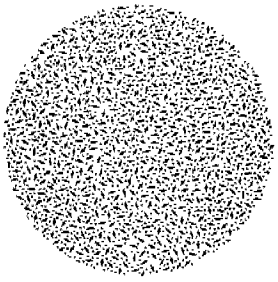
永久磁石의 進步와 現況

Recent Developments in Permanent Magnets



金 明 喆

産業研究院技術情報室

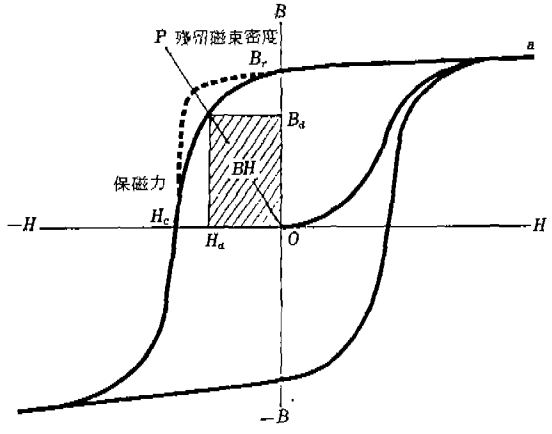
1. 概 說

지금까지의 永久磁石材料로는 알니코系磁石과 바륨페라이트와 같은 세라믹磁石을 그 代表로 들 수 있지만 最近에 들어 높은 에너지積을 目標로 하는 稀土 元素－Co, Fe－Cr－Co, Mn－Al－C 등의 磁石이 登場하였으며 이 分野에 대해서는 研究에서 實用化에 이르기까지 活潑한 進展이 이루어지고 있다.

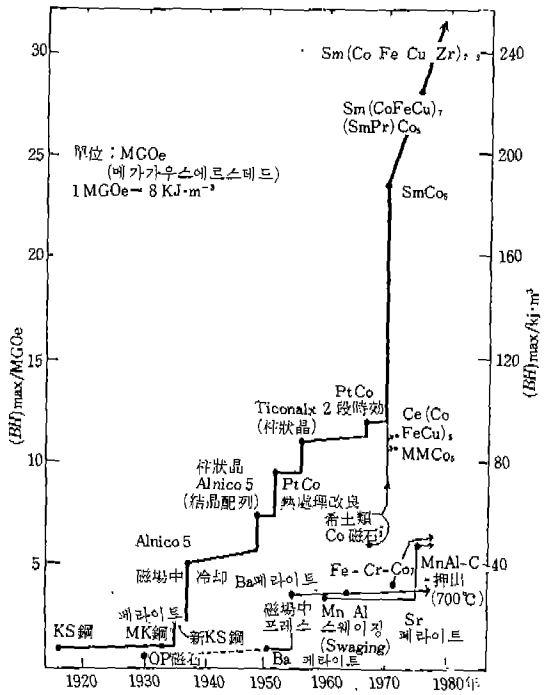
永久磁石은 일반 家電製品을 비롯해 각종 産業用 電子機器에 쓰이는 基幹材料의 하나로서 經濟變動에도 아주 민감한 素材이다. 여러해 전, 世界最大의 코발트産地인 中央아프리카에서의 政情不安으로 原料供給의 不均衡이 생겨 價格이 오르고 이에따라 알니코磁石과 같이 코발트를 쓰는 磁石에서 싼 價格의 原料를 쓰는 페라이트磁石으로 옮아가게 되었고 70年 代 이후로는 美國 및 유럽, 그리고 日本 등에서도 세라믹磁石을 쓰는 비율이 크게 높아지고 있다.

永久磁石의 特性을 나타내는 代表的인 要素는 에너지積인데 이는 磁氣履歷曲線에서의 磁石의 反磁場 Hd와 磁束密度 Bd와의 곱을 뜻한다. 磁石의 性能을 評價하는 데는 最大에너지積 (BH)max을 사용케되며 實用時에는 (BH)max/(單位体積當의 價格)이 중요한 要素가 된다.

