig. 3은 무한궤도형 트랙슈의 2 캐비티 주조

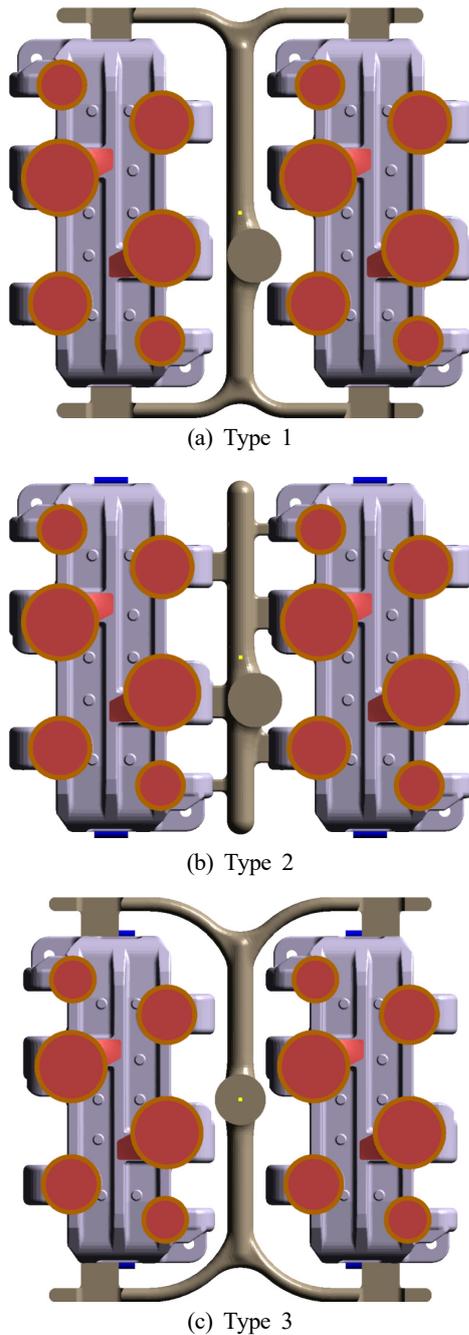


Fig. 4 2 cavity casting process design of track shoe mold for super-large excavator caterpillar

방안을 보여준다. 주조 방안 설계는 주물에서 수축되는 곳까지 용탕을 운반하며, 수축이 일어났을 때 필요한 여분의 금속을 보충할 수 있도록 고려해야 한다. 압탕은 수축에 의해 부족한 용탕을 공급해 주므로 방향성 응고를 위해 적절한 위치에 설계하였다. 탕구계는 유체의 흐름을 고려하여 용탕을 주형으로 균일하게 흘러 들어가게 3가지 타입으로 설계하였다. Fig. 3(a)는 Type 1의 런너를 보여주고, (b)는 Type 2의 런너를 보여주고, (c)는 Type 3의 런너를 보여준다. Type 3은 Type 1에서 유동성을 개선하기 위하

Table 1 Material conditions of sand casting mold

Division	Material
Cast	SCMnCrM3B
Mold	Ceramsite
Core	Body: Ceramsite Hole: Resin coated sand
Chill densener	SS275
Sleeve	Heating sleeve

여 코너 R부를 크게 설계하였다. 용탕 주입시간은 내마모 합금주강을 사용하므로 응고 구간이 높은 온도에 있으므로 미리 응고하는 것을 막기 위해 빠르게 주입하도록 설계하였다. Fig. 4는 트랙 슈 금형의 2 캐비티 주조 방안 설계를 보여준다.

