

동절기 해상으로 유출된 저유황 중질유 제거를 위한 발열 흡착포

박한규* · 오경근** · 배병욱*** · † 송영채

*포항해양경찰서 해양오염방제과 계장(6급), **한국해양대학교 대학원 박사과정생, ***대전대학교 토목환경공학과 교수,

† 한국해양대학교 물류·환경·도시인프라공학부 환경공학전공 교수

Exothermic Oil Absorbent Sheet for Low-sulfur Fuel Oil (LSFO) Spilled into Seawater in the Winter Season

Han-gyu Park* · Gyung-geun Oh** · Byung-Uk Bae*** · † Young-Chae Song

*Manager, Marine Pollution Response Division, Korea Coast Guard Station Pohang, Pohang 37642, Korea

**Student, Major of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

***Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Daejeon University, Daejeon 34520, Korea

† Professor, Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 탄산칼슘과 염산 수용액에 폴리프로필렌 섬유를 침지시켜 표면에 염화칼슘 결정층을 생성시킴으로써 발열 흡착포를 제작하였다. 발열 흡착포를 유출 기름으로 인해 유막이 형성된 해수면에 적용하면 염화칼슘 결정이 주변의 수분을 흡수하여 이온화되면서 용해열을 방출한다. 염화칼슘의 용해열을 유동점 이하의 저온에서 응고된 저유황 중질유를 액화시켜 흡유 가능한 상태로 전환시킨다. 발열 흡착포의 제작을 위해 폴리프로필렌 표면에 염화칼슘 결정층을 생성시키기 위한 탄산칼슘과 염산의 최적 몰농도는 각각 0.25 M과 0.5 M이다. 저유황 중질유 발열 흡착포의 흡유능은 해수 온도에 따라 다르지만, 우리나라 인근 해역의 동절기 평균 수온인 10℃에서 4.5-7.08 g/g으로 매우 우수하였다. 염화칼슘 발열 흡착포를 사용하면 동절기 선박사고로 인하여 해상에 유출된 저유황 중질유를 효과적으로 흡유하여 제거할 수 있다.

핵심용어 : 저유황 중질유, 해상 유출, 염화칼슘, 발열 흡착포, 동절기

Abstract : An exothermic oil absorbent sheet with calcium chloride crystals can be fabricated, by dipping a clean polypropylene fabric in calcium carbonate and hydrochloric acid solution and drying it. The exothermic oil absorbent sheet applied to the seawater surface, releases heat by the dissociation of calcium chloride. The dissociation heat liquefies the solidified low-sulfur fuel oil at a low temperature, and converts it to a state at which it can be absorbed. The optimum mole concentrations of calcium carbonate and hydrochloric acid required for the exothermic oil absorbent sheet, are 0.25 M and 0.5 M, respectively. The oil absorption capacity of the exothermic oil absorbent sheet for low sulfur fuel oil depends on the seawater temperature. But, it is highly excellent at 4.5-7.08 g/g at 10℃, the average seawater temperature during the winter in Korea. The exothermic oil absorbent sheet is an excellent alternative in absorbing low-sulfur fuel oil in winter and removing it from seawater.

Key words : low-sulfur fuel oil, oil spill, calcium chloride, exothermic oil absorbent sheet, winter

1. 서 론

국가 간의 교역을 위하여 화물을 운송하는 선박은 상대적으로 가격이 저렴한 벙커-C 중질유를 동력원으로 널리 사용하고 있다 (Kang et al., 2019). 그러나, 벙커-C 중질유는 황함유량이 높아 선박의 엔진을 구동하기 위하여 연소하는 과정에서 많은 양의 황산화물(SOx)을 배출한다 (Kang et al., 2019; Park et al., 2020). 선박에서 배출된 황산화물은 공기 중의 수분과 반응하여 산성비의 원인물질을 생성함으로써 자연생태계에 악영향을 미칠 수 있다 (Lisa and Jeannine, 2003). 최근

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 선박의 운항에 따른 대기오염 문제를 완화하기 위하여 선박 연료유의 황함유량 기준을 0.5% 이하로 크게 강화하였다 (Kang et al., 2019; Monique, 2021; Park et al., 2020). 그러나, 선박의 연료유로 사용하는 저유황 중질유는 파라핀 함량에 따라 유동점이 3-30℃ 정도로 알려지고 있다 (Kim et al., 2021; Sørheim et al., 2020). 한편, 우리나라 해역의 동절기 평균 수온은 약 10℃ 내외로서 저유황 중질유의 유동점보다 크게 낮다 (Kim et al., 2021). 따라서, 동절기의 선박사고에 의해 유출된 저유황 중질유는 유동점보다 낮은 수온에 의해 고형화될

