

유도전동기 회전자 금형주조 시 품질평가

박상철
거제대학교 조선해양공학과

Quality Evaluations of Induction Motor Rotors during Die Casting Process

Sang-Chul Park

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Kojje College

요약 본 연구에서는 산업현장에서 널리 사용되고 있는 소형 유도전동기의 회전자를 생산공장에서 금형주조(die casting)로 제작 시 rotor core cast의 품질을 평가하기 위하여 주조해석 전용 프로그램을 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 유도전동기 회전자의 고압 금형주조 시 고속으로 사출된 알루미늄 용탕의 충전 양상을 시간 경과에 따라 평가한 결과, 용탕은 하부 end ring 부를 먼저 충전하고 수평으로 이동하여 상부 end ring, core slot 부분을 충전하여 최종적으로 core slot 부분에서 충진이 완료된다. 둘째, mould 내부에서의 용탕의 충전 양상을 보면 상부 end ring, core slot 부분보다 하부 end ring 부분에서 용탕의 유동에 의한 와류가 발생하여 결함 발생이 예측되었으며, 현장 실험결과 하부 end ring 부 단면에서 작고 큰 다수의 결함이 발견되었다. 셋째, 금형주조 작업으로 양호한 품질의 회전자를 제작하기 위해서는 cast 형상 변경이나 작업조건 등 추가적인 연구가 필요하며 이에 대해서는 추후에 보고할 예정이다.

Abstract This study examined the cast quality of small-sized induction motor rotors during the die casting process. Numerical analyses with 3-dimensional half models were performed to investigate the filling patterns of aluminum molten metals into a mold after high-speed injections. The following were obtained from numerical analyses and experimental results. First, molten metals started to fill the lower end ring, then moved horizontally to fill the core slot and upper end ring, and finally stopped to fill the rotor core slot. Second, circulation of molten metals occurred at the lower end ring, resulting considerable porosity at the section of lower end ring from the experimental results. Third, further work for obtaining sound quality of rotor core cast is required to develop a new shape of the rotor core cast or improve the die casting conditions.

Keywords : Induction Motor, Rotor, Die Casting, Rotor Core, Aluminum Cast, Filling Analysis

1. 서론

회전기는 회전자의 회전운동을 통하여 전력을 발생시키거나 전력을 받아 기계동력을 발생시키는 장치이다. 이러한 회전기는 기계동력을 발생시키는 전동기(motor)와 전기에너지를 발생시키는 발전기(generator)로 나눌 수 있으며, 산업현장에서는 쉽게 기계동력을 얻을 수 있

는 교류 유도전동기가 널리 사용되고 있다. 회전자(rotor)는 전동기에서 회전축을 중심으로 회전하는 기기로서 용량 및 사용목적에 따라 그 종류가 다양하며, 고압의 금형주조(die casting)법으로 rotor core의 slot 부분을 용융 알루미늄으로 단시간에 충전시켜 제작된다[1].

특히 출력이 낮은 소형 유도전동기 회전자는 생산공장에서 side gate type의 die casting 작업으로 제작되고

*Corresponding Author : Sang-Chul Park(Koje College)

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

Received July 9, 2018

Accepted October 5, 2018

Revised (1st August 2, 2018, 2nd August 9, 2018)

Published October 31, 2018

있는데 최근에 cast 품질에 문제가 발생하고 있다고 현장에서 보고되고 있다. 회전자 cast 부분에 주조작업에 의한 다수의 결함이 발생하면 전기적 효율이 감소하고 고속회전 시 unbalancing 문제로 인하여 소음이 발생하여 추가적인 보정작업이 요구되므로 생산성 향상에 걸림돌이 되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 금형주조품의 품질에 대한 관심이 어느 때보다 높아지면서 현재 생산되고 있는 소형 유도전동기 회전자에 대하여 현재의 금형주조 작업조건에서 rotor end ring 부분의 품질을 해석적인 방법과 실험적인 방법을 사용하여 평가하였으며, 추후에 보고될 2차 연구결과에서는 본 연구결과를 바탕으로 회전자 die casting 작업시 건전한 cast 품질을 얻을 수 있는 대안을 제시하고자 하였다[2-4].