Table 1은 사형주조 금형의 재료조건을 보여준다. 내마모 합금주강 소재는 SCMnCrM3B 이고, 냉금 소재는 SS275 이고, 슬리브는 발열슬리브를 사용하였다. 몰드(mold)는 세라믹 샌드를 사용하고, 코어(core)는 몸통이 세라믹 샌드이고, 구멍은 Resin Coated Sand를 사용하였다. 사형주조의 주요 제작공정은 조형을 하기 위해 주물사와 규산소다를 일정한 비율로 배합하여 2개씩 실시하였다. 도형제와 알콜을 일정한 배합비로 교반하여 조형이 완료된 몰드에 붓으로 도포하여 합형이 바닥에서 되도록 하였다. 용해를 위해 전기로를 사용하여 원자재를 장입한 후 침지식 온도계를 이용하여 온도를 확인하면서 용해하였다. 제품의 단중을 계산하여 가장 적합한 레이들을 준비하여 용해로에 Ca-Si 탈산제를 상부에 도포하여 탈산이 되도록 한 후 주입온도 1,560℃에서 주형에 주입하였다.

주기적으로 용해로 상부에 비금속 계재물을 제거할 수 있도록 슬락스를 도포하고, 주입속도는 39초 이내로 주입하였다. 주입 후 주형 상부에 발열재를 도포하여 응고가 제품부터 진행되도록 하였다. 후처리로 몰드 해체 시 제품에 손상이 없도록 탈사하며, 탈사가 완료된 제품은 쇼트 블라스트를 진행하여 육안상 표면에 이물질이 없도록 하였다. 탕구 절단은 제품에 손상이 없도록 절단하고, 열처리를 진행하였다. 이어서 가공은 황삭가공과 정삭가공을 도면에 준하여 실시하고, 최종적으로 성분검사, 침투탐상검사, 치수검사 등을 실시하였다.

2.2 냉금 설계 및 제작

주조 방안 설계에서 내부 수축결함을 제어하기 위해서는 압탕의 위치, 크기를 고려해야 하며, 제품 형상에 따라 냉금을 사용하여 방향성 응고를 촉진시켜 내부 수축결함을 제어할 수 있다. 하지만 냉금으로 인해 표면 결함이 발생할 수 있으며, 적절한 위치에 사용되지 않을 경우 방향성 응고를 방해하여 내부 수축결함이 발생할 수 있다. 따라서 적절한 위치에 적절한 크기의 냉금이 필요하다.

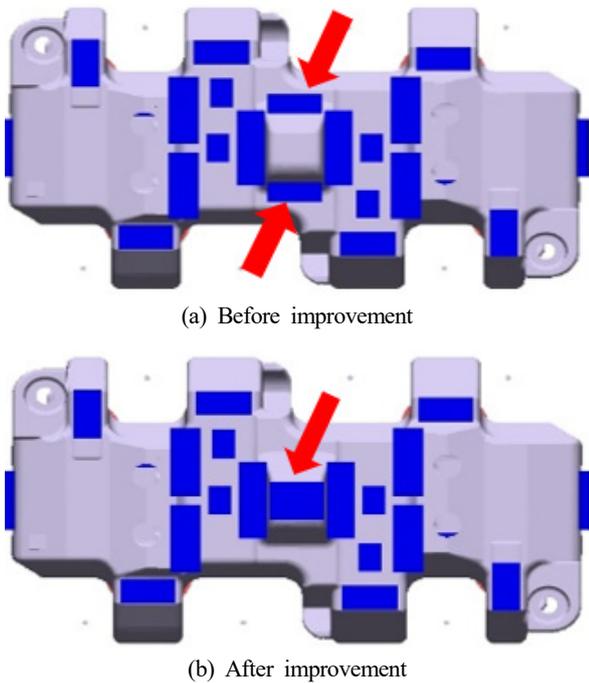


Fig. 5 Size and location of chill densener on the lug for track shoe mold

여러 공정변수를 고려하여 냉금을 설계하고, 주조 응고해석을 통하여 최적화된 냉금을 설계하였다. Fig. 5는 개발 전후 냉금의 크기와 위치 변경 예를 보여준다. Fig. 5(a)는 개발 전의 리그부에 냉금의 크기와 위치를 보여주었고, Fig. 5(b)는 개발 후의 리그부에 냉금의 크기와 위치를 보여준다. 개발 후의 리그부에는 냉금이 리그부 표면에 직접 맞닿도록 설계하였다.

