

## 몇 가지 여재를 이용한 부영양수 내의 조류 및 인 제거효과

박채홍 · 박명환\* · 최동호<sup>1</sup> · 이준현<sup>1</sup> · 이명훈<sup>1</sup> · 황순진\*

(건국대학교 환경과학과, <sup>1</sup>(주)케이씨리버텍)

**The Removal of Algae and Phosphorus in Eutrophic Waters Using Various Filter Media. Park, Chae-Hong, Myung-Hwan Park\*, Dong-Ho Choi<sup>1</sup>, Joon-Heon Lee<sup>1</sup>, Myung-Hoon Lee<sup>1</sup> and Soon-Jin Hwang\* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; <sup>1</sup>KC RIVERTECH, Daegwang Plaza, Haan-dong, Gwangmyung, Gyeonggi 302-2, Korea)**

In this study, the four different filter media (sponge, volcanic stone, activated carbon and magnesium hydroxide) were tested for the removal of algae and phosphorus in the two eutrophic water samples (natural water and artificial algal culture with BG-11 medium). These filter media were used in the column device as single or combined applications. The effect of the Mg(OH)<sub>2</sub> on phosphorus removal was examined using different particle sizes (<2 mm and >2 mm) and concentrations (0, 10, 50 and 100 g L<sup>-1</sup>) of magnesium hydroxide. The removal efficiency of phosphate by magnesium hydroxide was increased with longer experimental time and higher concentration. However, there was no significant difference in the degree of phosphorus removal between any two particle sizes (1 mg P L<sup>-1</sup>: F=0.109, P=0.685; 10 mg P L<sup>-1</sup>: F=1.542, P=0.355). Among the four media, activated carbon showed the most potent effect on the removal of both algae and phosphorus. The highest removal efficiency of algae and phosphorus was obtained by combining four columns of each filter medium. Interestingly, integration of four filter columns showed higher removal efficiency than activated carbon alone. The highest removal efficiency by integrated filter columns seemed to be caused by a synergistic effect of combined activated carbon and magnesium hydroxide.

**Key words : Sponge, Volcanic stone, Activated carbon, Magnesium hydroxide, Phosphorus and Algae removal**

### 서 론

호소와 하천 등 수생태계에서의 부영양화에 의한 수질 악화는 식물플랑크톤의 과도한 이상증식이 주된 원인이며, 그에 따른 악취, 이취미 등의 발생이 문제가 되고 있다. 특히 여름철에 발생하는 녹조현상은 시각적 불쾌감,

공중위생상의 문제, 생태계 파괴, 상수처리비용의 증가 등과 같은 여러 문제를 야기시킨다(Persson, 1982; Dawson, 1998). 최근에는 기후변화에 의한 기온상승으로 인해 겨울철 저온기의 녹조현상도 점차 가시화되고 있으며 (Ibelings *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2011), 국내에서는 2011년 12월 한강수계에서의 남조류 (*Anabaena spiroides*)의 대발생으로 인한 피해가 보고되고 있다.

\* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr, parkmh96@konkuk.ac.kr

부영양화에 의한 녹조현상의 피해로 말미암아 대증식 조류를 제어하기 위한 학술적 이해와 기술에 대한 관심은 과거부터 육수학 및 수질관리 분야에서 주요한 문제로 다루어져 왔으며 (Cooke *et al.*, 2005), 이와 함께 다양한 기술들이 개발되고 있다. 조류의 성장과 증식을 위해서는 광, 온도, CO<sub>2</sub> 등과 같은 요소 이외에 다양한 영양염이 필요하다. 영양염중에서, 특히 담수생태계에서 인은 질소에 비해 조류성장의 제한인자로서의 효과가 큰 것으로 알려져 있으며 (Schindler *et al.*, 1971; Oh *et al.*, 1998), 따라서 수중 인의 농도 감소는 조류의 대증식을 억제할 수 있는 중요한 수단으로 고려되고 있다.

수중 인 제거에 관한 연구에는 생물학적 탈인법, 알루미늄 (Al), 철 (Fe), 칼슘 (Ca) 등의 원소가 주성분인 화학제재를 이용한 인 제거 등이 이용되어 왔다 (Park *et al.*, 2002). 화학적인 처리제를 사용한 인 제거방법은 그 효과가 상당히 빠르고 우수하여 광범위하게 사용되어 왔으나, 약품비와 슬러지 발생량 증가에 따른 처리비용 증가의 단점이 있다 (Cho *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006). 또한 상수원 및 호소 등에 적용시 약품의 잔류에 따른 2차오염을 통해 수중생물에 불리한 영향을 미칠 수 있기 때문에 친환경적이고 경제적인 수질개선 기술에 대한 요구가 증대되고 있다. 최근 기존의 화학적 처리방법의 대안으로 활성탄, 화산석 같은 물질을 여재로 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Morgan-Sagastume and Noyola, 2008; Oh *et al.*, 2010). 이러한 여재들은 다공성형태로서 비표면적이 넓어 기질 내부의 표면에 부착한 생물막이나 미생물군이 영양염을 제거하는데 매우 효과적이다. 또한 운전관리가 용이하고, 2차 오염물질이 없는 장점을 가지고 있어 여재를 이용한 기술의 가능성이 국내·외적으로 점차 커지고 있다.

