

음식폐기물 탄화재로 충전된 PRB설계법 제안을 위한 컬럼실험

Column Tests for the Design of PRB System using CFW

한 중 근 ¹	Han, Jung-Geun	윤 원 일 ^{2*}	Yoon, Won-Il
정 동 호 ³	Jung, Dong-Ho	김 용 수 ⁴	Kim, Yong-Soo
이 중 영 ⁵	Lee, Jong-Young		

ABSTRACT

Permeable Reactive Barriers (PRB) method is an economical method that does not require any other methods to be operated once it is installed as it controls of groundwater flow in the barrier, which is inserted a reactive material on the way of pollutant. The major dominant element of PRB is a reactive material in the reactive wall, and such factors as purification efficiency and used time based on the chemical and physical features in between the reactant and pollutant. High purification efficiency can be expected when a rational design that is synthetically considered in features of packing density, operation period, and adsorption reactant of pollutant. A column test was conducted for an application test using CFW as its adsorption reactant in order to remove copper(Cu^{2+}) in the PRB system. The CFW was used for the reactant and selected inflow speed, density and thickness of PRB as its necessary factors for design of PRB. As a result of the experiment, the removal efficiency decreased as operating time of PRB increased and the efficiency linearly increased upon the length. Therefore, it is confirmed that the thickness of reactive materials in PRB system can be designed using the proposed formula considering purification time and density of CFW.

요 지

PRB 공법은 지하수의 흐름을 변화시키지 않고 오염물질이 지나가는 길목에 반응물질이 삽입된 벽체를 형성함으로써 한번 설치할 경우 운용에 필요한 별도의 시설이 불필요한 경제적인 공법이다. PRB공법의 주요 지배요소는 반응벽체내 반응물질이며, 반응물질과 오염물간의 물리·화학적 특성에 따라 정화효율, 사용시간 등이 결정된다. PRB공법은 오염물의 유입 농도, 유입기간, 흡착반응물질의 특성을 종합적으로 고려한 설계가 이루어져야 높은 정화효율을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 PRB시스템에서 구리(Cu^{2+})제거를 위한 흡착반응물질로 CFW를 사용할 경우 적용성 평가를 위한 컬럼실험을 실시하였다. 컬럼실험은 CFW를 반응물질로 하며 오염물의 유입속도, 밀도, PRB의 두께를 PRB의 설계에 필요한 영향인자로 선정하였다. 실험결과 PRB의 가동 시간이 증가함에 따라 제거효율은 감소하였으며, PRB길이에 따라 제거효율은 선형적으로 증가하였다. 이러한 관계를 이용하여 PRB system의 반응물질 두께를 CFW 밀도, 정화기간을 고려한 제안식을 이용하여 설계할 수 있음을 확인하였다.

Keywords : Carbonized foods waste, Permeable reactive barrier, Copper, Column test

1. 서 론

오염된 지하수 정화를 위한 대표적인 방법으로는 양수

처리(pump and treat)공법이 있는데, 이 공법은 오염된 지하수를 추출정 또는 양수한 후 다양한 물리·화학적 처리에 의해 정화시키는 비원위치(ex-situ)처리 방법이다. 원위치

-
- 1 정회원, 중앙대학교 건설시스템공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Sys. Engrg., Chung-ang Univ.)
 - 2* 학생회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chung-ang Univ., E-mail: sinensis3@naver.com)
 - 3 학생회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chung-ang Univ.)
 - 4 정회원, 한국시설안전공단 네트워크연구단 과장 (Member, Manager, Research Team, KISTEC)
 - 5 정회원, (주)지오힐텍 대표이사 (Member, President, Geo Healtech Korea CO. LTD.)

(in-situ)처리방법은 오염원(유기, 무기)에 따라 미생물, 공기, 화학용액 등을 주입하는 방법과 반응물질을 벽체형태로 설치하여 오염물질과의 반응에 의해 처리할 수 있는 PRB(permeable reactive barrier)공법이 있다. 이들 처리공법 중 양수처리 공법과 주입에 의한 원위치 정화방법은 오염물질이 지속적으로 발생하는 오염원에 대해서 기술적 한계, 경제적 취약성 등의 문제가 지적되기도 한다. 반면에 PRB공법은 지하수의 흐름을 변화시키지 않고 오염물질이 지나가는 길목에 반응물질이 삽입된 벽체를 형성함으로써 한번 설치할 경우 운용에 필요한 별도의 시설이 불필요한 경제적인 공법이다(USEPA, 1997). PRB공법 적용에 관한 주요 지배요소는 반응벽체 내에 삽입되는 반응물질이며, 반응물질과 오염물질간의 물리·화학적 특성에 따라 정화효율, 사용시간 등이 결정된다. 대표적인 반응물질로는 영가철(zero valent iron; ZVI), 제올라이트(zeolite), 입상활성탄(granular active carbon; GAC) 등이 사용되고 있으며, 최근에는 폐자원 활용에 관심을 둔 연구가 급증하고 있는 추세이다(이종영 등, 2009; 한중근 등, 2007, 2011; Han et al., 2010a).

