

낙동강 수계 페놀처리를 위한 정수처리시스템 평가

Evaluation of Water Treatment System for Phenol Removal in the Nakdong River Basin

강병재¹ · 채선희^{2*} · 이경혁¹ · 전항배³

Byung-Jae Kang¹ · Seon-Ha Chae^{2*} · Kyung-Hyuk Lee¹ · Hang-Bae Jeon³

1 한국수자원공사 감사실, 2 K-water연구원, 3 충북대학교 환경공학과

(2009년 월 일 접수 ; 2009년 월 일 수정 ; 2009년 월 일 채택)

Abstract

Repeated phenol spill in the Nakdong River has been a big issue in Korea since 1991. In this study, treatment of phenol in each water treatment process and total water treatment system is evaluated. Phenol was highly volatile, easily oxidized by ozone, and readily absorbed onto GAC. When there was phenol of 0.3mg/L in water, by ozonation of 1mg/L or by GAC adsorption with EBCT of 10minutes or longer, it could be treated to lower than 0.005mg/L, the national drinking water standard of phenol. Even when a sufficient contact time(70minutes) was allowed, only 35 to 40% of phenol could be removed by powdered activated carbon(PAC). Based on the test results, it can be concluded that 1.0mg/L or less concentration of phenol can be treated at the plants adopting the combination process of ozone and GAC down to the safe level. In this study, removal characteristics for phenol were evaluated with the existing pilot plant and demo plant in different advanced water treatment processes(AWTPs). In the future, studies on changes in oxidation and adsorption characteristics caused by competitive matters such as DOC and removal characteristics by other various AWTPs including ozone/filter adsorber need to be performed.

Key words : Phenol, Ozone, Granular activated carbon (GAC), Advanced Water treatment processes

주제어 : 페놀, 오존, 입상활성탄, 고도정수처리

1. 서론

산업사회의 변화과정에서 도시의 발달과 인구 집중화로 인하여 수계로 배출되는 오염물질의 종류가 다양해지고 있으며, 수계별 오염부하량 또한 가중되고 있는 반면에, 국민의 생활수준 향상과 더불어 깨끗하고 안전한 물에 대한 욕구는 점차 높아지고 있다. 특히 낙동강 수계의 경우에는 1970년대 이후 인위적으로 조성된 공업도시가 유역내 산재

하고 있으며, 이로 인하여 타 수계에 비하여 환경기초처리시설 설치 등에 많은 비용을 투자하였으나 미량의 유기성 오염물질은 대부분 표준정수처리공정(Conventional water treatment system:CWT)에 의한 제거에 한계가 있어 별도의 고도처리공정에 의한 처리의 필요성이 증대되고 있다. 일상적으로 수계로 배출되는 오염물질에 대해서는 배출규제, 폐수처리 및 정수처리를 통하여 어느 정도 대처가 가능하지만 유역내 상류공장의 시설파손, 화재 등으로 예측하지

* Corresponding author Tel:+82-42-870-7524, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: shchae@kwater.or.kr(Chae, S.H.)

못한 상태에서 제품 생산공정에서 사용되는 오염물질이 수계로 유입될 때에는 주민들의 피해와 용수공급 중단 등 많은 사회적 문제를 야기시키고 있다. 특히 낙동강 수계에서는 그 동안 1991년 2차에 거친 구미공단으로부터의 폐놀유출(고령 0.11mg/L, 수산 0.189mg/L)과 2008년 김천공단으로부터의 폐놀유출(구미시 해평면 0.005mg/L) 등의 수질 오염사고가 발생하였다. 폐놀(Phenol)은 폐놀계 수지, 전자제품 제조, 석유화학 공장 등의 방류수를 통하여 배출되는데 수중에 유입될 경우 특이한 맛과 냄새를 유발하며 정수과정에서 염소처리시에는 염소와 반응하여 Ortho-Chlorophenol 등 독성이 클 뿐만아니라 역한 냄새가 나는 반응물이 생성됨에 따라(WHO, 1989, Pierre, 1990) 우리나라에서는 “먹는물수질기준및검사항에관한규칙(2008.2.4. 환경부령 제 276호)”으로 0.005mg/L이하로 규제하고 있으나, 정수처리공정에서의 처리방안에 대한 연구가 미흡하여 실공정에서 대처가 어려울 뿐만 아니라 과거 수질오염사고에 대한 급수지역 주민들의 막연한 피해의식으로 인하여 수질기준 이상으로 검출될 때에는 취수중단에 의한 급수장애로 도시 기능이 일시적으로 마비되는 등 심각한 문제를 초래하고 있다. 이러한 여건으로 인하여 사고 등으로 인해 일정농도 이상의 폐놀이 수계로 유출될 경우에는 취수중단이나 정수처리시스템에서 처리가 불가피하여 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 그러나 낙동강 수계의 원수를 이용하는 정수장 중 고도처리공정이 설치된 15개 정수장은 모두 “오존(Ozone)+입상활성탄(Granular Activated Carbon; GAC)” 공정을 도입하고 있으나, 오존 또는 활성탄 등 단위공정에 의한 처리특성에 대해서는 간헐적 연구가 있었으며, 조합공정에 대해서는 연구자료가 미흡할 뿐만 아니라 특히, 기존의 표준 정수처리공정에서 응집·침전 등에 의한 폐놀의 제거율에 대한 연구가 전무한 실정임에 따라 폐놀을 정수처리공정에서 효과적으로 제어하기 위하여 오존산화/활성탄 흡착공정 중심으로 원수 수질특성 및 폐놀의 농도수준에 따른 정수처리 시스템을 평가하여 제시하고자 한다.

