

# 반응고 성형법에 의해 제조된 고효율 전동기용 Cu-Rotor의 미세조직 및 결함 분석

강병무\* · 서동우\* · 손근용\* · 이상용\*

## Analysis of Microstructures and Defects of the Thixoformed Cu rotor for High Efficiency Electrical Motors

B.M.Kang, D.W. Suh, K.Y.Sohn and S.Y.Lee

### Abstract

Rotor in small-medium induction motor has been usually manufactured by aluminum diecasting. In order to improve efficiency of induction motors, however, it is desirable that pure aluminum is replaced by high electrical conductivity copper alloy. For this purpose, a rotor is thixoformed with Cu-Ca alloy. Thermomechanical processing(TMP) is carried out to modify the semi-solid microstructure of the alloy and final microstructures and filling defects of thixoformed Cu-rotors are investigated. The characteristics of thixoformed Cu-rotor such as motor efficiency and torque are compared with those of Al rotor.

**Key Words** : Thixoforming, Copper Rotor, High Conductivity Copper Alloys

### 1. 서 론

전동기는 전기에너지를 로터의 회전에 의해 기계적 에너지로 바꾸어 주는 장치로서 에너지의 변환 과정에서 전동기의 종류에 따라 7-25%의 에너지 손실이 발생하며 현재 사용되고 있는 모터의 54% 이상이 중·소형 모터로 알려지고 있다[1]. 유도전동기의 효율은 전동기 내부의 로터의 전기전도도에 의해서 크게 영향을 받기 때문에 전기전도도가 높은 로터 소재를 사용함으로써 전동기의 효율을 높이고 에너지 손실을 줄일 수 있다.

현재 상업적으로 사용되고 있는 중·소형 전동기의 로터 소재는 순수한 알루미늄으로 다이캐스팅에 의해 제조되고 있다. 이것은 알루미늄의 소재가격이

싸고, 복잡한 형상을 제조하기 용이하며, 동합금을 다이캐스팅하는 것에 비해 금형수명이 길기 때문이다. 알루미늄의 전기전도도는 순동의 60%수준으로서 전동기의 효율향상을 위해서는 로터 소재를 알루미늄에서 순동으로 전환하는 것이 바람직하다. 그러나 전동기 로터용 동합금을 다이캐스팅으로 제조하는 데는 많은 제약이 있다. 동의 용점(1083℃)이 알루미늄의 용점(660℃)보다 높아서 금형의 마모가 심하고 경제적인 금형수명을 기대하는 것이 불가능하다[2]. 이러한 다이캐스팅의 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 Al 및 Mg 합금 부품 제조에 많은 기술 축적이 이루어진 반응고 성형법이 기대를 모으고 있다. 반응고 성형은 다이캐스팅보다 100-

\* 한국기계연구원 재료기술연구소

150℃ 정도 낮은 온도에서 성형이 이루어지기 때문에 금형마모와 구조결함을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.

이 연구에서는 동합금(Cu-Ca alloy)의 반응고 성형을 위한 입자 구상화 및 적정 액상률 유지를 위한 공정변수 제어를 통하여 동합금 rotor 를 성형하고 반응고 성형된 로터의 각 부위별 미세조직을 분석하였다. 또한 반응고 성형된 동합금 rotor 의 제반특성을 기존의 다이캐스팅된 알루미늄 rotor 와 비교, 검토하였다.

## 2. 원소재 및 성형 공정

### 2.1 원소재 분석

동합금로터의 반응고 성형을 위해서 0.1~1.5%Ca 을 첨가하여 높은 전기전도도와 넓은 고액공존구역을 지닌 Cu-Ca 합금을 진공용해 하였다. VIM 직후의 미세조직을 Fig. 1 에 나타내었다. 용해재의 미세구조는 밝은 부분의 Primary copper dendrite 와 Cu 와 Cu<sub>5</sub>Ca 인 검은 부분의 interdendritic eutectic 으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다[3]. Ca 의 함량이 증가할수록 dendrite 의 크기는 미세화 되며, 공정상의 분율도 증가함을 알 수 있다.

Fig.2 는 로터의 중요한 특성인 전기전도도를 나타낸다. Cu-Ca 합금의 전기전도도는 Ca 함량에 증가함에 따라 비례적으로 감소하였다.