† Corresponding author : 종신회원, soyc@kmou.ac.kr 051)410-4417

* greenpark113@hanmail.net 051)410-4977

** sambo8866@naver.com 051)410-4977

*** baebu@dju.kr 042-280-2535

수 있다. 일반적으로 유출된 기름에 의해 생성된 해상의 유막은 폴리프로필렌 부직포와 같은 소수성 흡착포를 이용하여 흡유하여 제거하는 경우가 많다. 폴리프로필렌은 표면장력이 29 mN/m로서 해수의 표면장력 60-65 mN/m보다는 낮고 기름의 표면장력 20 mN/m 보다는 높은 소수성 유흡착포의 재료이다 (ITOPF, 2014). 그러나, 유출된 저유황 연료유가 유동점보다 낮은 저수온에서 고형화되면 흡착포를 이용하여 제거하기 어려워진다. 그런데, 우리나라의 동절기는 해상의 기상이 악화되는 빈도가 높아 선박사고와 기름 유출이 자주 발생한다 (Kim, 2013). 그러나, 아직까지 동절기에 해상으로 유출된 저유황 중질유의 방제 및 방제과정에서 발생하는 문제들을 해결하고자 하는 연구는 거의 없었다. 한편, 해수면에 고형화되어 부유하는 저유황 중질유는 온도를 유동점 이상으로 높여 액화시키면 기존의 소수성 흡착포 등으로도 쉽게 흡유시켜 제거할 수 있다. 저온에서 고형화된 형태로 해수면에 존재하는 저유황 중질유는 화학물질의 발열반응을 이용하면 액화시킬 수 있다.

화학반응이 일어나는 동안 열을 방출하여 엔탈피가 감소하고 엔트로피가 증가하는 반응이 발열반응이다. 자연계에서 흔히 관찰되는 발열반응은 유기물의 산화반응, 산과 염기의 중화반응, 금속과 산의 반응, 기체의 용해반응, 화학물질이 물과 결합하는 수화반응 등으로 그 종류가 매우 다양하다 (Kelly, 2020). 그러나, 저온의 해수면에서 고형화된 저유황 중질유를 액화시키기 위하여 가열하는데 사용할 수 있는 물질은 i) 취급성이 좋아야 하고, ii) 발열반응이 빠르게 일어나고, iii) 가격이 저렴하며, iv) 2차 오염문제가 발생하지 않아야 한다. 염화칼슘 (CaCl₂)은 가격이 저렴하고 물에 대한 용해도가 큰 조해성 물질이다. 또한, 염화칼슘은 수화정도에 따라 차이가 있지만 무수화물의 경우 용해열이 0.693 kJ/g 정도이며, 수화과정에서 많은 양의 열을 급속하게 발산하는 물질이다 (Kustov et al., 2007; Sinke et al., 1985). 그러나, 염화칼슘의 수화과정에서 생성되는 물질은 해수의 구성성분인 Ca²⁺, Cl⁻ 이온이기 때문에 2차오염에 대한 우려가 없다. 염화칼슘 결정은 탄산칼슘과 염산을 반응시켜 흡착포의 폴리프로필렌 섬유 표면에 석출시킬 수 있다. 염화칼슘이 담지된 흡착포를 해수면에 적용하면 염화칼슘이 주위의 수분과 반응하여 발열하게 된다. 염화칼슘의 수화반응에 의한 용해열은 인접하고 있는 고형화된 저유황 중질유를 액화시켜 점성을 감소시킴으로써 소수성 흡착포에 쉽게 흡유될 수 있는 상태로 변화시킬 수 있다. 한편, 비슷한 원리를 가진 유흡착물로서 태양광에 의해 발열하는 탄소나노튜브로 개질된 폴리우레탄 스펀지를 이용하여 유출 중유의 점도를 낮춤으로써 흡유를 촉진시키는 연구사례가 보고되고 있다 (Chang et al., 2018).