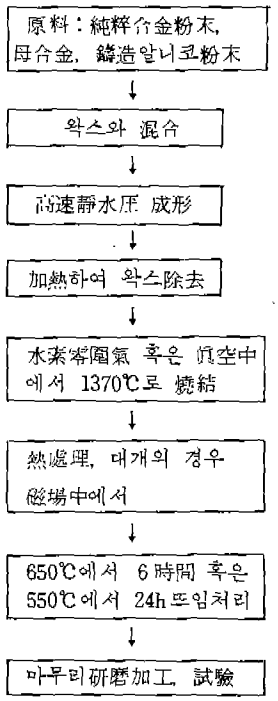
永久磁石의 開發은 (BH)max과 價格의 양면을 고려하여 進行되게 된다.



〈그림－1〉 磁石材料의 B-H 曲線(磁化曲線)



〈그림－2〉 最大에너지積으로 본 永久磁石의 進步



〈그림－3〉 燒結Alnico磁石의 製造工程

2. 燒結 알니코磁石

알니코系 材料는 높은 殘留磁化, 溫度에 대한 安定性 때문에 金屬材料磁石 중에서 가장 오랜 동안 實用材料로서 널리 쓰여 왔다. 알니코磁石은 Al(～8 wt%), Ni(～14wt%), Cu(～3 wt%), Co 등을 포함하는 鐵系 合金材料로서 높은 保磁力을 얻기 위해서는 Ti(～7 wt%), Nb(～1 wt%)를 添加하게 된다. 여기서 코발트는 磁氣 異方性이 우수한 原素로서 凡用 알니코(Alnico 600이나 Alcomax 3 A) 등에는 약 24wt%가 포함되고 高保磁力 磁石(Alnico 2000이나 Hycomax 4)에는 38wt%까지 포함된다. 여기서 코발트는 磁石의 結晶磁氣異方性(合金熔融体를 磁場中에서 冷却시킬 때 선택적인 磁化軸을 갖게하는 能力)을 크게하는 이외에 磁性消滅溫度인 큐리溫度을 높여주는 역할을 한다.

알니코磁石은 보통 鑄造法에 의해 만들게 되며 그 硬度가 매우 높아 機械加工이 힘들고 따라서 精密한 치수를 요구한다거나 形狀이 작고 複雜한 경우에는 製造上의 어려움이 많게 된다.

이같은 問題點을 解決키 위해 燒結磁石이 開發되어 小型磁石을 高速生産(550個/分)할 수 있게 되었다. 이 燒結法은 粉末冶金技術(原料를 熔融 시키지 않고 粒子表面間의 界面에너지를 낮추는 方向으로 固相反應을 일으켜 固結시키는 技術)을 活用한 것으로 燒結時의 收縮 및 磁氣的 性質의 변화에 관련한 Al含量의 調節이 중요한 問題가 된다. 이 原素는 Fe－Al, Co－Al등과 같이 母合金狀態로 쓰이게 된다. 燒結過程은 통상적으로 3段階로 이루어지는

〈표－1〉 알니코 磁石의 特性(異方性磁石)

종 류	殘留磁化 (Br, mT)	保磁力 H_{cJ}, KAm^{-1}	$(BH)_{max}$ KJm^{-3}	保磁力의 機構
				긴 粒子의 形狀異方性
Alnico 37 / 5	1180	49	37	鑄造 | 8 Aℓ, 24Co, 3 Cu, 14Ni, 나머지 Fe
Alnico 34 / 5	1120	48	34	燒結
Alnico 52 / 6	1250	56	52	鑄造, 柱狀
Alnico 38 / 11	800	112	38	鑄造 | 7 Aℓ, 35Co, 3 Cu, 14Ni, 5 Ti, 나머지Fe
Alnico 31 / 11	760	111	31	燒結
Alnico 60 / 11	900	112	60	鑄造, 柱狀

