

# 흡착제를 이용한 침강 HNS 처리 및 현장적용 가능성 연구

## - 현장 처리를 위한 활성탄소 활용 조건 검토 및 제안 -

최기영\* · 김창준\*\*† · 김혜은\*\*\* · 정준모\*\*\*\* · 황호진\*\*\*\*\* · 이문진\*\*\*\*\*

\*, \*\* 한국해양과학기술원 선임연구원, \*\*\* 한국해양과학기술원 기술원, \*\*\*\* 부경대학교 해양학과 박사과정,  
\*\*\*\*\* 선박해양플랜트연구소 책임연구원

## Feasibility of Activated-Carbon Adsorbent to Sequester Sunken Hazardous and Noxious Substances (HNS)

Ki-young Choi\* · Chang-joon Kim\*\*† · Hye-eun Kim\*\*\* · Jun-mo Jung\*\*\*\* · Ho-jin Hwang\*\*\*\*\* · Moonjin Lee\*\*\*\*\*

\*, \*\* Senior Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

\*\*\* Full-time Research Specialist, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

\*\*\*\* Ph.D Student, Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

\*\*\*\*\* Principal Research Scientist, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 활성탄소를 이용하여 해양환경으로 유출된 침강 HNS를 현장에서 대응하기 위한 기술 개발을 목적으로, 활용 가능한 활성탄소의 조건을 검토하고 예상 소요량을 산출하였다. 입자 크기별 7종의 활성탄소들을 대상으로 침강 속도를 측정하였고, 침강 HNS로 분류된 클로로포름(CHCl<sub>3</sub>)에 대한 흡착용량을 실험실 규모 실험(lab-scale test)으로 측정하였다. 또한 7종 활성탄소들에 대하여 유해 물질함량과 용출 실험을 실시하여 용출된 유해물질 함량을 정량 분석하였다. 평균 침강속도(Mean particle-settling velocity)는 0.5-8 cm/sec의 범위로 8-20 mesh 경우를 제외하고 입자의 크기가 클수록 침강속도가 빨랐으며, 클로로포름에 대한 흡착효율은 대체로 입자가 작을수록 표면적이 넓어져 증가되었다. 또한 현장 투입 후 2차 오염가능성 확인을 위한 유해물질함량과 용출 실험 실험에서 >100 mesh의 활성탄소는 전함량분석결과가 아연(Zn)과 비소(As)가 수처리제기준보다 높고, 용출실험결과에서도 크롬(Cr), 아연(Zn), 비소(As)가 다른 활성탄소에 비해 높은 농도로 용출되었다. 흡착효율, 침강속도, 유해성분 용출량 등을 종합적으로 고려하여 현장 처리 적용 가능한 활성탄소는 20-60, 20-40, 2mm&down mesh 이었으며, 흡착용량을 최우선으로 판단하여 투입물량을 계산하면 최소 현장 투입 물량은 각각 0.82, 0.90, 1.28 ton/kl 이다.

**핵심용어** : 침강HNS, 흡착제, 활성탄소, 현장처리, 실험실 규모 실험

**Abstract** : We experimented with the particle-settling velocity and CHCl<sub>3</sub> absorption efficiency of seven activated-carbon and analyzed seven heavy metal contents by elution for application to the field treatment of sunken HNS on the marine seabed. The mean particle-settling velocity was in the range 0.5-8 cm/s, except when the 8-20 mesh was used. The larger the HNS particle, the faster the particle-settling velocity was, and the CHCl<sub>3</sub> absorption efficiency increased considerably owing to the larger surface area. In addition, the elution test results showed that the total Zn and As contents in >100-meshed activated carbon was higher than the contents criteria for the standard for water-treatment agents, and Cr, Zn, and As were released at higher concentrations than those released by other activated-carbon groups. Taken together, the CHCl<sub>3</sub> absorption efficiency, settling velocity, and elution test results suggested that the 20-60, 20-40, and 2mm&down mesh activated-carbon adsorbents could be applied to the field treatment of HNSs and that the minimum required amount for field treatment were 0.82, 0.90, and 1.28 ton/kl, respectively, as calculated based on the HNS-adsorption-capacity priority.

