

고효율 전동기용 Cu-Ca 합금의 반응고 성형공정에 미치는 가공열처리의 영향

이의열* · 강병무** · 이상용**

*안동대학교 신소재공학부, **한국기계연구원 공정연구부

The Effects of Thermo-mechanical Treatment on the Thixoforming Process of Cu-Ca Alloys for High Efficiency Electrical Motors

E.Y. Lee*, B.M. Kang**, and S.Y. Lee**

*Dept. of Material Science and Engineering, Andong National University, 388 Songcheon-dong,
Andong 760-749, Korea

**Korea Institute of Machinery and Materials, 66 Sangnam-dong, Changwon 641-010, Korea

Abstract The effect of the thermo-mechanical treatment on the microstructural development and the electric conductivity of Cu-Ca alloys are studied for the thixoforming processed rotor of the induction motor. The Cu-Ca alloys containing Ca less than 1.0wt% show the electrical conductivity higher than 80% IACS. They also show broad melting range over 150°C, which is desirable for the thixoforming process. The semi-solid microstructure of cast alloy changes from the dendrite structure to globular structure by prior deformation before reheating. The details of microstructural changes by the thermo-mechanical treatment are discussed.

(Received July 30, 2002)

Key words: Cu rotor, Thixoforming, High conductivity copper alloy, Cu-Ca alloys, TMT(Themomechanical treatment)

1. 서 론

전동기는 전기에너지를 로터의 회전에 의하여 기계적 에너지로 바꾸어 주는 장치로서 기정뿐만 아니라 산업분야에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 이 에너지 변환 과정에서 전동기의 종류에 따라 7-25%의 에너지 손실이 발생한다. 현재 전력의 54% 이상이 중·소형 모터에서 사용되고 있다[1]. 따라서 전동기의 효율을 높임으로 에너지 손실을 줄일 수 있다. 유도전동기 효율은 전동기 내부 로터의 전기전도도에 의해서 크게 영향을 받는다.

현재 상업적으로 생산되고 있는 중·소형 전동기 로터의 소재는 순수한 알루미늄으로 디이캐스팅에 의해 제조되고 있다. 알루미늄의 전기전도도가 순동의 60% 수준임에도 불구하고 알루미늄을 로터의 소재로 사용하고 있는 것은 저렴한 소재가격과 복잡한 형상의 로터 제조 용이성 그리고 낮은 용접으로 인한 금형의 수명연장 때문이다. 그러나 알루미늄 로터를 사용한 전동기의 효율을 높이기 위한 노력은 거의

한계점에 이르러 전동기 효율을 더욱 향상시키기 위해서는 로터 재료 자체의 전기전도도 향상이 중요한 과제로 대두되고 있다. 전동기 로터의 재료로는 전기 전도도가 우수한 동합금을 사용하는 것이 가장 바람직하지만 동합금 로터를 디이캐스팅으로 제조하는 데는 많은 어려움이 있다. 동합금 디이캐스팅의 어려운 점 중의 하나는 동의 용점이 알루미늄보다 매우 높아 금형의 마모가 심하여 경제적인 금형수명을 기대하기 어렵기 때문이다[2]. 이러한 디이캐스팅의 문제점을 해결할 수 있는 방안의 하나로 최근에 기대를 모으고 있는 것이 Al 및 Mg 합금의 부품제조에 많은 기술의 진보가 이루어진 반응고 성형법이다.

반응고성형은 고액공존구역에서 성형이 이루어지기 때문에, 액상선보다 100°C 이상 온도에서 성형을 하는 디이캐스팅에 비해 금형의 마모율이 작고, 주조결함이 적은 잇점이 있다. 그러나 이런 동합금을 반응고 성형하기 위해서는 넓은 고액공존구간과 구상화 조직을 갖는 동합금의 개발과 함께, 반응고성형의 공정변수 제어가 필요하다. Al합금과 같은 저용점 금속

의 반응고 성형에 대한 연구는 세계적으로 비교적 많이 이루어진 반면, 동합금과 같은 고용점 금속에 대한 연구는 연구·개발 단계이다[3,4].

본 연구에서는 동합금(Cu-Ca alloy)의 반응고 성형을 위한 기초적인 실험을 진행하였다. 즉, Cu-Ca 합금의 가공도, 가열온도 및 유지시간의 변화에 따른 전기전도도의 변화, 액상률과 입자의 크기와 같은 미세조직의 변화를 검토해 보았다.

