

Ni-Fe-Co 박막도금층의 조성, 우선배향 및 자기적 성질

예길촌, 김선윤, 문근호, 김용웅

영남대학교 금속공학과

Composition, preferred orientation and magnetic properties of Ni-Fe-Co alloy electrodeposits

G. C. Ye, S. Y. Kim, G. H. Moon, and Y. W. Kim

Dept. of Metallurgical Eng. Yeungnam Univ., 713-749, KOREA

Abstract

The effect of electrolysis conditions on the composition, the magnetic properties and the preferred orientation of Ni-Fe-Co alloy deposits was investigated using the sulfate-chloride bath paddle agitated. Cathode current efficiency increases with the current density, showing the different tendency of the variation from that of the Ni-Fe electrodeposits. The Co content of the deposits decreases with increasing current density, while the content of Ni and Fe is shown to be minimum or maximum at $3A/dm^2$ respectively. The Ni/Fe ratio of the alloy deposits is lower than that of Ni-Fe deposits. The coercive force(H_c) of the deposits increases with the Co content in deposit, showing the relatively low value in the range of 1.8~5.0Wt.% Co. The anisotropy field(H_k) of the deposits is higher than that of Ni-Fe alloy deposits. The preferred orientation of the deposits is generally (200), but the orientation factor(R) changes with both the increase of current density and the magnetic field applied during deposition.

1. 서 론

Ni-Fe 박막도금층의 연자성에 미치는 As, Mo 및 P 등 제 3원소의 첨가영향에 대한 연구가 이루어져 왔다^{1, 4)}. Freitag 등^{1, 2)}은 Ni-Fe 합금에 As 또는 Mo를 공석시킴으로써 합금층의 이방성자기장(H_k) 및 보자력(H_c)이 낮아짐을 조사하였으며 자기적 성질이 전해조건의 제어에 의하여 개선될 수 있음을 발표하였다. 또한 Ni-Fe 합금에 Co를 미량 첨가함으로써 합금박막의 보자력이 저하됨을 발표한 바³⁾ 있으나 다양한 전해조건(전해액, 전류

밀도 및 자장부가등)의 변화에 따른 Ni-Fe-Co 합금박막의 조성 및 우선배향의 변화에 대한 연구는 부족한 실정이다. Ye 등은 최근에 사용된 바 있는 황산-염화물 욕⁶⁾을 사용하여 Ni-Fe 합금박막의 조성 및 우선배향에 미치는 전해조건의 영향을 연구한 바 넓은 전류밀도 범위에서 합금조성이 일정하게 유지되는 결과를 조사하였다⁷⁾. 그러나 황산-염화물 욕으로 전해된 Ni-Fe-Co 3원합금의 조성, 우선배향과 자기적 성질에 미치는 전해조건의 영향에 대한 연구는 이루어지지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 황산-염화물 욕을 사용하여 전

해조건(액 중의 Co함량, 전류밀도 및 자장부가)의 변화에 따른 Ni-Fe-Co 3원합금박막의 조성, 우선배향 및 자기적 성질을 조사하여 이들 성질에 미치는 전해조건 및 Co첨가의 영향을 연구함을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

Ni-Fe-Co 합금박막의 전해액은 황산-염화물 용을 사용하였으며 그 조성과 전해조건은 Table 1과 같다. 전해액 중의 Co함량을 Co/Ni 무게비율로써 0.5~4.0% 범위에서 변화시키고 전류밀도는 1~7A/dm²범위로 변화시켜 3 μ m 두께의 합금박막을 전해하였다. 전해장치는 Ye등의 선행연구⁶⁾와 같이 2.0 l 용량의 아크릴 전해조 및 Paddle 교반장치를 사용하여 20cm/sec의 선속도로 왕복운동시켜 교반하였다. 음극전류효율은 일정시간 전해한

Table 1. Composition of bath and electrolysis condition

Composition (g/L)	NiSO ₄ ·6H ₂ O	:	105
	NiCl ₂ ·6H ₂ O	:	60
	FeSO ₄ ·6H ₂ O	:	12.44 (2.5g-Fe)
	CoSO ₄ ·7H ₂ O	:	0.9~7.3
	H ₃ BO ₃	:	25
	Citric acid	:	0.6
	Saccharin	:	4.0
	Electrolysis Condition	PH	:
Temp.		:	53°C
Current density		:	1~7A/dm ²
Cathode		:	Cu-sheet
Anode		:	Ni-sheet
Electrode distance		:	5.5cm
Electrode area		:	4×4cm
Paddle speed		:	20cm/sec