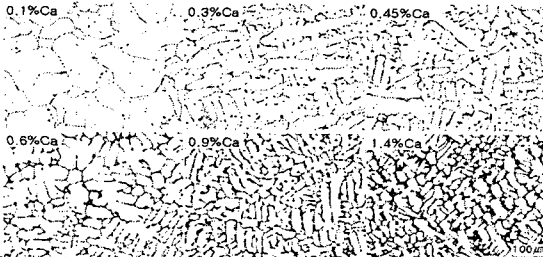


Fig. 1 Optical microstructures of various as-cast Cu-Ca alloys

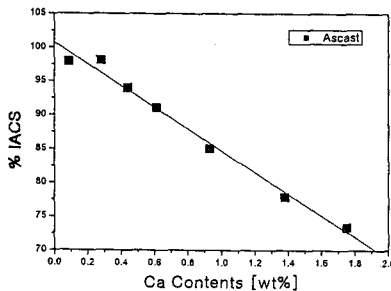


Fig. 2 Electrical conductivity of Cu-Ca alloys with Ca contents

### 2.2 가공 열처리

반응고 성형에 필요한 유동성을 확보하기 위하여 구조 직후 용해재의 수지상 조직을 구상의 조직으로 만들어 주는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 수지상 조직을 가진 시편에 적당한 소성변형을 부여한 후 고액공존구역으로 가열하여 미세조직을 구상화 하는 방법을 사용하였다[4]. Fig.3 은 Cu-0.45%Ca 합금을 5~30%까지 소성변형을 한 후, 1050℃에서 4 분간 유지한 시편의 미세조직으로서 소성변형량이 증가함에 따라 입자의 크기가 점점 미세해지는 것을 알 수 있다.

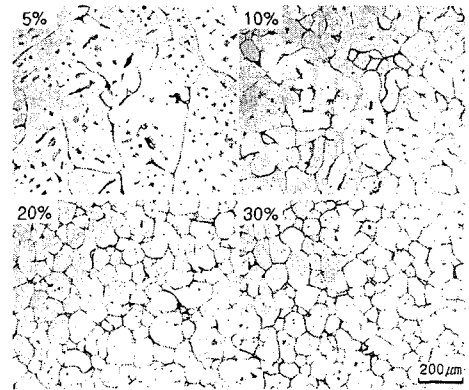


Fig. 3 Optical microstructures of Cu-0.45%Ca alloy specimens compressed to various deformation levels at room temperature.(1050℃/ 4min)

### 2.3 성형 공정

시제품 성형은 60W 용 냉장고용 소형 rotor 를 대상으로 하였다. Fig. 4 의 A 는 rotor core assembly 로 크기는 직경 55mm, 높이 25mm 이며, 작은 슬롯으로 구성되어 있다. 실제로 충전해야 할 부분인 squirrel cage 의 형태는 Fig. 4 의 B 이다. Cu-0.45%Ca 합금 용해재를 이용하여 구상화를 위한 15% 압축 변형을 가한 후 빌렛을 가공하였다. 빌렛은 가열된 후 곧 바로 성형이 가능하도록 금형 하부에서 고주파 유도 가열기를 이용하여 가열하였으며 1055℃까지 가열 후 1 분간 유지하였다.

성형시 램속도는 100 mm/sec 로 했으며, 금형 온도는 250℃로 가열하였다. Fig.5 는 실제 반응고 성형 직후의 로터의 모습이다. 외관상 충전 상태는 매우 양호하였다. 성형된 로터의 내부 충전 상태를 확인하기 위하여 로터의 각 부위를 절단 및 가공하여 분석하였다.

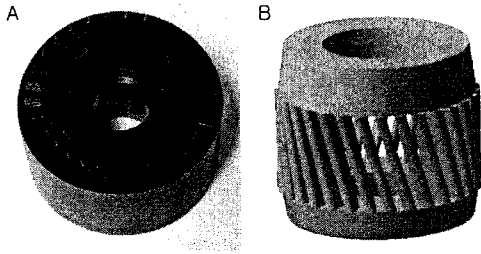


Fig. 4 Rotor core assembly(A) and Squirrel cage (B)

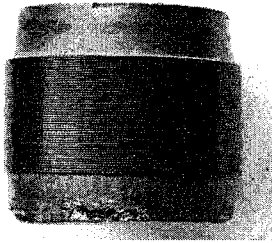


Fig. 5 As-thixoformed Cu-rotor

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Cu- rotor 성형품의 충전결함 분석

반응고 성형후 슬롯의 거시 결함을 분석하기 위하여 로터의 직경을 직경 50mm로 가공한 후의 모습을 Fig. 6 에 나타내었다. 크게 두가지 형태의 미충진 양상을 확인할 수가 있었다. 첫번째는 Fig. 6 의 A 와 같이 슬롯을 따라 충전방향으로 충전되면서 생긴 기공이다. 이는 슬롯내로의 충전속도가 너무 빨라서 충류를 형성하지 못하면서 생긴 것으로 상부까지 충전이 일어난 후 공기압에 의해서 더 이상 채워지지 못하고 응고가 일어난 것으로 판단된다.

