

# 염전 폐간수의 재활용(I) : 마그네슘 회수

나춘기 · 박현주<sup>\*,†</sup>

목포대학교 환경공학과, \*서울대학교 건설환경종합연구소  
(2016년 6월 16일 접수, 2016년 7월 5일 심사, 2016년 7월 15일 채택)

## Recycling of Waste Bittern from Salt Farm (I) : Recovery of Magnesium

Choon-Ki Na and Hyunju Park<sup>\*,†</sup>

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

<sup>\*</sup>Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University, 1 Gwanakro, Gwanakgu, Seoul 08826, Republic Korea

(Received June 16, 2016; Revised July 5, 2016; Accepted July 15, 2016)

### 초 록

본 연구의 목적은 마그네슘 생산을 위한 원료 물질로서 폐간수의 활용 가능성을 검토하는 것이다. 본 연구에서는 간수에 NaOH를 첨가하여 Mg 이온을 수산화마그네슘(Mg(OH)<sub>2</sub>)으로 회수하는 침전법을 적용하였다. 간수에 용존되어 있는 Mg 이온은 NaOH 첨가량이 [NaOH]/[Mg] 몰비 2.70~2.75, pH 9.5~10.0에서 99% 이상이 제거되었다. 알칼리제로 첨가하는 NaOH 용액의 몰 농도는 Mg의 회수효율에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 침전반응을 통해 생성되는 Mg(OH)<sub>2</sub>의 입도는 주로 알칼리제의 첨가속도에 의해 영향을 받았으며 첨가속도가 느릴수록 증가하였다. 침전반응을 통해 간수 1 L당 100~120 kg의 Mg(OH)<sub>2</sub> (순도 약 94%)을 회수할 수 있었다. 이러한 실험결과들은 천일염 산업의 부산물인 간수가 해수마그네시아 생산을 위한 유용자원으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

### Abstract

The purpose of the research was to examine the utilization of waste bittern from salt farm as a source for producing magnesium (Mg). In this work, a precipitation process for recovering Mg, where Mg is precipitated as Mg(OH)<sub>2</sub> by the addition of NaOH solution, was investigated. At the NaOH/Mg molar ratios of 2.70 : 1 to 2.75 : 1 and pH 9.5-10, > 99% of Mg could be precipitated from the bittern. The molar concentration of NaOH solution added as an alkaline reagent had no significant influence on the recovery efficiency of Mg precipitate. The particle size of Mg precipitate was strongly affected by the flow rate of caustic addition. The faster the flow rate of caustic addition, the smaller particles were formed. The Mg precipitate recovered was 100-120 g per 1 L of bittern and contained 94% Mg(OH)<sub>2</sub> after washing with water. Our results showed that the bittern can be used as a potential resource for Mg production.

**Keywords:** bittern, recycling, magnesium recovery, salt farm, precipitation process

## 1. 서 론

우리나라 서해안은 조수간만의 차이가 크고 경사가 완만하면서 일조량이 풍부하여 천일염 산업이 발달되어 있다. 2013년 국내에서는 42만 439톤의 갯벌 천일염이 생산되었으며 이 중 38만 톤이 전남지역 염전에서 생산되어 전국 생산량의 90.8%를 차지했다[1]. 천일염 생산 과정에서 고농도의 무기물을 포함하는 간수가 부산물로 다량 발생한다. 간수란 일반적으로 천일염을 생산해 소금창고에 보관하거나 또는 포대에 담아 둘 때 조해작용에 의해 저절로 흘러나오는 고농도의 무

기물 액체를 의미하지만, 소금을 제조하는 과정 중에 발생하게 되는 부산물 액체를 통칭하기도 한다. 즉, 일반적 의미의 간수 외에도 염전의 결정지에서 천일염을 생산하고 남은 모액도 간수에 해당되며, 또한 천일염 산지종합처리장이나 가공공장에서 원심분리기를 이용해 인위적으로 천일염을 탈수하는 과정에서도 발생한다[2]. 이들 모두 소금 제조과정에서 발생하는 부산물로 그 발생원에 따라 탈수염 간수(dehydrated salt bittern), 함수(concentrated sea water), 천일염 간수(solar salt bittern) 및 숙성 천일염 간수(bittern from solar salt during storage)로 분류되지만 그 종류에 관계없이 거의 일정한 화학조성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다[3]. 우리나라에서 천일염의 생산, 저장, 가공 중에 발생하는 간수의 양은 아직까지 정확한 통계는 없지만 매년 10만 톤 이상으로 추정하고 있다. 이처럼 다량으로 발생하는 간수는 식품 가공용 및 폐수 처리비용을 제외하고 거의 대부분 폐기되고 있어 이의 처리 비용으로 인한 경제적 손실 또한 크다. 이에 따라 폐기되는 간수의 효율성을 높이기 위해 간수로부터 마그네슘을 비롯하