외국의 경우, 여재를 이용한 인 제거방법으로 백운석과 모래를 혼합한 여재를 이용한 인의 제거 (Prochaska and Zouboulis, 2006), 슬래그와 제올라이트 여재를 이용한 인 제거 (Sakadevan and Bavor, 1998), 그리고 7가지 다양한 여재 (bauxite, shale, burnt oil shale, limestone, zeolite, light expanded clay aggregates (LECA) and fly ash)를 이용한 인 제거 (Drizo *et al.*, 1999) 등의 방법이 보고되었다. 국내에서는 그물형태의 폴리프로필렌 여재를 이용한 유기물 처리 (Lee *et al.*, 1999), 황토비드와 블랙카본, 부식, 규산질 화산석 등이 혼합된 혼합여재의 질소 및 인의 흡착특성 및 흡착능 평가 (Seo *et al.*, 2007), 활성탄의 인 흡착특성에 대한 연구 (Seo and Kang, 2010) 등이 보고되었다. 하지만 여재의 폐쇄 현상으로 인한 효율저하 및 슬러지 재부상 등의 문제점도 노출되었다.

따라서 본 연구는 보다 안정적이고 경제적인 신소재 여재의 개발과 적용을 위해, 폴리프로필렌 소재의 스펀지, 화산석, 활성탄, 수산화마그네슘 등 네 가지 여재를 선정하여 칼럼여과 장치에 단독 및 혼합여과 한 후, 조류와 인 제거 효율을 분석하였다. 또한 여재로 사용한 수산화마그네슘의 첨가량 및 입자크기를 조절하여 인 제거효과를 비교, 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 여재

실험에 사용한 여재는 스펀지, 화산석, 활성탄, 수산화마그네슘 등 총 4가지를 선정하였다. 폴리프로필렌 소재의 스펀지를 가로, 세로, 높이 각각 2 cm × 2 cm × 2 cm 규격을 사용하였다. 화산석은 체 분리하여 입경 4~6 mm를 사용하였다. 활성탄은 입상활성탄으로 입경 2 mm를 사용하였으며, 사용 전에 증류수에 침전시켜 미세분진 등을 제거한 후 건조기에 충분히 건조한 후 사용하였다. 수산화마그네슘은 입경이 2 mm 이하와 2 mm 이상으로 분리되도록 체 분리하여 사용하였으며, 수돗물로 세척한 후 다시 증류수로 2회 세척하여 건조기에 건조한 후 사용하였다.

### 2. 진탕시 수산화마그네슘의 인 제거

진탕(Shaking)시료에서 수산화마그네슘 입경에 따른 인 제거효과를 조사하기 위해 삼각플라스크 내에 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 증류수에 용해시켜 인 농도를 1 mg L<sup>-1</sup>와 10 mg L<sup>-1</sup>로 조절한 후, 입경이 2 mm 이하와 2 mm 이상의 수산화마그네슘 50 g L<sup>-1</sup>를 삼각플라스크에 첨가하였다. 시료는 진탕배양기를 이용하여 100 rpm에서 5일 동안 진탕하면서 인 농도의 변화를 조사하였다. 인 농도의 감소효과를 검증하기 위해 SPSS package (ver. 12.0.1, SPSS inc., 2004 release)를 이용하여 ANOVA test를 실시하였다.

수산화마그네슘 처리량에 따른 인 제거효과를 조사하고자 입경 2 mm 이상의 수산화마그네슘을 삼각플라스크에 0, 10, 50, 100 g L<sup>-1</sup>로 각각 첨가하였다. 모든 시료의 인 농도는 0.1 mg L<sup>-1</sup>로 하였으며, 진탕배양기를 이용하여 100 rpm에서 2일 동안 진탕하면서 인 농도의 변화를 조사하였다.

### 3. 컬럼 여과실험

#### 1) 실험장치의 구성

4가지 여재에 대한 조류 및 인 제거효과를 조사하기 위

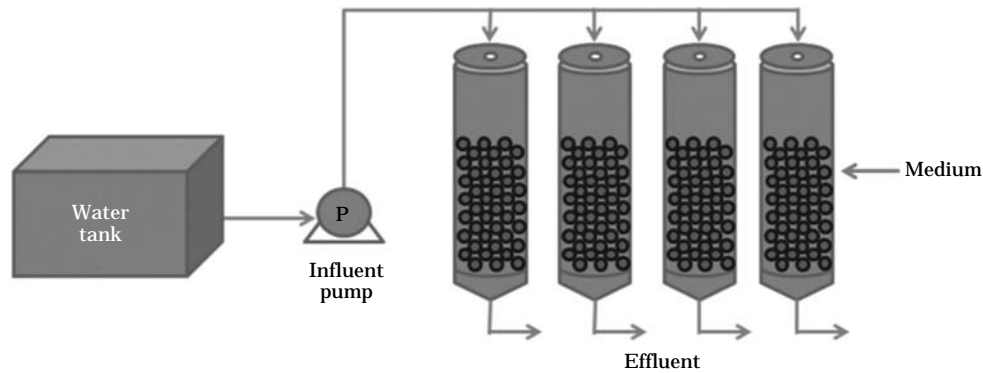


Fig. 1. Experimental device of column filtration using various media.