본 연구는 폴리프로필렌 흡착포의 표면에 발열 화학물질인 염화칼슘 결정을 형성시켰으며, 수분과 반응하여 생성되는 열에 의해 저수온에서 고형화된 저유황 중질유를 액화시킴으로써 흡유능이 개선되는 현상을 증명하였다. 이를 위해 먼저 탄산칼슘 수용액과 염산이 혼합된 용액에 폴리프로필렌 흡착포

를 침지시킨 뒤 인발하여 건조하는 방법으로 흡착포를 구성하는 섬유 표면에 염화칼슘 결정을 석출할 수 있는지 시험하였다. 또한, 발열 흡착포 제작을 위해 필요한 탄산칼슘 및 염산의 적정 몰농도를 제시하였으며, 저유황 중질유에 대한 발열 흡착포의 흡유능을 다양한 유종과 온도조건에서 평가하여 대조구와 비교하였다. 본 연구에서는 동절기의 해상 선박사고로 인한 연료유 유출 상황에서 저유황 중질유의 효과적인 방제를 위한 새로운 기술적 대안을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시약 및 재료

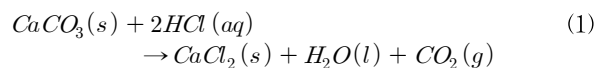
해상 유출유의 방제작업에 널리 사용하는 폴리프로필렌 흡착포 (DL-A, Daeil Co., Ltd., Korea)를 절단하여 흡착포 시험편 (10 cm × 10 cm, 두께 0.5 cm)을 준비하였다. 발열물질인 염화칼슘의 화학적 합성법에 사용된 탄산칼슘 (98.0%, Junsei Co., Ltd. Japan)과 염산 (36.0%, Duksan pure chemicals Co., Ltd. Korea)은 일급(Extra pure) 시약을 사용하였다. 흡착포의 흡유특성 시험에서는 선박 연료로 널리 사용하는 A사의 저유황 중질유, 고유황 중질유 및 경유, 그리고 B사의 저유황 중질유 및 경유를 사용하였다 (Table 1).

Table 1 Characteristics of marine fuel oils for ships

Characteristics	A company			B company	
	LSFO	HSFO	Disel	LSFO	Disel
Density (kg/m ³ , 15°C)	943.8	986.2	858.2	922.3	846.4
Viscosity (mm ² /s)	55.00 (50°C)	374.0 (50°C)	3.286 (40°C)	64.54 (50°C)	4.188 (40°C)
Sulfur Content (%)	0.469	2.780	0.042	0.430	0.039

2.2 발열 흡착포의 제작 및 흡유량 평가

발열 흡착포는 염화칼슘의 화학적 합성법을 이용하여 폴리프로필렌 섬유 표면에 염화칼슘 결정을 석출시키는 방법으로 제작하였다. 간략히 설명하면, 먼저 증류수에 미리 정한 몰수의 탄산칼슘을 주입하여 용해시켰다. 폴리프로필렌 흡착포 시험편을 준비된 탄산칼슘 용액에 침지시키고 염산을 주입하여 다음 식 (1)에서와 같이 폴리프로필렌 섬유 표면에서 탄산칼슘에서 해리된 칼슘이온이 염소이온과 결합하여 염화칼슘 결정을 석출하도록 하였다.



탄산칼슘을 녹인 염산 수용액에서 염화칼슘 결정 생성반응

이 완료된 후에는 침지된 흡착포를 인발하여 열판에서 건조시킴으로서 발열 흡착포를 완성하였다.

기존의 폴리프로필렌 흡착포의 흡유능을 10℃ 및 20℃에서 상기한 선박 연료유 5종에 대하여 평가하였다. 또한, 폴리프로필렌 섬유 표면에 염화칼슘 결정층을 형성시킨 발열 흡착포의 저유황 흡유능을 10℃의 해수에서 조사하였으며, 대조구인 기존의 폴리프로필렌 흡착포와 비교하였다. 발열 흡착포 표면에 석출된 염화칼슘 결정층은 전자현미경 (SEM, scanning electron microscope) (MIRA-3, Tescan, Czech)을 이용하여 확인하였다. 다양한 탄산칼슘에 대한 염산의 몰비 및 몰농도에서 제작된 발열 흡착포의 염화칼슘 결정층을 비교하였으며, 염화칼슘 결정층의 양에 따른 흡유능을 비교하였다. 저유황 중질유에 대한 발열 흡착포의 흡유능에 미치는 해수 온도의 영향을 조사하였다.