3. 주조 응고해석

대형 굴삭기용 2 캐비티 사형주조 기술을 적용한 무한궤도형 트랙슈 급형의 주조 응고해석을 위해 MAGMA S/W를 활용하여 내마모 합금주강 소재에 대한 해석을 수행하였다. 내마모 합금주강 소재는 C 0.32~0.34%를 함유한 것으로 주입온도는 1,560℃로 발열 슬리브를 사용하였다. 주강 주물은 응고시 수축하기 때문에 이로 인하여 결함이 발생할 위험이 있으므로 주조 응고해석을 기반으로 최적의 주조 방안을 설계하였다.

2 캐비티 무한궤도형 트랙슈 급형의 주조 방안을 설계하기 위하여 런너의 크기와 형상, 게이트의 위치, 압탕의 위치와 크기, 슬리브의 위치와 크기, 냉금의 위치와 크기 등은 제품과 현장 작업조건을 고려하여 주조 응고해석을 통하여 최적화 설계를 수행하였다. 트랙슈에 대한 사형주조 응고해석을 위해 주조품과 코어, 스프루, 런너, 라이저를 3D 모델링하고, 중력 방향 설정과 재질, 충전시간, 주입온도 등을 입력하였다. 주조 응고해석에 사용된 해석 조건은

Table 2 Simulation conditions of sand casting

Division	Casting conditions
Pouring time (sec)	70
Pouring temperature (℃)	1,560
Mold temperature (℃)	25
Stream height (mm)	1,250
Stream diameter (mm)	Ø45
Ladle capacity (kg)	4,000

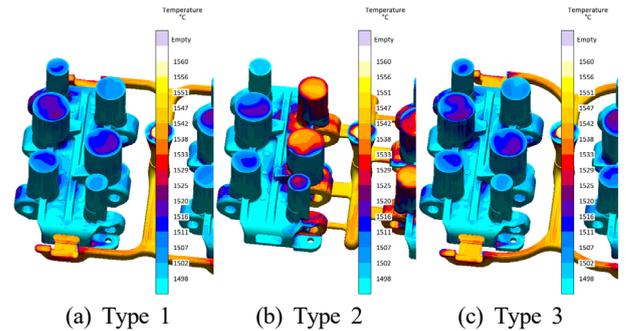


Fig. 6 Molten metal filling level of track shoe mold for super-large excavator caterpillar

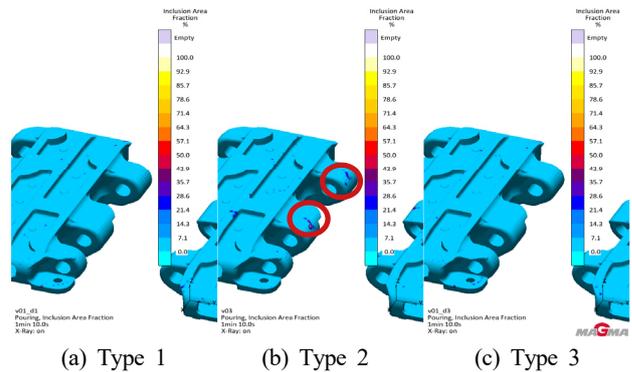


Fig. 7 Inclusion area fraction of track shoe mold for super-large excavator caterpillar

Table 2와 같다. 내마모 합금주강의 재질인 SCMnCrM3B는 저합금 주강품으로 항복강도가 540 MPa 정도인 고장력 강재이고, 사형(sand mold)의 재질은 세라믹 샌드(ceramsite)를 사용하였다. 용탕의 주입온도는 1,560℃, 주형의 예열온도는 25℃로 설정하였다.

