

2007년 2월

碩士學位論文

침착활성탄에 의한 중금속 흡착에
관한 연구

朝鮮大學校 大學院

環境工學科

尹 美 蘭

침착활성탄에 의한 중금속 흡착에
관한 연구

A Study on the Adsorption of Heavy Metals
by Impregnated Active Carbons

2007년 2월

朝鮮大學校 大學院

環境工學科

尹 美 蘭

침착활성탄에 의한 중금속 흡착에
관한 연구

指導教授 申 大 允

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함

2006년 10월

朝鮮大學校 大學院

環 境 工 學 科

尹 美 蘭

尹美蘭의 工學碩士學位論文을 認准 함

委員長 朝鮮大學校 教授 崔 炯 一 (인)

委員 朝鮮大學校 教授 鄭 京 勳 (인)

委員 朝鮮大學校 教授 申 大 允 (인)

2006년 11월

朝鮮大學校 大學院

目 次

List of Figures	iii
List of Tables	v
ABSTRACT	vi
I. 서 론	1
II. 이론적 고찰	3
2.1 중금속	3
2.2 흡착	5
2.2.1 흡착형태	5
2.2.2 흡착반응	6
2.2.3 흡착평형	7
2.3 활성탄	10
2.3.1 활성탄의 흡착 특성	11
2.3.2 활성탄의 분류	13
2.4 침착활성탄	13
2.4.1 침착활성탄의 제조	13
2.4.2 화학흡착 및 화학반응	16
III. 실험 및 분석 방법	17
3.1 실험재료	17
3.1.1 활성탄 시료	17
3.1.2 침착제 및 침착용액	17
3.1.3 중금속 시료용액	17

3.2 실험방법	18
3.2.1 침착활성탄의 제조	18
3.2.2 침착활성탄의 pH에 따른 흡착능실험	19
3.2.3 침착활성탄의 흡착용량실험	19
3.2.4 침착활성탄의 흡착속도실험	19
3.3 분석방법	19
IV. 결과 및 고찰	20
4.1 pH에 따른 흡착특성	20
4.1.1 구리	20
4.1.2 카드뮴	25
4.1.3 크롬	29
4.2 침착활성탄의 흡착용량	33
4.2.1 구리	33
4.2.2 카드뮴	37
4.2.3 크롬	41
4.3 침착활성탄의 흡착속도	45
4.3.1 구리	45
4.3.2 카드뮴	49
4.3.3 크롬	53
4.4 등온흡착식에 의한 흡착능 평가	57
4.4.1 침착활성탄의 등온흡착식	57
4.4.2 침착활성탄의 $1/n$ 값	63
4.4.3 침착활성탄의 K값	65
V. 결론	67
참 고 문 헌	69

List of Figures

Fig. 1. Pore structure of active carbon.	12
Fig. 2. Flow diagram impregnated activated carbon make-up.	18
Fig. 3. Removal efficiency of Cu^{2+} as pH and species of impregnated granular activated carbons.	23
Fig. 4. Removal efficiency of Cu^{2+} as pH and species of impregnated pelletized active carbons.	24
Fig. 5. Removal efficiency of Cd^{2+} as pH and species of impregnated granular active carbons.	27
Fig. 6. Removal efficiency of Cd^{2+} as pH and species of impregnated pelletized active carbons.	28
Fig. 7. Removal efficiency of Cr^{3+} as pH and species of impregnated granular active carbons.	31
Fig. 8. Removal efficiency of Cr^{3+} as pH and species of impregnated pelletized active carbons.	32
Fig. 9. Adsorption capacity of Cu^{2+} as dosage of impregnated granular active carbon.	35
Fig. 10. Adsorption capacity of Cu^{2+} as dosage of impregnated pelletized active carbon.	36
Fig. 11. Adsorption capacity of Cd^{2+} as dosage of impregnated granular active carbon.	39
Fig. 12. Adsorption capacity of Cd^{2+} as dosage of impregnated pelletized active carbon.	40
Fig. 13. Adsorption capacity of Cr^{3+} as dosage of impregnated granular active carbon.	43

Fig. 14. Adsorption capacity of Cr^{3+} as dosage of impregnated pelletized active carbon.	44
Fig. 15. Removal efficiency of Cu^{2+} as reaction time and species of impregnated granular active carbons.	47
Fig. 16. Removal efficiency of Cu^{2+} as reaction time and species of impregnated pelletized active carbons.	48
Fig. 17. Removal efficiency of Cd^{2+} as reaction time and species of impregnated granular active carbons.	51
Fig. 18. Removal efficiency of Cd^{2+} as reaction time and species of impregnated pelletized active carbons.	52
Fig. 19. Removal efficiency of Cr^{3+} as reaction time and species of impregnated granular active carbons.	55
Fig. 20. Removal efficiency of Cr^{3+} as reaction time and species of impregnated pelletized active carbons.	56
Fig. 21. Equilibrium of Cu^{2+} as various granular active carbon.	57
Fig. 22. Equilibrium of Cu^{2+} as various pelletized active carbon.	58
Fig. 23. Equilibrium of Cd^{2+} as various granular active carbon.	59
Fig. 24. Equilibrium of Cd^{2+} as various pelletized active carbon.	60
Fig. 25. Equilibrium of Cr^{3+} as various granular active carbon.	61
Fig. 26. Equilibrium of Cr^{3+} as various pelletized active carbon.	62

List of Tables

Table 1. The properties of heavy metals	4
Table 2. Physical properties of active carbon	17
Table 3. Removal efficiency of Cu^{2+} according to pH and species of impregnated active carbons	22
Table 4. Removal efficiency of Cd^{2+} according to pH and species of impregnated active carbons	26
Table 5. Removal efficiency of Cr^{3+} according to pH and species of impregnated active carbons	30
Table 6. Relationship between adsorption capacity of Cu^{2+} and dosage of impregnated active carbon	34
Table 7. Relationship between adsorption capacity of Cd^{2+} and dosage of impregnated active carbon	38
Table 8. Relationship between adsorption capacity of Cr^{3+} and dosage of impregnated active carbon	42
Table 9. Relationship between removal efficiency of Cu^{2+} and reaction time and species of impregnated active carbons	46
Table 10. Relationship between removal efficiency of Cd^{2+} and reaction time and species of impregnated active carbons	50
Table 11. Relationship between removal efficiency of Cr^{3+} and reaction time and species of impregnated active carbons	54
Table 12. 1/n-value of heavy metals according to reaction time and species of impregnated active carbons	64
Table 13. K-value of heavy metals according to reaction time and species of impregnated active carbons	66

ABSTRACT

A Study on the Adsorption of Heavy Metals by Impregnated Active Carbons

Written by Mi-Ran, Yun

Advised by professor Dae-Yewn, Shin Ph. D.

Department of Environmental Engineering

Graduate school of Chosun University

The result of impregnating granular active carbon and palletized active carbon with KSCN, Na₂S and Na₂C₂O₄ to produce impregnated active carbon to examine the adsorption characteristics of heavy metals such as Cu²⁺, Cd²⁺ and Cr³⁺ are as follows.

1. Adsorption of impregnated active carbon based on pH is lowest at pH 2 for all three heavy metals and most satisfactory at pH 6, rate of removal by impregnating agent at pH 4~8 was in the order of KSCN>Na₂S>Na₂C₂O₄ for Cu²⁺ and Na₂S>KSCN>Na₂C₂O₄ for Cd²⁺ and Cr³⁺

2. KSCN impregnated active carbon has excellent adsorption for Cu²⁺, and Na₂S and Na₂C₂O₄ impregnated active carbons have excellent adsorption for Cr³⁺. For each type of activated carbon, adsorption capacity by impregnating agent for Cu²⁺ was greater in granular carbon than palletized carbon, and was in the order of

KSCN>Na₂S>Na₂C₂O₄; Adsorption capacity for Cd²⁺ was greater in granular carbon than palletized carbon and was in the order of Na₂S>KSCN>Na₂C₂O₄; and adsorption capacity for Cr³⁺ by type of activated carbon was less in granular carbon than palletized carbon and was in the order of Na₂S >Na₂C₂O₄>KSCN.

3. Time to reach adsorption equilibrium for impregnated active carbons was 4~30 minutes for Cu²⁺, 4~15 minutes for Cd²⁺, and 4~8 minutes for Cr³⁺, and by impregnating agent, Adsorption equilibrium was reached in the order Na₂C₂O₄>KSCN>Na₂S for Cu²⁺, for Cd²⁺, Na₂S and Na₂C₂O₄-impregnated activated carbons reached adsorption equilibrium more rapidly than KSCN- impregnated activated carbon, and for Cr³⁺, adsorption equilibrium of Na₂S and Na₂C₂O₄-impregnated activated carbons were reached slower than KSCN-impregnated activated carbon.

4. Due to adsorption, 1/n value of activated carbons for Cu²⁺, Cd²⁺ and Cr³⁺ decreased from 0.54~0.84 to 0.38~0.49 which improved adsorption in liquid phase, and by type, that of Cu²⁺ and Cd²⁺ are similar for Cr³⁺, granular impregnated activated carbon is slightly greater than palletized impregnated activated carbon.

5. As a result of impregnation, the K value of activated carbon for Cu²⁺, Cd²⁺ and Cr³⁺ increased 149~626%, improving adsorption capacity of activated carbons, and by type, K values of granular impregnated activated carbon for Cu²⁺ and Cd²⁺ were slightly greater than that of palletized impregnated activated carbon, for Cr³⁺, that of granular impregnated activated carbon was found to be 13.1~21.5 less.

I. 서 론

과학기술이 발달하고 산업이 고도화됨에 따라 부산물로서 발생하는 오염물질의 종류가 다양해지고 그 양도 증가하는 추세이다. 이러한 오염물질 중 중금속은 주로 금속 공업, 광산업, 페인트 제조업, 농약 제조업 등의 산업체에서 배출되며,¹⁾ 독성이 강하여 생태계를 파괴하고 자연계에서 분해되지 않음으로써 먹이사슬을 통해 동·식물 및 인간에 체내에 농축되어 공해병을 일으킨다.

따라서 국제적으로 중금속 배출에 대한 규제가 강화되고 있으며, 국내에서도 1999년부터 Cu, Cd, Pb, Cr 등의 중금속에 관한 유해화학물질 배출량 보고 제도를 실시하고 있으나,²⁾ 중금속 배출을 근원적으로 차단할 수 없고 분해 기작이 복잡하여 처리비용이 많이 들기 때문에 적정 수준으로 처리하는데 어려움이 있다.¹⁾

그 동안 산업폐수 중의 중금속 제거에 관한 연구는 물리, 화학적 방법이 대부분이었으나 최근에는 식물이나 미생물을 이용한 방법도 시도되고 있다. 산업체에 도입된 공법으로는 응집·침전법, 이온교환법, 흡착법, 산화·환원법, 전기분해법, 중화법 및 추출법 등이 있으며, 응집·침전법과 이온교환법이 가장 많이 이용되고 있다.

그러나 응집·침전법은 처리효율이 낮고 부산물로서 슬러지가 다량 발생하는 문제점이 있고, 이온교환수지법은 고가의 수지를 사용하기 때문에 유가물질을 회수하여 재사용하지 않을 경우에는 경제성이 없으므로 적절한 처리 방법이 개발되어야 한다.³⁾

그 동안 활성탄은 비표면적이 크고 기공의 크기가 다양하여 여러 가지 물질을 동시에 흡착시킬 수 있고, 산성 및 염기성 산화물이 함유되어 이온교환성이 있어서 수용액상의 유기화합물 및 중금속제거 등의 목적으로 연구되어 왔으나, 활성탄의 단가가 높고, 유기화합물 제거에는 활성탄의 기공구조, 비표면적 및 기공 부피 등 물리적 성질의 영향이 크고, 중금속 제거에는 수용액 중의 이온 농도 및 pH에 따라 여러 가지 착이온이 형성되었기 때문에 현장적용에 어려움이 있었다.^{4,5)}

따라서 활성탄의 표면을 개질하여 물리흡착 및 화학흡착의 흡착능을 높이거나 특정 중금속만을 선택적으로 흡착제거하는 침착활성탄을 이용한 흡착법에 대해 관심이 대두되고 있다. 침착활성탄은 일반 활성탄 표면과 세공 내벽에 특정물질을 침착시킴

으로서 촉매적 기능 즉, 화학적 활성이 증가하고 특정 성분에 대한 선택적 흡착성을 갖는 활성탄이다.

침착활성탄의 흡착능은 침착제의 종류, 농도 및 시간 등에 따라 달라지며, 특히 침착제의 영향이 매우 크므로 침착제를 선정할 때에는 활성탄에 잘 침착되고 피흡착질과 안정적으로 결합하는지를 고려하여야 한다.⁶⁾

본 연구에서는 Cu, Cd 및 Cr을 흡착시키기 위해 KSCN, Na₂S, 및 Na₂C₂O₄이 침착된 침착활성탄을 제조하여 흡착특성, 흡착능 등을 조사하였다.

II. 이론적 고찰

2.1 중금속

중금속은 비중이 4~5이상인 금속을 말한다.⁷⁾ 생물이 생존하는데 있어서 미량의 중금속은 필수 성분이지만 농도가 높거나 과량 섭취될 경우 유해물질로 작용하여 생장을 저해하거나 사멸시킨다.

중금속은 대기, 수질 및 토양오염을 유발하고 오염된 지역에서 사육되거나 재배되는 동·식물의 체내에 축적되며 먹이사슬을 통해 궁극적으로 사람의 체내에서 고농도로 농축되어 만성독성을 유발한다.

중금속 중에서 특히 독성이 강한 것은 Hg, Pb, Cu, Cd, As, Cr, Mn, Ni 등이며,⁷⁾ 그 특성, 배출원 및 인체에 미치는 영향은 다음과 같다.

수은은 증기 또는 먼지 형태로 대기 중에 배출되며, 피부에 접촉되면 국소적 피부염을 유발하고, 인체의 호흡기 및 소화기 계통으로 섭취된 양의 80%정도가 신장 및 간장에 축적되어 소뇌 기능을 마비시킨다. 주요 배출원은 방부제, 살균제, 살충제 등의 수은 화합물 제조공정과 온도계, 기압계, 수은등, 전기분해, 도금, 수은광산 등 수은제품 생산시설 등이며, 인체에 미치는 영향은 미나마타병 및 신경손상을 일으킨다.⁸⁾

카드뮴은 대부분 산업 폐기물 및 광산 폐기물로부터 환경 중에 배출되며, 주요 배출원은 아연정련, 카드뮴 축전지, 전기도금, 카드뮴합금, 페인트 및 플라스틱의 안료, 형광등제조시설 등이다.⁸⁾ 인체에 미치는 영향은 이따이이따이병을 유발하고, 뼈의 관절부의 이상초래, 신경·간장·호흡기·순환기 계통의 질환을 일으킨다.

납의 배출원은 아연정련, 건전지 및 축전지 제조, 인쇄공업, 크레용 및 페인트 안료, 농약, 자동차 배기가스 등이다. 인체에 미치는 영향은 소화기, 호흡기, 음식물, 피부로 흡수되어 체내에 축적되고 흡수된 납의 99%가 골수에 축적되어 헤모글로빈 생성을 저해하며 말초운동신경 기능을 저하시킨다. 뇌손상 및 행동장애를 유발하기도 한다.⁹⁾

크롬은 2가, 3가, 6가 화합물로 존재하며, 2가 크롬은 매우 불안정한 물질이며, 3가 크롬은 물이나 알코올에 불용성이며, 산 또는 알칼리에 안정하다. 6가 크롬은 비용해성이고 대부분 산소와 강하게 결합되어 있으며 산화력이 강하고, 크롬 화합물 중 가

장 유독하다. 배출원은 피혁, 합금제조업, 크롬도금업, 시멘트제조업, 잉크, 페인트 및 플라스틱 안료공업 등이다. 인체에 미치는 영향은 호흡기와 피부를 통해 유입되어 간장, 신장, 골수에 축적되며, 신장, 대변을 통해 배출된다. 폐기종, 폐부종, 만성기관지염, 접촉피부염, 구토 등을 유발한다.^{8,9)}

구리의 배출원은 구리제련, 주물작업, 도금작업, 동전주조, 자동차 부품생산공정, 산세액, 광산 등이다. 인체에 미치는 영향은 단기간 노출에서는 빈혈, 두통, 현기증, 오한, 발열 등 금속열 증상 및 구진, 수포 등 피부염이 발생하고, 장기간 노출에서는 간섬유증, 간경변 등 간질환과 식욕부진, 구토, 메스꺼움, 두통, 현기증 등을 일으킨다.^{8,9)}

Table 1에 중금속의 물리화학적 특성을 나타내었다.

Table 1. The properties of heavy metals

Property	Mercury (Hg)	Cadmium (Cd)	Lead (Pb)	Chromium (Cr)	Copper (Cu)
Atomic Weight	200.6	112.4	207.2	52.0	63.5
Density	13.60(15℃)	8.64(20℃)	11.34(16℃)	7.19(20℃)	8.92(20℃)
Melting Point	-38.87℃	320.9℃	327.4℃	1,905℃	1,083℃
Boiling Point	356.58℃	767℃	1,750℃	2,200℃	2,570℃

2.2 흡착(adsorption)

흡착(adsorption)은 어떤 상에 존재하고 있는 이온이나 분자가 다른 상의 표면 또는 계면에 응축되거나 농축되어 농도가 달라지는 현상을 말한다. 즉 흡착은 기체, 액체와 같은 유체상의 어떤 성분이 고체 흡착제(adsorbent)의 계면에 전달되어 농도가 증가하는 분리현상이며,¹⁰⁾ 이 때 흡착되는 물질을 흡착질(adsorbate), 흡착하는 고체물질을 흡착제(adsorbent)라고 한다.

일반적으로 흡착은 물리흡착(physical adsorption), 화학흡착(chemical adsorption) 및 교환흡착(exchanged adsorption)으로 구분된다. 물리흡착은 주로 분자간의 상호 인력에 의해서 일어나며, 흡착력은 흡착제와 흡착질 간에 London dispersion 인력과 영구쌍극자, 유도쌍극자 등 van der Waals인력으로서 비교적 약하고, 흡착은 가역적이다. 화학흡착은 흡착제와 흡착질이 화학적으로 결합하여 흡착제 표면에 새로운 화합물을 형성하므로 흡착력이 비교적 강하고, 흡착은 비가역적이며, 교환흡착은 흡착제와 흡착질간에 전기화학적 potential에 의해 이온을 교환함으로써 이루어지며, 흡착은 가역적이다.

2.2.1 흡착형태

1) 물리흡착

물리흡착에서 흡착된 분자는 한 곳에 고정되어 있지 않고 계면 내에서 자유로운 2차원 병진운동을 한다. 물리흡착은 기체의 액화현상과 비슷하여 활성화에너지가 거의 없으므로 흡착속도가 빠르고 평형에 도달하는 시간이 짧다. 그러나 흡착제의 세공이 아주 작은 마이크로 미세공인 경우 기체 확산이 느려서 물질전달이 지연된다.