† Corresponding Author: Seoul National University,  
Institute of Construction and Environmental Engineering, 1 Gwanakro,  
Gwanakgu, Seoul 08826, Republic Korea  
Tel: +82-2-880-4321 e-mail: narjjs@snu.ac.kr

Table 1. Major Components (g/L) of the Bittern Used in this Study

Element	Seawater*	Bittern	Enrichment factor
Na <sup>+</sup>	12.28	55.84 ± 1.50	4.5
Mg <sup>2+</sup>	1.42	41.77 ± 1.83	29.4
Ca <sup>2+</sup>	0.47	0.04 ± 0.01	0.1
K <sup>+</sup>	0.50	14.32 ± 0.21	28.6
Cl <sup>-</sup>	22.01	125.69 ± 3.06	5.7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.20	63.97 ± 0.62	20.0

\* Data from Nir *et al.*[15]

여 리튬, 붕소, 우라늄 등 해수용존자원의 회수[4-6], 간수를 마그네슘원으로 이용한 축산폐수의 처리[7] 등 다양한 활용방안이 검토되고 있다.

마그네슘(Mg)은 농업, 식품, 제약, 내화물, 정수 및 폐수처리, 탈황, 합금 등 다양한 산업에서 폭넓게 이용되고 있다. 전 세계 마그네슘 생산량은 2011년 기준 429천 톤/년으로 자동차산업의 마그네슘 합금 수요가 증가함에 따라 매년 빠르게 증가하고 있는 추세이다[8]. 마그네슘은 마그네사이트(MgCO<sub>3</sub>), 돌로마이트(CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), 수산화석(Mg(OH)<sub>2</sub>), 사문암(Mg<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) 등에 함유되어 있으나 대부분 해수, 염수(brine) 및 간수(bittern)에서 회수하고 있다. 해수는 약 1.3 g/L의 마그네슘을 함유하고 있어, 이로부터 수산화마그네슘을 생산하는 해수마그네시아 산업은 천일염 산업과 함께 상용화되어 있는 대표적인 해수용존자원 산업이다. 특히 염전 및 천일염 산업에서 발생하는 간수는 해수에 비해 다량의 마그네슘이 농축되어 있어 마그네슘 생산을 위한 유용자원으로 주목받고 있다[9]. 해수 중의 마그네슘은 알칼리 물질을 첨가하여 수산화마그네슘으로 침전시키는 방법에 의해 이루어지고 있다[10]. 알칼리 물질로는 가성소다(NaOH)가 주로 사용되지만 석회(CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>)도 사용된다. 다만, 석회의 경우 낮은 용해도(0.159 g/100 mL H<sub>2</sub>O, 25 °C)로 인해 미용해 석회입자가 수산화마그네슘 침전물에 불순물로 혼입될 뿐만 아니라 고농도의 황산이온을 포함하는 경우 석고(CaSO<sub>4</sub>)로 침전될 가능성이 높아 고순도의 수산화마그네슘을 얻기 어렵다는 단점이 있다. Rabadzhieva *et al.*은 염수로부터 수산화마그네슘을 회수하는 공정에서 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>)을 이용하여 황산이온을 제거하는 방법을 제시하였으나 그들이 회수한 제품의 불순물 함량은 여전히 높았다[11]. 한편 알칼리 물질로 가성소다를 사용할 경우에는 결정도가 낮고 미립의 수산화마그네슘 입자가 생성되기 쉬워 고-액분리를 위한 여과조작이 어려워지는 단점이 있다[12-13].