Fig. 6은 3가지 타입의 용탕 충전 거동을 보여준다. 충전 중 난류 발생 정도는 Type 2에서 가장 높고, Type 3에서 가장 낮게 나타난다. 이는 Type 3에서 충전 거동이 가장 빠르고, Type 2에서 충전 거동이 가장 느다는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 3가지 타입의 용탕 개재물 경향을 보여준다. Type 2의 경우 핀 체결부로 용탕이 주입되므로 개재물 경향이 가장 높게 나타난다. 반면 Type 3과 Type 1은 비슷한 경향을 보이지만, Type 3에서 개재물 경향이 더 낮게

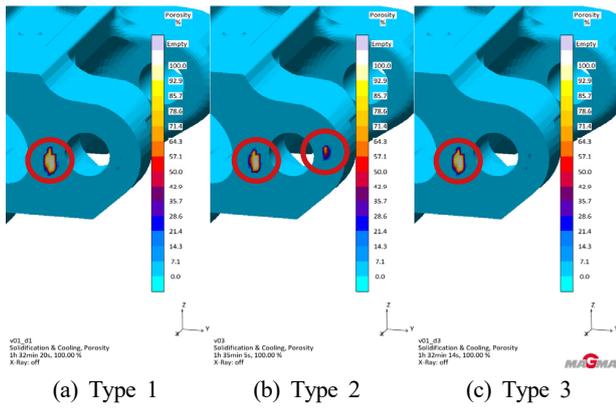


Fig. 8 Shrinkage defects tendency of track shoe mold for super-large excavator caterpillar

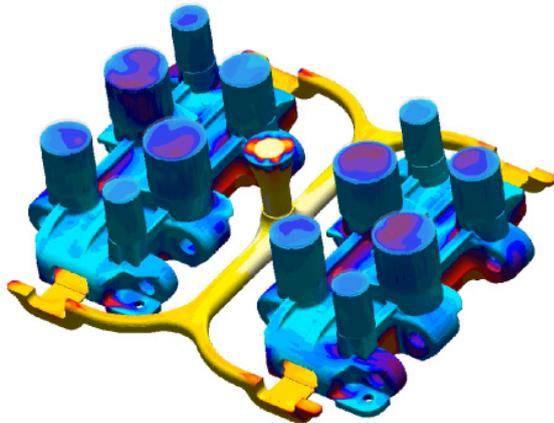


Fig. 9 Molten metal temperature change of type 3 during pouring for track shoe mold

나타난다. Fig. 8은 3가지 타입의 수축결함 경향을 보여준다. 수축결함 정도를 살펴보면, 전체 수축결함 양상은 모두 유사하나, 핀체결부에서 Type 2가 수축결함이 심하게 나타나고, Type 3과 Type 1은 비슷하나 Type 3에서 수축결함이 낮게 나타난다. 따라서 주조응고해석 결과 Type 3의 경우에 용탕 충전 거동, 개재물 경향, 수축결함 경향 등이 가장 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

탕구계 설계에 있어서 중요 인자는 주물사, 슬래그(slag), 드로스(dross), 가스(gas), 수축(shrinkage), 기공(porosity) 등이 있다. 용탕의 주입온도는 너무 높이지 말고 신속히 주입하도록 하고, 용탕의 난류도를 줄여 주형 내에서의 드로스 형성을 줄이도록 하며, 슬래그나 부유물을 막고, 주형의 침식을 줄이는 것이 중요하므로 이를 고려하여 주조 방안을 설계하였다. 주입시간을 길게 하여 낮은 온도에서 주입하면 주형을 채우지 못한 채 응고하든지, 너무 빠르면 주형의 침식, 거친 주물의 표면, 수축결함 등이 나타날 수 있다. 주철과 같은 금속은 주입속도에 그리 민감하지 않으나 주강과 같은 금속은 다른 주물용 합금에 비해 응고 구간이 높은 온도에 있으므로 미리 응고하는 것을 막기 위해 빠르게 주입하도록 설계

