J. of the Korean Society for Heat Treatment
Vol.4, No.2, June 1991, pp.9~18

論 文

in situ法에 의한 Cu-Fe系 多纖維狀 複合材料製造에 관한 硏究

서수정·박현순
성균관대학교 공과대학 금속공학과

A Study on Cu-Fe Multifilamentary Composites Produced by in situ Process

S.J. Shur and H.S. Park
Dept. of Metall. Eng. Sung Kyun Kwan Univ.

ABSTRACT

Among the many maunfactured processes of producing multifilamentary composites, in situ process is widely used owing to its simplicity and easyness of mass production. In this study, the mechanical and electromagnetic properties of Cu-Fe composite materials was investigated. The tensile strength of the Cu-Fe wires increased as the Fe content and reduction ratio were increased. The Cu-30 wt%Fe composites had the best properties in terms of figure merits compared to the other Cu-Fe composites made in this study or the commercially manufactured 6/1 ACSR cables of Cu cable. The coercivity was decreased by increasing Fe content, but the squareness was increased greatly. As increasing reduction ratio, the coercivity and squareness increased up to the maximum points, and then decreased. For example, the maximum values were obtained at 0.09 mmϕ for Cu-30 wt%Fe composites and at 0.066 mmϕ for Cu-45 wt%Fe composites. The magnetic property of Cu-Fe wires produced by precipitation treatment was higher than that of Cu-Fe wires produced by thermomechanical treatment. By annealing Cu-Fe wires after drawing process, the coercivity, remanence and squareness were improved.

1. 서 론

單磁區 粒子의 강자성체에 대한 연구는 Stoner-Wohlfarth[1]가 이론적으로 확립한 이래로 많은 연구가 수행되어, 單磁區 거동을 나타내는 강자성 미립자를 非磁性相내에 분산시켜 形狀異方性을 주면 높은 보자력을 가진 자성재료의 개발을 할 수 있을 것으로 기대되어 왔고 이와같은 이론에 의해 ESD자석이[2] 개발되었다. 非磁性體인 Cu와 강자성체인 Fe의 고용도가 낮은 특성을 이용하여 2상이 공존하는 單磁區粒子의 자성을 연구하고, 두 금속의 기계적, 물리적인 특성을 이용한 多纖維狀 복합재료를 개발하는 것은 매우 의의가 있다.

일반적으로 多纖維狀 복합조직의 제조방법으로는 복합가공법[3], 분말야금법[4], in situ법[5-7]이 널리 알려져 있다. 복합가공법은 Cu 모재 중에 복합재를 삽입한 후 압출하고 이 압출재를 수십개 묶어 일정한 형태의 dies로 인발하여 세선이 될 때까지 반복하여 가공하는 방법으로써 제조방법이 복잡한 단점이 있다. 분말야금법은 모상과 제2상 금속의 분말입자를 자유로이 선택할 수 있고 합금조성의 제약이 적은 장점이 있으나, 압축된 재료중에 기공이 많이 존재하여 가공성과 자기적 성질이 나쁜 단점이 있으므로, 이와같은 단점을 보완하기 위하

여 Hot powder법이[8] 제안되었고, 또 용융금속을 분말 소결체에 침투시켜 복합재료를 만드는 infiltration법도[9] 개발되었다. 그러나 in situ법은 합금을 직접 용해, 주조하고 가공을 하므로, 제조공정이 대단히 간단하고 대량생산이 용이하다. 또한 이 방법으로 제조한 경우 두께 50-2000Å, 10^6-10^{10}개/cm^2정도의[10] 미세한 섬유상을 가진 복합조직을 형성시킬 수 있으므로 우수한 기계적 성질과 다양한 용도의 전·자기적 특성을 가진 재료를 개발할 수 있다. 특히 in situ법을 이용하여 저렴한 원료를 사용하는 Cu-Fe계 多纖維狀 복합조직 선재의 개발은 전자교환기, high speed rotor와 같은 半硬質자석용과 고전압 송전 케이블 등 다양한 수요가 예상되며 초전도에 관한 연구에도 크게 기여하게 될 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 Cu-10~45 wt%Fe 합금을 in situ법으로 제조한 極細多纖維狀 복합재료의 Fe함유량, 가공도 및 어닐링이 기계적 성질과 보자력(H_{cl}), 角形性(M_r/M_s), 잔류자속밀도(B_r) 및 최대에너지적 $(BH)_{max}$등의 자기적 특성이 미치는 영향을 조사하였으며, 가공열처리(thermomechanical treatment, TMT)를 하므로써 前報에서[11] 보고한 석출열처리법과 비교, 검토하였다.

동시에 이 복합재료의 우수한 인장강도와 낮은 전기저항을 이용하여 송전용 Cu 케이블이나 ACSR(aluminum cable steel reinforced)의 대체재로서의 사용가능성도 알아보았다.

2. 실험방법

Cu-Fe계 합금의 주조는 전기동과 전해철을 혼합하여 석영관에 넣어 Ar가스 분위기 하에서 고주파 유도로로 용해하고 미세한 조직을 얻기 위하여 석영관을 직접 수냉하여 시편을 응고시켰다. 주조한 시편의 화학성분을 습식으로 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical Composition of Alloy.

