

# 1/4 마력급 압축기의 성능 개선을 위한 SPIM 회전자에 관한 연구

(Fill Factor of Rotor of Single Phase Induction Motor  
for the Capability Improvement of 1/4 HP Compressor)

김강원\* · 안현진 · 최준호 · 한재현 · 김의선 · 임영철\*\*

(Kang-Won Kim · Hyun-Jin Ahn · Jun-Ho Choi · Jae-Hyun Han · Eui-Sun Kim · Young-Cheol Lim)

## Abstract

This paper discusses to the capability improvement of the 1/4 HP compressor. And, for efficiency improvement of the single phase induction motor, this paper has proposed a casting method to improving the fill factor of the rotor of the single phase induction motor. First, by using FEM, it was analyzed the magnetic flux distribution and the fill factor to the SPIM rotor by the conventional method and the proposed method. And, based on the FEM analysis results, SPIMs are manufactured by the each casting process. Through experiments using dynamometer, they were compared and measured to their efficiencies. In addition, through experiments using Calorimeter, we have analyzed the refrigerating capacity of the compressor of which they were applied. Based on the results of the previous two experiments, they are to verify the validity of the proposed method.

Key Words : Single Phase Induction Motor, FEM, Compressor, Rotor, Fill Factor

## 1. 서 론

오늘날 산업현장은 과학기술의 발전에 힘입어 전기 에너지의 사용량이 급증하고 있다. 그 사용량의 대부분은 장비를 구동하기 위한 동력원이며, 이 동력원 중

가장 많이 쓰이는 전동기는 유도전동기(IM, Induction Motor)이고, 거의 70%이상을 차지하고 있다. 유도전동기의 원리는 고정자(stator)의 권선에 교류전원을 인가함으로써 생성된 회전자계가 전자기유도현상에 의해 회전자(rotor)에 기전력과 전류가 유기되어 회전하는 것이다[1-4].

그래서 다른 전동기들에 비해 원리 및 구조적으로 간단하여 가격이 저렴하고, 내구성이 강하고, 신뢰성이 높은 장점을 지니고 있다. 이러한 유도전동기는 기술이 발달함에 따라 그 사용 범위는 점점 넓어지고 있으며, 이 중에서 단상유도전동기(SPIM,

\* Main author : Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University

\*\* Corresponding author : Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University

Tel : 062-530-1740, Fax : 062-530-1749

E-mail : yclim@jnu.ac.kr

Received : 2015. 7. 6

Accepted : 2015. 7. 31

Single Phase Induction Motor)는 별도의 전력 스위칭 소자들이 필요 없이 상용전원(110V~220V)을 그대로 이용할 수 있어서 가정용 기기에 많이 이용되고 있다. 하지만 근래에 들어 가정용기기 중 특히 냉장고의 경우 고급화 및 대형화로 인한 에너지 절감과 동시에 고효율 화를 위해 SPIM를 대체하여 영구자석을 매입한 회전자 구조의 가변속 제어가 가능한 BLDC(Brushless Direct Current) 전동기로 전환하는 추세이다. 그러나 별도의 제어기를 필요로 하기 때문에 추가적인 가격 상승이 발생하게 되는 단점이 있어 아직까지는 가격이 저렴한 SPIM의 사용 비중이 크다[5-7].

이에 따라 SPIM의 출력의 손실을 줄이고 전기에너지의 효율적인 사용을 위한 많은 연구가 현재 진행되고 있으며, 이는 제작기술, 설계적 기법, 재료 등에 의해 향상을 할 수 있다. 첫 번째로 고정자 슬롯에 삽입되는 도체(구리 및 알루미늄)의 밀도를 의미하는 슬롯점적율을 향상시키는 방법의 제조기술 향상이 있으며, 두 번째로 코어, 구리, 알루미늄 등의 전기도체와 같은 재료의 체적을 증가시키는 방법과 저 철손의 전기 강판으로 손실을 줄이는 재료를 적용하는 방법이 있으며, 세 번째로 목표효율에 맞추어 모터를 최적 설계하는 방법이 있다[8].