해 컬럼 여과장치를 제작하였다. 컬럼 여과장치는 내경 6 cm, 높이 60 cm, 총용적 1.75 L의 하향류식 원통형 아크릴 반응조로 구성하였다. 컬럼 상부에는 실험수를 유입하기 위해 cover 형태로 제작하였으며, 컬럼의 하부에는 유출수를 채취하기 위하여 볼밸브를 설치하였다(Fig. 1). Peristaltic pump (Watson-Marlow Sci-Q 323 S/D, England)를 이용하여 실험수를  $0.175 \text{ mL min}^{-1}$  (EBCT 10 min),  $0.35 \text{ mL min}^{-1}$  (EBCT 20 min),  $0.525 \text{ mL min}^{-1}$  (EBCT 30 min),  $1.5 \text{ mL min}^{-1}$  (EBCT 60 min)의 속도로 주입하였다.

## 2) 실험방법

네 개 반응조에서 단독으로 여과할 때와 스펀지, 화산석, 활성탄, 수산화마그네슘의 순서로 혼합하여 여과할 때의 효과를 서로 비교하였다. 대상 실험수는 자연수와 인공적으로 제조한 조류 배양수를 사용하였다. 자연수는 부영양호수(일감호, 서울)의 표층수를 채수하여  $60 \mu\text{m}$ ネットで 동물플랑크톤을 걸러낸 후 사용하였고, 인공 조류 배양수는 일본 국립환경연구소(NIES)에서 분양받은 *Scenedesmus acutus*를 BG-11 배지가 첨가된 폭기수에 접종하여 온도  $25^\circ\text{C}$ , 광도  $70 \sim 80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 의 조건에서 배양한 후 실험을 실시하였다. 각 반응조에 대한 여재의 충전율은 60%로 하였으며, 조류와 인 제거효과는 유입수와 유출수에서 Chl-*a*, SRP, TP 분석을 통하여 조사하였다.

## 3) 분석방법

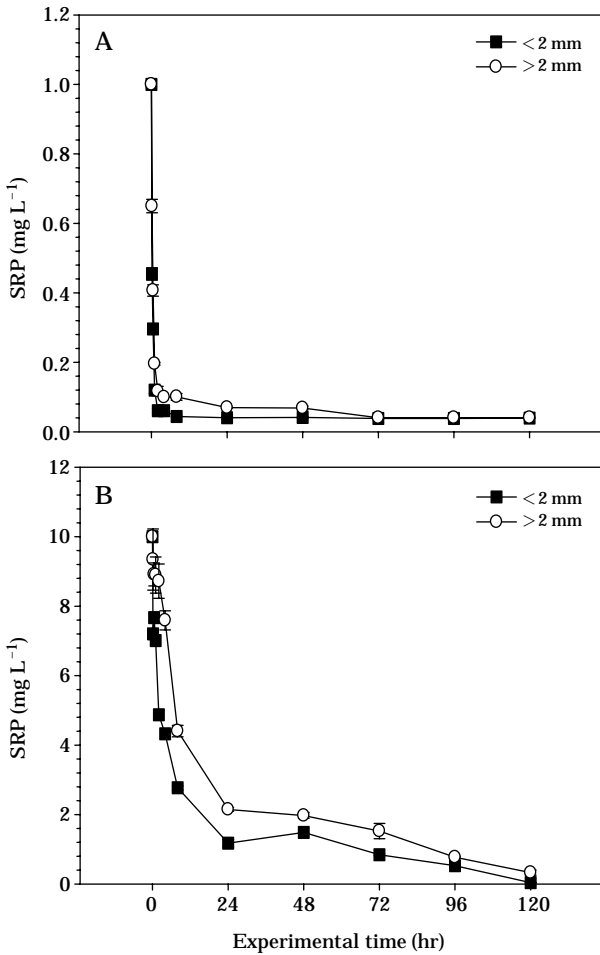
Chlorophyll-*a* 농도는 시료를 Whatman GF/F (Whatman International Ltd., Maidstone, England) 유리섬유 여과지로 여과하여 90% Aceton 10 mL에서 24시간 동안  $4^\circ\text{C}$ 의 암상태에서 추출한 후 20분간 원심분리하여 흡광도를 측정하여 계산하였다. SRP 농도는 ascorbic acid법, TP 농도는 persulfate 분해 후 ascorbic acid법으로 용존 무기인 농도를 각각 측정하였다(APHA, 2005).