본 연구는 실험실 규모와 KR정수장에 설치된 파일럿 설비를 이용하여 오존과 입상활성탄의 개별공정에서 폐놀 제거 특성을 평가하였고, 실증플랜트 연구를 통해 농도별 폐놀 유입에 따른 오존과 활성탄공정을 포함한 정수처리 시스템에서 폐놀의 제어 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 분석방법

폐놀은 분할연속흐름 자동분석기를 이용하여 분석되었다. 분석기기는 SKALA 4000 모델을 사용하였으며 분석

Table 1. Analytical condition of automatic analysis system

Instrument Part	Phenol
Start Value Tracer	5000 DU
Peak Width Tracer	30 (5-100) %
Height Reject	500 DU
Start Ignore	300 sec
End Ignore	120 sec
Trigger Time	1800 sec
Measure Window	75 (10-150) %
Reaction Type	Colourisation

조건은 Table 1에 제시하였다. 폐놀의 표준용액은 0.005 ~ 0.05 mg/L의 범위를 단계별로 조제하였고, 시료는 표준용액을 이용하여 각 농도별로 7회씩 분석하여 사용하였다. 폐놀의 검출한계는 0.001 mg/L이고, 정량한계는 0.005 mg/L이다.

용존유기탄소(Dissolved Organic Carbon:DOC) 분석방법은 Standard Methods 5310B, “High-Temperature Combustion Method”로 하였고, 분석기기는 SHIMADZU TOC분석기(V_{CPH})를 사용하였다.

2.2. 실험방법

활성탄 흡착능 평가를 위한 등온흡착실험(Isotherm Test)에 사용된 활성탄은 12×40 mesh GAC (APD ; Average Particle Diameter 1.1 mm)를 이용하여 APD 44 μm(200×400 mesh)로 준비하였고, 급속소규모컬럼 실험(Rapid Small Scale Column Test; RSSCT) (Summers R. S., 1996, Knappe D. R. U et al., 1997)은 12×40와 8×30(APD 1.5mm)mesh GAC를 사용하여 APD 0.11 mm(100×200 mesh)로 준비하였다. 준비된 활성탄은 실험실 증류수로 완전히 세척하고, 24시간동안 85°C 오븐에서 건조시킨 후, 사용하기 전에 활성탄 공극에 있는 공기를 제거하기 위하여 진공상태에서 증류수에 하룻밤동안 정치시켰다. 활성탄 등온흡착을 위한 시료는 10mM K₂HPO₄(Potassium Phosphate)로 완충되고, H₂SO₄(Sulfuric acid)로 pH 7.0±0.2로 조정하여 준비하였다. 활성탄은 산세척과 고압멸균 되어진 250 mL 유리병에 0~500 mg/L로 양을 달리하여 정확하게 무게를 측정하였고, 시료병은 20°C±0.1 온도로 조절된 텀블러에 장착시켜 1주일간 교반시킨 후, 용액으로부터 활성탄을 제거하기 위하여 GF/C(Glass Fiber Filter/C)를 통해 여과하였다.

RSSCT 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 컬럼의 활성탄 층을 지지하기 위하여 스테인리스 스틸 스크린과 유리섬유를 테프론관의 아래층에 설치하고, 준비된 GAC를 3/16"ID (I.D

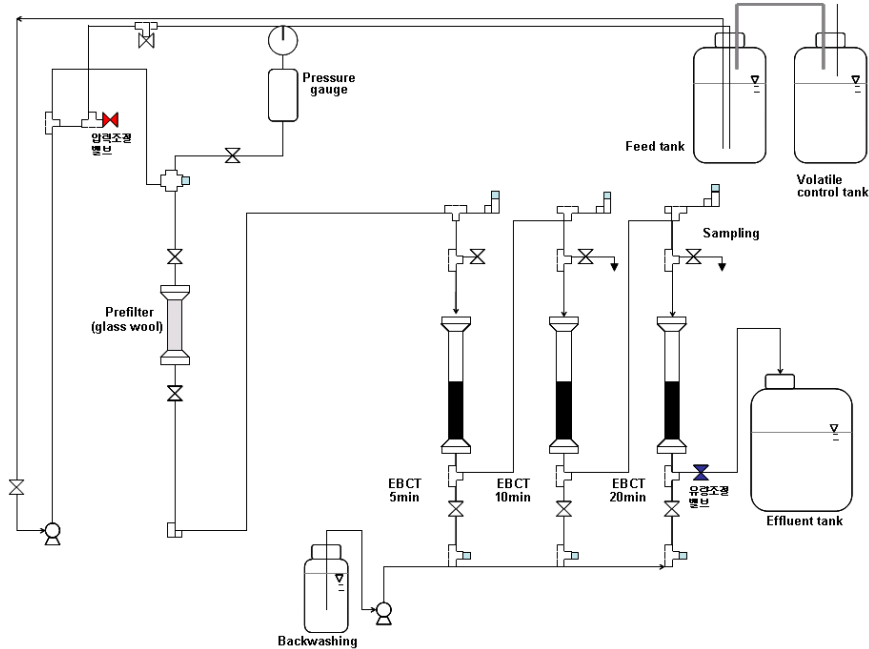


Fig. 1 Schematic diagram of RSSCT set-up

3.9 mm) 테플론 관에 충전하였다. 모든 조립품과 관은 테플론 또는 스테인리스 스틸 재질로 설치하였다. RSSCT에 사용된 활성탄컬럼은 실험용 흡착지를 Scaling factor (SF) 9.44와 13.16으로 축소한 것으로 활성탄 충전 깊이는 EBCT (Empty Bed Contact Time) 별로 계산하여 충전하였다. 정량펌프를 이용하여 위에서 계산된 유량으로 펌프 유량조절밸브를 조정하여 유입수를 통수하였다. 처리수는 일정용기에 연속적으로 채취하여 일정시간마다 처리수량을 확인하여 기록하였다.

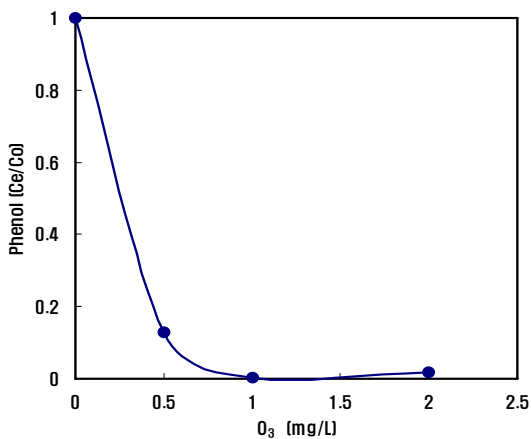


Fig. 2 Removal of phenol as a function of ozone dosage (Co 0.29mg/L, Contact Time 15min.)

