

KINS/HR-365

**자성을 이용한 탄소강배관의  
감육완화방안 연구**

**A Study on the Impediment of  
Thickness Diminution of Carbon Steel Tube by  
Using Applied Magnetic Field**

**2001. 3**

**연구기관**

**충남대학교 공과대학 재료공학과**

**한국원자력안전기술원**

# 제 출 문

## 한국원자력안전기술원장 귀하

본 보고서를 “원전 수명관리 규제기술개발”과제 중 위탁과제로 수행된 “자성을 이용한 탄소강배관의 감육완화방안 연구”과제의 제 1차년도 보고서로 제출합니다.

2001년 3월 31일

연구기관명 : 충남대학교 공과대학 재료공학과

연구책임자 : 김 종 오

연구원 : 김 종 희

연구원 : 조 완 식

연구원 : 홍 성 민

KINS 과제책임자 : 박 윤 원

# 요 약 문

## I. 제 목

자성을 이용한 탄소강배관의 감육완화방안 연구

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

원자력발전소에서 냉각수로 사용되고 있는 중수는 원자로 냉각 후 약 300 °C의 온도로 탄소강배관을 통하여 배수되고 있으며, 이러한 고온 냉각수에 의하여 탄소강배관의 감육이 진행되고 있는 것으로 조사되고 있다. 특히, 빠른 유속이 접하는 탄소강관의 굴절부위에서 감육속도가 다른 부위에 비해 급속도로 진행되고 있는 것으로 사료된다. 따라서 탄소강배관의 감육의 저지 또는 방지할 수 있는 새로운 안전장치에 대한 연구의 필요성이 시급히 요구되고 있다. 이와 같은 연구의 한 분야로 자기장을 이용하여 탄소강배관의 감육을 감소시키는 방안이 고려되고 있다. 즉, 탄소강배관 내에서 감육이 진행되고 있는 부분에 강한 자기장(magnetic field)을 인가함으로써 감육을 감소 또는 정지시킬 수 있다면 매우 획기적인 대처방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 원자력발전소 냉각배수 온도에서 최적 자기장을 적용할 수 있는 방법을 조사하여 응용 가능한 영구자석을 제조하고, 원자력발전소의 배수환경과 유사한 실험장치를 설계 및 제작하여 탄소강배관 감육방지에 응용 가능한 자기장 발생기구 및 이에 관련된 기술개발을 수행하고자 한다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

원자력발전소에서 냉각수배관으로 사용하는 탄소강관(SA106 Gr.C)의 외부 자장 효과를 조사하기 위해 탄소강관의 자기적 특성을 진동시료형자력계(Vibrating Sample Magnetometer)를 사용하여 조사하였다. 자기장이 인가된 상태에서의 탄소강관의 자장분포를 조사하기 위해 컴퓨터를 이용하여 모의실험(simulation)하였다. 모의실험의 결과를 바탕으로 하여 탄소강관의 사용환경에서 응용 가능한 영구자석

Alnico 5DG와 Alnico 5로 결정하였고, 영구자석의 성능을 비교하기 위해  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  자석을 사용하였다. 탄소강관의 감육상태 및 감육방지 연구를 위하여 원자력발전소의 냉각수 배수환경과 유사한 실험장치를 제작하였다.

#### IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

- 1) 탄소강관의 자기적 특성을 진동시료형자력계를 사용하여 측정하였다. 300 ℃의 고온에서도 탄소강관의 자기적 성질은 상온에서와 같은 값을 나타내었다.
- 2) 컴퓨터를 이용하여 자기장이 인가된 상태에서의 탄소강관의 자장분포를 모의실험하였다.
- 3) 모의실험의 결과를 토대로 응용가능한 영구자석으로 Alnico 5DG 및 Alnico 5를 결정하였고,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  자석으로 비교하였다.
- 4) 탄소강관의 감육방지 연구를 위하여 원자력발전소의 냉각수 배수환경과 유사한 실험장치를 제작하였다.

# S U M M A R Y

## I. Project Title

A Study on the Impediment of Thickness Diminution of Carbon Steel Tube by Using Applied magnetic Field.

## II. Objective and Importance of the Project

The heavy water used as cooling water in nuclear power plant is drained through the carbon steel tube with the temperature of about 300 °C after cooling the nuclear reactor. It is well known that the thickness diminution of carbon steel tube is generated by this high temperature cooling water. The thickness diminution in particular in the bending parts of carbon steel tube is more developed than that in the straight. Therefore, studies on a new safety apparatus for impediment or prevention of the thickness diminution of carbon steel tube are urgently required. From this point of view, the impediment of the thickness diminution using magnetic field is proposed. If the thickness diminution can be reduced by applying strong magnetic field on the parts in which the diminution is in progress, the counter plan would be widely utilized in these areas.

The object of this research is to fabricate the desirable permanent magnets by examining the methods applicable to an optimum magnetic field and to design and manufacture an experimental apparatus similar to the draining environment of nuclear power plant. Also with, this, the mechanism of the field generation and the development of the related technologies are carried out.

### III. Scope and Contents of the Project

Magnetic properties of the carbon steel tube(SA106 Gr.C) which is used as the pipe laying of cooling water in nuclear power plant were measured using a vibrating sample magnetometer to investigate the effect of external field. On the basis of the simulation results, Alnico 5DG and Alnico 5 were selected as the permanent magnets applicable to the carbon steel tube.  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  magnet was used to compare the performance of permanent magnets. The experimental apparatus similar to the draining environment of cooling water in nuclear power plant was also manufactured in order to research the impediment of thickness diminution of carbon steel tube.

### IV. Results and Recommendation for Application

1. Magnetic properties of the carbon steel tube were measured using a vibrating sample magnetometer. Magnetic properties of the carbon steel tube in high temperature, 300 °C were obtained same value of that of room temper

2. Magnetic field distribution of carbon steel tube in the applied magnetic field was simulated by computer program.

3. On the basis fo the simulation results, Alnico 5DG and Alnico 5 were selected as the permanent magnets applicable to the carbon steel tube.  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  magnet was used to compare the performance of permanent magnet.

4. The experimental apparatus similar to the draining environment fo cooling water in nuclear power plant was manufactured in order to research the impediment of thickness diminution of carbon steel tube.

# 목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 이 론	4
제 1 절 Flow-Accelerated Corrosion(FAC) 현상	4
제 2 절 전자석	5
2. 1. 일반 솔레노이드	5
2. 2. 전자석에 의한 자장	7
제 3 절 영구자석재료(경자성재료)	10
3. 1. Alnico 합금	13
3. 2. 희토류 Co 합금	15
제 4 절 최대 에너지적	17
제 3 장 실 험	20
제 1 절 탄소강관의 기초자기특성측정	20
제 2 절 적용 영구자석의 선정 및 평가	21
제 3 절 실험장비제작	21
제 4 장 실험결과 및 실험장비제작	22
제 1 절 탄소강의 자기적 특성	22
제 2 절 영구자석특성 시뮬레이션	23
제 3 절 영구자석의 자기적 특성	25
제 4 절 실험기기제작	26
제 5 장 결 론	28
참 고 문 헌	29

## 제 1 장 서 론

최근의 산업발전의 방향이 고속화, 집적화로 이루어지면서 이에 따른 에너지사용의 증가로 인하여 에너지 산업은 모든 산업의 기반산업의 위치에 있다. 산업혁명이후 꾸준히 사용되어온 석탄, 석유, 가스 등 화석연료는 산업의 발전이 거듭될수록 그 사용량이 나날이 증가하고 있으며, 이러한 화석연료의 과다사용으로 인한 지구환경 파괴를 막기 위해서 각 선진국에서는 청정에너지원이라고 하는 풍력, 조력, 태양광 바이오매스 등 대체 에너지를 개발하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 대체 에너지는 현재의 기술과 경제성 측면에서 대량의 에너지를 얻는데 많은 한계에 부딪힘에 따라 값싸면서 대량 조달이 가능한 원자력발전이 화석연료를 대체하여 에너지산업을 이끌어가고 있는 실정이다.

각 선진국에서는 원자력발전의 수요가 증가하고 있으며, 우리나라에서는 1978년 4월 우리나라 최초의 원자력 발전소인 고리 1호기가 가동된 이후 원자력 발전은 에너지 빈국인 우리나라의 경제발전에 지대한 공헌을 하여 왔으며 앞으로도 연간 10 % 내외의 지속적인 에너지 수요증가가 예상되고 있는 상황에서 원자력의 필요성과 중요성은 더욱 절실해 지고 있다. 현재 우리나라는 16기의 원자력 발전을 가동하여 국내 총 발전량의 약 43 %를 생산하고 있을 정도로 원자력 발전은 막중한 역할을 담당하고 있다. 이렇게 원자력 발전의 수요가 지속적으로 증가함에 따라 원자력 발전의 안전성에 대한 중요성 또한 증가하고 있다. 원자력 발전의 안전성에 대한 문제가 중요하게 대두되면서 원자로, 터빈, 냉각배관 등 원자력발전소의 각 시설에 대한 안전관리가 중요한 사항이 되었다.