이에 반해 Fig. 6 의 B 는 rotor 의 반응고 성형에서 흔히 볼 수 있는 미충진 양상이다. 이것은 하부에서 슬롯으로의 충전이 일어나는 도중 슬롯 내에서 응고가 일어난 경우에 발생하는 현상이다. 일단 응고가 일어나기 시작한 슬롯 내에서 더 이상의 충전은 진행되지 않지만 타 슬롯을 통해 상부까지 도달한 반응고 슬러리가 다시 미충진된 슬롯으로 역충진되고 역충진 도중 슬러리의 응고가 일어나게 되어 Fig. 6 의 B 와 같이 두 방향에서 만나는 현상을 나타내게 된다.

로터 슬롯 미충진의 가장 주요한 원인은 rotor core assembly 의 온도(250℃)와 반응고 슬러리의 온도

(1055℃) 차이에 기인한 슬롯 충전시 반응고 슬러리의 응고 현상으로 판단된다. 또한 0.5mm 의 얇은 Fe-Si 강판을 일정한 각도로 적층하면서 생긴 요철이 반응고 슬러리와와의 접촉 표면적을 증가시켜 슬러리의 온도를 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 슬러리의 유동저항을 증가시킬 수 있을 것으로 생각되며 대기중 가열로 생긴 빌렛 표면의 고상층이 일부 슬롯을 막아서 유동을 방해하여 슬롯의 미충진 영역이 발생할 수도 있을 것으로 생각된다.

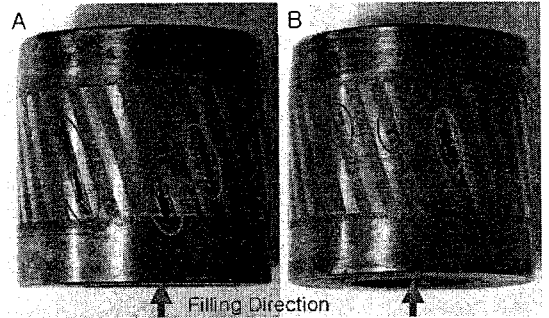


Fig. 6 Filling defects of as-thixoformed Cu-rotor

#### 3.2 Cu- rotor 성형품의 결함분석

성형품의 각 부위의 결함 및 액상 및 고상의 편석등을 조사하기 위하여 Fig. 7 과 Fig. 8 과 같이 슬롯의 각 부위의 미세조직을 관찰하였다. Fig. 7 은 상부까지 완전히 충전된 슬롯의 미세조직이고, Fig. 8 은 상부까지 충전되지 못하고 중간에서 응고된 슬롯의 미세조직을 충전이 시작되는 지점에서 상부까지의 영역으로 구분하여 나타낸 것이다.

Fig. 7 과 Fig. 8 에서 알 수 있듯이 가공도를 부여하여 반응고 성형한 로터의 미세조직에서 수직상 조직은 거의 관찰할 수 없었으며 주로 구상의 입자만을 관찰할 수 있었다. 상부까지 슬롯이 충전된 경우와 상부까지 도달하지 못하고 응고가 일어난 부위에서 각 위치별 미세조직의 뚜렷한 차이는 관찰할 수 없었으나 전체적으로 하부쪽에서는 고상률이 높았으며, 상부쪽(반응고 슬러리의 충전거리가 먼 곳)에서는 액상률이 높았다. 이것은 플런저에 의해 직접적으로 압이 가해지는 쪽에서는 액상이 상부쪽으로 squeeze 되었기 때문이다. Fig. 7 의 (2)에서와 같이 기하학적 형상이 급격하게 변화하는 부위에서도 액상률의 편석이 관찰되었다. 입자 크기 및 액상률 편석과 모터의 효율과의 정량적인 관계는 아직 명확하지 않지만 입계는 자유전자의 이동을 방해하는 장애물 역할을

하므로 입자크기가 클수록 그리고 공정상의 분율이 작을수록 효율은 증가될 것으로 판단된다.