## 결과 및 고찰

### 1. 진탕시 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 의 인 제거효과

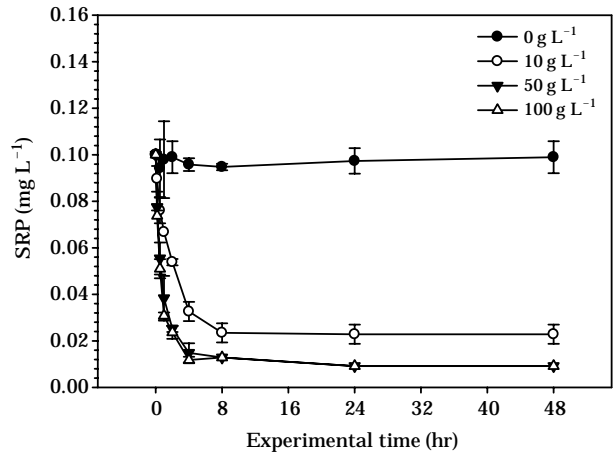
해수에서 추출한 천연소재인 수산화마그네슘의 입자크기 및 첨가량에 따른 인 제거 특성을 알아보기 위하여 초기 인 농도  $1 \text{ mg L}^{-1}$ 과  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 에서 입경 2 mm 이하 및 2 mm 이상의 수산화마그네슘을  $50 \text{ g L}^{-1}$ 로 첨가하여 인 농도를 각각 측정하였다. 초기 인 농도  $1 \text{ mg L}^{-1}$ 에서 2 mm 이하 및 2 mm 이상의 수산화마그네슘 모두 2시간 이내에 인 농도가 급격히 감소하였다. 72시간 경과 후 입경 2 mm 이하에서 가장 낮은 농도인  $0.04 \text{ mg L}^{-1}$ 로 96.2% 감소하였고, 2 mm 이상에서도  $0.04 \text{ mg L}^{-1}$ 로 96.0% 감소하는 것으로 조사되었다(Fig. 2A). 초기 인 농도  $10 \text{ mg L}^{-1}$ 에서는 24시간 이내에 인 농도가 급격히 감소하였으며 120시간 경과 후 입경 2 mm 이하에서 가장 낮은 농도인  $0.04 \text{ mg L}^{-1}$ 로 99.6% 감소하였고, 2 mm 이상에서는  $0.3 \text{ mg L}^{-1}$ 로 96.7% 감소하는 것으로 조사되었다(Fig. 2B). 본 결과에서 입경 2 mm 이하의 수산화마그네슘을 적용한 경우, Park et al. (2002)이 보고한 입경이 상이한 규산질 다공체의 인 제거효과와 같이 같은 중량에서 비표면적이 넓어 수중의 인과 반응하는 접촉면이 커지기 때문에 입경 2 mm 이상보다 약간 더 높은 인 제거효과를 보인 것으로 사료되었다. 그러나 ANOVA 분석 결과 수산화마그네슘의 인 제거효과가 입경 2 mm 이하 및 2 mm 이상에서 유의한 차이를 보이지는 않았다( $1 \text{ mg P L}^{-1}$  F=0.109, P=0.685) ( $10 \text{ mg P L}^{-1}$  F=1.542, P=0.355).

수산화마그네슘을 0, 10, 50,  $100 \text{ g L}^{-1}$ 로 각각 첨가한 결과 각 처리군에서의 인 농도는 8시간까지 급격히 감소하다가 이후에는 시간 경과에 따른 인 제거효과가 크지 않았다(Fig. 3). 수산화마그네슘을 10, 50,  $100 \text{ g L}^{-1}$ 를 첨



**Fig. 2.** Effect of particle size of Mg(OH)<sub>2</sub> on SRP removal in P-added solution (A: 1 mg P L<sup>-1</sup>, B: 10 mg P L<sup>-1</sup>).

가한 각각 처리군에서 초기 인 농도 0.1 mg L<sup>-1</sup>는 초기 1 시간 이내에는 31.8, 60.8, 68.5%, 2시간 이내에는 45.6, 74.5, 76.1%의 인 농도 감소효과가 각각 나타났고, 이에 따라 인 농도 0.1 mg L<sup>-1</sup>가 0.025 mg L<sup>-1</sup> 이하의 총인 기준 부영양화 기준 값(Forsberg and Ryding, 1980) 아래의 농도로 감소하는 데에는 1~2시간 이내의 시간이 소요되었다. 이후에는 수산화마그네슘이 10 g L<sup>-1</sup> 포함된 처리군에서 48시간 경과 후 인 농도가 0.01 mg L<sup>-1</sup>로서 90.8% 감소하였고, 수산화마그네슘이 50, 100 g L<sup>-1</sup>를 포함한 처리군에서 24시간 경과 후 인 농도가 0.01 mg L<sup>-1</sup>로서 90.6% 감소하였다. 일반적으로 수중의 총인 농도가 0.025~0.1 mg L<sup>-1</sup>이면 부영양상태라고 판정할 수 있는데(Forsberg and Ryding, 1980), 수산화마그네슘을 이용한 인 제거를 통해서 단시간에 인 농도 0.01 mg L<sup>-1</sup> 이하의 빈영양상태로 정화될 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 시