원자력발전소 배관의 상당히 많은 양이 탄소강 으로 제작되어지는데 이러한 탄소강배관은 유동가속부식 (Flow Accelerated Corrosion: FAC)현상으로 인해 두께가 점차 감소해나가는 문제점이 비교적 최근에 안전문제로 대두되



었다. FAC로 인한 배관감육은 대부분 2차계통에 속하는 배관에서 발생되어 심각한 안전문제로는 인식되지 않았던 것이 사실이나 최근에 중수형원자로의 배관인 피더배관에서도 이러한 현상이 심각하게 발생할 수 있다는 사실이 확인되면서 중요한 안전문제로 인식되었다. 해결책으로 제시되는 탄소강관의 교체는 안전상의 문제이외에 원자력발전소의 가동중지 등 많은 노력이 요구되며 이로 인하여 엄청난 경제적 손실을 유발할 수 있다. 따라서 현재 사용하고 있는 탄소강배관의 감육을 최대한 저지 또는 방지하여 수명연장이 가능하다면 원자력발전의 안전에 획기적으로 기여할 수 있을 뿐만 아니라 경제적 기여도도 매우 클 것으로 판단된다.

현재 중수형 원자력발전소에서 냉각수로 사용되고 있는 중수는 원자로 냉각 후 약 300 ℃의 온도로 탄소강배관을 통하여 순환되고 있으며, 이러한 고온 냉각수에 의하여 탄소강배관의 감육이 진행되고 있는 것으로 조사되고 있다. 특히, 빠른 유속이 접하는 탄소강관의 굴절부위에서의 감육속도가 다른 부위에 비해 급속도로 진행되고 있는 것으로 사료된다. 따라서 탄소강배관의 감육을 저지 또는 방지할 수 있는 새로운 방안의 필요성이 시급히 요구되고 있다. 이러한 방안의 하나로 한국안전기술원 박윤원 박사는 자기장을 이용하여 탄소강배관의 감육을 감소시키는 방안을 제안하였으며, 본 보고서는 제안된 방법의 가능성을 확인하기 위해 수행된 실험적 접근을 다룬 것이다. 즉, 탄소강배관 내에서 FAC 현상은 일반적으로 산화피막을 통해 Magnetite가 유체로 이동해감으로써 발생하는 것이므로 외부에서 강한 자기장(magnetic field)을 인가하여 Magnetite의 이동을 막고 산화막을 치밀하게 유지할 수 있게 한다면 감육을 급격히 감소 또는 정지시킬 수 있을 수 있다는 아이디어의 가능성을 확인하고자 하는 것이다. 이러한 탄소강배관의 부식 방지에 관한 연구는 국내에서는 급수관 및 보일러 탄소강배관의 부식방지를 위하여 필요부위에 영구자석을 설치하여 자장을 인가함으로써 효과를 얻은 보고가 있으나, 그와 같은 연구는 상온상태의 냉각수의 배수에 관한 연구이며, 본 연구과제와 같이 고온 냉각수에 관한 연구결과 발표는 전무한 실정이

다. 국외의 경우도 본 연구과제와 유사한 연구개발은 거의 이루어지지 않은 것으로 파악되고 있다. 따라서 고온 냉각수에 의한 탄소강배관의 감육의 자기장 영향에 관한 연구는 국내외적으로 전무한 실정이며, 이에 따라 현재 사용조건에서의 감육기구(mechanism)구명이 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다.

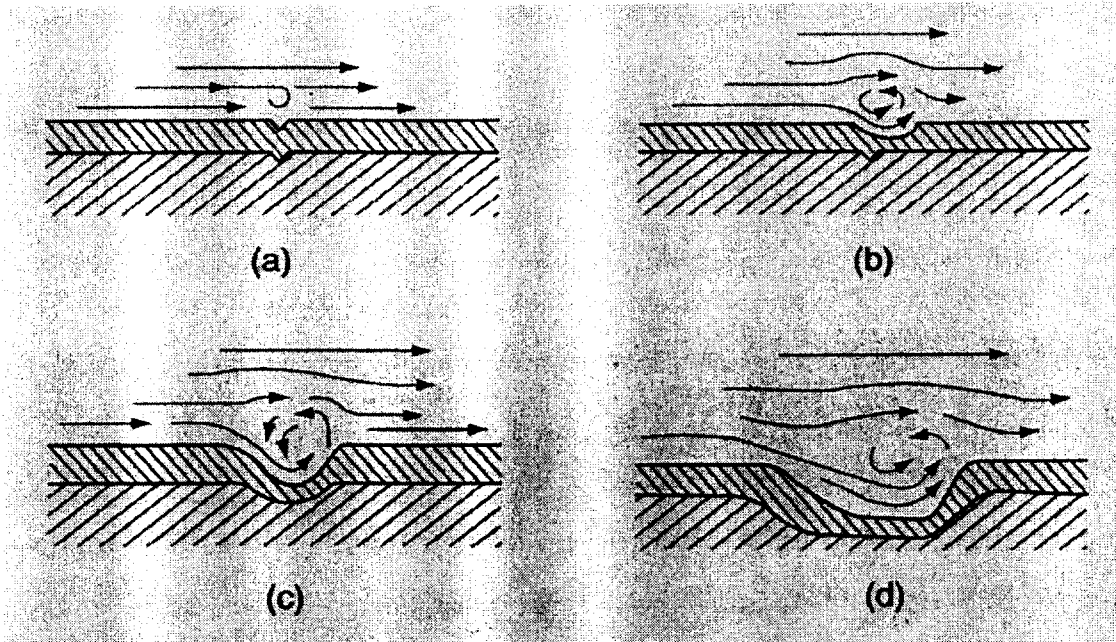
탄소강관의 부식 및 부식과 관련된 감육은 고온냉각수의 배수조건에서 생성된 산화물 및 탄소강관이 강자성체라는 점에서 자기장의 영향을 충분히 예상할 수 있다. 따라서 자기장이 탄소강관 감육방지의 중요한 기구로 작용할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구는 1차년도에서는 원자력발전소에서 사용중인 탄소강배관의 외부자장효과를 알아내기 위하여 탄소강관의 기초자기특성을 조사하여 탄소강관의 사용환경에서의 자장인가 가능성을 조사하였고, 이 탄소강관의 사용환경에서 응용가능한 전자석 및 영구자석을 조사하여 그 특성을 확인하였다. 그리고 그 결과로부터 현재 원자력 발전소의 냉각수 배수환경과 유사한 실험장치를 제작하였다. 2차년도에는 탄소강관에 적합한 영구자석을 제조하여 최적의 자기장 발생장치를 제작하고, 이 자기장 발생장치의 온도, 시간에 따른 신뢰성을 평가할 예정이다.

## 제 2 장 이 론

### 제 1 절 Flow-Accelerated Corrosion(FAC) 현상

FAC(Flow-Accelerated Corrosion, 이하 FAC)현상은 유체에 노출된 탄소강과 저합금강에서 부식현상이 가속되는 현상을 통틀어 일컫는다.<sup>1,2</sup> 초기에 산화 보호피막이 형성된 금속이 유체에 노출되면서 보호피막 표면의 철 이온이 농도의 차이에 따른 물질전달 (mass transfer) 반응에 의하여 사라지게 된다. 결국 부식에 의한 피막 생성 반응과 유체에 의한 피막 제거 반응이 같은 속도로 일어나게 되면 그 결과 유체에 노출된 금속의 두께가 연속적으로 감소하게 되어 최종단계에 설계 임계두께에 이르면 금속은 파단된다. (그림 2-1)에 FAC현상이 일어나는 과정을 나타내었다.



(그림 2-1) FAC(Flow-Accelerated Corrosion) mechanism

## 제 2 절 전자석

### 2. 1. 일반 솔레노이드

솔레노이드는 거의 모든 형상 특히 봉이나 선형시편의 측정에 유용하다. 이 솔레노이드는 수 분의 1 Oe에서 200 kOe까지 범위의 자장을 발생시킬 수 있도록 설계되어 있다. 솔레노이드는 플라스틱과 같은 절연체 튜브에 절연된 동선을 감아서 주로 만들어진다. (그림 2-2)에서 보인 칫수의 경우 중심 C로부터 x cm 떨어져 있는 p점에서의 자장 H는

$$H = \frac{4\pi ni}{10L} \left[ \frac{L+2x}{\sqrt{2D^2+(L+2x)^2}} + \frac{L-2x}{\sqrt{2D^2+(L-2x)^2}} \right] \quad (2.1)$$

로 주어진다. 여기서 n은 권선수이다. 솔레노이드의 중심 (x=0)에서는

$$H = \frac{4\pi ni}{10L} \left( \frac{L}{\sqrt{D^2+L^2}} \right) \quad (2.2)$$

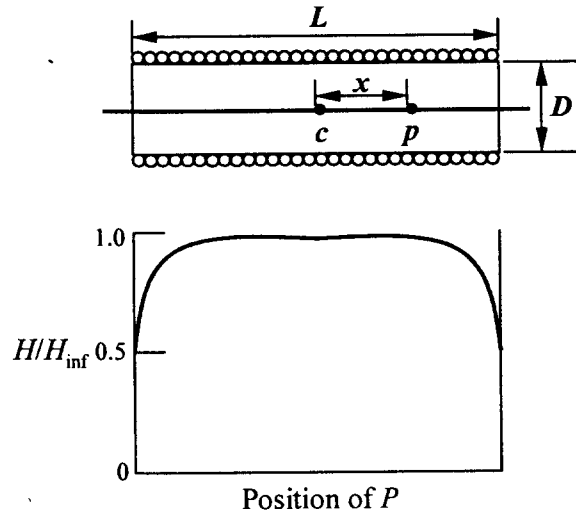
로 표시되며  $L \gg D$ 인 경우

$$H = \frac{4\pi ni}{10L} = \frac{1.257ni}{L} \quad (2.3)$$

로 간단히 표시된다.