합금층의 무게와 그 조성분석치를 사용하여 계산하였다. 합금층의 조성은 I. C. P(LAB-TAM 8440)를 사용하여 분석하였으며, 3개의 시편에 대한 평균치로 조성을 결정하였다. 또한 합금층의 우선배향은 X-선 회절장치(CuK α)를 사용하여 결정 격자면들의 적분강도를 측정후 집합조직계수로 환산하여 결정하였다. 합금층의 연자성(보자력 및 이방성자기장)은 V. S. M.을 사용하여 B-H곡선으로부터 측정하였다. 이방성자기장 측정은 300 Oe의 외부자장을 음극에 나란히 부가하여 전해한 합금박막층을 사용하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3. 1. 음극전류효율 및 합금층의 조성

Ni-Fe-Co 합금 전해시 음극전류효율은 Fig. 1의 결과와 같이 전류밀도가 1~7A/dm²의 저전류밀도에서는 전류효율이 74~80% 범위로 낮은 값을 나타낸 반면에 3~7A/dm²의 전류밀도 범위에

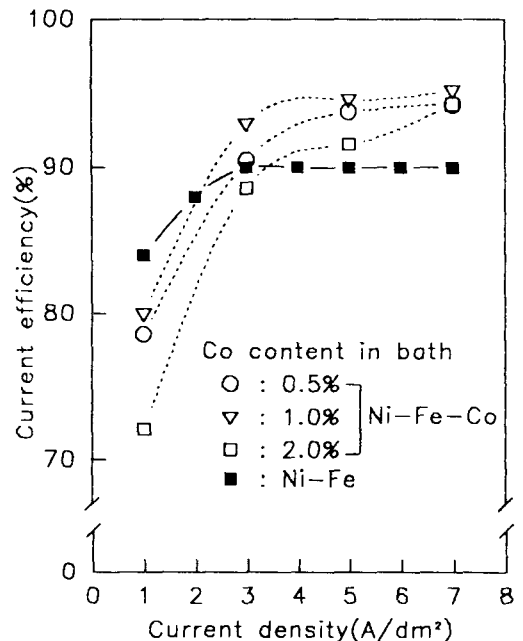


Fig. 1. C. E. (%) vs. Current density.

서는 89~95% 범위로 현저히 증가하였다. Ni-Fe 2원합금의 경우⁷⁾ 전류밀도가 1A/dm²에서 3~7A/dm²으로 증가함에 따라서 전류효율이 84%에서 90%로 약간 증가하고, 특히 3~7A/dm²의 범위에서 전류효율이 거의 일정하게 유지된 결과와 비교하면 Co가 공석된 Ni-Fe-Co 합금의 전류효율은 전류밀도의 증가에 보다 민감한 영향을 받을 수 있으며, 고전류밀도에서는 효율이 현저히 향상된 결과를 나타내었다. 한편 액 중의 Co첨가량의 변화가 전류효율의 변화에 미치는 영향은 본 실험의 첨가량 범위에서는 일정한 경향을 나타내지 않았다.

전류밀도의 변화에 다른 Ni-Fe-Co 합금층의 조성변화는 Fig. 2의 결과와 같다. 합금층의 Co함량은 전류밀도가 1~7A/dm²범위에서 증가함에 따라서 완만히 감소하였다. 이 결과는 Co성분의 전착이 물질이동에 의해 울속되고 따라서 전류밀도의 증가 또는 확산과전압이 증가됨에 따라서 음극에

Co이온의 공급이 부족하게 된 데 기인한 것으로 판단된다. B. Lehman등¹⁰⁾은 Ni-Fe 합금전착의 경우 니켈 및 철이온의 전착이 각각 활성 또는 물질이동울속에 의해 진행됨을 발표한 바 있으며, 본 실험 경우는 전해액 중의 Co함량비에 따라서 합금층의 Co함량이 현저히 증가하여(Fig. 2) Co성분의 전착이 물질이동에 의존함을 나타내었다.

한편 합금층의 Ni 및 Fe함량은 1~3A/dm²범위에서는 각각 감소하거나 증가하였으나 3~7A/dm²의 전류밀도 범위에서는 반대로 증감되는 결과를 나타내어 3A/dm²의 전류밀도에서 각각 최소 및 최대함량을 나타내었다. Dahms등¹¹⁾은 Ni-Fe 합금전해시 음극표면에 수소개스 발생이 증가함에 따라서 극부적 pH상승이 이루어지고 따라서 철수산화물층이 음극 인근에 형성됨으로써 니켈이온의 전착이 억제되는 반면에 철이온의 환원이 증가되어 이상형 합금전착(Anomalous codeposition)현상이 이루어짐을 해석하였다. 본 Ni-Fe-Co 합금의 조성변화도 위의 해석에 대체로 부합되었다. 저전류밀도(1A/dm²)에서 합금의 Fe 및 Ni함량이 각각 감소 또는 증가한 결과는 낮은 전류밀도에서 음극 표면 인근의 pH상승이 미소하여^{11, 12)} 철수산화물의 형성이 현저히 억제됨으로써 Ni이온의 전착이 증가되고 동시에 철이온의 전착은 보다 감소된 것으로 해석된다.