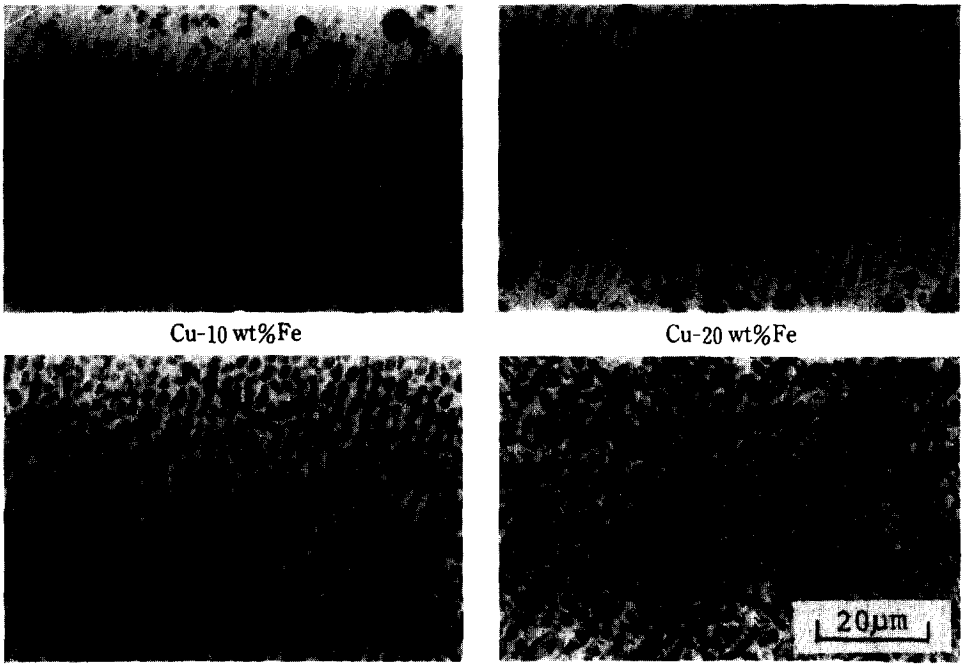
Alloy \ Elements	Fe	Si	Pb	Zn	Ni	Cr	Mn	Cu
Cu-10 wt%Fe	10.23	0.0061	0.0100	0.0055	0.0017	tr.	0.0037	bal.
Cu-20 wt%Fe	20.27	0.0080	0.0095	0.0073	0.0018	tr.	0.0029	bal.
Cu-30 wt%Fe	30.36	0.0930	0.0105	0.0061	0.0021	tr.	0.0035	bal.
Cu-45 wt%Fe	44.80	0.0390	0.0105	0.0056	0.0015	tr.	0.0030	bal.

본 실험에서 채택한 가공열처리법은 1000℃에서 1일간 열처리한 시편을 1 mmϕ까지 압연하고, 630℃에서 1시간 동안 열처리한 시편 다음 1 mmϕ부터 0.5 mmϕ까지 인발한 후 540℃, 1시간 열처리하였다. 그리고 diamond dies를 사용하여 350℃에서 1시간 동안 중간 어닐링을 하면서 최종 0.054 mmϕ까지 인발하는 방법을 택하였다. 열처리는 시편의 산화를 방지하기 위하여 10^{-4}torr 이상의 진공상태로 만든 석영관을 사용하였으며, 어닐링은 Ar가스 분위기 속에서 행하였다. 주조조직은 광학현미경으로, 인발후의 Fe섬유상은 주사전자현미경(SEM, JEOL-35 CF)으로 관찰하였다. 이때 섬유조직을 관찰하기 위하여 55% H_3PO_4, 25% CH_3COOH, 20% HNO_3의 혼합 부식액을 사용하여 모상인 Cu를 선택적으로 부식시켰다. 경도시험은 시편을 수직으로 세워 마운팅한 후, 미소경도시험기(TORSEE, MVH-1)로 단면의 경도를 측정하였으며, 10회이상 측정하여 평균값으로 나타내었다. 인장시험은 0.24 mm, 0.12 mmϕ의 선재를 냉간가공 상태와 어닐링한 시편으로 각각 분리하여 시험하였다. 이때의 cross head speed는 0.25 mm/min하고, 50 kg Load cell을 사용하였다. 이때 선재의 단면적을 정확히 구하기 위하여 digital microgage를 사용하여 직경을 10^{-3}mm까지 구하였다. 시편의 전기전도성은 digital multi-ohm meter를 사용하여 JIS H-0505 규격에 따라 전기저항을 측정하였다. Cu-30, 45 wt%Fe의 직경 0.24 mm, 0.12 mm, 0.09 mm, 0.066 mm 및 0.054 mmϕ의 시편에 대해 試料振動型磁氣計(VSM)를 사용하여, Fe의 조성, 가공도와 어닐링에 따른 磁氣履歷曲線을 구하여 H_{cl}, M_r/M_s, B_r 및 $(BH)_{max}$를 구하여 자기적 특성을 평가하였다. 이때 자장을 장축과 평형하게 걸어주었으며, 최고자장은 3500 Oe로 하였다. 시편의 무게는 chemical balance로 10^{-5}g까지 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조직관찰

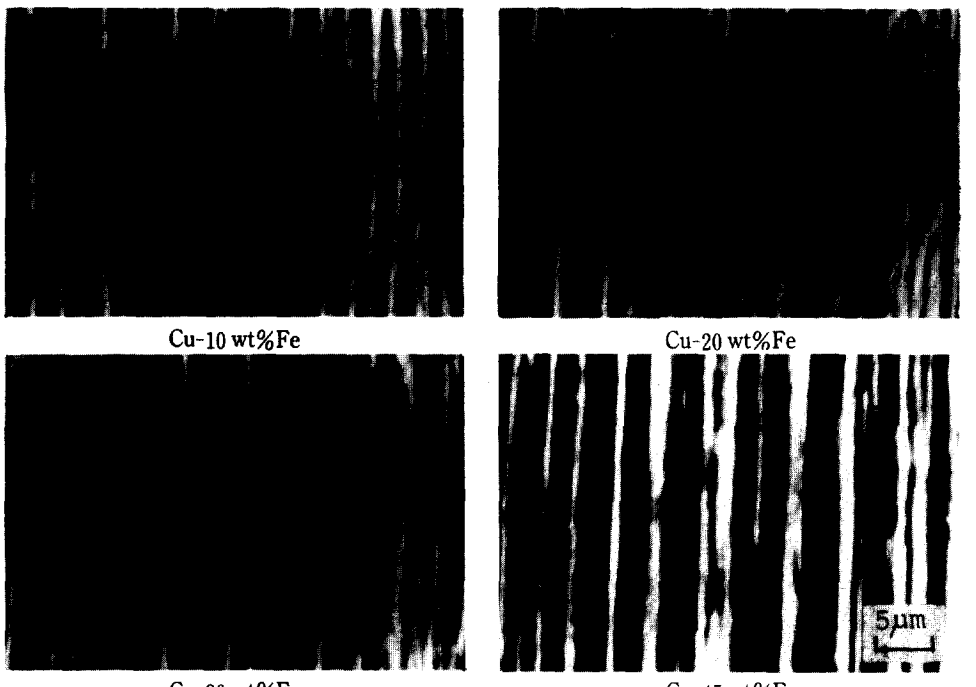
Photo.1은 Cu-Fe 합금을 주조한후 1000℃에서 1일간 열처리한 후의 조직사진으로서 Fe입자가 비교적 균일하고 미세하게 분포된 조직을 얻을 수 있었으며, Fe 함량이 높을수록 Fe입자가 점차 수지상으로 나타나고



