

## 선박사고로 인한 해양유출기름의 MHD방식 분리기술 연구 I

이승환\*

\*한국해양대학교 Sea Grant 시범대학사업단 연구원

## Oil Separation from Oil-Contaminated Seawater by MHD Method I

Seung-Hwan Lee\*

\* Sea Grant Model College Program Center, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요약 :** 본 연구는 MHD(Magnetohydrodynamics)방식의 전자기력을 이용하여 선박사고 등으로 인하여 해상에 유출된 기름을 분리하는 새로운 방법에 대한 설계 및 정식화를 이끌어 내었다. MHD분리방식은 최근에 연구되고 있는 자기파우더를 이용한 분리방식보다도 더욱 친환경적이고 분리가 용이하다는 강점을 가지고 있다. 여기서는 기름을 대신하여 고분자 입자를 넣은 해수를 가정하여 유체 내의 전류, 자기장, 유속에 대한 분리율(분리측 입자의 질량/전 입자의 질량)을 수치시뮬레이션을 이용하여 그 특성을 검토하였다.

**핵심용어 :** MHD방식, 해양유출기름, 전자기력, 기름분리, 자기장

**ABSTRACT :** A new method of oil separation from oil-contaminated seawater based on electromagnetic forces, so-called MHD method was designed and formulated. MHD method has advantages of easy treatment of separated oil as well as little effect upon the environment, comparing with a conventional separation method using magnetic powders. Assuming high polymer particles instead of oil, the separation ratio (the mass of simulation particles / the total mass of simulation particles) for the sample fluid was calculated as a function of electric current, magnetic field and seawater velocity.

**KEY WORDS :** MHD method, oil-contaminated seawater, electromagnetic force, oil separation, magnetic field

### 1. 서 론

우리나라 주요 항·포구에서 1979년부터 2001년까지 발생된 해양오염사고의 발생건수는 약 6,420건으로, 그 대부분이 기름에 의한 오염 사고로 전체 발생건수의 92.6%를 차지하고 있다. 오염사고의 발생추이 면에서는 1979년 발생건수 128건을 기준으로 전반적으로 증가추세를 보이며, 2001년에는 455건으로 무려 355%나 증가하였다(한국해양연구원, 2004). 이러한 선박에 의한 기름오염사고는 해양오염의 중요한 원인 중에 하나로서 우리 연근해에 대규모적이고 장기적인 피해를 가져왔다.

해양에서의 기름오염사고는 사고예방과 함께 발생에 따른 신

속하고 확실한 유출기름의 회수 방법이 강구되어야 할 필요가 있다. 최근 유출 기름의 회수방법의 한가지로서 미세한 자성체를 살포하여 수중의 오염물질을 흡착 및 응고시켜 제거하는 자기분리법이 제안되어 연구가 이루어지고 있다.(Ohara et. al, 2002) 그러나 이 방법에서는 대량의 자성체를 살포하기 때문에 환경면, 비용면, 회수 후의 처리방법 등의 문제가 대두된다. 그래서 저자는 그 대안으로 해수 중에 흐르는 전류와 초전도 자석을 이용한 강력한 자기장에 의해 발생하는 전자기력을 사용하는 분리방식(MHD방식)을 제안하고자 한다. 이 분리방식은 환경에 대한 영향이 적고 미소한 기름이 분산되어 있는 Emulsion에 대하여 특별히 효과가 있을 것으로 예상된다.

\* 정희원, shlee@bada.hhu.ac.kr 051)410-5137

이 연구에서는 기름의 대체품으로써 고분자의 입자를 이용한 MHD(Magnetohydrodynamics)방식의 유출기름의 분리 및 회수 방법을 설명하고, 이론식의 유도와 함께 수치계산에 의하여 그 타당성을 확인하여 새로운 방식의 유출기름의 분리 및 회수 방법을 제안하고자 한다.

## 2. MHD방식에 의한 분리법의 원리

Fig. 1은 MHD방식의 기본적인 원리를 나타낸다. 먼저 그림에서와 같이 분리장치 내에 해수와 기름의 혼합액을 넣고 초전도 자석에 의해 흐르는 해수의 방향에 자기장  $B$ 를 인가한다. 또 전극 간에 해수를 넣어서 전류  $I$ 를 자기장  $B$ 와 수직인 방향으로 흐르게 한다. 전극간 거리를  $x$ 라 하면 해수는 플레밍(Fleming)의 원론 법칙에 따른 방향으로 다음 식에서 보이는 전자기력  $F_{MHD}$ 를 받는다.