2. 실험방법

Copper 로터의 반응고 성형을 위해서 0.1~1.5%Ca을 첨가하여 높은 전기전도도와 넓은 고액공존 구역을 지닌 Cu-Ca 합금을 진공유도용해(Vacuum Induction Melting) 주조를 하였다. 빌렛의 크기는 성형에 적합한 직경 54 mm, 길이 150 mm로 만들었으며, 가공열처리를 위해서 직경 10 mm, 높이 15 mm의 압축시험편 규격에 맞게 제작하였다. 가공 열처리(TMT; Thermo-mechanical treatment)는 압축가공도를 0~40%까지, 가열온도는 900°C~1050°C까지, 유지시간은 0~6분까지 변화시켰다.

VIM 주조직후의 빌렛의 성분을 분석하기 위하여 유도결합 플라즈마 분광법(ICP) 분석을 했으며, 그 결과를 Table 1에 전기전도도를 측정한 결과와 같이 나타내었다. 주조직후의 전기전도도(%IACS)는 Ca 함량이 증가할수록 비례적으로 감소함을 보여주고 있다.

VIM주조직후 Cu-(0.1~1.5)%Ca 조성의 동합금 빌렛의 미세조직을 Fig. 1에서 나타내었다. 동합금 빌렛의 미세조직은 밝은 부분의 primary copper dendrite와 검은 부분의 interdendritic eutectic으로 구성되어 있음을 알 수 있다. Cu-Ca 이원상태도에서 Cu에 Ca의 고용도는 거의 0이므로, interdendritic 상은 주로 Cu와 Cu₅Ca로 구성되어 있는 것으로 알려지고 있다[5]. 주조직후의 조직인 Fig. 1의 Cu-

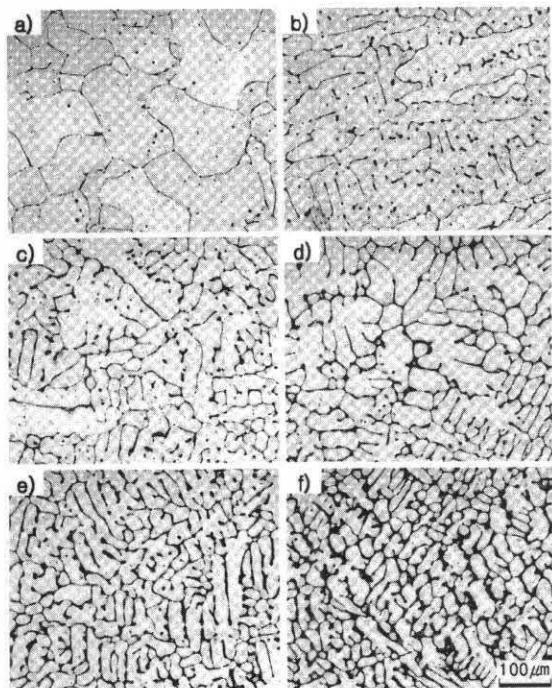


Fig. 1. Optical microstructures of various as-cast Cu-Ca alloys: a) 0.1%Ca, b) 0.3%Ca, c) 0.45%Ca, d) 0.6%Ca, e) 0.9%Ca, f) 1.4%Ca.

0.1%Ca 합금의 경우, 전기동의 조직과 유사하게 입계가 명확히 구별되었다. 그러나 Ca 함량이 증가하면서 공정상의 분율이 증가하였다. 입자의 형태도 수지상조직이 부분적으로 많이 파괴된 모습을 볼 수 있었다.

주사전자현미경을 이용하여 Fig. 1에서의 공정상을 관찰한 것이 Fig. 2이다. Fig. 2에서 공정조직은 Cu와 Cu₅Ca로 형성된 interdendritic 상을 보여주고 있으며, 판상으로 적층된 구조를 취하고 있다. Fig.

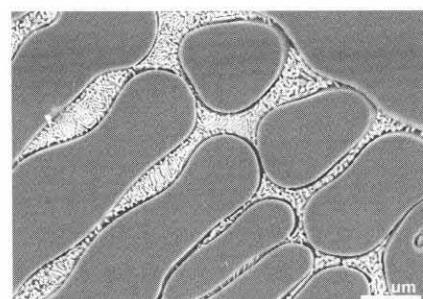


Fig. 2. SEM image of as-cast Cu-1.4%Ca alloy.

Table 1. Electrical conductivity of Cu-Ca alloys with the charge of Ca contents

Ca [wt%]	nominal	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5
% IACS	real	0.087	0.28	0.44	0.61	0.91	1.38
	평균	98.0	98.3	94.6	91.6	85.4	78.3

2에서 회색부위는 Cu의 상이며, 흰색 부위는 interdendritic 상이라는 것을 XRD 분석을 통해서 알 수 있었다. 또한 공정조직(Fig. 1에서 검은영역)의 체적이 크면 클수록, 즉 금속간 화합물인 Cu_5Ca 가 많이 포함되어 있을수록 Cu-Ca합금은 취성이 강하다. 반응고 성형면에서는 공정상이 많을수록 성형성은 좋아지지만 액상의 양과 입자모양의 제어에 따라서 성형성이 다를 수 있다.