2.3 흡유량 시험 및 계산

흡착포의 흡유능(Oil absorption capacity, OAC)은 해양경찰청 “해양오염방지자재·약제의 성능시험기준 및 검정기준” 및 국가 표준인증 “KS K 1600(2021) - 유류 흡착포”에 따라 평가하였다. 간략히 설명하면, 먼저 기름이 섞이지 않은 증류수 또는 해수 시료를 시험용기에 채워하고 수표면 1 cm² 당 1.0 g의 기름을 주입하여 유막을 형성시킨다. 용기의 수면에 생성된 유막 위에 흡착포를 적용하여 유막의 기름을 5분간 흡수시킨다. 흡수 종료 후 흡착포는 철망에서 5분간 방치하여 수분을 제거한 후 질량을 측정하여 기름의 흡유 정도를 평가한다. 흡착포의 흡유능(Oil absorption capacity, OAC)은 식 (2)와 같이 흡유 전후의 흡착포 무게 변화로부터 계산하였다 (Lv et al., 2018).

$$OAC (g/g) = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad (2)$$

여기에서 OAC는 흡착포의 흡유능(g oil/g oil absorbent sheet)이며, W₀와 W_t는 흡유 전/후의 흡착포의 무게이다. 흡착포 시험편의 흡유능은 상기한 흡유 실험을 3 반복 수행하여 평균값으로 나타냈다. 그러나, 발열 흡착포의 경우 유막이 형성된 수면에 사용하면 염화칼슘이 수화반응에 의해서 용해되어 무게가 감소한다. 따라서, 흡유 후 무게는 염화칼슘의 수화 정도에 따라 W_t에서 W₀-W_{CaCl₂}를 제한 값으로 계산하였다. 여기서, W_{CaCl₂}는 수화반응에 의해서 감소한 염화칼슘의 무게이다.

3. 결과 및 토의

3.1 기존 흡착포에 의한 선박 연료유 흡유

국내 정유 2사에서 생산한 연료유인 고유황 중질유 1종, 저유황 중질유 2종, 그리고 경유 2종 등 총 5종의 연료유를 대

으로 폴리프로필렌 재질의 기존 흡착포의 흡유특성을 조사하였다. 고유황 중질유는 일반적으로 아스팔텐 함량이 높고 포화물 함량이 낮아 유동점과 동점도가 낮다 (Song et al., 2020). 따라서, 10℃에서 고유황 중질유에 대한 폴리프로필렌 흡착포의 흡유능은 8.72±0.23 g/g로서 대단히 우수하였다. 이 결과는 고유황 중질유의 경우 수온이 낮은 동절기에도 기존 흡착포로서 충분히 흡유시켜 제거가 가능하다는 것을 나타낸다. 한편, 경유의 경우에는 10℃에서 기존 흡착포의 흡유능은 20℃에 비하여 오히려 크게 높았다 (Fig. 1). 이것은 경유의 흡유능이 온도에 따른 유동점 변화에 의한 영향보다는 온도가 높을수록 휘발되어 손실되는 부분이 증가하기 때문으로 보인다 (El-Din et al., 2013; Lv et al., 2018). 저유황 중질유 2종의 경우 20℃에서 시험한 흡유능은 각각 약 7.67 g/g 및 7.28 g/g 우수하였으나, 10℃에서는 흡유능은 각각 2.96 g/g, 2.92 g/g으로 크게 감소하였다. 저유황 중질유는 생산과정에서 거치는 감압 증류 등의 공정에서 아스팔텐 (Asphaltens)이 분해되고, 유동점 온도가 높은 파라핀 왁스와 고분자 탄화수소 계열의 포화물 (Saturates)의 함량이 높아진다 (Fingas and Fieldhouse, 2009; Kim et al., 2021). 따라서, 저유황 중질유는 일반적으로 유동점 온도가 고유황 중질유에 비하여 높다 (Daling et al., 2020). 이 결과는 저유황 중질유의 경우 수온이 유동점 이하로 감소하는 동절기에는 기존 흡착포를 이용하여 흡유하고 제거하는 것이 어렵다는 것을 의미한다.