$$F_{MHD} = IBx \quad \dots(1)$$

단, 전류  $I=iWL$ 이고,  $i$ 는 전류밀도( $A/m^2$ ),  $L$ 은 전극의 길이,  $W$ 는 전극의 폭이다. 여기서는 해수에 작용하는 전자기력이 최대가 되도록 전류와 자기장의 방향이 수직으로 설계되어 있다. 다음으로, 해수 중에 포함되어 있는 기름은 구형모양으로 절연성을 갖는다고 하면 절연성으로 인해 기름에는 전자기력  $F_{MHD}$ 가 작용하지 않는다. 이 경우 분리장치 내에서 해수는 Fig. 2에 나타내는 방향으로 전자기력  $F_{MHD}$ 를 받고, 그 안을 전자기력 방향으로 힘이 작용하지 않는 구형모양의 기름이 부유하면서 흐르는 상태가 된다. 그 때문에 기름에는 중력장의 수중에서 작용하는 부력과 같은 원리로 Fig. 3에서 보이는 것처럼 분리력  $F_{Se}$ 가 작용한다. 분리력  $F_{Se}$ 는 부력과 같은 단위체적당 작용하는 힘으로 나타낼 수 있으며, 전자기력 밀도  $f_{MHD}$ 와 구형모양의 기름의 체적  $V_p$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$F_{Se} = f_{MHD} V_p \quad \dots(2)$$

여기서  $f_{MHD}$ 는 단위체적당 작용하는 전자기력 밀도( $N/m^3$ )이고,  $f_{MHD} = F_{MHD}/xWL = iB$ 이다.

이 때문에 기름분리장치 내에서의 기름은 출구 방향으로 흐르면서 분리력 방향으로 이동하고, 따라서 Fig. 1에서 보는 것처럼 유로의 출구에 분리판을 설치함으로써 기름을 한 방향으로 분리 배출하는 것이 가능하다.

## 3. MHD방식 분리의 해석 모델

### 3.1 해석 모델

Fig. 1의 분리 셀 및 유로를 고려하여 MHD방식의 해석 모델

을 구축한다. 먼저, 분리 셀에서는 유로의 폭을  $W(m)$ , 전극간의 거리는  $x(m)$ , 유로의 길이는 전극장과 같은  $L(m)$ 이라 하고, 분리판은 분리 셀 입구로부터 길이  $L$ 인 지점으로 측벽 면에서부터  $W/2$ 의 거리에 설치되어 있다고 한다. 해수는 비압축성으로 유로 내를 균일하게 채우고 있는 정상류를 가정한다. 그러면 해수 중에 섞인 기름은 절연성의 구형 입자이기 때문에, 입자에 작용하는 분리력  $F_{Se}$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{Se} = \frac{\pi}{6} WL IB d^3 \quad \dots(3)$$

여기서  $d$ 는 입자의 직경( $m$ )이고, 입자체적  $V_p = \pi d^3/6$  을 이용하였다.

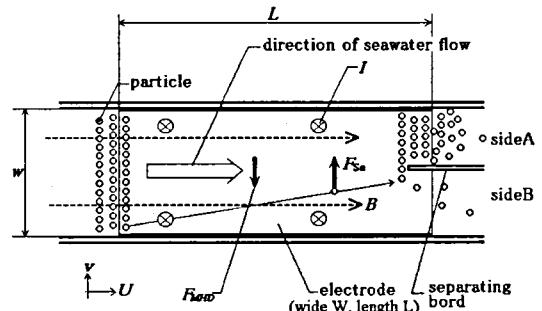


Fig. 1 Principle of oil separation by MHD method

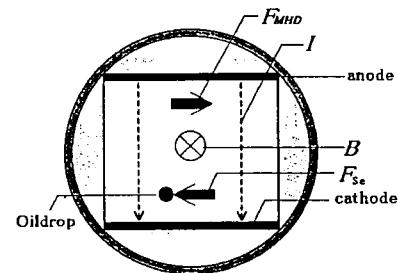


Fig. 2 Dynamic motions of seawater and oil particle by MHD method

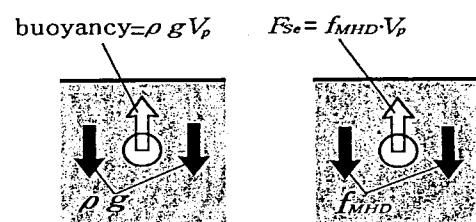


Fig. 3 Relationship between buoyancy and separation force

한편, 분리력  $F_{Se}$  를 받으면서 해수 중을 운동하는 입자에는 저항력  $F_{loss}$  가 작용한다. 여기서 저항력  $F_{loss}$  는 스토크스(Stokes)의 구체저항의 식에 의해 다음과 같이 나타난다.

$$F_{loss} = \frac{\pi}{8} C_D \rho v^2 d^2 \quad \dots(4)$$

단,  $C_D$  는 저항계수로 레이놀드 수  $Re$  값에 의존한다.  $\rho$  는 해수의 밀도( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $v$ 는 입자의 이동속도( $\text{m}/\text{s}$ )이다.

