

고효율 전동기용 Cu Rotor 의 반응고 성형과 공정변수 제어

정우성[#] · 이상용² · 신평우¹

Process Control and Thixoforming of Cu Rotor for High Efficiency Motors

W. S. Jung, S. Y. Lee, P. W. Shin

(Received June 23, 2005)

Abstract

Rotor in small-medium induction motor has been usually manufactured by aluminum diecasting. In order to improve the efficiency of induction motors, newly developed Cu-Ca alloys have been investigated. The electrical conductivity in the Cu alloys containing Ca less than 1.0wt% was higher than 80% IACS. Cu-Ca alloy is desirable for the thixoforming process because it has wide semi-solid range over 150 °C. In this study, Cu-rotor with thixoforming process was developed to replace the conventional aluminum diecasting rotor. Analysis was performed for the microstructure of thixoforming rotor. Effect of incomplete filling on the efficiency of induction motor was discussed.

Key Words : Cu Rotor, Thixoforming, Semi-solid Metal Forming, High Conductivity Copper Alloy, SIMA Process, Cu-Ca Alloy

1. 서 론

전동기는 전기에너지를 로터의 회전에 의하여 기계적 에너지로 바꾸어 주는 장치로서 가정뿐만 아니라 산업분야에 광범위하게 사용되고 있다. 향후 경제성장과 산업발달에 따라 전력수요량은 점차 증가할 것이라 예측된다. 현재 전력의 54% 이상이 중,소형 모터에서 사용되고 있다[1]. 그러나, 에너지의 변환과정에서 전동기의 종류에 따라 7~25%의 에너지 손실이 발생한다. 따라서, 전동기의 효율을 높임으로 에너지 손실을 줄일 수 있다. 유도전동기의 효율은 전동기 내부의 로터의 전기전도도의 영향을 매우 크게 받는다.

현재 상업적으로 생산되는 중,소형 전동기 로터는 순수한 알루미늄을 재료로 다이캐스팅으로 제

조하고 있다. 이것은 알루미늄이 소재가격이 저렴하고, 복잡한 형상을 제조하기 용이하고, 동합금을 다이캐스팅 하는것에 비해 금형수명이 길기 때문이다. 알루미늄의 전기전도도는 순동의 60% 수준으로 전동기의 효율향상을 위해서는 로터의 소재를 알루미늄에서 전기전도도가 높은 동합금으로 전환하는 것이 바람직하다. 동합금은 상온 및 고온 강도뿐 아니라 내 피로성, 내 크립성이 높기 때문에 동합금을 이용하여 로터를 제조할 경우 에너지 효율이 높고, 내구성 및 성능이 우수한 전동기의 제조가 가능하다. 하지만, 동합금의 다이캐스팅은 많은 제약이 따른다. 알루미늄 보다 매우 높은 용점(1083 °C)으로 인해 금형의 마모가 심하여 경제적인 금형수명을 기대하기 어렵다[2]. 이러한 동 다이캐스팅의 문제점을 해결할 방안으

1. 창원대학교 재료공학과

2. 안동대학교 신소재공학부

교신저자 : 창원대학교 재료공학과

E-mail: garian96@paran.com

로 Al 및 Mg 합금 부품제조에 많은 기술 축적이 이루어진 반응고 성형법이 있다. 반응고 성형은 고액공존구역에서 성형이 이루어지기 때문에 액상선보다 100℃ 이상의 온도에서 성형을 하는 다이캐스팅에 비해 금형의 마모율이 작고, 주조결함이 적은 이점이 있다. 본 연구에서는 넓은 고액공존구간을 가지는 Cu-Ca합금을 사용하여 SIMA 공정(Strain Induced Melt Activated)을 통해 구상화 조직을 형성하고 공정변수의 제어를 통하여 고효율 전동기용 rotor의 반응고 성형과 성형된 시제품의 효율측정을 통하여 유도전동기의 효율 상승에 대하여 논의하고자 한다.