물리흡착의 흡착력은 분자나 흡착제가 본래 가지고 있거나 흡착과정에서 생성된 쌍극자간의 인력이나 분자 또는 원자간의 분산력이므로, 흡착과정에서 분자구조가 변하지 않고 온도에 따라 흡착되며 다층흡착이 가능하다. 흡착능이 흡착제 표면의 구성원소나 화학적 성질보다는 표면의 물리적 구조에 따라 달라지기 때문에 고체의 표면적을 측정하는데 유용하다.

2) 화학흡착

화학흡착은 활성화 과정을 거쳐서 이루어지므로 활성화 에너지가 큰 경우에는 흡착속도가 매우 느려져서 물리흡착과 쉽게 구별된다. 그러나 흡착이 발열반응이면 발생된 흡착열이 계의 온도를 높여주어 흡착속도가 빨라진다.

화학흡착은 흡착제 표면과 흡착된 분자사이에 전자가 이동되어 생성된 이온사이에 나타나는 정기적 인력이나 전자공유로 전자의 밀도 분포가 달라져 화학결합이 형성되어야 일어나기 때문에 흡착되는 물질과 고체표면의 종류에 따라 흡착여부가 결정된다. 또한 화학결합에 의한 흡착이므로 흡착층은 단층이다.

화학흡착의 흡착능은 흡착제 표면의 조성이나 원자배열상태에 따라 결정되므로, 화학흡착은 흡착제 표면의 화학적 성질과 흡착질의 분산상태를 조사하는데 활용된다. 특히, 화학흡착은 금속표면에 수소나 일산화탄소가 선택적으로 흡착되는 성질을 이용하여, 이들의 흡착량을 조사함으로써 금속이 담지된 촉매에서 금속의 분산상태를 예측하는데 응용된다.

3) 교환흡착

교환흡착은 이온교환 방식의 일종으로 흡착질과 흡착제 표면사이에 전기적 인력이 작용하여 흡착되는 현상이다. 이때 물질의 이온이 표면 위의 반대전하 부위로 정전기적 인력에 의해 끌려가서 표면에 농축된다.

교환흡착의 흡착능은 이온의 전하가 크고, 이온 반경이 작을수록 증가한다.

2.2.2 흡착반응

흡착법으로서 수중의 오염물질을 제거하는 공정에서는 흡착질이 고체 흡착질에 흡착되는 속도와 흡착량이 중요하다. 흡착에 의한 오염물질의 제거는 다음 세 단계를 통해 일어난다.¹¹⁾

- ① 흡착제 주위의 막을 통하여 흡착질의 분자가 이동하는 단계

(Boundary layer diffusion: Film diffusion)

② 공극을 통하여 흡착질이 확산하는 단계

(Intraparticle diffusion : pore-diffusion)

③ 흡착제 활성표면에 흡착질 분자가 흡착되면서 흡착질과 흡착제간의 결합이 이루어지는 단계 (Adsorption and Desorption : be adsorbed)

위의 제시한 단계 중 한 가지 또는 여러 가지가 중금속의 흡착속도를 결정하게 된다. 이것은 흡착되는 물질의 일반적 특성과 표면층을 통해 세공 속으로 확산되는 상대적인 속도에 의존한다. 또한 흡착량은 흡착제의 물에 대한 용해도, 흡착질과 흡착제 표면과의 상대적 친화성, 흡착제 표면에서의 이동 정도 및 흡착질의 흡착제 세공 내부 확산 여부에 의해 결정된다.

2.2.3 흡착평형

흡착제를 미량의 흡착질이 함유된 수용액 중에 일정한 온도 하에서 장시간 접촉시키면 흡착질은 흡착제의 표면에 농축되기 시작하여 더 이상 흡착되지 않는 평형에 도달하게 된다. 이때 액상의 농도와 흡착제에 흡착된 흡착질의 농도사이에는 일정한 관계가 성립되는데 이것을 등온흡착식이라 한다.¹²⁾ 이 식에서는 단위흡착제 무게당 흡착질의 흡착무게를 흡착질의 농도와 관련시켜 나타낸다.

흡착제의 흡착등온선을 측정함으로써 그 흡착제의 포화흡착량을 알 수 있고 나아가 실제 장치의 크기 및 운전경비를 추정할 수 있다.

등온흡착식은 흡착제 및 흡착 물질의 종류, 흡착제의 세공분포, 세공경의 크기, 표면상태, 흡착제와 흡착질의 상호작용에 의하여 결정된다. 단일성분의 등온흡착식은 평형실험을 통하여 흡착평형 데이터를 얻고 간단한 수학적 표현을 이용하여 구할 수 있다.⁷⁾

1) *Freundlich* 등온흡착식

상수나 하수처리장에서 수처리에 사용되는 활성탄의 흡착특성을 설명할 때 가장 많이 이용되는 경험식이다. 불균일 표면에 대한 흡착량과 흡착열의 관계를 나타낼 때 잘 부합된다고 알려졌다.

$$\frac{X}{M} = KC^{1/n}$$

여기서 X/M : amount of cadmium adsorbed per unit weight of adsorbent(mg/ℓ)

C : equilibrium concentration remaining in solution(mg/ℓ)

K : measure of adsorption capacity

1/n : adsorption intensity

식의 양변을 대수로 취하면

$$\log \frac{X}{M} = \log K + \frac{1}{n} \log C$$

따라서 C대 X/M를 양대수그래프에 plot하면 근사적으로 직선이 얻어진다. 1/n은 기울기이고, K는 C=1일 때의 절편이다.

직선의 기울기가 작을 때는 저농도로부터 고농도에 걸쳐 잘 흡착되고, 기울기가 클 때는 고농도에서 흡착량이 많아지는 반면에 저농도 범위에서 흡착량이 현저히 적어지고 특수한 활성탄에서는 중도에서 꺾어질 수도 있다.

2) Langmuir 등온흡착식

Langmuir 등온흡착식은 평형에서 흡착속도와 탈착속도가 같아는 속도론적 관점에서 속도를 구할 수 있도록 다음과 같은 가정 하에서 합리적인 이론에 따라 유도된 식이다.

- ① 흡착제의 표면에 흡착될 수 있는 지점의 개수는 고정되어 있으며 각 지점은 균일한 에너지를 가지고 있다.
- ② 흡착은 가역적이다. 즉, 평형상태에서는 표면에 흡착하는 속도와 탈착하는 속도가 같아진다. 어떤 농도에서 흡착된 양과 그 농도에서 흡착가능한 양의 차이는 평형농도에서 0이다.

$$\frac{X}{M} = \frac{abC}{1 + bC}$$

여기서 X : 흡착된 용질의 양(유입농도-유출농도)

M : 흡착제의 중량

X/M : 단위 중량의 활성탄에 흡착된 물질의 양

a : 흡착제 단위중량당 단분자층 덮개상수(흡착질 mg/흡착제 g)

b : 평형상수(흡착제 cm³/흡착된 용질mg), 실험에 의해 구해지는 상수

C : 흡착이 일어난 후 용액중의 흡착질(용질)의 평형농도(mg/ℓ)

이 식을 역수로 하여 선형 식으로 고치면

$$\frac{1}{X/M} = \frac{1}{a \cdot b} \times \frac{1}{C} + \frac{1}{a}$$

여기서 1/(a · b) : 기울기, 1/a : 절편

$\frac{1}{X/M}$ 대 1/C의 그래프를 그리면 직선을 얻을 수 있다.

$$\frac{C}{X/M} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C$$

3) B.E.T 등은흡착식(Brunauer-Emmett-Teller equation)

단분자층 흡착에 적용될 수 있는 BET 등은흡착식은 흡착되는 분자와 흡착제 사이에 선택성이 없는 물리흡착에 적용될 수 있고 등은흡착식으로부터 단분자층 흡착량을 쉽게 결정할 수 있어, 흡착제나 촉매의 표면적을 구하는데 널리 이용되고 있다.

BET등은흡착식은 다음과 같은 가정 하에 유도된다.

- ① 흡착질은 표면에서 고정
- ② 동일 층내의 enthalpy는 동일
- ③ 최초층 아래의 모든 분자는 동일 흡착 energy를 갖는다.
- ④ 한 층이 완성되기 전에 새로운 층이 형성될 수 있다.

$$\frac{C}{v(C_o - C)} = \frac{1}{M \cdot K} + \frac{K-1}{MK} \times \frac{C}{C_o}$$

위 식은 흡착실험 결과로부터 흡착제의 표면적을 측정하는데 널리 이용되고 있다.

여기서 v : the volume of gas actually adsorbed

M : the volume of gas which would be adsorbed if a monolayer were formed

C_0 : the saturation pressure of the adsorbate

C : the pressure

$$K = \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right)$$

이러한 BET 등온흡착식이 성립하는 흡착계에서 C/C_0 에 대한 $C/v(C_0 - C)$ 를 그리면 기울기가 $(K-1)/MK$, 절편이 $1/MK$ 인 직선이 얻어지며 기울기와 절편을 더한 값의 역수가 단분자층 흡착량 M 이다.

2.3 활성탄(*active Carbon*)

대표적인 흡착제로 사용되는 활성탄은 목재, 갈탄, 무연탄 및 야자껍질 등을 활성제인 염화아연이나 인산과 같은 약품, 또는 수증기로 활성화하여 얻어진 비극성 흡착제이다. 활성화 과정에서 분자 크기 정도의 미세공이 잘 발달되어 큰 내부 표면적을 갖는 무정형 탄소로, 정육각형의 불균일 배열을 갖는 비규칙적인 층상 격자 구조이며, 탄소 육각형이 교차 연결되는 공간 격자형과 망형면이 평행으로 불규칙하게 적층된 난층 구조형이 복합된 형태이다.

활성탄의 유효면적은 $1,000\text{m}^2/\text{g}$ 이상이며, 표면에 있는 탄소 원자의 관능기가 주위의 액체 또는 기체에 인력을 가하여 흡착질 분자를 흡착한다. 물리적·기계적 강도가 크고, 내열성이 우수하여 재생 시 손실이 적으며, 회분이 적고 순도가 높다.

활성탄의 세공은 활성화 과정에서 탄소계 성분의 제거로 인해 결정자 간에 생기는 작은 공간을 말하며, 세공이 많아 표면적이 클수록 흡착량이 많고, 세공의 형상이나 세공분포에 따라 흡착량 차이가 발생하게 된다. 활성탄 세공의 특성은 활성화 온도에 가장 큰 영향을 받는다.¹³⁾

2.3.1 활성탄의 흡착 특성

활성탄(active carbon)은 기체 성분이나 용액중의 용질을 잘 흡착하는 다공성 탄소질 물질로서 흡착성은 주로 그 내부 표면에서 일어나는 물리흡착에 기인한다.

활성탄의 흡착효율은 흡착제 및 흡착질의 물리·화학적 특성에 영향을 받는다. 따라서 흡착제의 비표면적, 공극의 형태와 크기, 표면에 분포된 작용기 등과 흡착질의 분자량, 분자의 크기, 극성 등이 매우 중요하며, 용액의 온도, pH 및 전해물질농도 등도 흡착능에 영향을 미친다.

활성탄의 비표면적(specific surface area)은 흡착능력을 결정하는 가장 중요한 인자로서 비표면적이 클수록 흡착능력은 증가된다. 그러나 비표면적이 $1,500\text{m}^2/\text{g}$ 이상으로 증가하면 공극의 크기가 1mm 이하로 작아져서 분자 크기가 작은 물질만 흡착하므로 흡착능이 오히려 감소한다.

공극의 크기뿐만 아니라 활성탄의 세공도 흡착능력에 영향을 미친다. 활성탄의 세공은 표면세공의 반경에 따라 미세공(Micro pore), 중간세공(Meso pore), 대세공(Macro pore)으로 구분한다. 미세공은 반경이 20\AA 이하이며, 중간세공은 $20\sim 1,000\text{\AA}$, 대세공은 $1,000\sim 100,000\text{\AA}$ 이상이다. 대세공은 흡착질의 확산통로 역할을 하므로 흡착속도에 큰 영향을 미치지만, 액상에서의 흡착력은 오히려 미세공과 중간세공 용적분포의 영향을 많이 받는다. 또한 미세공, 중간세공 및 대세공이 적당히 분포된 것이 미세공만으로 구성된 활성탄에 비하여 여러 종류의 유기물 흡착에 유리하다.

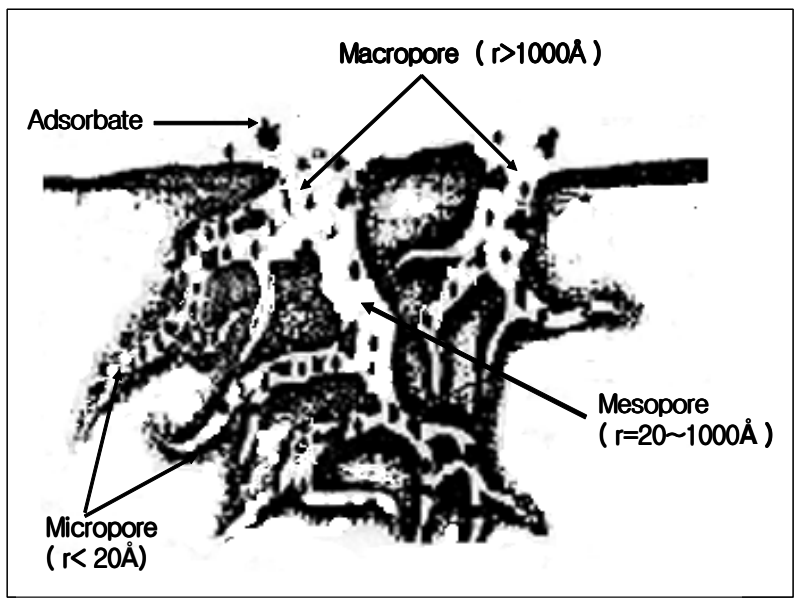


Fig. 1. Pore structure of active carbon.

2.3.2 활성탄의 분류

활성탄의 흡착특성은 원료나 활성화조건 등 제조방법에 따라 달라진다. 이와 같은 다양성 때문에 활성탄은 특정 용도로 제조되기도 한다. 또 어떤 물질에 대한 흡착능이 저조하더라도 다른 물질에 대해서는 좋은 결과가 나타날 수 있기 때문에 활성탄의 이용성은 증가된다. 활성탄의 제조, 응용, 재생에 있어서 활성탄 종류에 따라 응용방법이 달라지기 때문에 활성탄을 선택할 때에는 몇 가지 기준을 고려하여야 한다.

활성탄은 물리적 형상에 따라 분말활성탄, 입상활성탄, 조립활성탄 및 활성탄섬유 등으로 분류되고, 기초원료에 따라 식물질, 석탄질, 석유질 등으로 분류된다. 또 흡착능에 따라 단일형(선택성) 및 복합형(다양성)으로 분류되고, 용도에 따라 기상흡착용과 액상흡착용으로 크게 구분되며, 그 외 의약품, 수처리용, 촉매용 등이 있다.

2.4 침착활성탄

침착활성탄은 일반 활성탄으로 제거하기 어려운 특정 유해물질의 흡착효율을 향상시키거나 또는 흡착탑의 사용기간을 연장시키기 위해 일반 활성탄에 특수 약품을 세공벽면에 흡착시켜 화학적 활성을 높인 활성탄이다.¹⁴⁾

활성탄은 저온에서도 활성이 있고 비표면적이 다른 흡착제에 비해 매우 크며 온도에 따라 수축과 팽창하는 폭이 크기 때문에 다양한 분야에 응용되고 있다.⁶⁾ 그러나 물리흡착력이 약하여 운전효과가 그다지 높지 않다. 따라서 기존의 활성탄 표면 및 세공 내벽에 산이나 염기 또는 금속이나 특정한 금속염을 침착시켜 촉매적 기능 즉, 화학적 활성이 강하고 특정 성분을 선택적으로 흡착시킬 수 있는 침착활성탄을 제조하여 사용한다.^{14,15)}

2.4.1 침착활성탄의 제조

1) 활성탄의 선택

활성탄은 자체가 탄소물질을 활성화시킨 것이므로 기계적 성질이 탄소에 비해 약하다. 즉 미세공이 많을수록 기계적 강도는 떨어진다. 그런데 침착활성탄의 제조과정

중 침착과정에서 금속염에 의한 침착이 이루어질 때 세공구조가 바뀔 수 있으며, 만약 활성탄의 기계적 강도가 너무 약하면 문제가 발생할 수 있다.¹⁶⁾

활성탄의 물리적 성질은 제조원료의 영향을 받는다. 원료는 주로 야자각과 갈탄이 이용되어 왔다. 야자각 활성탄은 갈탄활성탄에 비해 micro pore가 잘 발달되었고 기계적 성질이 좋은 반면 가격이 비싸다는 단점이 있다.^{16,17)}

침착활성탄의 화학적 성질에 영향을 미치는 한 가지 요인은 침착물질과 활성탄 표면의 간섭작용이다. 일반적으로 활성탄이 담체인 경우 표면의 금속물질과는 화학적으로 무관하다. 그러나 활성탄 내에 존재하는 다른 금속이나 이물질은 침착물질에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 높다. 이러한 현상은 갈탄 활성탄에서 종종 나타나며 주로 활성탄 제조과정 중 활성화 공정에 의한 불순물의 영향이 매우 크다.

활성탄의 활성화에 주로 사용되는 약품은 수증기, 일반산소, $ZnCl_2$ 및 CO_2 등이다. 이들 중 $ZnCl_2$ 로서 활성화 한 활성탄은 침착성분의 독성이 큰 것으로 알려져 있는데, 이는 활성탄 표면에 존재하는 Zn의 영향 때문이라고 한다.¹⁸⁾

침착활성탄의 기본담체로서 사용되는 활성탄은 다음과 같은 물성을 갖는 것이 좋다.¹⁶⁾

- 1) 미세기공이 잘 발달된 기상용 활성탄일 것(micro pore 70%이상)
- 2) 비표면적이 클 것 ($1,000m^2/g$)
- 3) 기계적 강도가 클 것
- 4) 불순물이 함유되지 않은 순수한 상태일 것

2) 침착용액 및 함침

침착물질은 제거하고자 하는 물질과 화학적으로 반응하여 안정한 화합물을 형성하거나 이온교환하여 무해한 상태로 변화시킬 수 있어야 한다. 활성탄 침착은 보통 수용액 상태에서 이루어지기 때문에 용해성이 좋아야 한다.