Cu-10 wt%Fe　　Cu-20 wt%Fe

Cu-30 wt%Fe　　Cu-45 wt%Fe

Photo. 1. Microstructures of Cu-Fe after heat treatment at 1000℃ for 24 hrs. (Cu : light areas, Fe : areas)



Cu-10 wt%Fe　　Cu-20 wt%Fe

Cu-30 wt%Fe　　Cu-45 wt%Fe

Photo 2. Longitudinal sections of Cu-Fe composites after cold drawing. (Cu : dark areas, Fe : light areas)

Photo. 3. Tranverse sections of Cu-20 wt%Fe composites drawn to 0.24 mmϕ. (Cu : light areas, Fe : dark areas)

있음을 알 수 있다. Cu-Fe계 합금과 같이 固-液相間이 넓은 경우에는 수지상정의 형성을 억제시키기가 대단히 어려우므로 1960년 Kraft[12]가 제안한 방향성 응고법에 의해 복합재료를 제조하는 in situ응고법으로 섬유상을 형성시킬 수 없기 때문에, 연성이 우수한 Cu 모상을 이용하여 높은 가공도로 인발하여 제2상인 Fe를 직선적으로 배열시켜 모상중에 極細多纖維狀을 형성시키는 in situ법을 채택한 것이다.

Photo.2는 Cu-10～45 wt%Fe합금을 0.24 mmϕ까지 인발한 후 350℃에서 1시간 동안 어닐링한 시편의 측면조직을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 모상인 Cu내에 균일하고 미세한 Fe섬유상이 분포되어 있다. 그러나 앞서 보고한 논문과[11] 비교하면 섬유상의 균일성이 좋지 못하며, 섬유상이 더 많이 엉켜있는 것을 볼 수 있다. 이것은 가공열처리한 경우가 Cu 모상 내에 고용된 Fe함량이 상대적으로 많으므로, 모상인 Cu의 가공경화도가 크게 되어 Fe섬유상의 slip을 방해하기 때문이라고 생각된다.

Photo.3은 Cu-20 wt%Fe선재의 단면조직을 나타낸 것으로 Fe섬유상이 리본 모양으로 되어있다는 것을 알 수 있다. 이 이유는 bcc결정의 4개의 〈111〉 slip방향 중에 가공 방향으로 놓여있는 2개의 〈111〉 방향으로만 신장하여 섬유조직이 되며 이 경우에 bcc인 섬유상은 축방향으로 대칭적인 유동을 받는 주위의 fcc모상에 의해 구속을 받아 엉켜서 리본 모양이 된다[13].

3.2. 기계적 성질

Fig.1은 1000℃에서 1일간 열처리한 후 0.24 mm, 0.12 mmϕ로 가공한 시편의 Fe함량에 따른 micro vickers 경도치의 변화와 350℃에서 1시간 동안 어닐링한 시편의 경도치와 비교하여 나타낸 것이다. Fe함량의 증가에 따른 경도치의 증가는 현저하였고, 0.12 mmϕ의 경우가 0.24 mmϕ보다 높은 값을 가졌으며, 그 차이는 Fe함량이 높을수록 더 크게 나타났다. Fe함량이 낮은 경우에는 어닐링에 의해 경도가 저하되었으나, Fe함량이 증가함에 따라 가공상태보다 경도가 오히려 약간 상승하는 경향이 나타났다. 이 이유는 Fe 섬유상 내에 고용되어 있는 Cu의 석출에 의한 경화와 주원인으로 생각된다. 이와같은 Cu의 석출은 가공에 의해 형성된 과잉의 원자공공을 매개로[14,15]하여 일어나는 것으로 생각되며, Hornbogen등에[16] 의하면 비교적 고온에서 석출되는 경우를 제외하고는 Cu의 석출은 전위와는 관계가 없다고 보고하였다.

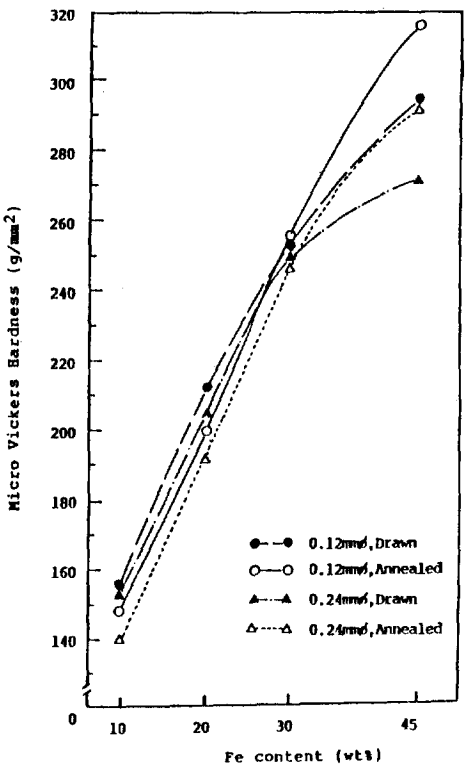


Fig.1. Micro Vickers hardness of in situ Cu-Fe composites as a function of Fe content.