어떠한 솔레노이드에서도 x가 증가하면 자장은 감소한다. 긴 솔레노이드에서 끝부분의 자장은 중심의 자장과 비교하여 반이 된다. 그러나  $x=L/4$ 인 부분(middle half)에서는 (그림 2-2)와 (표 2-1)에 나타낸 것처럼 놀라울 정도로 일정하다. (표 2-1)의 값은 (식 2.1)에서 얻은 것이다. 이 표에서  $H_{inf}$ 는

(식 2.3)에 의해 주어진 무한정 긴 솔레노이드에서 중심부분의 자장을 나타낸다.



(그림 2-2) Single-layer solenoid.

L/D	H at Center	H at edge of middle half
5	0.9806 $H_{inf}$	0.9598 $H_{inf}$
10	0.9950	0.9892
20	0.9987	0.9972
50	0.9996	0.9994

(표 2-1) 솔레노이드의 자장균일성

자장이 특정값보다 증가하기 위해서는 전류를 증가시키는 것보다 2층 또는 그 이상으로 전선을 감아  $n/L$ 을 증가시키는 것이 좋다.  $H$ 가  $i$ 에 비례하지만 권선의 열은  $i^2R$ 에 비례하기 때문이다. 여기서  $R$ 은 솔레노이드의 저항을 나타낸다. 따라서 권선수를 2배로 증가시키면  $H$ ,  $R$ 과 열의 양이 모두 2배로

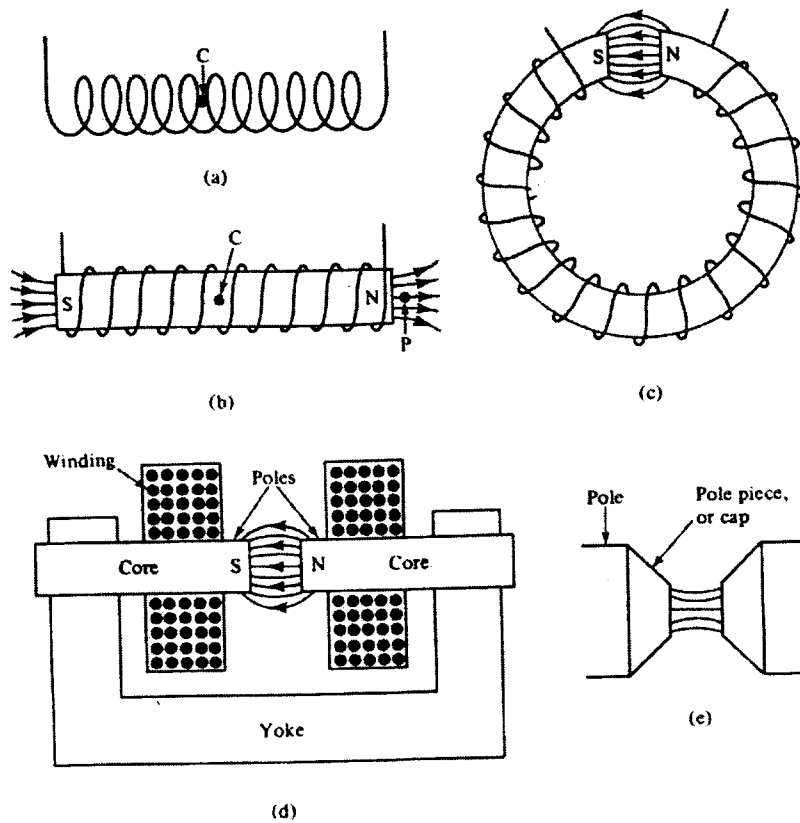
증가하지만 전류를 2배로 증가시키면 H는 2배로 증가하나 열은 4배로 증가한다. 솔레노이드의 설계에서는 여러 가지 양립할 수 없는 조건에 균형을 맞추어야 하며, 다음의 조건을 유의해야 한다.

1. D값은 솔레노이드 안의 실험공간을 고려하여야 한다.
2. L/D비율은 합당한 균일자장의 거리를 고려하여 정한다. 이것은 최대시편길이가 L/D를 결정하게 된다는 것을 의미한다.
3. 주어진 L에 대하여 자장은 ni에 비례하고 발열량은  $i^2R$ 에 비례한다.
4. 주어진 전류에 대하여 전원으로 필요한 전압은 R에 비례하며 이 R은 n에 비례한다.

## 2. 2. 전자석에 의한 자장

전자석은 직류전류를 흘릴 수 있는 코일로 철심주위를 감은 형태를 하고 있는데, 일반 솔레노이드로 얻은 자장보다 높은 자장이 필요한 경우에 주로 이용한다. (그림 2-3)은 전자석의 발달 모양을 나타낸 것이다. (그림 2-3) (a)에 간단한 솔레노이드를 보였는데 중심 C에서의 H는 식 2.3과 같이 단위 길이당 전류×권선수에 비례한다.

(그림 2-3) (b)와 같이 코일에 철 봉을 넣으면 철심 안 중심 C에서의 자장은 매우 크게 되는데 이것은 전류에 의한 H와 철에 의한  $4\pi M$ 의 합인 B로 자장이 주어지기 때문이다. 물론 철심 안의 자장은 사용할 수 없다. 그러나 철심 양단근처인 p점에서의 자장은 B와 같다. 양단에서 멀리 떨어지면 자력선이 퍼져서 자속 또는 자장의 세기는 감소한다. 철심은 전류에 의해서 발생하는 자장을 배가시키는 역할을 하며 배가수는  $B=\mu H$  식에 의하여 투자율  $\mu$ 가 된다. 따라서 H=10 Oe에서 투자율이 2000이라면 철심안이나 근처에서의 자장은 20,000 Oe가 된다. 이 방법으로 상대적으로 낮은 전류를 인가하고서도 큰 자장을 얻을 수 있다. 여기에서 철심 안이라도 양단근처의 자장이 중심의 자장보다 작아지는 현상을 무시하였는데 이 효과를 고려하면 철심양



(그림 2-3) Evolution of the electromagnet.

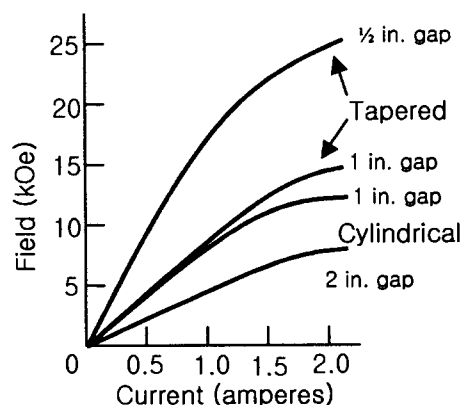
단의 B값이 20,000 G가 되기 위해서는 코일에 가해주는 전류는 10 Oe의 경우보다 몇 배는 커져야 한다는 것을 알 수 있다. 그래도 이 전류는 철심이 없을 경우보다는 훨씬 작다.

철 봉의 양단에서 자력선이 퍼지는 현상은 (그림 2-3) (c)와 같이 철 봉을 원형으로 구부려서 양단이 거의 닿도록 함으로써 줄일 수 있다. 그러면 자속은 한 극에서 다른 극으로 공극을 가로질러 지나간다. 권취선의 전류가 증가하면 철의 자화도 포화자화값( $M_s$ )인 1714 emu/cm<sup>3</sup>까지 증가한다. 따라서 공극에서의 자장에 미치는 철의 최대기여도는 자극면이 편평할 경우  $4\pi M_s$  즉 21,500 G가 된다. 이 이상의 증가는 권선에 인가되는 전류의 증가에만 의존한다. 이러한 기여를 효과적으로 이용하기 위하여 권선을 공극에 가깝도록

하며 (그림 2-3) (d)에 그 형상을 보였다. 권선에 의해서 발생한 자속은 철심을 통하여 요크로 가며 다시 다른 철심으로 간다. 요크와 철심은 높은 투자율을 갖도록 어닐링한 철 또는 저탄소강으로 만들고 있다. 요크는 두 극 사이에 걸리는 인력을 지지할 수 있도록 크게 만든다. 권선은 수냉하기도 한다. 전자석의 크기는 극의 직경으로 주로 분류되는데 주로 4 ~ 12 inch까지의 것이 쓰인다.

상당히 큰 부피에 걸쳐 균일한 자장이 필요할 때는, 편평한 자극면이 주로 쓰인다. 더 높은 자장을 얻기 위해서는 경사진 자극편(pole caps)을 자극에 붙인다. 경사진 면에 생긴 자유자극(free poles)은 (그림 2-3) (e)에 보인 것처럼 공극 중심부분의 자장에 기여하여  $4\pi M_s$  이상이 되도록 한다.<sup>34</sup> 그러나 높은 자장은 부피가 작고 균일하지 않은 단점도 있다. 크지는 않지만 자장을 높일 수 있는 방법으로  $4\pi M_s$ 가 23,000 G 이상인 50 %의 Fe와 50 %의 Co 합금으로 만든 자극캡을 사용하는 방법이 있다.

대부분 전자석에서 공극의 길이는 요크에 나사를 내어 조정한다. 공극이 커질수록 (그림 2-3)의 (c)와 (d)에 보인 것처럼 많은 자속이 공극부피 밖으로 빠져나가서 자장은 낮아진다. (그림 2-4)는 전자석에서 공극의 크기 및 권선의 전류변화에 따른 자장세기의 변화를 보인 것이다. 최소공극의 크기는 시편의 크기나 공극에 넣는 실험장치의 크기에 따라 결정된다.



(그림 2-4) Field in the gap of the magnet as a function of current in the winding and gap size.