Li, Na, K, Rb, Cs 등 알칼리 금속은 촉매로서 형성하기가 쉽고, 고체표면에 증착시켜 사용하기가 용이하다. 또한 화학적으로 이온화포텐셜이 현저히 낮기 때문에 화학

반응성이 격렬하여 침착물질로서 많이 사용된다.¹⁹⁾

침착용액은 활성탄 세공 깊숙이 담지되어야 하므로 함침인자로서는 침착용액의 농도, 점도 및 활성탄과의 친화성 등이 가장 중요하다. 즉 침착물질을 활성탄에 보다 많이 함침시키기 위해서는 침착용액의 농도가 높은 것이 바람직하지만 점도가 상승하므로 용액의 농도가 높으면서도 점도는 낮은 것이 요구된다. 또한 원하는 금속염의 농도를 얻기 위한 시약의 용해성도 매우 중요하다. 침착용액의 농도를 최적화하지 않으면 결정화 할 수 도 있기 때문이다.⁶⁾

3) 침착활성탄의 제조방법 및 조건

침착활성탄의 제조시 일반적으로 이용되는 방법은 함침법이다. 즉 제거하고자 하는 물질에 적합한 침착시약을 선정하여 적당한 농도의 용액을 조제하고 활성탄에 침착시킨 후 건조하여 제조한다. 침착시약이 기공내에 균일하게 분포되어야 하며, 침착용액의 농도, 점도, 친화성, 침착공정, 건조 온도 등이 매우 중요하다.^{19,20)}

특히 침착활성탄 제조 시 침착용액의 농도와 시간이 매우 중요한데 침착용액의 농도가 높을수록 활성탄 침착율은 증가하지만 활성탄의 micro pore를 막아버리는 pore filling 현상을 일으켜 전체적인 흡착질의 흡착능은 감소된다.

또한 침착시간의 경우에는 일정한 시간이 경과하면 더 이상 침착시키더라도 흡착능은 증가하지 않는다.

2.4.2 화학흡착 및 화학반응

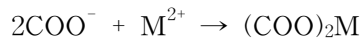
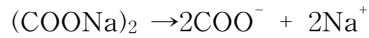
침착제는 활성탄 표면에 달라붙어 용액 중의 흡착질과 화학적으로 반응하는 약품을 말하며, 본 연구에서 사용하는 침착제의 메커니즘은 다음과 같다.

SCN⁻ 이온은 주기율표의 Ib족 및 Vb족 양이온과 착염을 형성한다.²¹⁾



대표적 이온은 Hg(SCN)₄²⁻, Cu(SCN)₄²⁻, Bi(SCN)₆³⁻ 등이며, Hg(II) complex가 가장 안정하다. 또한 제1 천이원소의 금속 이온과도 반응하여 Cr(SCN)₆³⁻, FeNCS²⁺, Co(SCN)₄²⁻ 등의 착염을 형성한다.

Na₂C₂O₄는 수중에서 Na⁺ 이온과 C₂O₄²⁻ 이온으로 해리되며, C₂O₄²⁻ 이온은 3가 금속 및 2가 금속이온과 많은 착염을 형성한다.²²⁾

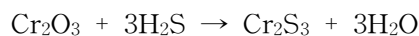
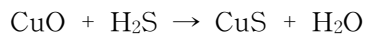


S²⁻ 이온과 결합한 염은 대부분 매우 난용성이며 유색화합물을 형성한다. S²⁻ 이온은 수용액에서 염기성인데 그 이유는 다음과 같이 가수분해하기 때문이다.



H₂S는 달걀 썩는 냄새를 가진 무색의 가스로 물에 용해하여 황화수소염을 형성한다.

Cu²⁺ 및 Cr³⁺ 이온이 침착된 활성탄일 사용하여 용액 중의 S²⁻ 이온을 흡착제거하는 메커니즘은 다음과 같다.



Ⅲ. 실험 및 분석 방법

3.1 실험재료

3.1.1 활성탄 시료

침착활성탄의 제조 시 담체로 사용한 활성탄은 J사의 입상활성탄과 조립활성탄이며, 증류수로 충분히 세척한 후 105℃에서 48시간 건조한 것을 데시케이터에 보관하여 사용하였다.

활성탄의 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Physical properties of active carbon

Property	Value	
	Granular	Pelletized
Particle size	8*30Mesh	2~3mmØ
Bulk density	0.4~0.5g/cm ³	0.4~0.5g/cm ³
Specific surface area	500~1,500m ² /g	900~1,200m ² /g
Pore volume	0.6~1.2cm ³ /g	0.6~1.2cm ³ /g

3.1.2 침착제 및 침착용액

침착제인 KSCN, Na₂S · 5H₂O 및 Na₂C₂O₄은 Junsei사 특급시약을 사용하였으며, 침착용액은 각각 0.5N용액을 조제하여 사용하였다.⁶⁾

3.1.3 중금속 시료용액

흡착질로 사용한 중금속은 Cu²⁺, Cd²⁺ 및 Cr³⁺이며, Anapex사의 ICP standard solution(농도 1,000mg/ℓ)을 희석하여 Cu²⁺ 및 Cr³⁺은 20mg/ℓ 용액, Cd²⁺은 25mg/ℓ 용액을 사용하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 침착활성탄의 제조

입상활성탄과 조립활성탄을 증류수로 수차례 세척한 후 105℃에서 48시간 건조하였다. 각각 20g을 300ml 삼각플라스크에 넣고 침착용액 200ml를 가하여 진탕기에서 150 rpm으로 5시간 진탕한 후 증류수를 가하여 표면에 묻어있는 시약을 제거하고, 105℃에서 48시간 건조하였다. 데시케이터에 보관하며 사용하였다.

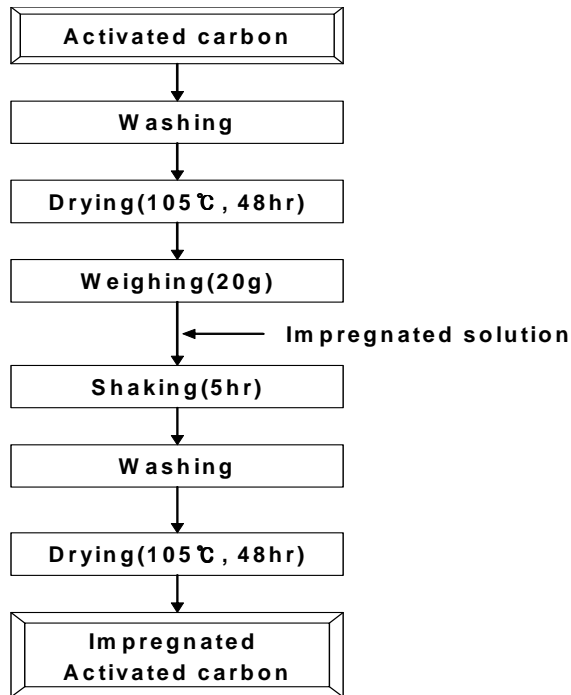


Fig. 2. Flow diagram impregnated active carbon make-up.

3.2.2. 침착활성탄의 pH에 따른 흡착능실험

pH2, 4, 6, 8, 10으로 조절한 중금속 용액시료 100ml씩을 300ml 삼각플라스크에 넣고, 일반 활성탄(입상, 조립) 및 침착활성탄을 2mg/ℓ 씩 가한 후 20℃에서 2시간동안 진탕하고 여과하여 여액의 중금속농도를 측정하였다. 여액의 중금속농도로부터 활성탄에 침착된 중금속의 양을 산출하였다.

3.2.3 침착활성탄의 흡착용량실험

중금속이온이 수산화물로서 침전되지 않도록 중금속 시료용액의 pH를 4로 조절하여 실험하였다. 300ml 삼각플라스크에 중금속 시료용액 100ml와 침착활성탄 및 일반 활성탄(입상, 조립)을 각각 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 3.0mg/ℓ 씩 넣고 20℃에서 2시간동안 진탕한 후 여과하여 여액의 중금속 농도를 측정하였다. 여액의 중금속 농도로부터 활성탄에 침착된 중금속의 양을 구하고 흡착제의 흡착용량을 산출하였다.

3.2.4 침착활성탄의 흡착속도실험

300ml 삼각플라스크에 중금속 시료용액 100ml와 침착활성탄 2.0mg/ℓ 을 주입하고 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60 및 120분 동안 진탕한 후 여과하였다. 여액의 중금속 농도를 측정하여 흡착속도를 산출하였다.

3.3 분석방법

중금속 농도는 Jobin ybon사의 유도결합플라즈마방출분광계(ICP)를 이용하여 측정하였으며, 항목별 측정파장은 구리 324nm, 카드뮴 214nm 및 크롬 205nm이다.

IV. 결과 및 고찰

4.1 침착활성탄의 pH에 따른 흡착 특성

4.1.1 구리

금속이온은 수용액에서 착물을 형성하여 이온의 화학종이 변하므로 금속이온의 흡착특성은 pH에 따라 크게 달라진다.

Table 3과 Fig. 3, 4에 Cu^{2+} 의 pH와 활성탄 종류에 따른 흡착특성을 나타내었다.

pH에 따른 침착활성탄의 Cu^{2+} 제거율은 pH 2와 10에서 저조하고 pH 2에서 가장 저조하였으며, pH 6에서 가장 양호하였다. 특히 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 침착입상활성탄 (이하 G- Na_2S)의 경우 pH가 증가함에 따라 제거율이 증가하여 pH 6에서 최고치를 나타낸 후 감소하여 일반 활성탄보다 저조한 제거율을 나타내었다.

제거율이 가장 양호한 pH 6에서 제거율은 KSCN 침착입상활성탄(이하 G-KSCN)이 86.1%, Na_2S 침착입상활성탄(이하 G- Na_2S)가 83.8%, G- Na_2S 가 69.6%, KSCN 침착조립활성탄(이하 Pe-KSCN)이 86.5%, Na_2S 침착조립활성탄(이하 Pe- Na_2S)가 77.5%, $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 침착조립활성탄(이하 Pe- Na_2S)이 72.7%이었다.

제거율이 양호한 pH 4~8에서 Cu^{2+} 제거율은 G-KSCN가 82.3~86.1%, G- Na_2S 가 77.8~83.8%, G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 65.3~69.6%, Pe-KSCN가 82.0~86.5%, Pe- Na_2S 가 72.7~77.5%, Pe- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 67.4~72.7%이었다.

침착제별 Cu^{2+} 제거율은 $\text{KSCN} > \text{Na}_2\text{S} > \text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 의 순으로 높게 나타났으며 pH 4~8에서 침착제별 제거율의 편차는 -4.6~18%를 나타내었다.

또한 활성탄의 형상별 Cu^{2+} 제거율은 KSCN과 Na_2S 침착활성탄은 입상탄이 높은 반면, $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 침착활성탄은 조립탄이 다소 높게 나타났다.

일반 활성탄의 Cu^{2+} 제거율은 GAC의 경우 pH 2~6에서 20.3~56.3%로서 낮고, pH 8과 10에서 각각 72.1%와 66.5%를 나타내었고, PeAC의 경우 pH 2와 4에서 각각 32.5%와 49.0%로서 낮고, pH 6~10에서 60.2~64.4%를 나타내었다. pH와 형상에 따라 차이는 있지만 침착제를 침착시킴으로써 Cu^{2+} 제거율이 약 10~15.3% 상승하였다.

일반 활성탄 및 침착활성탄의 pH에 따른 흡착특성은 유 등³⁾, 옥 등²³⁾의 연구에서와 같이 전형적인 양이온형 흡착특성 즉, pH가 높아질수록 제거율이 증가하는 경향을 보였다. 이는 Cu^{2+} 이 pH 5 이상에서 이온상태로 존재하지 않고, 침전물로 존재하기 때문이다.³⁾

한편 입상활성탄의 Cu^{2+} 제거율이 pH 4이상에서 높고, pH 8~10에서 다소 감소하는 경향을 보인 것은 전²⁴⁾이 Cu^{2+} 의 최적흡착영역이 pH 4~8.5라고 보고한 바와 유사하며, 이는 활성탄 표면에 금속 침전물이 형성되어 활성탄의 기공을 막음으로서 흡착능이 감소되었기 때문이라고 사료된다.

위 사항을 종합하면 침착활성탄의 pH에 따른 Cu^{2+} 흡착특성은 pH 2에서 가장 저조하고 pH 6에서 가장 양호하며, 침착제별 제거율은 $\text{KSCN} > \text{Na}_2\text{S} > \text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 의 순으로 높았다. 활성탄의 형상별로는 KSCN과 Na_2S 침착제는 입상탄이 높은 반면, $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 침착제는 조립탄이 다소 높게 나타났으며, 침착에 의하여 제거율이 약 10~15% 상승하였다.

Table 3. Removal efficiency of Cu^{2+} according to pH and species of impregnated active carbons

(Unit : %, Rate of increase in parenthesis)

pH Items	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
G-KSCN	50.2	83.7 (66.6)	86.1 (2.9)	82.3 (-4.4)	74.7 (-9.3)
G- Na_2S	46.7	77.8 (66.5)	83.8 (7.8)	78.4 (-6.4)	74.6 (-4.9)
G- $Na_2C_2O_4$	43.9	65.3 (48.7)	69.9 (7.0)	67.5 (-3.4)	65.9 (-2.4)
GAC	20.3	50.0 (146.3)	55.3 (10.6)	72.1 (30.4)	66.5 (-7.8)
Pe-KSCN	48.5	82.0 (69.0)	86.5 (5.5)	82.2 (-4.9)	82.4 (0.2)
Pe- Na_2S	40.3	72.7 (80.6)	77.5 (6.5)	74.4 (-4.0)	72.3 (-2.8)
Pe- $Na_2C_2O_4$	37.3	67.9 (81.9)	72.7 (7.1)	67.4 (-7.3)	66.0 (-2.1)
PeAC	32.5	49.0 (50.6)	60.2 (23.0)	64.4 (7.0)	63.4 (-1.6)

* Cu^{2+} Solution : 20mg/ℓ

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

Dosage of impregnated active carbon : 2mg/ℓ

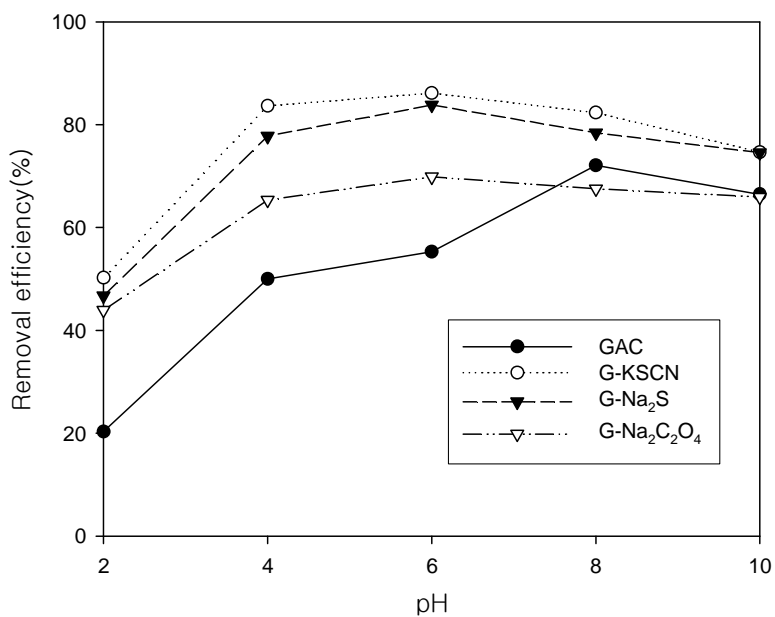


Fig. 3. Removal efficiency of Cu^{2+} as pH and species of impregnated granular active carbons.

Cu^{2+} Solution : 20mg/l

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

Dosage of impregnated active carbon : 2mg/l

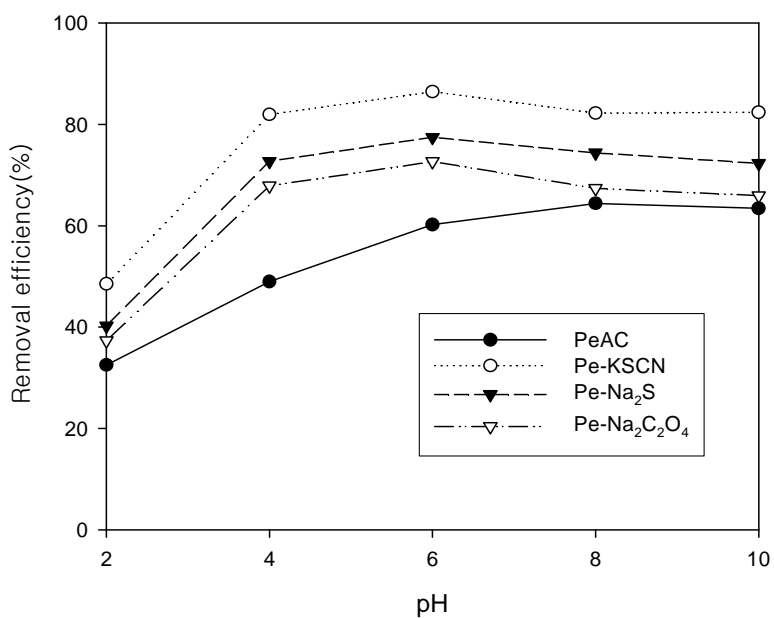


Fig. 4. Removal efficiency of Cu^{2+} as pH and species of impregnated pelletized active carbons.

Cu^{2+} Solution : 20mg/l

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

Dosage of impregnated active carbon : 2mg/l

4.1.2 카드뮴

Table 4와 Fig. 5, 6에 pH와 활성탄 종류에 따른 Cd^{2+} 의 흡착특성을 나타내었다. pH에 따른 침착활성탄의 Cd^{2+} 제거율은 pH 2에서 가장 저조하고 pH 4에서 저조하였으며, pH 8에서 가장 양호하였다.

침착활성탄에 따라 Cd^{2+} 제거율이 가장 양호한 pH가 일치하지는 않으나 pH 8에서 제거율은 G-KSCN가 75.3%, G- Na_2S 가 74.9%, G- $Na_2C_2O_4$ 가 73.4%, Pe-KSCN가 70.2%, Pe- Na_2S 가 70.6%, Pe- $Na_2C_2O_4$ 가 64.3%이었다.

제거율이 양호한 pH 6~8에서 Cd^{2+} 제거율은 G-KSCN가 70.5~75.3%, G- Na_2S 가 72.3~74.9%, G- $Na_2C_2O_4$ 가 70.2~73.9%, Pe-KSCN가 67.4~70.2%, Pe- Na_2S 가 69.2~71.3%, Pe- $Na_2C_2O_4$ 가 62.4~64.3%이었다.

침착제별 Cd^{2+} 제거율은 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$ 의 순으로 높게 나타났으며 pH 6~10에서 침착제별 제거율의 편차는 0.1~8.1%를 나타내었다.

또한 활성탄의 형상별 Cd^{2+} 제거율은 세 가지 침착제 모두 입상탄이 조립탄보다 다소 높게 나타났다.

일반 활성탄의 Cd^{2+} 제거율은 GAC의 경우 pH 2와 4에서 각각 25.3%와 44.4%로서 낮고, pH 6~10에서 50.7~62.8%를 나타내었고, PeAC의 경우 pH 2와 4에서 각각 26.3%와 41.7%로서 낮고, pH 6~10에서 57.2~61.0%를 나타내었다. pH와 형상에 따라 차이는 있지만 침착제를 침착시킴으로써 Cd^{2+} 제거율이 약 2.2~12% 상승하였다.

위 사항을 종합하면 침착활성탄의 pH에 따른 Cd^{2+} 흡착특성은 pH 2에서 가장 저조하고 pH 8에서 가장 양호하며, 침착제별 제거율은 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$ 의 순으로 높았다. 활성탄의 형상별로는 세 가지 침착제 모두 입상탄이 조립탄보다 다소 높게 나타났다. 침착에 의하여 Cd^{2+} 제거율이 2.2~12% 상승하였다.