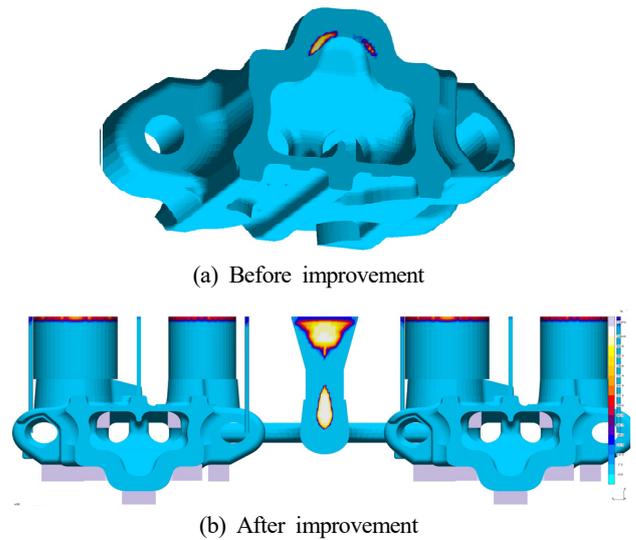


Fig. 10 Simulation results of type 3 on the lug for track shoe mold

하였다.

Fig. 9는 Type 3의 주입 용탕의 온도 변화를 보여준다. Type 3의 주입 용탕의 온도 변화에 대한 해석결과를 살펴보면, 탕구와 탕도 등에 주물의 온도가 가장 높으며, 압탕(riser) 부위에도 비교적 주물의 온도가 높게 나타난다. Fig. 10은 러그부에서 냉금 적용 전후의 주조 응고해석 결과를 보여준다. 트랙슈 부품의 러그부에서 냉금의 크기와 위치를 변경하여 주조 응고해석을 수행한 결과 냉금 적용 전에는 Fig. 10(a)와 같이 러그부 주위에 수축공이 나타나지만, 냉금 적용 후에는 Fig. 10(b)와 같이 러그부 주위에 수축공이 나타나지 않는다. 이는 트랙슈 부품의 러그부에서 냉금의 크기와 위치를 변경하면 러그부 주위에 수축공 발생을 억제할 수 있음을 주조 응고해석 결과로부터 확인할 수 있었다.

4. 결과 및 고찰

대형 굴삭기용 2 캐비티 사형주조 기술을 적용한 무한궤도형 트랙슈 부품은 유체의 흐름을 고려하여 용탕을 주형으로 균일하게 흘러 들어가게 하는 3가지 타입으로 설계하여 주조 응고해석을 통하여 가장 양호한 결과를 얻은 Type 3에 대해 시제품을 제작하였다. Fig. 11은 무한궤도형 트랙슈 금형의 조형 작업을 보여주고, Fig. 12는 무한궤도형 트랙슈 금형의 주입 작업을 보여준다. 주조품의 양부는 용탕이 주형에 어떻게 유입되고, 어떻게 응고할 것인가에 달려 있다. 탕구(sprue)는 용융 금속이 탕구계의 여러 부분에 흘러가는 수직 통로로 탕도(runner)와 주형 공간을 연결하는 짧은 입구를 말하며, 탕도는 금속이 흘러 지나가는 수평 통로이다. 압탕은 수축에 의해 부족한 용탕을 공급해 주므로 방향성 응고를 위해



Fig. 11 Molding operation for caterpillar track shoe mold of type 3



Fig. 12 Pouring operation for caterpillar track shoe mold of type 3

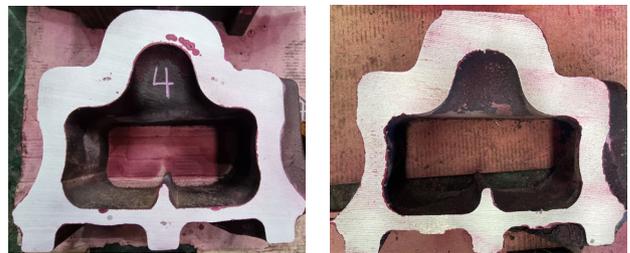


Fig. 13 Sand removal work for caterpillar track shoe mold of type 3

적절한 위치에 설치하고, 탕구계는 유체의 흐름을 위해 용탕을 주형으로 조용히 그리고 균일하게 흘러 들어가도록 설계 제작하였다. 트랙슈 부품의 주조 방안은 주물에서 수축되는 곳까지 용탕을 운반하며, 수축이 일어났을 때 필요한 여분의 금속을 보충할 수 있도록