연구를 수행하기 위한 과일롯 플랜트는 낙동강 수계 KR정수장에 설치되었으며, 구성은 Fig. 2와 같이 정수장 침전수를 원수로 이중여과(안트라사이트/모래) 처리 후에, 후오존과 입상활성탄공정으로 구성하였다. 전체 시설용량은 100 m³/일로서 2계열로 나뉘어져 있으며, 한 계열당 50 m³/일을 처리할 수 있다. 즉 여과지 2계열, 후오존 1계열, 입상활성탄 흡착지 2계열로 구성되어 있다. 후오존공정은 상향류, 인젝터 타입으로 접촉조를 설치하였고, 접촉조 체류시간이 5~15분으로 운전되도록 설치하였다. 오존 주입량은 0~2 mg-O₃/L가 주입되도록 하였다. Table 2는 오존공정의 사양을 나타냈다. 입상활성탄 과일롯 실험장치는 아크릴 재질

Table 2. Specification of ozone contactor

분 류	구 분	오존공정
오존 접촉 방식		Side Stream(Injector + Nozzle)
오존 접촉지 규격		450(W) × 800(L) × 3000(H)
수리 흐름		상향류(도류벽 설치)
원료 가스		산소(현장 발생)
처리 유량 (m ³ /일)		100
접촉시간 (분)		15
주 입 율 (mg/L)		0~2.0

로 1지당 15 m³/일로 2계열로 구성하였다. 활성탄 흡착지는 중력식 고정층으로서 실제 정수장을 모사하여 자연평형형으로 설치하였으며, 1지당 14와 17.5 m³/일 유량으로 운전하였고, EBCT를 22분으로 하였다. 입상활성탄 컬럼 구성과 사양을 Table 3에 상세히 나타내었다. 모형플랜트의 입상활성탄 컬럼에 충전된 활성탄은 역청단계 원료의 제품으로서 유효경 1.0, 균등계수 1.7인 NORIT 830의 제품이었다.

실증플랜트의 처리용량은 2,000 m³/일 규모이며, 2계열로 구성되었다. 각 계열은 시설용량 1,000 m³/일 규모로 그 중 A계열은 고도정수처리공정을 중심으로 전오존/혼화/응집/침전/여과/후오존/입상활성탄공정으로 구성되어 있고, B계열은 기존 정수처리공정을 중심으로 분말활성탄/혼화/응집/경사관침전지/여과/입상활성탄공정으로 설치되어 있다. A계열과 B계열의 각 공정의 사양은 Table 4에 제시하였다.

Table 3. Specification of GAC adsorber

구분		KR 정수장	
분류		실공정	파일럿 플랜트
공정명		실공정	파일럿 플랜트
EBCT (분)		22	22
여과속도 (m/d)		197.5	155.7
유량 (m ³ /일)		6,306.2	14
지면적 (m ²)		31.9	0.09
1 Bed Volume/day		65.9	64.8
여재	깊이 (cm)	GAC	300
		자갈	26
	활성탄종류	NORIT 830	NORIT 830
	Mesh size	8×30 ≥2.36mm ≤15% ≤0.60mm ≤4%	8×30 ≥2.36mm ≤15% ≤0.60mm ≤4%
	유효경(mm)	1.0	1.0
	균등계수(UC)	1.7	1.7
	ρb(g/cm ³)	0.5	0.5
	비표면적(m ² /g)	1,100	1,100
	오오드가 (mg/g)	1,000	1,000
	하부집수장치		유공블럭

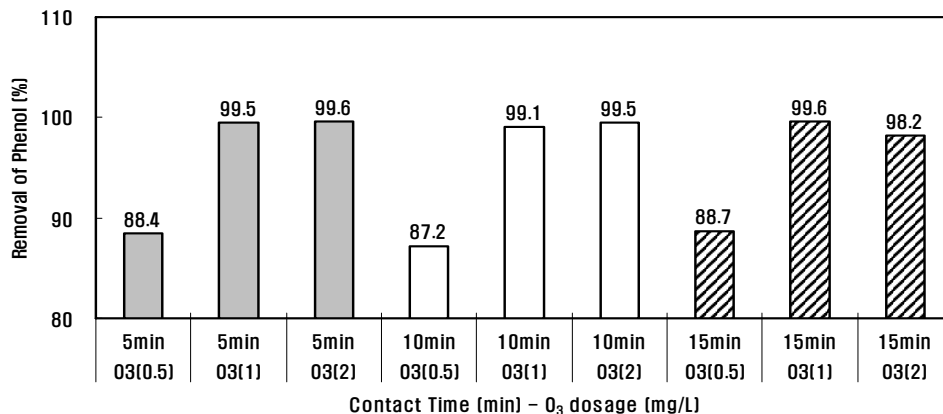


Fig. 3 Removal of phenol by contact time & ozone dosage (Co 0.29mg/L)

