

## 칠러(Chiller) 냉각장치 침전물에 미치는 마그네슘의 영향에 관한 환경 광물학적 연구

### Environmental Mineralogy on the Mg Effects of Chiller Precipitates

김 정 진 (Jeong Jin Kim)<sup>1,\*</sup> · 김 윤 영 (Yoon Young Kim)<sup>2</sup> ·  
장 세 정 (Sea Jung Chang)<sup>3</sup> · 장 윤 득 (Yun Deuk Jang)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과  
(Department of Earth & Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

<sup>2</sup>중앙대학교 산업경영연구소  
(Korean Ginseng Institute, Chung-Ang University, Ansung 456-756, Korea)

<sup>3</sup>(주)디지털워터  
(Digital Water Co., Ltd., 4 Human Techno BI Center, Chung-Ang University, Ansung 456-756, Korea)

<sup>4</sup>경북대학교 지질학과  
(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

**요약** : 산업체에서 사용하고 있는 칠러 냉각 장치에는 침전물이나 부유물이 많이 발생한다. 칠러 냉각장치에 마그네슘을 적용시켰을 때 나타나는 냉각수와 침전물 및 부유물의 변화를 연구하기 위하여 ICP-AES, IC, XRD, SEM 분석을 실시하였다. 칠러 냉각장치에 Mg를 적용할 경우 대부분의 용해 성분이 감소하는 경향을 보여주고 있어 냉각수의 수질이 상당히 개선되었다. 또한 유기물 형태로 존재하던 부유물이나 침전물이 거의 생성되지 않아 유기물 생성을 억제시키는 효과도 있는 것으로 판단된다.

**주요어** : 칠러, 냉각장치, 침전물, 부유물, 마그네슘, 유기물

**ABSTRACT** : It is common to find lots of organic and inorganic precipitates inside of industrial cooling system. Analytical instruments including ICP-AES, IC, XRD, and SEM were used to investigate the effects of application of Mg on reaction among coolant, precipitates and suspended matters within chiller system. Magnesium (Mg) has a decreasing effect on total dissolved material in the coolant suggesting a significant improvement of quality of coolant. Disappearance of most organic materials in the cooling devices also suggests an inhibitive effect on the growth of organic matters.

**Key words** : chiller, cooling system, precipitates, suspended matters, magnesium, organic materials

\*교신저자: jjkim@andong.ac.kr

## 서 언

산업체에서 제품을 생산하는 과정에는 많은 열이 발생하게 되며, 이를 냉각시키기 위해서는 냉각수를 사용하게 된다. 대부분의 경우 사용한 냉각수는 그대로 버리는 것이 아니라 회수하여 다시 사용한다. 회수된 냉각수는 온도가 높기 때문에 다시 온도를 낮추는 시설이 필요한데 이때 더워진 냉각수를 모아 냉각시키는 장치를 칠러(Chiller)라고 한다. 칠러 냉각 장치의 냉각수는 계속 순환을 하며 이 과정에서 냉각수가 소실되는 경우는 그 만큼의 양을 외부에서 보충해 줄 수 있도록 설계되어 항상 일정한 양을 유지시켜 준다. 일정한 양의 냉각수로 채워져 있는 칠러 냉각 장치의 탱크 내부에는 다양한 종류의 부유물과 침전물이 형성되고 있으며 이를 제거하기 위하여 주기적으로 세척을 해주어야 한다. 냉각수가 흐르는 배관은 내벽에 생성되는 스케일 문제 때문에 약 5년을 주기로 전체 배관 라인을 교체해야하기 때문에 냉각장치 내의 부유물 및 침전물에 대한 연구가 매우 중요하다.

이에 관한 국내연구는 비교적 최근에 와서야 활발히 진행되고 있다. 배관 내벽에 존재하는 스케일에 대한 연구에서 스케일은 배관 자체의 산화작용에 의해 형성된 철산화/수산화 광물과 물속에 존재하는 이온들의 반응에 의해 생성되는 탄산염이나 규산염 광물로 이루어진 것으로 보고된 바 있다(김정진과 김윤영, 2002b). 온천이나 지하수에도 수질의 지화학적 특성 변화에 따라 다양한 형태의 침전물이 형성되는데 이에 대한 연구로는 김정진 등(2004), 김정진과 김윤영(2002a), 김윤영과 김정진(2001), 김건영 등(2000)에 의해 수행된 바 있다. 그 외에 스케일 형성에 관한 연구(권혁철 등, 2004; 심재주 등, 2003), 배관부식과 부식억제에 대한 연구(김윤영 등, 2002; 김윤영 등, 2003; 박재현 등, 2003; 전경수와 고영태, 1996; 홍성욱과 안형환, 2004; 김정진 등, 2004) 등이 있다. 그러나 이처럼 지금까지의 연구는 주로 배관 자체에 대하여 금속의 부식에 대한 접근 방법으로 진행되고 있으며 배관내벽의 스케일이나 저수탱크의 침전물에 대한 연구는 문제성은 많이 제기되고 있으나 체계적인 연구는 아직 부족한 편이다.