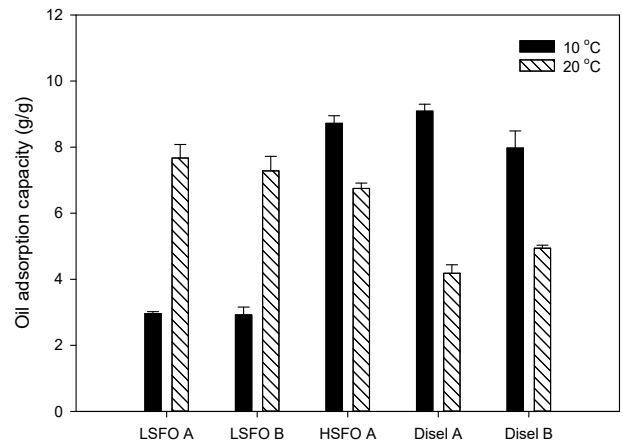


Fig. 1 Oil adsorption capacities of polypropylene sheet for different marine fuel oils at the temperatures of 10℃ and 20℃

3.2 발열 흡착포의 염화칼슘 결정 및 흡유기작

탄산칼슘과 염산용액에 침지시킨 뒤 건조하여 제작한 발열 흡착포의 경우 흡유시험 이전 시험편의 초기 무게는 약 6.6 g으로서 대조구에 비하여 약 40% 가량 무거웠다 (Table 2). 이것은 칼슘과 염소이온, 탄산이온을 함유한 수용액에 비하여 상대적으로 표면장력이 작은 폴리프로필렌 섬유의 표면에 염화칼슘 등의 무기 결정들이 석출되었기 때문이다 (Daling et al., 2020). 대조구 표면을 SEM-EDS로 분석한 결과로부터 주

성분이 탄소인 것으로 확인되었다 (Fig. 2c). 이것은 대조구 흡착포가 탄소사슬로 이루어진 폴리프로필렌 섬유로 이루어졌기 때문이다. 발열 흡착포 시험편의 표면을 전자현미경으로 관찰한 결과 폴리프로필렌 섬유 표면에 다수의 결정들이 발견되었다 (Fig. 2b). 또한, SEM-EDS로 분석한 결과 발열 흡착포 표면에서는 대조구에 비하여 탄소함량이 감소하고, 염소와 칼슘의 함량이 각각 증량기준으로 34.4 %와 12.2 % 까지 증가한 것으로 확인되었다 (Fig.2d). (2a SEM-control, 2b SEM-heat, 2c EDS-control, 2d EDS-heat)

Table 2 Oil absorption capacity of exthermic oil absorbent sheet

Content	Before oil absorption (g)	After oil absorption (g)	OAC (g/g)
Control	4.69±0.09	18.55±0.3	2.96±0.06
Exothermic oil absorbent sheet	6.60±0.26	32.38±1.59	3.92-5.71

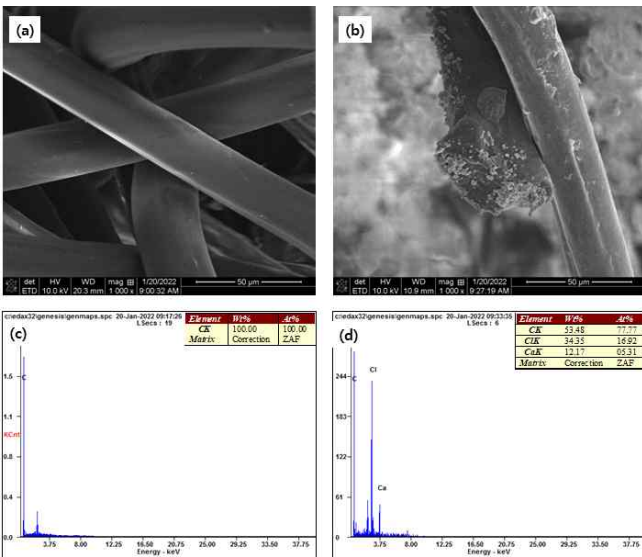


Fig. 2 SEM images of oil absorbent sheet for (a) control (polyethylene fiber) and (b) exothermic absorbent sheet, and EDS spectra for (c) control and (d) exothermic absorbent sheet.

3.3 염화칼슘 결정 형성을 위한 탄산칼슘 및 염산의 몰농도

탄산칼슘과 염산으로부터 염화칼슘 결정이 생성되는 반응식 (1)에 의하면 염화칼슘 1몰을 생성하기 위해 필요한 탄산칼슘과 염산의 몰수는 각각 1몰과 2몰이다. 탄산칼슘은 물에서 용해도가 낮지만 염산이 존재하면 염산과 반응하여 염화칼슘 결정을 생성하는 반응에 의해 연속적으로 용해될 수 있다 (Larson et al., 1976). 따라서, 탄산칼슘이 충분한 때 화학반응에 의해 생성되는 염화칼슘의 몰수는 염산의 몰수에 의해 결정된다. A사의 저유황 연료유에 대하여 다양한 탄산칼슘과 염산 몰농도 비에서 제작된 발열 흡착포의 흡유능을 10℃의 저