2. 원소재 및 성형공정

2.1 원소재 가공과 SIMA 공정

Cu로터 반응고성형을 위한 원소재는 Ca을 0.5% 함유한 Cu-Ca합금을 Ar분위기에서 진공용해주조(VIM)를 통해서 직경 100mm, 높이 180mm의 빌렛을 직경 76mm, 높이 90mm의 원통형 빌렛으로 1차 가공하였다. Cu-Ca합금의 Ca함량이 1.0%이하일 경우에 80% IACS(International Annealed Copper Standard) 이상의 전기전도도를 가졌다. VIM 주조 직후의 Cu-Ca합금의 Ca함량에 따른 전기전도도를 Table 1에 나타내었다. Ca함량이 낮을수록 우수한 전기전도도를 나타내었으나 다양한 조성의 Cu-Ca합금의 가열실험결과 극히 낮은 Ca 함량의 Cu-Ca합금은 넓은 고액공존구역을 가지지만 성형성은 좋지 않은 특성을 나타내었다[3].

반응고성형은 입자의 형태에 따라 성형성이 크게 좌우되는데 입자가 구상의 형태를 하고 있으면 작은 전단응력으로도 입자의 유동이 용이해지기 때문에 성형성이 좋아진다. 또한, 금속재료가

Thixotropic 특성을 지니기 위해서는 조직적으로 구형의 고융점 상들이 저융점 상으로 둘러 싸여져 있어야 한다. 일반적인 주조조직은 수지상을 형성하고 있기 때문에 가공열처리 방법중의 하나인 SIMA공정을 통해 입자를 구상화 시킬 수 있었다[4-5]. 이 공정은 소재를 냉간 또는 열간 가공으로 변형을 가하여 재가열 동안 입자의 재결정화를 통해서 쉽게 구형화 시키는 방법이다. 충분한 소성변형을 받은 재료를 반응용상태로 가열하면 조직이 미세하고 균일하며 비수지상의 구형입자를 형성하여 반응고 성형에 필요한 유동성을 확보할 수 있다. Fig. 1.1과 Fig. 1.2는 여러 가지 조성의 Cu-Ca합금을 가공도를 달리하여 압축 후 1050℃까지 가열한 후 4분간 유지한 결과로 결정립 크기와 전기전도도의 변화를 측정하였다. 가공도가 15%이상인 경우, 조성에 크게 영향을 받지 않고 구형화된 결정립들이 비슷한 크기를 나타내었다[6]. 이것을 이용하여 전기전도도가 우수한 Ca함량이 낮은 합금을 가공열처리 하여 Ca함량이 높은 합금의 결정립 크기와 비슷한 수준으로 만들 수 있었다. 가공도에 따른 전기전도도의 측정결과 0.5%조성의 합금이 우수한 경향을 나타내었다. 이에 따라 Ca을 0.5%함유한 Cu-Ca합금을 이용하여 1차 가공한 후 SIMA공정을 적용하여 15% 압축을 가해서 최종 직경 76mm, 높이 76mm의 빌렛을 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions and conductivity of Cu-Ca alloys (in weight percent)

Alloys	Ca	Cu	% IACS
Cu-0.3Ca	0.28	Bal.	98.4
Cu-0.5Ca	0.44	Bal.	95.1
Cu-0.7Ca	0.61	Bal.	92.1
Cu-1.0Ca	0.93	Bal.	85.7
Cu-1.5Ca	1.38	Bal.	78.6

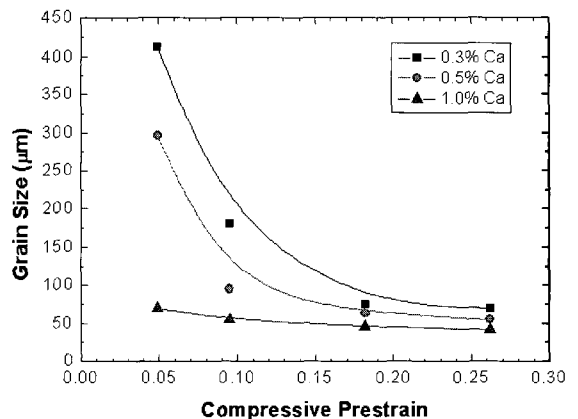


Fig. 1.1 Grain size of Cu-Ca alloy specimens compressed to various deformation levels at room temperature followed by heat treatment at 1050℃ for 4 minutes