한편, 우리나라의 음식폐기물은 연간 약 15조 원이며 생활수준의 향상으로 인해 앞으로도 지속적인 증가가 전망된다. 현재 음식폐기물의 처리형태는 매립, 소각, 재활용(자원화) 형태로 처리되고 있으며, 이중 매립에 의한 처리방법은 현재 중소규모 도시에 한하여 제한적으로 실시되고 있다. 최근에는 매립에 의한 처리방법의 대체 수단으로 재활용(자원화)에 관심이 집중됨에 따라 사료화, 퇴비화, 하수병합처리, 지렁이사육, 버섯재배 등의 방법으로 처리되고 있다(환경부, 1996, 2004; 한국식품개발연구원, 2002). CFW(carbonized foods waste)는 음식폐기물을 탄화 처리하여 생산된 제품으로 다른 처리방법에 비해 단시간에 재활용 형태로 처리할 수 있다는 특징이 있다. 탄화 처리는 부피감량률이 90%이상이고 생산된 제품은 현재

비료, 연료, 탈취제 등으로 활용되고 있다.

본 연구에서는 PRB공법의 반응물질로 CFW를 사용하였으며, 정화효율에 영향을 미치는 인자로 반응시간, 충전 밀도, 오염물의 흐름속도, 설치두께를 설정하여 침전 및 흡착에 의한 제거효과 관점으로 정화효율을 살펴보았다. 또한, 흐름속도, CFW의 충전밀도에 대하여 가동시간과 PRB두께 관점으로 정화효율에 관한 상관관계 분석을 실시하였다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 최종적으로 구리로 오염된 지하수 정화에 있어서 CFW를 PRB반응물질로 사용하고자 했을 때 요구되는 PRB두께를 사용기간, 밀도, 오염물 유입속도에 따라 설계할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

표 1은 CFW의 물리화학적 특성을 나타낸 것으로 CFW는 전체구성의 약 90%이상이 에쉬, 탄소 및 산소로 구성되어 있다. 비표면적은 14.16m²/g, 평균세공경이 132.4Å으로 이는 IUPAC(International Union of Pure and Applied Chemistry)에서 정의하고 있는 대세공 500Å이상, 중간세공 20~500Å, 미세세공 20Å이하와 대조해 볼 때 CFW는 중간세공이 발달한 것을 확인할 수 있었다. 세공용적은 0.0469cm³/g으로 폐활성슬러지 0.064cm³/g, 석탄계 활성탄 0.126cm³/g보다 다소 떨어지는 것으로 평가되었으나 전체 세공용적 중 중간세공이 100%를 차지하고 있어 분자량이 큰 오염물질에 대한 제거효율은 높을 것으로 예상된다. 사진 1은 주사전자현미경(SEM; Philips XL30 ESEM)을 이용해 세공분포 발달을 관찰한 것으로 촬영결과 표면세공의 발달을 육안으로 확인할 수 있었다.

충진물질로 사용된 CFW는 No.40번체(0.4mm)를 통과

표 1. CFW의 물리화학적 특성

I. Physical composition of CFW													
C	H	O	N	S	Cl	ash	Total						
(%)													
11.3	0.52	11.9	1.09	0.48	1.85	72.9	100						
II. Chemical composition of CFW													
O	Ca	C	K	Cl	Na	P	Fe	Si	Mg	S	Al	Other	Total
(%)													
38.39	25.51	21.73	3.2	3.05	2.64	1.5	1.29	0.97	0.71	0.51	0.27	0.23	100

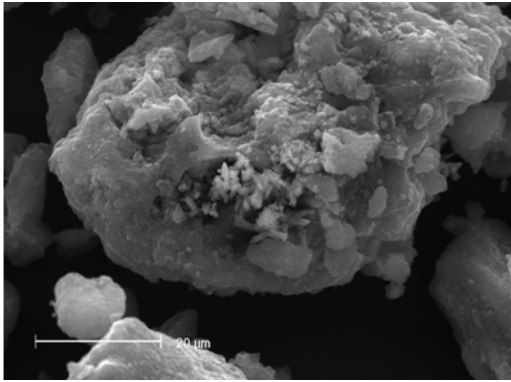


사진 1. 주사전자현미경 촬영결과

한 재료를 사용하였으며, 오염물질은 분말상태의 황산구리 [Copper(II) Sulfate Pentahydrate-CuSO₄·5H₂O]를 증류수에 1,000mg/l의 농도로 희석하여 사용하였다.