본 연구에서는 마그네슘 금속 설치 전 후의 냉각수의 수질변화와 칠러 내부에 생성되는 침

전물의 특성 변화를 연구하고, 침전물 변화에 대한 마그네슘의 영향에 대해서 알아보았다.

## 연구 방법

### 칠러의 구성과 마그네슘 실험 장치

일반적으로 칠러 냉각장치는 유입수에 의해 채워진 저수탱크 내부에 설치된 냉각장치에 의해 냉각된 물이 펌프를 통하여 고열이 발생하는 기계시설로 흘러 가열된 기계를 식힌 후 다시 저수 탱크로 되돌아오도록 설계되어 있다. 마그네슘 실험 장치는 물이 통과할 수 있도록 마그네슘 봉에 흡을 파서 원통형의 황동관 내부에 고정시킨 후 배관에 설치를 쉽게하기 위하여 장치의 양끝 부분은 플렌지를 부착시켰다(그림 1). 이렇게 제작된 마그네슘 실험 장치는 가열된 기계를 냉각시킨 후 칠러 냉각장치로 되돌아오는 라인에 설치하여 칠러 침전물과 배관의 스케일의 변화 상태를 연구하였다.

### 물분석

마그네슘 장치를 설치하기 전 후의 칠러 냉각수 변화를 관찰하기 위하여 현장에서 pH, 전기전도도(EC) 등을 Orion 1230 pH-EC 측정기로 측정하였다. 양이온과 음이온 분석용 시료는 0.45  $\mu\text{m}$  membrane filter를 이용해서 부유물을 제거시켰다. 채수한 시료의 양이온은 Perkin-Elmer Optima 3000XL 유도쌍극자플라즈마분광분석(ICP-AES), 음이온은 Dionex 4000i 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석하였다.

### 침전물 분석

칠러 내부에 침전되는 침전물에 대한 구성 광물들을 감정하기 위하여 Rigaku Geigerflex RAD3-C를 이용하여 X-선 회절 분석을 실시하였으며, 분석조건은  $\text{CuK}\alpha$  선을 이용하여 1°/min (연속)로 측정하였다. 침전물을 구성하는 물질의 형태를 조사하기 위하여 쌍안실체현미경과 주사전자현미경(SEM)관찰 및 쌍안실체 현미경 관찰을 실시하였다.

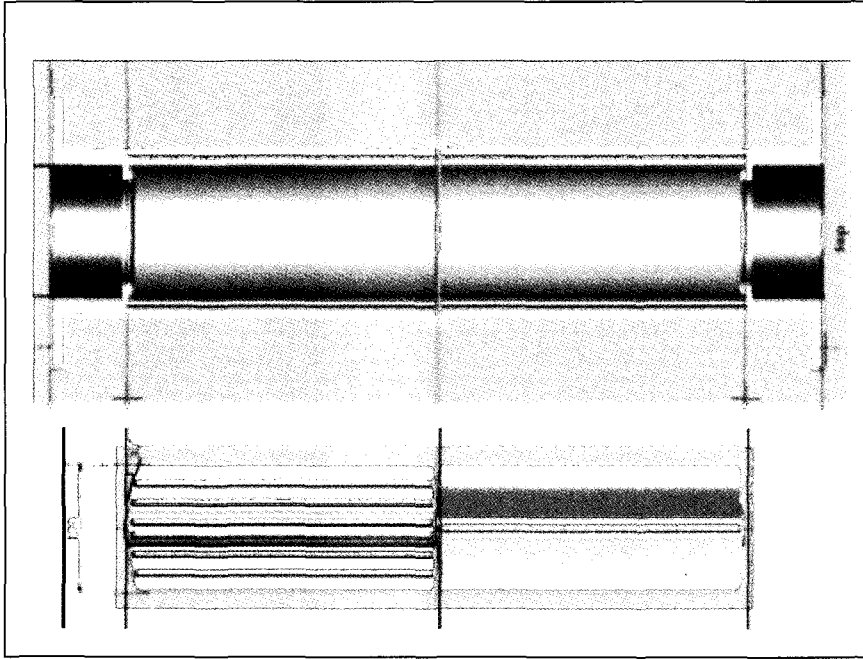


Fig. 1. Experimental equipment for application of Mg.