2. 본론

2.1 금형주조(Die Casting) 작업

본 연구에서 대상으로 선정된 2전극 소형 유도전동기의 회전자(rotor, Fig. 1 참조)를 생산공장에서 die casting작업으로 제작하는 순서는 다음과 같다. 우선 Fig. 2에 나타난 두께 0.5mm, 반경 101.57mm, core slot이 38개인 SS23 강판(Table 1 참조) rotor core를 높이 230mm까지 층층이 쌓은 후 직경 67mm인 shaft를 core 내부 hole에 삽입, 고정시킨 다음 Fig. 3에 나타난 die casting 장비의 fixed die part 내부에 안치한 후 movable die part를 fixed die part에 이동시켜 결합시킨다. 그 후 movable die part 하부에 연결된 shot sleeve 끝부분 hole에 초기온도 680°C인 순수 알루미늄 용탕을 부어 넣은 후 sleeve 끝에 연결된 plunger를 수평방향으로 최대 4,500 mm/sec 속도로 이동시켜 sleeve 내부에 있던 용탕을 rotor core slot 내부로 고속으로 충전시킨다. 이때 sleeve에서 고속으로 사출된 용탕은 회전자 end ring 부 측면에 설치된 side gate를 통해 우선 수직방향으로 end ring 부 하부를 충전시키고 그 다음 수평방향으로 이동하여 rotor core 내부를 완전히 충전시킴으로서 회전자가 제작되는 방식이다. 이 때 회전자 상부, 하부 end ring의 blade 높이는 52.37mm, pin 개수는 상, 하부 각각 12개이다.

한편 현장에서 사용되고 있는 금형주조 장비는 사출 거리(injection stroke) 575mm, sleeve 직경 106mm,

sleeve 길이 415mm로 다른 유사 장비와 달리 사출 gate가 end ring 부 옆에 부착된 horizontal type이다.

Table 1. Chemical compositions of Rotor Core(wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
SS23	0.02	1.13	0.4	0.025	0.008	0.02	0.03	0.01



Fig. 1. Configuration of Induction Motor Rotor

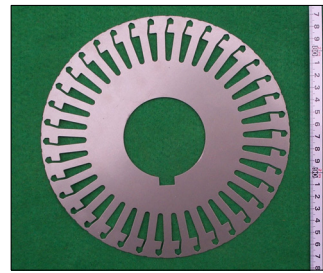


Fig. 2. Shape of Rotor Core

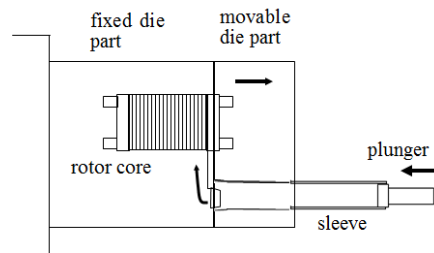


Fig. 3. Schematic Diagram of Die Casting Equipment

2.2 유동해석

유도전동기 회전자 금형주조 시 용탕이 사출된 후 상하부 end ring, rotor core slot에 발생하는 용탕의 유동 및 충전 양상을 시간경과에 따라 평가하기 위하여 수치 해석을 수행하였으며, 해석에는 유한체적법 기반의 구조

해석 전용프로그램인 AnyCasting을 사용하였다[5].

회전자 금형주조 시 shaft, rotor core를 제외하고 runner system, 3개의 ingate를 포함한 알루미늄 cast만의 형상을 Fig. 4에 나타내었으며, 이러한 cast 형상에 대하여 충전해석을 수행하기 위한 수치해석 모델은 side gate의 형상 및 3개의 ingate 위치, rotor core의 slot 개수 및 형상 등 대칭조건과 경계조건, 수치해석 시 계산시간 등을 고려하여 half model을 채용하였으며 그 형상을 Fig. 5에 나타내었다.

전체 rotor core cast model을 감싸고 있는 주변 mould는 경계조건에서 virtual die로 설정하였으며, 해석에 사용된 전체 cell 개수는 약 16,000,000개, 사용된 유동해석 조건은 core length 230mm, 금형 재질은 SKD 61, 주형 예열온도 200°C, rotor core 초기온도 25°C, cast 주입온도 680°C, cast-mould 사이 열전달계수는 0.02cal/cm²·sec·°C, 주위온도 25°C 이다.