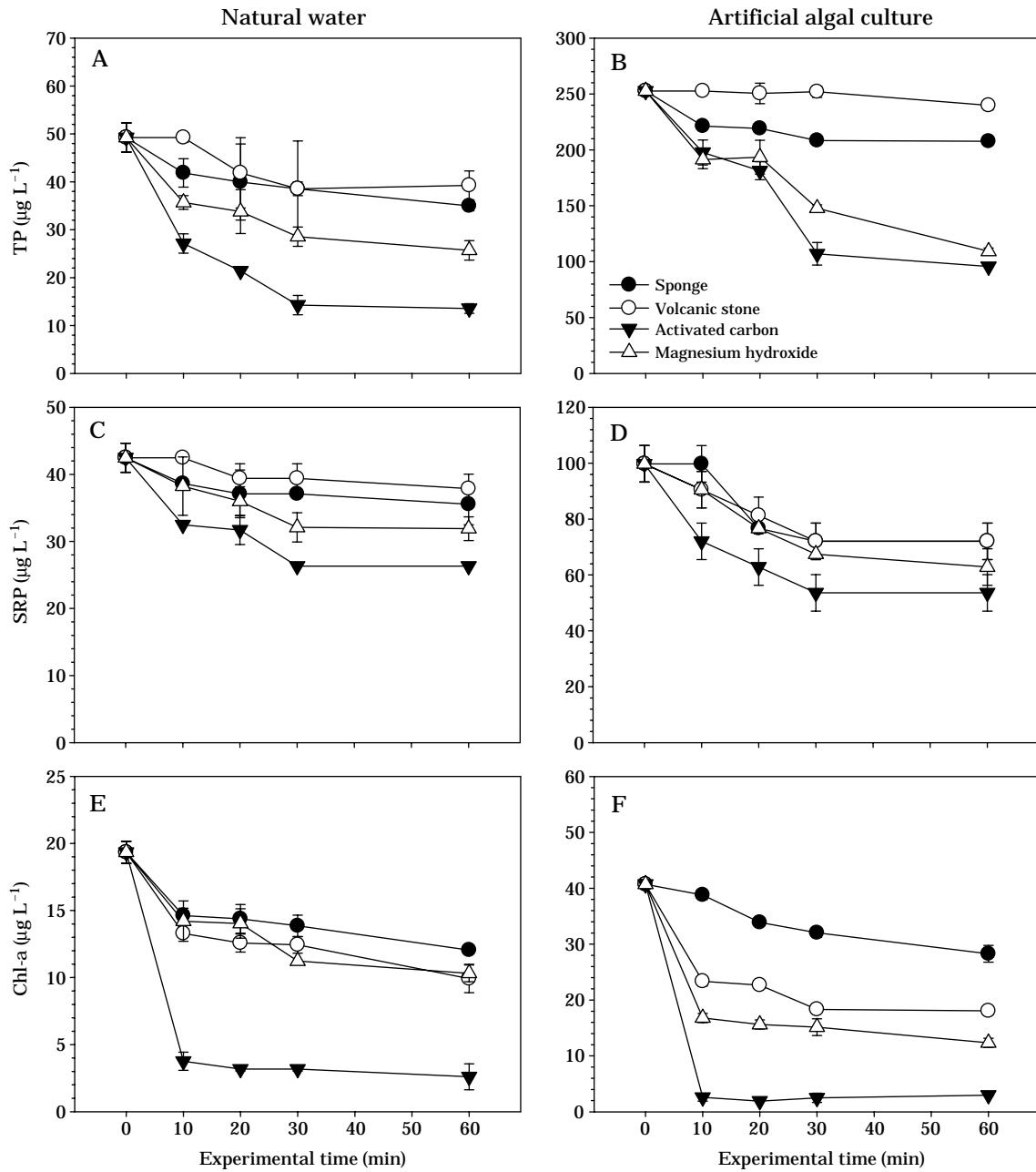


**Fig. 3.** Effect of added amount of Mg(OH)<sub>2</sub> on SRP removal in P-added solution. The particle size of Mg(OH)<sub>2</sub> was greater than 2 mm.

간의 경과에 따른 감소율을 비교한 결과 수산화마그네슘의 인 제거효과는 첨가량의 증가에 따라 비례하는 것으로 나타났으나, 8시간 이후에는 50 g L<sup>-1</sup>와 100 g L<sup>-1</sup>간에 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 10, 50, 100 g L<sup>-1</sup>로 첨가한 각 처리군에서 초기 4시간 이내에는 수산화마그네슘 첨가량 증가와 함께 인 농도 감소가 매우 급격히 이루어졌는데, 이러한 결과는 수중의 인과 흡착반응하는 수산화마그네슘 입자량 증가에 따른 것으로 판단되며(Oh *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2002), 초기의 급격한 인 제거효과 이후에 8, 24, 48시간으로 반응시간이 점차 길어진 경우에는 수산화마그네슘 첨가량 증가에 따른 인 제거효과가 매우 완만하게 나타났다. 따라서 본 결과를 바탕으로 현장에서 수산화마그네슘을 여재로 이용할 때에는 50 g L<sup>-1</sup> 이내의 첨가량으로서 1시간 이내의 반응시간을 통한 수중의 인 제거는 50~60% 이상의 효과를 나타낼 것으로 판단되며, 다른 여재들과의 혼합에 의해서 반응시간은 좀더 단축될 것으로 사료된다.

## 2. 컬럼 여과실험 결과

스펀지, 화산석, 활성탄, 수산화마그네슘의 4가지 여재를 단독 및 혼합 적용한 컬럼 여과실험의 결과는 수중의 Chl-a 및 SRP, TP에 대한 농도변화를 통해 Fig. 4와 5에 나타내었다. 단독여재의 자연수 및 인공 조류 배양수 유입시 제거효율을 조사한 결과, 여재별 TP 제거효율은 스펀지가 21.1% 및 15.3%, 화산석이 14.3% 및 1.6%, 수산화마그네슘은 37.2% 및 36.5%, 활성탄은 61.2% 및 42.4%으로 각각 조사되었으며(Fig. 4A, 4B), 혼합여재의 자연수