### 제 3 절 영구자석재료(경자성재료)

자기에 대한 인식은 천연자석의 특성이 알려진 이후부터이다. 쇧조각이 천연자석에 달라붙고 지자력에 의해 특정 방향으로 배향되는 것 등이 오늘날 영구자석과 같은 효과를 갖는 것이다. 이러한 천연자석 재료인 magnetite는 오늘날 영구자석이라기 보다는 연자성으로 취급되고 있다. 연자성과 경자성 재료의 바람직한 자기적 특성은 큰 자발자화를 갖는다는 것이다. 그러나 연자성 재료에서 중요하다고 생각되는 특성들이 영구자석에서는 별로 중요하지 않거나 혹은 불리한 경우도 있다.

영구자석에서는 큰 잔류 자속밀도와 큰 포화자화량을 얻는데 도움이 되는 외부 자장이 필요없기 때문이다. 재료를 자화시킨 후 자장을 제거하면, 재료를 탈자시키려는 자장이 항상 존재한다. 탈자장은 자구구조를 형성시키고 그 결과 시편의 자기 모멘트는 감소한다. 영구자석은 자체 탈자장에 의해 탈자되는 것이 억제될 수 있어야 한다. 자화되는 것을 억제하는 힘의 척도가 보자력이고, 이것이 영구자석에서 큰 보자력이 요구되는 중요한 이유이다. 포화자화된 자화량을 0까지 감소시키는데 필요한 역자장을 보자력으로 정의한다.

자석의 용도 개발을 위해 장비를 설계하는 방향에서는 자화량  $M_s$ 보다는 자기유도  $B$ 값이 더 유용하다. 왜냐하면,  $B$ 는 직접 측정이 가능하기 때문이다. 따라서  $B$ 값을 0까지 감소시키는데 필요한 역자장을 보자력으로 정의할 수도 있다. 이 두 다른 보자력의 개념은 각각  $mH_c$ 와  $BH_c$ 로 표시한다.

중요한 것은 좋은 자석 재료일수록  $mH_c$ 와  $BH_c$ 의 차가 커진다는 점이다. 탈자되지 않은 완전한 자석의 경우, 잔류 자속밀도는  $M_r$ 이고 역자장이 걸렸을 때 이 자화값이 상수값으로 될 것이다. 따라서,

$$B = \mu_0(H + M_r) \quad (2.4)$$

가 되므로

$$H = -M_r \quad (2.5)$$

일 때,  $B=0$ 가 된다. 따라서 보자력은 다음과 같다.

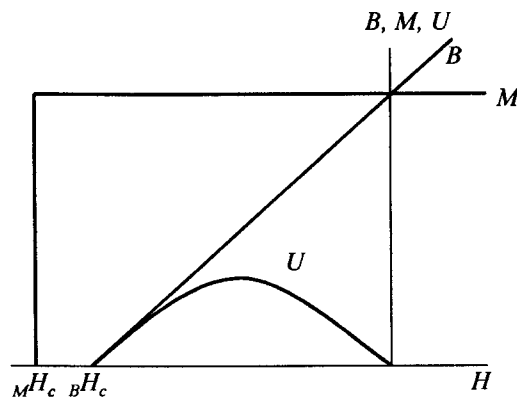
$$B H_c = M_r \quad (2.6)$$

자화량이  $M$ 이 큰 역자장까지  $M_r$ 과 동일한 값으로 유지된 후 갑자기 0으로 떨어진다고 생각하면, 이 현상이 일어나는 자장이  $M H_c$ 이다.

$M H_c > M_r$  이면,  $B H_c$ 는는 항상  $M_r$ 과 같으므로  $M H_c > B H_c$  이다. 영구자석에서 다른 중요한 특성은  $H$ 와  $B$ 값을 곱한 것이다. 이것은 단위 부피당 에너지와 같다.  $H$ 가 재료 내부에서 균일하다면, 자석의 에너지는  $-(HB) \times V$ (여기서  $V$ 는 재료의 부피)이며, 음의 부호는  $H$ 가  $B$ 에 반대방향에 있다는 것을 의미한다. (식 2.4)로부터 단위부피당 에너지는

$$U = -\mu_0 H(H + M_r) \quad (2.7)$$

이다 (그림 2-5)에서 이상적인 자석에 대해  $U$ 를 나타내었다.  $U$ 는 포물선이고 최대값은



(그림 2-5) Change of  $M$ ,  $B$ ,  $U$  by  $H$  at ideal magnet

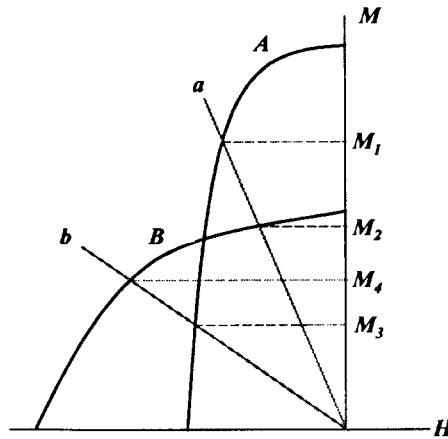
$$U_{\max} = \frac{1}{4} \mu_0 M_r^2 \quad (2.8)$$

이다. 비이상적인 재료에서 최대 에너지적  $U_{\max}$ 는 이 값보다 적다. 일반적으로 이 값은 자석 재료의 특성 평가로 이용된다. 이상적인 자성 재료에서  $U_{\max}$ 는  $M_r$ 값에 의해서만 영향을 받는다. 물론  $M$ 값이  $+H$ 값에서 상수값이 된다면, 그때 잔류 자속밀도는 포화자화량  $M_s$ 값과 동일하게 되므로 최대값은

$$U_{\max} = \frac{1}{4} \mu_0 M_s^2 \quad (2.9)$$

이 된다. 따라서 이상적인 자석 재료의 특성은 단순히  $M_s$ 에 의해 좌우된다. 상온에서 가장 높은  $M_s$ 값을 갖는 재료는 Fe-Co이므로 이 재료가 절대 최대  $U_{\max}$ 를 가질 것이다. 실제 재료는 비이상적이어서  $M$ 값이 상수로 유지되는 것이 아니라  $H$ 값에 따라 변한다. 그래서  $U_{\max}$ 는 식 2.8 혹은 식 2.9에서 얻은 값보다 항상 낮다. 따라서 실제 자석 재료의 특성을 평가하는데  $M_s$ 와  $M_r$ 뿐만 아니라  $M H_c$ 의 값을 고려하는 것도 중요하다.

최대 에너지적  $U_{\max}$ 는 평균 특성평가의 척도에 불과하다. 자석의 특성을 비교하여 용도에 맞는 자석의 선택 기준을 알 수 있다. 특수한 응용분야에서 좀 작은 에너지적  $U_{\max}$ 를 갖는 재료가 큰 에너지적  $U_{\max}$ 를 갖는 재료보다 더 유용하게 쓰일 수 있는 경우가 있다. 이런 현상이 어떻게 일어날 수 있는가를 알아보기 위해 X-Y 좌표계에서 2상한에 자기이력 곡선을 그려 넣는다. 이것은 외부 자장이 없을 때의 자기이력 곡선이다. 이 곡선을 탈자곡선이라 부른다. (그림 2-6)에 서로 다른 자석의 탈자 곡선을 나타내었다.



(그림 2-6) demagnetization curves of two different materials, A, B.

곡선 A는 큰 잔류 자속밀도와 큰 보자력을 갖는 재료의 자기이력 곡선이다. 탈자장은 M값에 비례하므로  $H_d = -N_d M$ 이 되어서(여기서  $N_d$ 는 탈자장계수) 원점으로부터 음의 기울기를 갖는 직선으로 표시된다. 직선의 기울기는 자석의 형태에 의해서만 좌우된다. 길이  $l$ 과 직경  $d$ 의 비( $l/d$ )가 다른 원통형 모양의 두 자석을 고려하자. 원통형 축을 따라 자화되어 있다면, 직선 a는  $l/d$ 이 큰 비를 갖는 자석에 적합하고 직선 b는 작은  $l/d$ 을 갖는 재료에 적합하다.

자화량은 탈자장 곡선과 직선의 교차점에 의해 얻어진다. 만일 큰  $l/d$ 비를 갖는 재료가 필요하다면,  $M_1 > M_2$ 이므로 재료 A를 선택하는 것이 바람직하고 작은  $l/d$ 비를 갖는 재료가 필요하다면,  $M_4 > M_2$ 이므로 재료 B가 더 바람직하다. 이것은 특수한 응용분야에 대해서  $U_{max}$ 값이 자석 재료를 선택하는 최선의 기준이 되지 못한다는 것을 의미한다.<sup>5</sup>

### 3. 1. . Alnico 합금

1930년대 초반에 새로운 자성 재료가 개발되었다. 이들 재료는 Fe에 첨가된 Al, Ni 및 채의 첫글자를 따서 alnico라는 이름을 갖게 되었다. 맨 처음에

개발된 합금들은 실제로 Co가 첨가되지 않았기 때문에 때때로 AlNi 합금으로 알려졌다. 그러나 그들은 alnico에 속한다. 왜냐하면, 야금학적으로 그들은 Co를 함유한 합금과 유사한 성질을 갖고 있기 때문이다.