본 연구의 목적은 마그네슘 생산을 위한 원료 물질로서 전남지역의 염전 및 천일염 산업에서 대량으로 발생하고 있는 폐간수의 활용 가능성과 효율성을 평가하여 제시하는데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 간수에 가성소다(NaOH)를 첨가하여 용존상의 마그네슘 이온(Mg<sup>2+</sup>)을 수산화마그네슘(Mg(OH)<sub>2</sub>)으로 회수하는 침전법을 적용하고, 마그네슘 성분의 적정 회수조건과 효율, 침전 생성물의 물리화학적 성상 등을 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

간수는 전남 영광군에 위치한 B 염전에서 보관 중인 천일염 간수를 채취하였다. 채취된 간수는 GF-C 여과지를 이용하여 여과한 다음 사용하였다. 본 연구에 사용한 간수의 화학적 조성을 Table 1에 해수 중

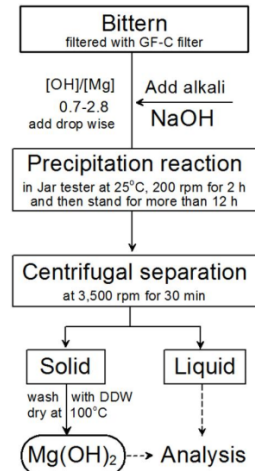


Figure 1. Schematic diagram of the experimental processes for Mg(OH)<sub>2</sub> recovery from bittern.

의 평균함량[14]과 비교하여 나타냈다. 간수로부터 수산화마그네슘을 생성시키기 위한 알칼리제로는 가성소다(NaOH, 98%)를 사용하였다.

### 2.2. 수산화마그네슘 침전반응

수산화마그네슘 침전반응실험은 Jar tester를 이용하여 상온(25 ± 2 °C)에서 실시하였다. 1 L 비이커에 간수 100~500 mL를 넣고 200 rpm으로 교반하면서 1~5몰의 가성소다 용액을 NaOH/Mg 몰비로 0.7~2.8이 되도록 서서히 첨가하였다. 침전물의 생성은 가성소다 용액의 첨가와 동시에 이루어졌으나 완전한 석출반응과 함께 입자의 성장을 유도하기 위해 목표량의 가성소다를 첨가한 후 2 h 동안 더 교반한 다음 12 h 이상 정지시켰다. 정지 후 분리된 상등액은 채취하여 pH를 측정하고 분석시료로 보관하였다. 나머지 침전물은 원심분리(3,500 rpm, 30 min)를 통해 고-액을 분리한 다음 증류수로 반복 세척하여 미반응 이온들과 가용성 염을 제거하였다. 회수된 침전물은 105 °C에서 12 h 동안 건조한 다음 그 무게를 측정하고 분석용 시료로 데시케이터에 보관하였다. 실험과정은 Figure 1에 요약하여 나타내었다.

### 2.3. 성상 분석

간수 및 수산화마그네슘 침전반응에서 채취한 액상시료는 0.45 μm 여과지로 여과한 다음 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 및 Cl<sup>-</sup> 농도를 분석하였다. 또한 수산화마그네슘 침전공정에서 회수한 침전물들은 적정량을 분취하여 질산을 이용하여 재용해시킨 다음 양이온과 음이온 성분을 분석하였다. Na<sup>+</sup> 등 양이온 농도는 AAS (Shimadzu AA-6701F, Japan)를, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 Cl<sup>-</sup> 농도는 이온크로마토그래피(Waters-Alliance IC system)를 이용하여 각각 분석하였다. 각 성분의 질량수지 및 물분율을 이용하여 제거율 및 함량비를 계산하였다. 침전물의 입도 및 광물 조성은 레이저입도분석기(Mastersizer S, UK) 및 XRD (X'pert-pro MPD, Netherlands)를 이용하여 각각 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 마그네슘의 회수 효율

침전반응에 미치는 알칼리 농도의 영향을 확인하기 위해 간수에 1~5몰의 NaOH 용액을 [NaOH]/[Mg] 몰비로 2.53이 되도록 첨가하는 조건에서 침전반응을 유도한 후 NaOH 농도변화 잔류여액의 pH, Mg

Table 2. Results of Precipitation Reaction with Various Mole of NaOH Under Fixed Molar Ratio of NaOH/Mg to 2.53

NaOH (M)	add V (L/L <sub>b</sub> )*	pH <sub>eq</sub>	filtrate (L/L <sub>b</sub> )*	precipitate (g**/L <sub>b</sub> )*	Mg <sup>2+</sup> (g/L)***	Removal (%)
1	4.50	9.39	4.30	93.5	0.66	91.3
2	2.25	9.38	2.15	95.6	0.99	92.3
3	1.50	9.32	1.48	98.6	1.26	92.4
4	1.13	9.26	1.17	100.1	1.40	92.9
5	0.90	9.20	0.99	100.3	1.52	93.1

\* per unit volume (L) of bittern  
 \*\* dry weight of precipitate at 100 °C after washing with DDW  
 \*\*\* residual concentration in liquid phase after precipitation reaction

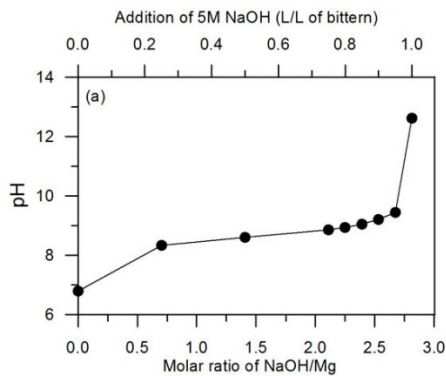


Figure 2. Variations of pH with addition ratio of NaOH solution.