온에서 평가하였다 (Fig. 3). 먼저, 탄산칼슘 0.25 M 및 염산 0.25 M에서 제작된 발열 흡착포의 흡유능은 2.44-2.55 g/g로서 매우 낮았다. 탄산칼슘과 염산의 몰농도가 모두 0.25 M인 경우 수용액에서 이론적으로 생성 가능한 염화칼슘의 몰농도는 0.125 M이다. 따라서, 탄산칼슘 0.25 M 및 염산 0.25 M에서 제작된 발열 흡착포의 낮은 흡유능은 생성된 염화칼슘 결정의 양이 너무 작아 수화반응에서 생성되는 용해열이 고형화된 저유황 중질유를 액화시키기에 충분하지 못하기 때문으로 보인다 (Kustov et al., 2007). 그러나, 탄산칼슘 0.25 M과 반응하는 염산의 몰농도를 0.5 M로 증가시키면 0.25 M의 염화칼슘이 수용액에 생성될 수 있다. 탄산칼슘 0.25 M과 염산 0.5 M을 이용하여 제작한 발열 흡착포의 경우 저유황 중질유에 대한 흡유능은 5.46-6.79 g/g으로 크게 증가하였다. 이것은 생성된 염화칼슘 결정의 수화반응 만으로도 10℃의 수온에서 고형화된 저유황 중질유의 액화에 필요한 열을 충분히 공급하기 때문으로 보인다 (Kustov et al., 2007). 폴리프로필렌 표면에 생성된 염화칼슘 결정의 양은 수용액에서 이론적으로 생성 가능한 염화칼슘 몰농도에 비례하는 듯하다. 그러나, 탄산칼슘 몰농도를 0.5 M 이상으로 증가시켰을 때는 염산의 몰농도에 상관없이 흡유능은 오히려 약간 감소하였다. 이것은 탄산칼슘이 0.5 M 이상의 고농도인 경우 발열 흡착포 표면에 형성된 결정에 염화칼슘 외에도 탄산칼슘 등의 불순물이 혼입될 수 있기 때문으로 보인다 (Fig. 2c,d)(Fakcev et al., 2003).

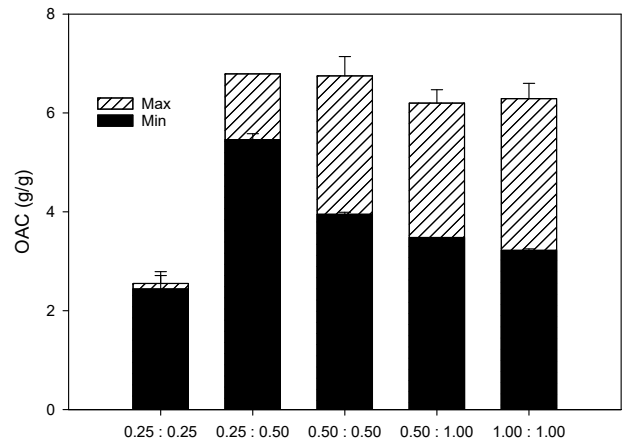


Fig. 3 Absorption capacity of LSF0 depending on the molar ratio of reactants (CaCO₃, HCl) in seawater (10℃).

3.4 수온에 따른 발열 흡착포의 저유황 중질유 흡유능

발열 흡착포의 흡유능은 저유황 중질유의 종류와 수온에 크게 영향을 받았다 (Fig. 4). 5℃에서는 탄산칼슘 0.25M과 염산 0.5M의 혼합 용액에 침지시켜 제작한 발열 흡착포의 흡유능은 A사 저유황 중질유에 대해 3.30-4.92 g/g 이었으며, B사의 저유황 중질유에 대한 4.05-4.65 g/g와 차이가 크지는 않았다. 그러나, A사 및 B 사의 저유황 중질유에 대한 대조구의 흡유능 0.08 g/g 및 0.09 g/g 으로서 발열 흡착포에 비해서는 크게 낮았다. 10℃에서는 A사 및 B 사의 저유황 중질유에 대