VIM 주조직후의 조직의 입자크기와 액상율(공정상의 분율)을 측정한 것을 Fig 3에서 보여주고 있다. 0.1~0.5%의 Ca 함량에서는 입자의 구분이 명확하지 않았지만, 대체적으로 첨가된 Ca의 양이 증가할수록 핵생성 자리의 증가에 따른 입자의 크기가 감소함을 보여주고 있다. 입자의 평균크기는 0.6~1.4%Ca에서 대략 50~30 μm 정도의 미세한 입자들로 구성되어 있었다. 공정상이 증가함에 따라 액상율은 거의 직선적으로 비례함을 Fig. 3의 b)에서 알 수 있다. 특히

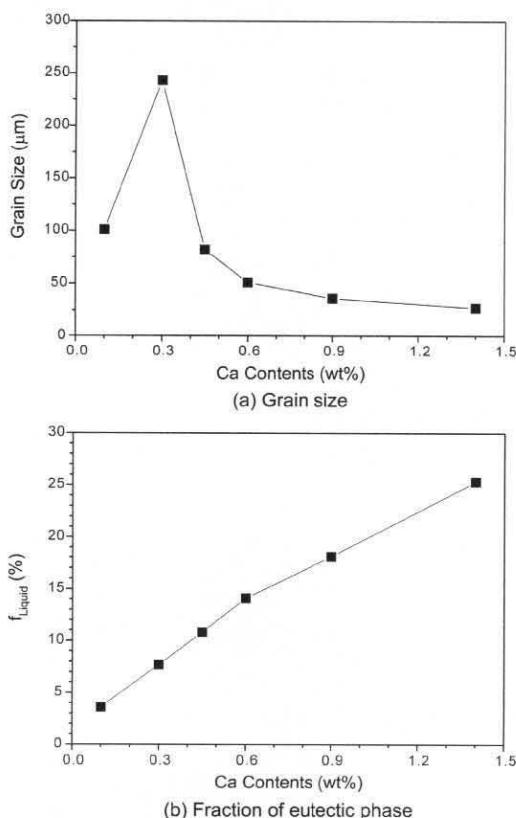


Fig. 3. Grain size and eutectic fraction of various as-cast Cu-Ca alloys.

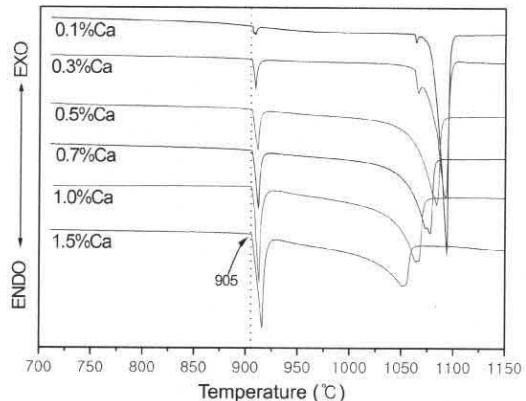


Fig. 4. DSC curves of Cu-Ca alloys.

1.4%Ca 합금에서는 추가적인 변형을 주지 않아도 성형이 가능할 정도의 입자의 크기와 액상율 및 구상의 형태를 하고 있었다.

반응고 성형을 위해서는 적당히 넓은 구간의 고액 공존구간이 필요하다. Fig. 4는 Cu-Ca 합금의 고액 공정구역을 알아보기 위하여 열분석(DSC)을 한 결과를 나타낸 것이다. DSC분석 결과 905°C 부근에서 peak가 시작한 것을 볼 수 있었다. 이것은 공정상의 용해가 시작되는 것을 의미한다. 즉 Fig. 1의 검은 영역에서 용해가 시작하여 온도가 증가함에 따라 고상중의 액상량이 증가함을 알 수 있다. Peak의 크기는 Ca함량이 증가함에 따라 점차 크게 나타났으며, 이는 반응에 관여하는 eutectic volume이 증가하였다는 것을 의미한다. Cu-Ca합금이 완전히 용융이 일어나는 두 번째 peak는 Ca의 함량이 증가할수록 낮아져 1.5% Ca에서는 약 1061°C 정도 되었다. 고액공존구간이 Ca의 함량에 따라 140~180°C인 것을 알 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 냉각방식에 따른 미세조직과 전기전도도와의 관계

Cu-Ca 합금의 전기전도도는 Ca의 함량에 따라 크게 영향을 받는다(Table 1). 또한 열처리와 같은 Cu-Ca 합금의 후처리 공정에 따라서도 조금씩 변한다. Fig. 5는 Ca 함량이 증가함에 따라 전기전도도는 직선적으로 감소함을 보여주고 있다. Fig. 5는