Table 4. Removal efficiency of Cd²⁺ according to pH and species of impregnated active carbons

(Unit : %, Rate of increase in parenthesis)

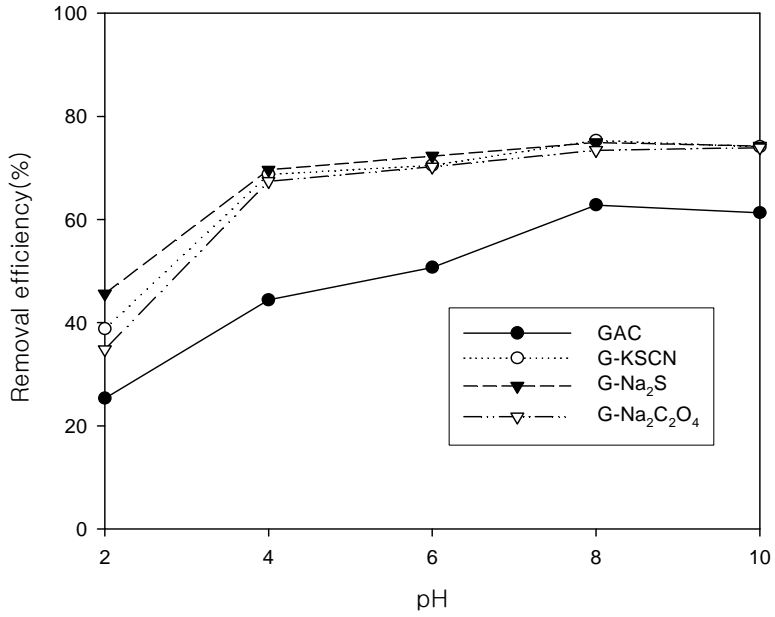
pH Items	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
G-KSCN	38.8	68.7 (77.1)	70.5 (2.6)	75.3 (6.8)	74.1 (-1.6)
G-Na ₂ S	45.6	69.6 (52.6)	72.3 (3.9)	74.9 (3.6)	74.2 (-0.9)
G-Na ₂ C ₂ O ₄	34.8	67.4 (93.7)	70.2 (4.2)	73.4 (4.6)	73.9 (0.7)
GAC	25.3	44.4 (75.5)	50.7 (14.2)	62.8 (23.9)	61.3 (-2.4)
Pe-KSCN	40.6	65.1 (60.4)	67.4 (3.5)	70.2 (4.2)	69.3 (-1.3)
Pe-Na ₂ S	44.0	67.4 (53.3)	69.2 (2.7)	70.6 (2.0)	71.3 (1.0)
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	39.1	59.4 (52.0)	62.4 (5.1)	64.3 (3.0)	63.2 (-1.7)
PeAC	26.3	41.7 (58.4)	57.2 (37.2)	60.1 (5.1)	61.0 (1.5)

* Cd²⁺ Solution : 25mg/ℓ

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

Dosage of impregnated active carbon : 2mg/ℓ



*Fig. 5. Removal efficiency of Cd²⁺ as pH and species of impregnated granular active carbons.
 Cd²⁺ Solution : 25mg/l
 Reaction time : 2hr
 Reaction Temp. : 20°C
 Dosage of impregnated active carbon : 2mg/l*

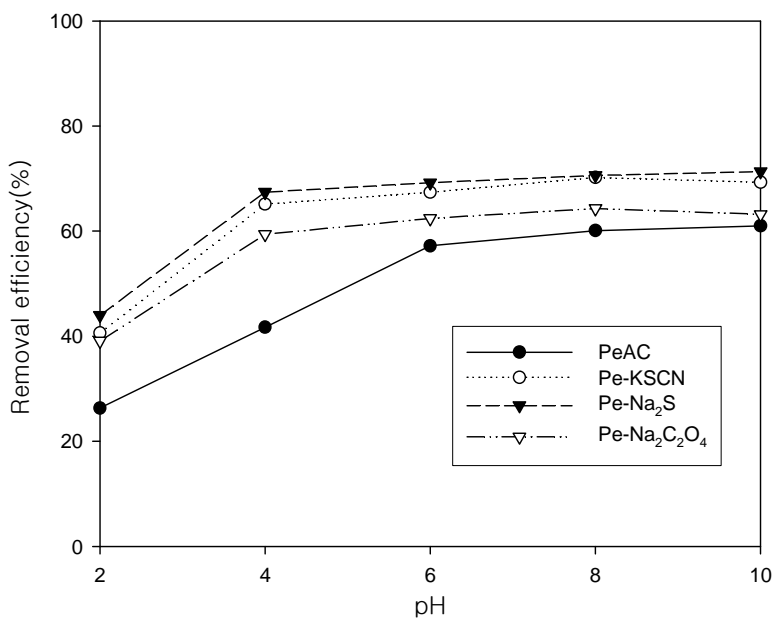


Fig. 6. Removal efficiency of Cd²⁺ as pH and species of impregnated pelletized active carbons.

Cd²⁺ Solution : 25mg/ℓ

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

Dosage of impregnated active carbon : 2mg/ℓ

4.1.3 크롬

Table 5와 Fig. 7, 8에 크롬의 pH와 활성탄 종류에 따른 흡착특성을 나타내었다.

pH에 따른 침착활성탄의 Cr^{3+} 제거율은 pH2에서 가장 저조하고 KSCN과 $Na_2C_2O_4$ 침착활성탄은 pH 4, Na_2S 침착활성탄은 pH 10에서 저조하였으며, 제거율이 가장 양호한 pH는 KSCN과 Na_2S 침착활성탄은 pH 6, $Na_2C_2O_4$ 침착활성탄은 pH 10이었다.

Cr^{3+} 제거율이 가장 양호한 pH에서 제거율은 G-KSCN가 90.5%, G- Na_2S 가 89.9%, G- $Na_2C_2O_4$ 가 86.3%, Pe-KSCN가 93.8%, Pe- Na_2S 가 94.8%, Pe- $Na_2C_2O_4$ 가 90.4%이었다.

Cr^{3+} 제거율이 양호한 pH범위에서 제거율은 G-KSCN가 87.5~90.5%, G- Na_2S 가 86.3~89.9%, G- $Na_2C_2O_4$ 가 84.5~86.3%, Pe-KSCN가 90.2~93.8%, Pe- Na_2S 가 93.9~94.8%, Pe- $Na_2C_2O_4$ 가 90.3~90.4%이었다.

침착제별 Cr^{3+} 제거율은 입상탄은 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$, 조립탄은 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$ 의 순으로 높게 나타났으며 제거율이 가장 양호한 pH범위에서 침착제별 제거율의 편차는 0.1~8.9%를 나타내었다.

또한 활성탄의 형상별 Cr^{3+} 제거율은 세 가지 침착제 모두 조립탄이 입상탄보다 2.2~7.6% 높게 나타났다.

일반 활성탄의 Cr^{3+} 제거율은 GAC의 경우 pH 2와 4에서 각각 38.0%와 55.5%로서 낮고, pH 6~10에서 63.2~68.3%를 나타내었고, PeAC의 경우 pH2 와 4에서 각각 48.3%와 60.7%로서 낮고, pH 6~10에서 66.8~83.4%를 나타내었다. 침착제를 침착시킴으로서 Cr^{3+} 제거율이 pH와 형상에 따라 다르지만 약 0.9~28% 상승하였다.

본 연구에서 입상활성탄에 의한 Cr^{3+} 흡착의 최적 pH범위는 pH 6~10이고, 전²⁴⁾은 pH 5~6.5이라고 보고하여 다소 다른 양상을 나타내었다.

위 사항을 종합하면 침착활성탄의 pH에 따른 Cr^{3+} 흡착특성은 pH 2에서 가장 저조하고 KSCN과 Na_2S 침착활성탄은 pH 6, $Na_2C_2O_4$ 침착활성탄은 pH 8에서 가장 양호하며, 침착제별 제거율은 입상탄은 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$, 조립탄은 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$ 의 순으로 높았다. 활성탄의 형상별로는 세 가지 침착제 모두 조립탄이 입상탄보다 다소 높게 나타났다. 침착에 의하여 제거율이 0.9~28% 상승하였다.

Table 5. Removal efficiency of Cr³⁺ according to pH and species of impregnated active carbons

(Unit : %, Rate of increase in parenthesis)

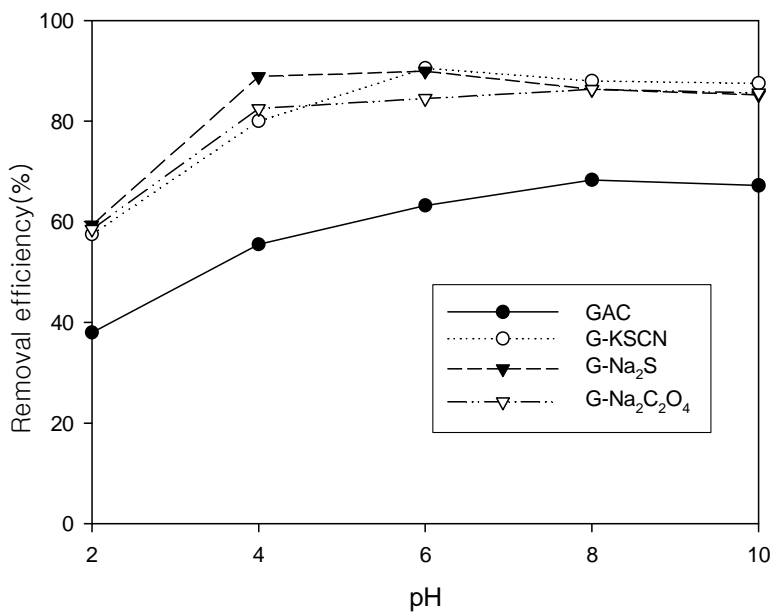
Items \ pH	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
G-KSCN	57.5	80.0 (39.1)	90.5 (13.1)	88.0 (-2.8)	87.5 (-0.5)
G-Na ₂ S	59.3	88.9 (49.8)	89.9 (1.2)	86.3 (-4.0)	85.2 (-1.3)
G-Na ₂ C ₂ O ₄	58.5	82.5 (41.0)	84.5 (2.4)	86.3 (2.1)	85.6 (-0.8)
GAC	38.0	55.5 (46.1)	63.2 (13.9)	68.3 (8.1)	67.2 (-1.6)
Pe-KSCN	63.4	88.7 (39.9)	93.8 (5.7)	90.2 (-3.8)	90.3 (0.1)
Pe-Na ₂ S	66.4	93.9 (41.3)	94.8 (1.0)	93.9 (-0.9)	90.0 (-4.2)
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	59.8	89.2 (49.2)	90.3 (1.2)	90.4 (0.2)	90.4 (0.0)
PeAC	48.3	60.7 (25.7)	66.8 (10.0)	82.6 (23.7)	83.4 (1.0)

* Cr³⁺ Solution : 20mg/ℓ

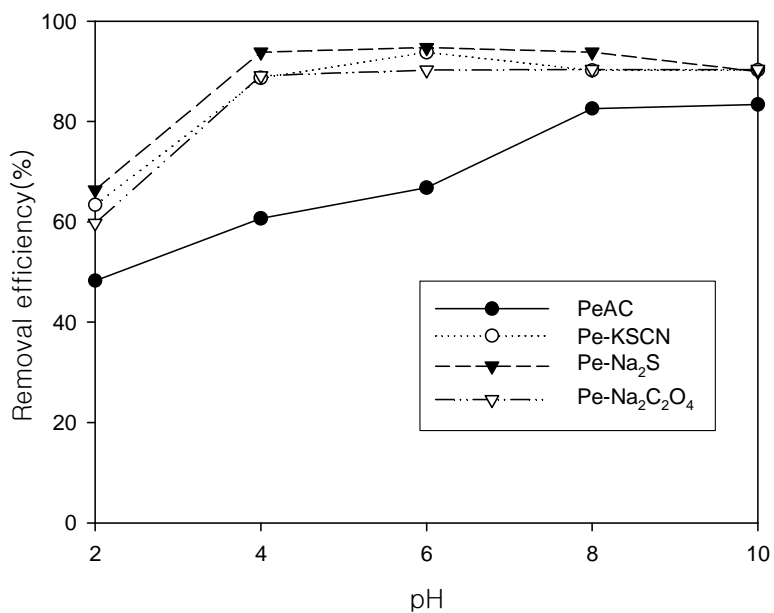
Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

Dosage of impregnated active carbon : 2mg/ℓ



*Fig. 7. Removal efficiency of Cr³⁺ as pH and species of impregnated granular active carbons.
 Cr³⁺ Solution : 20mg/l
 Reaction time : 2hr
 Reaction Temp. : 20°C
 Dosage of impregnated active carbon : 2mg/l*



*Fig. 8. Removal efficiency of Cr³⁺ as pH and species of impregnated pelletized active carbons.
 Cr³⁺ Solution : 20mg/ℓ
 Reaction time : 2hr
 Reaction Temp. : 20°C
 Dosage of impregnated active carbon : 2mg/ℓ*

4.2 침착활성탄의 흡착용량

4.2.1 구리

Table 6과 Fig. 9, 10에 수온 20°C, pH 4, 접촉시간 2시간, Cu^{2+} 농도 20mg/ℓ 인 용액 100ml에 침착활성탄을 1~3mg/ℓ 주입할 때 Cu^{2+} 의 흡착용량을 나타내었다.

세 가지 침착활성탄 모두 1mg/ℓ 주입할 때 Cu^{2+} 흡착용량이 가장 크고 주입량이 증가함에 따라 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

활성탄의 형상별 Cu^{2+} 흡착용량은 침착활성탄을 1mg/ℓ 주입할 때 입상탄의 경우 G-KSCN가 1.23mg Cu^{2+} /gC, G- Na_2S 가 0.98mg Cu^{2+} /gC, G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 0.72mg Cu^{2+} /gC, 조립탄은 Pe-KSCN가 1.03mg Cu^{2+} /gC, Pe- Na_2S 가 0.85mg Cu^{2+} /gC, Pe- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 0.74mg Cu^{2+} /gC로서 입상탄이 조립탄보다 크며, 침착제별로는 KSCN> Na_2S > $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 순으로 크게 나타났다.

흡착에 의한 침착제별 Cu^{2+} 흡착용량 증가율은 침착활성탄 주입량이 1mg/ℓ 일 때 KSCN은 G-KSCN이 128%, Pe-KSCN이 106%, Na_2S 는 G- Na_2S 가 81%, Pe- Na_2S 가 70%, $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 는 G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 83%, Pe- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 48%이다. 흡착에 의하여 Cu^{2+} 흡착용량이 KSCN은 106~128%, Na_2S 는 70~81%, $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 는 33~48% 증가하였고, 침착제별 증가율은 KSCN> Na_2S > $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 순으로 크게 나타났다.

또 주입량이 1mg/ℓ 에서 1.5mg/ℓ 로 증가함에 따라 Cu^{2+} 흡착용량은 G-KSCN가 0.39mg Cu^{2+} /gC, G- Na_2S 가 0.14mg Cu^{2+} /gC, G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 0.26mg Cu^{2+} /gC 감소하고, Pe-KSCN가 0.13mg Cu^{2+} /gC, Pe- Na_2S 가 0.03mg Cu^{2+} /gC, 감소하여 입상침착활성탄의 감소량이 크고 조립침착활성탄의 감소량은 작은 것으로 나타났다.

위 사항을 종합하면, Cu^{2+} 흡착용량은 침착활성탄을 1mg/ℓ 주입할 때 G-KSCN가 1.23mg Cu^{2+} /gC, G- Na_2S 가 0.98mg Cu^{2+} /gC, G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 0.72mg Cu^{2+} /gC, Pe-KSCN가 1.03mg Cu^{2+} /gC, Pe- Na_2S 가 0.85mg Cu^{2+} /gC, Pe- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 0.74mg Cu^{2+} /gC이다. 활성탄 형상별로는 입상침착활성탄이 조립침착활성탄보다 크고 침착제 별로는 G-KSCN>G- Na_2S >G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 순으로 높게 나타났으며, 침착에 의하여 Cu^{2+} 흡착용량이 KSCN은 106~128%, Na_2S 는 70~81%, $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 는 33~48% 증가하였다.

Table 6. Relationship between adsorption capacity of Cu²⁺ and dosage of impregnated active carbon

(Unit : mg Cu²⁺/g carbon, Rate of decrease in parenthesis)

dosage (mg/ℓ)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Items					
G-KSCN	1.23	0.84 (31.94)	0.81 (3.09)	0.68 (16.12)	0.57 (15.59)
G-Na ₂ S	0.98	0.84 (14.30)	0.78 (7.81)	0.65 (15.99)	0.56 (14.47)
G-Na ₂ C ₂ O ₄	0.72	0.66 (8.24)	0.65 (1.16)	0.54 (16.69)	0.47 (14.40)
GAC	0.54	0.50 (7.58)	0.46 (7.73)	0.40 (12.60)	0.35 (12.95)
Pe-KSCN	1.03	0.90 (12.07)	0.82 (9.08)	0.67 (18.63)	0.57 (15.22)
Pe-Na ₂ S	0.85	0.82 (3.94)	0.73 (11.51)	0.60 (17.19)	0.52 (14.17)
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	0.74	0.74 (0.36)	0.68 (8.23)	0.56 (17.88)	0.48 (13.08)
PeAC	0.50	0.49 (3.57)	0.49 (0.00)	0.41 (17.22)	0.34 (16.17)

* Cu²⁺ Solution : 20mg/ℓ

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

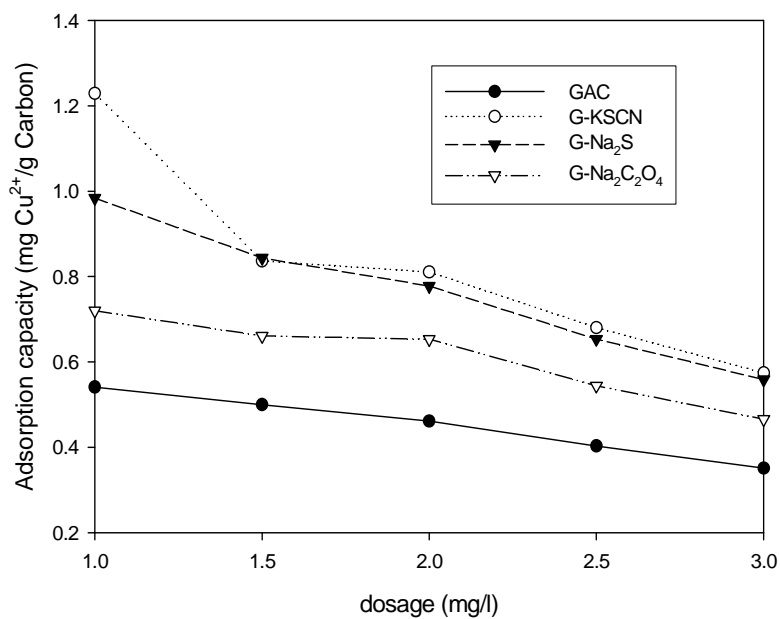


Fig. 9. Adsorption capacity of Cu^{2+} as dosage of impregnated granular active carbon.