또한 전류밀도가 3~7A/dm²범위에서 증가됨에 따라서 Ni 및 Fe의 함량이 각각 증감한 결과는 음극전류효율(Fig. 1)이 전류밀도에 따라서 향상되고 따라서 수소발생이 감소됨으로써 음극부위의 pH상승이 미소하게 되어 철수산화물층의 형성이 저지된데 기인한 것으로 판단된다. Ni-Fe 합금의 경우⁷⁾ 저전류밀도에서는 Fe함량이 감소하였고, 반면에 3~7A/dm²의 증가된 전류밀도 범위에서는 음극전류효율이 90% 정도로 일정하고 동시에 Fe함량이 20% 정도로 일정하게 유지된 결과를 나타내어 Fe조성이 전류효율과 밀접한 연관성이 있음을 조사한 바 있다. Ni-Fe-Co 합금의 Ni/Fe 조성비는

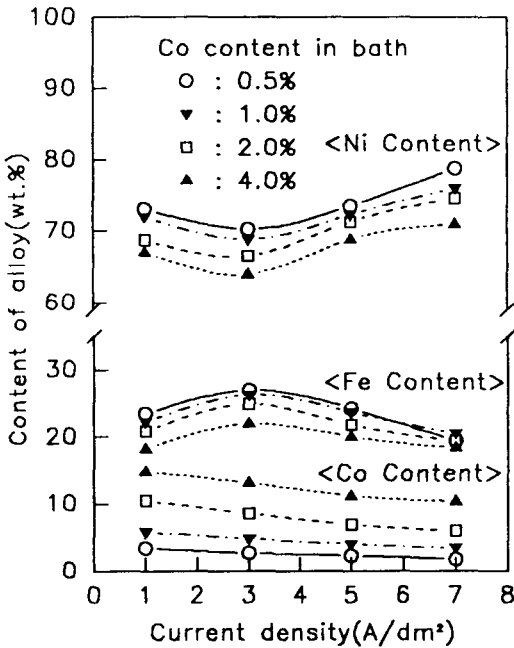


Fig. 2. Content of Ni-Fe-Co alloys vs. current density.

Fig. 3과 같이 3A/dm²의 전류밀도에서 2.6~2.9 범위로 최소값을 나타내고 전류밀도가 3A/dm²전 후로 감소 또는 증가함에 따라서 그 비율은 3.1~4.0범위로 증가하였다. Ni-Fe 합금의 경우⁷⁾는 3~7A/dm² 범위의 전류밀도에서 Ni/Fe 비가 3.6~3.8 정도로 일정하게 유지된 결과와 비교하면 본 Ni-Fe-Co 합금의 Ni/Fe 비는 대체로 보다 감소되었으며 그 변화경향도 상이하였다.

따라서 Ni-Fe-Co 합금에 Co성분의 공석은 합금층의 Ni/Fe 조성비를 감소시키거나 Fe함량을 보다 증가시킴을 알 수 있었다. Freitag등⁸⁾은 Ni-Fe-As 합금층의 경우 전류밀도가 감소하거나 As 함량이 증가됨에 따라서 Ni/Fe비가 감소됨을 발표한 바 있어 본 실험결과도 대체로 이에 유사한 경향임을 알 수 있었다.

전해액 중의 Co함량(Co/Ni비)에 따른 합금조성의 변화는 Fig. 4a의 결과와 같이 Co함량이 0.5%에서 4.0%로 증가함에 따라서 Co함량은 1.8~3.4

%에서 10.4~15% 범위로 현저히 증가하였다. 동시에 Ni 및 Fe함량은 각각 유사한 비율로 감소하여 Co성분의 증분에 상응함을 알 수 있었다.

또한 합금층의 Co/Ni 비는 Fig. 4b와 같이 전해액의 Co함량에 비하여 현저히 증가하여 Co성분의 전착이 Ni의 경우에 비하여 보다 촉진됨을 알 수 있었다.