Fig. 14 2 cavity casting process product of track shoe parts after removing sand of type 3



(a) Before improvement (b) After improvement
Fig. 15 Prototype completed before and after applying casting solidification analysis of type 3

록 설계 제작하였다. 압탕(risers)은 주물이 응고하는 마지막까지 용탕을 공급하는 역할을 한다. 즉, 주형에 대한 과도한 압력이나 약한 주형 때문에 주물이 원래의 치수보다 팽창하거나 부풀어 오를 경우 압탕으로부터 모자라는 양만큼 더 용탕을 보충한다. Fig. 13은 무한궤도형 트랙슈 금형의 탈사 작업을 보여주고, Fig. 14는 탈사 작업 후 무한궤도형 트랙슈 시제품을 보여준다.

기존 1 캐비티와 달리 2 캐비티 사형주조에서 냉금 방안을 적용하여 설계하였으나, 리그부 내부에 수축결함이 확인되었다. 이를 개선하고자 리그부 주변의 냉금 방안 일부를 수정하여 내부 수축결함 발생을 억제하고 냉금의 크기와 위치를 변경하여 최적 설계하였다. 냉금을 사용하면 보다 빠른 열방출 속도를 가져오는데 이는 냉금 재료가 높은 열확산도를 갖기 때문이다. 따라서 냉금은 방향성 응고를 촉진시키는 급격한 온도구배를 갖게 한다. 냉금은 단부효과를 증가시키고 정상적으로는 단부효과가 일어나지 못하는 압탕 사이에 사용될 때 인위적인 단부효과를 일으킬 수 있다. 냉금은 표면이 주형에 고정하여 사용하였으며, 냉금 소재는 강재를 사용하였다. Fig. 15는 리그부에서 냉금 적용 전후의 주조 시제품 단면을 보여준다. 트랙슈 부품의 리그부에서 냉금의 크기와 위치를 변경하여 주조 시제품을 제작하여 단면을 검사한 결과에서



Fig. 16 Caterpillar track shoe parts of type 3 for super-large excavator

냉금 적용 전에는 Fig. 15(a)와 같이 러그부 주위에 수축공이 나타나지만, 냉금 적용 후에는 Fig. 15(b)와 같이 러그부 주위에 수축공이 나타나지 않는다. 이는 트랙슈 부품의 러그부에서 냉금의 크기와 위치를 변경하면 러그부 주위에 수축공이 발생하지 않음을 알 수 있었다. Fig. 16은 초대형 굴삭기의 무한궤도형 트랙슈 부품을 보여준다. 그러므로 트랙슈 부품의 러그부에 냉금의 크기와 위치를 변경하여 주조 응고해석과 시제품 제작을 통하여 그 적용 결과가 일치함을 알 수 있었고, 수축결함을 개선할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 2 캐비티 사형주조 기술을 적용한 초대형 굴삭기의 무한궤도형 트랙슈 부품을 개발하는 것으로 원가절감과 제품 수명을 향상하기 위한 개선공정을 제시하였다. 즉, 트랙슈 부품의 2 캐비티 사형주조 공법을 적용하여 주조 방안 설계와 주조 응고해석, 시작금형 설계 제작, 시제품 성능평가를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 무한궤도형 트랙슈 부품을 사형주조로 설계하여 내마모 합금주강 소재를 적용한 주조 응고해석을 수행하고, 그 결과 충전율에 따른 온도 분포, 충전 시간, 주탕 불량, 수축공 등을 확인하고 최적 주조 방안을 설계할 수 있었다.

(2) 2 캐비티 사형주조에서 무한궤도형 트랙슈 부품의 주조 방안을 주조 응고해석을 통하여 최적 설계하였다. 무한궤도형 트랙슈 부품의 러그부 수축 결함을 방지하기 위하여 냉금의 크기와 위치를 변경하여 주조 응고해석과 시제품 제작을 통하여 수축결함을 개선하고 검증할 수 있었다.