Cu^{2+} Solution : 20mg/l

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

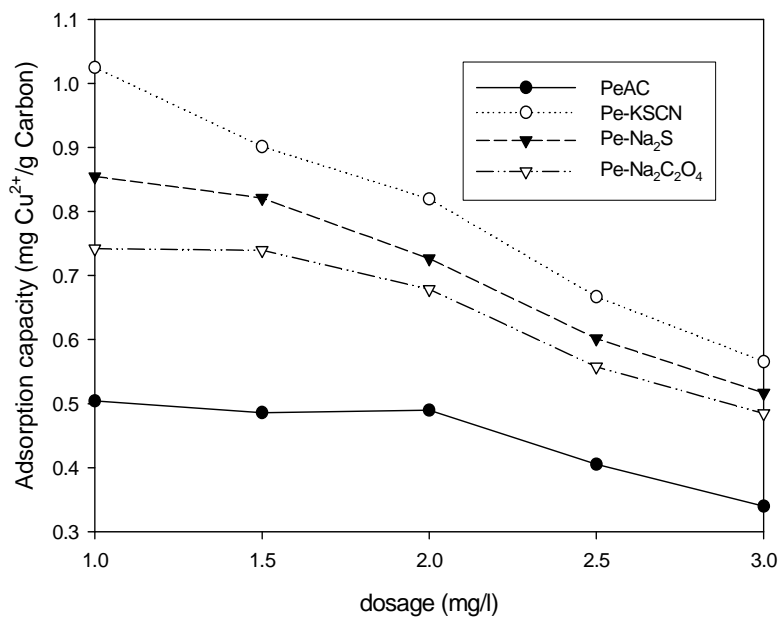


Fig. 10. Adsorption capacity of Cu^{2+} as dosage of impregnated pelletized active carbon.

Cu^{2+} Solution : 20mg/ℓ

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

4.2.2 카드뮴

Table 7과 Fig. 11, 12에 수온 20°C, pH 4, 접촉시간 2시간, Cd^{2+} 농도 25mg/ℓ 인 용액 100ml에 침착활성탄을 1~3mg/ℓ 주입할 때 Cd^{2+} 의 흡착용량을 나타내었다.

세 가지 침착활성탄 모두 1mg/ℓ 주입할 때 Cd^{2+} 의 흡착용량이 가장 크고 주입량이 증가함에 따라 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

활성탄의 형상별 Cd^{2+} 흡착용량은 침착활성탄을 1mg/ℓ 주입할 때 입상탄의 경우 G-KSCN가 0.98mg Cd^{2+} /gC, G- Na_2S 가 1.06mg Cd^{2+} /gC, G- $Na_2C_2O_4$ 가 0.94mg Cd^{2+} /gC, 조립탄은 Pe-KSCN가 0.93mg Cd^{2+} /gC, Pe- Na_2S 가 0.99mg Cd^{2+} /gC, Pe- $Na_2C_2O_4$ 가 0.87mg Cd^{2+} /gC로서 입상침착활성탄이 조립침착활성탄보다 크며, 침착제별로는 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$ 순으로 크게 나타났다.

침착제별 Cd^{2+} 흡착용량 증가율은 침착활성탄 주입량이 1mg/ℓ 일 때 KSCN은 G-KSCN가 78%, KSCN가 75%, Na_2S 는 G- Na_2S 가 92%, Pe- Na_2S 가 87%, $Na_2C_2O_4$ 는 G- $Na_2C_2O_4$ 가 71%, Pe- $Na_2C_2O_4$ 가 64%로서, 침착에 의하여 Cd^{2+} 흡착용량이 KSCN은 75~78%, Na_2S 는 87~92%, $Na_2C_2O_4$ 는 64~71% 증가하였고 증가율은 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$ 순으로 크게 나타났다.

또 주입량이 1mg/ℓ 에서 1.5mg/ℓ 로 증가함에 따라 Cd^{2+} 흡착용량은 G-KSCN가 0.12mg Cd^{2+} /gC, G- Na_2S 가 0.19mg Cd^{2+} /gC, G- $Na_2C_2O_4$ 가 0.07mg Cd^{2+} /gC 감소하고, Pe-KSCN가 0.12mg Cd^{2+} /gC, Pe- Na_2S 가 0.15mg Cd^{2+} /gC, Pe- $Na_2C_2O_4$ 가 0.13mg Cd^{2+} /gC 감소하여 입상침착활성탄의 감소량이 크고 조립침착활성탄의 감소량은 작은 것으로 나타났다.

위 사항을 종합하면, Cd^{2+} 흡착용량은 침착활성탄을 1mg/ℓ 주입할 때 G-KSCN가 0.98mg Cd^{2+} /gC, G- Na_2S 가 1.06mg Cd^{2+} /gC, G- $Na_2C_2O_4$ 가 0.94mg Cd^{2+} /gC, 조립탄은 Pe-KSCN가 0.93mg Cd^{2+} /gC, Pe- Na_2S 가 0.99mg Cd^{2+} /gC, Pe- $Na_2C_2O_4$ 가 0.87mg Cd^{2+} /gC 이다. 활성탄 형상별로는 입상침착활성탄이 조립침착활성탄보다 크고, 침착제별로는 $Na_2S > KSCN > Na_2C_2O_4$ 순으로 크며, 침착에 의하여 Cd^{2+} 흡착용량이 Na_2S 는 87~92%, KSCN은 75~78%, $Na_2C_2O_4$ 는 64~71% 증가하였다.

Table 7. Relationship between adsorption capacity of Cd²⁺ and dosage of impregnated active carbon

(Unit : mg Cd²⁺/ g carbon, Rate of decrease in parenthesis)

Items \ dosage (mg/ℓ)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
G-KSCN	0.98	0.86 (12.70)	0.86 (0.00)	0.70 (18.93)	0.60 (14.51)
G-Na ₂ S	1.06	0.87 (17.92)	0.82 (6.13)	0.71 (13.55)	0.60 (14.78)
G-Na ₂ C ₂ O ₄	0.94	0.87 (7.31)	0.84 (2.79)	0.68 (19.29)	0.57 (15.69)
GAC	0.55	0.55 (0.00)	0.53 (3.82)	0.45 (15.63)	0.39 (14.37)
Pe-KSCN	0.93	0.81 (12.28)	0.78 (3.60)	0.67 (14.72)	0.56 (16.32)
Pe-Na ₂ S	0.99	0.84 (14.47)	0.80 (5.44)	0.69 (13.89)	0.58 (15.21)
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	0.87	0.74 (14.16)	0.67 (9.32)	0.62 (8.22)	0.53 (13.70)
PeAC	0.53	0.53 (0.00)	0.52 (0.98)	0.42 (18.85)	0.36 (14.22)

* Cd²⁺ Solution : 25mg/ℓ

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

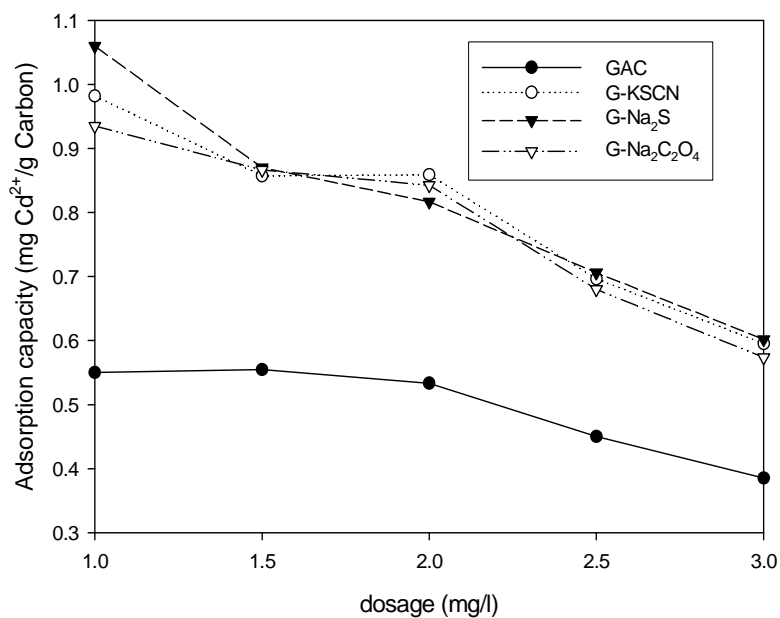


Fig. 11. Adsorption capacity of Cd²⁺ as dosage of impregnated granular active carbon.

Cd²⁺ Solution : 25mg/l

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

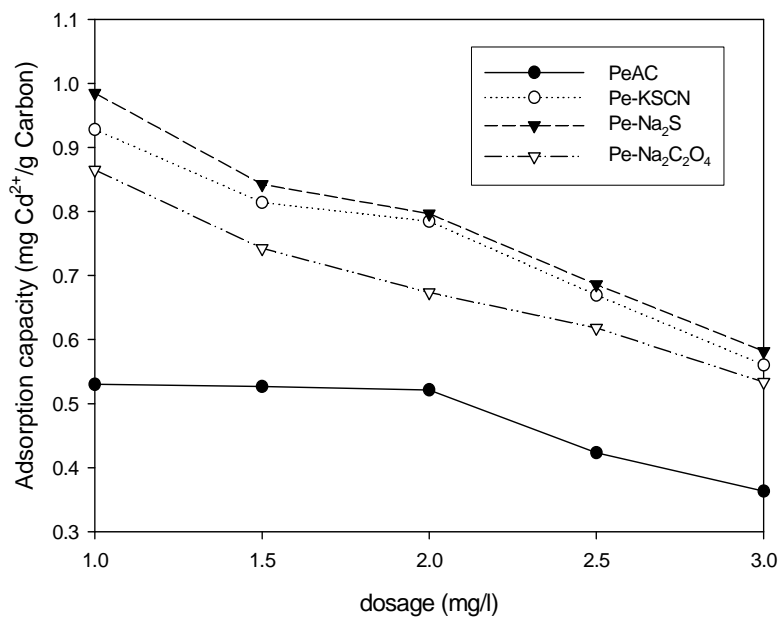


Fig. 12. Adsorption capacity of Cd²⁺ as dosage of impregnated pelletized active carbon.

Cd²⁺ Solution : 25mg/l

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

4.2.3 크롬

Table 8과 Fig. 13, 14에 수온 20℃, pH 4, 접촉시간 2시간, Cr³⁺이 20mg/ℓ 인 용액 100ml에 침착활성탄을 1~3mg/ℓ 주입할 때 Cr³⁺의 흡착용량을 나타내었다.

세 가지 침착활성탄 모두 1mg/ℓ 주입할 때 Cr³⁺흡착용량이 가장 크고 주입량이 증가함에 따라 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

활성탄의 형상별 Cr³⁺흡착용량은 침착활성탄을 1mg/ℓ 주입할 때 입상탄의 경우 G-KSCN가 0.98mgCr³⁺/gC, G-Na₂S가 1.25mgCr³⁺/gC, G-Na₂C₂O₄가 1.05mgCr³⁺/gC, 조립탄은 Pe-KSCN가 1.29mgCr³⁺/gC, Pe-Na₂S가 1.39mgCr³⁺/gC, Pe-Na₂C₂O₄가 1.30mgCr³⁺/gC로서 조립탄이 입상탄보다 크며, 침착제별로는 Na₂S>Na₂C₂O₄>KSCN순으로 크게 나타났다.

흡착에 의한 침착제별 Cr³⁺흡착용량 증가율은 침착활성탄 주입량이 1mg/ℓ 일 때 KSCN은 G-KSCN이 63%, Pe-KSCN이 95%, Na₂S는 G-Na₂S가 108%, Pe-Na₂S가 111%, Na₂C₂O₄는 G-Na₂C₂O₄가 75%, Pe-Na₂C₂O₄가 97%이다. 흡착에 의하여 Cr³⁺흡착용량이 KSCN은 63~95%, Na₂S는 108~111%, Na₂C₂O₄는 75~97% 증가하였고, 침착제별 증가율은 Na₂S>Na₂C₂O₄>KSCN순으로 크게 나타났다.

또 주입량이 1mg/ℓ 에서 1.5mg/ℓ 로 증가함에 따라 Cr³⁺흡착용량은 G-KSCN가 0.03mgCr³⁺/gC, G-Na₂S가 0.26mgCr³⁺/gC, G-Na₂C₂O₄가 0.14mgCr³⁺/gC 감소하고, Pe-KSCN가 0.35mgCr³⁺/gC, Pe-Na₂S가 0.19mgCr³⁺/gC, Pe-Na₂C₂O₄가 0.32mgCr³⁺/gC감소하여 입상침착활성탄의 감소량이 작고 조립침착활성탄의 감소량은 큰 것으로 나타났다.

위 사항을 종합하면, 침착활성탄의 Cr³⁺흡착용량은 침착활성탄을 1mg/ℓ 주입할 때 입상탄은 G-KSCN가 0.98mgCr³⁺/gC, G-Na₂S가 1.25mgCr³⁺/gC, G-Na₂C₂O₄가 1.05mgCr³⁺/gC, 조립탄은 Pe-KSCN가 1.29mgCr³⁺/gC, Pe-Na₂S가 1.39mgCr³⁺/gC, Pe-Na₂C₂O₄가 1.30mgCr³⁺/gC이다. 활성탄 형상별로는 입상침착활성탄이 조립침착활성탄보다 작고 침착제 별로는 G-Na₂S>G-Na₂C₂O₄>G-KSCN순으로 높게 나타났으며, 침착에 의하여 Cr³⁺흡착용량이 KSCN은 63~95%, Na₂S는 108~111%, Na₂C₂O₄는 75~97% 증가하였다.

Table 8. Relationship between adsorption capacity of Cr³⁺ and dosage of impregnated active carbon

(Unit : mg Cr³⁺/g carbon, Rate of decrease in parenthesis)

Items \ dosage (mg/ℓ)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
G-KSCN	0.98	0.95 (3.66)	0.80 (15.61)	0.66 (17.80)	0.56 (14.33)
G-Na ₂ S	1.25	0.99 (20.98)	0.89 (10.19)	0.72 (19.19)	0.60 (15.97)
G-Na ₂ C ₂ O ₄	1.05	0.91 (12.77)	0.83 (9.67)	0.66 (19.47)	0.56 (15.21)
GAC	0.60	0.55 (7.58)	0.53 (3.82)	0.45 (15.55)	0.39 (13.34)
Pe-KSCN	1.29	0.94 (26.80)	0.89 (5.71)	0.71 (19.86)	0.60 (15.96)
Pe-Na ₂ S	1.39	1.20 (13.47)	0.94 (21.75)	0.75 (20.04)	0.63 (15.82)
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	1.30	0.98 (24.53)	0.89 (8.78)	0.72 (19.55)	0.60 (16.34)
PeAC	0.66	0.61 (8.58)	0.59 (3.57)	0.49 (17.04)	0.41 (16.39)

* Cr³⁺ Solution : 20mg/ℓ

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

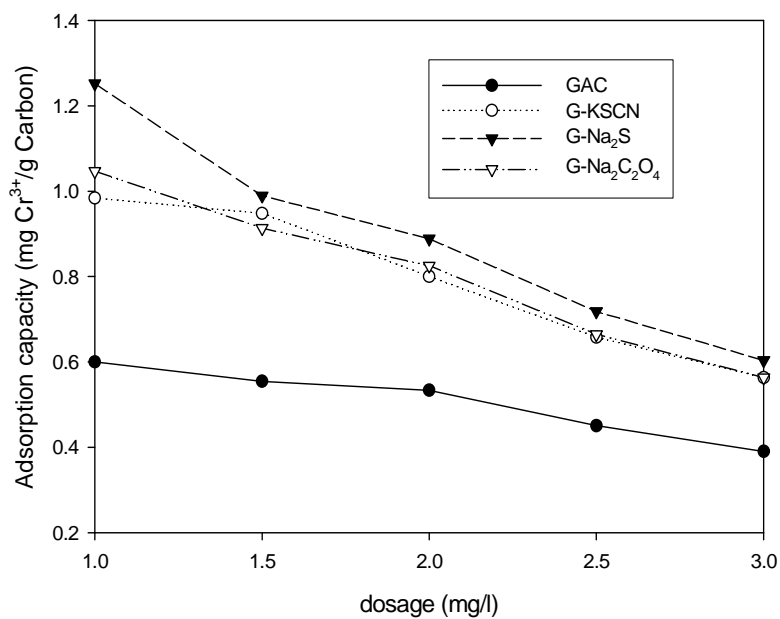


Fig. 13. Adsorption capacity of Cr³⁺ as dosage of impregnated granular active carbon.

Cr³⁺ Solution : 20mg/l

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

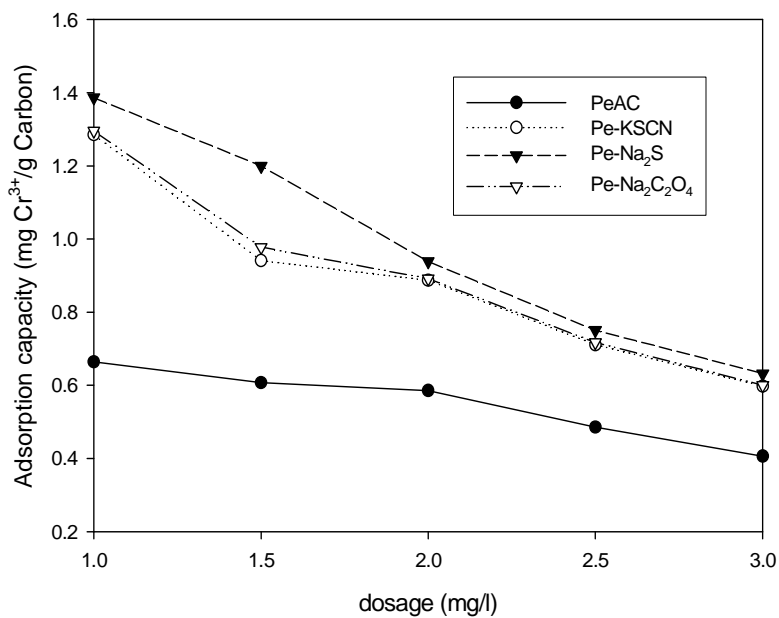


Fig. 14. Adsorption capacity of Cr³⁺ as dosage of impregnated pelletized active carbon.

Cr³⁺ Solution : 20mg/l

pH : 4

Reaction time : 2hr

Reaction Temp. : 20°C

4.3 침착활성탄의 흡착속도

4.3.1 구리

Table 9와 Fig. 15, 16에 수온 20°C, pH 4, Cu^{2+} 농도가 20mg/ℓ 인 용액 100mℓ에 침착활성탄 2mg/ℓ 을 주입하고 흡착시간에 따른 Cu^{2+} 제거율을 나타내었다.

침착활성탄들은 반응시간 4~30분에 흡착평형에 도달하였다.

흡착평형에 도달한 시간은 입상침착활성탄의 경우 G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 8분, G-KSCN-과 G- Na_2S 는 30분이고, 조립침착활성탄은 Pe- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 4분, Pe-KSCN가 8분, Pe- Na_2S 가 15분이었다.