따라서 본 논문에서는 압축기의 성능을 개선하는 SPIM을 제작하기 위해 회전자 재료인 알루미늄의 충진율을 향상시키는 제작기술을 제안하였다. 그 내용으로 우선 유한요소해석(FEM, Finite Elements Method)을 이용하여 기존의 방법인 가압주조와 원심주조, 그리고 제안한 방법인 개선된 원심주조에 의한 충진율에 따른 해석을 수행하였다. 다음으로 이 해석을 기반으로 세 종류의 회전자가 적용된 SPIM의 시제품을 제작하여 Dynamometer를 이용하여 효율을 비교 분석하였다. 또한 결과적으로 압축기에 적용을 하기 때문에 세 종류의 SPIM을 압축기에 결합하였다. 그리고 이 압축기는 Calorimeter를 이용한 실험을 통하여 충진율에 따른 냉동능력을 비교함으로써 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 회전자의 주조방법과 충진율

### 2.1 기존의 주조방법

기존의 주조방법은 크게 가압주조법과 원심주조법으로 나뉜다. 우선 가압주조법(수평 및 수직식)은 SPIM의 회전자를 생산하는 가장 보편적인 공법으로 널리 사용되고 있으며, 그림 1과 같다. 이 주조법은 대량 생산이 가능하여 생산성이 우수한 장점이 있다. 하지만 공정 과정에서 주형에 알루미늄을 고속, 고압으로 주입하기 때문에 충전 시 난류가 생성되고, 이 때 발생한 가스 또는 금형 내에 잔류하는 공기가 혼입된 채 응고되면서 발생하는 수축기공을 피할 수 없는 단점이 있다. 그래서 가압주조법에 의해 생산된 SPIM 회전자의 경우 충진율은 85%정도의 수준이다[9].



Fig. 1. Horizontal and vertical type of squeeze casting method

다음으로 원심주조법은 그림 2와 같이 금형 하단에 취부되어 있는 회전 주형이 위쪽으로 상승함으로써, 상, 하 몰드가 결합된 후 회전 주형이 고속 회전(700~1000rpm) 중에 용융금속을 주입구를 통해 주입함으로써, 원심력에 의한 압력을 용융 금속에 가하여 금속 산화물과 비금속 개재물을 밀도 차에 의해 원심 분리시켜 회전자의 도체부를 성형하는 공법이다. 가압주조법 대비 상대적으로 낮은 압력으로 주조를 성형할 수 있는 장점이 있다. 그리고 이처럼 낮은 압력 조건에서 성형된 원심주조 회전자는 알루미늄과 회전자 적층 간에 더 나은 절연을 가능케 하며, 회전자-슬롯 바와 엔드링부의 알루미늄 충진율 향상에 따

른 수축 기공의 감소로 인해 회전자-바 저항 및 공극률이 감소하여 결과적으로 전도도가 높은 고밀도의 회전자를 만들 수 있다. 하지만 낮은 압력으로 성형되기 때문에 구조면의 강성이 낮고, 공정 특성상 주물의 내측부에 불순물이 포함될 우려가 있으며, 가압 주조법에 비해 초기 설비 투자비용이 크고 생산성이 낮은 단점 등이 있다. 그래서 원심주조법에 의해 생산된 회전자의 충전율은 공정 조건에 따라 충전율은 약 95~99% 수준이다[10].