2.2 실험장치 및 조건

그림 1 및 사진 2는 실험장치의 구성 및 실험전경을 나

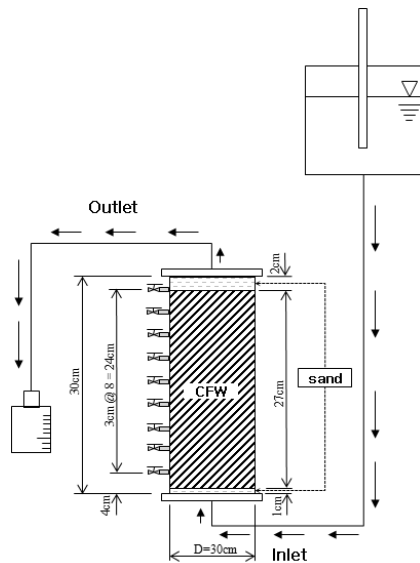


그림 1. 실험장비 모식도

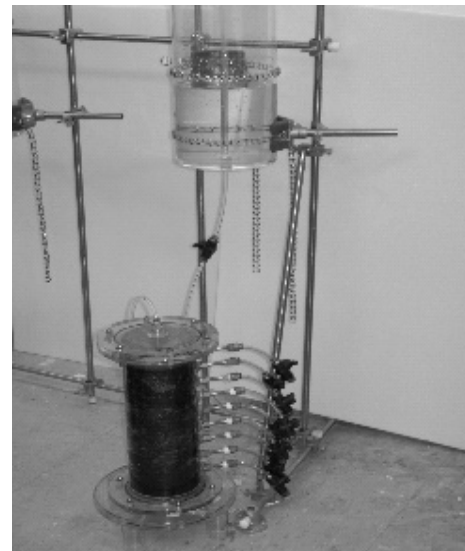


사진 2. 실험장비 모식도

타낸 것이다. 실험장치는 아크릴 재질의 원통형 컬럼, 수위조절장치로 구성되어 있으며, 오염물질의 유입은 수두차에 의해 컬럼 하부에서 상부로 주입되는 상향주입 방식을 채택하였다. 또한 유입구 및 유출구에 용액의 고른 분포를 위하여 표준사를 포설하였으며, 실험과정 중 샘플 추출을 위해 3cm 간격으로 9개의 포트를 설치하였다. 실험과정 중 오염물질은 24시간 간격으로 채취하였으며, 각 위치별로 채취된 오염물질은 40ml 유리병에 채운 후 부유물질 제거를 위해 3000rpm으로 원심분리하였다. 이후 0.24 μm의 멤브레인 필터를 이용해 미세잔류물을 제거한 후 유도결합플라즈마분광기(ICP, Inductively Coupled Plasma Spectrometer, JY-Ultima-2, Jobin Yvon, France)를 이용해 잔류농도를 정량 분석하였다

표 2는 컬럼실험 조건을 나타낸 것으로 영향인자별로 총 9회 실시하였다. 영향인자 중 밀도는 상대밀도 산정식을 이용하였으며, 다짐실험을 통해 CFW의 최대건조밀도 0.834g/cm³와 최소건조밀도 0.558g/cm³를 건조단위중량에 따라 32%(느슨함), 52%(중간) 그리고 72%(조밀함)의 상태로 구분하였다.

표 2. 실험조건

Flow velocity(k)	Density of PRB (Dr)	Loose (32%)	Midium (52%)	Dense (72%)
10-2 cm/sec		PRB1-1	PRB2-1	PRB3-1
10-3 cm/sec		PRB1-2	PRB2-2	PRB3-2
10-4 cm/sec		PRB1-3	PRB2-3	PRB3-3

3. 실험결과

3.1 실험조건별 pH 변화

그림 2는 CFW의 밀도와 흐름속도에 따른 pH변화를 나타낸 것이다. 그림 2(a)~(c)는 느슨한 조건인 32% 실험조건 결과로 실험초기의 pH변화는 용액이 약 12cm 이상을 통과했을 때 변화가 관찰되었다. 이것은 반응횟수가 증가함에 따른 결과이며, 유입속도가 빠를수록 pH 상승효과는 낮은 것으로 나타났다. 유입속도 관점으로 봤을 때 $k=1E-2 \sim 1E-3 \text{cm/sec}$ 에서의 pH변화는 유사한 경향을 보였으며, 유입속도가 상대적으로 느린 $1E-4 \text{cm/sec}$ 에서는 pH가 상승하는데 필요한 PRB길이가 짧은 것으로 나타났다. $k=1E-2 \sim 1E-3 \text{cm/sec}$ 조건에서의 pH의 상승은 길이에 따

라 다소 차이가 있지만 약 50~70시간 경과 후 급격히 낮아진 값을 보였으며, $k=1E-4 \text{cm/sec}$ 조건에서는 최대 120시간 경과 후 pH가 감소하는 것으로 나타났다. 컬럼위치에 따른 pH변화를 고려하면 약 18cm 이상일 경우에 중금속 제거효과는 우수하고 가동시간이 약 50~120시간 경과 후에는 침전에 의한 제거보다는 흡착에 의한 제거가 지배적일 것으로 예상되었다.

그림 2(d)~(f)는 중간정도의 밀도인 52%로 설정한 실험조건에 대해 흐름속도별 pH변화를 나타낸 것이다. $k=1E-2 \text{cm/sec}$ 조건은 밀도가 느슨할 경우와 대비해 큰 변화를 보이지 않았으나 $k=1E-3 \text{cm/sec}$ 이상의 조건에서 pH변화는 큰 폭으로 나타났다. pH가 감소하는데 필요한 시간은 $k=1E-2 \text{cm/sec}$ 에서는 약 40시간, 그 이하의 흐름조건에서는 약 80시간을 전후로 pH가 감소하였다. 가장 느린 조건