Table 4. Processes specification of the demo-plant

공정명	규격 및 설계인자 (계열별 유량 1,000m ³ /일)	
	A계열	B계열
전오존공정	<ul style="list-style-type: none"> 접촉지 1,000m³/일 x 1지 체류시간 : 10.9분 오존발생기 1대 	-
분말활성탄 접촉조	-	<ul style="list-style-type: none"> 접촉시간 : 47분 수류식 배플형
혼화공정	<ul style="list-style-type: none"> 혼화지 : 2지 체류시간 : 1.0분 최대G값 : 300sec⁻¹ 수직터빈형 혼화기 2대 	<ul style="list-style-type: none"> 혼화지 : 2지 체류시간 : 1.0분 최대G값 : 300sec⁻¹ 혼화기 : 수직터빈형 2대
응집공정	<ul style="list-style-type: none"> 체류시간 : 39.4분 수평패들형 응집기 G값 : 50~10sec⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> 체류시간 : 37.3분 수직 Hydrofil형 응집기 G값 : 1열) 75~30sec⁻¹ 2열) 50~20sec⁻¹ 3열) 25~10sec⁻¹
침전공정	<ul style="list-style-type: none"> 체류시간 : 3시간 표면부하율 : 32.1m³/m²/일 장폭비 : 1:5.4 월류부하 : 55.6m³/m²/일 	<ul style="list-style-type: none"> 경사판침전지 체류시간 : 1.8시간 장폭비 : 1:3.3 월류부하 : 55.6m³/m²/일
여과공정	<ul style="list-style-type: none"> 단층여과지 4지 여층높이 : 1.3m 여과속도 : 108.7m/일 하부집수장치:유공블럭형 	<ul style="list-style-type: none"> 이중여재여과지 4지 여층높이 : 2m 여과속도 : 294.1m/일 하부집수장치:유공블럭형
후오존공정	<ul style="list-style-type: none"> 접촉지 1,000m³/일 x 1지 체류시간 : 14.5분 체류조 1,000m³/일 x 1지 체류시간 : 17.5분 오존발생기 1대 등 오존투입설비1식 	-
입상활성탄공정	<ul style="list-style-type: none"> 처리용량 : 500m³/d/지*2지 여과속도 : 250m/일 이하 역세방식 : 물+공기세척 	<ul style="list-style-type: none"> 여과속도 : 120m/일 이하 처리용량 : 500m³/d/대*2지 역세방식 : 물+공기세척
정수지	<ul style="list-style-type: none"> 시설용량 : 250m³/일 체류시간 : 2.3시간 	<ul style="list-style-type: none"> 시설용량 : 250m³/일 체류시간 : 2.3시간

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 오존공정에서 페놀의 제거

오존공정은 처리용량 100 m³/일에서 여과수를 유입수로 하는 후오존공정으로서 오존주입률에 따른 페놀의 제거특성을 알아보기 위하여 페놀의 평균 유입농도 0.29 mg/L에서 오존 접촉시간을 15분으로 고정한 조건에서 오존 주입률을 0.5, 1, 2 mg/L로 변화시켜 실험하였다. 오존공정에 유입되는 DOC 농도는 1.3 mg/L로서 DOC 농도 대비 오존농도는 0.4, 0.8, 1.5 mg-O₃/mg-DOC로 주입되었으며, pH는 7.0~7.4 범위였다. Fig. 2는 오존공정이 페놀의 제거에 효

과적인 공정임을 나타내고 있다. 오존 주입률 0.5 mg/L 주입 시, 87%의 제거율을 나타냈으며, 전반적으로 오존이 1 mg/L 이상이 주입되었을 때 수질기준 0.005 mg/L이하로 제거되었다.

오존 접촉시간에 따른 페놀의 제거특성을 알아보기 위하여 페놀의 평균 유입농도 0.29 mg/L에서 오존 주입률을 0.5, 1, 2 mg/L으로 변화시키면서 오존 접촉시간 5, 10, 15분의 조건에서 실험하였다. Fig. 3은 오존공정에서 페놀의 제거는 5분 이상의 접촉시간에서는 접촉시간과 관련성이 적고 오존농도의 함수임을 알 수 있었다. 오존 주입농도 0.5 mg/L에서 접촉시간이 증가하여도 페놀의 제거율에는 변화

가 없음을 보여주었다.

유입수의 pH 변화에 따른 오존공정에서 폐놀의 제거특성을 알아보기 위하여 폐놀의 유입농도 0.26~0.29 mg/L와 오존 주입률을 0.5, 1 mg/L에서 pH를 6, 7, 8로 변화시키면서 실험하였으며 이때 DOC는 1.9 mg/L이었다. Fig. 4와 Fig. 5는 오존공정에서 대상수의 pH가 증가함에 따라 폐놀의 제거율이 증가됨을 보여주고 있다. 오존주입률이 0.5 mg/L에서 1 mg/L로 증가하는 것 보다 pH 증가 시에 더 높은 제거율을 나타내고 있다. 그러나 실제 정수처리공정에서는 전/후오존처리 과정에서 pH를 8이상 유지하는 것이 불합리하거나 어려워 pH 7 전후가 타당하고 이때 오존주입율 1.0 mg/L에서 폐놀의 제거율은 약 77% 수준이며 오존 주입률과 접촉시간에 따른 폐놀 제거율 실험결과(99%이상) 상대적으로 폐놀 제거율이 낮은 이유는 대상 시료의 DOC 농도차이 (1.3 vs. 1.9 mg/L)에 의한 피산화물의 오존 소모에 따른 것으로 판단된다.

유입수 내 폐놀의 초기농도 변화에 따른 오존공정에서 폐놀의 제거특성을 알아보기 위하여 오존 주입률 1 mg/L에서

폐놀의 유입농도를 0.05 mg/L에서 0.28 mg/L까지 변화시키면서 접촉시간 15분으로 하여 실험하였다. Fig. 6과 같이 0.28 mg/L의 폐놀농도에서는 폐놀의 초기농도에 상관없이 오존주입률 1 mg/L에서 수질기준 0.005 mg/L이하까지 제거되었다.

오존에 의한 폐놀의 산화 실험 결과를 종합하면 과거 낙동강 상수원을 오염시켰던 폐놀농도(0.2 mg/L이하)를 기준으로 일반적인 상수원수에 포함될 수 있는 폐놀의 농도에 대해서는 오존 1.0 mg/L을 주입할 경우 먹는물 수질기준이하의 적정수준까지 처리가 가능한 것으로 평가되었다.