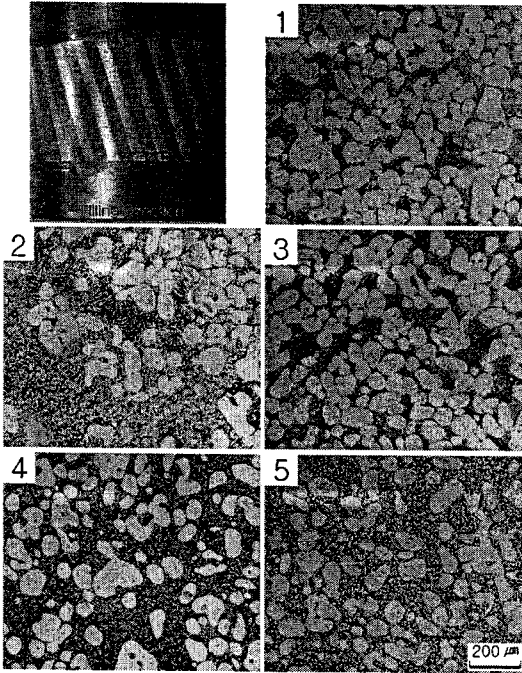


Fig. 7 Microstructures of as-thixoformed Cu-rotor at the various positions (1055 °C/1min holding)

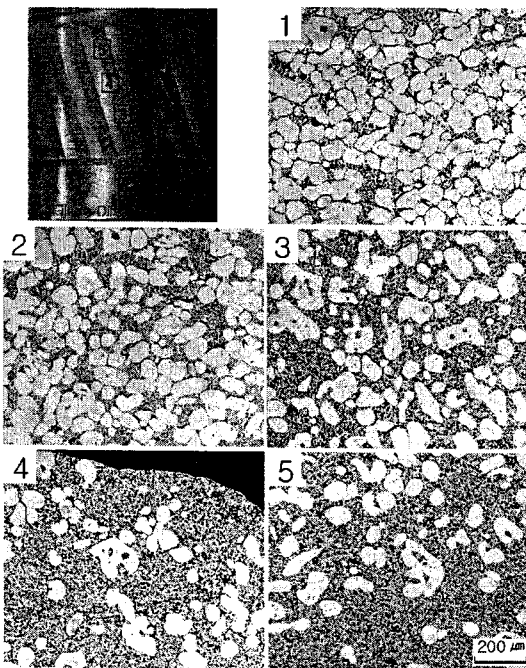


Fig. 8 Microstructures of as-thixoformed Cu-rotor at the various positions (1055 °C/1min holding)

### 3.3 Al D/C rotor 와 Cu rotor 동시비교시험

Table 1 은 알루미늄 다이캐스팅으로 제조된 로터와 반응고성형으로 제조된 로터의 특성을 비교 시험 한 결과를 나타낸 것이다. 로터의 전기전도도만을 고려 하여 시뮬레이션한 모터 특성 예측치는 동합금 로터가 알루미늄 로터에 비해 효율이 1.5% 증가, RPM 이 22 증가, 기동토크는 2% 감소, 정동토크가 12% 증가할 것으로 기대되었으나 실제 테스트 결과는 효율 1.7% 감소, RPM 5 증가, 기동토크 동등, 정동토크 0.5% 감소로 나타났다. 동합금 로터의 효율과 정동토크의 감소는 Fig. 6 에서 보이는 미충진에 따른 로터슬롯의 단락에 기인한 것으로 생각되며 충전결함을 감소시킴으로서 예측값에 근접한 특성을 나타낼 수 있을 것으로 생각된다.

Table 1 Comparison of Al die-casting rotor and thixoformed Cu rotor

	Efficiency	RPM	기동토크	정동토크
Al D/C	66.9	3522	2.8	5.5
Cu SSF	65.2	3527	2.8	5.0

## 4. 결 론

Cu-Ca 합금의 반응고 성형을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Cu-Ca 합금의 TMT 처리로 반응고 성형에 적합한 구상의 입자를 얻을 수 있었다.

(2) 충전이 완전한 슬롯이나 미충진된 슬롯 모두 각 위치별 조직의 뚜렷한 차이는 없었으나, 로터의 하부는 상대적으로 액상이 스퀴즈되면서 고상율이 높았다.

(3) 동합금으로 제조된 로터내에 일부 충전결함이 존재하였으나 모터의 효율시험 결과 다이캐스팅으로 제조된 알루미늄 로터와 거의 비슷한 특성을 나타내었다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kang, D.H., Ha, H.D., Chang, K.C., Goo, D.H. et al.: Planning of long-term technology for the development of high efficiency motors, Report for the Ministry of Commerce, Republic of Korea, 1998,

p.250.

- (2) Sellors, R.G.R. and Heyes, J.G., Engineering, Vol. 219, No.11(1979), 1434-1437
- (3) Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., and

Kacprzak, L.: Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd edition, p.906, ASM International, 1990

- (4) 이상용, 전재일, 이정환, 이영선, 신평우 1998, "Al 7075 합금의 열간단조와 반응고 단조에 있어서 조직, 성형성 및 경도 특성비교" 한국소성가공학회지, 제 7 권, 제 6 호, pp. 620~630