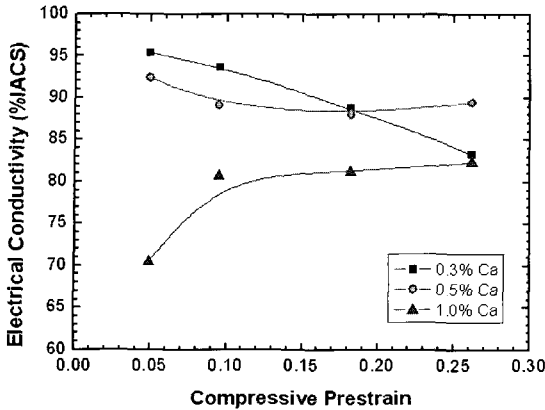


Fig. 1.2 Electrical conductivity of Cu-Ca alloy specimens compressed to various deformation levels at room temperature followed by heat treatment at 1050 °C for 4 minutes

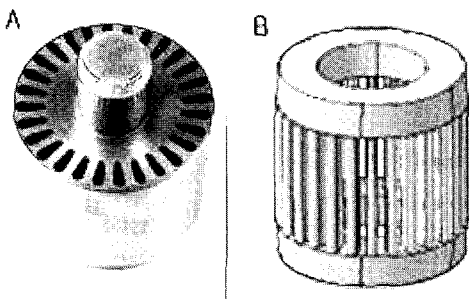


Fig. 2 Rotor core assembly (A) and squirrel cage (B)

2.2 성형공정

시제품의 성형은 3HP용 rotor로 하였다. Fig. 2는 시제품 성형을 위한 rotor core assembly (A)와 squirrel cage (B)를 나타내었다. rotor core assembly는 실제 냉장고용으로 사용되는 것으로 직경 84mm, 높이 67mm로 Fe-Si강관을 중심부의 회전축에 직충한 형태이며 슬롯은 상부까지 직선형으로 설계되어 있다. 실제 성형으로 충전해야 하는 부위를 나타내는 squirrel cage는 체적을 계산하여 그 결과를 이용하여 사용될 빌렛의 최소 체적의 기준으로 삼았다.

SIMA공정을 적용하여 가공된 빌렛을 50kW 고주파 유도가열기를 이용하여 가열하였으며 1070°C 부근까지 가열하여 800ton Press를 이용하여 성형하였다. 성형시 Ram speed는 300mm/s, Load 25ton, 금형

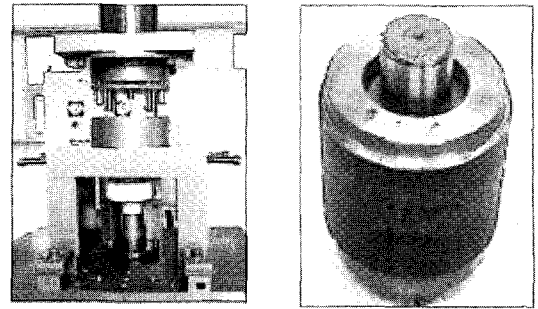


Fig. 3 Die for Cu-rotor thixoforming and thixoformed Cu-Rotor

온도는 성형직전 core assembly의 온도를 400°C의 조건으로 성형하였다. Fig. 3에 성형용 금형과 성형된 시제품을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 성형된 시제품의 충전결함

초기에 성형된 시제품들은 많은 미충전결함이 발견되었다. 시제품 내부의 결함을 관찰하기 위해 상,하부 엔드링과 슬롯부위로 절단하여 슬롯의 결함이나 엔드링의 충전상태를 관찰하였다.