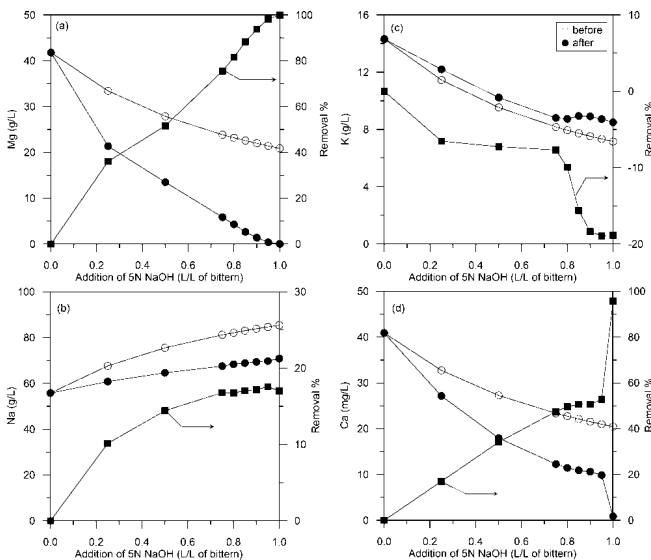


Figure 3. Variations of cation concentration and removal with addition ratio of NaOH solution.

와 Na 농도 및 제거율, 잔류여액과 침전물의 회수량을 측정하였다. 그 결과 Table 2에 나타낸 바와 같이 NaOH 농도를 1~5몰로 증가시키에 따라 첨가량은 간수 1 L당 4.5 L에서 0.9 L로, 잔류여액은 4.3 L에서 0.99 L로 각각 감소하였다. NaOH 농도가 높을수록 첨가에 따른 회석률이 감소함에 따라 잔류여액 중의 Mg 농도는 0.66 g/L에서 1.52 g/L로 증가하였으나 Mg 제거율과 침전물 발생량은 각각 91.3~93.1%와 93.5~100.3 g/L로 오히려 약간 증가하는 경향을 보였다. 한편 잔류여액 중의 Na 농도는 NaOH 농도를 1~5몰로 증가시키에 따라 24.9~

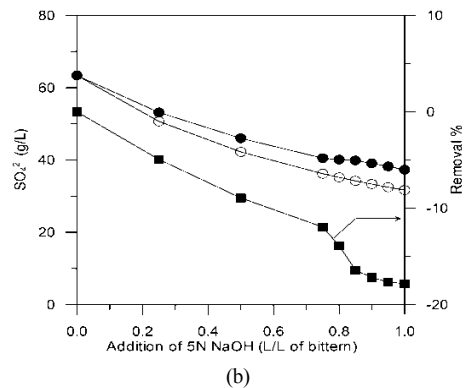
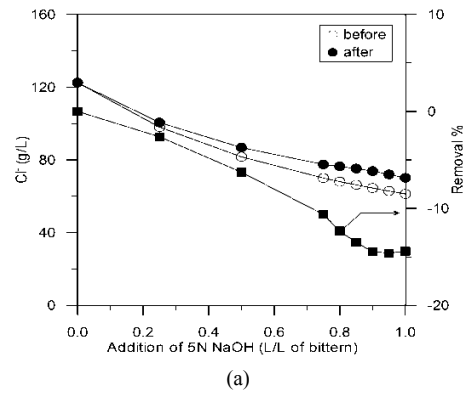


Figure 4. Variations of anion concentration and removal with addition ratio of NaOH solution.