한편 전해액의 Co함량에 따른 Ni-Fe-Co 합금층의 Ni/Fe 비는 Fig. 4c의 결과와 같이 거의 일정하게 유지되었으며, Ni-Fe 이원합금의 조성비에 비하여 다소 감소됨을 알 수 있었다. 이 결과는 전류밀도에 따른 Ni/Fe 비의 변화결과(Fig. 3)와 더불어 Ni-Fe-Co 합금의 Co공석이 합금층의 Fe함량을 Ni-Fe 이원합금의 경우에 비하여 다소 증가시킴을 나타내고 있다. 따라서 Co성분의 공석이 Ni-Fe 합금의 이상형전착을 보다 조장시킴을 본 연구에서 알 수 있었다.

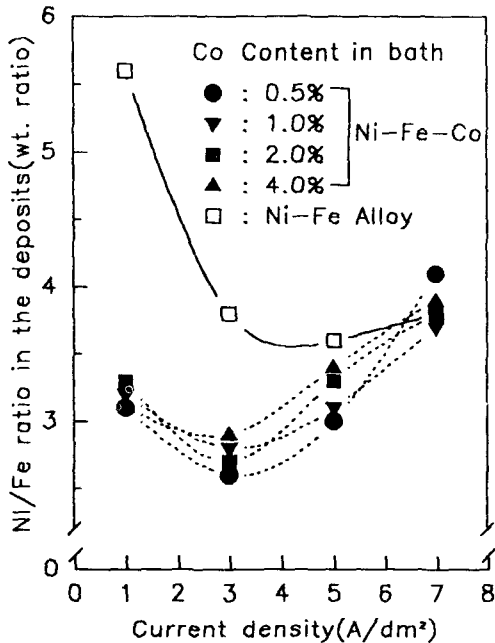


Fig. 3. Ni/Fe ratio in Ni-Fe-Co deposits vs. current density.

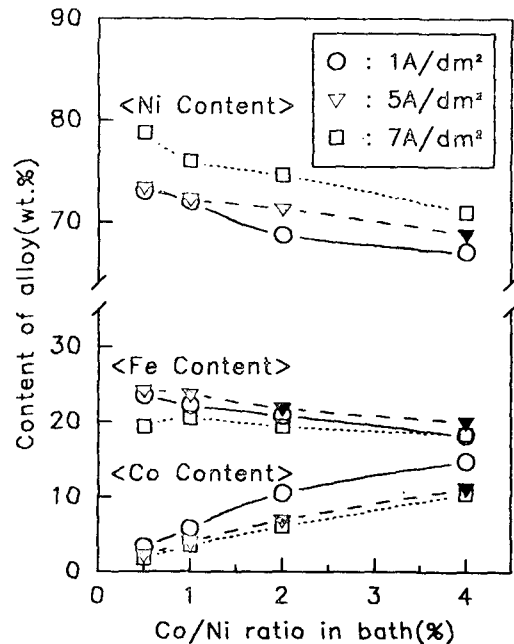


Fig. 4a. Content of Ni-Fe-Co alloy deposits vs. Co Content in bath.

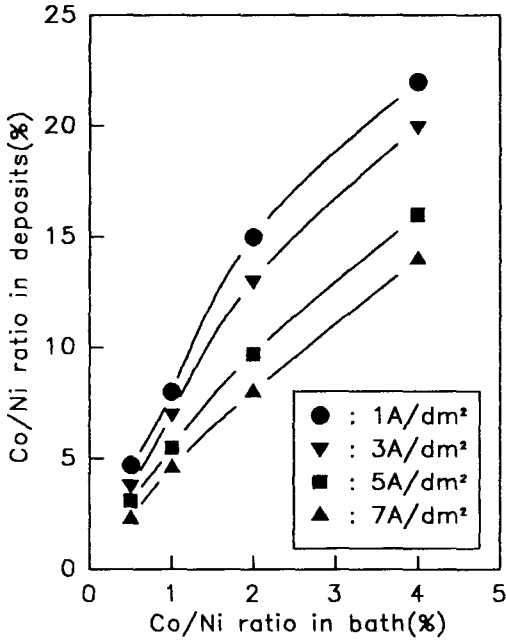


Fig. 4b. Co/Ni ratio in deposits vs. Co/Ni ratio in bath.

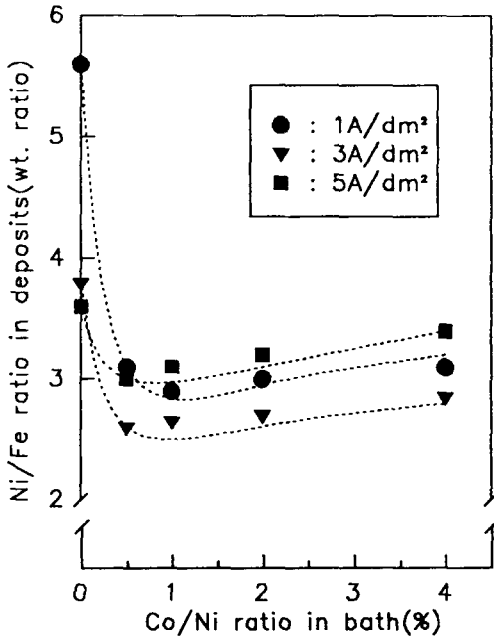


Fig. 4c. Ni/Fe ratio of Ni-Fe-Co alloy deposits vs. Co content in bath.