Fig.2는 Fe함량, 가공도 및 어닐링에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 것이다. 가공도와 Fe함량이 높을수록

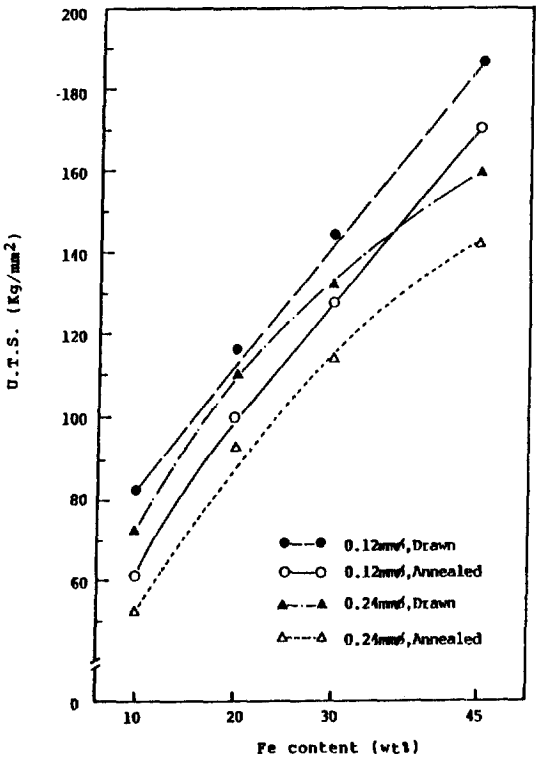


Fig.2. Ultimate tensile strength of in situ Cu-Fe composites as a function of Fe content.

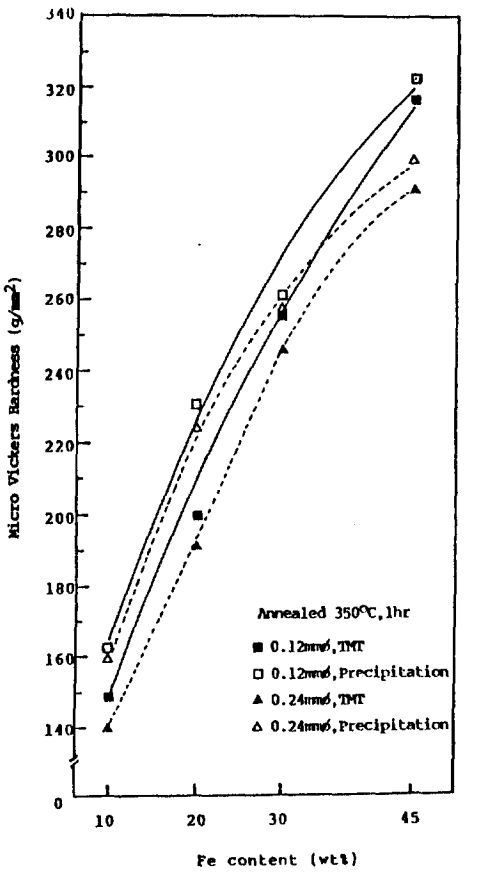


Fig.3. Micro Vickers hardness of in situ Cu-Fe composites as a function of Fe content.

현저한 인장강도의 증가가 있었고, 350℃에서 1시간 동안 어닐링한 결과 인장강도가 약간 저하되었다. Fe함량이 증가할수록 현저하게 인장강도가 높아지는 것은 모상인 Cu와 섬유상인 Fe의 slip면이 다르고, 가공후에 섬유상이 모상보다 강도가 훨씬 크기 때문에 전위가 계면에 고착되어, 이 계면에 있는 전위와 활주 전위의 상호작용에 의해 섬유상이 모상의 이동을 방해하기 때문이며, 또한 제2상 자체의 강도도 복합재료의 인장강도에 큰 영향을 미친다고 생각된다. 제2상의 부피분율이 낮을 경우에는 전자의 영향이 큰 것으로 생각되나, Fe함량이 증가할수록 후자의 영향이 점차 커질 것이다. 특히 Photo.3에 나타낸 바와 같이 Cu-Fe계 합금의 섬유조직은 리본형태로 되어 있으므로 가공도가 클수록 면적/부피비가 증가되므로 전위를 고착시키는 계면이 많아지므로 인장강도에 기여하는 가공의 효과가 크다.

Fe함량이 낮은 경우에는 0.24 mmϕ의 냉간가공 상태가 0.12 mmϕ의 어닐링한 경우보다 높은 인장강도값을 가지나, Cu-45 wt%Fe의 경우에는 어닐링한 0.12 mmϕ의 시료가 어닐링하지 않은 0.24 mmϕ시료보다 높은 인장강도값을 가지게 되는데, 이 현상으로부터 제2상의 부피분율이 낮은 경우에는 제2상이 전위이동의 장벽으로서 작용하기 때문에 인장강도값은 가공도가 높을수록 증가하며, 제2상의 강도는 부차적인 기구로서 생각된다. 그리고 Cu-45 wt%Fe의 경우에는 Fe함량이 높을수록 Fe섬유상의 수가 증가함에 따라 전위이동의 장벽이 많아지므로 인장강도가 증가하나 또한 석출경화된 제2상의 강도도 크게 기여하는 것으로 생각된다.

Fig.3은 가공열처리법에 의해 0.24 mmϕ 및 0.12 mmϕ로 인발한 후 어닐링한 시료의 경도를 前報[11]의 석출열처리한 시료의 경도와 비교하였다. Fe함량에 따른 경도값의 변화는 유사한 경향을 나타내고 있으나,

Table 2. Properties of Various Cu-Fe Composites for Use in Transmition Wire Cables.

Material	U.T.S (kg/㎟)	Resistivity (μΩ-cm)	Density (g/㎤)	Figure Merit kg/㎟(μΩ · cm · g/㎤)
Cu-10 wt%Fe	52.63	2.87	8.80	1.95
Cu-20 wt%Fe	93.08	3.20	8.67	3.29
Cu-30 wt%Fe	113.60	3.54	8.59	3.74
Cu-45 wt%Fe	142.53	4.61	8.44	3.66
Cu cable	39.40	1.84	8.96	2.39
6/1 ACSR	32.30	2.93	3.42	3.22

모든 Fe함량 및 가공도에서의 경도치는 석출열처리의 경우가 가공열처리를 했을 때보다 약간 높은 경도를 나타내고 있다.