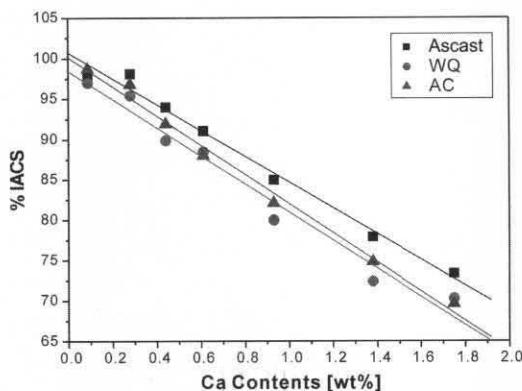


Fig. 5. Variation of electrical conductivity of copper on the concentration of calcium at various cooling conditions.

as-cast와 1050°C까지 가열후 상온까지 수냉 및 공냉한 후의 전기전도도를 측정한 결과이다. As-cast 상태에서 전기전도도가 반응고 상태로 가열 후 수냉 또는 공냉한 시편에서 보다 전기전도도가 매우 높게 나왔다. 이에 반하여 1050°C까지 가열후 수냉/공냉 후의 시편에서 측정한 전기전도도 값은 큰 차이를 보이지 않았다. 일반적으로 전기전도도는 입자의 크기가 클수록 높다. 이는 입계가 전기전도의 장벽으로 써 작용하기 때문이다. Cu-Ca 합금의 고액공존구간인 1050°C까지 가열후 냉각할 경우 시편 내부에는 상당수의 기공이 포함되어 있다. 1050°C까지 가열 후 수냉 및 공냉한 미세조직을 Fig. 6에 나타내었다. As-cast 조직에 비해 가열후 수냉 및 공냉한 조직이 상당히 조밀화되어 있는 것을 볼 수 있다. 세가지 경우 모두 액상율은 비슷하였으나, 전기전도도 값이 as-cast 상태가 가장 높게 나온 것은 고액공존구역으

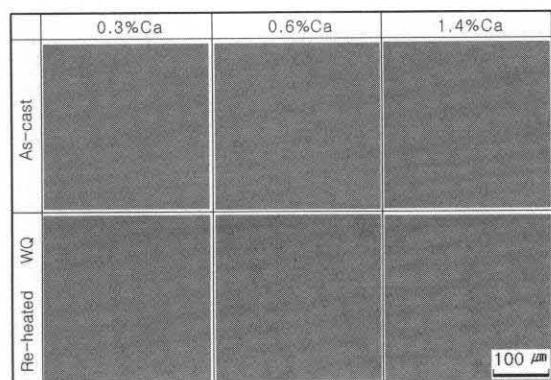


Fig. 7. Optical Microstructures with different cooling conditions (reheating conditions: 1050°C/0 min, 0.9%Ca).

로 재가열한 시편의 경우 시편내부에 형성된 기공이 전기전도도를 저하시켰기 때문에 판단된다(Fig. 7). Fig. 7은 진공용해 주조직후와 1050로 재가열후 수냉한 조직의 광학현미경 사진으로 기공을 관찰하기 위해 에칭을 하지 않았다. Fig. 7에서 검은 점으로 보이는 것이 기공이다. 재가열후 수냉조직에서 더 많은 기공이 관찰되었고 이런 기공에 의한 자유전자의 산란에 의해 전기전도도가 감소한 원인으로 보인다.

3.2. Cu-Ca 합금의 Thermo-mechanical process

일반적인 주조조직은 수지상을 형성하고 있기 때문에 반응고 성형에 적합하지 않다. 반응고 성형에서 입자의 형태에 따라 성형성이 크게 좌우된다[6]. 즉 입자가 구상의 형태를 하고 있으면 작은 전단응력으로도 입자의 유동이 용이해지므로 성형성이 좋아지게 된다. 또한 금속재료가 thixotropic 특성을 지니기

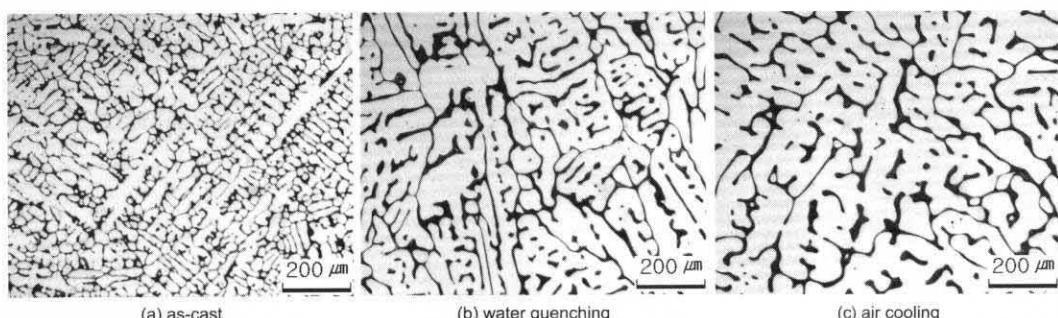


Fig. 6. Optical Microstructures with various cooling conditions (1050°C/0 min, 0.9%Ca).