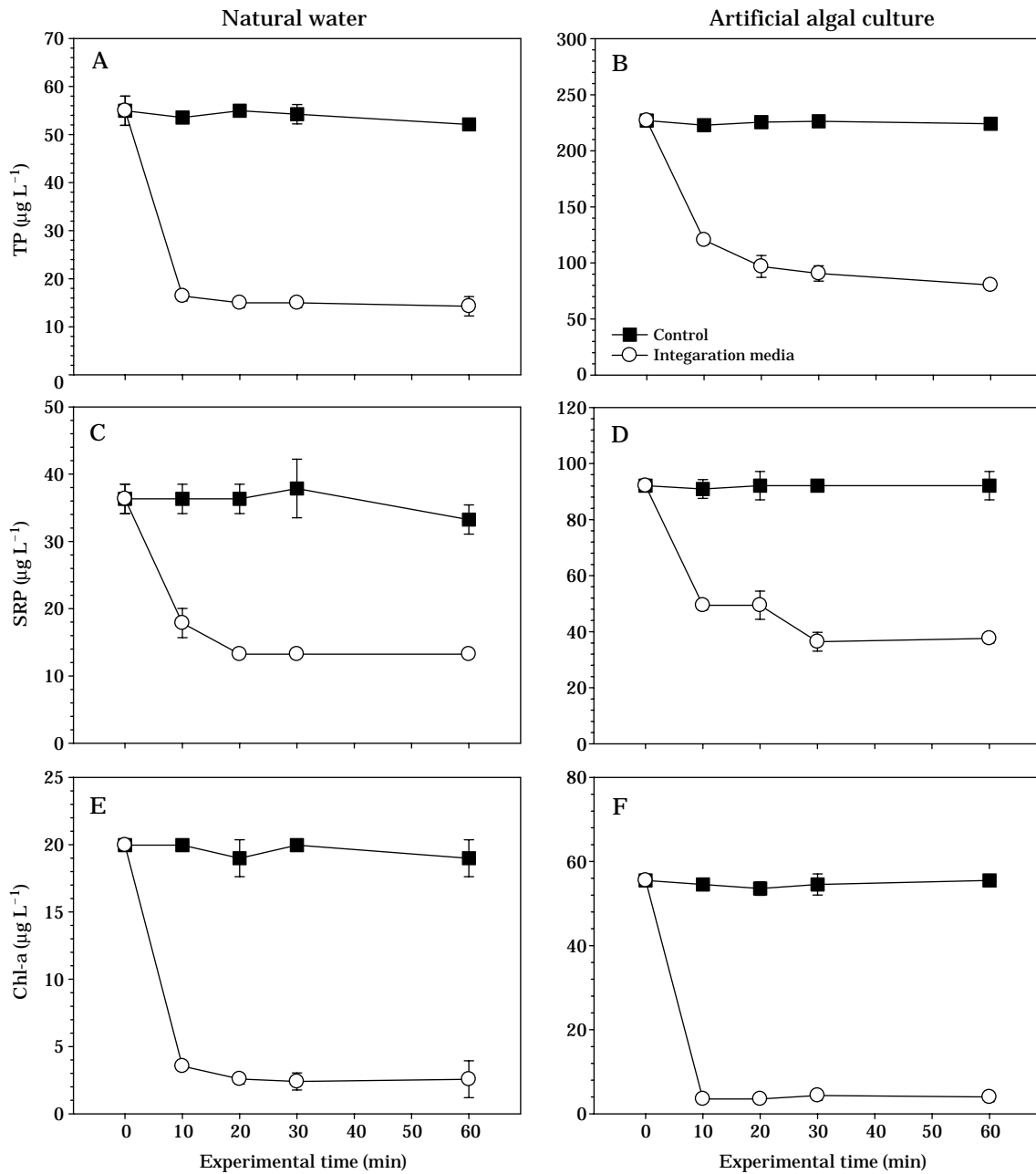
**Fig. 4.** Change of phosphorus and Chl-a in the two eutrophic water samples (natural water and artificial algal culture) by four types of media (sponge, volcanic stone, magnesium hydroxide and activated carbon).

및 인공 조류 배양수 유입시 제거효율이 각각 69.4 및 56.8%로서 단독여재에 비해 높게 나타났다(Fig. 5A, 5B). 전체적으로 여재를 적용한 TP의 제거능은 혼합여재>활성탄>수산화마그네슘>스펀지>화산석 순으로 나타났다.

SRP의 경우에도 TP 제거효과와 비슷한 결과를 나타냈다. 단독여재에서 자연수 및 인공 조류 배양수 유입시 각각의 여재별 제거효율은 스펀지가 12.7% 및 19.7%, 화산

석은 6.3% 및 20.9%, 수산화마그네슘은 25.5% 및 25.5%, 활성탄은 31.2% 및 39.4%로서 활성탄의 SRP 제거효율이 가장 높은 것으로 나타났다(Fig. 4C, 4D). 이러한 활성탄의 효과적인 인 제거는 Seo and Kang (2010)이 보고한 내용과도 서로 일치하였다. 그리고 혼합여재의 경우는 자연수 및 인공 조류 배양수 유입시 각각의 처리효율이 59.9% 및 52.9%로서 여재를 단독으로 이용하였을 경우





**Fig. 5.** Change of phosphorus and Chl-a in the two eutrophic water samples (natural water and artificial algal culture) by different combinations of four types of media (sponge, volcanic stone, magnesium hydroxide and activated carbon).