## 연구 결과

### 물시료의 화학적 특성 비교

가열된 기계를 냉각시키는 데 사용하는 냉각수의 원수는 수돗물을 이용하고 있으며 대분의 성분은 우리나라에서 공급되는 수돗물과 유사한 값을 갖고 있다. 표 1은 냉각수 원수로 사용하고 있는 수돗물 시료(M1), 냉각수에 압력을 가해 기계로 보내는 양수기를 통과한 시료(M2), 일반 칠러 시료(M3), Mg를 적용한 칠러 시료(M4)에 대한 화학 분석값을 나타낸 것이다. 그림 2는 냉각수 원수로 사용하는 수돗물과 양수기, 일반칠러, Mg를 적용했을 때 각 성분들의 변화를 나타낸 그래프이다.

### pH

냉각수 원수로 사용하는 수돗물은 대부분의 다른 수돗물과 비슷한 pH 7.61로 중성에 가깝다. 유기물의 침전이 많이 생기는 일반 칠러에서 채취한 시료는 pH 7.10으로 수돗물보다 약간 낮게 나타나지만 유기물의 침전이 거의 생성되지 않는 Mg를 적용한 시료는 7.73으로 높은

경향을 보여준다. 일반 칠러에서 수돗물보다 pH 값이 낮아지는 것은 칠러 내부에서 생성된 유기물의 영향으로 인하여 낮아졌을 가능성이 있다. Mg를 적용한 칠러에서 채취한 시료는 침전물 자체도 일반 칠러와 아주 상이할 뿐 아니라 pH 값의 상승과 유기물 생성을 억제시키는데 큰 역할을 담당하는 것으로 추측된다.

### 전기 전도도(EC)

Mg를 적용한 시료(M4)와 유기성 부유물이 많이 존재하는 일반 칠러 시료(M3)에서 전기전도도는 각각  $256 \mu\text{S}/\text{cm}$ 와  $580 \mu\text{S}/\text{cm}$ 로 냉각 원수인 수돗물(M1)보다 상당히 높게 나타난다. 이것은 냉각 원수인 수돗물이 냉각라인을 통과하면서 많은 양의 이온들이 칠러 냉각수에 부가되었다는 것을 의미한다. Mg를 적용한 시료에서 일반 칠러보다 낮게 나타나는 것은 냉각수에 용해되어있던 이온들이 결합하여 새로운 물질을 생성시키면서 침전물로 침전이 되었다는 것을 의미한다.

### 음이온

불소(F)는 대부분의 시료에서 2 ppm 이하의

**Table 1.** Chemical analysis of water samples in chiller system (determined by pH-EC meter, ICP-AES, and IC)

Sample No.	M1	M2	M3	M4
Sampling Site	waterworks water	pump	general chiller	Mg applied chiller
pH	7.61	7.32	7.10	7.73
EC	144	567	580	256
F	0.41	1.84	1.76	0.99
Cl	10.79	45.54	45.76	25.88
NO <sub>3</sub>	7.29	29.26	N.D	13.05
SO <sub>4</sub>	11.61	65.89	61.49	26.24
Na	6.70	32.07	30.86	16.97
Mg	2.82	12.39	14.58	7.09
Al	0.00	0.00	0.00	0.00
Si	0.87	5.68	6.39	0.22
K	1.95	9.96	12.12	6.46
Ca	15.47	56.17	57.71	15.82
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00

낮은 값을 나타낸다. 초기 원수인 수돗물의 경우 0.41 ppm이지만 이보다 조금은 높게 나타나는 다른 시료와 비교했을 때 큰 변화는 없다. 염소(Cl)의 경우 초기 원수인 수돗물에서는 10.79 ppm이지만 냉각수 라인을 통과한 모든 시료에서 높은 값을 나타낸다. 이것은 냉각수 라인을 통과하는 동안 외부에서 공급되었을 가능성이 크다. 특히 Na, Mg, K, Ca, Si 등과 같은 성분들이 함께 증가한 것으로 보아 이런 양이온과 결합된 염류에 의해 공급되었을 가능성이 아주 크다. NO<sub>3</sub>의 경우 유기물 형성에 필요한 성분으로 유기물이 많이 생성될수록 낮은 값을 나타낸다. 따라서 일반 칠러의 경우 수돗물보다 낮은 값을 나타내는 것은 유기물 생성에 NO<sub>3</sub>가 소모되었기 때문이다. 황산이온(SO<sub>4</sub>)의 경우도 Cl과 마찬가지로 수돗물보다 훨씬 높은 값을 나타내는 것은 냉각 과정에서 외부에서 공급되었기 때문인 것으로 추정된다.