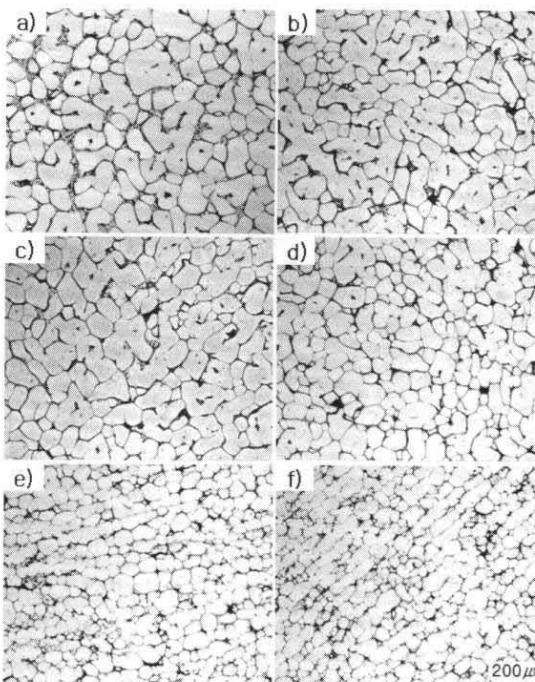


Fig. 8. Optical microstructures of Cu-0.6%Ca alloy specimens compressed to various deformation levels at room temperature followed by heat treatment at 1050°C for 4 minutes: a) 0%, b) 5%, c) 10%, d) 20%, e) 30%, f) 40%.

위에서는 조직적으로 구형의 고용접상들이 저용접상들로 둘러싸여져 있어야 한다. 이를 위하여 가공열처리 방법중에 하나인 SIMA(Strain Induced Melt Activated) 공정을 이용하여 입자를 구상으로 만들어 줄 수가 있다[7]. SIMA공정은 소재를 냉간 또는 열간가공으로 변형을 가하여 재가열 동안 입자의 재결정화에 의하여 쉽게 구형화를 시키는 방법이다. 충분한 소성변형을 받은 재료를 반응용상태로 가열하면 조직이 미세하고 균일하며 비수지상의 구형입자를 형성할 수 있다.

Fig. 8의 a)는 소성변형 없이 1050°C에서 4분간 가열한 것으로 부분적으로 구상화가 이루어져 있는 것을 볼 수 있다. 이렇게 가열만으로 부분적 구상화가 이루어지는 현상은 Ca의 함량이 증가할수록 더 낮은 온도에서 일어났으며, 저 Ca함량에서는 입자의 크기가 쉽게 조대화 되었다. 성형성 및 입자의 미세화를 위해서는 Ca의 함량이 높을수록 좋으나 Ca은 금속간화합물인 Cu_5Ca 를 형성하여 전기전도도

를 저하시키는 원인이 되므로 첨가한 Ca의 양을 최소화시켜야 한다. Ca의 함량을 최소화 하면서 쉽게 구상화 할 수 있는 방법이 소재에 충분한 변형을 가하는 방법이다.

Cu-Ca 합금에 소성변형을 부여하기 위하여 가공도 40%까지 단순 압축시험을 하였다. 이때 가공도는 초기 높이에 대한 최종 높이의 변화량($\Delta h/h_0$)으로 구하였다. Fig. 8의 b)~f)는 가공도를 증가시키면서 1050°C에서 4분간 가열한 한 소재의 미세조직을 나타내고 있다. 가열전에 소성변형을 한 소재는 수지상 조직이 쉽게 구상화가 진행되었다. 이것은 변형량이 증가함에 따라 재결정화가 일어 날 수 있는 자리가 증가하기 때문이며 가열 동안 심하게 변형된 Cu-Ca 합금은 재결정에 의하여 결정립 미세화가 일어나게 된다.