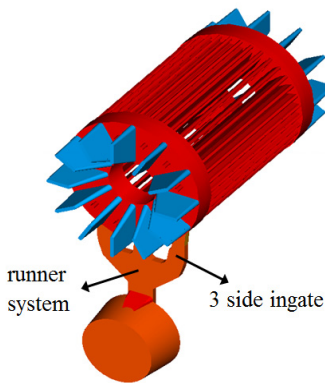


Fig. 4. Shape of Rotor Core Cast

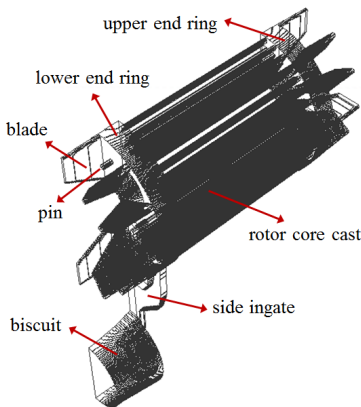


Fig. 5. Analysis Model of Rotor Core Cast

2.3 해석결과

본 연구에 사용된 금형주조 현장 작업조건은 plunger 이동속도가 최대 4,500mm/sec인 고속사출이며 용탕이 사출되기 시작하여 충진이 완료될 때까지 소요되는 시간은 0.29초이다. 이러한 작업조건에 대하여 주조해석 전용프로그램을 사용하여 용융 알루미늄이 core slot 내부로 충전되는 양상을 평가하였으며, 그 결과 용탕이 전체 rotor core cast 체적의 10%, 20%, 40%, 60% 충전 시 용융 알루미늄의 모습을 Fig. 6.(a)~(d)에 나타내었다.

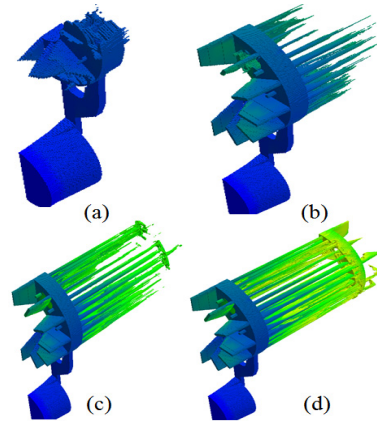


Fig. 6. Filling Patterns of Cast Model
(a) 10% (b) 20% (c) 40% (d) 60%

그림에 나타난 바와 같이 용탕이 mould 내부로 충전되는 양상을 살펴보면, 용탕은 shot sleeve를 떠나 sleeve gate를 통과하면서 고속으로 상부로 분출되어 먼저 하부 end ring 부 밑부분을 충전하고 그 다음에 하부 blade를 점진적으로 충전하기 시작하여 충전률이 20%에 이르면 하부 end ring, 하부 blade는 모두 충전되어 용탕은 본격적으로 core slot 내부로 이동하기 시작한다. 한편 충전률이 40%에 이르면 용탕은 수평방향의 core slot를 지속적으로 충전하다가 상부 end ring 부를 충전하기 시작하고 충전률이 60%에 이르면 상부 end ring의 blade 부분을 상당부분 충전하게 된다. 상부 blade가 완전히 충전되면 용탕은 하부로 내려오면서 충진이 안된 core slot 부분을 충전하게 되며 최종적으로 상부 end ring에서 밀어내어 조금 떨어진 rotor core slot 부분에서 충진이 완료된다는 사실을 알 수 있다.

이러한 금형주조 시 rotor core cast, end ring, blade에서의 품질상태를 평가하기 위하여 Fig. 7에 나타난 section-1, section-2, section-3 단면에서의 충전률에 따

른 용탕의 유동 변화를 평가하였다. 그 결과로 단면의 중심부인 section-1에서의 용탕의 유동 양상은 Fig. 8, 회전자에 삽입된 축의 외경 부근인 section-2에 대해서는 Fig. 9, 단면 내-외경 중심부인 section-3에 대해서는 Fig. 10에 나타내었으며 편이상 biscuit, side ingate cast는 평가에 포함하지 않았다.

Fig. 8에 나타난 단면 중앙부 section-1에서의 용탕의 유동 양상을 살펴보면, 유동 양상은 비교적 큰 blade가 존재함으로 인하여 하부 end ring 부분에 용탕의 와류가 발생하여 지속적으로 유지되고 있으며 충진이 50%~60%가 될 때까지 존재하고 있음을 알 수 있다. 반면에 상부 end ring 부분과 rotor core slot을 충전하는 과정에는 큰 차이는 없으며 우선 상부 end ring 부 윗부분을 먼저 충전한 후 그 다음에 점진적으로 아랫부분을 충전하고 최종적으로 rotor core slot 부분을 충전한다는 것을 확인할 수 있다.