Alnico의 주형태는 1에서 9까지 번호가 붙여져 있다. Alnico 합금은 주조 혹은 소결 중 어느 한 방법에 의해서 제조된다. 일반적으로 주조법에 의해서 제조된 자석은 어느 정도 좋은 자기 특성을 갖게 된다. 소결법에서 제조된 재료는 값이 싸다는 장점을 갖고 있다. 특히 소결법은 작은 자석을 대량 생산하는데 적합하다. 모든 alnico 재료에서, 최적 자기적 특성은 spinodal 분해가 일어난 후에 부여된다. 이는 매우 미세하게 상호 혼합된 상을 갖는 2상 구조 때문에 생긴다. 한 상은 주로 Fe 혹은 Fe-Co로 구성되고, 다른 한 상은 Ni-Al으로 구성된다. 두 상은 모두 bcc 구조이고 일반적으로 각각  $\alpha_1$ (Fe-Co 풍부)과  $\alpha_2$ (Ni-Al 풍부)로 불리어진다. 미세조직의 형태는 alnico 종류마다 다르다. 모든 경우에 Fe 혹은 Fe-Co상은 강한 자기적 특성을 나타낸다. Ni-Al상은 약자성인지 혹은 비자성인지 아직 확실치 않지만 적어도 어떤 합금에서는 약자성을 나타낸다. 어떤 주어진 시편에서, 상의 조직 형태와 조성은 열처리에 의해서 변할 수 있다. 어떤 조성은 가역적으로도 일어난다. 초기 단계에서 개발된 alnico(alnico 1, 2, 3, 및 4)에서, 최적 자기적 특성은 적당한 열처리에 의해서 유지되었다. 열처리의 주된 단계는 600 °C ~ 700 °C에서 템퍼링(tempering)한 후 냉각이나 퀴칭(quenching)을 하는 것이다. 이들 합금의 어떤 것도 Co를 함유하지 않으나 Co 혹은 적은 양의 Cu가 유용한 효과가 있다는 것이 알려지면서 이들 합금이 첨가되기 시작했다. 어떤 합금은 Ti을 첨가하는데, 이는 일반적으로 보자력을 증가시키거나 alnico의 잔류자화량을 감소시킨다. 이는 열처리로 인해  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 상으로 spinodal 분해를 일으키기 때문이다.

어떤 합금에서  $\alpha_1$  상은 <100> 방향으로 늘어져 있으나, 결정학적으로는 그 방향에 대해 우선적이지 않으므로 재료는 등방향이며, 그들의 자기적 특성은 자장이 걸리는 방향에 무관하다. 이들 alnico 중 가장 좋은 자기적 특성

을 나타내는 재료는 잔류자화량  $M_r = 6285 \text{ G}$ , 보자력  $H_c = 880 \text{ Oe}$ , 및 최대 에너지적  $U_{\max} = 119.4 \text{ MGOe}$ 를 보인다. 좀더 개선된 자기적 특성은 다음 3가지 방법에 의해 얻을 수 있다. 첫째는 자장 열처리(자장이 걸린 상태에서의 열처리), 둘째는 조성 변화 및 셋째는 방향성 결정립 성장 등이 그것이다.

오늘날 대부분 alnico 재료(alnico 5, 6, 8, 및 9)는 7~8.5 % Al, 12~16 % Ni 및 2~4 % Cu를 함유한다. Co 함량은 23 %부터 40 %까지 변하고, Ti는 0~8 %까지 변한다. Alnico 5, 6, 8, 및 9는 자장 열처리에 의해서 제조되고, 그것의 효과는 입자를 길게 늘어뜨리기 위해 3개의  $\langle 100 \rangle$ 방향 중 하나를 우선 배향시키는 것이다. 자기적 성질은 열처리하는 동안 걸어준 자장의 방향에 따라 달라지므로 이들 재료들은 자기 이방성 재료이다. Alnico 5는 Ti를 거의 함유하지 않는 불규칙 결정립 재료로서  $M_r = 12,570 \text{ G}$ ,  $H_c = 628.5 \text{ Oe}$ , 및  $U_{\max} = 318.4 \text{ MGOe}$ 를 갖는다. Alnico 6은 어느 정도 Ti를 함유하며 좀더 높은 보자력과 좀더 낮은 에너지적을 보인다. Alnico 8은 alnico 5와 유사한 에너지적을 가지며, 좀더 높은 보자력(약 1634 G)과 낮은 잔류자화량을 나타내며, 이는 Co와 Ti량을 증가시킴으로써 얻어진다.

Alnico 5와 alnico 8에 해당하는 재료는 방향성 결정립을 성장시키면 자기적 성질이 개선된다. Alnico 8을 방향성 결정립 성장을 시킨 재료를 alnico 9라 부르며, 이것은 597 MGOe 만큼 높은 에너지적을 갖는데, 이것은  $\langle 100 \rangle$ 의 우선 방위가 요구된다. 또한 열처리시에 이  $\langle 100 \rangle$ 의 방향에 평행하게 자장을 걸어주어야 한다.

### 3. 2. 희토류 Co 합금

1970년대 초에 고성능 자석을 요구하는 응용분야에서 Pt-Co 합금 대신 희토류-Co 합금이 사용되게 되었다. 이 재료의 개발은 많은 기초연구의 결과로써, 희토류 원소와 천이금속을 함유하는 많은 합금들의 자기적 성질이 조직적으로 연구되었다. 수많은 희토류 및 3개의 자기 천이금속과 결합되어지

는 관련 원소들뿐 아니라 각 이원계 합금에서 안정한 금속간 화합물이 존재하는 많은 조성이 있다.

천이금속 중 Co 합금이 일반적으로 더 높은 이방성을 나타내기 때문에, Co가 가장 장래성 있는 원소로 알려졌다. 희토류 원소 중 원자번호 58(Ce)부터 62(Sm)까지 좀더 가벼운 원소가 더욱 유용하였는데, 이는 Co를 함유한 이들 합금은 다른 재료들보다 높은 포화자화량을 나타내기 때문이다. 이들 합금 중 어떤 것은 영구자석으로 적합하지 않은 음성 이방성에 기여하는 것으로 알려졌다. 그러므로 영구자석으로의 가능한 합금의 수는 상당히 감소한다. 영구자석을 만드는데 가능한 재료라 하더라도, 이들 재료로부터 분말자석을 만들 때, 그들의 대부분은 이론 보자력보다 훨씬 낮은 보자력을 갖는다. 그러나  $\text{SmCo}_5$  합금만은 다른 자석들보다 월등히 우수한 특성을 갖는 것으로 나타났다. 보자력이 최대값에 도달한 후 다시 감소하는 다른 재료들과는 달리  $\text{SmCo}_5$ 의 보자력은 입자의 크기가 감소함에 따라 증가한다.

1970년대 초에는  $\text{SmCo}_5$ 를 제조하는 많은 방법들이 개발되었다.  $\text{SmCo}_5$ 에서 희토류 원소량이 아주 적은 것은 아니고 그들은 서로가 혼합물을 형성하며, 그들의 유사한 화학적 성질 때문에 그들이 서로 분리되기가 매우 어렵다. 그러나 경제적으로  $\text{SmCo}_5$ 자석을 만들기 위해서 1970년대까지 분리기술이 충분히 개선되었다.  $\text{SmCo}_5$  재료를 다루는데 주요 문제점은 그 재료가 화학적으로 불안정하다는 것이며, 특히 분말 형태일 때 더욱 그러하다.

$\text{SmCo}_5$ 는 높은 단축 이방성, 상당히 높은 큐리온도(약  $720^\circ\text{C}$ ) 및  $9679\text{ Oe}$ 의 포화자화량을 갖는 육방정구조를 갖는다. 이 재료의 최대 이론 보자력은 적어도  $201.12\text{ kOe}$  인데, 실제 보자력은  $B_{Hc} = 9553.2\text{ Oe}$ ,  $M_{Hc} = 37.71\text{ kOe}$ 이다. 이 값은 최대 보자력에 비하여 매우 적지만 아직도 매우 유용한 자석이다. 최대 에너지적은 약  $1592\text{ MGOe}$ 이고 잔류자화량은 약  $9804.6\text{ G}$ 이다.

$\text{SmCo}_5$  자석을 마드는데 중요한 단계는 분쇄와 소결과정이다. 자기적 성질에 악영향을 주는 주위 환경과의 화학적 반응으로부터 합금을 보호하고 또한 다른 금속간 화합물의 형성을 막기 위한 여러 가지 방법이 개발되었다.

SmCo<sub>5</sub> 자석은 또한 고분자 결합(polymer-banded) 형태로 생산될 수 있다. 연구되고 있는 다른 가능성은 약간의 Co량을 Cu로 대체하는 것이다. Cu 치환형 합금에서, 비자성 석출이 일어날 수 있고, 그것은 자구의 고착 현상에 의해 보자력을 증가시킨다. 그러나 이 가능성은 폭넓게 연구되고 있지 않다. Sm을 좀더 풍부한 희토류 원소 중의 하나로 대체할 수 있는 가능성에 대해 많은 연구가 수행되고 있다. Ce-Co 및 mischmetal-Co 합금은 SmCo<sub>5</sub> 자석의 특성과 비교되지 않는다. 그러나 최근에 좀더 유망한 재료가 개발되고 있다. Zr 및 Hf과 같은 원소를 첨가한 Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> 화합물에 기초를 둔 우수한 자기적 성질을 갖는 재료들이 개발되었다. 재료와 Sm을 좀더 가격이 싼 원소로 대체된 우수한 자기적 특성을 갖는 재료가 개발되고 있다. 가장 우수한 자기적 특성을 갖는 합금의 자기적 특성은  $M_r = 11941.5 \text{ G}$ ,  $B_{Hc} = 10056 \text{ Oe}$  및  $U_{\max} = 2070 \text{ MGOe}$ 이다. 이들 자석은 SmCo에 비하여 보자력보다는 잔류자화량이 증가된 것이다.<sup>6,7</sup>