3. 2. 합금박막의 보자력 및 이방성자기장

Ni-Fe-Co 합금박막의 보자력(H_c)은 Table 2 및 Fig. 5의 결과와 같이 합금의 Co함량에 따라서 주로 변화되었으며 Ni/Fe비 또는 Fe함량의 변화에는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. Co함량이 1.8~5.0% 범위에서 보자력은 0.8~1.2 Oe 범위로 낮은 값을 나타내었으며 그 함량이 5.8~10.5% 범위로 증가됨에 따라서 1.8~6.0 Oe 범위에서 현저히 증가하였다. 따라서 20~22% Fe함량의 Ni-Fe 합금의 보자력이 0.6~0.9 Oe인 선행 연구 결과⁸⁾와 비교하면 Ni-Fe 합금에 Co를 공석 시킴으로써 보자력을 더 감소시키는 효과는 얻을 수 없었다. 한편 외부자장(300 Oe)을 부가하여 전해한 합금의 보자력도 자장을 부가하지 않는 경우와 동일한 변화경향을 나타내었으나 자화용이방향(Easy axis)의 H_c 값이 자화곤란방향(Hard axis)의 값보다 다소 감소된 결과를 나타내었다.

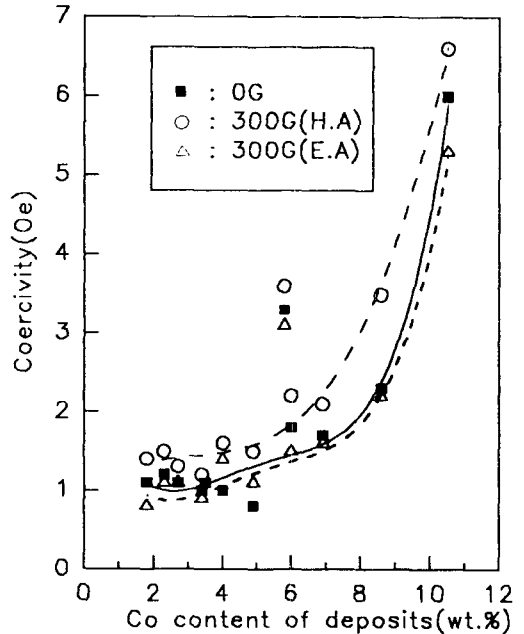


Fig. 5. Coercivity of Ni-Co deposits vs. Co content of the deposits.

Table 2. Coercivity and anisotropy field of Ni-Fe-Co alloy deposits according to electrolysis conditions

C. D (A/d m ²)	Ni-Fe-Co															Ni-Fe				
	Co/Ni ratio in bath(wt.%)																			
	0.5					1.0					2.0									
	0G			300G		0G			300G		0G			300G		0G			300G	
Fe(%) Co(%)	Ni/Fe	Hc (Oe)	Hc(E. A) Hc(H. A)	Hk	Fe(%) Co(%)	Ni/Fe	Hc (Oe)	Hc(E. A) Hc(H. A)	Hk	Fe(%) Co(%)	Ni/Fe	Hc (Oe)	Hc(E. A) Hc(H. A)	Hk	Fe(%) Co(%)	Ni/Fe	Hc (Oe)	Hc(E. A) Hc(H. A)	Hk	
1	23.5 3.4	3.1	1.0	0.9 1.2	18	22 5.8	3.2	3.3	3.1 3.6	25	20.8 10.5	3.3	6.0	5.3 6.6	36	15	5.6	5.7	4.5 5.5	34
3	27 2.7	2.7	1.1	1.1 1.3	23	26.3 4.9	2.8	0.8	1.1 1.5	20	24.9 8.6	2.7	2.3	2.2 3.5	34	21	3.8	0.6	0.5 0.8	15
5	24.2 2.3	3.0	1.2	1.1 1.5	20	23.7 4.0	3.1	1.0	1.4 1.6	21	21.8 6.9	3.3	1.7	1.6 2.1	24 3	22	3.6	0.8	0.7 0.8	20
7	19.4 1.8	3.8	1.1	0.8 1.4	18	20.5 3.5	3.7	1.1	-	-	19.4 6.0	3.8	1.8	1.5 2.2	23	21	3.8	0.9	0.6 0.9	16