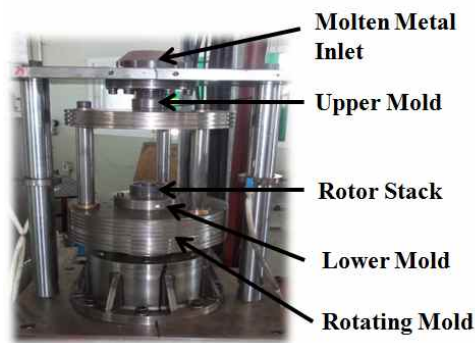


Fig. 2. Centrifugal casting method

### 2.2 제안한 주조방법

기존의 원심주조법에 의해 만들어진 회전자의 충전율은 95~99%정도로 편차가 심하다. 그래서 용융금속 알루미늄이 균일하게 채워지지 않은 상태에서 응고되어 도체부 내측이 침식되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제는 원심주조법 공정 특성에 따른 결함으로써, 주형이 빠르게 회전하는 상태에서 알루미늄이 주입되기 때문에 회전 관성에 의해 알루미늄이 회전자 외측으로 편중되어 내측 일부가 빈 공간을 형성한 채로 응고되기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 이와 같은 문제를 개선하기 위해 다음과 같은 공정 방법을 제안하였다. 기존의 조건보다 안정적으로 알루미늄 용액을 균일하게 채우기 위해 700rpm 이상이던 주형의 회전속도를 600rpm으로 조정하였고, 720°C로 녹인 알루미늄을 원심주조기의 주입구를 거쳐 회전자 주형에 주입되는 과정에서 알루미늄과 회전자 코어 간에 온도차가 크기 때문에

두 물질의 접촉으로 인한 열 손실 발생으로 알루미늄 용액이 빠르게 응고되는 현상을 지연하기 위해 200°C 이던 주형의 히팅온도(예열)를 250°C로 상향 조정하여 기존의 원심주조법을 개선하였다.

### 3. FEM 해석

앞 장에서 언급한 기존의 방법과 제안한 방법에 의한 시제품 제작에 앞서서 주조법에 따른 회전자의 특성을 확인하기 위해 FEM해석을 수행하였다. 충전율을 제외한 모델의 여러 조건들은 동일하게 유지한 상태에서 회전자를 설계하였고, 표 1은 FEM 해석 모델의 사양을 나타내고 있다[11-12].

Table 1. Specifications of FEM model

항 목	값	
Voltage(V)	220	
Speed(rpm)	3557	
Power(W)	175	
Torque(Nm)	3.9	
Line Current(A)	0.8	
Pole number	2	
적층 길이(mm)	48	
공극길이(mm)	0.2	
고정자 슬롯 수	24	
회전자 슬롯 수	28	
권선	Main $\Phi$ 0.80	83.83.65.65.33
	Aux $\Phi$ 0.50	80.80.20.20

그림 3의 (a), (b), (c)는 회전자의 충전율에 따른 모델의 3°에서의 자속밀도 분포에 대한 해석 결과를 나타내고 있다. 회전자도체의 충전율이 높으면 회전자도체에서 유도되는 전류와 이 전류에 의한 자속이 증가하게 되고, 이로 인해 고정자 자속은 회전자 자속에 대한 반작용 자속이기 때문에 고정자의 자속밀도는 감소하게 된다. 이와 같은 원리를 바탕으로 FEM 해석

결과 충전율이 높을수록 회전자 자속밀도는 증가하고, 고정자의 자속밀도는 감소하게 되는 결과를 확인할 수 있었다. 즉 충전율의 향상은 전기전도율에 직접적인 영향을 주며, 이로 인해 토크특성 및 효율이 향상된 사실을 확인할 수 있다.