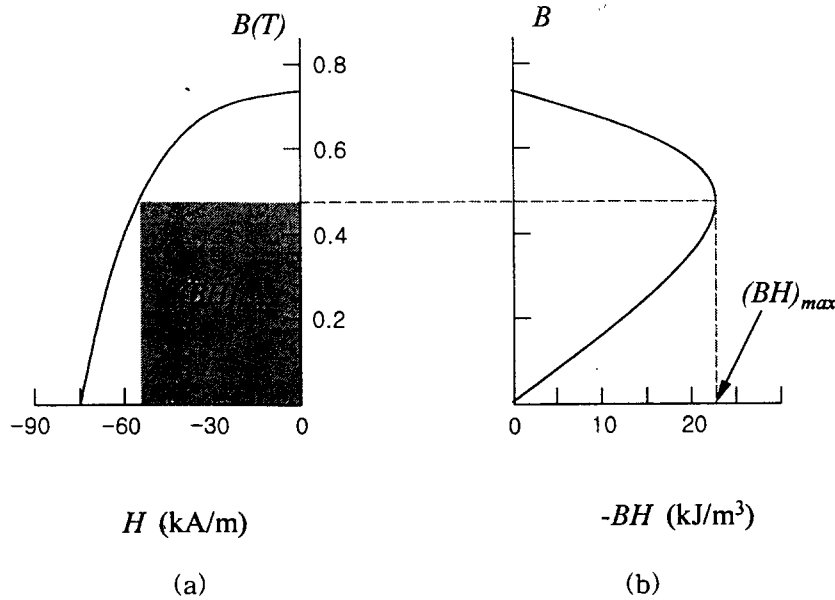
#### 제 4 절 최대 에너지적

영구자석은 B-H 곡선의 2상한 구간의 곡선을 가지고 특성평가를 하게 된다. 이 구간의 곡선을 탈자 곡선이라 부르며, 이 곡선의 면적은 자석의 부피당 저장된 에너지를 나타낸다. 따라서 탈자 곡선의 면적이 넓을수록 우수한 영구자석이라 할 수 있다. 따라서 보자력과 잔류자화가 높을수록 영구자석으로 사용되기에 바람직하다.

잔류자화 혹은 보자력 중 어느 하나가 높고 나머지가 낮은 탈자 곡선을 갖는 재료는 영구자석으로 좋지 않다. 보자력이 낮은 경우, 그 재료는 보자력보다 높은 자장이 존재하는 곳에서 자석의 특성을 상실할 수 있다. 낮은 잔류자화를 나타내는 재료는 낮은 자석의 힘을 나타낸다. Alnico 자석의 탈자 곡선을 (그림 2-7)(a)에 나타냈고, H에 따른 -BH를 (그림 2-7)(b)에 나타냈다. H에 따른 -BH값이 어느 특수한 H값에서 최대가 되는데, 이것을 최대



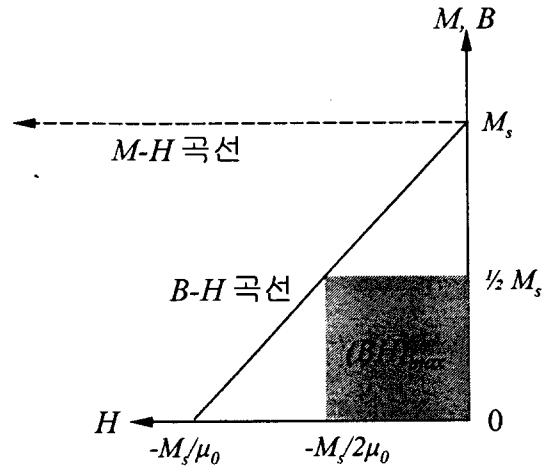
에너지적이라 하고  $(BH)_{max}$ 로 표시한다. 단위 부피당 높은  $(BH)_{max}$ 를 나타내는 재료가 영구자석용 재료로 사용되기에 적당하다.



(그림 2-7) (a) demagnetization curve of Alnico magnet.  
(b)  $-BH$  curve about  $H$  of (a).

문제는 어떻게  $(BH)_{max}$ 를 증가시킬 것인가에 있다. 앞서서도 언급한 바와 같이 잔류자화와 보자력을 동시에 증가시켜야 하는데, 이를 위해  $(BH)_{max}$ 를 증가시키는데 한계가 있다. (그림 2-8)에서처럼 각형의 자화 곡선을 가지고 무한한 고유 보자력을 갖는 재료의 탈자 곡선을 고려해 보자.

가장 높은 잔류자화  $B_r$ 은  $M_c$ 값이고, 고유 보자력  $H_{ci}$ 가 무한히 큰 값을 갖는다면,  $H_c$ (일반적으로 말하는 보자력)는  $B_r/\mu_0 (= M_s/\mu_0)$ 이다. 이 경우에 탈자 곡선은 직선이고 최대 에너지적은  $B = 1/2B_r$ 과  $H = -B_r/(2\mu_0)$ 에서 얻어지므로  $(BH)_{max} = B_r^2/(2\mu_0)$ 으로 된다. 이것은 최대 에너지적의 상한값이다. 어떤 재료라도 이 값을 초과할 수 없다.



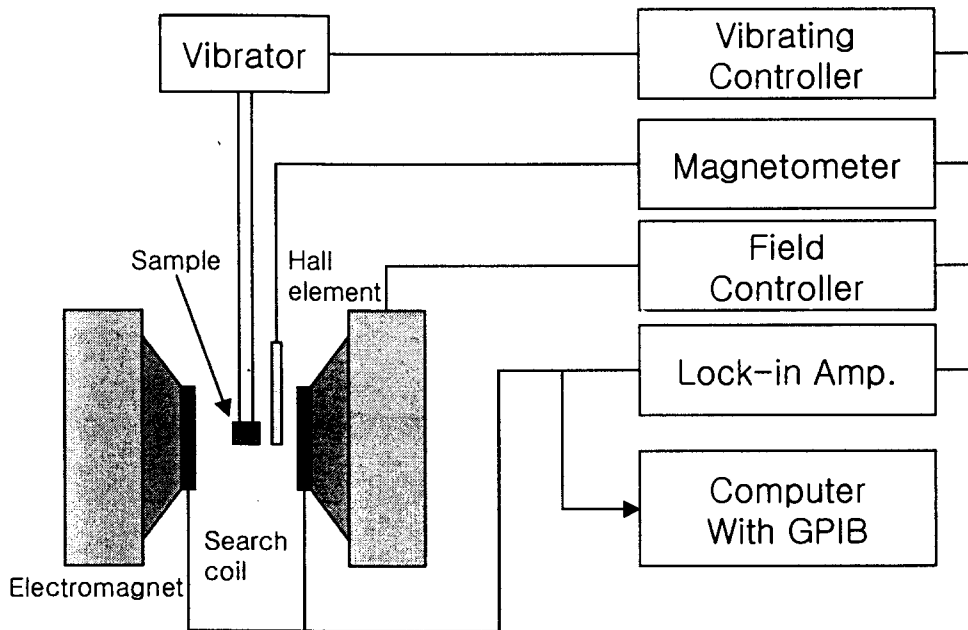
(그림 2-8) The demagnetization curve when  $H_{ci}$  increase unlimited.

자석의 자기적 특성은 자기 입자의 우선 방위 즉, 자화 용이축의 우선 방위에 의해 개선될 수 있다. Alnico 자석의 경우, 상자성 기지내 강자성 입자가 어떤 방향으로 배열하느냐에 따라 자석의 성질이 변화된다. 자발자화의 방향에 강자성 입자의 긴 축을 배열시키기 위한 한 가지 방법은 주조(casting)후 자장 내에서 alnico 재료를 냉각시킴으로써 얻을 수 있다. Ceramic 자석은 미세한 분말을 만든 후 일정한 형태를 얻기 위해 다이(die) 내에 넣고 교류 자장을 걸어주면서 미세 분말을 진동시키면 우선 방위가 얻어지는데 이때 압력을 가하여 얻고자 하는 형상을 만들 수 있다. 이 방법에 의해 우선 방위를 갖는 헥사 페라이트(hexa ferrite) 자석이 얻어지는데 이는 무방위를 갖는 재료보다 2배의 잔류자화를 얻을 수 있는데 그로 인해 4배의 최대 에너지적  $(BH)_{max}$ 을 얻을 수 있다.<sup>5</sup>

### 제 3 장 실 험

#### 제 1 절 탄소강관의 기초자기특성측정

냉각수배관으로 사용하는 탄소강(SA106 Gr.C)의 자기적특성은 진동시료형 자력계(Vibrating Sample Magnetometer)를 이용하여 측정하였다. (그림 3-1)은 진동시료형 자력계의 개략도이다.