Fig. 4에서 나타나는 결함이 반응고 성형한 Cu-rotor에서 가장 흔히 나타나는 결함으로 역방향 충전과 기공이 주로 발견되었다. 역방향 충전은 성형시 충전 도중 응고되어 미충전 슬롯이 발생하는 경우 슬롯별 유동성의 차이에 의해 상대적으로 유동속도가 빨라서 정상 충전된 주변의 다른 슬롯이 상부 엔드링의 충전후에 상부가 비어있는 미충전 슬롯의 반대방향으로 충전되어 슬롯의 중간부위가 미충전 구간으로 남아 있게 된다. 기공의 경우 충전방향으로 충전속도가 매우 빨라서 충류를 형성하지 못하여 내부에 있던 공기압으로 인해 발생하여 충전후에도 그대로 잔류하게 된 것으로 성형시에 샷을 한 후 추가적인 가압으로 거의 제어가 가능했다. 충전중 응고 현상의 원인으로서는 core assembly(400°C)와 반응고 슬러리의 온도(1070°C)차이나 Fe-Si강관을 적층시켜 만든 core assembly의 구조상 미세한 요철이나 강관의 간격이 슬러리의 온도저하나 유동성저항을 증대시킬 수 있다고 예상되며 대기중의 가열로 인해 형성되는 빌렛표면의 산화막도 충전 중 응고 현상의 한 요인이라 생각된다.

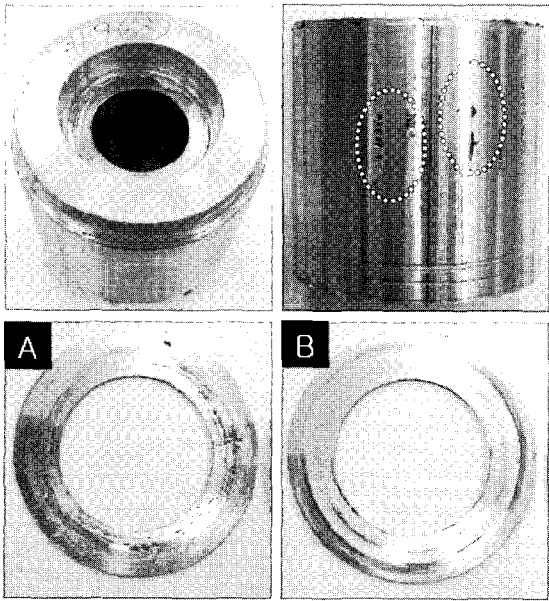


Fig. 4 Filling defects of thixoformed Cu-rotor (A) upper end ring (B) lower end ring

슬롯 중심부위에 미충전 부위가 있는 슬롯을 부위별로 미세조직을 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 슬롯내 모든 부위에서 액상과 고상이 혼재된 조직으로 결합부위와 정상적으로 충전된 부위의 특이한 차이점이 나타나지 않았으며 다른 시제품의 정상슬롯의 경우에도 차이점은 관찰되지 않았다. 반응고 성형된로터의 모든 슬롯은 상부에는 액상이 많이 관찰되고 하부에는 고상부분 밀집된 공통된 경향을 보였다. 이는 성형시 액상과 고상의 유동성이 서로 상이함으로 유동성이 좋은 액상이 압을 받고 고상보다 먼저 상부로 이동하게 되어 나타나는 결과로 상대적으로 하부에는 고상이 많이 나타나게 된다[7-8]. 그러나, 슬롯의 단면적이 상당히 크고 충전방향이 하부에서 상부로 충전되기 때문에 하부의 고상의 부분적인 밀집이 충전을 방해하는 요인이 될 가능성은 미약하다고 판단되었다. 슬롯의 미충전이나 이로 인한 단락은 효율저하의 가장 주요한 원인이므로 영향을 줄 수 있는 공정변수의 제어를 통해서 적절한 가열과 성형조건을 적용한 성형방법으로 결함을 제거하고자 하였다.