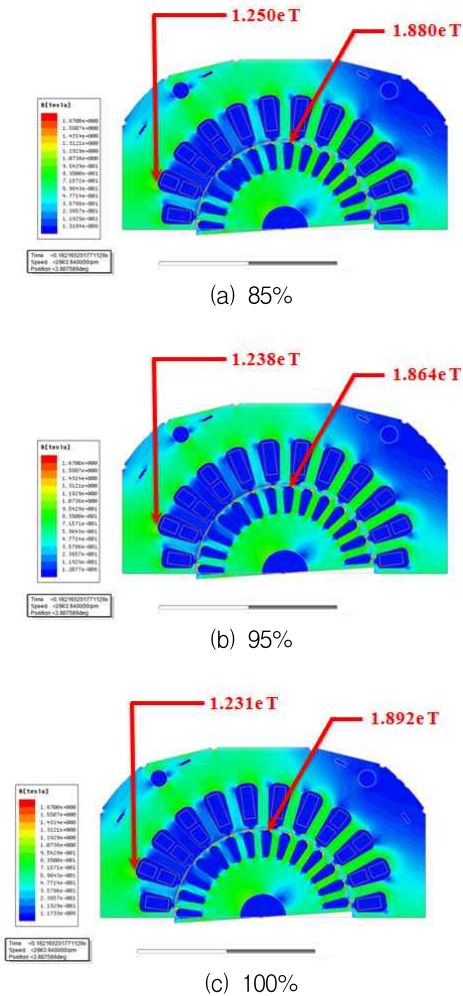


Fig. 3. Magnetic flux density distribution by fill factor

## 4. 실험 및 고찰

### 4.1 주조방법별 회전자 충전율 분석

각 타입의 회전자의 충전 상태를 비교 분석하기 위

해 외경  $\Phi 60 \times$  적층 48mm의 회전자 코어에 그림 4와 같이 타입별로 각각의 시제품을 제작하였다. 기존의 가압주조법과 원심주조법 두 공정의 압력 차이가 충전 상태에 미치는 영향을 확인하기 위해 주물 제조 금형의 특성을 제외하고, 충전율에 영향을 끼칠 가능 변수인 용융금속의 순도(알루미늄 99.7%), 용해로 온도(720℃) 및 기타 조건 등을 동일 조건으로 제작하였다. 그리고 제안된 원심주조법의 경우 회전속도와 주형의 히팅온도를 제외한 나머지 공정 조건들은 기존의 원심주조법과 동일하게 제작하였다.



Fig. 4. Manufactured rotor by casting method

Table 2. Cutting plane of manufactured rotor

가압주조	원심주조

제작 결과 가압주조법과 원심주조법에 의한 회전자 도체의 외형은 주조 방법 차이에 따른 형상 차이를 보이지만, 기존의 원심주조법과 제안된 원심주조법의 외형 차이는 없는 것으로 그림 4에서 보는 바와 같이 확인할 수 있다. 또한 표 2는 제작된 시제품의 기존 가압주조와 원심주조의 회전자도체의 내부 절단면을 나타내며, 수축 기공 유무의 차이를 확인할 수 있다.

표 3은 기존의 원심주조와 제안된 원심주조의 절단면을 나타내며, 기존의 원심주조의 경우 침식현상 발생된 사실을 확인할 수 있었다. 이는 공정 조건 불안정으로 인한 회전자도체 충전 미흡이 주된 원인으로 판단된다. 반면 제안된 원심주조의 경우 침식현상이 발생하지 않았다.



Table 3. Comparison of the cutting plane of the centrifugal casting rotor

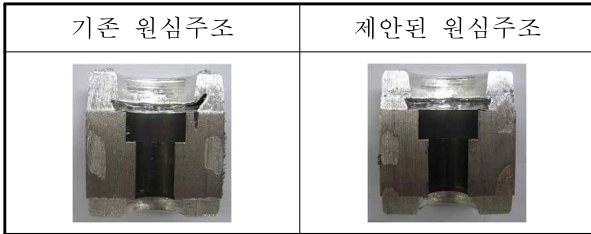


Table 4. Specifications of manufactured rotor

	가압주조	원심주조	제안된 원심주조
상단 엔드링밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.31	2.52	2.67
하단 엔드링밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.32	2.66	2.69
바 밀도(g/cm <sup>3</sup> )	2.40	2.61	2.70
바 저항( $\mu\Omega\cdot\text{cm}^3$ )	3.19	3.07	3.01
충진율(%)	86.79	96.17	99.63
충진율 편차(%)	약 1%P	약 3%P	약 1%P