이 입자는 정상상태에서 분리력  $F_{Se}$  와 저항력  $F_{loss}$  가 균형을 이루고 있다고 말할 수 있다. 따라서 (3), (4)식에 의해 입자의 이동속도는 다음 식과 같이 나타난다.

$$v = \left( \frac{4}{3C_D \rho WL} IBD \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots(5)$$

여기서는 레이놀드 수  $Re < 2$  의 범위만을 고려하여 저항계수  $C_D = 24/Re$  의 실험치를 근사치로서 이용하면, (5)식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$v = \frac{1}{18\mu WL} IBD^2 \quad \dots(6)$$

이상으로부터 입자는  $Re < 2$  조건 아래에서는 (6)식의 운동속도로 분리측에 이동하게 된다.

### 3.2 분리특성의 계산방법

Fig. 4 는 분리율  $Se$  에 주목하여 MHD방식에 의한 해양유출 기름의 분리특성 계산을 위한 계산모델이다. 입자는 틈 없이 균일히 분리 셀 내에 들어가고, (6)식에서 유도하였던 속도로 운동하면서 분리된다고 한다. 그리고 분리된 입자를 포함한 해수는 A측으로, 분리되지 않고 배출된 입자를 포함한 해수는 B측으로 각각 배출된다고 한다. 먼저 분리율  $Se$  는 다음과 같이 정의한다.

$$Se = \frac{M_A}{M_A + M_B} \quad \dots(7)$$

여기서  $M_A$  는 A측의 배수에 포함된 입자의 질량( $\text{g}$ ),  $M_B$  는 B측의 배수에 포함된 입자의 질량( $\text{g}$ )이다. 또한, 입자는 틈 없이 균일하게 분리 셀 내에 진입하므로 분리율  $Se$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Se = \frac{A}{A + B} \quad \dots(8)$$

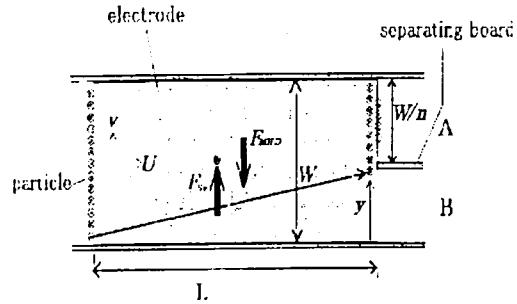


Fig. 4 Separation property of oil-contaminated seawater

여기서  $A$  는 A측의 배수에 포함된 입자의 개수,  $B$  는 B측의 배수에 포함된 입자의 개수를 나타낸다.

분리 셀 내에서의 해수유속은  $U(\text{m}/\text{s})$ 라고 하면, 입자가 분리 셀 내에 들어와 분리판이 설치된 출구까지 도달하는 시간  $t = L/U$  안에 분리방향으로의 이동거리  $y(\text{m})$  는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$y = \frac{U}{L} v \quad \dots(9)$$

여기서 B측 벽면 부근에 있는 입자는 출구에 도달할 때에 B측 벽면으로부터 분리방향으로  $y$  만큼 나아가게 된다. 또한 분리 셀 내의 중앙에 분리판이 설치되어있으므로  $W/2 - y$  사이에 있는 입자는 분리되지 않고 B측으로 배출되는 일이 존재한다. 단,  $W/2$  는 B측 벽면으로부터 분리판까지의 거리이다. 따라서 A측, B측으로 배출된 입자의 개수를 도출하여 (8)식에 대입함으로써 분리율  $Se$  는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Se = \frac{1}{2} + \frac{L}{WU} v \quad \dots(10)$$

또한 (5)식을 이용하면 분리율  $Se$  는  $Re < 2$  의 조건 아래에서 다음 식으로 나타난다.

$$Se = \frac{1}{2} + \frac{1}{18\mu W^2 U} IBD^2 \quad \dots(11)$$

위의 (11)식으로부터 분리율  $Se$  는 전류, 자기장, 해수유속, 입자직경의 함수로 나타낼 수 있으며, 각 함수에 따른 분리율을 수치계산에 의하여 구할 수 있다.

#### 4. 수치계산의 결과

실제로 분리율에 대하여 유도한 (11)식을 이용하여 수치를 대입을 통해 자장과 전류, 해수유속의 크기에 따른 분리율을 계산하였다. 이 때, 해수를 대신하여 3.5 %의 NaCl용액과 기름을 대신하여 직경이  $100\mu\text{m}$ 의 크기의 고분자 입자를 사용한 것으로 가정하였다. 또한 강한 자기장을 이용함으로써 비교적 작은 전류를 흘려도 큰 분리력을 얻을 수 있으므로, 본 계산에서는 전류의 범위를 0~1A, 자기장의 범위를 0~10T로 하였다.