3.3. 전기적 성질

Cu-10~45 wt%Fe합금을 0.24 mmϕ로 인발한 후 350℃에서 1시간 동안 어닐링한 시편의 전기저항을 측정하였다. Table 2는 현재 사용하고 있는 고전압 송전용 케이블인 6/1 ACSR(Al/steel)과 Cu케이블의 여러가지 특성을 각 조성의 Cu-Fe합금과 비교하여 나타낸 도표이다. Cu-Fe 복합재료의 전기저항은 Cu케이블에 비해 높은 값을 나타내지만, 인장강도값은 매우 우수하였다. 이와같은 성질을 종합으로 알아보기 위하여, 인장강도값을 저항과 밀도로 나눈값으로 비교한 결과 본 실험에서 제조한 Cu-Fe의 경우가 대체적으로 6/1 ACSR과 Cu케이블에 비해 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 특히 Cu-30 wt%Fe선재의 경우가 가장 우수한 특성을 가지고 있다.

3.4. 자기적 성질

본 연구에서는 비자성체인 Cu와 강자성체인 Fe를 높은 가공도로 인발하여 Fe상에 形狀異方性을 주면서 單磁區粒子에 도달할 때까지 미세화시킨 후 자화곡선을 그려 자기적특성을 조사하였다. Cu-30 wt%Fe를 0.24 mm, 0.12 mm, 0.09 mm, 0.066 mm 및 0.054 mmϕ까지 인발한 후의 H_{ci}와 M_r/M_s을 Fig.4에 나타내었고, 또한 350℃에서 1시간 동안 어닐링한 시편의 자기적성질을 측정한 결과도 함께 표시하였다. 0.09 mmϕ까지는 가공도에 비례하여 H_{ci}와 M_r/M_s가 증가되었으나, 그 이상의 가공도에서는 다시 저하되었다. 그리고 모든 가공도에서 어닐링에 의해 자기적특성이 향상되었다. Cu-30 wt%Fe에서의 가장 우수한 자기적성질은 0.09 mmϕ까지 가공한 후 어닐링하였을 때이다.

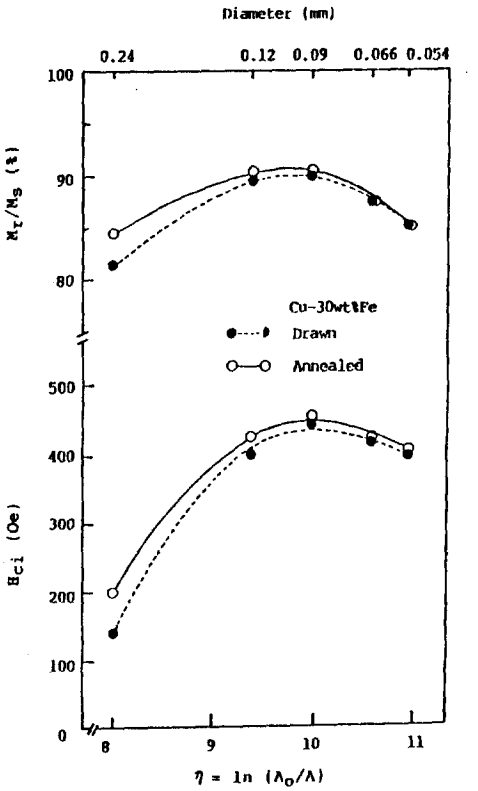


Fig.4. Intrinsic coercivity and remanence to saturation ratio of in situ Cu-30 wt%Fe wire composites as a function of $\eta=\ln(A_0/A)$.

Fig.5는 Cu-45 wt%Fe의 가공도 및 어닐링에 따른 H_{ci} 및 M_r/M_s값을 나타낸 것이다. H_{ci}와 M_r/M_s값이 가공도 및 어닐링에 따라 비례적으로 향상되었으나, 0.054 mmϕ에서 다시 감소되었다. 이 조성에서 가장 우수한 자기적성질은 0.066 mmϕ까지 가공한 후 어닐링하였을 때 나타났다.

Fig.4와 Fig.5를 비교해 보면 45 wt%Fe의 경우가 30 wt%Fe보다 보자력이 낮게 나타나는데 이 이유는 다음과 같다. 본 실험에서와 같이 높은 가공도에 의해 강자성 입자인 Fe를 섬유상으로 만든 경우에는 結晶磁器異方性보다 形狀磁氣異方性이 크게 나타나며, 이 경우에는 보자력은 부피분율로 정의되는 충진률, P에 의해 변하게 되는데, 입자상호작용에 의해 P가 클수록 보자력은 감소한다.

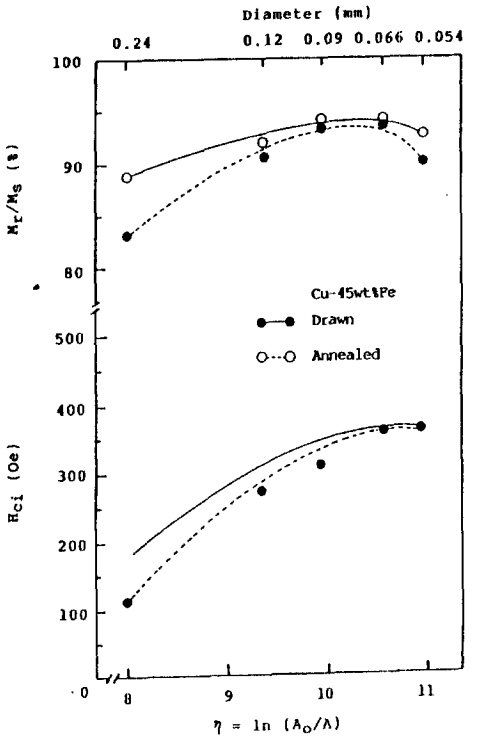


Fig.5. Intrinsic coercivity and remanence to saturation ratio of in situ Cu-45 wt%Fe wire composites as a function of $\eta=\ln(A_o/A)$.