3.2 공정변수의 제어

빌렛의 경우 높이를 5mm 높인 직경 76mm 높

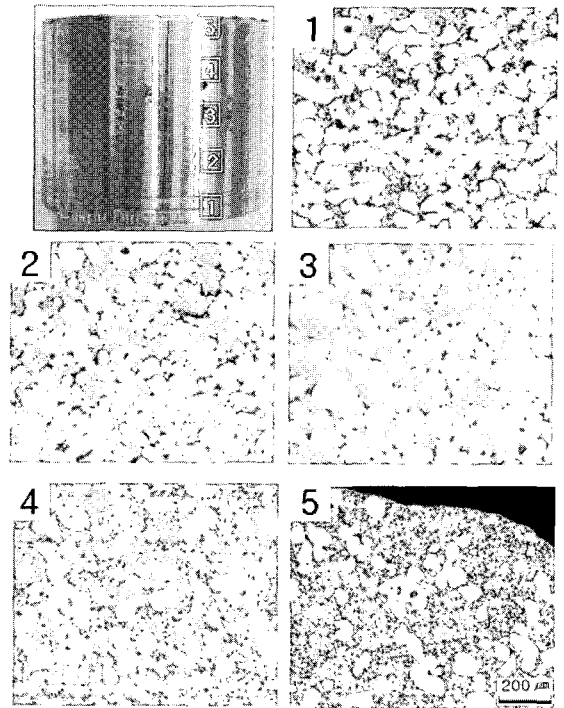


Fig. 5 Microstructures of as-thixoformed Cu-rotor slot at the various positions

이 81mm의 빌렛을 사용하여 이전의 유도가열기 코일을 상,하부 대칭가열에서 상부로 약간 치우치게 코일을 위치하여 가열시 상부가 하부보다 더 높은 온도를 나타내었다. 기존 방법으로 가열시 빌렛 크기가 크기 때문에 상부와 하부의 온도차가 크고 빌렛 자체의 자중과 하부의 압축 석면부에 접촉하면서 방출되지 못한 열로 인해 성형전에 하부가 먼저 용융되어 무너지는 경향을 방지하고 성형시 상부는 슬롯으로 유입되어 충전되는 부분이지만 하부는 직접적인 충전에 사용되지 않고 충분한 압력을 전달해야 하기 때문에 상부에 비해 낮은 온도로 유지하여 체적으로 인해 생기는 부위별 온도차이를 성형에 유리한 조건으로 변경할 수 있었다. 적정 성형온도의 결정에 고려된 사항은 빌렛이 내부와 외부의 온도차이가 가열이 진행되면서 증가하게 되는데 가열시간과 온도는 미세조직과 성형성에 많은 영향을 미친다. 빌렛자체의 체적과 유도가열의 특성상 코일에 가까운 표면부위가 중심부위보다 모든 구간에서 온도가 높다. 표면부위는 대기와 접촉하고 있으며 고온에서 산화막이 생성된다. 각기 다른 깊이로 5mm와 20mm 깊이로 열전대를 장착하여 가열중

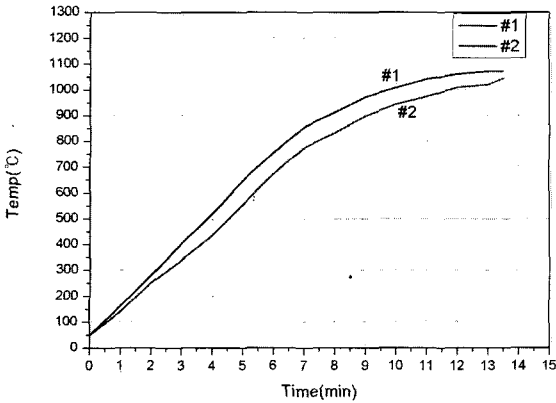


Fig. 6 Heating curves measured at (#1) 5 mm (#2) 20 mm, apart from surface

온도 차이를 측정된 결과 가열에 따라 온도차는 커지고 1050°C를 넘어가면서 표면에 산화막이 생성되는 구간에서 온도차가 최대가 되었다가 1070°C를 지나면서 내부온도가 급격하게 상승하면서 온도 차이가 최소가 되는 시점을 경험적으로 성형온도로 설정하였다. 성형온도는 이후에 많은 성형실험이 반복되면서 다른 조건들이 고정된 조건에서 1075°C까지 동일한 양상을 나타내게 되었다.

3.3 비파괴 검사

여러 변수들 중에 가열조건을 고정시켜 중심부와 표면부위를 거의 비슷한 조직으로 제어하고 상부 중점 가열과 성형조건을 제어하게 되어 최적의 조건으로 성형된 시제품은 육안으로 검사했을 때 완벽한 형상으로 관찰되었다. 시제품의 특성상 결과를 효율로 평가해야 하기 때문에 시제품 내부의 건전성을 검사하기 위해서 효율측정 전에 비파괴검사(RT:Radiographic Testing)를 수행하였다. 슬롯 내부의 미충전 결함을 측정하기 위해서 2차원 투영상으로 X-선 필름에 기록된 결과를 분석하는 방법으로서 시제품을 절단하지 않고 슬롯의 충전 여부를 검사할 수 있었다. 검사는 시제품의 측면방향으로 8면을 촬영하여 rotor내의 모든 면의 슬롯을 관찰하였다. 슬롯에 충전 결함이 있는 경우 미충전된 영역이 슬롯내에 검은 영역으로 관찰되었다.