**Key Word** : Sunken HNS, Adsorbent, Activated Carbon, On-site treatment, Lab-scale test

\* First Author : kychoi@kiost.ac.kr, 051-664-3201

† Corresponding Author : kcj201@kiost.ac.kr, 051-664-3199

## 1. 서론

화학물질류를 포함하는 국제 해상 무역량의 증가로 인해 다양한 화학물질들이 해양환경으로 유출되고 있다(UNCTAD, 2016; Yoon et al., 2018; KMI, 2018; KMST, 2020). 화학물질류 중 특히 위험·유해물질(Hazardous noxious substances, HNS)은 최근 2014-2015년간 약 9,000만톤이 유통되었고, 매년 그 유통량 증가와 함께 사고에 의한 해양환경오염 가능성 또한 증가하고 있다(Chun et al., 2019; Kim et al., 2019).

HNS는 해양 환경에 유입 시, 해양자원, 생태계 및 인체건강에 악영향을 주고, 기타 합법적인 해양 활용에 피해를 줄 수 있는 유류 이외의 물질로 정의된 물질로서(IMO, 2000), 사고 등에 의한 환경 유출 이후 물리화학적 특성에 따라 대부분 증발(38%), 용해(37%)되고, 가스(15%), 침강(8%), 부유(2%) 등의 거동특성을 갖는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2012). 이들 중 해저로 침강하는 HNS류는 용해되지 않고(용해도 <0.1%), 해수보다 비중이 커서 침강 후 해저퇴적층 내에 지속적으로 잔류하며 악영향을 줄 가능성이 있기 때문에, 국제해사기구(IMO)를 포함하여 유럽에서는 현재, HNS 위해성 기반의 관리우선물질 선정, 정보 DB구축 및 대응기술 개발 등에 관한 다양한 연구를 진행하고 있다(Harold et al., 2014; ITOPF, 2014; Cunha et al., 2016).

특히, 대표적인 침강HNS류에 포함되는 염화 유기용매류(Chlorinated solvent) 중 염화메틸렌(Methylene Chloride), 클로로포름(Chloroform), 트리클로로에틸렌(Trichloro ethylene), 퍼클로로에틸렌(Perchloroethylene), 테트라클로로메탄(Tetrachloro Methane) 등은 장기 손상, 생식력 감소 및 발암 등의 질병을 유발할 가능성이 있는 물질들로서(Moran et al., 2007), 유럽 표준 분류 기준(SEBC)에서 정한 대량 해상운송 100대 화물 중에 포함되어 있고, 이들 중 클로로포름은 최근 국내에서 2014-2015년 해상유통 HNS류들 중 최종 158개 물질의 우선순위를 제시한 연구에서도 관리 우선순위 물질군에 포함되어 있다(Kim et al., 2016).

현재 국내에는 해저침강 HNS류 사고에 대한 대응 및 방제 등의 관련 관리체계가 수립되어 있지 않다. 더욱이, 해상물동량 증가에 따른 사고발생 위험성은 매년 증가하고 있는 상황에서 국가적 차원의 적극적 대비/대응체제 구축이 무엇보다 시급할 것으로 판단된다(Kim et al., 2019).

염화 유기용매류는 흡착반응을 이용하여 환경에서 분리할 수 있다(Roebers et al., 1988; Cornelissen et al., 2011). 활성탄소를 활용한 오염퇴적물의 정화, 오염원으로부터의 격리 등의 주제에 대한 해외 선행연구들이 이미 보고된 바 있고(Cornelissen et al., 2011; Choi et al., 2014; Thompson et al., 2016), 흡착반응은 단일 단계 반응으로 반응 시간이 신속하

고, 반응조건이 단순하며, 반응 성공률이 높을 뿐 만 아니라, 경제성이 우수하고, 쉬운 난이도로 인해 현장 적용에 유리한 장점이 있다(Rondina et al., 2019).