데, 첫째 結合劑를 제거키 위해 豫熱하게 되고, 둘째 이를 1350℃로 燒成해 强度를 갖게하고, 세째眞空이나 還元性 水素零圍氣中에서 冷却시키게 된다. (그림 3)

3. 硬質페라이트

硬質페라이트, 즉 페라이트磁石이라함은 MO－6 Fe_2O_3 ($M=Ba^{2+}$, Sr^{2+})의 組成을 갖는 六方晶系의 마그네토플룸바이트型 構造의 磁石材料를 일컫는 것으로 磁氣異方性定數($BaO-6Fe_2O_3$의 경우 $K_1=3.3\times10^6 erg/cm^3$)가 커서 保磁力 또한 큰 長點을 갖고 있다. 특히 페라이트磁石은 原料가 싸고 구하기 쉬우며 製造가 容易한 편으로 (BH)max / 價格, 즉 Cost Performance가 아주 우수하다. 그러나 酸化物이기 때문에 飽和磁束密度가 작아 殘留磁束密度가 작으며, 또한 알니코磁石에 비해 溫度變化에 대한 特性變動이 큰 결함이 있다. 하지만 保磁力이 稀土類－코발트 磁石 다음으로 크고 應用面에 있어 磁石의 多機能化, 複合化가 가능해 應用分野가 크게 늘고 있다.

페라이트磁石은 그 利用形態에 따라 燒結 페라이트磁石, 페라이트粉体를 고무 또는 플라스틱과 混合해 붙인 고무磁石, 플라스틱본드磁石 등의 複合磁石 등이 있고 이들은 要求에 따라 적합한 性能의 것이 市販되고 있다(표 2).

3. 1 燒結페라이트磁石

燒結페라이트는 原料粉体의 調製, 加圧成型, 加熱燒結 등의 工程을 거치는 粉末治金的 技術을 이용하게 되며 마지막 段階에서는 分極配向處理를 하게 되는데 이는 순간적으로 素材에 强磁場을 걸어 磁石化하는 것을 뜻한다. M형 (Magnetoplumbite Crystal Type) 六方晶페라이트는 C軸이 磁化容易軸으로 페라이트生成反應時 粒成長過程에 있어 C軸이 a軸보다 結晶成長速度가 빨라 C面이 發達한 六角板狀의 微粉子가 얻어지기 쉽다. 이 粉体에 磁場을 가하면 각 粒子들은 c軸으로 整列하게 되고 이같은 配向處理를 하면서 加圧成形하는 方法을 磁場프레스法이라고 한다. 이같이 하여 얻은 成形体를 粒成長이 일어나지 않도록 하면서 燒結하면 燒結後에 結晶粒의 c軸이 일정하게 配列하며 이 異方軸에

〈표－2〉 各種페라이트 磁石의 物性値

磁石의 種類	JIS記號	特徵과組成	殘留磁束密度(kG)	保磁力(kOe)	最大에너지積 $(BH)_{max}$ (MG·Oe)	備考
燒結磁石	MPA100	等方性－Ba	2.0~2.3	1.6~1.9	0.8~1.1	
	MPB280	異方性－Ba	3.0~3.4	2.1~2.5	2.5~3.0	
		異方性－Sr	3.4~3.6	2.2~2.6	2.6~3.2	
	MPB320	異方性－Ba	3.7~4.1	1.7~2.1	3.2~3.7	
	MPB330	異方性－Ba	3.8~4.1	2.2~2.6	3.4~4.0	
		異方性－Sr	3.7~4.0	2.5~3.0	3.2~3.7	
	MPB380	異方性－Ba	3.9~4.2	1.8~2.2	3.5~4.1	
		異方性－Sr	4.0~4.4	1.8~2.2	3.5~4.1	
	MPB270H	異方性－Sr	3.3~3.7	2.7~3.2	2.5~3.2	
	MPB330H	異方性－Sr	3.5~3.9	2.8~3.3	2.8~3.5	
	——	W型Ba－페라이트	4.4~4.7	1.5~2.1	3.7~4.3	
複合磁石	——	플라스틱	2.4	2.2	1.4	펄럽스 SP－130
		본드磁石	2.45	2.2	1.4	3M, 1.4H
	——	고무磁石	－	－	0.7~0.8	