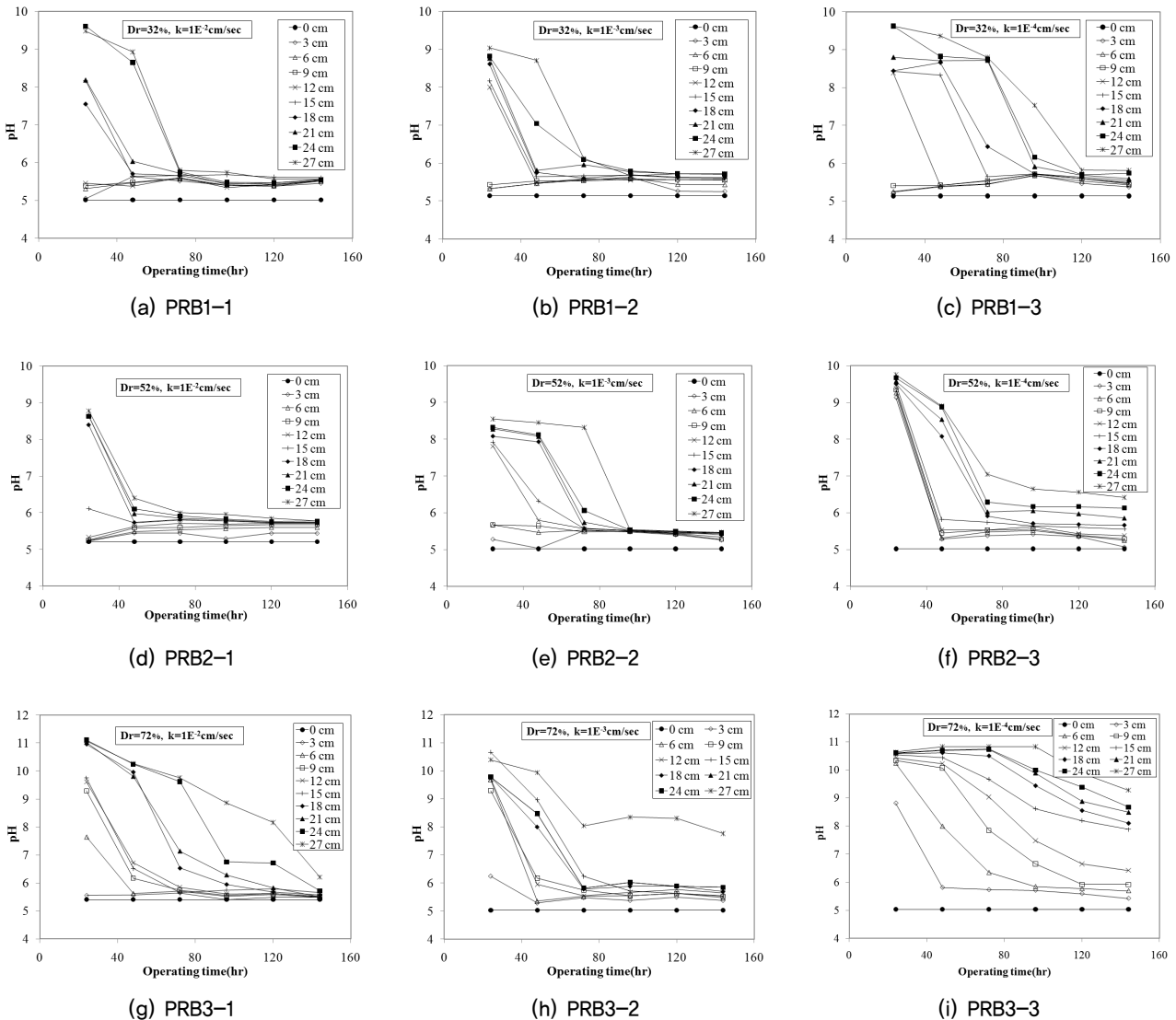


그림 2. 밀도와 흐름속도에 따른 pH의 변화

인 $k=1E-4$ cm/sec에서는 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 실험종료 후 pH가 약 6.5인 것으로 미루어 볼 때 침전에 의한 중금속 제거효과를 유지함을 알 수 있었다. 한편 그림 2(g)~(i)는 상대밀도가 72%인 조밀한 경우 각 흐름조건별 pH변화를 나타낸 것이다. 조밀한 경우 전반적인 pH변화는 그 이하의 밀도조건에서보다 증가폭 및 유지시간이 길어지는 경향을 보였다. 동일한 밀도 조건에서 흐름속도에 따른 pH변화는 흐름속도가 느려짐에 따라 pH감소폭 및 하강시간이 느려지는데 이는 CFW와 오염물의 접촉시간이 길어짐에 따른 결과이다.

전반적으로 컬럼 내부의 수직적인 pH변화 양상은 Cu^{2+} 의 주입에 따른 수소이온의 증가로 pH는 유입부인 하부부터 점차 중화반응이 진행되어 컬럼 상부로 확산됨을 확인할 수 있었다. 또한, CFW의 충전밀도와 흐름속도에 따른 pH변화와 관련된 영향인자 중에서 밀도는 중간밀도일 때

큰 폭의 변화를 가져왔으며, 흐름속도가 $k=1E-3$ cm/sec이상의 조건에서는 변화폭이 크지 않음을 알 수 있었다.