표 4는 제작된 세 가지 타입 회전자의 밀도 및 충전율을 비교한 결과이다. 기존 가압주조 대비 기존 원심주조의 회전자의 바(Bar) 저항, 밀도 충전율이 우수한 특성을 보이고 있다. 하지만 기존 원심주조의 경우 충전율 편차가 심한 것으로 확인되었다. 제안된 원심주조 경우 기존 원심주조 대비 부분별 밀도가 모두 상승하였고, 바 저항은 약 2% 저감 효과를 보였다. 전체 충전율은 약 4% 향상되었으며, 충전율의 편차 또한 감소된 결과를 보였다.

시제품 제작을 통해 가압주조 방법에 비해 원심주조 방법의 회전자가 충전율이 우수하다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 가압주조 방법에 비해 원심주조 방법의 주물 성형 압력이 상대적으로 낮기 때문에 알루미늄과 회전자 적층 간에 더 나은 절연을 가능케 하여 회전자-슬롯 바의 저항이 감소하였으며, 기공 감소로 인해 회전자의 충전율이 향상된 사실을 확인할 수 있었다. 또한 제안된 원심주조 방법의 경우 회전자 내부에 알루미늄이 균일하게 채워진 상태에서 응고되도록 하기 위해 주형의 회전속도를 낮춰 회전 시 발생하는

진동을 최소화함과 동시에 응고 속도를 늦추기 위해 주형의 온도를 높임으로써 회전자 도체부의 전반적인 충전 상태 결함 및 충전율이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

#### 4.2 SPIM 효율 비교

제작한 회전자를 적용한 SPIM의 효율을 측정 및 비교하기 위해 그림 5와 같은 SPIM Dynamometer를 구성하였다.



Fig. 5. SPIM Dynamometer

Dynamometer를 이용하여 부하의 변화 따른 SPIM의 효율을 비교하였다. SPIM 효율에 영향을 미치는 가능 변수로 회전자의 충전율을 제외한 모든 변수는 배제하기 위해 동일한 측정 조건으로 실험을 진행하였다. 또한 실험 결과에 대한 신뢰성을 높이기 위해 그림 6과 같은 고정자를 단품으로 제작하여 앞에서 제작된 회전자를 적용한 실험을 진행하였다. 그리고 표 5는 제작된 고정자 모델의 사양이다.



Fig. 6. Stator of SPIM

Table 5. Specifications of manufactured stator

항 목		고정자
상용 전원(V/Hz)		220V/60Hz
적층 길이(mm)		48
공극 길이(mm)		0.2
극수		2
Run Capacitor( $\mu$ F)		5
권선저항 ( $\Omega$ )	주권선	7.54
	보조권선	11.41
초기 온도( $^{\circ}$ C)		25

Table 6. Experiment results of Dynamometer

	가압주조	원심주조	제안된 원심주조
충진율 (%)	87	96	99
속도(rpm)	3536	3538	3549
전류(A)	0.86	0.82	0.81
입력(W)	176	173	171
역률(%)	0.93	0.96	0.96
기동토크(Nm)	7.83	7.69	7.77
최대토크(Nm)	12.04	12.19	12.26
코일온도( $^{\circ}$ C)	29.2	28.5	28.1
효율(%)	82.8	84.1	85.2