양이온

양수기에서 채취한 시료(M2)와 유기성 부유물이 많이 생성된 일반 칠러 시료(M3)의 경우 대부분의 양이온의 함량이 높게 나타난다. Mg를 적용한 칠러에서는 일반 양이온은 수돗물보다 높게 나타나지만 Ca와 Si의 경우 거의 비슷한 수준이거나 낮게 나타난다. Mg 적용 칠러 시료는 일반 칠러와 비교했을 때 대부분의 양이온에 대해 훨씬 낮은 값을 보인다. 이것은 양이온이 새로운 물질을 형성시키면서 고상으로 냉각수로부터 제거되어 침전되었을 가능성을 제시한다. 새로운 물질을 형성시켜 냉각수로부터 제거 될 경우 입자의 크기가 작은 경우 물속에 부유물 형태로 존재하지만 입자크기가 커지게 되면 침전물을 형성하게 된다. 일반 칠러에서 생성되는 부유물과 침전물은 대부분 유기물 형태이지만 냉각수에 용해된 양이온이나 음이온의 반응에 의해 형성된 침전물은 무기물로 현저한 차이를 나타낸다. 수용액으로부터 가장 쉽게 제거될 수 있는 물질은 불용성 염을 형성하는 물질로 주로 Ca와 Si이다. Mg를 적용한 칠러의 경우 특히 이 두 성분이 급격하게 감소한 것을 볼 수 있는데 이것은 Mg의 영향으로 수용액 내에 존재하는 양이온을 제거하는데 상당한 효과가 있다는 것을 의미한다.

침전물의 육안적 관찰

육안관찰에 의하면 일반 칠러의 경우 많은 양의 부유성 물질이 존재하고 유기물 형태로 끈적이거나 서로 엉켜 붙어 쉽게 분리되지 않고 혼탁하게 보이지만(그림 3A), Mg를 적용한 칠러 침전물은 쉽게 가라앉을 뿐만 아니라 철산화물이나 수산화물과 같은 무기물이라는 것을 쉽게 알 수 있다(그림 3B). Mg를 적용한 칠러에서 유기물 형태가 나타나지 않는 것은 Mg가 유기물 생성을 억제시킬 수 있다는 것을 의미하며 침전물이 철 산화물이라는 것은 냉각수 라인의 배관으로부터 떨어져 나온 녹(scale)으로 볼 수 있다. 따라서 Mg를 적용할 경우 배관내의 녹을 제거할 수 있지만 녹을 이온상태로 용해시켜서 제거하는 것이 아니라 1~10 μm 크기의 입자 형태로 떨어져 나와 배관으로부터 제거되기 때문에 유속이 느려지는 곳에 침전될 수 있다.

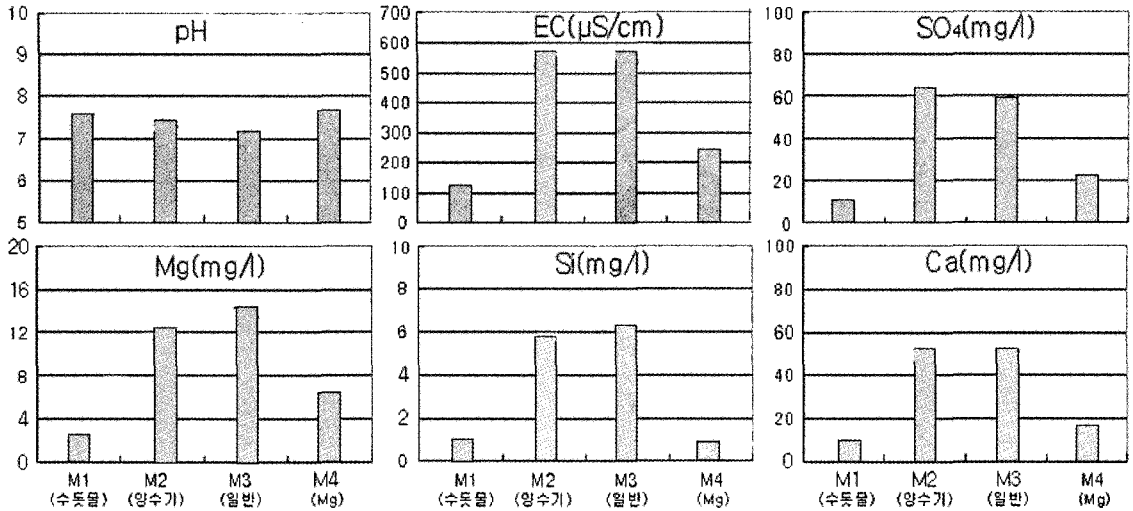


Fig. 2. Variations of chemical composition with sampling location.