3.2 충전밀도와 흐름속도 변화에 따른 제거특성

그림 3은 CFW의 충전밀도가 느슨한 경우일 때 각 유입속도 조건에 대하여 컬럼 위치에 따른 Cu^{2+} 의 제거율을 시간별로 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 유입속도 $k=1E-2$ cm/sec에 대한 결과로서 24시간 경과 후 18cm 이상의 지점에서 100%의 제거율을 나타냈으며, 그 이하 위치에서는 제거율이 선형적으로 감소하였다. 그림 3(b)는 $k=1E-3$ cm/sec에 대한 제거율을 나타낸 것으로 24시간 경과 후 12cm 이상 지점에서 측정된 제거율은 100%를 보였다. 이후 제거율은 그림 3(a)와 유사하게 감소하였는데 유입속도 중 $k=1E-2$ cm/sec와 $k=1E-3$ cm/sec의 차이점은 뚜렷하게 나타

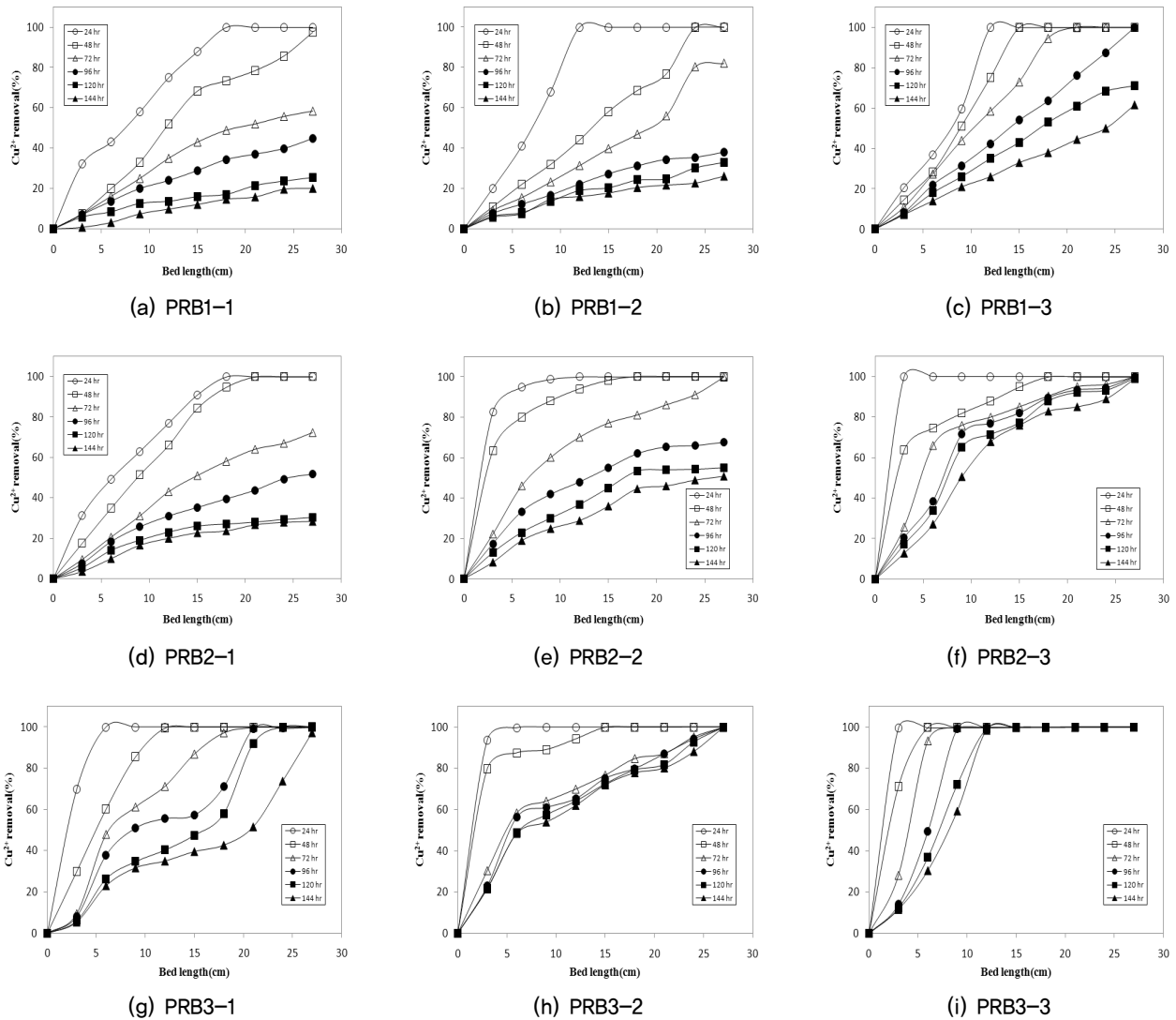


그림 3. CFW 충전길이에 따른 Cu^{2+} 의 제거율

나지 않았다. 반면에 유입속도가 가장 낮은 $k=1E-4\text{cm/sec}$ 는 실험종료시까지 약 60%이상의 높은 제거율을 보였는데, 이것은 유입속도가 감소함에 따라 흡착제와의 반응시간이 상대적으로 많았고 pH측정 결과에서 나타난 바와 같이 pH상승에 필요한 시간이 충분했기 때문에 침전에 의한 효과가 제거율 상승에 영향을 준 것으로 판단된다.

그림 3(d)~(f)는 CFW 충전밀도가 중간밀도 조건에서의 유입속도에 따른 제거율을 나타낸 것으로 $k=1E-2\text{cm/sec}$ 에서는 충전밀도가 느슨한 경우에 비해 제거효율은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 $k=1E-3\text{cm/sec}$ 이하의 유입속도에서는 느슨한 경우에 비해 높은 제거율을 보였으며, 유입속도가 가장 느린 $k=1E-4\text{cm/sec}$ 조건일 때 실험 진행과정 전체적으로 컬럼 최상부 27cm지점에서 100%의 높은 제거율을 유지하였다. 그림 3(g)~(i)은 조밀한 충전밀도 조건에서의 실험결과이며, 전반적으로 모든 조건에서의 제거율은 다른 밀도조건에서의 실험결과보다 우수한 결과를 보였다. 유입속도가 가장 느린 $k=1E-4\text{cm/sec}$ 에서는 컬럼의 12cm지점에서 실험 종료시까지 모든 중금속이 제거되는 것으로 나타났다.