비고) $1Oe=\frac{10^3}{4\pi}A/m$, $1G=10^{-4}T$, $1G.Oe=7\ 958\times10^{-3}J/m^3$

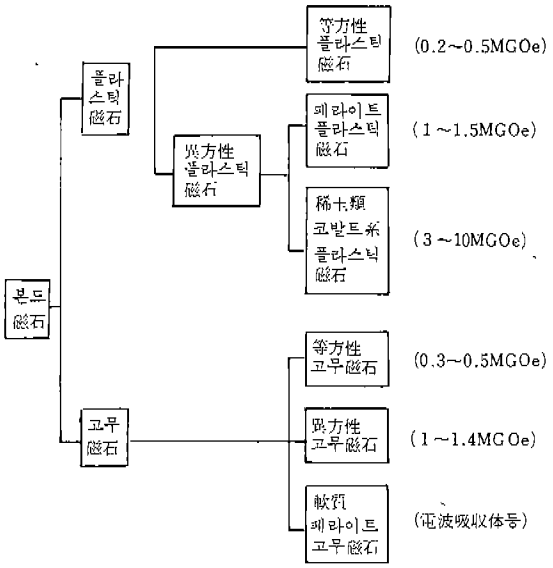
$1G/Oe=\frac{4\pi}{10^7}H/m$

平行으로 分極處理하면 特性이 한층 우수한 磁石이 얻어진다. 이같은 磁石을 異方性磁石이라고 부르며 磁場프레스를 행하지 않은 페라이트磁石을 等方性磁石이라고 한다.

六角板狀微粒子를 물에 分散시켜 슬러리狀으로 한 것에 磁場프레스하는 方法을 濕式磁場프레스法이라 하는데, 磁場을 가할 때 粒子가 回轉하기 쉽고 配向度가 높아져 乾式法에 비해 磁石特性이 向上된다 그러나 加圧成形時 脫水도 함께 이루어져야 하기 때문에 處理速度가 늦고 生産能率이 떨어지는 短點이 있다. 현재 濕式磁場프레스法의 効率改善이 生産技術上의 중요한 課題로 되어 있다.

研究室規模에서는 燒結溫度를 가급적으로 낮게하고 結晶粒의 成長을 억제하며 高密度化를 이루고 있으며 Sr－페라이트의 경우 Br=4,600G, $(BH)_{max}$ =5.2MG.Oe의 것이 나오고 있다.

최근에는 링狀磁石을 半徑方向(라디칼方向) 으로 異方性化한 라디칼異方性 링磁石의 工業的 製法이 開發되었다. 六角板狀 微粒子, 有機바인더, 可塑劑 熔劑 등을 混合해 롤成形하며, 이때 페라이트微粒子는 膜面에 平行으로 配向케 되고 롤成形後 膜을



〈그림－4〉 본드磁石의 種類

多層이 되게끔 감아 링狀 혹은 파이프狀으로 成形한 다음 燒結處理하면 c軸이 半徑方向인 微粒子燒結体가 얻어진다. 이를 半徑方向으로 磁場配向시켜 半徑方向으로 磁極을 갖는 링磁石이 얻어진다. Sr－페라이트의 경우 Br＝4,150G, ${}_{B}H_{c}$＝2,400 Oe, $(BH)_{max}$＝4.1 MG. Oe의 것이 얻어지며 小型高成能모터에 널리 쓰이고 있다.