67.8 g/L로 증가되었으며, 그 제거율도 14.0~19.2%로 증가하는 경향을 보여 Mg와 함께 공침하는 Na계 침전물이 증가됨을 알 수 있다. 마그네슘 회수를 위한 최적 알칼리 첨가량을 확인하기 위해 간수 1.0 L당 5몰의 NaOH 용액 0.25~1.0 L ([NaOH]/[Mg]=0.7~2.8)를 첨가하여 침전반응을 유도한 후 각 첨가량별 잔류여액의 pH, 양이온과 음이온의 성분변화를 측정하였다. 침전반응이 완료된 후 상등액의 pH는 NaOH 용액의 첨가량 0.25~0.97 L에서는 8.33~10.05까지 서서히 증가하였으나 1.0 L에서는 12.6으로 급격히 증가하였다(Figure 2). NaOH 용액 첨가량별 양이온 성분의 농도변화는 Figure 3에 나타낸 바와 같이 Mg, Na 및 Ca는 첨가량이 증가할수록 초기 농도에 비해 침전반응 후 농도가 계속 감소하였으나 K의 경우 오히려 초기농도에 비해 증가하는 추세를 보였다. K 이온이 오히려 증가하는 이유는 Mg, Na 및 Ca의 침전물이 수화물 형태로 침전되어 물이 결정수로 소비되었기 때문으로 판단된다. 음이온의 경우 Figure 4에 나타낸 바와 같이

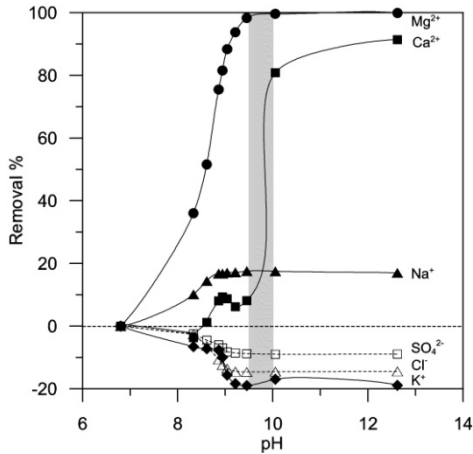


Figure 5. Variations of cation and anion removal from bitter with pH of bitter after addition of NaOH solution.

Cl과 SO<sub>4</sub> 모두 K와 유사하게 침전반응이 진행됨에 따라 농도가 오히려 3~18% 정도 증가하는 현상을 보여 침전반응에 거의 참여하지 않았거나 결정수로 소비되는 물에 비해 훨씬 적은 양이 침전되었기 때문으로 추측된다. Figure 5는 NaOH 용액 첨가량에 따른 양이온과 음이온의 제거율을 반응 후 평형 pH를 함수로 요약한 것으로 Mg의 제거율은 pH 9.5까지 급격히 증가하여 98% 이상 제거되었으며, Ca는 pH 9.5에서는 약 8% 제거되는데 그쳤으나 pH 10 이상에서는 그 제거율이 80% 이상으로 급격히 증가하였다. Na, Cl 및 SO<sub>4</sub>의 경우 pH 9를 기점으로 제거율 또는 부화율이 일정해지는 경향을 보였다. 이상의 결과로부터 간수 중의 Mg를 효율적으로 회수하기 위한 적정 pH는 9.5 이상 10.0 미만임을 알 수 있다. 이는 5몰의 NaOH 용액을 사용할 경우 간수 1 L당 0.95~0.97 L를 첨가하는 조건이며, [OH]/[Mg] 몰비로는 2.70~2.75 정도로 Mg(OH)<sub>2</sub>의 이론적 몰비 2.0에 비해 35% 이상 높아 첨가된 OH<sup>-</sup> 이온의 일부가 소모되는 부반응이 존재함을 시사한다.

3.2. 수산화마그네슘 침전물의 입도

수산화마그네슘 침전반응에서 마그네슘의 회수율과 함께 침전물의 입도분포도 중요하게 고려되어야 하는 요인 중의 하나이다. 즉 생성물의 입도가 미립일수록 여과와 건조가 어렵기 때문에 가능한 입도가 크고 좁은 분포범위를 갖는 수산화마그네슘 침전물이 생성될 수 있는 반응조건을 규명하여야 한다.