본 연구에서는 침강 HNS 유출로 인한 해양생태계의 피해를 최소화하기 위한 신속한 대응 방법 연구를 목적으로, 클로로포름을 대상으로 하여 입자크기별 7종의 활성탄소를 선정하고, 이들의 흡착력을 이용한 소수성(Hydrophobic)의 염화 유기용매류 제거의 현장적용 가능성을 Lab-scale test를 통해 고찰하였다.

7종 활성탄의 침강속도와 흡착용량을 실험하였고, 현장 투입 시 활성탄에 의한 2차 오염가능성 확인을 위해 활성탄 내 중금속 함량을 정량 분석하였으며, 해수 중 중금속 7종의 용출 실험을 실시하였다. 실험 결과들을 기반으로 최적의 활성탄소를 선정하였고, 추가하여 유출사고 발생 시 현장에서 투입하기 위한 활성탄소의 투입물량을 도출하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료

#### 2.1.1 활성탄소 (Activated Carbon)

본 실험에서는 국내 유통 중인 7종의 활성탄소(Activated Carbon)를 사용하였고(Table 1), 비극성의 할로젠화 유기용매류(Alkyl Halides)로서 대표적인 침강 HNS로 분류되는 클로로포름(Chloroform: CHCl<sub>3</sub>, density: 1.49 g/mL)은 Sigma Aldrich사의 특급시약을 사용하였다.

Table 1. Physical properties of seven types of activated carbons by particle size

	Mesh	Particle size (mm)	Manufac.	Produc. No	Density (g/cm <sup>3</sup> )
AC1	100-400	~ 0.2	Sigma (Honeywell)	C3345-500G	< 2
AC2	>100	0.06 ~ 0.2	Sigma	161551-1KG	~ 0.05
AC3	20-60	0.4 ~ 1.2	Sigma (Honeywell)	C3014-500G	~ 2
AC4	20-40	0.6 ~ 1.2	Alfa Aesar	45478	~ 2.26
AC5	2mm & down	< 2	Alfa Aesar	10926	~ 2.26
AC6	8-20	1.2 ~ 3.2	Sigma	C2889-500G	No data available
AC7	4-8	3.2 ~ 6.4	Alfa Aesar	43118	~ 2.26

2.2 실험방법

2.2.1 7종 활성탄소의 침강속도 및 흡착용량 측정

침강속도는 7종 활성탄소에 대하여 예비 실험(침강거리 0.4m)을 실시한 후, 투명 아크릴 재질의 원통관(내경 30 cm, 높이 2m)에서 7회 반복측정 하였다. 또한 흡착용량을 확인하기 위해 GF/F 필터로 여과한 해수 150 mL와 활성탄소 9 g을 채운 분별 깔때기(Separatory funnel)에 클로로포름 36 mL을 통과시켜 흡착시킨 후 남은 클로로포름의 부피를 측정하였다.

2.2.2 7종 활성탄소의 중금속 함량 및 해수 중 용출량 정량

국내 활성탄소에 대한 환경기준은 “수처리제의 기준과 규격 및 표시기준(환경부고시 제2017-190호)”가 있으며, 활성탄소의 성분규격기준을 참고하여 활성탄소에 함유된 7종 미량 금속원소를 전함량분석하였고, 해수중으로 투입 후 해수 중으로 용출될 수 있는 용출실험을 수행하였다.