3．2 고무磁石 및 플라스틱磁石

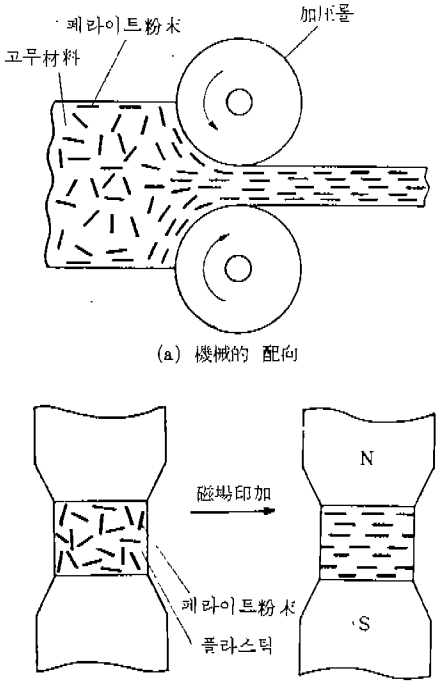
페라이트에 고무를 다량 配向하여 磁石을 만든 것은 1952年 필립스社에 의한 特許가 最初로서 冷藏庫의 도어패킹, 自動車도어, 鐵粉除去沪過裝置, TV用 電子線集束裝置 등에 이용되고 있으며 그 우수한 加工性 때문에 用途가 넓혀지고 있다.

製造에 있어 페라이트粉의 特性이 가장 중요한 한편, 고무는 彈性 지내는 結合性을 갖게하는 역할을 하고 磁性의 强弱은 페라이트 粉末의 添加量에 따라 달라지게 되고 반면 고무物性値는 磁粉의 添加量에 비례해 감소하게 된다.

製造過程은 原料配合, 混練·칼렌더링·加黃등의 加工工程, 着磁作業을 거치며 보통 고무工場에서 加黃工程까지를 행하고 着磁作業은 外注를 주게 된다.

플라스틱中에 强磁性粉末을 分散시킨 것을 複合磁石이라하고 플라스틱 및 고무磁石을 통칭해 본드磁石이라고 부른다(그림4). 보통 페라이트粉末을 90－95wt%까지 混合하여 고도의 結晶配向處理를 한 후에 플라스틱硬化處理로 磁石이 얻어진다. 이는 샤프트, 요크材, 機械連結部品 등과 一体成型이 가능한 장점이 있어 小型모터의 回轉子에 應用이 기대되고 있다.

페라이트粉末의 配向에는 機械的 혹은 磁場配向이 利用될 수 있다(그림5).