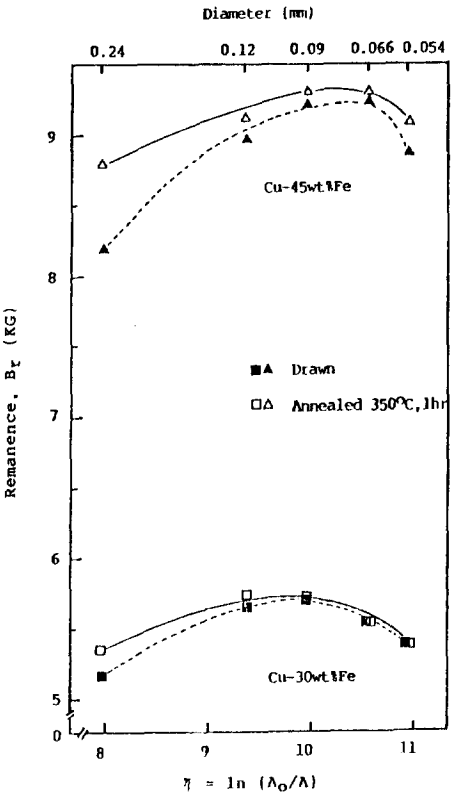


Fig.6. Remanence of in situ Cu-Fe wire composites as a function of $\eta=\ln(A_o/A)$.

$$H_{ci}(P) = H_{ci}(0)(1-P) \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서 $H_{ci}(0)$는 고립된 입자의 보자력이다.

신장된 입자의 形狀磁氣異方性에 의한 보자력은 다음 식으로 계산된다.

$$H_{ci} = (N_a - N_c)M_s \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 N_a는 단축에서의 反磁場 계수이며 N_c는 장축에서의 反磁場 계수이다.

본 실험에서와 같이 높은 가공도에 의해 강자성 입자인 Fe를 미세한 섬유상으로 만든 경우에는 축비, c/a가 무한히 크므로 $N_a - N_c$는 2π가 된다. 따라서 식(1)과 (2)를 종합하면 다음과 같다.

$$H_{ci}(p) = 2\pi M_s(1-p) \quad \cdots\cdots (3)$$

따라서 Fe함량이 클수록 보자력은 직선적으로 감소된다.

가공도의 증가에 따라 보자력이 증가되는 것은 가공도가 클수록 섬유상이 미세화되어 單磁區粒子의 크기에 도달하기 때문이고, 角形性의 향상은 가공도의 증가에 따라 섬유상의 균일성이 좋아지기 때문이다. 그러나 더 높은 가공도에서는 다시 보자력이 감소되는데 이 이유는 임계입자크기 이하에서는 열에너지에 의해 입자의 magnetic moment는 불규칙적인 배열을 하기 때문이다.

가공도가 높을수록 角形性이 개선되는 이유는 가공방향으로 형성되는 1軸 磁氣異方性이 커지기 때문이다.

또한 어닐링에 의해 자기적 특성이 개선된 것을 알 수 있는데, H_{ci}가 증가되는 것은 어닐링에 의해 미세한 Fe섬유상내에 고용되어 있는 Cu가 석출되고, 또한 반복된 가공과 어닐링에 의해 Cu 석출입자가 성장함에 따라 Fe상이 분리되어 單磁區化가 촉진될 뿐만 아니라, Fe섬유조직이 가공에 의해 리본형상으로 변화되어 있으므로

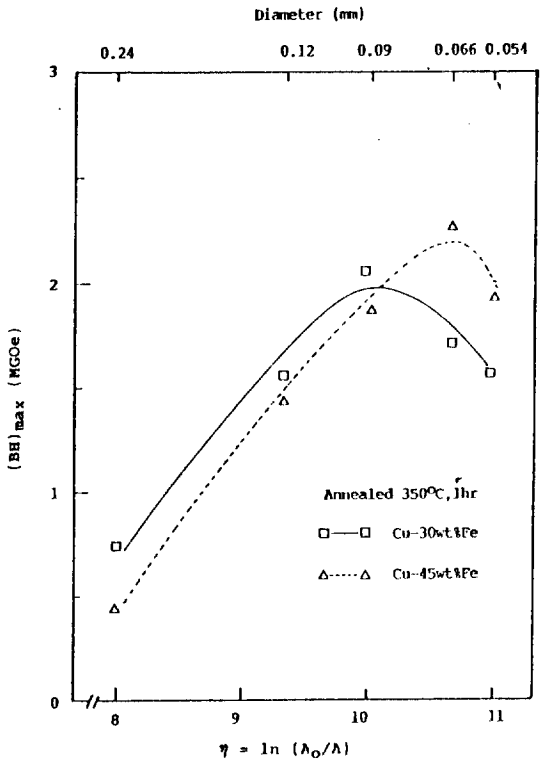


Fig.7. $(BH)_{max}$ of in situ Cu-Fe wire composites as a function of $\eta=\ln(A_0/A)$.

shape instability가 대단히 크기 때문에 어닐링을 할 때 이 계면의 직선화가[17] 일어나기 때문이라 생각된다. M_r/M_s가 개선되는 것은 가공한 후 중간 어닐링을 할 때 가공성이 좋아져서 섬유상의 균일성이 개선되기 때문이라 생각된다.

Fig.6은 Cu-30, 45 wt%Fe합금을 여러가지 가공도로 인발한 시편의 B_r값과 350℃에서 1시간 동안 어닐링하였을 때의 B_r값의 변화를 비교하여 나타내었다. Cu-45 wt%Fe의 경우가 Cu-30 wt%Fe보다 높은 값을 가지고 있으며, 어닐링에 의해 B_r값을 향상시킬 수 있었다. 이와같이 가공도가 높을수록 B_r값이 개선되는 것은 가공에 따른 가공방향으로의 1軸 形狀磁氣異方性이 점차 커지기 때문이다. Cu-30 wt%Fe의 경우에는 0.09 mmϕ까지 가공한 후 어닐링하였을 때 가장 우수한 B_r값을 가졌으며, Cu-45 wt%Fe의 경우에는 0.066 mmϕ까지 가공한 후 어닐링하였을 때 나타났다.