전함량분석을 위해 7종 활성탄소를 각각 혼합산1(질산:과염소산 6:1(v:v))과 혼합산2(질산:불산 3:2(v:v))을 순차로 이용하여 완전분해한 후 ICP-MS(Thermo, iCAP Q)로 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb를 정량하였고, 용출실험을 위해 7종 활성탄소를 각각 10 g과 3차 증류수 150 mL를 혼합하여 상온에서 1시간 교반(240 rpm) 후 테플론필터(0.45 μm)로 여과한 여액의 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb 함량을 ICP-MS(Thermo, iCAP Q)로 정량하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 7종 활성탄소의 침강속도 및 침강용량

7종 활성탄소의 평균침강속도(Mean particle-settling velocity)는 0.5~8 cm/sec 범위로서, AC7 > AC5 > AC4 > AC3 > AC6 > AC2 > AC1의 순서로 확인 되었고, AC6 경우를 제외하고 입자의 크기와 평균 밀도에 비례하는 것으로 판단된다(Table 2).

Table 2. Results of mean particle-settling velocity and adsorption capacity test of seven types of activated carbons by particle size

	Mean particle-settling velocity (cm/sec)	Over loaded vol. (mL)	Absorption vol. (mL)	Capacity AC(g) : CHCl <sub>3</sub> (mL)
AC1	> 0.5	15	21	1 : 2.33
AC2	> 0.2	13	16	1 : 1.78
AC3	4	25	11	1 : 1.22
AC4	5	26	10	1 : 1.11
AC5	7	29	7	1 : 0.78
AC6	> 1	33	3	1 : 0.33
AC7	8	34	2	1 : 0.22

또한, 7종 활성탄소 중 AC1의 흡착용량이 가장 높았고 (1:2.33(w:v)), 입자의 표면적에 비례하는 결과를 확인하였다 (Table 2).

Table 3. Standards and labeling standards for water treatment agents (Notification No. 2017-190 of the Ministry of Environment)

Item	Powdered Activated Carbon (PAC)	Granular Activated Carbon (GAC)
Component & Color	powder, black	granule, black
Verification test	valid	valid
pH	4.0~11.0	4.0~11.0
Sieve size	74 μm sieve 90 % pass	2,380 μm sieve 100 % pass and 500 μm sieve 5 % pass
Loss on Drying	≤50 %	≤5 %
Chloride	≤0.5 %	≤0.5 %
Arsenic(As)	≤2 mg/kg	≤2 mg/kg
Lead (Pb)	≤10 mg/kg	≤10 mg/kg
Cadmium(Cd)	≤1 mg/kg	≤1 mg/kg
Zinc(Zn)	≤50 mg/kg	≤50 mg/kg
Phenol value	≤25	≤25
ABS value	≤50	≤50
Methylene blue decolorization power	≥150 mL/g	≥150 mL/g
Iodine adsorbability	≥950 mg/g	≥950 mg/g

전함량 정량 결과 AC2의 아연(Zn) 함량이 121 mg/kg로서, 수처리제 기준인 50 mg/kg 보다 높은 함량으로 확인되었고 AC2, AC3, AC4의 비소(As) 함량이 수처리제 기준인 2 mg/kg를 초과하였다(Table 3 and Table 4). 참고로, 7종 활성탄소 중 AC4의 구리(Cu) 함량이 54.3 mg/kg으로 가장 높았다(Table 4).

Table 4. Total metal contents of seven types of activated carbons by particle size (mg/kg)

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
AC1	2.66	1.5	2.04	6.99	0.12	0.019	0.34
AC2	14.8	7.63	11.3	121	12.1	0.378	4.92
AC3	16.8	25.4	30.2	9.07	6.25	0.004	0.44
AC4	14.5	19.0	54.3	7.07	2.65	0.007	1.48
AC5	12.3	15.5	32.9	7.15	1.76	0.004	0.65
AC6	5.49	5.0	14.1	4.68	1.11	0.001	0.03
AC7	ND	0.48	12.1	7.08	0.05	ND	1.34

또한 7종 활성탄소의 해수 중 용출실험 결과, AC2에서 크롬(Cr), 아연(Zn), 비소(As)가 각각 0.123, 0.177, 0.144 mg/kg 용출되었고, AC1에서도 아연(Zn)이 0.094 mg/kg이 용출되었다. 한편, 전함량 정량에서 비소(As) 함량이 수처리제 기준인 2 mg/kg 보다 높았던 AC3, AC4에서는 각각 0.0003, 0.004 mg/kg이 용출되어 환경부의 “먹는 물 수질기준” 인 0.01 mg/L 보다 낮은 값을 나타냈다(Table 5).