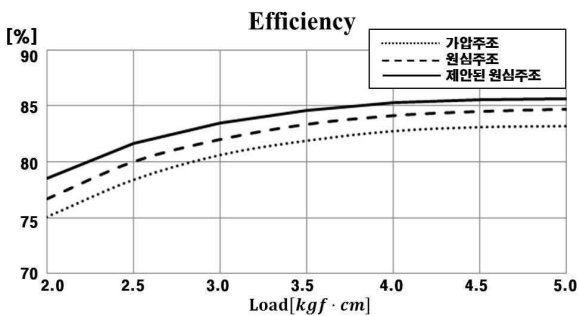


Fig. 7. Comparison of efficiency by casting method

표 6과 그림 7은 제작한 고정자로 220V/60Hz를 인

가하여 충진율이 다른 회전자를 비교 시험한 결과이다. 가압주조법 회전자 대비 원심주조법 회전자의 모터 효율이 1.3% 상승효과를 보였으며, 토크특성이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 그리고 제안된 원심주조법에 의한 회전자는 기존 원심주조법 대비 모터 효율은 1.1% 상승효과를 보였다. 이는 충진율이 높을수록 전류밀도가 커짐으로써, 속도 및 토크 특성 향상 그리고 모터의 온도 감소에 따른 결과로 볼 수 있다.

### 4.3 압축기 냉동 능력 비교

본 실험은 압축기에서 충진율이 향상된 회전자를 적용함으로써 이에 따른 이점을 검증하기 위해 수행하였다. Dynamometer 실험에 사용된 SPIM를 결합하여 왕복식 압축기(hermetic reciprocating compressor)를 그림 8과 같이 제작한 후, 그림 9의 Calorimeter를 이용하여 소비전력 및 성능(냉동능력) 비교 실험하였다. 컴프레서 내부 SPIM의 회전속도는 진동센서를 이용하여 측정하였으며, 냉동력은 ASHRAE의 LBP(Low Back Pressure) 시험 조건에 따라 측정하였다[13].



Fig. 8. Applied compressor of manufactured SPIM

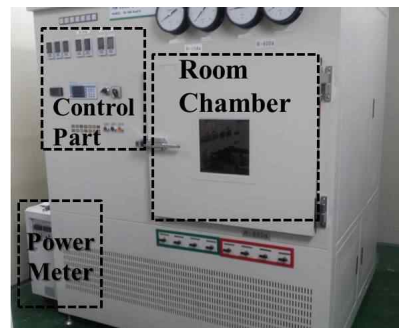


Fig. 9. Calorimeter

실험 결과 충전율을 향상시킨 회전자를 적용한 압축기의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 즉 표 5의 Dynamometer 실험 결과에서 나타난 것처럼 충전율이 높을수록 기동 특성이 향상됨을 확인할 수 있는데, 이는 충전율이 높을수록 압축기 내부 방열효과에 도움이 되어 성능이 향상됨을 실험 결과 확인할 수 있었다. 그 결과는 표 7과 같다.

Table 7. Experiment results of calorimeter

	가압구조	원심구조	제안된 원심구조
충진율(%)	86	95	99
속도(rpm)	3509	3513	3519
전류(A)	0.85	0.81	0.77
소비전력(W)	178	173	172
냉동능력(kcal/h)	252.9	252.8	253.1
코일온도(°C)	95.2	93.4	92.8
효율(w/w)	1.65	1.70	1.72

## 5. 결 론

본 논문은 1/4 마력급 압축기의 성능 개선을 위해 압축기에 결합되는 SPIM의 고효율 화에 관한 연구이다. 그래서 SPIM의 고효율 화를 위해 회전자와 도체부 충전율을 향상하기 위해 기존의 원심구조법의 공정을 개선한 방법을 제안하였다.

우선 FEM을 이용하여 구조방법에 따른 충전율의 차이가 자속밀도분포에 미치는 영향을 해석하였다. 그리고 이를 기반으로 구조방법에 따라 각각의 시제품을 제작하여 Dynamometer를 이용한 SPIM의 효율을 비교하였고, 제작한 시제품을 압축기에 결합하여 Calorimeter를 이용한 실험을 통하여 제안된 방법에 의한 충전율이 높은 회전자일수록 SPIM의 효율이 높고, 압축기의 냉동 능력이 우수함을 확인할 수 있었다.

따라서 본 논문에서 제안한 방법에 의한 회전자와 충전율 향상이 압축기의 성능을 개선할 수 있음을 실험 결과 타당함을 입증할 수 있다.