알칼리제로 첨가하는 NaOH 용액의 농도가 생성되는 침전물의 입도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 간수 100 mL에 1, 3, 5몰의 NaOH 용액을 각각 500, 167, 100 mL를 0.3 mL/min의 속도로 첨가, 혼합하는 조건에서 침전반응을 유도하고 각 물수에서 생성된 침전물의 입도를 분석, 비교하였다. 그 결과 Figure 6에 나타난 바와 같이 1 몰과 3몰의 NaOH 용액을 사용할 경우 생성된 침전물의 입도는 각각 1.30~58.93 mm (중위경 12.27 mm)과 1.18~56.23 mm (중위경 13.37 mm)로 거의 중복되는 입도분포를 보였으나, 5몰일 경우 입도분포가 0.878~41.78 mm (중위경 9.24 mm)로 상대적으로 약간 미립의 침전물이 생성되었음을 보여주었다. Figure 7은 NaOH 용액의 첨가속도를 0.3 mL/min에서 1.0, 6 mL/min으로 증가시키는 조건에서 생성되는 침전물의 입도분포를 보여주고 있다. Figure 7은 3몰의 NaOH 용액을 알칼리제로 첨가한 경우로 그 첨가속도를 0.3 mL/min (Figure 6)에서 1.0, 6 mL/min으로 증가시킴에 따라 침전물의 입도는 1.18~56.23 mm (중위경 13.37 mm)에서 0.878~37.84 mm (중위경 8.74 mm),

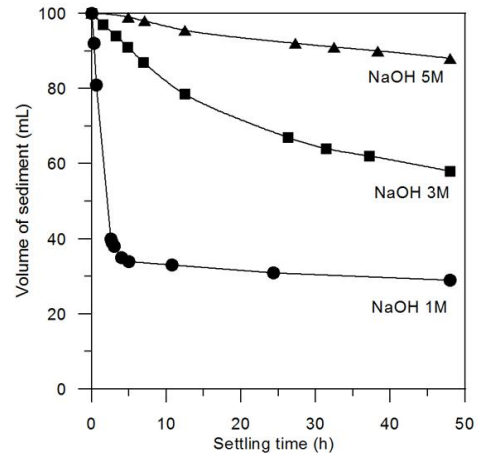


Figure 6. Sedimentation velocity and volume depending on the concentration of NaOH added into bitter.

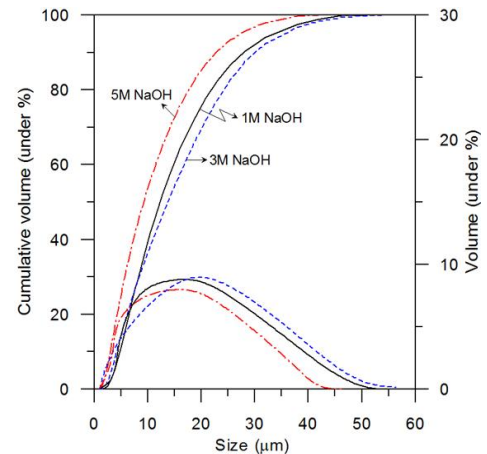


Figure 7. Particle size distributions of Mg(OH)<sub>2</sub> crystallized from bitter depending on the concentration of NaOH.

0.295~23.06 mm (중위경 5.95 mm)로 급격히 감소하는 경향이 뚜렷하였다. 이는 알칼리제의 첨가속도가 빠를수록 광범위한 과포화 현상과 대량의 핵생성 현상이 동시에 일어나 첨가된 알칼리제로 인한 과포화가 입자의 성장보다는 오히려 핵생성에 대부분 소모되기 때문이다[9,14]. Alamdari et al.은 침전반응을 시작하기 전에 충분한 양의 수산화마그네슘을 핵으로 첨가할 경우 과도한 핵생성을 어느 정도 방지할 수 있다고 주장하였다[9]. 즉, 간수로부터 수산화마그네슘을 침전시키는 과정에서 수산화마그네슘 분말을 간수 100 mL당 15 g의 수산화마그네슘 분말(5-40 mm)을 핵으로 첨가하는 조건에서 입도 5-60 mm의 침전물을 얻을 수 있었다고 보고한 바 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서도 수산화마그네슘을 첨가할 경우 침전물의 입자 성장에 미치는 영향을 살펴보았다.

3.3. 수산화마그네슘 회수량 및 성상

Figure 6은 간수 1 L당 5몰의 NaOH 용액 0.25~1.0 L를 첨가하는 조건(Figure 2)에서 회수할 수 있는 침전물의 무게를 반응 후 평형 pH를 함수로 이론값과 실측값을 비교하여 나타낸 것이다. 침전물의 이론적 회수량은 Figure 3(a)의 Mg 제거율을 바탕으로 제거된 Mg가 모두 Mg(OH)<sub>2</sub>로 침전했다는 가정하에 계산된 값이다. Figure 6에 나타난 바와 같이 침전물 실측값은 간수 1 L당 37~112 g으로 이론값 36

Table 3. Chemical Composition of Mg(OH)<sub>2</sub> Precipitate Recovered from Bitterm