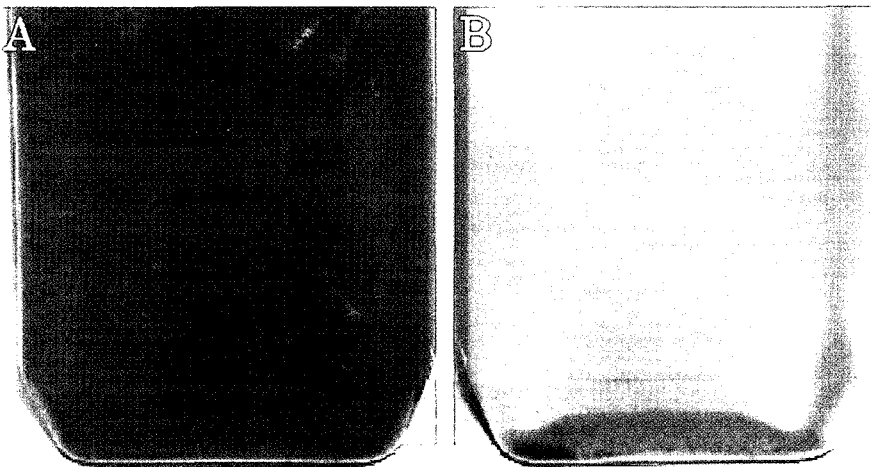


Fig. 3. Change of precipitates in general (A) and Mg applied (B) chiller system.

### 쌍안실체현미경 관찰

일반 칠러 침전물의 경우 작은 입자로 분리된 결정 형태로 나타나는 것이 존재하지 않으며 대부분 유기물 형태로 나타난다(그림 4A). Mg를 적용한 칠러 침전물은 아주 미세한 입자의 붉은 색 철 산화/수산화 광물과 무색 투명한 방해석 결정들을 관찰할 수 있다(그림 4B). 이 광물들은 대부분 냉각수 라인 배관으로부터 분리되어 칠러 내부에 침전된 것으로 생각된다.

### 전자현미경(SEM) 및 EDS 분석

전자 현미경 사진에서 일반 칠러 침전물의 경우 침전물들은 하나의 입자로 존재하는 것이 아니라 서로 엉켜있는 것을 관찰할 수 있다(그림 5A). 이것은 무기물에서 나타나는 결정형태를 전혀 갖추고 있지 않으므로 쉽게 유기물이란 것을 알 수 있다. Mg를 적용한 칠러의 경우 자형으로 나타나는 방해석 결정과 구형내지 포도상으로 나타나는 철 산화물들을 쉽게 관찰할 수 있다(그림 5B). 이러한 무기물들은 주로 배관 내부로부터 떨어져 나온 물질들과 냉각수에 용

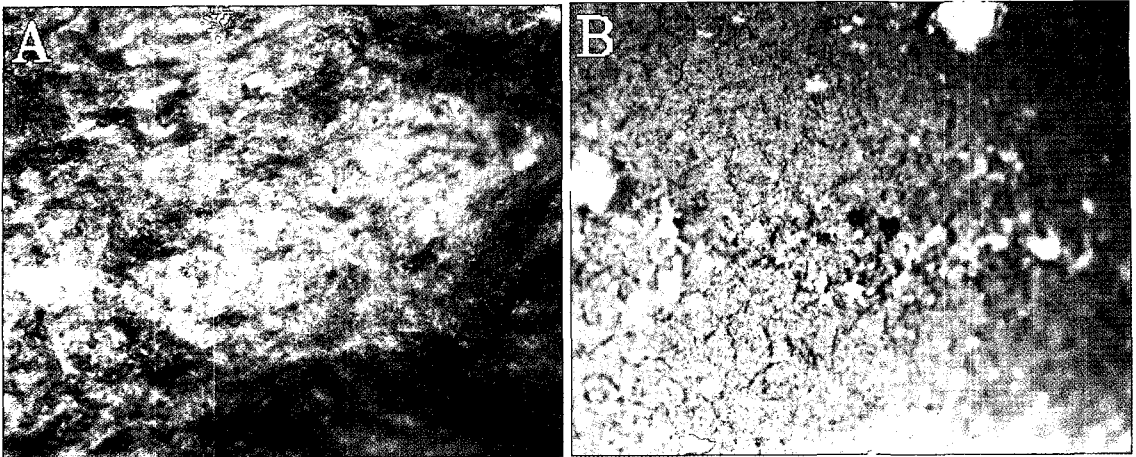


Fig. 4. Stereo microscopic photographs ( $\times 60$ ) of precipitates in general (A) and Mg applied (B) chiller system.