3.4 시제품의 효율측정

효율의 측정은 AI D/C rotor와 동시 비교 실험

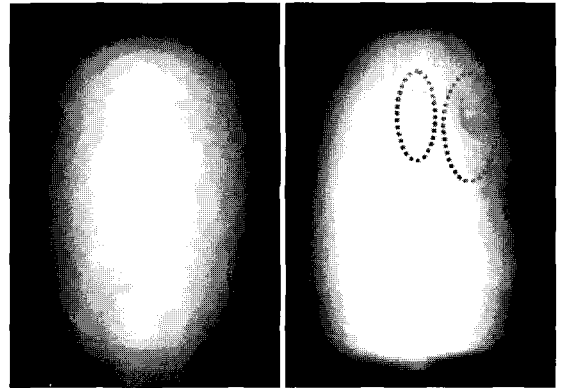
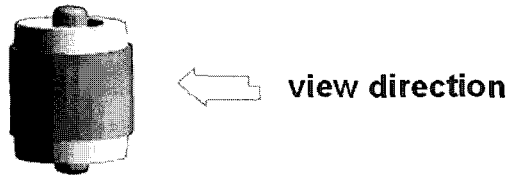


Fig. 7 Results of non-destructive testing

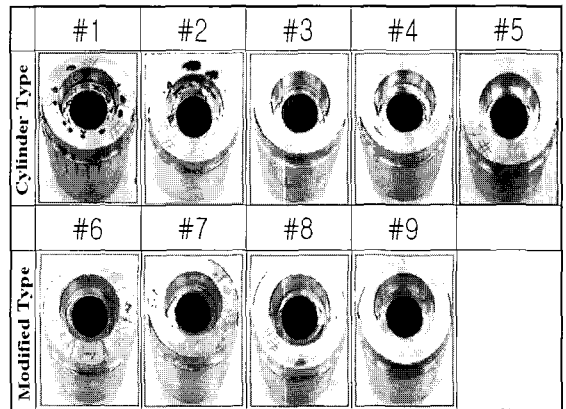


Fig. 8 Thixoformed Cu-rotor for efficiency test

으로 측정하였다. Fig. 8에 효율 측정대상 시제품의 외관을 나타내었으며 #6부터 #9의 경우 빌렛의 형상을 개선한 시제품으로 기존의 실린더 형상의 빌렛이 성형시에 core assembly 중심의 회전축에 먼저 충돌하게 되는 경향을 피하기 위해서 core assembly 회전축에 맞는 홈을 만들어 성형시에 샷의 압력을 슬롯에 직접적으로 전달하게 하였다. 형상을 변경한 빌렛을 Fig. 9에 나타내었다.