Fig. 9는 15%까지 가공도를 부여한 후 반응고 영역까지 가열한 것으로 동일한 가공도에서 Ca의 함량이 증가함에 따라 입자의 크기는 점점 작아졌으며, 액상율은 증가한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 4가지 조성의 다양한 가공도에서 미세조직의 입자크기를 측정한 것을 도식화하였다. 전체적으로 가공도가 낮을수록, 첨가된 Ca 함량이 작을수록 입자는 조대화 되었다. 또한 Ca 함량이 작은 것도 가공도가 증가함에 따라 Ca 함량이 높은 합금의 입자크기와 비슷한 수준까지 입자를 미세화할 수 있

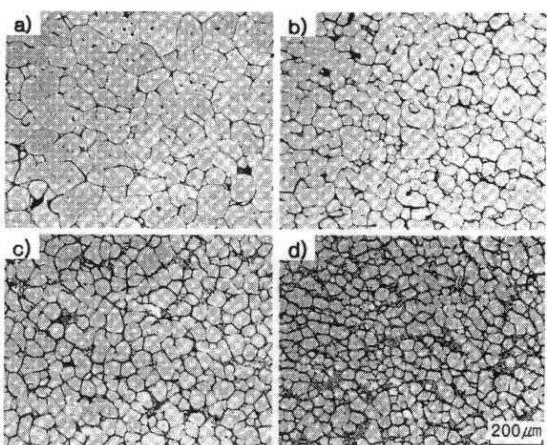


Fig. 9. Optical microstructures of Cu-Ca alloy specimens compressed to 15% deformation at room temperature followed by heat treatment at 1050°C for 4 minutes: a) 0.3%Ca, b) 0.6%Ca, c) 0.9%Ca, d) 1.4%Ca.

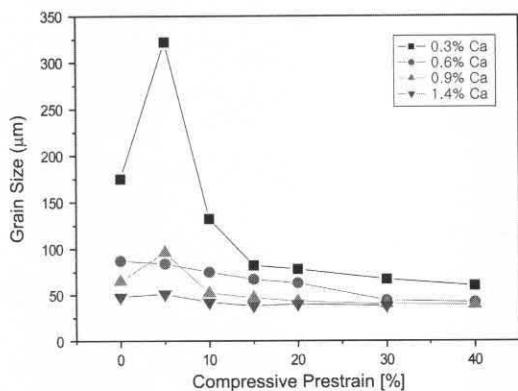


Fig. 10. Grain size of Cu-Ca alloy specimens compressed to various deformation levels at room temperature followed by heat treatment at 1050°C for 4 minutes.

었다.

Cu-Ca합금의 최적의 반응고 성형 조건을 찾기 위해서는 가열온도 및 시간에 따라 미세조직의 거동을 살펴보았다. Fig. 11과 Fig. 12는 서로 다른 가공도에서 Cu-0.9%Ca 합금을 동일한 가열시간(4분)에서

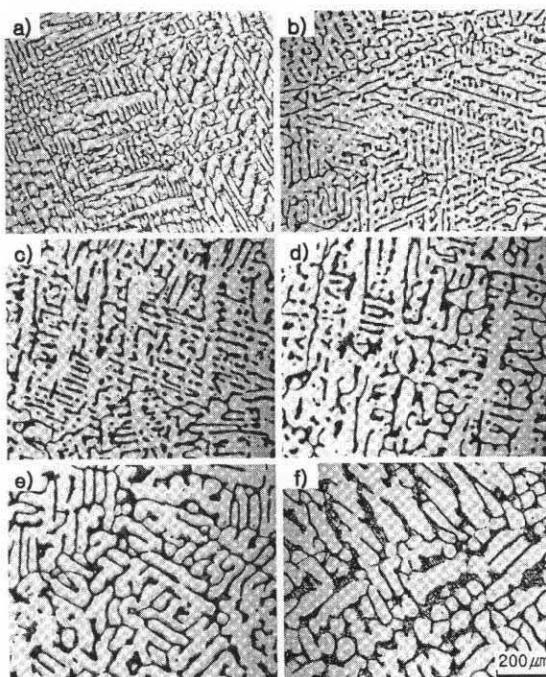


Fig. 11. Optical microstructures of Cu-0.9%Ca alloy specimens with different reheating temperatures (heat-ing time : 4 min, 0% compressed): a) 900°C, b) 917°C, c) 950°C, d) 1000°C, e) 1030°C, f) 1050°C.

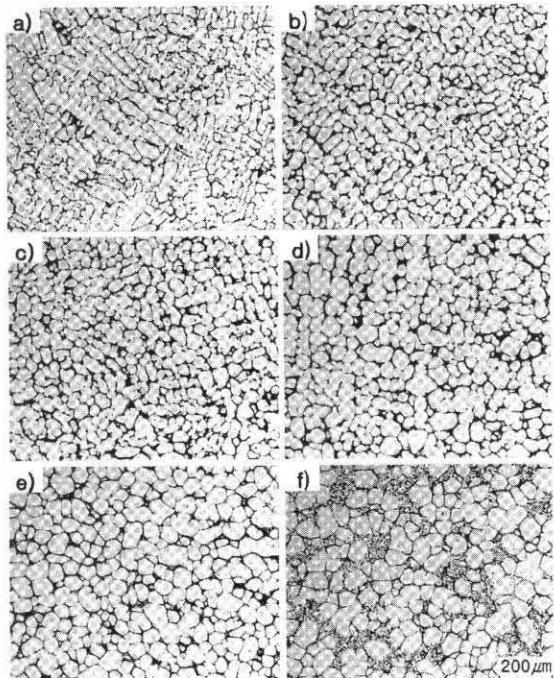


Fig. 12. Optical microstructures of Cu-0.9%Ca alloy specimens with different reheating temperatures (heat-ing time : 4 min, 15% compressed): a) 900°C, b) 917°C, c) 950°C, d) 1000°C, e) 1030°C, f) 1050°C.