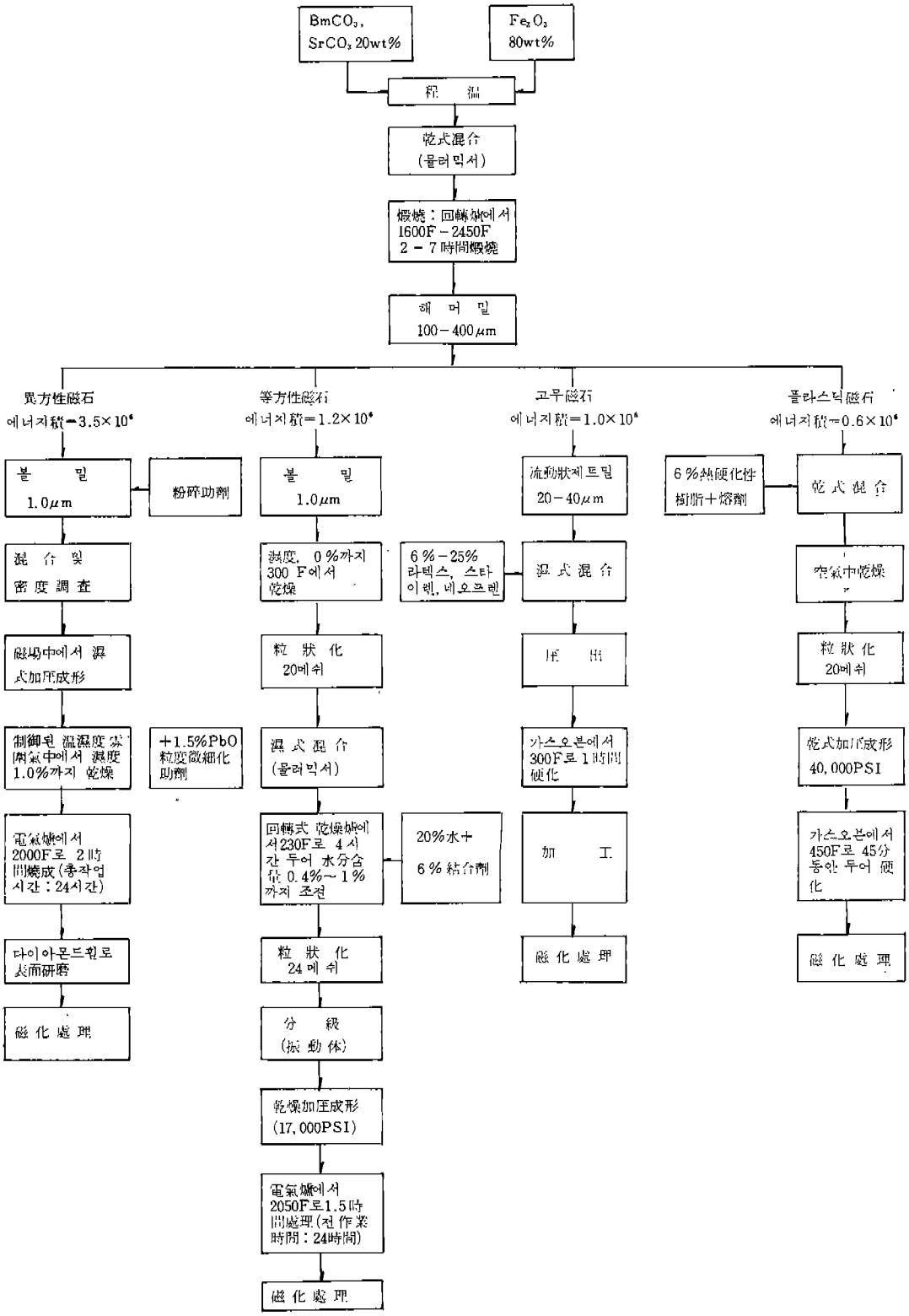


〈그림－5〉 페라이트粉末의 配向

이상의 페라이트 磁石 製造工程을 보면 그림6과 같이 나타낼 수 있다.

4．稀土類－코발트磁石

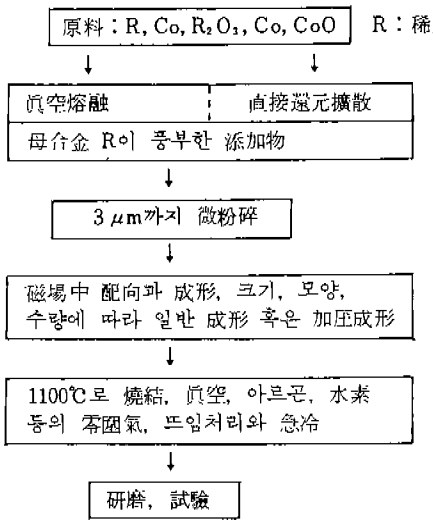
바륨페라이트의 發明(1952年) 以來 새로운 磁石材料가 나오지 못하다가 稀土類－코발트 化合物이 磁石材料分野에 導入되면서 활발한 研究開發이 이루어져 최초로 商業用으로 登場한 것이 $SmCo_5$ 燒結磁石이고 이어서 Sm_2Co_{17}型과 Ce－Co化合物등이 나타나게 되었다. 이와 같은 稀土類－코발트(R



〈그림－6〉 硬質페라이트 製造工程圖

-C) 磁石은 最大에너지積 (10-30MGOe)이 매우 높아 Alnico 5의 2~6倍에 이르고 있다.