3.2. 활성탄공정에서 폐놀의 제거

Fig. 7은 폐놀 초기농도 0.29 mg/L에서 초순수와 낙동강 원수(정수장 여과수, DOC 1.5mg/L)를 대상으로 등온흡착 실험(NORIT 830) 결과를 도시한 것이고, Table 5는 실험 결과에 의한 Freundlich 상수 값 K와 1/n 값을 나타낸 것이다. 흡착강도를 지시하는 1/n값은 Dobbs and Cohen (1980)이 제시한 0.54의 범위에 있어, 흡착이 용이함이다

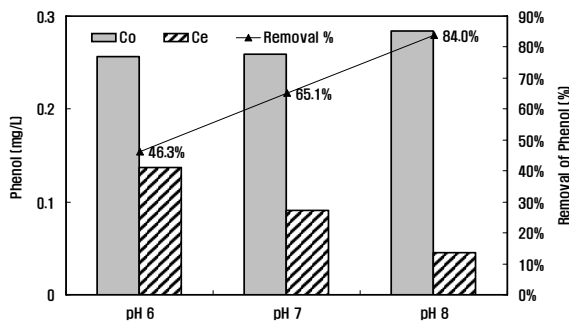


Fig. 4 Removal of phenol by pHs (O₃ Dosage 0.5mg/L)

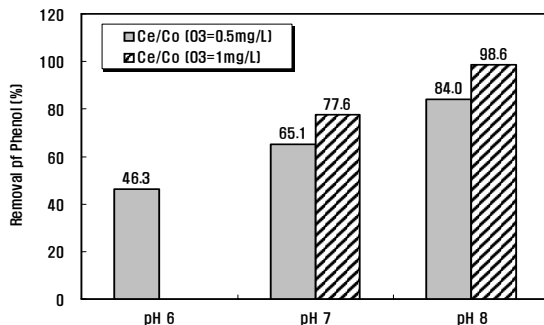


Fig. 5 Removal of phenol by pHs (O₃ Dosage 0.5, 1.0 mg/L)

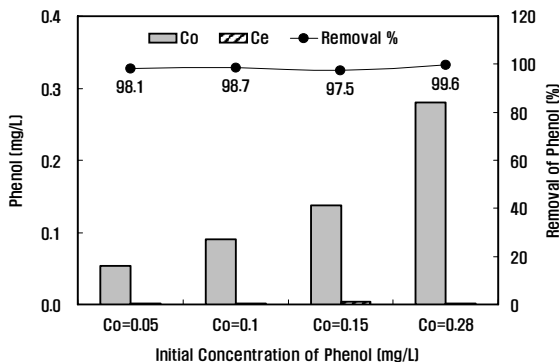


Fig. 6 Removal of phenol by initial concentrations (O₃ Dosage 1.0mg/L, O₃ Contact Time 15min.)

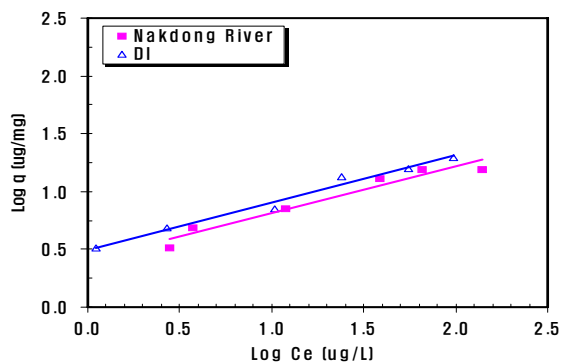


Fig. 7 Equilibrium adsorption capacity of phenol with fresh GAC(NORIT 830) in DI and Nakdong river waters (Co 0.29mg/L, DOC 1.5mg/L)

Table 5. Equilibrium adsorption capacity(Freundlich Constants) of Phenol with fresh GAC(NORIT 830) in DI and Nakdong river waters (Co 0.29mg/L, DOC 1.5mg/L)

	K	1/n
DI (Phenol Co =0.293mg/L)	3.13	2.56
Nakdong River (Phenol Co =0.293mg/L, DOC 1.45mg/L)	0.41	0.40

*K unit =ug/mg(L/ug)^{1/n}

출되었다. 흡착능을 지시하는 K 값은 흡착의 세기로 처리대상물질의 초기농도나 경쟁하는 배경물질(Natural Organic Matter:NOM)의 정도에 따라 달라질 수 있는데, Dobbs and Cohen(1980)이 페놀의 초기농도를 0.1 mg/L로 수행한 연구에서 K 값은 6.0이었다. 페놀 초기농도를 0.29 mg/L로 조정해 초순수를 대상으로 실험한 결과 3.1의 K 값을 얻었으며, DOC가 1.5 mg/L 존재한 낙동강 원수에서 K 값은 2.6으로 낮아졌다. 이는 배경물질인 DOC의 흡착경쟁으로 인해 흡착능이 그만큼 감소한 것으로 판단된다.

활성탄 컬럼에서 페놀의 파괴특성을 모의하기 위하여 RSSCT를 수행하였다. RSSCT 실험에서는 실제 정수장에서 페놀이 수질사고시에 유입되는 점을 감안하여 활성탄컬럼의 운영 중에 용존유기물질의 파괴정도에 따라 페놀이 유입되었을 때 제거되는 특성을 평가하였다.

Fig. 8은 낙동강 원수(정수장 여과수, DOC 1.4 mg/L)를 대상으로 EBCT 10분과 20분의 조건에서 8x30 mesh 활성탄으로 RSSCT를 수행한 것으로, 용존유기물질이 흡착되는 중에 일정시간 동안 페놀을 고농도와 저농도(0.05~0.6 mg/L)로 강제투여(Spiking)하여 페놀의 파괴특성을 평가하였다. 페놀은 EBCT 10분의 활성탄 컬럼에서 Bed Volumes(BV) 0~11,200, BV 22,100~25,600, BV 29,200~38,200에서 투여되었고, EBCT 20분의 활성탄 컬럼에서 BV 0~5,500, BV 11,000~12,700, BV 14,500~19,200에서 투여되었다. 유입수의 DOC 농도는 페놀의 주입에 따라 유동적으로 증가하였으며, 운영시간에 따라 유출수에서 증가하는 동안 페놀은 전 구간의 유출수에서 검출되지 않았다.