본 연구에서 사용된 AC2는 전함량분석결과가 아연(Zn)과 비소(As)가 수처리제기준보다 높고, 용출실험결과에서도 크롬(Cr), 아연(Zn), 비소(As)가 다른 활성탄소에 비해 높은 농도로 용출되어 현장에서 다량의 흡착제로 사용했을 경우 주변 해양수질환경에 상대적으로 유해한 영향을 줄 가능성이 있는 것으로 판단된다.

Table 5. Released heavy metal contents from seven types of activated carbons into water after 1hour-leaching test (mg/kg)

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
AC1	0.008	0.017	0.0023	0.094	0.002	0.00073	0.00116
AC2	0.123	ND	0.0006	0.177	0.144	0.00062	0.00047
AC3	ND	0.001	ND	0.0001	0.0003	ND	0.00003
AC4	ND	0.0001	ND	0.0001	0.004	ND	0.00005
AC5	0.00001	0.002	ND	0.0002	0.002	0.00001	0.00004
AC6	0.00001	0.003	ND	0.0002	0.001	0.00001	0.00004
AC7	ND	ND	ND	0.00003	0.001	ND	0.00008

### 3.2 현장 적용 가능한 활성탄소 선정

각 활성탄소의 흡착효율, 침강속도, 유해성분 용출량 등을 종합적으로 고려하여 해양환경에 침강 HNS 유출시 흡착제로 현장 적용이 가능할 수 있는 활성탄소를 선정하였다(Table 6).

Table 6. Summary of lab-scale test of activated carbon

	Mean particle-settling velocity (cm/sec)	Capacity AC(g) : CHCl <sub>3</sub> (mL)	High concentration of trace metal in leaching test
AC1	>0.5	1 : 2.33	Zn
AC2	>0.2	1 : 1.78	Cr, Zn, As
AC3	2	1 : 1.22	-
AC4	3	1 : 1.11	-
AC5	3	1 : 0.78	-
AC6	>1	1 : 0.33	-
AC7	5	1 : 0.22	-

침강 HNS에 높은 흡착효율을 보인 활성탄소는 입자의 크기가 상대적으로 작은 AC1, AC2이나, 신속한 처리를 고려하면 침강속도가 상당히 오래 걸리고, 유해성분의 용출 가능성이 상대적으로 높다. 한편, AC6, AC7은 중금속함량이 작고, 침강 속도도 빠르지만 흡착효율이 다른 4종에 비해 매우 낮아 현장 투입 시 상대적으로 많은 양을 투입해야 하는 단점이 있다. 흡착효율, 침강속도, 유해성분 용출량 등을 종합적으로 고려하면, AC3, AC4, AC5의 활성탄소가 현장적용에 적합할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

7종 활성탄의 침강속도, 흡착효율을 실험하고 현장 투입 시 활성탄에 의한 2차 오염가능성 확인을 위해 활성탄 내 중금속 함량을 정량 분석하였으며, 해수중 중금속 7종의 용출 실험을 실시하여 이들 결과를 종합적으로 고려하여 해양환경에 침강 HNS 유출시 흡착제로 현장 적용이 가능할 수 있는 활성탄소를 선정하였다.