한편 section-2 단면에서의 용탕의 유동 양상은 Fig. 9에 나타난 바와 같이 전체적으로 section-1에서의 유동 양상과 유사한 형태를 보여주고 있다. 그러나 하부 end ring 부에서 blade가 상대적으로 크기 때문에 용탕이 blade로 계속 충전됨에 따라 그 빈 공간을 채우기 위하여 용탕이 지속적으로 side ingate로 부터 공급되어야 하므로 와류가 발생하여 기포가 end ring 부분에 한동안 존재하게 되며 이러한 사실은 용탕이 15%, 45%까지 충전되었을 때의 용탕의 유동 양상을 보면 알 수 있다. 즉 용탕의 와류에 의하여 공기가 갇히게 되어 기포가 상대적으로 크고 넓게 존재하게 되어 결과적으로 응고 후 하부 end ring 부에 기포가 많이 발생할 수 있다는 것을 예상할 수 있다. 반면에 상부 end ring 부 및 최종 충진이 이루어지는 rotor core slot 부분에서는 다른 경우와 유사한 충전 양상을 나타내고 있다.

반면에 section-3 단면에서의 용탕의 유동 양상은, Fig. 10에 나타난 바와 같이 section-3 자체가 3개의 side ingate 외부에 위치한 절단면이기 때문에 다른 절단면에서의 유동 양상과 다를 것으로 예상되었지만 결과적으로 유사한 모습을 나타내었다. 용탕이 고속으로 mould 내부로 충전됨에 따라 하부 end ring 부에는 15% 충전률에서 와류 발생으로 기포가 다소 크게 발생하였으나 곧 감소하기 시작하여 section-2와 달리 30% 충전률에서는 end ring 부에는 작은 크기의 기포가 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 기포는 좀 더 충진이 진행됨에 따라

용탕으로 완전히 채워짐을 알 수 있으며 그 외 다른 부분의 충전 양상은 section-1, section-2의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이러한 용탕의 유동 결과로부터 예측된 품질상태를 실험적으로 검증하기 위하여 실제제품에 대하여 금형주조 후 하부 end ring 부를 절단한 단면 모습을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 다수의 작고 큰 기공이 단면에 분포하고 있음을 확인할 수 있다[6-7].

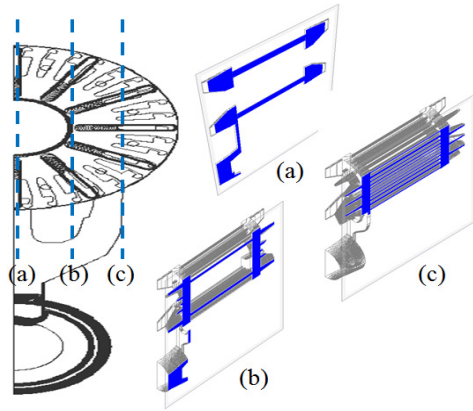
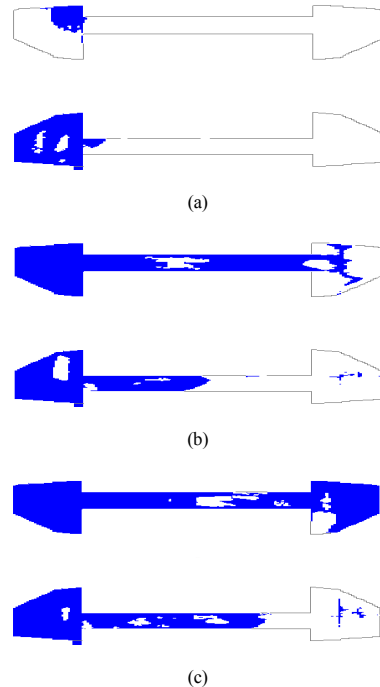


Fig. 7. Evaluation Location of Cast Model
(a) Section-1 (b) Section-2 (c) Section-3