보다 혼합하였을 경우에 SRP의 제거효율이 활성탄에 비해서 20% 이상 높은 것으로 조사되었다(Fig. 5C, 5D). 활성탄을 다른 소재들과 결합하여 이용할 때에 나타내는 화합물의 분해, 흡착에 대한 상승효과와 같이 (Matos *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2002), 본 연구에서 단독여재에 비해 혼합여재에서 나타난 더 높은 인 제거효과는 여러 여재 중에서 활성탄과 수산화마그네슘에 의한 상호간의 상승작

용에 따른 것으로 판단된다.

Chl-a 경우 혼합여재와 활성탄의 경우 자연수 및 인공 조류 배양수를 유입시켰을 때 공통적으로 여과 10분 이내에 80~90%까지 Chl-a의 농도가 급격히 감소되었으며, 이후 60분까지 매우 낮은 농도를 유지하였다. 여재별로는 자연수 및 인공 조류 배양수 유입시 활성탄의 Chl-a 제거효율이 83.5% 및 93.9%로서 가장 높았으며, 스펀지, 화산

석, 수산화마그네슘은 Chl-*a* 제거효율이 25~60%를 보이며 활성탄에 비해서는 상대적으로 낮은 제거효율을 나타냈다(Fig. 4E, 4F). 혼합여재는 자연수 및 인공 조류 배양수 유입시 각각 85.8% 및 93.0%의 높은 Chl-*a* 제거효율을 나타내었으며, 활성탄을 제외한 나머지 여재보다 Chl-*a* 제거에 우수하였다(Fig. 5E, 5F). 혼합여재에서는 활성탄의 높은 Chl-*a* 제거효과로 인하여 인 제거효과에 비해서 조류제거에 대한 상승작용이 나타나지 않았으나, SRP와 TP 제거효과에서는 여재들을 이용한 현장적용시 혼합여재에 의한 인 제거의 상승효과가 기대되었다. 단독으로 여재를 사용할 경우에는 흡착능이 좀더 빨리 소실되는 동시에 그 기능 역시 단순여과에 의존하기 때문에 여재의 기능을 더욱 향상시키기 위해서는 여러 여재를 혼합시켜 여과하는 것이 좀더 적합하다(Sakadevan and Bavor, 1998; Prochaska and Zouboulis, 2006).

단독여재 실험결과 조류 및 인 제거효과는 여러 여재 중에서 활성탄이 가장 높았으며, 이와 같은 결과는 소재의 입자 조성의 차에 기인한 것이라 판단된다. 즉 제거율이 높은 활성탄의 경우 입자분포는 2 mm 이하이지만, 제거율이 낮은 화산석이나 스펀지의 경우 10~20 mm 범위로 입도 조성차이에 영향이 있을 것으로 판단된다. 또한 활성탄은 비표면적이 넓어 유기물질이나 부유물질의 흡착이 용이한 것도 원인으로 사료된다. 같은 중량의 활성탄이라도 입상활성탄에 비해 상대적으로 비표면적이 넓은 분말활성탄은 적은 양으로도 더욱 높은 인 제거효과를 나타내며, 활성탄은 질소흡착 보다는 인흡착이 좀더 우수한 것으로 보고된 바 있다(Seo *et al.*, 2008; Seo and Kang, 2010). 인흡착이 우수한 활성탄과 인흡착용 천연소재인 수산화마그네슘을 포함한 여재를 통해 혼합여재의 경우가 단독여재일 때 보다 이들 여재 사이의 상승작용으로 더 높은 인 제거효과를 나타냈으며, 혼합여재를 적용시 체류시간을 10~30분으로 유지할 때에도 상당한 높은 효과가 나타났다.

이상의 연구결과와 선행연구들을 종합하면, 4가지 여재는 조류와 인 제거에 높은 효과를 보였으며, 특히 여재의 혼합여재를 적용시 각 여재간 상승작용으로 인하여 더욱 높은 제거효과를 나타내었다. 따라서 여름철 남조대발생으로 인한 부영양 호소에 적용시 조류제어와 수질개선 효과를 클 것으로 사료되며, 향후, 이러한 효과를 높이기 위한 여재의 조합방법 및 반응시간 조절을 통해 요구되는 처리수 수질개선을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 반응기(여과장치)의 규모는 처리량과 비례하므로 이들을 적용할 수 있는 대상이나 범위에 대한 적절한 고려가 필요하다.

## 적 요

본 연구는 자연수와 인공조류 배양수(BG-11 medium) 등 두 가지 부영양 실험수를 이용하여 네 가지의 여재(스펀지, 화산석, 활성탄, 수산화마그네슘)의 단독 및 혼합여재 적용에 따른 조류 및 인 제거효과를 조사하였다. 혼합여재는 컬럼 여과장치에 각각의 여재를 충전후, 스펀지, 화산석, 활성탄, 수산화마그네슘의 순서로 연결하여 단독으로 여과할 때와 서로 비교하였다. 또한 여재로 사용한 수산화마그네슘의 첨가량 및 입자크기를 조절하여 인 제거효과를 비교하였다. 수산화마그네슘은 두 가지 입경(2 mm 이상 및 이하) 모두에서 높은 인 제거효과를 보였으며, 반응시간 및 첨가량 증가에 따라 인 제거효과가 증가하였다. 단독여재의 적용 결과, 4가지 여재 중 활성탄은 조류 및 인 제거에 매우 효과적인 것으로 나타났다. 또한 활성탄을 이용한 단독여재와 비교하여 혼합여재를 통해 가장 높은 인 제거효율을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 혼합여재의 경우에는 제거효율이 높았던 활성탄과 수산화마그네슘 등의 조합 적용이 상승작용을 나타낸 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업(과제번호: 2010-30004-0001-1)에 의하여 수행되었음.