당초 R-Co系 化合物은 燒結性이 아주 나빠 實用化하는데 문제점이 많았지만 최근에 이르러 燒結技術의 向上으로 量産이 가능케 되었다. 製造工程을 보면 우선 原料粉末을 熔融鑄造하거나 혹은 同時還元시켜 合金을 形成시키는데 이때 코발트가 酸素와의 結合性이 크기 때문에 工程을 無酸素狀態에서 진행시킨다. 다음에 熔融体를 微粉碎하고 磁場中 成形하여 異方性을 갖게한 다음 眞空, 혹은 還元性 水素零圍氣中에서 1100℃로 燒成한 다음에 960℃로 뜨임처리를 한다 (그림 7)



〈그림-7〉 燒結稀土類-코발트磁石製造工程

우리가 보통 永久磁石의 特性을 말할 때 그 에너지積과 安定性을 들게 되는데 R-Co系 磁石은 이 特性을 이상적으로 겸비한 반면, 高性能 때문에 製造時 필연적으로 발생되는 着磁磁界의 增大, 減磁調整의 工數增加 등의 문제가 발생해 종래의 磁石에 비교해 사용하기에 어렵고 아울러 稀土類金屬 및 코발트 같은 稀少金屬을 사용하기 때문에 價格面에 제약이 따르고 있으나 製造工程의 改善이 급속하게 이루어지고 있다.

〈표-3〉 주요 磁石材料 特性

	殘留磁束密度 Br (T)	保磁力 $_BH_C$ (kA/m)	最大에너지積 $(BH)_{max}$ (kJ/m³)
알니코系			
Fe-24Co-14Ni-8Al-3Cu (Alnico5, 多結晶)	1.25 (12.5)	50 (0.63)	40 (5.0)
Fe-34Co-15Ni-7Al-3Cu-5Ti (Alnico8, 多結晶)	0.8 (8.0)	120 (1.50)	44 (5.5)
페라이트系			
$BaO \cdot 6Fe_2O_3$ (等方性)	0.2 (2.0()	144 (1.8)	8 (1.0)
$BaO \cdot 6Fe_2O_3$	0.4 (4.0)	160 (2.0)	28 (3.5)
$SrO \cdot 6Fe_2O_3$	0.4 (4.0)	240 (3.0)	28 (3.5)
稀土類-Co系			
$SmCo_5$ 粉末形	1.0 (10.0)	788 (9.9)	196 (24.6)
$Sm_{0.5}MM_{0.5}Co_5$ 粉末形	0.88 (8.8)	635 (8.2)	150 (18.8)
$Sm(Co_{0.76}Fe_{0.1}Cu_{0.14})_{7.0}$ 析出形	1.04 (10.4)	501 (6.3)	210 (26.4)
$Sm(Co_{0.69}Fe_{0.2}Cu_{0.1}Zr_{0.01})_{7.1}$ 析出形	1.11 (11.1)	517 (6.5)	236 (29.6)
$Ce(Co_{0.85}Fe_{0.11}Cu_{0.11})_5$ 析出形	0.72 (7.2)	398 (5.0)	95 (12.0)
Fe-Cr-Co系			
Fe-30Cr-23Co-SW	1.1 (11.0)	80 (1.0)	40 (5.0)
Fe-28Cr-17Co-1Si	1.2 (12.0)	56 (0.7)	44 (5.5)
Fe-21Cr-15Co-3V-1Ti	1.4 (14.0)	48 (0.6)	52 (6.5)
Mn-Al-C系			
Mn-29.5Al-0.5C	0.6 (6.0)	200 (2.5)	48 (6.0)

( )中의 數字는 OGS 單位 : B_r [KG], $_bH_c$ [kOe], , $(BH)_{max}$ [MGOe]

*