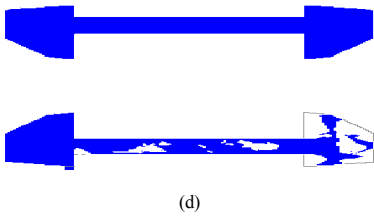


Fig. 8. Filling Patterns at Section-1
(a) 15% (b) 45% (c) 60% (d) 90%

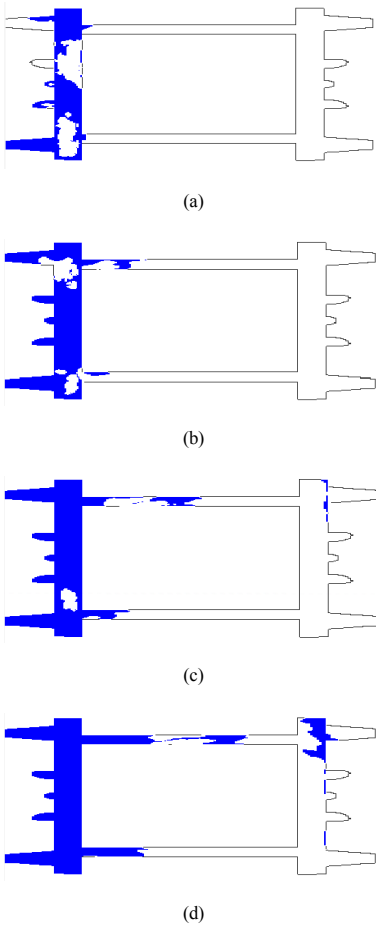


Fig. 9. Filling Patterns at Section-2
(a) 15% (b) 30% (c) 45% (c) 60%

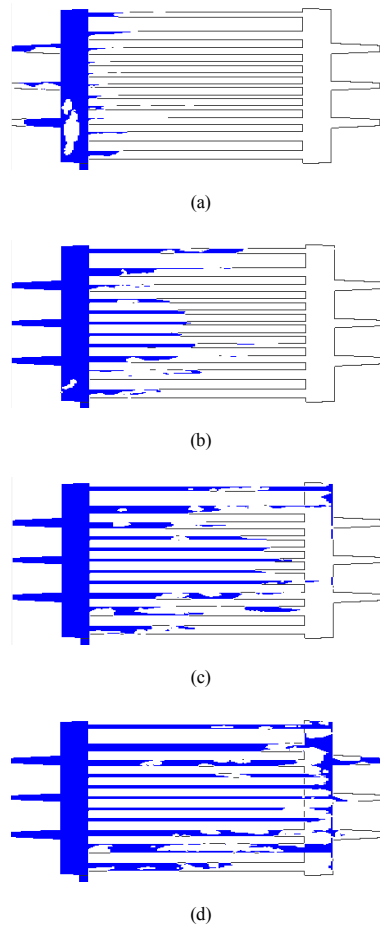


Fig. 10. Filling Patterns at Section-3
(a) 15% (b) 30% (c) 45% (d) 60%



Fig. 11. Sectional View of Lower End Ring

3. 결론

본 연구에서는 소형 유도전동기 회전자자의 금형주조 시 알루미늄 cast의 품질을 평가하기 위하여 수치해석을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

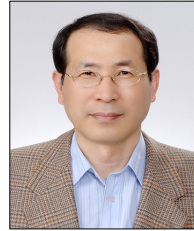
- 1) 유도전동기 회전자자의 금형주조 시 품질을 평가하기 위하여 충전해석을 수행하였으며, 그 결과 용탕은 하부 end ring 부를 먼저 충전하고 수평으로 이동하여 상부 end ring, core slot 부분을 충전하여 core slot 부분에서 충진이 완료되는 것을 알 수 있다.
- 2) 금형주조 시 용탕의 충전 양상을 보면 하부 end ring 부에 용탕의 유동에 의한 와류가 발생하여 결함발생이 예측되었으며, 현장실험 결과 하부 end ring 부 단면에서 다량의 결함이 발견되었다.
- 3) 양호한 품질의 회전자를 제작하기 위해서는 cast 형상 변경이나 작업조건 등 추가적인 연구가 필요하며 이에 대해서는 추후에 보고할 예정이다.

References

- [1] J. Campbell, "Complete Casting Handbook", Elsevier, 2011.
- [2] M. O. Durowoju, "Numerical Characterization of the Pores and the Determination of the Point Of Crack Initiation in Some Cast Aluminum Alloys", *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol.3, No.2, pp.1229-1237, March, 2013.
- [3] R. Podprocká, J. Malik, D. Bolibruchová, "Defects in High Pressure Die Casting Process", *Manufacturing Technology*, Vol.15, No.4, pp.674-678, 2015.
- [4] B. G. Jeong, H. K. Kwon, "A Case Study on Developing Automotive Part(Housing) by Filling and Solidification Analysis", *Journal of Society of Korea Industrial and System Engineering*, Vol.38, No.1, pp.44-51, 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.11627/jkise.2014.38.1.44>
- [5] AnyCasting Co., Ltd., version 1.1
- [6] Y. L. Hsu, C. C. Yu, "Computer Simulation of Casting Process of Aluminium Wheels - A Case Study", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol.220, No.2, pp.203-211, 2006.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM381>
- [7] Y. Otsuka, "Experimental Verification and Accuracy Improvement of Gas Entrapment and Shrinkage Porosity Simulation in High Pressure Die Casting Process", *Materials Transactions*, Vol.55, No.1, pp.154-160, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.2320/matertrans.F-M2013835>

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, 주-단조공학, 열탄소성 수치해석