	Mg	Na	K	Ca	Cl	SO <sub>4</sub>
g/kg	393.07 ± 14.63	16.63 ± 1.92	0.17 ± 0.05	1.62 ± 0.97	3.27 ± 0.35	31.35 ± 5.79
wt%	88.11 ± 3.28	3.73 ± 0.43	0.04 ± 0.00	0.36 ± 0.21	0.73 ± 0.08	7.03 ± 1.30
mol%	93.15 ± 3.46	4.16 ± 0.48	0.02 ± 0.01	0.23 ± 0.14	0.53 ± 0.06	1.90 ± 0.35

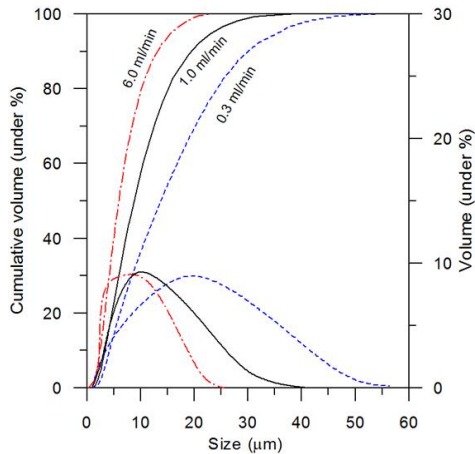


Figure 8. Particle size distributions of Mg(OH)<sub>2</sub> crystallized from bitterm depending on the injection velocity of NaOH solution.

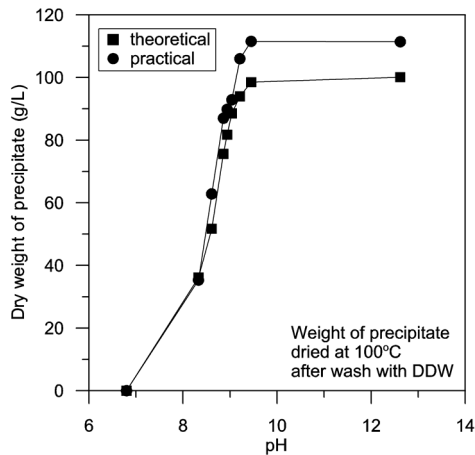


Figure 9. Particle size distributions of Mg(OH)<sub>2</sub> crystallized from bitterm depending on the addition of seed.

~100 g에 비해 높게 나타나 Mg(OH)<sub>2</sub> 외에 다른 화학조성의 침전물이 불순물로 공침되었거나 세척과정에서 가용성 염들이 완전히 제거되지 않았음을 시사하였다. Figure 8은 침전물에 대한 X-선 회절분석 결과로, 침전물의 가장 주된 광물상은 Mg(OH)<sub>2</sub>이며, 부수적으로 NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O 광물상도 나타나고 있다. 부수적으로 검출되는 광물은 모두 용해도가 매우 높은 광물로 Mg(OH)<sub>2</sub>와 함께 공침되었다 할지라도 수세를 통해 대부분 제거할 수 있다. 그럼에도 불구하고 이들 광물이 침전물에 불순물로 잔존하는 것은 수세과정에서 이들 광물 또는 용존상의 Na, Cl, SO<sub>4</sub> 이온들이 완전히 제거되지 않았기 때문으로 판단된다. 침전물의 화학조성을 정량적으로 분석한 결과 Table 3에 나타난 바와 같이 Mg가 주성분이었으나 Na, K, Ca, Cl, SO<sub>4</sub> 성분이 유의한 수준에서 불순물로 검출되었다. 침전물에서 차지하는 Mg 함량은 중량백분율과 몰백분율에서 각각 88.11 wt%와 93.15 mol%로,

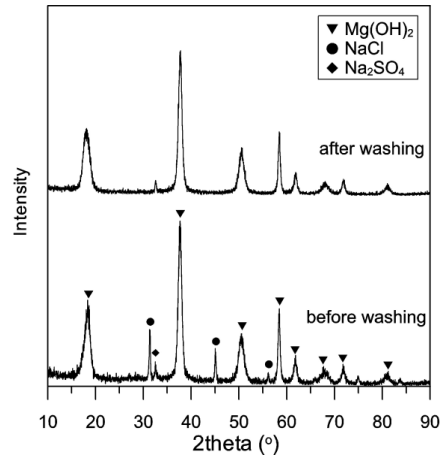


Figure 10. XRD patterns of Mg(OH)<sub>2</sub> obtained from precipitation at 25 °C using 5 N NaOH/bitterm volume ratio of 0.97 (pH 10) before and after washing with distilled water.