## 인 용 문 헌

- APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. American Public Health Association. Washington, D.C. USA.
- Cho, J.H., J.W. Cho., Y.W. Lee and T.J. Lim. 2004. Wastewater treatment of papermaking by using oyster shells. *Korean Journal of Technical Association of the Pulp and Paper Industry* **36**: 60-66.
- Cooke, G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson and S.A. Nichols. 2005. Restoration and management of lakes and reservoirs (3rd ed.). CRC Taylor & Francis. Boca Raton, New York. 591 pp.
- Dawson, R.M. 1998. The toxicology of microcystins. *Toxicon* **36**: 953-962.
- Drizo, A., C.A. Frost, J. Grace and K.A. Smith. 1999. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates

- for use in constructed wetland systems. *Water Research* **33**: 3595-3602.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Archiv für Hydrobiologie* **89**: 189-207.
- Ibelings, B.W., A.S. Gsell, W.M. Mooij, E. Van Donk, S. Van Den Wyngaert and L.N. De Senerpont Domis. 2011. Chytrid infections and diatom spring blooms: paradoxical effects of climate warming on fungal epidemics in lakes. *Freshwater Biology* **56**: 754-766.
- Kim, M.H., J.S. Hur, T.Y. Kim, H. Moon and J.H. Yang. 2002. The adsorption of organic and inorganic compounds using the CAC beads combined with chitosan and activated carbon. *Korean Journal of Chemical Engineering* **40**: 43-49.
- Lee, B.H., B.H. Moon and I.C. Cho. 2006. Application of oyster shells and zeolites for P and NH<sub>4</sub>(+)-N removal. *Journal of the Korean society for Environmental Analysis* **9**: 55-62.
- Lee, C.H., Y.S. Park and K.H. Ahn. 1999. Organic treatment and prediction of effluent concentration using fixed-bed biofilm reactor packed polypropylene media of a net form. *Journal of the Korean Society for Environmental Health* **25**: 60-65.
- Matos, J., J. Laine and J. Herrmann. 1998. Synergy effect in the photocatalytic degradation of phenol on a suspended mixture of titania and activated carbon. *Applied Catalysis B: Environmental* **18**: 281-291.
- Morgan-Sagastume, J.M. and A. Noyola. 2008. Evaluation of an aerobic submerged filter packed with volcanic scoria. *Bioresource Technology* **99**: 2528-2536.
- Oh, H.M., S.J. Lee, B.D. Yoon, W.J. Lee, S.K. Lee and L. Choi. 2000. Control of microalgae using a porous silicate material, CellCaSi. *Korean Journal of Limnology* **33**: 145-151.
- Oh, H.M., S.J. Lee., S.B. Kim., M.K. Park., B.D. Yoon and D.H. Kim. 1998. Determination of limiting nutrient for algal growth by algal bioassay. *Korean Journal of Limnology* **31**: 150-157.
- Oh, Y.M., J.H. Lee, J.J. Park, G.C. Choi, T.J. Park and T.H. Lee. 2010. Water quality improvement of stagnant water using an upflow activated carbon biofilm process and microbial community analysis. *Journal of Korean Society on Environmental Engineers* **32**: 1191-1200.
- Park, M.H., M.S. Han, S.J. Lee, C.Y. Ahn, B.D. Yoon and H.M. Oh. 2002. Effects of CellCaSi and inorganic additives on phosphorus removal in water. *Korean Journal of Limnology* **35**: 213-219.
- Persson, P.E. 1982. Muddy odor: a problem associated with extreme eutrophication. *Hydrobiologia* **86**: 161-164.
- Prochaska, C.A. and A.I. Zouboulis. 2006. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. *Ecological Engineering* **26**: 293-303.
- Sakadevan, K. and H.J. Bavor. 1998. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Research* **32**: 393-399.
- Schindler, D.W., F.A.J. Armstrong, S.K. Holmgren and G.J. Brunskill. 1971. Eutrophication of lake 227, experimental lake area, Northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **28**: 1763-1782.
- Seo, J.B. and J.W. Kang. 2010. A kinetic study on the phosphorus adsorption by physical properties of activated carbon. *Journal of Korean Society on Water Quality* **26**: 491-496.
- Seo, J.B., J.W. Kang and I.S. Lee. 2008. A kinetic study on the ammonia nitrogen adsorption by physical characteristics of activated carbon. *Journal of Korean Society on Water Quality* **24**: 311-316.
- Seo, J.W., H.S. Jang and K.H. Kang. 2007. Performance evaluation of subsurface-flow wetland with media possessing different adsorption capacities for nitrogen and phosphorus. *Journal of Korean Society on Water Quality* **23**: 155-160.
- Shi, Li., Y. Cai, F. Kong and Y. Yu. 2011. Changes in abundance and community structure of bacteria associated with buoyant *Microcystis* colonies during the decline of cyanobacterial bloom (autumn-winter transition). *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* **47**: 355-362.

(Manuscript received 8 February 2012,  
Revised 13 March 2012,  
Revision accepted 15 March 2012)