침착제별로 흡착평형에 도달한 시간은 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 > \text{KSCN} > \text{Na}_2\text{S}$ 순으로 짧고, 활성탄 형태별로는 조립침착활성탄이 입상침착활성탄보다 짧은 것을 알 수 있다.

일반 활성탄이 흡착평형에 도달한 시간은 GAC는 8분, PeAC는 4분이고, KSCN과 Na_2S -침착활성탄은 일반 활성탄보다 늦게 흡착평형에 도달하였다.

위 사항을 종합하면, 침착활성탄이 흡착평형에 도달하는 데는 4~30분이 소요되고, 침착제별로는 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 > \text{KSCN} > \text{Na}_2\text{S}$ 순으로 빠르고, 활성탄 형태별로는 조립탄이 입상탄보다 빠르며, KSCN과 Na_2S -침착활성탄은 일반 활성탄보다 늦게 흡착평형에 도달하였다.

Table 9. Relationship between removal efficiency of Cu^{2+} and reaction time and species of impregnated active carbons

(Unit : %)

Reaction time(min) \ Items	1	2	4	8	15	30	60	120
G-KSCN	68.8	79.4	80.2	81.1	82.0	83.7	83.7	83.7
G- Na_2S	64.9	68.3	75.3	75.9	76.8	77.8	77.8	77.8
G- $Na_2C_2O_4$	56.9	63.5	64.3	65.2	65.2	65.2	65.2	65.2
GAC	30.6	47.3	48.9	49.3	50.0	50.0	50.0	50.0
Pe-KSCN	65.3	78.9	81.6	81.9	82.0	82.0	82.0	82.0
Pe- Na_2S	62.8	67.8	70.4	71.7	72.3	72.3	72.6	72.7
Pe- $Na_2C_2O_4$	58.3	65.8	67.6	67.7	67.7	67.9	67.9	67.9
PeAC	43.7	45.3	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0

* Cu^{2+} Solution : 20mg/ℓ

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/ℓ

Reaction Temp. : 20°C

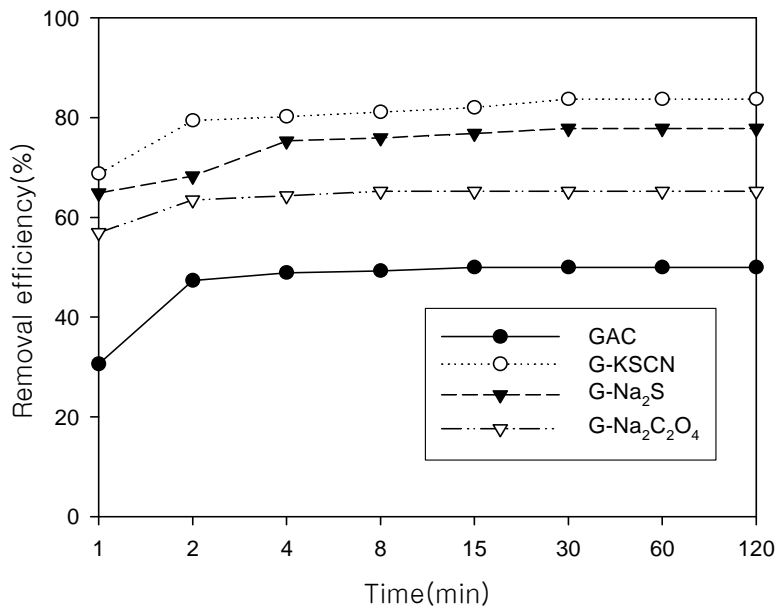


Fig. 15. Removal efficiency of Cu^{2+} as reaction time and species of impregnated granular active carbons.

Cu^{2+} Solution : 20mg/ℓ

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/ℓ

Reaction Temp. : 20°C

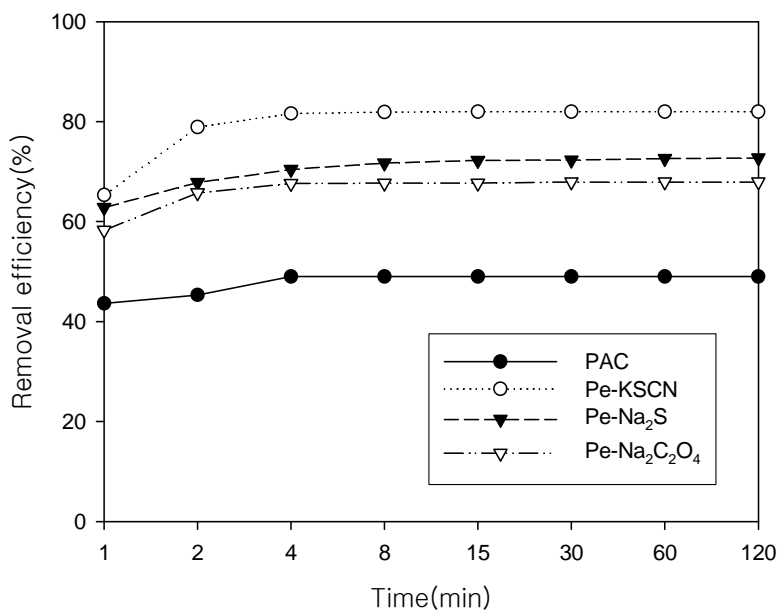


Fig. 16. Removal efficiency of Cu^{2+} as reaction time and species of impregnated pelletized active carbon.

Cu^{2+} Solution : 20mg/l

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/l

Reaction Temp. : 20°C

4.3.2 카드뮴

Table 10과 Fig. 17, 18에 수온 20℃, pH 4, Cd²⁺ 농도가 25mg/ℓ 인 용액 100mℓ에 침착활성탄 2mg/ℓ 을 주입하고 흡착시간에 따른 Cd²⁺ 제거율을 나타내었다.

침착활성탄들은 반응시간 4~15분에 흡착평형에 도달하였다.

흡착평형에 도달한 시간은 입상침착활성탄의 경우 G-Na₂S가 4분, G-KSCN과 G-Na₂C₂O₄는 15분이고, 조립상침착활성탄은 Pe-Na₂S와 Pe-Na₂C₂O₄가 4분, Pe-KSCN이 8분이었다.

침착제별로 흡착평형에 도달한 시간은 뚜렷한 경향이 나타나지는 않았지만, Na₂S와 Na₂C₂O₄-침착활성탄보다 KSCN-침착활성탄이 늦고, 활성탄형태로는 조립상침착활성탄이 입상침착활성탄보다 빠른 것을 알 수 있다.

일반 활성탄이 흡착평형에 도달한 시간은 GAC 4분, PeAC는 2분이고, KSCN과 Na₂C₂O₄-침착활성탄은 일반 활성탄보다 늦게 흡착평형에 도달하였다.

위 사항을 종합하면, 침착활성탄이 흡착평형에 도달하는 데는 4~15분이 소요되고, 침착제별로는 Na₂S와 Na₂C₂O₄-침착활성탄보다 KSCN-침착활성탄이 늦고, 활성탄형태별로는 조립상탄이 입상탄보다 빠르며, KSCN과 Na₂C₂O₄-침착활성탄은 일반 활성탄보다 늦게 흡착평형에 도달하였다.

Table 10. Relationship between removal efficiency of Cd²⁺ and reaction time and species of impregnated active carbons

(Unit : %)

Reaction time(min) Items	1	2	4	8	15	30	60	120
G-KSCN	56.0	65.3	66.6	66.2	68.5	68.5	68.6	68.7
G-Na ₂ S	62.8	65.3	69.4	69.6	69.6	69.6	69.6	69.6
G-Na ₂ C ₂ O ₄	58.4	63.0	63.8	64.9	65.8	66.2	66.8	67.4
GAC	40.3	43.1	44.0	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2
Pe-KSCN	53.7	56.1	64.3	64.6	64.6	65.1	65.2	65.1
Pe-Na ₂ S	56.3	66.8	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.4
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	55.4	58.6	59.3	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4
PeAC	40.6	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5

* Cd²⁺ Solution : 25mg/ℓ

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/ℓ

Reaction Temp. : 20°C

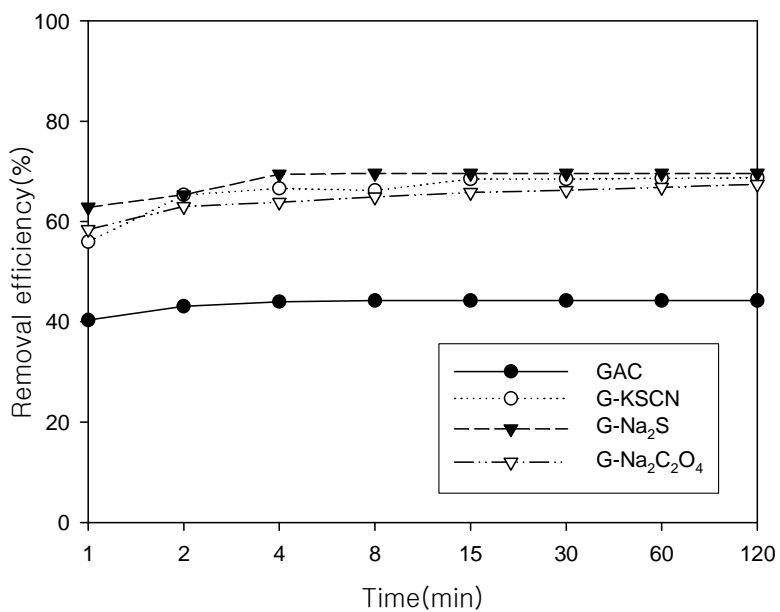


Fig. 17. Removal efficiency of Cd^{2+} as reaction time and species of impregnated granular active carbon.

Cd^{2+} Solution : 25mg/ℓ

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/ℓ

Reaction Temp. : 20°C

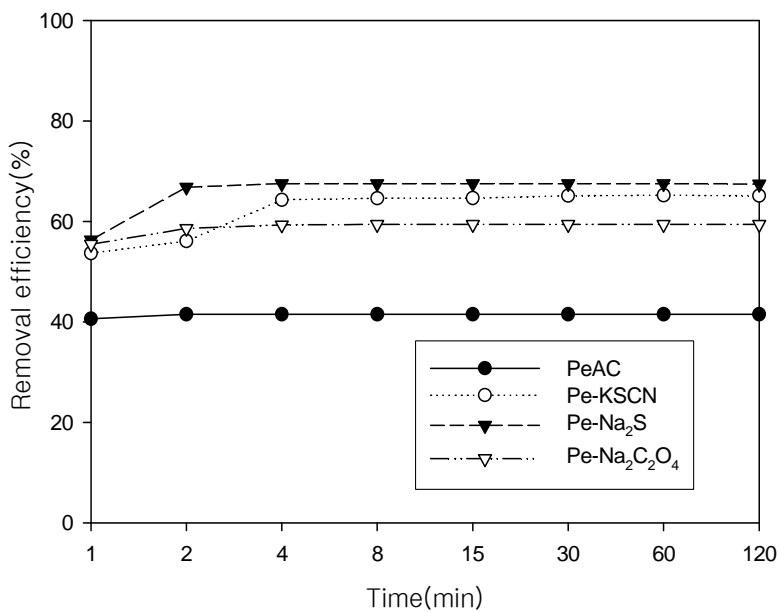


Fig. 18. Removal efficiency of Cd²⁺ as reaction time and species of impregnated pelletized active carbon.

Cd²⁺ Solution : 25mg/ℓ

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/ℓ

Reaction Temp. : 20°C

4.3.3 크롬

Table 11과 Fig. 19, 20에 수온 20℃, pH 4, Cr^{3+} 농도가 20mg/ℓ 인 용액 100mℓ에 침착활성탄 2mg/ℓ 을 주입하고 흡착시간에 따른 Cr^{3+} 제거율을 나타내었다.

침착활성탄들은 반응시간 4~8분에 흡착평형에 도달하였다.

흡착평형에 도달한 시간은 입상침착활성탄의 경우 G-KSCN과 G- Na_2S 가 4분, G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 는 8분이고, 조립침착활성탄은 Pe-KSCN과 Pe- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 4분, Pe- Na_2S 가 8분이었다.

침착제별로 흡착평형에 도달한 시간은 뚜렷한 경향이 나타나지는 않았지만, Na_2S 와 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -침착활성탄이 KSCN-침착활성탄보다 늦고, 활성탄형태로는 조립침착활성탄과 입상침착활성탄이 비슷한 경향을 보였다.

일반 활성탄이 흡착평형에 도달한 시간은 GAC 4분, PeAC 4분이고, 침착활성탄과 일반 활성탄이 흡착평형에 도달한 시간이 비슷하게 나타났다.

위 사항을 종합하면, 침착활성탄이 흡착평형에 도달하는 데는 4~8분이 소요되고, 침착제별로는 Na_2S 와 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -침착활성탄이 KSCN-침착활성탄보다 늦고, 활성탄형태별로는 조립탄과 입상탄이 비슷하게 나타났으며, 침착활성탄과 일반 활성탄의 흡착평형에 도달 시간도 비슷하게 나타났다.

Table 11. Relationship between removal efficiency of Cr³⁺ and reaction time and species of impregnated active carbons

(Unit : %)

Items	Reaction time(min)							
	1	2	4	8	15	30	60	120
G-KSCN	75.3	78.6	80.1	80.1	80.1	80.1	80.1	80.0
G-Na ₂ S	77.8	86.3	88.5	88.5	88.9	88.9	88.9	88.9
G-Na ₂ C ₂ O ₄	79.4	80.8	81.7	82.2	82.5	82.5	82.5	82.5
GAC	48.6	53.4	55.3	55.6	55.4	55.4	55.4	55.5
Pe-KSCN	80.2	87.3	88.6	88.6	88.6	88.6	88.6	88.6
Pe-Na ₂ S	81.8	90.8	92.2	93.7	94.0	94.0	94.0	93.9
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	85.7	88.5	89.0	89.2	89.6	89.6	89.5	89.2
PeAC	52.3	58.6	60.4	60.3	60.3	60.3	60.3	60.7

* Cr³⁺ Solution : 20mg/ℓ

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/ℓ

Reaction Temp. : 20°C

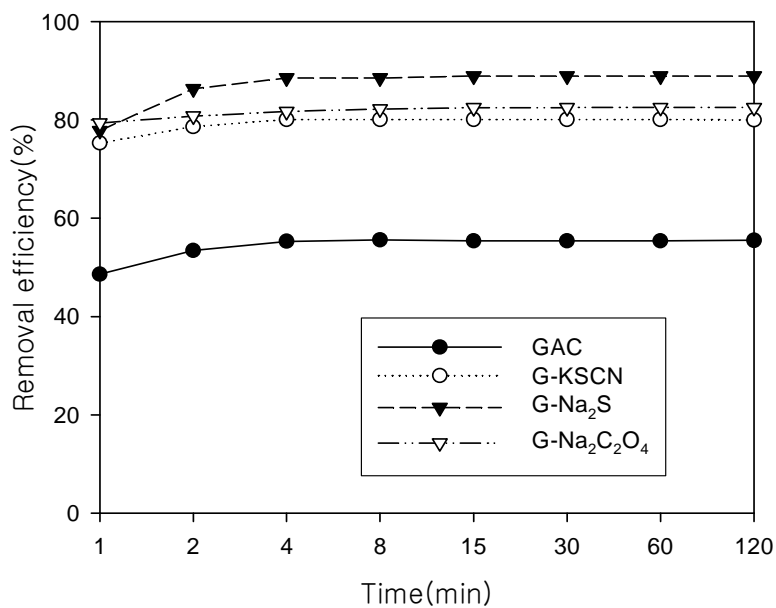


Fig. 19. Removal efficiency of Cr^{3+} as reaction time and species of impregnated granular active carbon.

Cr^{3+} Solution : 20mg/ℓ

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/ℓ

Reaction Temp. : 20°C

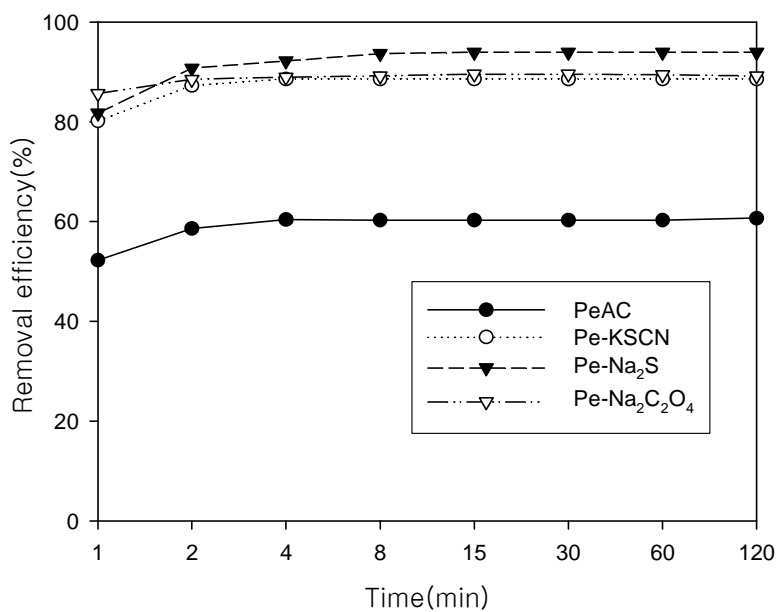


Fig. 20. Removal efficiency of Cr^{3+} as reaction time and species of impregnated pelletized active carbon.

Cr^{3+} Solution : 20mg/ℓ

pH : 4

Dosage of active carbon : 2mg/ℓ

Reaction Temp. : 20°C

4.4 등온흡착식에 의한 흡착능 평가

4.4.1 침착활성탄의 등온흡착식

Fig. 21~26에 Freundlich 등온흡착식에 Table 6~8의 흡착용량을 대입하여 산출한 침착활성탄의 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 등온흡착식들을 나타내었다.