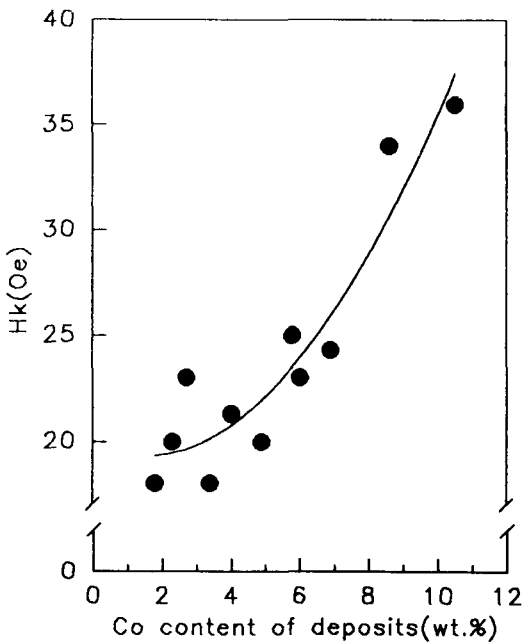


Fig. 6. Anisotropy field vs. Co content of Ni-Fe-Co alloy deposits.

T. Osaka 등¹³⁾은 Co기 연자성박막 전착층의 경우 자장부가에 의해 자화용이방향의 H_k값이 보다 저하됨을 조사한 바 있다. Ni-Fe-Co 합금층의 이방성자기장(H_k)은 Fig. 6과 같이 Co함량이 1.8~6.9% 범위에서는 18~25 Oe 범위로 완만하게 증가하였으나 Co함량이 8.0~10.5%로 증가함에 따

라서 34~36 Oe 범위로 현저히 증가하여 이방성 자기장이 합금층의 Co함량에 의존됨을 알 수 있었다. 따라서 Ni-Fe-Co 3원합금의 H_k값은 21% Fe조성의 Ni-Fe 합금의 경우(15~20 Oe)와 비교하여 다소 증가된 결과를 나타내었다.

한편 Ni-Fe-As 합금층의 경우²⁾ As공석량이 증가함에 따라서 H_k값이 감소하다가 다시 증가되는 결과였으며 Co-Fe-Cu 합금의 경우는 Cu공석에 의해 H_k값이 증가되고 H_k값이 13~18 Oe 범위에서도 박막헤드용으로 충분한 투자율이 유지됨을 발표하였다¹⁴⁾. Nakamura 등¹⁵⁾은 합금박막의 H_k값이 증가함에 따라서 자벽구조의 안정성과 재현성을 향상시키나 투자율이 감소되므로 적정한 H_k값이 존재함을 제시하였다. 본 합금의 H_k값과 투자율의 상관관계는 앞으로 더 조사해야 할 과제라고 생각된다.

3. 3. 합금박막의 우선배향

Ni-Fe-Co 합금층의 우선배향은 Table 3 및 Fig. 7과 같이 대체로 (200)우선배향을 형성하였으나 전류밀도 및 자장등 전해조건에 따라서 (200) 및 (111)의 T. C값의 비, 즉 우선배향인자(R)의 값이 다소 변화되는 결과를 나타내었다. 합금층의 R값은 Fig. 7과 같이 전류밀도가 1~7A/dm² 범

Table 3. Texture coefficient of Ni-Fe-Co alloy deposits according to the electrolysis condition
(R : T. C. of (200)/T. C. of (111))

C. D (A/d m ²)	Crystal plane	Ni-Fe-Co												Ni-Fe			
		Co/Ni ratio in bath(wt.%)															
		0.5				1.0				2.0							
		0G		300G		0G		300G		0G		300G		0G		300G	
	T.C	R	T.C	R	T.C	R	T.C	R	T.C	R	T.C	R	T.C	R	T.C	R	
1	(111)	1.3	2.1	1.3	2.1	1.5	1.7	1.2	2.3	1.1	2.7	1.0	3.0	1.6	1.5	1.5	1.7
	(200)	2.7		2.7		2.5		2.8		2.9		3.0		2.4		2.5	
3	(111)	1.3	2.1	1.2	2.3	1.5	1.7	1.4	1.9	1.3	2.1	1.3	2.1	1.6	1.5	1.3	2.0
	(200)	2.7		2.8		2.5		2.6		2.7		2.7		2.4		2.7	
5	(111)	1.6	1.5	1.5	1.7	1.6	1.5	1.5	1.7	1.7	1.3	1.4	1.9	1.8	1.2	1.5	1.7
	(200)	2.4		2.5		2.4		2.5		2.3		2.6		2.2		2.5	
7	(111)	1.6	1.5	1.5	1.7	1.6	1.5	1.5	1.7	2.0	1.0	1.7	1.3	1.7	1.3	1.5	1.7
	(200)	2.4		2.5		2.4		2.5		2.0		2.3		2.3		2.5	