각 이온들의 중량비와 몰비를 바탕으로 Mg(OH)<sub>2</sub>의 함량을 계산할 경우 약 94%로 추정되었다.

#### 4. 결 론

마그네슘 생산을 위한 원료 물질로서 전남지역의 염전 및 천일염 산업에서 대량의 발생하고 있는 폐간수의 활용 가능성을 평가하기 위하여 가성소다(NaOH)를 알칼리제로 이용하는 수산화마그네슘(Mg(OH)<sub>2</sub>) 침전법을 적용해 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 간수에 용존되어 있는 Mg 이온은 NaOH 첨가량이 증가할수록 제거율이 증가되어 [NaOH]/[Mg] 몰비 2.70~2.75 (pH 9.5~10.0)에서 99% 이상이 제거되었다. 이 과정을 통해 간수 1 m<sup>3</sup>당 100~120 kg의 수산화마그네슘(순도 약 94%)을 회수할 수 있었다.
2. Mg의 회수효율은 알칼리제로 첨가하는 NaOH의 몰농도와 관계없이 [NaOH]/[Mg] 몰비(또는 pH)에 의하여 영향을 받았다.
3. 침전반응을 통해 생성되는 수산화마그네슘의 입도는 주로 알칼리제의 첨가속도에 의해 영향을 받았으며 첨가속도가 느릴수록 증가하였다.
4. 이러한 실험결과들은 천일염 산업의 부산물인 간수는 해수마그네시아 생산을 위한 유용자원으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감 사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2015R1C1A2A01052334).

## References

1. JeonnamTV, <http://www.jntv.go.kr/main.php> (2013).
2. S. B. Han, Management system of tobu in Korea, *Food Ind. Nutr.*, **10**, 1-5 (2005).
3. K. H. Ko, S. H. Moon, Y. J. Yoo, and I. C. Kim, Characteristics of soybean curds manufactured by various bittern, *Korean J. Food Preserv.*, **20**(1), 37-44 (2013).
4. J. S. Kim, H. K. Park, S. D. Kim, H. S. Yu, and K. I. Rhee, Recovery of lithium and boron from the domestic bittern by an ion exchange method, *Korean J. Metals Mater.*, **30**(5), 600-607 (1992).
5. T. S. Hwang, J. E. Choi, and J. C. Lee, A study of adsorption characteristics of uranium ion using amidoximated PP-g-AN fibrous ion-exchanger in brine water, *Polymer(Korea)*, **26**(1), 121-127 (2002).
6. G. M. Ayoub, F. Merhebi, A. Acral, M. El-Fadel, and B. Koopman, Seawater bittern for the treatment of alkalized industrial effluents, *Water Res.*, **34**(2), 640-656 (2000).
7. H. D. Ryu, T. S. Kim, H. S. Park, and S. I. Lee, Struvite crystallization of swine wastewater using bittern, *J. Korean Soc. Water Qual.*, **23**(1), 138-143 (2007).
8. International Magnesium Association, <http://www.intlmag.org> (2014).
9. US Geological Survey: Mineral Commodity Summaries - Magnesium (ISBN 978-1-4113-3349-9), USGS, Virginia, 96-99 (2012).
10. A. Alamdari, M. R. Rahimpour, N. Esfandiari, and E. Nourafkan, Kinetics of magnesium hydroxide precipitation from sea bittern, *Chem. Eng. Process.*, **47**, 215-221 (2008).
11. D. Rabadzhieva, K. Ivanova, Khr. Balarev, and D. Trendafilov, Production of magnesium hydroxide from residual natural brine when extracting salt from seawater, *Russ. J. Appl. Chem.*, **70**(3), 358-363 (1997).
12. T. Baird, P. S. Braterman, H. D. Cochrane, and G. Spoons, Magnesium hydroxide precipitation as studied by gel growth methods, *J. Crystal Growth*, **91**(4), 610-616 (1988).
13. C. Henrist, J. P. Mathieu, C. Vogels, A. Rulmont, and R. Cloots, Morphological study of magnesium hydroxide nanoparticles precipitated in dilute aqueous solution, *J. Crystal Growth*, **249**(1-2), 321-330 (2003).
14. O. Nir, E. Marvin, and O. Lahav, Accurate and self-consistent procedure for determining pH in seawater desalination brines and its manifestation in reverse osmosis modeling, *Water Res.*, **64**, 187-195 (2014).
15. M. Turek and W. Gnot, Precipitation of magnesium hydroxide from brine, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **34**(1), 244-250 (1995).