(3) 트랙슈 부품 생산을 위해 기존 1 캐비티로 작업 시 생산성 문제로 인하여 원가 상승과 유동성 문제로 품질 저하가 빈번히 발생하였으나, 2 캐비티의 유동성을 개선하여 실제 주조 공정에서 품질이 우수한 최종 시제품을 확보할 수 있었다.

(4) 굴삭기 무한궤도형 트랙슈 부품에 대한 2 캐비티 사형주조 기술을 확보함으로써 원가절감과 제품 수명향상이 가능함을 확인

하였다.

후 기

이 논문은 중소벤처기업부 중소기업기술혁신개발사업(과제번호 RS-2024-00487804) 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Naotoshi, K., Liu, Z., Takao, K., 2010, Vacuum Degassed and Controlled Atmosphere Casting Process Applied in High Alloyed Steel Casting, *Journal of Korea Foundry Society*, 30:2 55-59.
- [2] Park, D. H., Hong, J. T., Kwon, H. H., 2017, Development of Sleeve Parts for Continuous Hot Zinc Plating Roll Applied to Wear-Resistant Alloy Cast Steel, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 26:4 357-364, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2017.26.4.357>.
- [3] Park, D. H., Yun, J. J., Hong, J. T., Kwon, H. H., 2017, Sand Casting Process Design for the Bush Parts of the Continuous Hot Zinc Plating Roll Applied to Wear-Resistant Alloy Cast Steel, *J. Korean Soc. Manuf. Process. Eng.*, 16:4 104-112, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.4.104>.
- [4] Jang, M. J., Kwak, S. Y., Lee, H. K., Kim, Y. H., 2022, Analysis of Thermal Deformation Behavior to Determine Optimal Process Conditions for Permanent Mold Casting of Large Pendulum Valve, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 31:6 403-408, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.6.403>.
- [5] Park, S. C., 2012, Optimization of Flask Fixtures for Marine Propellers Castings, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 13:8 3334-3338, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.8.3334>.
- [6] Youn, C. S., Park, Y. K., Lee, H. W., Lee, D. G., 2019, Study for Heat Treatment Optimization of Titanium Hollow Casted Billet, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, 32:2 68-73, <https://doi.org/10.12656/jksht.2019.32.2.68>.
- [7] Kim, M. G., Hwang, S. M., 2018, Behavior of Eutectic Si and Mechanical Properties of Sr Modified Al-7Si-0.35Mg alloy with Solid Solution Treatment for Sand Casting, *Journal of Korea Foundry Society*, 38:1 1-8, <https://doi.org/10.7777/jkfs.2018.38.1.1>.
- [8] Kang, D. M., Park, K. D., Park, J. H., 2011, High Temperature

Creep Strength of Mg-Nd-Zr-Zn Alloy in Sand Castings, J. Korean Soc. Manuf. Process. Eng., 10:6 83-88.

- [9] Nawi, I., Siswanto, W. A., Ismail, A. E., 2014, A Study of Auto Pour in Sand Casting Process, Appl. Mech. Mater., 660 74-78, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.660.74>.
- [10] Jin, C. K., 2023, Gating System Design and Casting Simulation for the Submarine Mast Cover, The Korean Society of Industry Convergence, 26:5 945-952.



Dong-Hwan Park

Research Fellow in the Department of AI Digital Manufacturing Convergence Research, Gyeongbuk Technopark. His research interests are Sheet Metal Forming, Forging and Casting Technology.
E-mail: pdh@gbtp.or.kr



Chang-Hee Lee

Manager in the Department of Quality Management, Dongil Metal Co., Ltd.. His research interests are Sand Casting Technology for more than 2 Cavities, Mold Steel/Manganese Steel Manufacturing Technology.
E-mail: chlee@dongilmetal.co.kr



Cheol-Woo Park

Director in the Department of Technology Sales, Dongil Metal Co., Ltd.. His research interests are Sand Casting Technology for more than 2 Cavities, Casting Manufacturing Technology.
E-mail: chelwoo7@dongilmetal.co.kr