Cu-30, 45 wt%Fe합금을 여러가지 가공도로 인발한 후

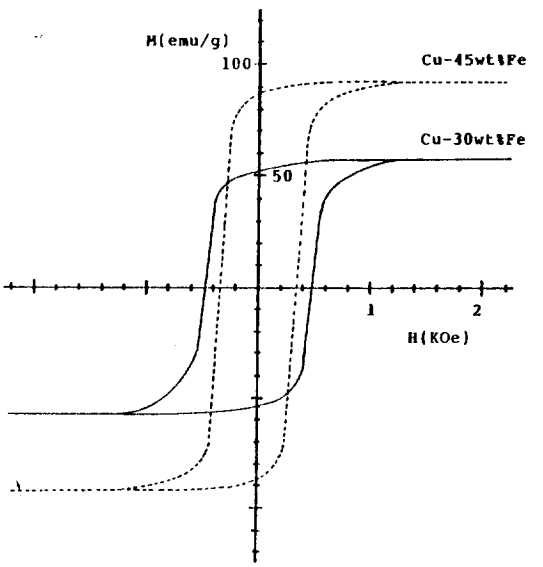


Fig.8. Hysteresis loops of optimally annealed Cu-30 wt%Fe, 0.09 mmϕ and Cu-45 wt%Fe, 0.066 mmϕ wire.

350℃에서 1시간 동안 어닐링한 시편의 $(BH)_{max}$를 Fig.7에 나타내었다. Cu-30 wt%Fe에서는 가공도에 비례하여 증가하다가 0.09 mmϕ에서 최대값을 가진후 더 높은 가공도에서는 다시 저하되었고, Cu-45 wt%Fe의 경우에는 0.066 mmϕ에서 최대값을 가진후 0.054 mmϕ에서는 다시 저하되었다. 이와같이 가공도에 비례하여 $(BH)_{max}$가 증가하는 이유는 多磁區粒子는 磁壁移動에 의해 자화되므로 강자성입자의 크기에 반비례하여 H_{ci}가 증가하다가 單磁區粒子가 되는 임계크기에서 최대로 되며 또한 가공도의 증가에 따라 角形性이 좋아지기 때문이다. 그러나 더 높은 가공도에서는 섬유상이 더욱 미세화되어 열효과에 의해 다시 $(BH)_{max}$는 저하하게 된다. 또한 Fe 성분변화에 따라 임계점이 나타나는 가공도가 다른데 이것은 Photo.1에서 알 수 있는 바와 같이 Fe함량이 높을수록 Fe입자가 조대화되어 있기 때문에 單磁區粒子크기로 미세화시키기 위해서는 더 많은 가공이 필요하기 때문이다.

Fig.8은 각 조성에서 가장 우수한 자기적특성을 나타내는 시편의 M-H곡선을 나타낸 것으로서 Cu-30 wt% Fe에서는 0.09 mmϕ까지 가공한 후 350℃에서 1시간 동안 어닐링한 경우로서 H_{ci}는 451 Oe, M_r/M_s는

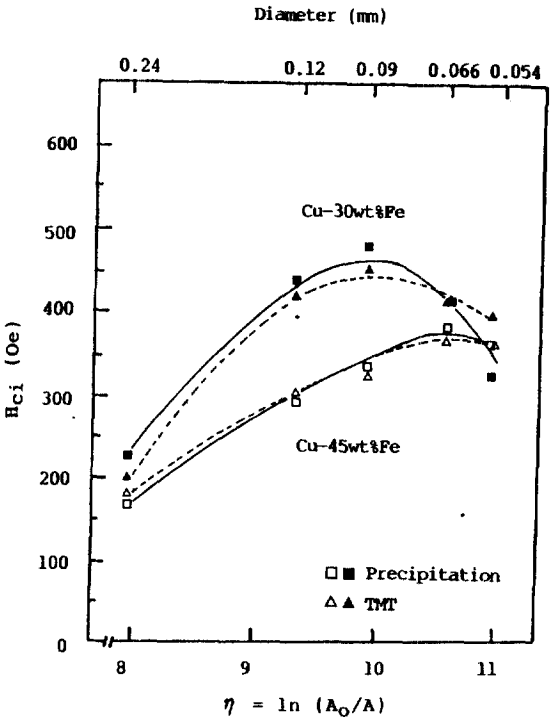


Fig.9. Intrinsic coercivity of in situ Cu-Fe wire composites as a function of $\eta=\ln(A_O/A)$.

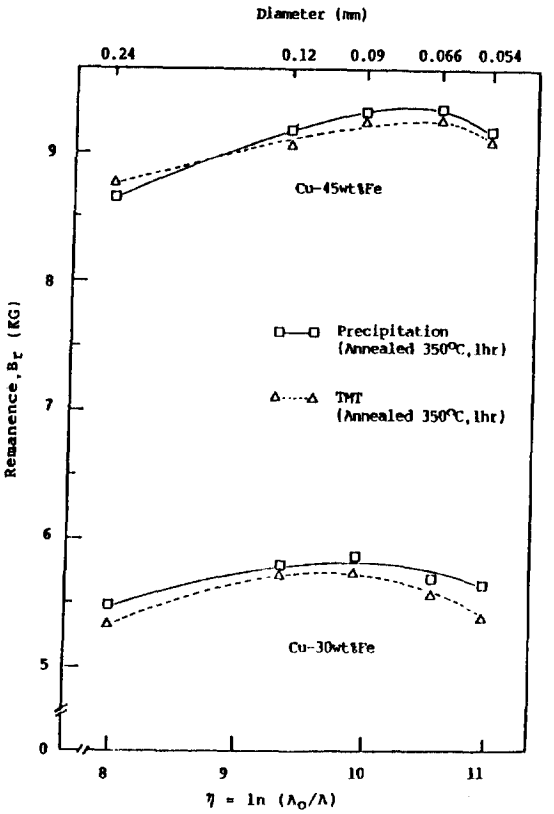


Fig.10. Remanence of in situ Cu-Fe wire composites as a function of $\eta=\ln(A_O/A)$.