(그림 3-1) Schematic diagram of vibrating sample magnetometer

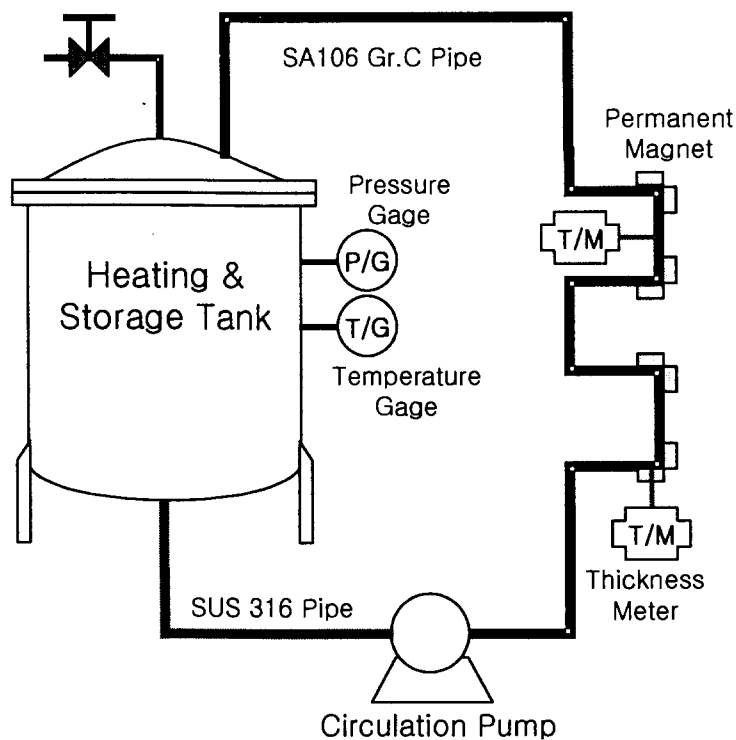
포화자속밀도 측정시 최대 10 kOe의 자장을 인가하였으며, 탄소강배관의 자기적 특성의 온도의존성을 보기 위하여 상온에서부터 300 °C까지 온도를 증가시키면서 측정하였다.

## 제 2 절 적용 영구자석의 선정 및 평가

본 연구에 사용한 영구자석은 정자계 해석 프로그램(Magnet. ver 5.3)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 선정하였고, B-H tracer를 이용하여 영구자석의 특성을 평가하였다.

## 제 3 절 실험장비제작

본 연구의 수행을 위한 자기장에 의한 탄소강관의 감육방지 실험장치는 원자력발전소의 냉각수배관과 동일한 SA106 Gr.C 탄소강을 사용하여 자체 제작하였다. Fig. 3-2는 실험장치의 개략도이다.

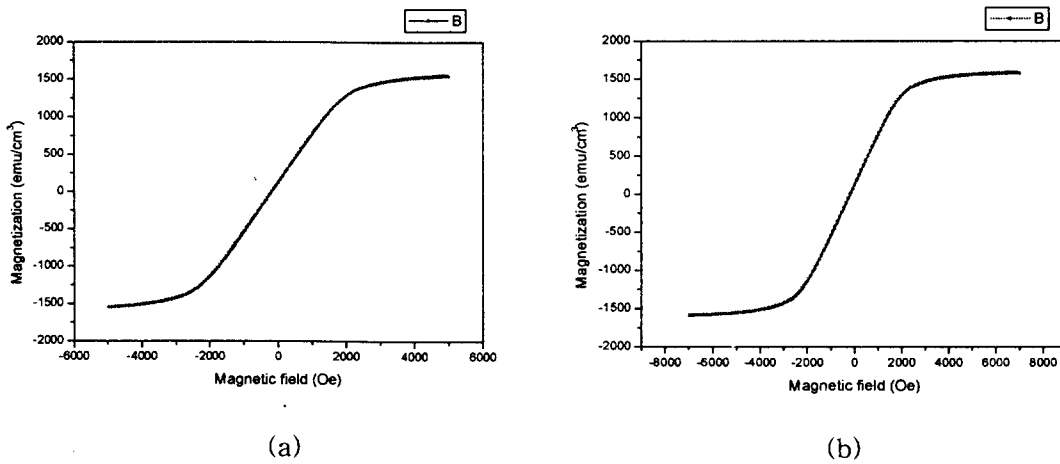


(그림 3-2) Schematic diagram of Carbon Steel Diminution Measurement System.

## 제 4 장 실험결과 및 실험장비제작

### 제 1 절 탄소강의 자기적 특성

탄소강배관의 온도변화에 따른 자기적 특성의 변화를 살펴보기 위하여 상온에서부터 300 °C까지 온도변화에 따른 M-H 곡선을 조사한 결과는 (그림 4-1)과 같다.

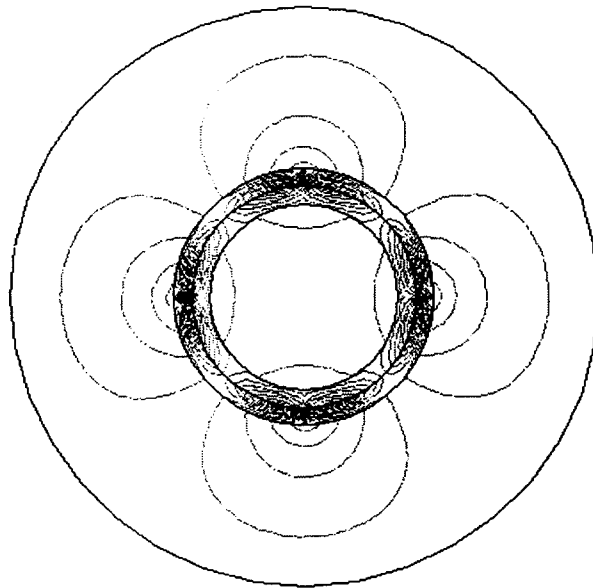


(그림 4-1) Magnetization curves of carbon steel(SA106 Gr.C) depending on the temperature. (a)  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (b)  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

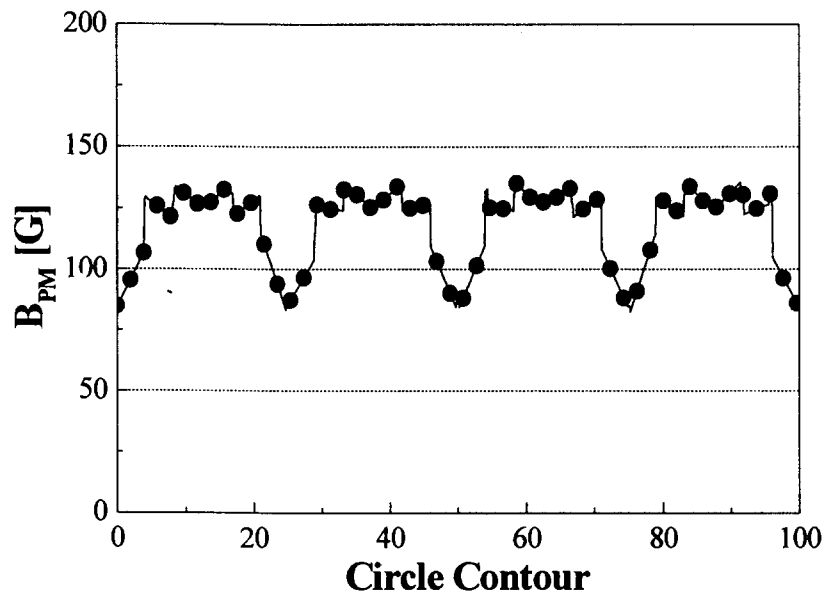
(그림 4-1)에서  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때와  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때의 자기이력곡선의 변화는 거의 차이가 없다. 이로써 냉각수배관이 사용되는  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도는 탄소강배관의 자기적 특성에 아무런 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

## 제 2 절 영구자석특성 시뮬레이션

내부관의 직경이 3[mm], 외부의 자석 두께가 3[mm], 영구자석의 종류는 Alnico로  $B_r = 12000$  G,  $H_c = 700$  Oe의 특성을 입력하였다. (그림 4-2)는 영구자석의 각 편에서 안쪽의 극이 NSNS 순서로 자화시켰을 때 자속분포도이다. (그림 4-2)에서 영구자석과 영구자석 사이의 공간과 영구자석과 배관사이의 공간은 0으로 결합제(Bond)의 공간은 무시하였다. (그림 4-2)에서 탄소강배관 안쪽에서의 자속밀도는 매우 낮게 나타났다. 이것은 배관자체가 강자성체이므로 자속분포가 배관에 집중되었기 때문이다. (그림 4-3)은 배관 표면(원점에서 16 mm)에서 등심선(Contour)을 그렸을 때 그 위치에서 자속밀도값입니다. 등심선(Contour)의 길이는  $16 \times 2\pi \approx 100$  mm로 설정하였다. (그림 4-3)에서 각 자석이 서로 마주하는 양 끝단에서의 자속밀도는 약 130 G로 일정한 값을 가지며, 각 자석 원호의 중심에서는 자속밀도가 약 80 G로 떨어지는 것을 알 수 있다.



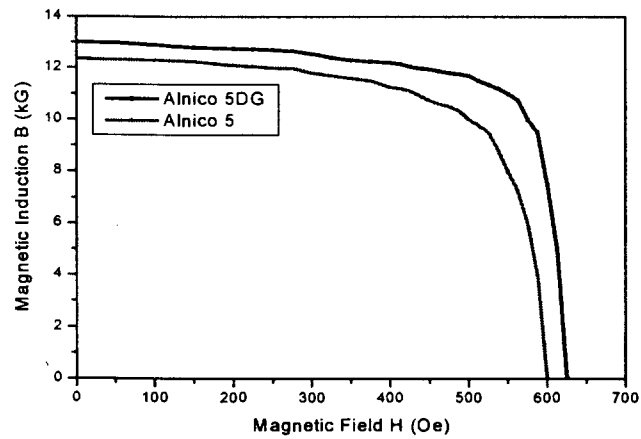
(그림 4-2) Magnetic flux density in the carbon steel.