온도를 고상선의 아래의 온도인 900°C에서 액상선 아래의 온도인 1050°C까지 변화시켰을 때의 미세조직의 변화를 관찰한 결과이다. Fig. 11은 가공도를 부여하지 않았을 경우로서, 공정선 온도인 917°C부근 및 그 아래에서는 미세한 수지상조직을 관찰할 수 있었다. 온도가 증가할수록 수지상조직이 조대화되었으며, 일부는 수지상의 가지가 떨어져서 구형의 입자를 형성하고 있었다. 그러나 가공도를 부여하지 않을 경우 수지상조직을 근본적으로 제거할 수는 없었다.

이에 반해 Fig. 12는 가공도를 15%정도 부여한 시편에서는 공정선 아래온도인 917°C 아래인 900°C에서만 수지상 조직을 관찰할 수 있었다. 즉, 고상선을 넘으면서 수지상이 파괴되어 입자의 구상화가 점점 진행되고 있는 모습을 보여주고 있다. 가공도를 15% 부여한 Fig. 12에서도 온도가 증가할수록 입자는 조대화되어지며, 액상영역은 점점 증가하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 서로 다른 가공도에서 Cu-

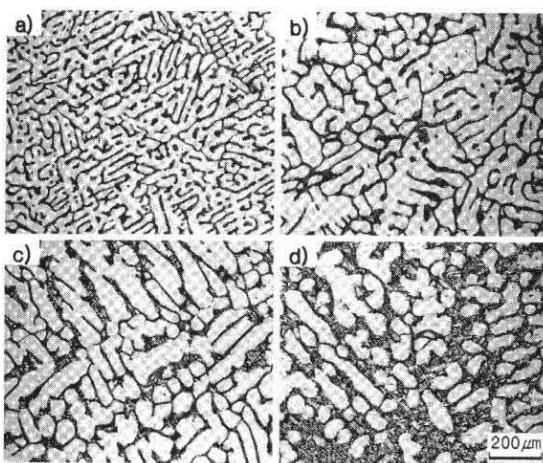


Fig. 13. Optical microstructures of Cu-0.9%Ca alloy specimens with different heating times (heating temp.: 1050°C, 0% compressed): a) 0 min, b) 2 min, c) 4 min, d) 6 min 0% compressed.

1.0%Ca 합금을 1050°C에서 0~6분까지 가열시간을 변화시켰을 때의 미세조직의 변화를 나타내고 있다. 가공도를 부여하지 않은 Fig. 13은 수지상조직이 그대로 남아 있었으며, 입자의 크기도 상당히 조대하였다. 가열시간이 길어질수록 수지상조직이 파괴되어 구상의 입자가 나타났으며, 액상영역이 확대된 것을 볼 수 있다. 그러나 가열시간이 짧을수록 수지상조직이 그대로 남아있어 반응고 성형에 적합하지 않음을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 14와 같이 15%의

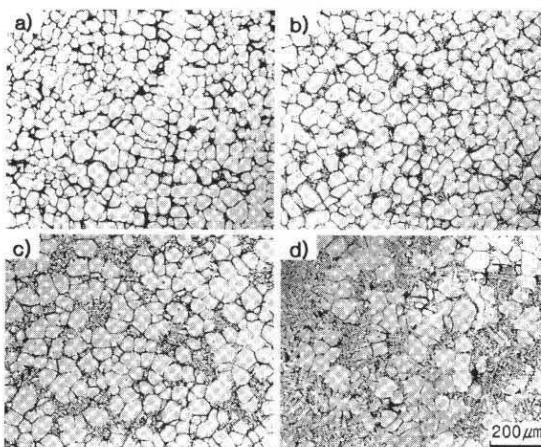


Fig. 14. Optical microstructures of Cu-0.9%Ca alloy specimens with different heating times (heating temp.: 1050°C, 15% compressed): a) 0 min, b) 2 min, c) 4 min, d) 6 min.