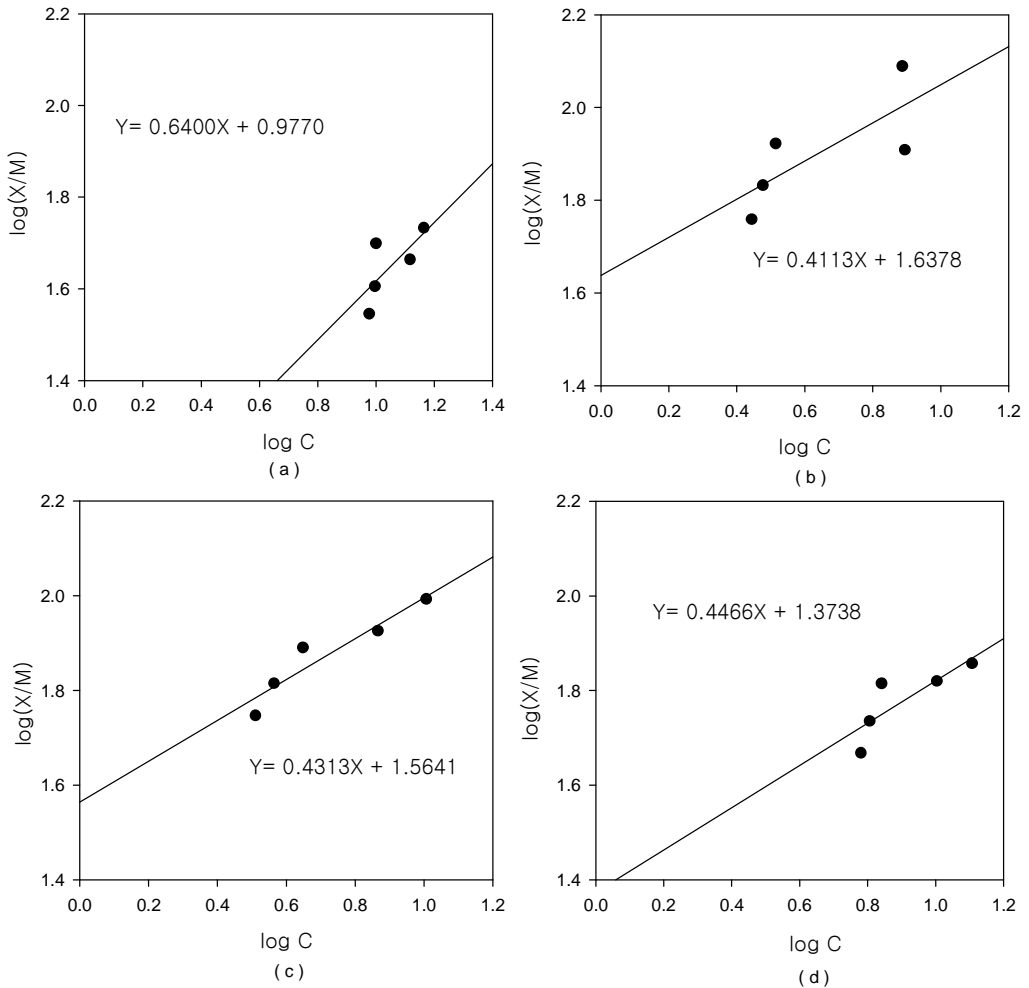


Fig. 21. Equilibrium of Cu^{2+} of impregnated granular active carbons.
 (a) : GAC , (b) : $G-KSCN$, (c) : $G-Na_2S$, (d) : $G-Na_2C_2O_4$

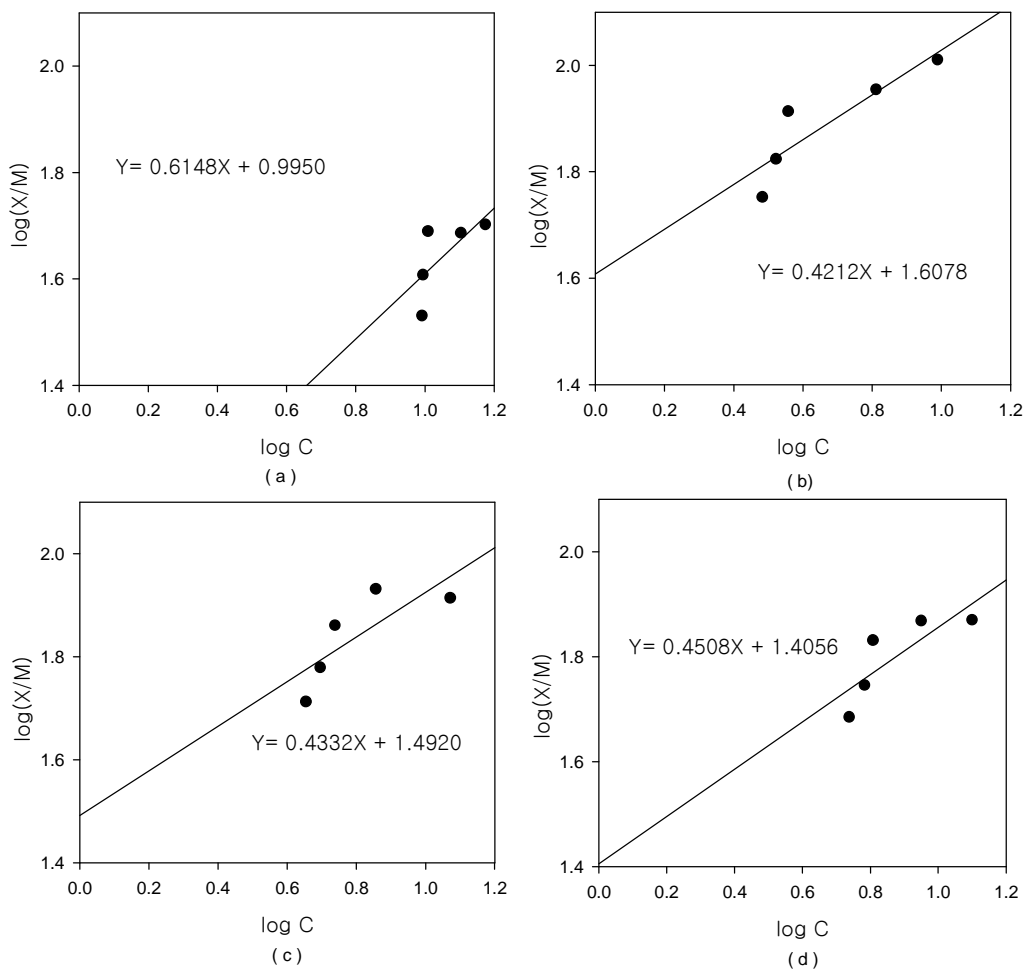


Fig. 22. Equilibrium of Cu^{2+} of impregnated pelletized active carbons.
 (a) : *PeAC*, (b) : *Pe-KSCN*, (c) : *Pe-Na₂S*, (d) : *Pe-Na₂C₂O₄*

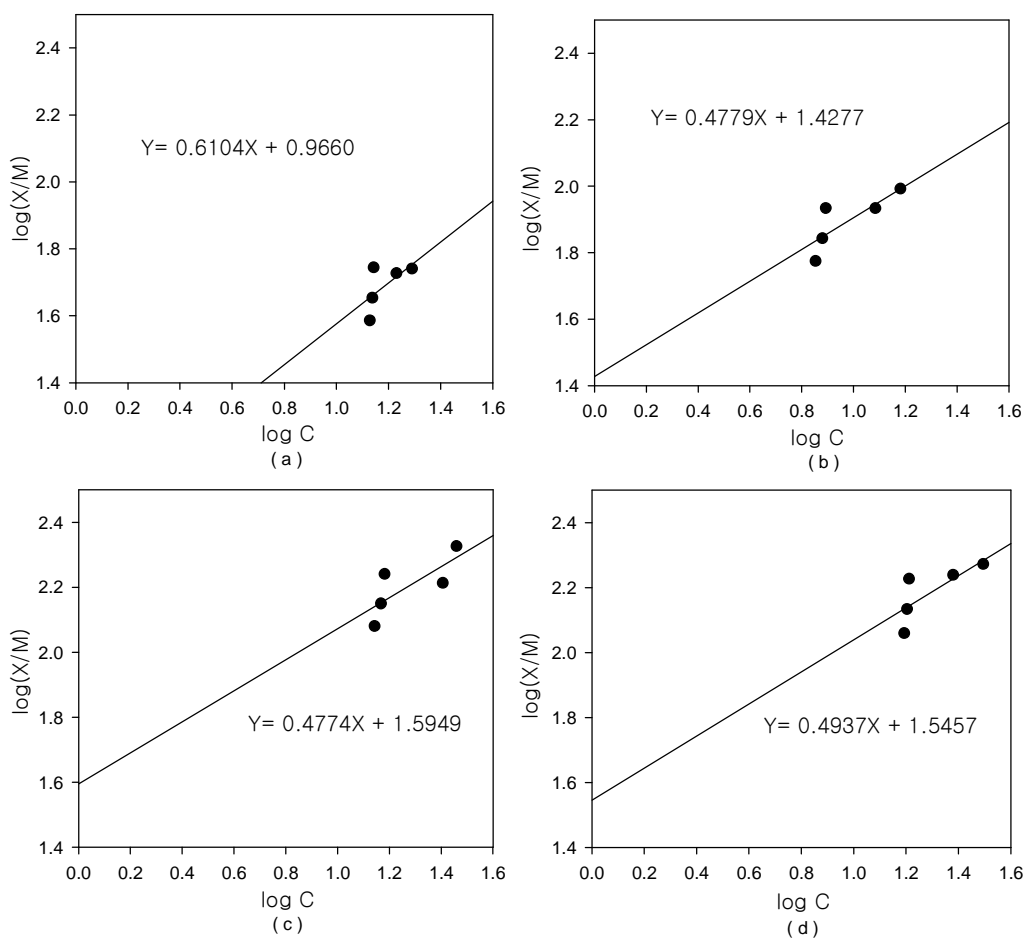


Fig. 23. Equilibrium of Cd^{2+} of impregnated granular active carbons.

(a) : GAC, (b) : G-KSCN, (c) : G- Na_2S , (d) : G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$

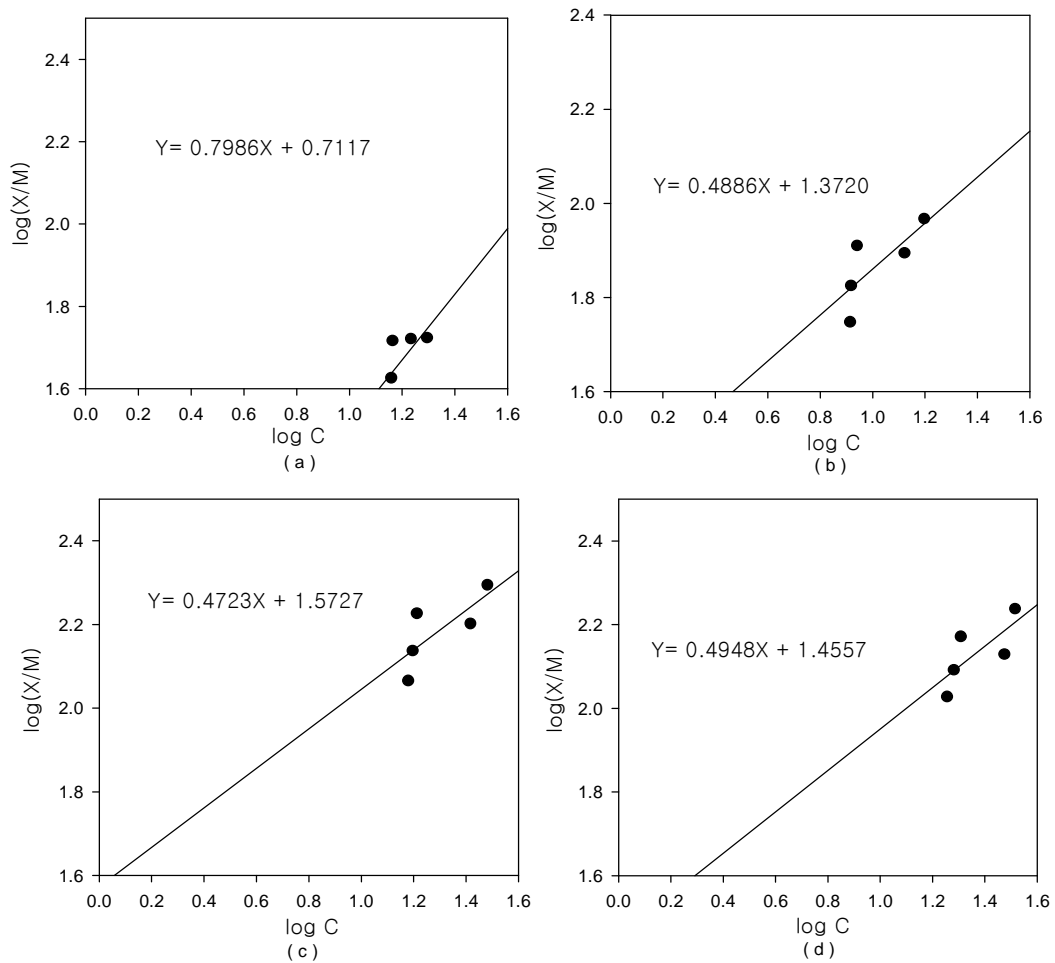
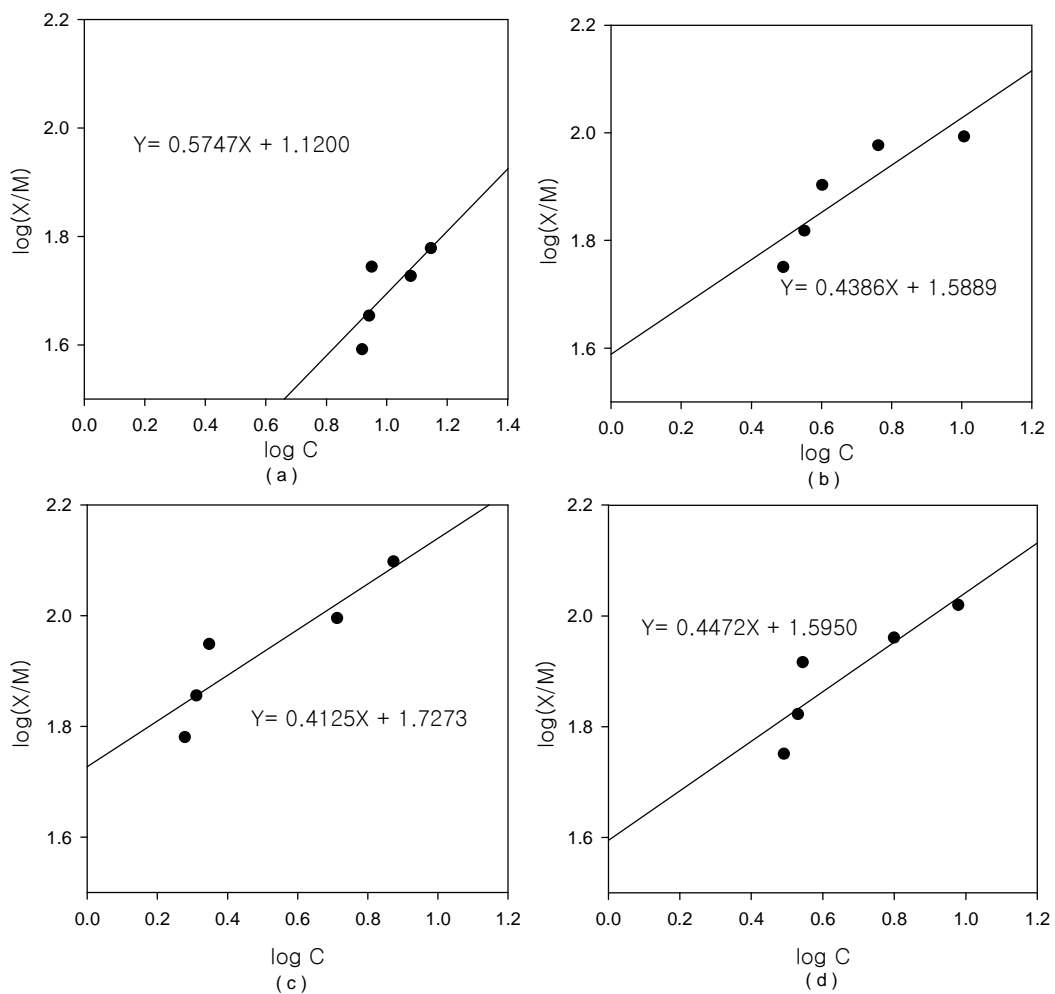
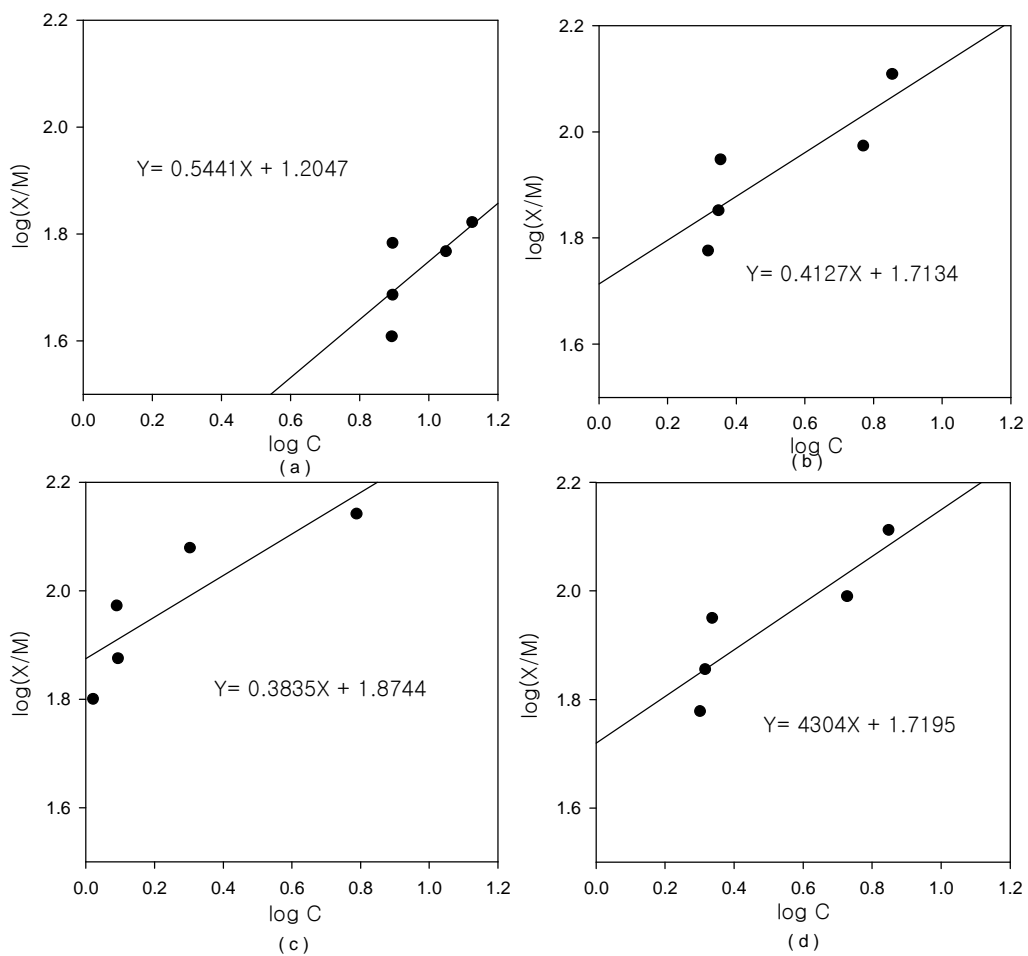


Fig. 24. Equilibrium of Cd^{2+} of impregnated pelletized active carbons.
 (a) : PeAC, (b) : Pe-KSCN, (c) : Pe- Na_2S , (d) : Pe- $Na_2C_2O_4$



*Fig. 25. Equilibrium of Cr^{3+} of impregnated granular active carbons.
 (a) : GAC, (b) : G-KSCN, (c) : G-Na₂S, (d) : G-Na₂C₂O₄*



*Fig. 26. Equilibrium of Cr^{3+} of impregnated pelletized active carbons.
 (a) : PeAC, (b) : Pe-KSCN, (c) : Pe-Na₂S, (d) : Pe-Na₂C₂O₄*

4.4.2 침착활성탄의 $1/n$ 값

Freundlich 등온흡착식의 상수 $1/n$ 값은 평형농도에 대한 흡착량의 의존성을 나타내는데 사용되며,^{12,25)} 일반적으로 액상흡착조작에서는 $1/n$ 값이 0.1~0.7이면 흡착되기 쉽고 흡착이 오래 지속되며, $1/n$ 값이 2이상이면 비효과적이다.^{26,27)}

Table 12에 Fig. 21~26의 등온흡착식들에서 산출한 침착활성탄의 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 $1/n$ 값을 나타내었다.