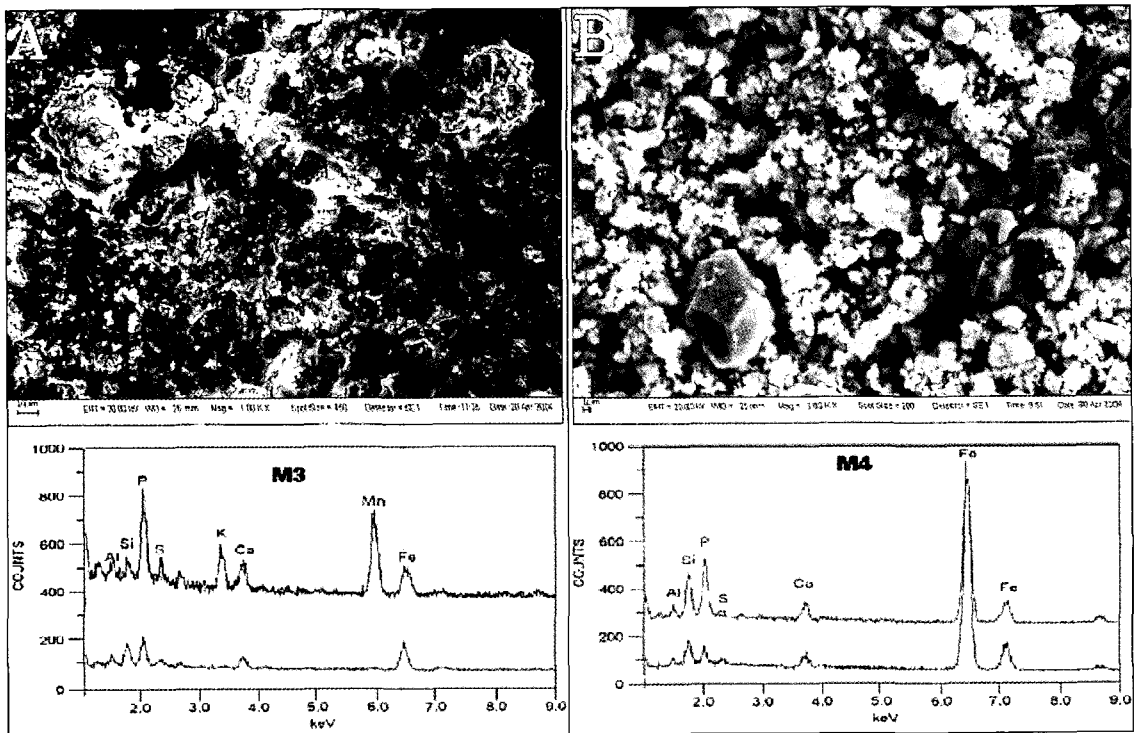


Fig. 5. SEM microphotograph and EDS patterns of precipitates in general (A) and Mg applied (B) chiller system.

해되었던 이온들이 무기물을 형성하면서 침전된 것들이다.

EDS 정량 분석결과 일반칠러 침전물의 경우  $P > Mn \gg K > Ca > Fe > Si > S > Al$ 로 Mg 적용

시료에 비해 P와 Mn, K, S의 함량이 높게 나타난다(그림 5A). 일반적으로 유기물의 성분에는 P와 S의 함량이 높게 나타나는데 이 시료에서 이러한 성분이 높게 나타나는 것으로 보아 유기

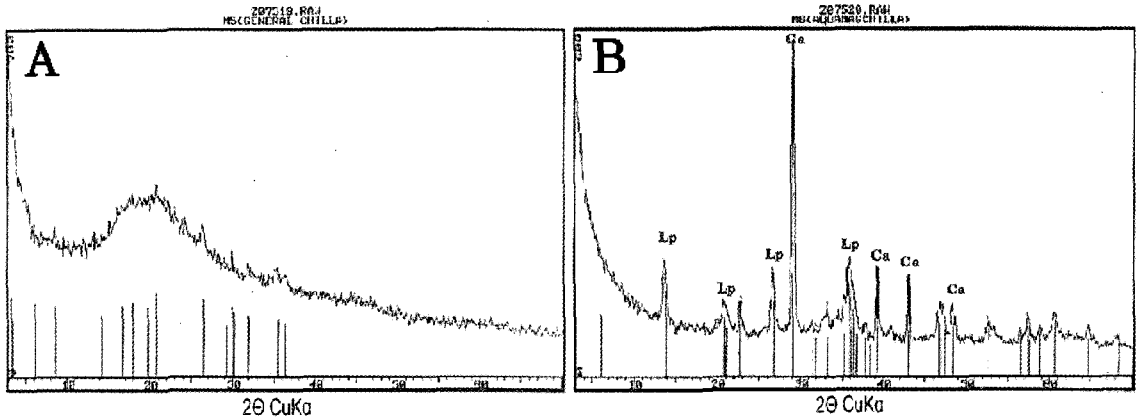
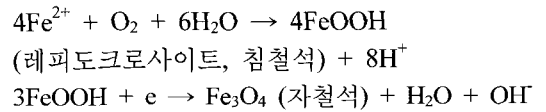