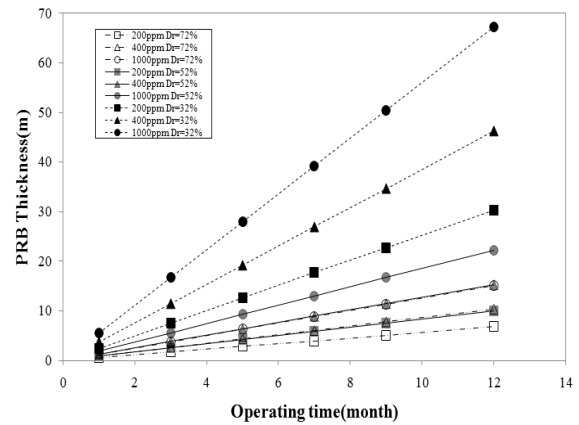
전반적으로 중금속 유입시간이 증가할수록 점차 제거율은 감소하였으며, 감소폭은 실험초반에 크게 나타났다. 이것은 pH가 실험초반에 증가폭이 큰 것과 관련되며, CFW의 pH가 일정수준을 유지한 이후에 침전에 의한 제거보다 흡착에 의한 제거효과가 지배적이었기 때문으로 판단된다. 또한 제거율이 실험중반 이후 낮게 측정되는 원인으로는 컬럼에 유입되는 Cu^{2+} 의 초기농도가 고농도 (1000mg/l)가 유입됨에 따라 실험초기에 CFW의 흡착능력 대부분을 소화한 것에 따른 결과이다.

제거효율은 컬럼길이에 따라 선형적인 감소경향을 보였고, 오염물의 유입속도가 느릴수록 제거효율은 증가하였고, 밀도가 증가할수록 pH증가 효과가 우수하였다. 즉, 밀도와 유입속도에 따른 제거효율은 pH의 변화, 오염물과 흡착제의 반응시간, 반응횟수가 증가함에 따라 제거효율이 증감됨을 알 수 있었다.

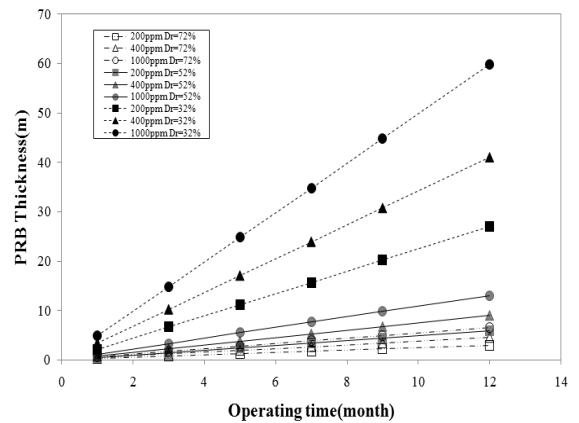
4. 결과분석

4.1 충전밀도/유입속도와 정화효율간의 상관관계 분석

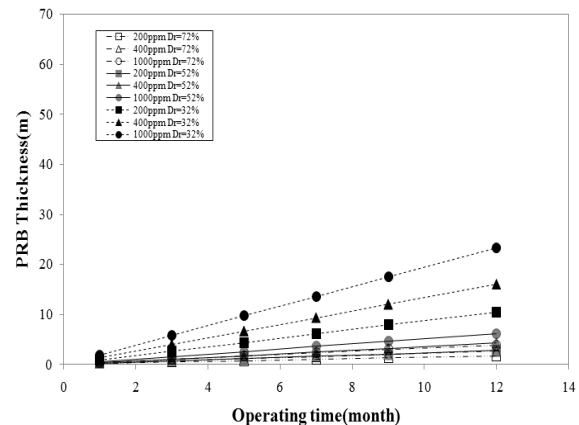
그림 4는 PRB운영시간에 따른 두께 산정을 위해 밀도와 유입속도를 영향인자로 두었을 때 가동시간에 따른



(a) $k=1.0E-2\text{cm/sec}$



(b) $k=1.0E-3\text{cm/sec}$



(c) $k=1.0E-4\text{cm/sec}$

그림 4. 밀도와 유입속도 고려한 가동시간에 따른 PRB두께

PRB두께를 농도별로 도시한 것으로, 가동시간을 1~12개월을 적용하여 시간경과에 따른 PRB두께를 나타낸 것이다. 이때, 유입되는 농도의 변화는 회분식 실험결과(Han et al., 2008, 2010b)를 사용하였는데, 그림 5와 같이 Cu^{2+} 의 초기농도와 흡착량과의 비선형적인 관계를 적용하였다.