Fig. 9는 DOC가 완전히 파괴된 활성탄컬럼을 대상으로 DOC의 흡착능이 남아있지 않은 상태에서 페놀을 강제투여하였을 때 페놀의 제거정도를 평가한 결과로, 낙동강 원수(정수장 여과수, DOC 1.3 mg/L)를 대상으로 EBCT 14분의 조건에서 12x40 mesh 활성탄으로 RSSCT를 수행한 것이다. DOC로 완전히 파괴된 상태에서 페놀이 고농도(0.9~1.2 mg/L)로 주입되었을 때, 유출수에서 페놀은 검출되지 않았고, 유출수의 DOC 농도도 변화되지 않았다. 이는 활성탄의 세공 내 용존유기물질이 흡착되어 포화되었을 지라도 작은 분자량(94.11 g/mol)의 페놀이 남아있는 세공으로의 흡착이 진행된 것으로 생각되어진다. 따라서 용존유기물질의 흡착능이 거의 소진된 활성탄 컬럼에서 고농도의 페놀이 유입될 때, 활성탄은 페놀의 제거가 가능함을 예측할 수 있었다.

15 m³/일 규모의 입상활성탄 흡착지에서 페놀의 제거는

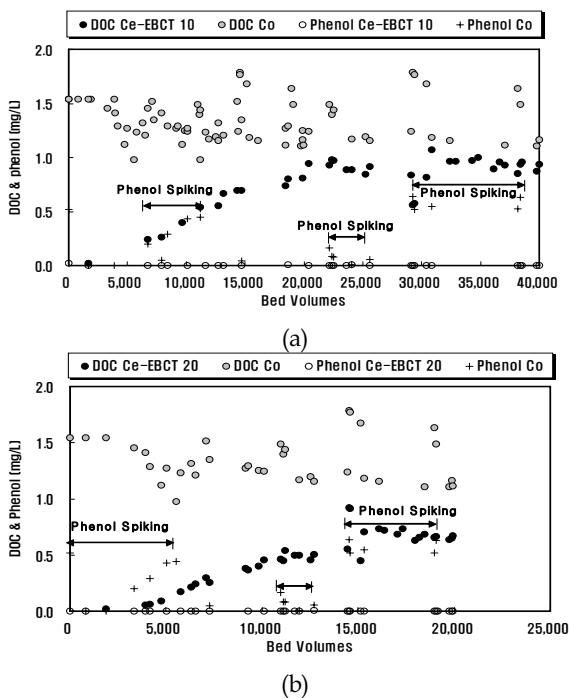


Fig. 8 Effect of phenol intermittent loading on DOC breakthrough (Influent DOC 1.4 mg/L, Influent Phenol 0.05~0.6 mg/L, with GAC 8x30 mesh, (a) EBCT 10min., (b) EBCT 20min.)

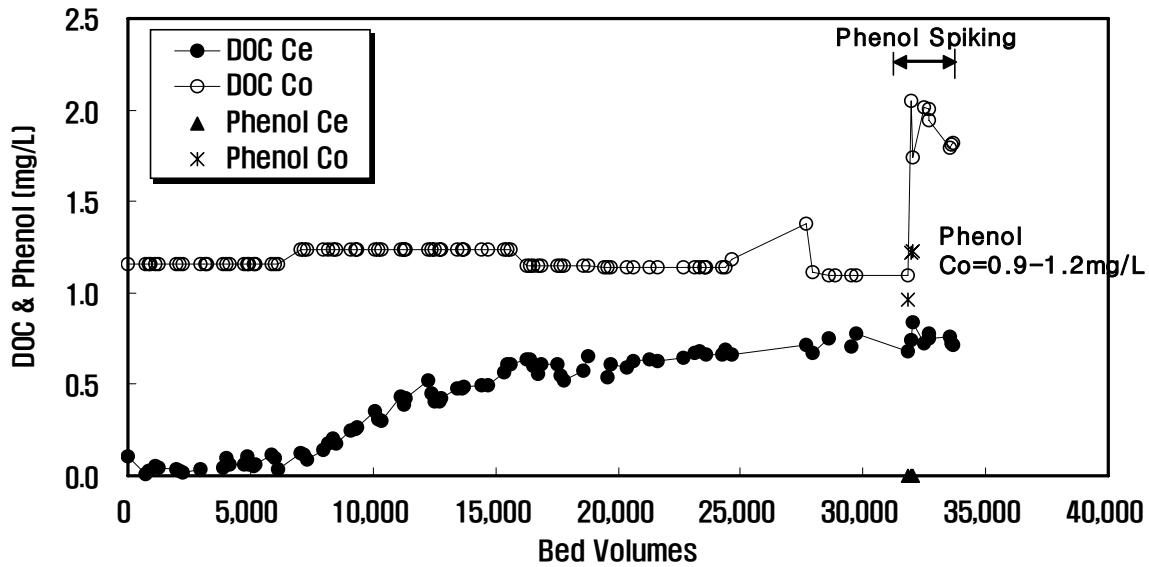


Fig. 9 Effect of phenol loading on DOC breakthrough (Influent DOC 1.3mg/L, Influent Phenol 0.9~1.2mg/L, with GAC 12x40mesh, EBCT 14min.)

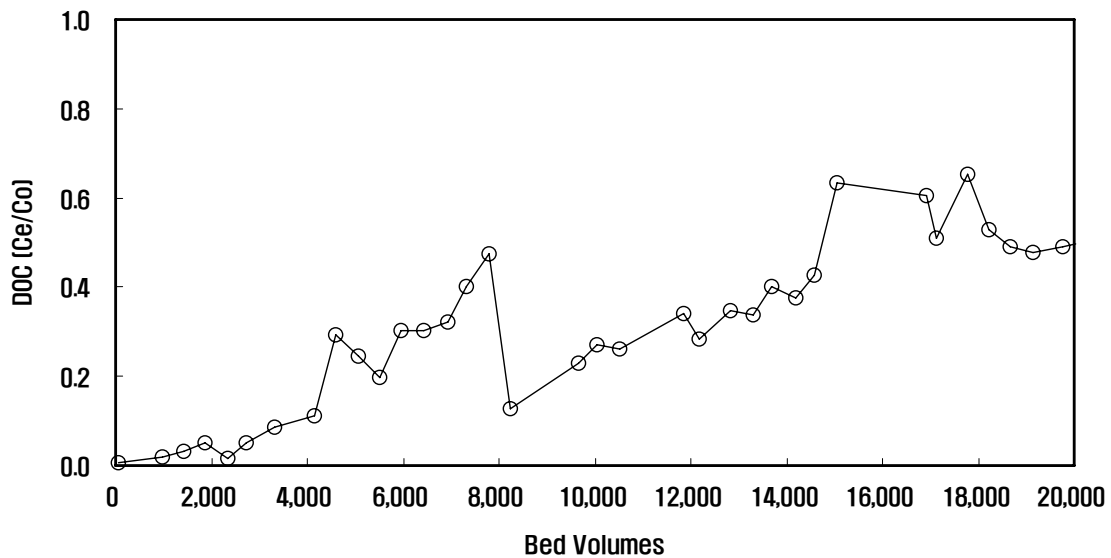


Fig. 10 DOC breakthrough curve for GAC column (EBCT 22min., BH 3.0m)