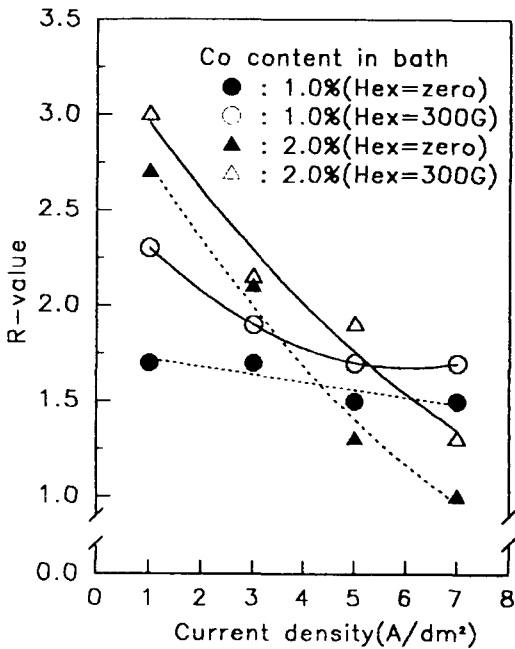


Fig. 7a. R-value vs. current density.

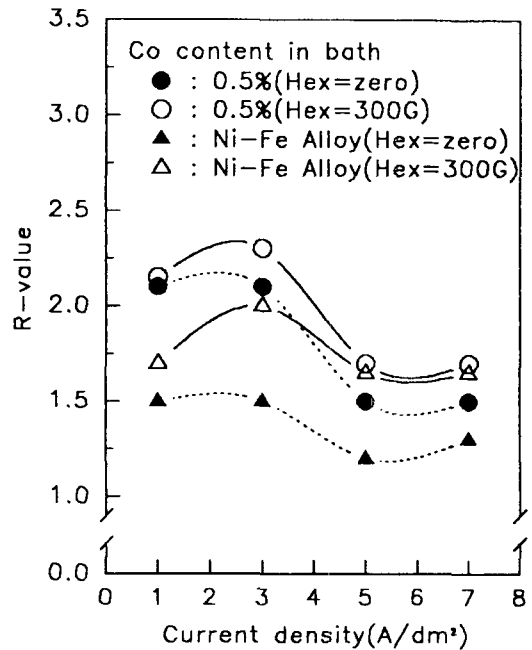


Fig. 7b. R-value vs. current density.

위에서 증가함에 따라서 감소되고 따라서 (200) 우선배향에 (111) 집합조직의 혼성비율이 다소 증가됨을 알 수 있었다. 이 결과는 fcc 구조를 갖는 전착층의 우선배향이 음극과전압의 증가에 따라서 (110)→(200)→(111)과 같은 순서로 변화됨을 해석한 Lee 등의 제안⁶⁾에 대체로 부합되었

다. 왜냐하면 본 합금의 전해시 전류밀도의 증가에 따른 증가된 음극과전압의 조건은 합금의 우선배향이 (200)에서 (111) 우선배향으로 변화되는 천이영역이라 생각되기 때문이다. 또한 전해액 중의 Co 함량이 0.5%에서 2.0%로 증가됨에 따라서 전류밀도의 증가에 따른 R값의 감소비율

은 보다 증가되었으며 특히 Co함량이 2%인 조건에서는 R값이 2.7에서 1.0으로 감소하여 전착층의 우선배향이 (200)으로부터 (200)+(111)혼합조직으로 변화되었다. 따라서 Co가 공석된 Ni-Fe-Co 합금층의 R값의 감소율이 Ni-Fe 이원합금의 경우⁷⁾에 비하여 다소 증가된 결과를 나타내었다. 이 결과는 Ni-Fe-Co 합금전해시 Co성분의 공석이 Fe성분과 더불어 확산을속됨으로써 전류밀도의 증가에 따른 확산과전압의 증가율이 Ni-Fe합금의 경우보다 증대된데 기인한 것으로 판단된다. Ye등⁸⁾은 과형전류로 전해된 Ni-Fe합금의 경우 off-time의 증가(또는 peak current density의 증가)에 따라서 음극과전압은 증가되고 우선배향은 (200)으로부터 (200)+(111)혼합배향으로 변화됨을 발표한 바 전류밀도의 증가에 따라서 R값이 감소된 본 합금의 실험결과도 이와 유사한 변화경향을 나타냄을 알 수 있었다.