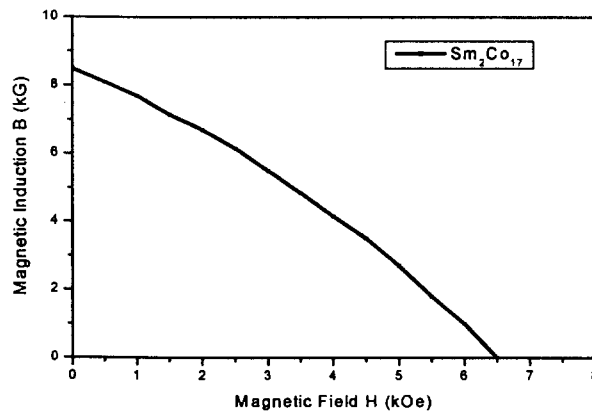
(그림 4-3) Magnetic flux density value when contour was made on the carbon steel pipe surface.

### 제 3 절 영구자석의 자기적 특성

본 연구에 사용한 영구자석의 자기적 특성을 (그림 4-4)에 나타내었다. 본 연구에서는 Alnico 5DG와 Alnico 5 및  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  영구자석을 각각 사용하였다.



(a)



(b)

(그림 4-4) Magnetic induction of permanent magnet. (a) Alnico permanent magnet.

(b)  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  permanent magnet.

Alnico 5DG 및 Alnico 5의 잔류자화는 각각  $B_r = 13,000$  gauss,  $B_r =$

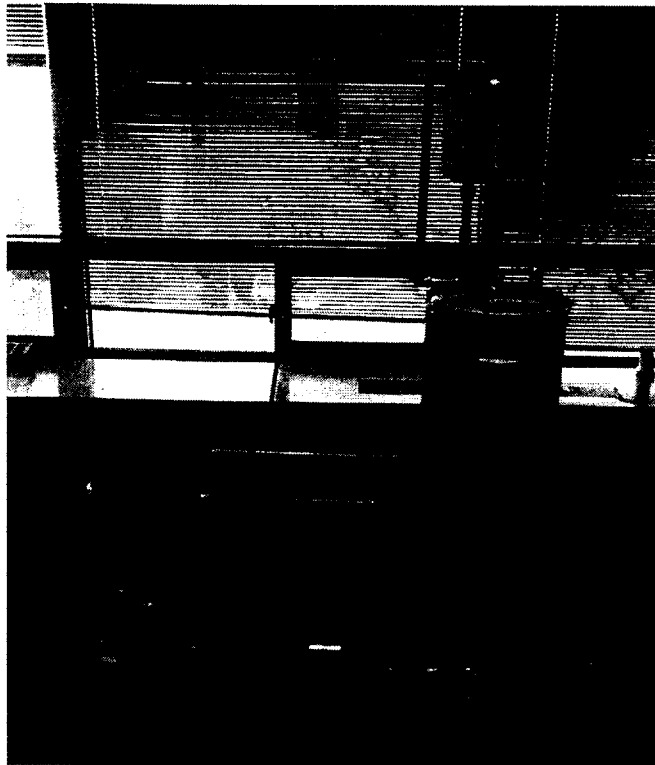


12,500 gauss 이고, 보자력은 각각  $H_c = 650$  Oe,  $H_c = 600$  Oe 였다. Alnico 5DG 및 Alnico 5의 최대에너지적은 각각  $(BH)_{max} = 6.0$  MGOe,  $(BH)_{max} = 5.0$  MGOe 였다.

$Sm_2Co_{17}$ 의 잔류자화는  $B_r = 8,500$  gauss, 보자력은  $H_c = 6,500$  Oe 이었고, 최대에너지적은  $(BH)_{max} = 16.0$  MGOe 였다.

#### 제 4 절 실험기기제작

본 실험에서 사용한 탄소강관의 감속방지 실험장치는 자체에서 제작하였다. (그림 4-5)에 제작한 실험기기를 나타내었다.



(그림 4-5) Carbon steel pipe diminution system

실험수를 가열하기 위해서 온수기(MI30R6DS13, BRADFORD WHITE Co.

USA)를 사용하였고, 초기급수 및 보충액 급수를 위해서 보조탱크를 장착하였다. 실험배관은 원자력발전소에서 사용하는 배관과 동일한 SA106 Gr.C 배관을 사용하였고, 같은 재질의 elbow관을 이용하여 각 배관을 연결하였다. 실험수의 지속적인 순환을 위해 순환모터(20NPD07, Nikuni Japan)를 사용하였다. 탄소강관의 감속방지를 위해 사용할 영구자석 및 초음파 두께 탐지기는 배관에 접촉하여 사용하였다.

## 제 5 장 결 론

탄소강배관의 감육완화를 위한 실험으로 탄소강배관의 자기적 특성 및 응용 가능한 영구자석의 특성을 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 냉각배수관으로 사용되는 탄소강배관(SA106 Gr.C)의 포화자화값은 상온일 때와  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일 때,  $M_s \approx 1500\text{ emu/cm}^3$ 으로 서로 거의 같은 값을 나타내어  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서도 자기적 특성의 변화는 없음을 알 수 있었다.

2. 정자계 해석 프로그램을 통한 영구자석의 성능 모의실험에서 영구자석의 자속분포는 대부분 탄소강배관의 내부에 집중됨을 알 수 있었으며, 영구자석의 원호중심에서 자속밀도값이 약  $\frac{2}{3}$ 정도로 감소함을 알 수 있었다.

3. 응용 가능한 영구자석으로 Alnico 5DG 및 Alnico 5를 선정하여 자기적 특성을 조사한 결과, 잔류자화 Br은 각각 13,000 gauss, 12,500 gauss, 보자력 Hc는 각각 650 Oe, 600 Oe, 최대에너지적은 각각 6.0 MGOe, 5.0 MGOe의 값을 나타내었다.

4. 원자력발전소에서 냉각수배관으로 사용하는 탄소강배관(SA106 Gr.C)을 이용하여 원자력발전소의 배수환경과 유사한 실험장치를 자체 제작하였다.

## 참 고 문 헌

1. B. Poulson, *Corr. Sci.*, **23**, 4, 391 (1983)
2. S. Zhou, M. M. Stack, and R. C. Newman, *Corr. Sci.*, **38**, 7, 1071 (1996)
3. J. A. Ewing, *Magnetic Induction in Iron and Other Metals*, The Electrician Printing and Publishing Co., 3d ed. 393 (1900)
4. H. Zijlstra., *Experimental Methods in Magnetism*. Wiley., (1967)
5. 김영희., 자기 및 자성재료, 반도체출판사 (1997)
6. B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley Publishing Co., (1972)
7. D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman and Hall, London, (1991)

## 서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호		
KINS/HR-365			
제목/부제	자성을 이용한 탄소강배관의 감육완화방안 연구		
연구위탁기관 과제명 및 과제책임자	자성을 이용한 탄소강배관의 감육완화방안 연구 김 종 오		
연구자 및 부서명	충남대학교 공과대학 재료공학과 김 종 오		
발행지	발행기관	충남대학교	발행일
			2001. 3. 31.
페이지	34 p.	도표	유 ( ○ ), 무 (   )
			크기
			21 × 29.7 cm.
참고사항			
비밀여부	공개( ○ ), 비공개(   )	보고서 종류	
연구위탁기관	한국원자력안전기술원	계약 번호	RS00-26-PL
초록 (200단어 내외)	<p>원자력발전소에서 냉각수배관으로 사용하는 탄소강관의 감육방지에 대한 연구를 위해 탄소강관의 자기적 특성을 조사하였다. 자기장이 인가된 상태에서의 탄소강관의 자장분포를 조사하기 위해 컴퓨터를 이용하여 모의실험하였다. 모의실험의 결과를 바탕으로 응용가능한 영구자석으로 Alnico 5DG 및 Alnico 5를 결정하였고, Sm2Co17 자석으로 비교하였다. 탄소강관의 감육상태 및 감육방지 연구를 위하여 원자력발전소의 냉각수 배수환경과 유사한 실험장치를 제작하였다.</p>		
주제명키워드(10단어 내외)	냉각수배관, 감육, 자기장, 영구자석		

## BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		
KINS/HR-365			
Title/Subtitle	<p>A Study on the impediment of Thickness diminution of Carbon Steel Tube by Using Applied Magnetic Field</p>		
Sponsoring Org. Project and Project Manager	Jong-Oh Kim, A Study on the impediment of Thickness diminution of Carbon Steel Tube by Using Applied Magnetic Field		
Researcher and Dep't.	Jong-Oh Kim, Dep't. of Material Engineering, Chungnam Nat'l. University		
Pub. Place	Pub. Org.	Chungnam Nat'l University	Pub. Date
			2001. 3. 31
Page	34 p.	Il. and Tab.	Yes ( <input type="radio"/> ), No ( <input type="radio"/> )
			Size
			21 × 29.7 cm.
Note			
Classified	Unclassified( <input type="radio"/> ), Classified( <input type="radio"/> )	Report Type	
Sponsoring Org.	KINS	Contract No.	RS00-26-PL
Abstract (About 200 Words)	<p>Magnetic properties of the carbon steel tube which is used as the pipe laying of cooling water in nuclear power plant were measured to research the impediment of thickness diminution of carbon steel tube. Magnetic field distribution of carbon steel tube in the applied magnetic field was simulated by computer program. On the basis of the simulation results, Alnico 5DG and Alnico 5 were selected as the permanent magnets applicable to the carbon steel tube. Sm2Co17 magnet was used to compare the performance of permanent magnets. The experimental apparatus similar to the draining environment of cooling water in nuclear power plant was also manufactured in order to research the impediment of thickness diminution of carbon steel carbon tube.</p>		
Subject Keywords (About 10 Words)	<p>Cooling water pipe, Thickness diminution, Magnetic Field, Permanent Magnet</p>		