AI D/C rotor와 동시 비교 실험으로 효율을 측정한 결과 rotor의 소재를 변경하는 것으로 1%이

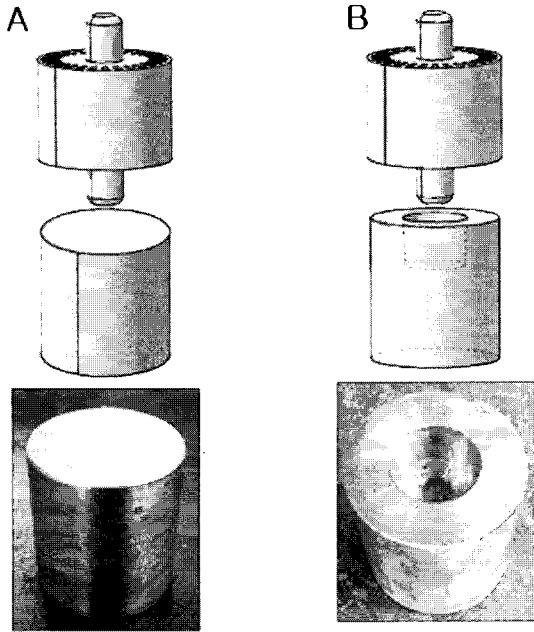


Fig. 9 Billet shape (A) cylinder type (B) modified type

상의 효율 증가가 있었다. 효율 측정결과와 사진에 비파괴검사의 결과를 비교한 결과 슬롯의 충전 상태에 따라 효율이 높은 경향을 보여주었고 빌렛의 형상을 개선한 시제품의 경우 슬롯의 충전 상태도 기존 형상보다 양호했고 효율도 높은 결과를 보였다. 이것은 빌렛의 형상 변경으로 슬롯의 충전이 더 유리하게 작용했다는 것으로 판단되며 core assembly의 형상이나 빌렛의 형상과 같은 설계의 변경으로도 효율 증대와 성형성 개선의 효과가 크다고 판단되었다.

4. 결론

고효율 전동기용 Cu-Ca합금의 공정변수 제어를 통한 성형과 효율측정의 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) SIMA 공정을 통해 전기전도도 면에서 더 나은 낮은 Ca함량의 합금을 Ca함량이 높은 합금과 비슷한 결정립 크기를 가진 구상입자를 만들 수 있었다.
- (2) 미충전 슬롯이 효율저하의 가장 큰 원인이며 가열조건 및 성형의 공정변수의 제어로 성형성을 개선하고 충전결함을 줄일 수 있었다.
- (3) 개량한 빌렛이 더 높은 효율의 결과를 보였

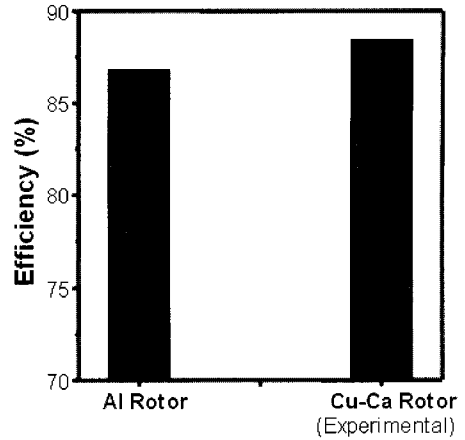


Fig.10 Thixoformed Cu-rotor efficiency

다. 설계의 개선을 통해 더 나은 성형성과 높은 효율을 얻을 수 있었다.

(4) Al D/C rotor와 효율 동시 비교 측정에서 Cu-rotor의 효율이 1%이상 높게 측정되었다.

후 기

본 연구는 창원대학교 공모과제 연구비 지원을 받았습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] D. H. Kang, H. D. Ha, K. C. Chang, D. H. Goo, et al, 1998, Planning of long-term technology for the development of high efficiency motors, Report for the Ministry of Commerce, Republic of Korea, p. 250.
- [2] R. G. R. Sellors, J. G. Heyes, 1979, Engineering, Vol. 219, No.11, pp. 1434~1437.
- [3] E. Y. Lee, B. M. Kang, S. Y Lee, 2003, J. of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 16, No. 5, pp. 267~274.
- [4] S. Kleiner, O. Beffort, M. Fuchs, P. J. Uggowitzner, 2003, Advanced Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Proceedings of the 7th S2P, pp. 257~262.
- [5] Lee Sang-Yong, Lee Jung-Hwan, Lee Young-Sun, 2001, Journal of Materials Processing Technology, 4845, 1-6.
- [6] Keun Yong Sohn, Dong Woo Seo, and Sang Yong Lee, 2003, AMPT, pp. 1497~1500.

- [7] 윤성원, 서판기, 강충길, 2003, 고액공존재료의 변형거동에서 재료의 크기가 액상편석에 미치는 영향, 한국소성가공학회지, 제 12 권 제 2 호, pp. 94~101.
- [8] J. C. Lee, H. K. Seok, H. I Lee, 2003, Effect of the Gate Geometry and the Injection Speed on the Flow Behaviors of a Semi-Solid A356 Al Alloy, Metals and Materials Int., Vol.9, No. 4, pp. 351~357.