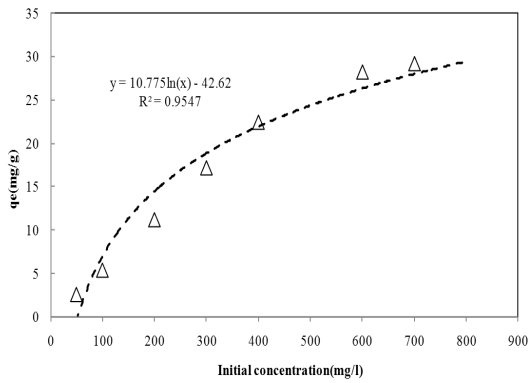


그림 5. 흡착량과 초기농도와의 관계

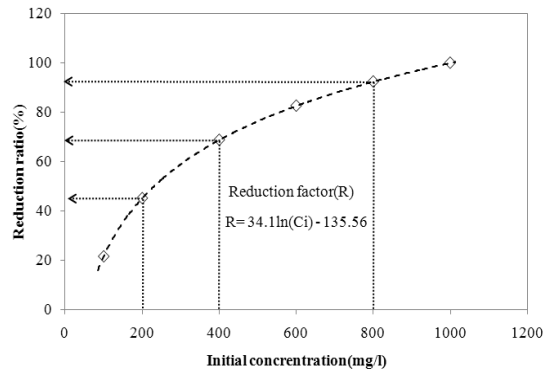
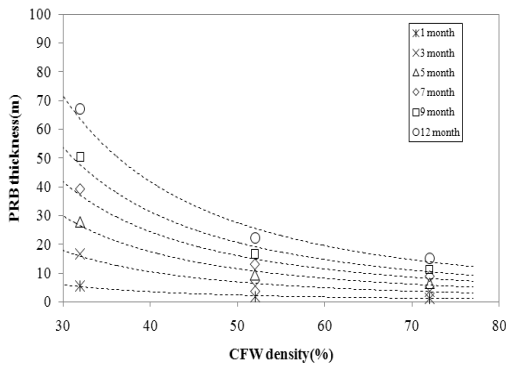
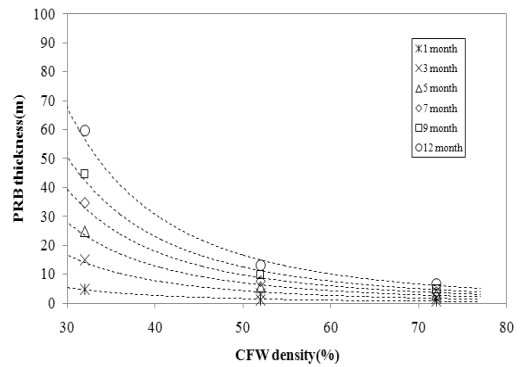


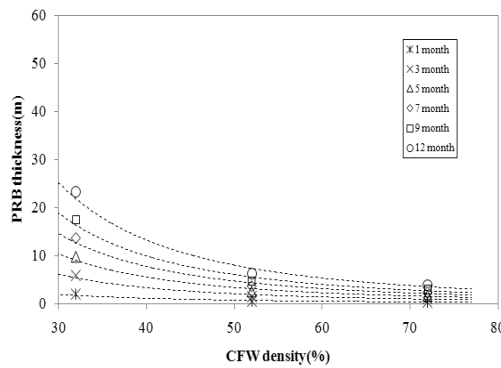
그림 6. 초기유입농도에 따른 감소를



(a) $k=1.0E-2$ cm/sec



(b) $k=1.0E-3$ cm/sec



(c) $k=1.0E-4$ cm/sec

그림 7. CFW밀도와 정화기간에 따른 PRB요구두께 설정

PRB의 사용기간은 흡착제의 최대흡착량과 비례하기 때문에 유입되는 금속이온 양이 변화하면 PRB길이는 초기농도-흡착량과의 관계로 변화하게 될 것이다. 즉, 유입되는 중금속의 양이 작으므로, 흡착제 최대흡착능력은 유입 중금속의 양만큼 사용기간이 증가한다는 것을 의미한다. 따라서 사용기간은 PRB의 두께를 증감시킴에 따라 변화시킬 수 있다. 따라서 PRB로 유입되는 중금속 농도에 대한 감소율로 표현하면 그림 6과 같이 되고, 이와 같은 관계식을 감소계수(reduction factor)라 정의하여 유입농

도별 PRB두께 계산에 사용하였다.

그림 7은 유입되는 중금속의 농도가 1000mg/l일 때 CFW밀도와 정화기간에 따른 PRB요구두께 설정관계를 나타낸 것으로 밀도와 PRB두께는 지수함수 관계로 표시된다. 밀도가 느슨한(약 30%) 경우 100%정화에 요구되는 두께는 약 50%일 때 보다 약 4배, 100배의 투수계수가 변화되었을 때 약 3배 이상 요구두께가 증가되는 것으로 나타났다. 밀도가 느슨하고 흐름속도가 1.0E-3cm/sec이하의 조건에서는 PRB두께에 큰 영향을 미치지 않으며, 중간밀

표 3. 가동시간에 따른 PRB두께 산정

Density (%)	PRB Thickness (m)		
	k=1.0E-2cm/sec	k=1.0E-3cm/sec	k=1.0E-4cm/sec
72	5.6102t-0.0776	4.9918t-0.0973	1.9447t+0.0243
52	1.8439t+0.0926	1.0804t+0.1191	0.5191t+0.016
32	1.2578t+0.0233	0.5378t+0.1624	0.3168t+0.1457

t : PRB 가동시간 (month)