Fig. 6. XRD patterns of precipitates in general (A) and Mg applied (B) system (Lp: lepidocrocite, Ca: calcite).

물 집합체라는 것을 알 수 있다. Mg를 적용한 칠러 침전물은  $Fe \gg P > S > Ca > Al$ 의 값을 나타내며 약간의 S가 포함되어 있다(그림 5B). Fe 값이 높게 나타나는 것은 이 침전물이 철 산화물이나 수산화물이라는 것이다.

#### X-선 회절 분석

일반 칠러 침전물에 대한 X-선회절 분석결과 방해석과 레피도크로사이트가 미세하게 감지되지만 전체적으로는 유기물이나 비정질에서 나타나는 전형적인 회절선 형태를 나타낸다(그림 6A). Mg를 적용한 칠러 침전물은 뚜렷한 회절선이 나타나 일반 칠러 침전물과 확연하게 구별된다(그림 6B). Mg를 적용한 칠러 침전물은 방해석과 레피도크로사이트가 주 구성광물이다. 쌍안실체현미경 관찰시 무색투명한 결정은 방해석이며, 마립의 붉은색을 띠는 것이 레피도크로사이트(lepidocrocite)이다. 수도 배관에 형성된 녹(scale)은 대부분 자철석으로 구성되어 있지만 초기에 생성되는 광물은 레피도크로사이트나 침철석이며 이들 철 광물을 결합시켜 주는 것은 방해석과 자폐아이트이다(김정진과 김윤영, 2002). 초기에 생성된 레피도크로사이트나 침철석은 다음과 같은 반응에 의해 자철석으로 변하게 된다.



이 반응식에서 레피도크로사이트나 침철석은 수도 배관자체의 산화작용에 의해 형성이 되며 시간이 지남에 따라 자철석으로 변해 오래된 배관일수록 자철석의 비율이 높아지게 된다. Mg를 적용한 칠러의 침전물 중 철 산화물이 대부분 레피도크로사이트인 것은 냉각수 라인 배관이 교체한지 오래되지 않아 레피도크로사이트가 자철석으로 변화될 수 있는 시간이 충분하지 않았기 때문인 것으로 생각된다.

#### 결 론

냉각수 원수인 상수도물, 일반 칠러 그리고 Mg를 적용한 칠러에서 채취한 시료에 대한 화학 분석결과 상수도물은 대부분의 용존 성분이 낮지만 배관 라인을 순환하는 냉각수는 상당히 많이 오염된 상태이다. 일반 칠러와 Mg를 적용한 칠러시료를 비교했을 때 대부분의 성분들이 감소하는 경향을 나타내며 Ca와 Si의 경우 냉각수 원수로 사용하는 수도물과 비슷하거나 더 낮은 값을 나타낸다. 이것은 Mg를 적용할 경우 물속에 포함된 이온들은 고상으로 침전되어 물

사 사

논문 내용을 개선하는 데 좋은 조언을 해 주신 경북대학교 지질학과 김영규 교수님과 한국원자력연구소 김건영 박사님께 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

로부터 제거되었다는 것을 의미한다. 물속에 존재하는 Ca와 Si의 성분은 각각 방해석과 자폐아이트와 같은 광물을 생성하였을 가능성이 크다. 이렇게 생성된 고상의 침전물은 배관의 산화작용에 의해 생성된 철 산화물과 같이 배관 내벽에 스케일을 형성하거나 칠러 냉각장치의 저수탱크 바닥에 침전물을 형성하게 된다.