반면에 전해시 외부자장을 부가한 합금층의 R값은 자장을 부가하지 않은 경우에 비하여 다소 증가되어 (200)우선배향의 형성이 보다 촉진된 결과를 나타내었다. 이 결과는 Ni-Fe합금의 경우(Fig. 7-b)와 동일한 변화경향을 알 수 있었다. A. Chiba등^{17, 18)}은 Cu등의 전해시 자장을 부가한 경우 음극과전압이 다소 감소하거나 음극에 물질이동이 증가됨을 발표한 바 있다. 본 합금의 전해경우도 자장의 부가에 의해 음극에 금속이온의 공급이 보다 촉진됨으로써 격자표면에너지가 (111)격자면의 경우보다 큰 (200)격자면의 결정성장이 보다 용이하게 되고 따라서 합금층의 우선배향인자(R)가 다소 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

황산-염화물 전해액을 사용하여 전해한 Ni-Fe-Co 합금박막층의 조성, 자기적 성질 및 우선배향을 연구한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 음극전류효율은 전류밀도의 증가에 따라서 80~95% 범위에서 증가하였으며 넓은 전류밀도 범위에서 전류효율이 거의 일정한 Ni-Fe 2원합금의 경우와 상이한 경향이였다.

2) Ni-Fe-Co 합금층의 Co함량은 전류밀도 증가에 따라서 완만히 감소된 반면에 Ni 및 Fe함량은 3A/dm²의 전류밀도에서 각각 최소 및 최대값을 나타내었다. Co공석에 의해 합금층의 Ni/Fe함량비는 Ni-Fe 2원합금의 경우보다 감소하여 이상형 공석현상이 다소 촉진됨을 알 수 있었다. Ni 및 Fe함량변화는 철수산화물 형성에 의한 이상형합금 전해이론에 대체로 부합되었다.

3) 합금층의 보자력은 합금의 C함량이 증가함에 따라서 증가하였으며 1.8~5.0% 범위에서 최저치(0.8~1.20e)를 나타내었으나 Ni-Fe합금의 경우보다 다소 증가하였다. 또한 자기이방성도 Co함량의 증가에 따라서 증가되었다.

4) 합금층의 우선배향은 대체로 (200)이었으나 전류밀도의 증가에 따라서 우선배향인자(R)가 다소 감소되었으며 자장부가에 의해서 R값은 증가되는 경향이였다. 이 결과는 우선배향 형성에 대한 Lee등의 해석에 대체로 부합됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. W. O. Freitag and J. s. Mathias : J. Electrochem. Soc., 112(1965) 64
2. W. O. Freitag, G. DiGuilio, and J. S. Mathis : J. Electrochem. Soc., 113(1966) 441
3. Le Mehaute and E. Rocher : Electroplat. and Met. Finish., 18(1965)300, 308
4. W. O. Freitag, J. S Mathias, and G. DiGuilio : J. Electrochem. Soc., 111(1964) 35
5. S. Firestone : USAEL TR-2477(Aug. 1964) 28pp AD 609829
6. H. H. Law and C. A. Holden : Plat. and Surf. Finish., 79(1992) 80

7. G. C. Ye, Y. W. Kim, and Y. H. Kim : J. Korean Inst. of Surf. Engineering, 27(1994) 319
8. G. C. Ye, Y. W. Kim, and Y. H. Kim : Proc. of RETCAM Meeting on thin film and crystal growth, SNU, (1994) 245
9. B. F. Rothschild and S. Ander : Plating, 56 (1969) 1241
10. E. B. Lehman and A. Riesenkampf : Surf. Technol., 11(1980) 349
11. H. Dahms and I. M. Croll : J. Electrochem. Soc., 112(1965) 771
12. K. Nakamura and T. Hayashi : Plat. and Surf. Fin., 72(1985) 42
13. T. Osaka and T. Homma : Proceed of 2nd Intern. Symp. on Magnetic Materials, Processes and Devices, L. T. Romankiw and D. A. Herman, eds. 92-10, Electrochem. Soc., (1991) 267
14. J. W. Chang, P. C. Andricacos, B. Petek, and L. T. Romankiw : Proc. Symp. on Magnetic Materials, Processes and Devices, 92-10 (1992) 275
15. Y. Nakamura, Y. Yamakama, and S. Iwasaki : IEEE Trans Magn., 21(1985) 1578
16. D. N. Lee and G. C. Ye : Proceed. of a Symp. Sponsored by TMS-AIME, (1981) 493
17. A. Chiba and T. Yamashita : Surface and Coating Technol., 34(1988) 455
18. A. Chiba : 金屬表面技術 : 39(1988) 106