침강 HNS에 높은 흡착효율을 보인 활성탄소는 입자의 크기가 상대적으로 작은 AC1, AC2이나, 침강속도가 0.5 cm/sec 이하로 침강하는데 오래 걸리고, 유해성분의 용출 가능성이 상대적으로 높았다. 침강속도가 빠른 AC6, AC7는 흡착효율이 낮아 현장투입 시 상대적으로 많은 양을 투입해야 함으로, AC3, AC4, AC5 범위의 활성탄소가 가장 현장적용에 적합할 것으로 판단된다.

현장적용을 위해 선정된 AC3, AC4, AC5의 활성탄소의 투입량은 유출사고 발생 시 침강 HNS의 해양환경으로 유출된 양에 따라 적정량을 투입해야 한다.

투입물량 산정은 각 활성탄소의 흡착효율을 최우선으로 판단하여 계산하였으며 현장에서의 투입방법은 확산식이 아닌 집중식 방법을 가정하여 산정하였다(Table 7). 계산된 활성탄소의 투입물량은 각각 0.82, 0.90, 1.28 ton/kℓ 이다.

Table 7. Calculation of input quantity of activated carbon

	AC3	AC4	AC5
Capacity AC (w) : CHCl <sub>3</sub> (v)	1 : 1.22	1 : 1.11	1 : 0.78
AC dose (ton/kℓ)	0.82	0.90	1.28

계산된 활성탄소의 투입물량을 고려하고 해양오염사고 발생현황과 관련하여 침강 HNS 유출사고를 대비하기 위해 필요한 활성탄소 보유량을 산정하였다.

2010년부터 2019년 동안 발생한 해양오염사고 발생현황

중 유해물질 사고는 총 26건이 발생했으며, 총 유해물질 유출량은 약 298 kl로 사고 건당 11.5 kl 정도이다(Table 8).

Table 8. Marine Pollution Accident of Hazardous Substances in Korea

Year	Frequency	Spill volume (kl)
2010	2	13.6
2011	4	75.6
2012	2	0.7
2013	4	3.1
2014	3	4.4
2015	3	198
2016	2	0.1
2017	1	0.2
2018	3	1.7
2019	2	0.9

Source : Korea Coast guard

따라서 국내 침강 HNS 유출사고를 대비하기 위해 약 10~15톤가량의 활성탄소를 상시 보유하고 있는 것이 신속한 처리를 위해 필요할 것으로 판단된다. 현재, 이 기술과 관련하여 투입된 활성탄소를 영구 제거하기 위한 기계적 수거 장치에 대한 설계가 함께 진행 중이며, 실제 현장 적용을 위해서는 향후 연관된 모든 현행 법률들에 대한 고찰 뿐만 아니라, 사회적, 경제적 소요 비용 등에 대한 추가적인 검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(위험유해물질(HNS)사고 관리기술 개발)입니다.