단일물질로서 페놀의 제거와 함께 배경물질로서 용존유기 물질의 흡착과 밀접한 관련이 되어 있다. 입상활성탄지는 페놀이 유입되기 전, 사전에 용존유기물질의 흡착이 진행된 상태로 BV 8,000 시점에 역세척에 의한 활성탄 유실량을 신탄으로 1/3 보충하였으며, BV 18,000과 20,000에서 페

놀을 유입시켰다. Fig. 10에서 제시된 바와 같이 입상활성탄 흡착지의 운영동안, 평균 유입 DOC는 1.5 mg/L였고, 페놀이 유입되는 동안 DOC의 제거율은 약 50~60%의 범위에 있었다.

입상활성탄 흡착지에서 EBCT별 페놀의 제거특성을 알아보기 위하여 페놀의 평균 유입농도 0.03 mg/L에서 EBCT 5, 10, 15, 22분에 해당되는 활성탄지의 높이별로 시료를 채취하여 유입농도 대비 유출농도를 측정하였다. Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 유입농도 0.03 mg/L의 조건에서 모든 EBCT는 수질기준 0.005 mg/L이하로 처리하였다. EBCT 5분에서 85%의 제거율을 나타냈고, EBCT 10분 이상에서 95%이상의 제거율로, EBCT 10분 이상에서는 EBCT에 따른 제거율의 차이를 보이지 않았다.

3.3. 수처리 시스템에서 페놀의 제거

Fig. 12는 낙동강 수계 KR정수장에서 표준정수처리공정에 의한 여과수에 페놀을 강제투여하여 오존공정과 활성탄 공정으로 처리한 파일럿 실험결과이다. 페놀의 유입농도가 0.28~0.31 mg/L 수준에서는 오존공정만으로도 충분히 페놀을 제어할 수 있고, GAC공정까지 처리할 경우 페놀의 제거효율이 매우 높음을 보여주었다.

2계열로 구성된 시설용량 2,000 m³/일(1,000 m³/일·계열)인 실증규모 플랜트에서 처리용량은 600 m³/일로 낮춰

실험하였으며, 페놀의 유입농도는 0.02, 0.22, 1.03 mg/L로 변화시켜 3~4일동안 지속적으로 주입시켰고, 시료는 6~8회 채취하여 분석하였다. A계열(Series A)의 전/후오존공정의 오존농도는 1 mg/L로 운영하였으며, B계열(Series B)의 분말활성탄의 주입농도는 페놀 유입농도 0.02와 0.22 mg/L에서는 20 mg/L였고, 페놀유입농도 1.03 mg/L에서는 40 mg/L로 증가시켰다.

Fig. 13은 A계열에서의 페놀의 제거를 도시한 것으로 파일럿 규모 연구에서 제시된 것과 같이 오존공정에서 높은 제거율을 나타내고 있다. 페놀의 유입농도 0.22 mg/L이하에서는 오존농도 1 mg/L의 전오존공정에서 수질기준 0.005 mg/L이하로 처리하였고, 페놀농도를 1.03 mg/L의 고농도로 증가시켰을 때 92%의 높은 제거율을 나타냈으나 수질기준 이하로는 제거하지 못했다. 고농도 유입 시에 전오존공정에서 제거되지 못한 페놀은 기존공정에서 약 50%의 제거율을 나타냈다.

Fig. 14는 B계열에서 페놀의 제거를 나타낸 것으로, 페놀 농도가 0.02 mg/L로 유입될 때 분말활성탄 주입농도 20 mg/L의 분말활성탄공정에서 65%의 제거율을 나타냈고, 이

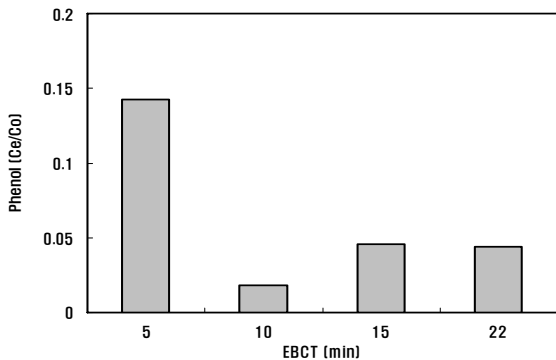


Fig. 11 Removal of phenol by EBCTs of GAC column

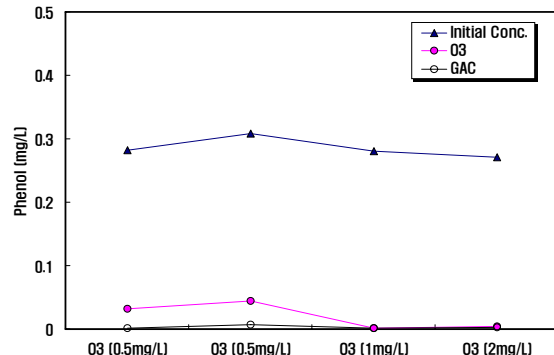


Fig. 12 Phenol removal for the advanced water treatment system

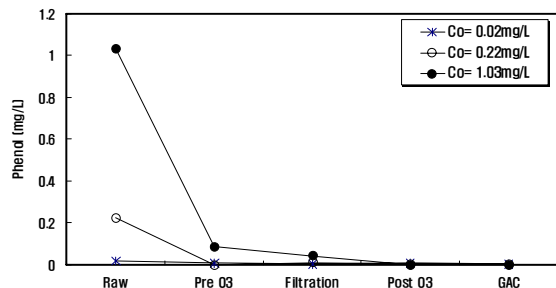


Fig. 13 Phenol removal for Series A (Pre O₃/CWT/Post O₃/GAC; O₃ Dosage 1.0 mg/L, O₃ Contact Time 15min, GAC EBCT 22min.)