X-선회절분석, 쌍안실체현미경 분석, 전자현미경분석 등을 통하여 분석한 결과, 침전물 시료의 경우 일반 칠러에서 침전물은 대부분 유기물로 구성되어있지만 Mg를 적용한 칠러의 경우 Ca 광물인 방해석과 Fe 광물인 레피도크로사이트로 구성되어 있었다. 이것은 Mg를 적용할 경우 유기물 생성을 억제시킬 뿐 아니라 배관내부에 형성된 녹(scale)을 제거시키는 역할을 할 수 있음을 지시한다. 그러나 배관내의 녹(scale)이 제거될 때 용해되는 것이 아니라 1~10  $\mu\text{m}$  크기의 입자 형태로 분리되기 때문에 가열된 기체를 냉각시키기 위한 미세한 통로를 통과할 경우 막힐 가능성과 유속이 느려지는 곳에서 침전물이 집적되는 경우가 나타날 수도 있다.

이상의 Mg 적용 전 후의 결과를 비교해보면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 수질 개선에 큰 효과가 있다. Mg를 적용한 칠러 시료의 경우 일반 칠러 시료에 비해 대부분의 성분이 낮게 나타난다. 따라서 칠러 냉각수 라인에 Mg를 적용할 경우 수질 개선에 큰 효과가 있는 것으로 판단된다.

둘째, 유기물 생성을 억제시키는 효과가 있다. Mg 적용 전 칠러 침전물은 대부분 유기물이지만 Mg 적용 후의 침전물을 배관 내벽에 생성된 스케일과 비슷한 성분을 갖는 무기물이다. 이것은 Mg를 적용할 경우 유기물 생성을 억제시키는 효과를 얻을 수 있음을 지시한다.

셋째, 배관 내벽에 존재하는 녹(scale)을 제거할 수 있다. Mg를 적용한 칠러 침전물은 배관 내벽에 존재하는 스케일과 유사한 성분으로 구성되어 있으며 이것은 배관 내벽에 존재하는 스케일이 떨어져 나와 유속이 느려지는 칠러 바닥에 침전된 것으로 생각된다.

권혁철, 양오봉, 김기주, 임한귀, 최미화 (2004) 보일러 튜브의 스케일 형성에 미치는 산소의 영향. 부식과 방식, 3, 22-27.

김건영, 고용권, 최현수, 김천수, 배대석 (2000) 중원 지역 탄산온천수의 탄산염 침전물에 관한 광물학적 및 지구화학적 연구. 한국광물학회지, 13, 22-36.

김윤영, 김정진 (2001) 탄산온천 지하수의 고온에서의 결정 정출로 인한 스케일 발생에 관한 연구. 2001년 대한상하수도·한국물환경학회 추계공동 학술발표회, 한국수자원공사 연수원, 10월 17일, 107-110.

김윤영, 김정진, 김형수, 원종호 (2002) 지하수질에 따른 배관부식 상태와 이의 해결방안 연구. 2002년 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, 서울시립대학교, 4월 12일, 263-266.

김윤영, 김정진, 양진현, 김형수 (2003) 지하수질에 따른 배관의 스케일 형성 특성 및 제거방법 연구. 2003년 한국물환경학회·대한상하수도학회 춘계 학술발표회, 중앙대학교 안성캠퍼스, 4월 26일, 517-520.

김정진, 김수진, 김윤영 (2004) 오색온천수의 지하학적 및 침전물에 대한 광물학적 특성, 한국광물학회, 18, 169-176

김정진, 김윤영 (2002a) 문경 탄산온천수의 지하학적 특성 및 침전물에 대한 광물학적 연구, 지하수도양 환경, 7, 45-52.

김정진, 김윤영 (2002b) 수도권내의 녹(scale)에 대한 광물학적특성 및 아연의 효과. 상하수도학회지, 16, 284-290.

김정진, 김윤영, 장세정, 김형수 (2004) 마그네슘(Mg) 금속을 이용한 배관 내벽의 스케일 제거 및 억제 장치. 2004년 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계 학술발표회, 대덕컨벤션센터, 11월 3일, 35-44.

박재현, 황덕홍, 이병헌 (2003) 고주파 전자장치를 이용한 판의 스케일 제거 특성. 2003년 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계 학술발표회, BE-XCO, 11월 13일, 19-23.

심재주, 신동호, 최윤석, 김정구, 유승재 (2003) 수돗물에서 동 배관의 부식특성에 관한 연구. 대한금속



칠러(Chiller) 냉각장치 침전물에 미치는 마그네슘의 영향에 관한 환경 광물학적 연구

재료학회지, 41, 902-908.  
전경수, 고영태 (1996) 지하 가스배관의 부식 및 방식  
대책. 한국화학공학회지, 14, 328-337.  
홍성욱, 안형환 (2004) 부식방지를 위한 마그네슘 및

칼슘 이온의 흡착 제거에 관한 연구. 한국안전학회  
지, 19, 40-44.

---

2005년 6월 3일 원고접수, 2005년 6월 16일 게재승인.