## References

- [1] Choi, Y., Y-M. Cho, D. Werner, and R. G. Luthy(2014), In Situ Sequestration of Hydrophobic Organic Contaminants in Sediments under Stagnant Contact with Activated Carbon. 2. Mass Transfer Modeling, *Environmental Science & Technology*, Vol. 48, No. 3, pp. 1843-1850.
- [2] Chun, J. Y., C. K. Kim, and C. W. Ha(2019), A Study on the Improvement of National Marine Pollution Response Policy according to Change of Marine Pollution Incident Trend, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 22, No. 1, pp. 57-65.
- [3] Cornelissen, G., M. E. Krusa, G. D. Breedveld, E. Eek, A. M. P. Oen, H. P. H. Arp, C. Raymond, G. Samuelsson, J. E. Hedman, Ø. Stokland, and J. S. Gunnarsson(2011), Remediation of contaminated marine sediment using thin-layer capping with activated carbon-a field experiment in Trondheim Harbor, Norway, *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, No. 14, pp. 6110-6116.
- [4] Cunha, I., H. Oliveira, T. Neuparth, T. Torres, and M. M. Santos(2016), Fate, behaviour and weathering of priority HNS in the marine environment: An online tool, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 111, pp. 330-338.
- [5] Harold, P. D., A. S. de Souza, P. Louchart, D. Russell, and H. Brunt(2014), Development of a Risk-based Prioritization Methodology to inform Public Health Emergency Planning and Preparedness in case of Accidental Spill at Sea of Hazardous and Noxious Substances (HNS), *Environment International*, Vol. 72, pp. 157-163.
- [6] IMO(2000), Protocol on Preparedness, Response and Co-operation to Pollution Incidents by Hazardous and Noxious Substances, pp. 3-24.
- [7] ITOPF(2014), TIP 17: Response to marine chemical incidents, Technical information papers, pp. 1-16.
- [8] Kim, Y. R., J. Y. Choi, M. H. Son, S. W. Oh, M. J. Lee, and S. J. Lee(2016), Prioritizing Noxious Liquid Substances (NLS) for Preparedness Against Potential Spill Incidents in Korean Coastal Waters, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 22, No. 7, pp. 846-853.
- [9] Kim, Y. R., M. Lee, J. Y. Jung, T. W. Kim, and D. Kim(2019), Initial environmental risk assessment of hazardous and noxious substances (HNS) spill accidents to mitigate its damages, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 139, pp. 205-213.
- [10] KMI(2018), Korea Maritime Institute, The statistics of the occurrence of maritime pollution, <https://www.kmi.re.kr/web/contents/contentsView.do?rbsIdx=226> (retrieved Mar. 9. 2020).
- [11] KMST(2020), Korean maritime safety tribunal, The statistics of the number of maritime accidents by registered vessels, <https://www.kmst.go.kr/eng/main.do> (retrieved Sep. 20. 2020).
- [12] Lee, E. B., J. H. Yun, and S. T. Chung(2012), A Study on the Development of the Response Resource Model of Hazardous and Noxious Substances Based on the Risks of Marine Accidents in Korea, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 36, No. 10, pp. 857-86.

- [13] Moran, M. J., J. S. Zogorski, and P. J. Squillace(2007), Chlorinated solvents in groundwater of the United States, *Environmental Science & Technology*, Vol. 41, No. 1, pp. 74-81.
- [14] Roebbers, A., T. Roncken, R. Hopman, C. L. de Ligny, B. G. Dekker, J. van der Laan, and J. C. Kruithof(1988), Activated Carbon as an Adsorbent for the Separation of Low-Molecular Alkyl Halides from Ground Water in the Production of Drinking-Water: I. An Accurate Method for the Determination of Adsorption Isotherms, and its Application to Virgin and Regenerated Activated Carbons, *Adsorption Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 13-28.
- [15] Rondina, D. J. G., D. V. Ymbong, M. J. M. Cadutdut, J. R. S. Nalasa, J. B. Paradero, V. I. F. Mabayo, and R. O. Arazo(2019), Utilization of a novel activated carbon adsorbent from press mud of sugarcane industry for the optimized removal of methyl orange dye in aqueous solution, *Applied Water Science*, Vol. 9, pp. 1-12, <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1063-0>.
- [16] Thompson, J. M., C-H. Hsieh, T. P. Hoelen, D. P. Weston, and R. G. Luthy(2016), Measuring and Modeling Organochlorine Pesticide Response to Activated Carbon Amendment in Tidal Sediment Mesocosms, *Environmental Science & Technology* Vol. 50, No. 9, pp. 4769-4777.
- [17] UNCTAD(2016), United Nations Conference on Trade and Development, Review of Maritime Transport 2016.
- [18] Yoon, S. Y., J. Y. Yun, J. Y. Han, and S. H. Jung(2018), Risk Analysis of Transporting Hazardous Substances in Harbor Using Modeling Program, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 32, No. 4, pp. 272-278.

---

Received : 2020. 11. 10.

Revised : 2020. 12. 08.

Accepted : 2020. 12. 28.