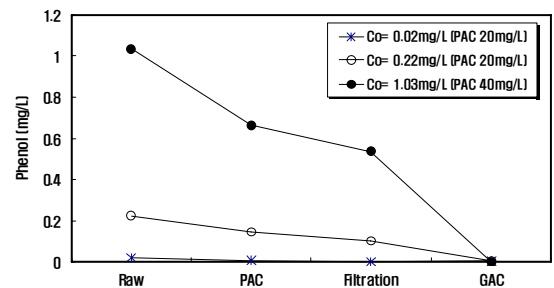
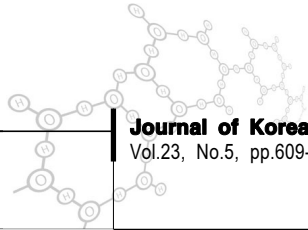


Fig. 14 Phenol Removal for Series B (PAC/CWT/GAC; ; PAC Contact Time 70min, GAC EBCT 22min.)



후 기존공정에서 수질기준 이하로 제거가 가능하였다. 페놀 농도가 0.22 mg/L로 증가하였을 때, 분말활성탄 주입농도 20 mg/L에서 페놀은 36%, 기존공정에서 29% 제거되었고, 이후 입상활성탄공정에서 수질기준(0.005 mg/L) 이하로 제거하였다. 정수처리공정에서는 고농도인 1.03 mg/L로 페놀 농도를 증가하였을 때, 분말활성탄 주입농도 40 mg/L에서 페놀은 36%, 기존공정에서 19% 제거되었고, 이후 입상활성탄공정에서 수질기준 이하로 제거되었다.

이상의 결과를 통해 볼 때, 분말활성탄공정은 오존이나 입상활성탄공정이 없는 정수장에서 갑작스런 수질사고로 0.01 mg/L 미만의 저농도 페놀이 유입될 경우 페놀 제거를 위해 유용한 공정으로 판단되었다. 그러나 고농도의 페놀이 유입될 경우에는 오존공정과 입상활성탄공정의 운영이 필수적임을 실험결과로 제시할 수 있었다.

4. 결 론

- 1) 오존공정에서 페놀의 제거는 상수원수에서 유입될 수 있는 일반적인 페놀농도 0.3 mg/L 수준에서 오존 접촉시간 5분 이상의 경우 오존 접촉시간과 페놀의 초기농도 사이에 관련성이 적었으며, 오존 주입률 1 mg/L 주입시 수질기준 이하(0.005 mg/L)로 처리되었다. 또한 오존 주입율을 0.5 mg/L에서 1 mg/L로 증가시킬 때 보다는 pH를 증가시킬 경우 페놀의 제거율이 더 높았다.
- 2) BV 18,000~20,000로서 용존유기물질이 50~60% 정도 파괴된 파일럿 플랜트의 입상활성탄 흡착지에서 페놀이 0.03 mg/L로 유입될 때, EBCT 10분이상에서 95% 이상 제거되었다. 페놀 초기농도 0.29 mg/L, DOC 1.5 mg/L 조건하의 등온흡착실험에서 $K=2.56$, $1/n=0.4$ 로서 페놀의 활성탄 흡착이 용이한 것으로 나타났다. EBCT 10, 15, 20분인 RSSCT에서 초기에서부터 DOC 파괴가 진행 중이거나 대부분 파괴가 완료될 때까지 페놀 0.056~0.6 mg/L과 0.9~1.2 mg/L를 투여하였을 때 유출수에서는 페놀이 검출되지 않았다. 페놀이 0.03 mg/L로 유입될 때, EBCT 5분과 10분에서 각각 85%와 95%의 제거율을 나타냈고, EBCT 10분이상에서는

EBCT에 따른 제거율의 차이를 보이지 않았다. 6개월이상 운전된 입상활성탄 흡착지는 용존유기물질의 흡착으로 DOC가 50~60% 파괴된 상태에서도 페놀의 제거율을 유지하였다.

- 3) 파일럿 플랜트 실험결과 0.29 mg/L 수준의 페놀농도에서 오존공정만으로도 충분히 페놀을 제어할 수 있었다. 실증플랜트 연구를 통해 분말활성탄공정은 오존이나 입상활성탄공정이 없는 정수장에서 갑작스런 수질사고로 0.01 mg/L 미만의 저농도 페놀이 유입될 경우 페놀 제거를 위해 유용한 공정으로 판단되었다. 오존/입상활성탄 계열의 실증플랜트는 페놀이 0.5 mg/L이하로 유입시 오존 또는 활성탄공정에 의해서 수질기준까지 처리가 가능하였으며, 1.0 mg/L이상의 고농도 유입시에는 오존이나 분말활성탄 등의 단독공정에 의해서 0.005 mg/L이하로 처리가 어려우나 오존/입상활성탄의 고도정수처리공정에 의해서 충분히 처리가 가능한 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. Dobbs, R. A. and Cohen J. M. (1980) Carbon Adsorption Isotherms for Toxic Organics, EPA-600/880-023, USEPA, Cincinnati, OH.
2. Knappe D. R. U., Snoeyink V. L., Roche P., Prados M. J. and Bourbigot M. M. (1997) The Effect of Preloading on Rapid Small-scale Column Test Predictions of Atrazine Removal by GAC Adsorbers, *Water research*, 31(11), pp. 2899-2909.
3. Pierre P. (1990) Photodegradation of 2- and 3-Chlorophenol in TiO₂ Aqueous Suspensions, *Environ. Sci. Technol.* 24(7), pp.990-996.
4. Summers R. S., S. Hopper and S. Hong (1996) GAC Precursor Removal Studies, *ICR Manual for Bench- and Pilot-Scale Treatment Studies. EPA 814-B-96-003, USEPA, Office of Water.*
5. WHO (1990) Chlorophenols, Geneva, *Environmental Health Criteria*, No.93.