한 발열 흡착포 흡유능이 각각 4.50-6.83 g/g 및 4.56-7.08 g/g 으로 5℃에 비하여 증가하였다. 이것은 수온 5℃의 저온에서는 고형화된 저유황 중질유를 액화시키기 위해 필요한 열을 발열 흡착포의 염화칼슘 용해열만으로 충분히 공급하지 못한다는 것을 보여준다. 15℃ 이상의 수온에서 발열 흡착포의 흡유능은 10℃ 보다 약간 증가하는 수준에 머물렀다. 대조구의 경우 흡유능이 10℃에서 각각 2.82 g/g (LSFO-A), 2.87 g/g (LSFO-B)로 증가하였다. 20℃에서는 발열 흡착포와 비슷한 7.37 및 7.04 g/g 이상의 흡착을 보였다. 이 결과는 해수 수온이 15℃ 이하인 경우 발열 흡착포를 이용하면 저유황 중질유의 흡유능을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 그러나, 발열 흡착포를 동절기 해상 선박사고에 현장에 활용하기 위해서는 현장 적용성을 평가하기 위한 연구가 후속연구가 필요한 것으로 판단된다.

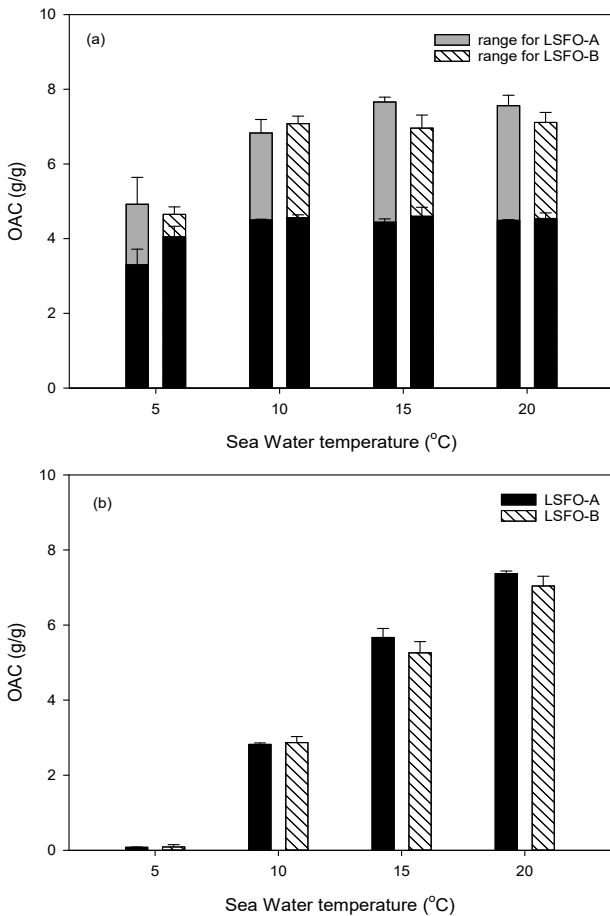


Fig. 4 Absorption capacity for LSFO-A and LSFO-B depending on water temperature: (a) exothermic absorbent sheet, (b) control (polypropylene sheet)

4. 결 론

탄산칼슘과 염산 용액에 폴리프로필렌 흡착포를 침지시켜 건조하는 방법으로 폴리프로필렌 섬유 표면에 염화칼슘 결정이 형성시켜 발열 흡착포를 제작할 수 있다. 표면에 염화칼슘

결정이 형성된 발열 흡착포를 해상의 유출 저유황 중질유에 적용하면 저온에서 용해열이 고형화된 저유황 중질유를 액화시켜 흡유능을 향상시킨다. 염화칼슘을 이용한 발열 흡착포의 제작에 필요한 탄산칼슘과 염산의 적정 몰농도는 각각 0.25M 및 0.5M이다. 염화칼슘을 이용한 발열 흡착포의 저유황 중질유에 대한 흡유능은 수온에 의해 영향을 받았으나 10℃에서 4.5-7.08 g/g으로서 대단히 우수하다. 본 연구에서는 동절기 선박사고에 의해 해상에 유출된 저유황 중질유를 염화칼슘을 이용한 발열흡착포를 이용하여 효과적으로 제거할 수 있는 가능성을 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국해양대학교 산학협력 선도대학 육성 (LINC 3.0) 사업단에 의해 일부 지원받아 수행되었으며, 초기 연구와 기초 실험 수행에 기여한 김유진, 김창엽, 조정일에게 감사드립니다.