표 4. CFW 밀도에 따른 PRB두께 산정식

Flow velocity, k(cm/sec)	Operating time(month)					
	1	3	5	7	9	12
1.0E-2	3021,2D ^{-1.832}	10114D ^{-1.863}	17231D ^{-1.869}	24352D ^{-1.872}	31475D ^{-1.873}	42159D ^{-1.875}
1.0E-3	21352D ^{-2.437}	139642D ^{-2.656}	276132D ^{-2.704}	416720D ^{-2.725}	558869D ^{-2.737}	773403D ^{-2.747}
1.0E-4	1091,7D ^{-1.856}	8282,2D ^{-2.117}	17135D ^{-2.177}	26421D ^{-2.204}	35880D ^{-2.22}	50218D ^{-2.233}

D : CFW의 상대밀도 (%)

도(50%이상)의 조건에서 PRB두께는 흐름속도 감소에 따라 점차 감소하였다.

4.2 설계식 산정

표 3은 PRB밀도와 흐름속도에 따라 가동시간에 따른 PRB두께 산정에 관한 회귀식을 나타낸 것으로 각 조건별 회귀식에 유입농도별 감소계수를 적용함으로써 정확히 요구되는 PRB두께의 선정이 가능하였다. 표 4는 가동시간과 흐름속도에 따른 PRB두께에 관해 밀도를 함수로 적용할 경우의 관계식을 나타낸 것이다. 이때, 적용된 증금속의 유입농도는 1000mg/l으로 다른 농도의 오염물이 유입될 경우에는 그림 7의 감소계수를 적용하여 100%정확에 요구되는 PRB두께의 설계가 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 PRB system에서 CFW를 구리(Cu²⁺)의 흡착반응물질로 적용하기 위한 컬럼실험 결과를 바탕으로 사용주기에 따른 적정 PRB시공두께를 선정하기 위한 상관관계 분석을 수행한 것이다. 충전밀도, 유입속도, 사용기간을 영향인자로 설정하고 상관관계 분석을 실시하여 시공두께 설계방법을 제시하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 컬럼 내부의 pH변화 양상은 Cu²⁺가 주입됨에 따라 유입부부터 점차 중화반응이 진행되어 컬럼 상부로 확산됨을 확인할 수 있었다. CFW의 충전밀도와 흐

름속도에 따른 pH변화를 통해 침전에 의한 제거를 관점으로 한 PRB설계시에는 중간정도 밀도 및 k=1E-4cm/sec이하의 흐름 조건에서 효율성이 높을 것으로 판단된다.

- (2) 컬럼길이 증가에 따라 제거효율은 선형적인 증가경향을 보였으며, 오염물의 유입속도가 느릴수록 제거효율은 증가하였고, 밀도가 증가할수록 pH증가 효과가 우수하였다.
- (3) 제거효율과 가동시간과의 상관관계 분석결과 가동시간이 증가함에 따라 제거효율은 감소하였고, PRB 길이에 따라 제거효율은 선형적으로 증가하였다. 이 같은 결과는 PRB두께와 제거효율은 비례관계를 의미하며, 이러한 관계를 이용하여 PRB system 내 반응물질 두께를 CFW 밀도, 정화기간을 고려한 제안식을 이용하여 설계할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2010- 0014890)에 대한 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이종영, 김영웅, 홍기권, 한중근 (2009), “FWC흡착제의 납/카드뮴 흡착특성”, 2009 한국지반공학회 가을학술발표회, pp.1507-1510.

2. 한국식품개발연구원 (2002), *음식물쓰레기로 버려지는 식량자원의 경제적 가치산정에 관한 연구*.
3. 한중근, 홍선미, 이명호 (2007), “재활용 탄화재의 중금속 흡착특성에 관한 기초적 연구”, *폐기물학회 2007년도 추계학술연구발표회*, pp.128-131.
4. 한중근, 이승현, 이기석, 홍기권 (2011), “TCE와 Phenanthrene에 대한 CFW의 흡착특성 분석”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제10권, 제1호, pp.53-61.
5. 환경부 (1996), *음식물 쓰레기의 제거 기술과 버려지는 식량자원의 경제적 가치산정에 관한 연구*.
6. 환경부 (2004), *음식물류 폐기물 처리 및 우수시설 사례집*, 연구보고서.
7. Han, J.G., Lee, J.Y., Hong, S.M. and Kim Y.W. (2008), “The Application of Permeable Reactive Barrier using Food Waste-Carbonized”, *The 19th Annual Research Conference of the Japan Society of Waste Management Experts*, Japan.
8. Han, J.G., Lee, J.Y., Hong, K.K., Lee, J.Y., Kim, Y.W. and Hong, S.M. (2010a), “Adsorption characteristics of Cu^{2+} and Zn^{2+} from aqueous solution using carbonized foods waste (CFW).” *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol.12, No.3, pp.227-234.
9. Han, J.G., Hong, K.K., Kim, Y.W. and Lee, J.Y. (2010b), “Enhanced electrokinetic (E/K) remediation on copper contaminated soil by CFW(carbonized foods waste)”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.177, pp.530-538.
10. USEPA (1997), *Permeable reactive subsurface barriers for the interception and remediation of chlorinated hydrocarbon and chromium (VI) plumes in ground water*, EPA/600/F-97/008.

(논문접수일 2011. 4. 17, 심사완료일 2011. 6. 24)