향후 충전율 향상에 관한 연구 결과를 기반으로 향

후 더 나은 SPIM의 고효율화를 위해 회전자의 손실을 줄이기 위한 높은 기술력과 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## References

- [1] B. K. Bose, "Power electronics and AC driver", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [2] J. M. D. Murphy and F. G. Turnbull, "Power electronics control of AC motors", Pergamon Press, 1988.
- [3] P. Waide, C. Brunner, "Energy-Efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems", International Energy Agency, Working Paper, Energy Efficiency Series, 2011.
- [4] "Energy efficiency in electric motor systems: Technical potentials and policy approaches for developing countries", United Nations Industrial Development Organization, 11/2011.
- [5] "Electric Motors and Generators-South Korea" Global Research & Data Services, 2012.
- [6] R. Ramarathnam, B. G. Desai, "Optimization Of Pplyphase Induction Motor Design: A Nonlinear Programming Approach", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 2, pp. 570-578, 1971.
- [7] J. D. Law, T. A. Lipo, "A Single Phase Induction Motor Voltage Controller with Improved Performance", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. PE-1, No. 4, 1986.
- [8] J. Haataja, J. Pyrhonen, "Improving three phase induction motor efficiency in Europe", Power Eng. J., vol.12, no. 2, pp. 81-86, April. 1998.
- [9] Yong, H.H., "Effect of the Revolution Speed on the Structure & Mechanical Properties of Cr-Mo Steel during Vertical Centrifugal Casting Using Investment Casting Mold", Master's Thesis, 2001.
- [10] Sufei Wei, "Centrifugal Casting", ASM Handbook, vol. 15: Casting, pp. 667-673, 2008.
- [11] X. Wang, C. Zhu, R. Zhang, R. Tang, S. Y. Hahn, "Performance analysis of single-phase induction motor based on voltage source complex finite-element analysis", IEEE Trans. Magnetic, Vol. 42, No. 4, pp. 587-590, 2006.
- [12] American National Standard Motor and Generator, ANSI/NEMA MG 1-2011.
- [13] <https://www.ashrae.org/standards-research-technology/standards-guidelines>.
- [14] E. R. Collins, H. B. Puttgen, W. E. Sayle, "Single-Phase Induction Motor Adjustable Speed Drive: Direct Phase Angle Control of Auxiliary Winding Supply", IAS 1988, vol. 1, pp. 246-252, 1988.
- [15] de Almeida, A.T, Ferreira, F.J.T.E, Both, D. "Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems", IEEE Trans. Ind. App., vol. 41, No. 1, pp. 188-199, 2005.

◇ 저자소개 ◇



**김강원(金剛院)**  
2008년 조선대학교 전기공학과 졸업.  
현재 전남대학원 전기공학과 석사과정.



**안현진(安賢眞)**  
2004년 전남대학교 전기공학과 졸업.  
2009년 동 대학원 전기공학과 졸업  
(석사). 2015년 동 대학원 전기공학과  
졸업(박사).



**최준호(崔竣豪)**  
1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업.  
1998년 동 대학원 전기공학과 졸업  
(석사). 2002년 동대학원 전기공학과  
졸업(박사). 현재 전남대학교 전기공학과  
교수.



**한재현(韓在賢)**  
2007년 목포대학교 제어시스템과 졸업.  
2013~2015년 동부대우전자 선임연구원.  
현재 DAEWOO Compressor 선임연구원.



**김의선(金義善)**  
1981년 전남대학교 계측공학과 졸업.  
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업  
(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과  
졸업(박사). 현재 신경대학교 정보통신  
공학과 교수.



**임영철(任永徹)**  
1953년 4월 23일생. 1975년 전남대학교  
전기공학과 졸업. 1977년 고려대학교  
전기공학과 졸업(석사). 1990년 고려대  
학교 전기공학과 졸업(박사). 1983년~  
현재 전남대학교 전기공학과 교수.