References

- [1] Chang, J., Shi, Y., Wu, M., Li, R., Shi, L., Jin, Y., Qing, W., Tang, C. and Wang, P.(2018), "Solar-assisted fast cleanup of heavy oil spill by a photothermal sponge", Journal of materials Chemistry A, Vol. 6, No. 19, pp. 9192-9199.
- [2] Daling, R. S. and Sørheim, K. R.(2020), "Characterization of low sulfur fuel oils (LSFO) - A new generation of marine fuel oils", SINTEF Report, pp. 1-21.
- [3] El-Din, M. R. N., El-Hamouly, S. H., Mohammed, H. M., Mishrif, M. R. and Ragab, A. M.(2013), "Water-in-diesel fuel nanoemulsions: Preparation, stability and physical properties", Egyptian Journal of Petroleum, Vol. 22, No. 4, pp. 517-530.
- [4] Fakeev, A. A., Vasil'eva, L. V. and Sukhanovskaya, A. I.(2003), "A Study of calcium chloride purification", Russian Journal of Applied Chemistry, Vol. 76, No. 2, pp. 167-170.
- [5] Fingas. M. and Fieldhouse, B.(2009), "Studies on crude oil and petroleum product emulsions: Water resolution and rheology", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 333, No. 1-3, pp. 67-81.
- [6] ITOPF(2014), "Use of sorbent materials in oil spill response", ITOPF technical information paper, pp. 6.
- [7] Kang, M. Y., Lee, M. G. and Park, D. H.(2019), "IMO 2020 environmental regulation for sulfur oxide, use regulation as an opportunity", Issue Monitor111,

- Samjong KPMG ERI Inc., Issue Monitor, p. 7.
- [8] Kelly R.(2020), “The Cold Pack: A Chilly Example of an Endothermic Reaction”, Let’s talk science, <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/cold-pack-a-chilly-example-endothermic-reaction>.
- [9] Kim, D. S., Seo, J. M., Ahn, S. H. and Lee, H. J.(2021), “Effectiveness of dispersants for very low sulfur fuel oil”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 27, No. 1, pp. 113-118.
- [10] Kim, K. S.(2013), “Overview of major oil spill at sea and details of various response actions 2. analysis of marine oil pollution incidents in Korea”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 19, No. 5, pp. 467-475.
- [11] Kustov, A. V., Berezin, M. B. and Berezin, B. D.(2007), “Enthalpies and heat capacities of dissolution for calcium chloride and sodium oxalate”, Russian Journal of Inorganic chemistry, Vol. 52, No. 1, pp. 129-130.
- [12] Larson, T. E., Jr.Sollo, F. W. and McGurk, F. F.(1976), “Complexes affecting the solubility of calcium carbonate in water-Phase II”, WRC Research Report No. 108, pp. 1-61.
- [13] Lisa M. Goss and Jeannine E. Eddleton(2003), “A Demonstration of acid rain and lake acidification: Wet deposition of sulfur dioxide”, Journal of Chemical Education, Vol. 80, No. 1, pp.39-40.
- [14] Lv, N., Wang, X., Peng, S., Luo, L. and Zhou, R.(2018), “Superhydrophobic /superoleophilic cotton-oil absorbent: preparation and its application in oil/water separation”, Royal Society of Chemistry, Vol. 8, No. 53, pp. 30257-30264.
- [15] Monique B. Vermeire(2021), “Everything you need to know about marine fuels, Chevron Marine Products”, p. 6.
- [16] Park, S. H., Han, C. H. and Kim, T. I.(2020), “Effect of low sulphur fuel oil use on Korean container shipping companies by IMO environmental regulations”, Journal of Korea Port Economic Association, Vol. 36, No. 1, pp. 23-40.
- [17] Sinke, G. C., Mossner, E. H. and Curnutt, J. L.(1985), “Enthalpies of solution and solubilities of calcium chloride and its lower hydrates”, The Journal of Chemical Thermodynamics, Vol. 17, No. 9, pp. 893-899.
- [18] Song, I. C., Shin, S. H., Kim, S. M., Lee, H. J. and Seo, J. M.(2020), “A study on physico-chemical properties on mixed fuel oil of very low sulfur fuel oil-high sulfur fuel oil (VLSFO+HSFO)”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 7, pp. 864-872.
- [19] Sørheim, K. R., Daling, P. S., Cooper, D., Buist, I., Faksness, L. G., Altin, D., Pettersen, T. A., Bakken, O.M., “Characterization of low sulfur fuel oils (LSFO) - A new generation of marine fuel oils, SINTEF Ocean AS, Report OC2020 A-050, (2020).

Received 09 June 2022

Revised 21 June 2022

Accepted 13 July 2022