90.4%이며 B_r은 5.74 KG로 나타났으며, Cu-45 wt%Fe에서는 Cu-45 wt%Fe에서는 0.06 mmϕ까지 가공한 후 어닐링한 경우로서 H_{ci}는 370 Oe, M_r/M_s은 93.8%이며, B_r은 9.27 KG로 가장 우수한 자기적 특성을 나타냈다.

이상에서 보고한 Cu-30, 45 wt%Fe합금에 대한 가공열처리와 前報의 석출열처리를 하였을 때의[11] 가공도에 따른 H_{ci}를 비교하여 Fig.9에 나타내었다. Cu-30 wt%Fe의 경우에는 0.09 mmϕ까지는 가공도가 클수록 H_{ci}가 증가되었으며, 그 이상의 가공도에서는 다시 저하되었다. 가공열처리한 경우의 H_{ci} 최대값은 0.09 mmϕ에서 451 Oe였고 석출열처리한 경우도 마찬가지로 0.09 mmϕ에서 480.4 Oe의 최대값을 가졌다. 그리고 Cu-45 wt%Fe합금에서는 0.066 mmϕ까지는 가공도가 클수록 H_{ci}가 증가되다가 0.054 mmϕ에서는 다시 감소되었으며 가공열처리한 경우의 최대값은 370 Oe로 나타났으며, 석출열처리한 경우에는 382.0 Oe 였다. Cu-30, 45%Fe 공히 석출열처리한 경우가 가공열처리보다 높은 H_{ci}를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig.10은 두 가지 합금을 여러가지 가공도로 인발한 후 350℃에서 1시간 동안 어닐링했을 때의 B_r값을 前報의 석출열처리법과[11] 비교하여 나타내었다. Fe함량에 관계없이 석출열처리한 경우가 가공열처리한 것보다 높은 B_r값을 가지고 있음을 알 수 있다. 가공열처리한 Cu-30 wt%Fe는 0.09 mmϕ에서 Br값이 5.74 KG로 나타났으며, Cu-45 wt%Fe는 0.066 mmϕ에서 9.27 KG로 나타났다. 그리고 석출열처리한 Cu-30 wt%Fe는 0.09 mmϕ에서 B_r값이 5.86 KG로 가장 높았고, Cu-45 wt%Fe는 0.066 mmϕ에서 9.35 KG로 나타났다.

이상과 같이 석출열처리와 가공열처리를 비교해 본 결과 가공열처리한 경우가 석출열처리한 경우보다 열처리 공정은 간단하나, 자기적 성질이 약간 저하되어 있는 것을 알 수 있는데 그 이유로는 가공열처리한 경우

가 모상인 Cu내에 고용된 Fe함량이 석출열처리한 경우보다 높기 때문에 가공경화가 크게 되어 Fe섬유상의 균일성이 저하되기 때문이라 생각된다.

4. 결 론

極細 多纖維狀 복합조직의 제조방법 중에서 공정이 가장 간단하고 대량생산이 용이한 잇점이 있는 in situ 법에 의해 제조한 Cu-Fe 복합재료의 기계적, 전·자기적 특성에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Cu-Fe계 합금의 선재는 Fe함량과 가공도가 클수록 인장강도가 증가하였다.

2) Cu-30 wt%Fe 복합재료의 figure merit는 다른 Cu-Fe계와 6/1 ACSR케이블 및 Cu케이블에 비해 가장 높게 나타났다.

3) Fe함량이 높을수록 보자력은 감소되었으나, 角形性은 현저하게 증가되었다. 가공도가 클수록 보자력 및 角形性이 증가되었으나, Cu-30 wt%Fe는 0.09 mmϕ일 때, Cu-45 wt%Fe는 0.066 mmϕ에서 각각 최대값을 가진 후 다시 저하되었다.

4) Cu-Fe계 선재에서 석출열처리한 경우가 가공열처리보다 자기적 성질이 우수하였고, 가공후 어닐링을 하므로써 보자력, 잔류자속밀도 및 角形性이 향상되었다.

「후 기」

본 연구는 한국과학재단 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. E.C. Stoner, E.P. Wohlfarth, Phil. Trans. Roy. Soc. A 240 (1948) 559.
2. F.E. Luborsky, T.O. Paine, L.I. Medelsohn, Powder Metallurgy 4 (1959) 57.
3. D.G. Howe, J.L. Francavilla, D.V. Gibser, IEEE Trans. on Magnetics MAG-13 (1977) 15.
4. R. Flükiger, R. Akihama, S. Foner, E.J. McNiff, Jr and B.B. Schwartz, Appl. Phys. Lett.35 (1977) 810.
5. J.D. Verhoeven, E.D. Gibson, F.A. Schmidt, D.K. Finnemore, J. Mater, Sci.15 (1980) 1449.
6. Ostenson, D.K. Finnemore, Adv, Cry. Eng.28 (1982) 501.
7. R. Roberge, J.L. Fihey, IEEE Trans. on Magnetics MAG-15 (1979) 818.
8. R. Bormann, H.C. Freyhardt, H. Bergmann, Appl. Phys Lett.35 (1980) 944.
9. K. Hemachalam and M.R. Pickus, J. of the Less Common Metals 46 (1976) 297.
10. J. Bevk, M. Tinkham, F. Habbal, C.J. Lobb and J.P. Harbison, IEEE Trans. Mag-17 (1981) 235.
11. 서수정, 박현순, 열처리공학회지 2 (1989) 38.
12. R.W. Kraft, U.S. Patent No.3129952 (1968).
13. W.F. Hosford, Jr. Trans. Metall. Soc. AIME 230 (1964) 12.
14. 本村, 日本金屬學會誌 4 (1965) 51.
15. R.A. Wolfe, H.W. Paxton, Trans. AIME 230 (1964) 1426.
16. E.Hornbogen, H.P. Jung, Z. Metall. 55 (1964) 691.
17. M. McLean, Mat. Sci. 12 (1978) 113.