침착에 의하여 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 활성탄의 $1/n$ 값이 0.54~0.84에서 0.38~0.49로 작아져 액상 흡착능이 개선되었으며, 액상 흡착조작에서 양호한 흡착범위인 0.1~0.7범위에 속하므로 본 연구에서 제조한 침착활성탄의 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 흡착능이 우수한 것으로 판단된다.

침착활성탄별 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 $1/n$ 값은 입상탄의 경우 G-KSCN과 G- Na_2S 는 0.41~0.48, G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 는 0.45~0.49로서 GAC 0.57~0.64보다 작고, 조립탄은 Pe-KSCN가 0.41~0.49, Pe- Na_2S 가 0.38~0.47, Pe- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 0.45~0.49로서 PeAC 0.54~0.80보다 작은 것을 알 수 있다.

중금속별 $1/n$ 값은 Cu^{2+} 는 입상탄이 0.41~0.45, 조립탄이 0.42~0.45이고, Cd^{2+} 는 입상탄이 0.48~0.49, 조립탄이 0.47~0.49이며, Cr^{3+} 이 입상탄이 0.41~0.45, 조립탄이 0.38~0.43이므로, Cu^{2+} 와 Cd^{2+} 는 비슷하나 Cr^{3+} 은 입상탄이 조립탄보다 약간 크다.

한편 일반 활성탄 PeAC의 Cr^{3+} 에 대한 $1/n$ 값 0.80은 Table 10에서 PeAC의 Cr^{3+} 제거율이 40.6~41.5로서 매우 낮은 것과 관련된 것이다.

위 사항을 종합하면, 침착에 의하여 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 활성탄의 $1/n$ 값이 0.54~0.84에서 0.38~0.49로 작아져 액상 흡착능이 개선되었으며, 형상별로는 Cu^{2+} 와 Cd^{2+} 는 비슷하나 Cr^{3+} 은 입상침착활성탄이 조립침착활성탄보다 약간 크다.

본 실험에서 얻은 결과는 이 등²⁸⁾이 활성탄에 의한 중금속 제거율이 $\text{Cr}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$ 의 순으로 높다고 보고한 결과와 부합된다.

Table 12. 1/n-value of heavy metals according to reaction time and species of impregnated active carbons

(Rate of decrease in parenthesis for general active carbon)

Items \ Heavy metals	Cu ²⁺	Cd ²⁺	Cr ³⁺
G-KSCN	0.41 (35.94)	0.48 (21.31)	0.44 (22.81)
G-Na ₂ S	0.43 (32.81)	0.48 (21.31)	0.41 (28.07)
G-Na ₂ C ₂ O ₄	0.45 (29.69)	0.49 (19.67)	0.45 (21.05)
GAC	0.64	0.61	0.57
Pe-KSCN	0.42 (31.15)	0.49 (38.75)	0.41 (24.07)
Pe-Na ₂ S	0.43 (29.51)	0.47 (41.25)	0.38 (29.63)
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	0.45 (26.23)	0.49 (38.75)	0.43 (20.37)
PeAC	0.61	0.80	0.54

4.4.3 침착활성탄의 K값

Freundlich 등온흡착식의 상수 K값은 흡착제의 흡착능을 평가하는데 사용된다.^{12,25)} 일반적으로 K값이 클수록 평형흡착량이 증가하여 흡착에 좋은 조건이 된다.

Table 13에 Fig. 21~26의 등온흡착식에 나타난 침착활성탄의 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 상수 K값들을 나타내었다.

본 연구에서 제조한 여섯 가지 침착활성탄의 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 K값이 일반 활성탄보다 훨씬 크므로 침착에 의하여 활성탄의 흡착능이 크게 개선된 것으로 판단된다.

침착활성탄별 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 K값은 입상탄의 경우 G-KSCN가 26.77~43.43, G- Na_2S 가 36.65~53.37, G- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 23.65~39.36로서 GAC 9.25~13.18보다 매우 크고, 조립탄은 Pe-KSCN가 23.55~51.69, Pe- Na_2S 가 31.04~74.89, Pe- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 가 25.44~52.42로서 PeAC 5.15~16.02보다 매우 크다.

중금속별 K값은 Cu^{2+} 는 입상탄은 23.65~43.43로서 GAC 9.48보다 매우 크고, 조립탄은 25.44~40.53로서 PeAC 9.89보다 매우 크다. Cd^{2+} 는 입상탄이 26.77~39.35로서 GAC 9.25보다 매우 크고, 조립탄이 23.55~37.39로서 PeAC 5.15보다 매우 크다. Cr^{3+} 은 입상탄이 38.31~53.37로서 GAC 13.18보다 매우 크고, 조립탄이 51.69~74.89로서 PeAC 16.02보다 매우 크다. 중금속마다 침착활성탄의 K값이 일반 활성탄보다 훨씬 크고, 형상별로는 Cu^{2+} 와 Cd^{2+} 의 경우 입상탄이 조립탄보다 약간 크나 Cr^{3+} 은 입상탄이 조립탄보다 13.1~21.5 작은 것으로 나타났다.

위 사항을 종합하면, 활성탄의 침착에 의하여 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 K값이 149~726% 증가하여 활성탄의 흡착능이 크게 개선되었으며, 형상별로는 입상침착 활성탄의 Cu^{2+} 와 Cd^{2+} 에 대한 K값은 조립침착활성탄보다 약간 크나 Cr^{3+} 은 입상침착활성탄이 13.1~21.5 작은 것으로 나타났다.

Table 13. K-value of heavy metals according to reaction time and species of impregnated active carbons

(Rate of increase in parenthesis for general active carbon)

Heavy metals Items	Cu ²⁺	Cd ²⁺	Cr ³⁺
G-KSCN	43.43 (358.12)	26.77 (189.41)	38.81 (194.46)
G-Na ₂ S	36.65 (286.60)	39.35 (325.41)	53.37 (304.93)
G-Na ₂ C ₂ O ₄	23.65 (149.47)	35.13 (279.78)	39.36 (198.63)
GAC	9.48	9.25	13.18
Pe-KSCN	40.53 (309.81)	23.55 (357.28)	51.69 (222.66)
Pe-Na ₂ S	31.04 (213.85)	37.39 (626.02)	74.89 (367.48)
Pe-Na ₂ C ₂ O ₄	25.44 (157.23)	28.56 (454.56)	52.42 (227.22)
PeAC	9.89	5.15	16.02

V. 결론

입상 및 조립활성탄에 KSCN, Na₂S 및 Na₂C₂O₄를 침착시켜 침착활성탄을 제조하였으며, 침착활성탄의 Cu²⁺, Cd²⁺ 및 Cr³⁺ 흡착특성을 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 침착활성탄의 pH에 따른 흡착특성은 세 가지 중금속 모두 pH 2에서 가장 저조하고 pH 6에서 가장 양호하며, pH 4~8에서 침착제별 제거율은 Cu²⁺은 KSCN>Na₂S>Na₂C₂O₄의 순으로 높고, Cd²⁺과 Cr³⁺은 Na₂S>KSCN>Na₂C₂O₄의 순으로 높게 나타났다.

2. KSCN침착활성탄은 Cu²⁺흡착능이 매우 우수하며, 흡착용량은 Cu²⁺는 G-KSCN가 1.23mgCu²⁺/gC, Pe-KSCN가 1.03mgCu²⁺/gC, Cd²⁺은 G-KSCN가 0.98mgCd²⁺/gC, Pe-KSCN가 0.93mgCd²⁺/gC, Cr³⁺은 G-KSCN가 0.98mgCr³⁺/gC, Pe-KSCN가 1.29mgCr³⁺/gC이며, 침착에 의하여 흡착용량이 Cu²⁺이 106~128%, Cd²⁺이 75~78%, Cr³⁺이 63~95% 증가하였다.

3. Na₂S침착활성탄은 Cr³⁺흡착능이 매우 우수하며, 흡착용량은 Cu²⁺는 G-Na₂S가 0.98mgCu²⁺/gC, Pe-Na₂S가 0.85mgCu²⁺/gC, Cd²⁺은 G-Na₂S가 1.06mgCd²⁺/gC, Pe-Na₂S가 0.99mgCd²⁺/gC, Cr³⁺은 G-Na₂S가 1.25mgCr³⁺/gC, Pe-Na₂S가 1.39mgCr³⁺/gC이며, 침착에 의하여 흡착용량이 Cu²⁺이 70~81%, Cd²⁺이 87~92%, Cr³⁺이 108~111% 증가하였다.

4. Na₂C₂O₄침착활성탄은 Cr³⁺흡착능이 매우 우수하며, 흡착용량은 Cu²⁺는 G-Na₂C₂O₄가 0.72mgCu²⁺/gC, Pe-Na₂C₂O₄가 0.74mgCu²⁺/gC, Cd²⁺은 G-Na₂C₂O₄가 0.94mgCd²⁺/gC, Pe-Na₂C₂O₄가 0.87mgCd²⁺/gC, Cr³⁺은 G-Na₂C₂O₄가 1.05mgCr³⁺/gC, Pe-Na₂C₂O₄가 1.30mgCr³⁺/gC이며, 침착에 의하여 흡착용량이 Cu²⁺이 33~48%, Cd²⁺이 64~71% , Cr³⁺이 75~97% 증가하였다.

5. 활성탄 형상별 침착제별 흡착용량은 Cu^{2+} 은 입상탄이 조립탄보다 크고 $\text{KSCN} > \text{Na}_2\text{S} > \text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 순으로 높고, Cd^{2+} 은 입상탄이 조립탄보다 크고, $\text{Na}_2\text{S} > \text{KSCN} > \text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 순으로 크며, Cr^{3+} 은 활성탄 형상별로는 입상탄이 조립탄보다 작고 $\text{Na}_2\text{S} > \text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 > \text{KSCN}$ 순으로 크다.

6. 침착활성탄이 흡착평형에 도달하는 시간은 Cu^{2+} 은 4~30분, Cd^{2+} 은 4~15분, Cr^{3+} 은 4~8분이 소요되고, 침착제별로는 Cu^{2+} 은 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 > \text{KSCN} > \text{Na}_2\text{S}$ 순으로 빠르고, Cd^{2+} 은 Na_2S 와 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -침착활성탄보다 KSCN -침착활성탄이 늦고, Cr^{3+} 은 Na_2S 와 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -침착활성탄이 KSCN -침착활성탄보다 늦다.

7. 침착에 의하여 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 활성탄의 $1/n$ 값이 0.54~0.84에서 0.38~0.49로 작아져 액상 흡착능이 개선되었으며, 형상별로는 Cu^{2+} 와 Cd^{2+} 는 비슷하나 Cr^{3+} 은 입상침착활성탄이 조립침착활성탄보다 약간 크다.

8. 침착에 의하여 Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Cr^{3+} 에 대한 활성탄의 K값이 149~626% 증가하여 활성탄의 흡착능이 크게 개선되었으며, 형상별로는 입상침착활성탄의 Cu^{2+} 와 Cd^{2+} 에 대한 K값은 조립침착활성탄보다 약간 크나 Cr^{3+} 은 입상침착활성탄이 13.1~21.5 작은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 최정윤, “수중 환경에서 황과 구리 이온 간의 침전 및 흡착 반응성에 관한 연구”, 이화여자대학교 과학기술대학원 석사학위논문, pp. 1~4, 34~36, 64, 2002.
- 2) Kim, Y. H., Lee, B. H., Cho. Y. S., and Yi, J. H., “Effects of the pore properties of meso-porous silica on the metal adsorption capacities”, *Journal of the Korean institute of Chemical Engineers*, 39(2), pp. 228~236, 2001.
- 3) 유목련, 양재규, 이승목, 김근한, “3가철 침착활성탄의 안정성 및 구리 흡착 특성 평가” 한국물환경학회, 22(2), pp. 328~332, 2006.
- 4) Stanislav, K. and Ladislav, S., “Handbook of chemical equilibria in analytical chemistry”, *John Wiley & Sons*, 1985.
- 5) MacNaughton, M.G. and James, R.O., *J. Colloid Interface Sci.*, Vol 47, pp. 431, 1974.
- 6) 조기철, “ Na_2CO_3 침착활성탄을 이용한 H_2S 제거에 관한 연구” 부산대학교 대학원 석사학위논문, pp. 1~19, 1999.
- 7) 심재운, “핏치계 활성탄섬유를 이용한 다성분(크롬, 구리, 니켈)의 흡착 성분” 충남대학교 대학원 박사학위논문, pp. 1~3, 64~69, 129~130, 2001.
- 8) 유해물질(카드뮴)노출 근로자들의 건강영향에 관한 연구(II), 한국산업안전공단, pp. 1~6, 2000.
- 9) 화학물질에 의한 건강장해예방 연구결과, 노동부, pp. 1~4, 253~256, 261~264, 2005.
- 10) R. L. Burwell Jr., *Adv. Catal.*, 26, 1977.
- 11) Organer. Y., and Temur. C., “Adsorption dynamics of $\text{Fe}(\text{II})$ from aqueous solution onto activated carbon”, *Journal of Colloid Interface Science*, 205, pp. 241-244, 1998.
- 12) 이성우, 이현동, 한명호, 박동희, 김충환 “고도상수처리”, 동화기술, p 231, 2004.
- 13) 손동진, “RPF를 이용한 활성탄 제조 및 특성 연구” 부산대학교 대학원 석사학

- 위 논문, pp, 27~70, 2004.
- 14) (주)카엘, “폐침착활성탄 재활용 장치 개발” 과학기술부, pp. 14, 1999.
 - 15) 오승배, “인산(H_3PO_4) 침착활성탄에 의한 암모니아가스 흡착효과”, 충남대학교 대학원 석사학위논문, pp. 1~3, 1996.
 - 16) 한국화학연구소, “침착활성탄소의 제조와 활용에 관한 연구(II)”, 과학기술처, 1988.
 - 17) 한국화학연구소, “기술도입불가능 핵심공정 기술개발; 기능성 탄소계 흡착제 개발(I)” 과학기술처, 1996.
 - 18) A. Ahmadpour and D. D. Do, “The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation”, Carbon, 33(4), 1996.
 - 19) (주)카엘, “소각로 배출 유해가스(다이옥신, SO_x , NO_x , 악취가스) 제거용 침착활성탄 개발” 과학기술부, pp. 45, 2000.
 - 20) 김성현, 유기풍, 민병무, 손현식, “염화제1구리를 함침시킨 활성탄 흡착제의 CO 및 CO_2 흡착평형”, 한국화학공학회지, 31(6), pp. 693~700, 1993.
 - 21)약품정성분석화학, 약품정성분석화학분회, 보진제, pp 198~209, 1980.
 - 22) 이황재, “활성탄소섬유(ACF)에 대한 작용제의 흡착에 관한 연구”, 동국대학교 석사학위논문, pp. 1~17, 2006.
 - 23) 옥삼복, 정용준, 정승원, 강운석, “입상활성탄에 의한 Cu, Zn, Cd의 흡착 특성” 한국환경과학회지 11권(4호) pp. 333~228, 2002.
 - 24) 전귀열, “입상활성탄에 의한 Cr(VI), As(V), Cu(II)의 흡착 및 탈착특성에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문, pp. 9~28, 1991.
 - 25) 장의덕, 김호성, 원미숙, 윤장희, 박경원, 백우현, “국내산 황토를 이용한 수용액 중의 Pd(II), Cu(II), Cr(II) 및 Zn(II)이온의 흡착 특성” 한국환경과학회지 8(4), pp. 497~502, 1999.
 - 26) 박함용, 신정훈, 김정우, 이창하, 김우식, “입상활성탄과 활성탄소섬유에 의한 수용액상에서의 Cr(II), Pb(II), Ni(II)의 흡착특성” 한국공업화학회지 8(4), pp. 198~204, 1999.

- 27) 전영신, “망간단괴와 그 침출잔사의 폐수 중 카드뮴 이온 흡착 거동” 이화여자 대학교 대학원 석사학위논문, pp. 10~13, 1998.
- 28) 이종집, 유용호, 조병린, “입상활성탄에 의한 중금속 킬레이트의 흡착 제거” 대한환경공학회지, 10(1), pp. 1,001~1,015, 1988.

감사의 글

어느덧 2년이라는 시간이 지났습니다. 대학원에 입학할 때는 2년이라는 기간동안 학부생 때 이루지 못했던 것도 이루고 더욱 열심히 공부하여 학문적으로나 인간적으로 좀더 성숙한 사람이 되야 겠다고 마음 먹었지만 지나고 나니 후회되는 일도 많고, 이루지 못한 것도 너무 많아 이렇게 졸업을 한다는 것이 부끄럽기만 합니다.

많이 부족한 저를 아낌없이 격려해 주시고 본 논문이 완성되기까지 많은 조언과 지도를 해 주신 신대운 교수님께 머리 숙여 감사 드립니다. 또한 기꺼이 논문 심사를 맡아 조언해 주신 최형일 교수님과 정경훈 교수님께 감사 드리고, 학부·학위 과정 동안 많은 가르침을 주신 정오진 교수님, 이성기 교수님, 김시욱 교수님, 이인화 교수님, 전영남 교수님께 감사 드립니다.

같이 실험실 생활하면서 많은 조언을 해주시고 저 때문에 많이 고생하신 문옥란 선배님께 감사 드리고 또한 고오석 선배님께 감사 드립니다. 그리고 재홍이 오빠, 세름이, 영란이에게도 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 또한 학위 과정 중 많은 도움을 주고 격려해준 선배님들께 감사 드립니다.

이제까지 부족한 저를 뒷바라지하느라 고생하신 부모님과 저를 믿고 지켜 봐준 오빠, 언니에게 감사 드립니다.

저작물 이용 허락서

학 과	환경공학과	학 번	20057122	과 정	석사, 박사
성 명	한글: 윤미란 한문 : 尹美蘭 영문 : YUN Mi-Ran				
주 소	광주광역시 동구 지산동 457-1 베스트빌 303호				
연락처	E-MAIL : mr-nation@hanmail.net				
논문제목	한글 : 침착활성탄에 의한 중금속 흡착에 관한연구				
	영문 : A Study on the Adsorption of Heavy Metals by Impregated Active Carbon				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ul style="list-style-type: none">1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(●) 반대()</p> <p style="text-align: center;">2006년 12월 일</p> <p style="text-align: center;">저작자: 윤 미 란 (서명 또는 인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">조선대학교 총장 귀하</p>					