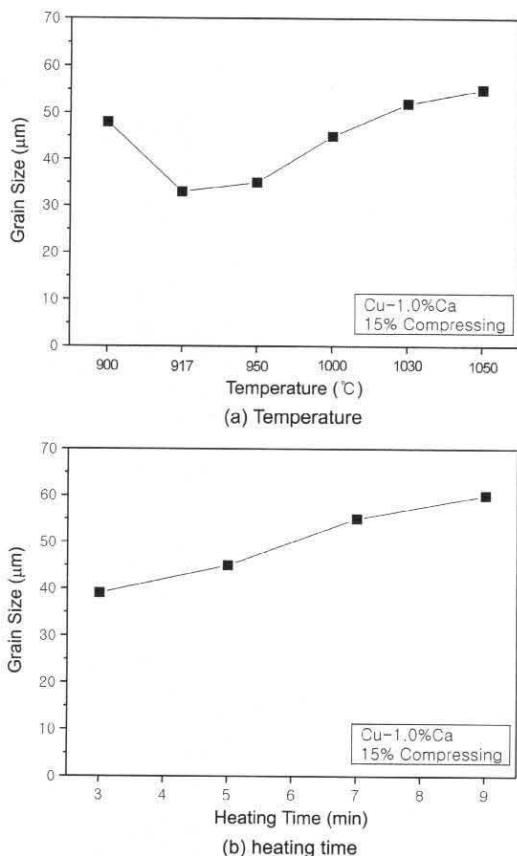


Fig. 15. Grain size of Cu-0.9%Ca alloy specimens compressed to 15% deformation followed by various heat treatments.

압축을 한 시편의 경우 가열시간에 관계없이 모두 구형의 입자를 형성하고 있었다. 그리고 가열시간이 증가할수록 액상영역과 입자크기는 증가하였다.

Fig. 15는 15% 가공도를 부여한 Cu-0.9%Ca 합금의 가열온도와 유지시간에 따른 입자크기를 나타낸 그래프이다. Fig. 11~14까지 설명한 경향을 나타내고 있으며, 입자의 크기는 35~60 μm 범위에서 변화였다.

4. 결 론

고효율 전동기용 Cu-Ca 합금의 반응고 성형을 위한 소재 재조 및 가공 열처리 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) VIM 제조된 Cu-Ca 합금의 전기전도도는 Ca

의 함량이 증가할수록 전기전도도가 급격히 감소하며, 80%IACS 이상의 전기전도도를 얻기 위해서는 1.0%이하의 Ca를 함유해야 한다.

(2) 원소재인 Cu-Ca 합금의 미세조직은 초정 Cu 수지상과 공정성분(Cu+Cu₅Ca)로 구성되어 있으며, Ca 함량이 증가할수록 수지상의 크기는 비례적으로 작아졌다.

(3) Ca함량이 높은 경우에는 Cu-Ca 합금을 반응하고 영역으로 가열하는 것으로도 구상의 입자를 얻을 수 있었으며, SIMA 공정(가공열처리법)을 통하여 소성변형량을 부여한 소재는 Ca 함량이 작은 것도 가공도가 증가함에 따라 Ca 함량이 높은 합금의 입자크기와 비슷한 수준까지 입자를 미세화 할 수 있었다.

(4) 냉각방식에 따라 전기전도도를 측정한 결과, 반응고 구간에서 가열후, 수냉과 공냉의 차이는 크지 않았지만, 주조후보다는 전기전도도가 떨어졌다. 이는 반응고 상태에서 생성된 기공의 영향으로 판단된다.

(5) 동일한 조성의 Cu-Ca 합금에서 가공도를 부여하지 않았을 경우, 온도가 증가에 따라, 가열시간의 증가에 따라 입자는 조대화되었고, 입자는 수지상형태를 유지하고 있었다.

(6) 동일한 조성의 Cu-Ca 합금에서 15% 가공도를 부여했을 경우, 온도가 증가에 따라, 가열시간의 증

가에 따라 입자는 조대화되었고, 구상의 입자를 얻을 수 있었다. 또한 액상율은 시간 및 온도의 증가에 따라 증가하였다.

참고문헌

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. Keun Yong Sohn, Byung Moo Kang, Chang Joo Kimm, and Sang Yong Lee: "Advanced Semi-solid Processing of Alloys and Composites", Proceedings of the 7th S2P, 2003, p.89-94.
4. Keun Yong Sohn, Dong Woo Suh, and Sang Yong Lee: AMPT 2003, P1497-1500.
5. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., and Kacprzak, L.: "Binary Alloy Phase Diagrams", 2nd edition, p.906, ASM International, 1990.
6. S. Kleiner, O. Beffort, M. Fuchs, P.J. Uggowitzer: "Advanced Semi-solid Processing of Alloys and Composites", Proceedings of the 7th S2P, 2003, p.257-262.
7. Lee Sang-Yong, Lee Jung-Hwan, Lee Young-Sun: Journal of Materials Processing Technology, 4845, (2001) 1-6.