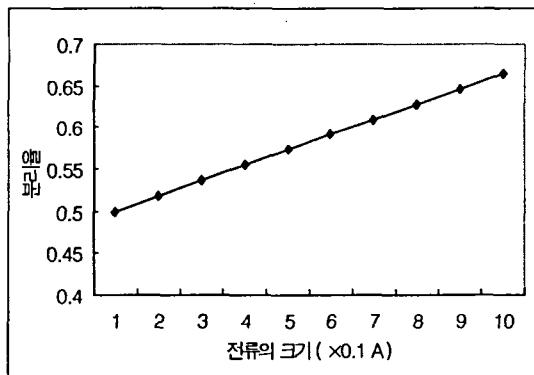


Fig. 5 Electric current dependency of separation ratio

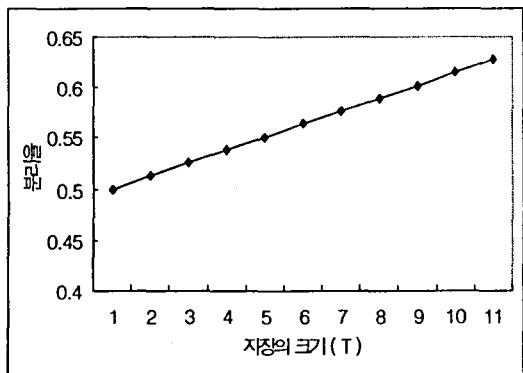


Fig. 6 Magnetic field dependency of separation ratio

먼저, 자기장을 10T, 유속을 0.1m/s로 일정하게 하고 전류의 크기를 변화 시켰을 때 얻어지는 분리율을 Fig. 5에 나타낸다. 이 그림에서 자기장을 일정하게 했을 때 분리율은 전류와 같이 거의 직선적으로 증가하는 것을 알았다. 또한 분리율  $S_C$ 는 0.9A에서 0.67정도이었다.

다음은 전류를 0.7A, 유속을 0.1m/s로 일정하게 하고 자기장

의 크기를 변화 시켰을 때 얻어지는 분리율을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서는 전류를 일정하게 하면 분리율은 자장과 같이 거의 직선적으로 증가한다. 또한, 유속과 전류가 각각 0.1m/s와 0.7A일 때, 10T에서 분리율  $S_C$ 는 0.63정도이었다. 이는 전류 또는 자기장의 증가에 따라 해수에 미치는 전자기력  $F_{MHD}$ 가 선형적으로 커지기 때문에 입자에 미치는 분리력  $F_{Se}$ 가 증가한다고 여겨진다.

계속해서 전류를 0.7A, 자기장의 크기를 10T로 일정하게 하고 유속의 크기를 변화 시켰을 때 얻어지는 분리율은 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에 유속의 크기를 0.03m/s~0.13m/s로 증가와 함께 시켰을 때, 해수의 유속의 증가와 함께 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 유속 0.03m/s일 때에 분리율은 0.93, 0.13m/s의 유속에서는 0.60정도를 나타낸다. 이것은 해수의 유속이 커지면 입자가 분리되기 전에 흘러가 버리기 때문이라고 여겨진다.

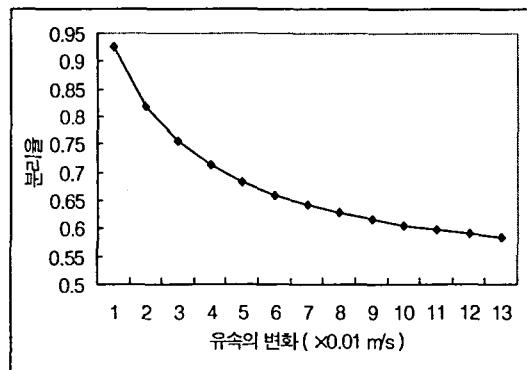


Fig. 7 Seawater velocity dependency of separation ratio

#### 5. 결 론

지금까지의 해양사고의 통계자료를 통하여 해양사고로 인한 기름유출이 큰 부분을 차지하였다. 이에 따라서 해양에서의 기름오염 사고는 사고 예방과 함께, 발생에 따른 신속하고 확실한 유출기름의 분리, 회수, 처리방법이 강구되어야 한다. 자성체를 살포하여 수중의 오염물질을 흡착 제거하는 자기분리법의 한 가지인 MHD방식은 보조물질을 사용하지 않으므로 2차적인 오염 피해가 없고, 회수 처리도 용이하다는 장점을 가지고 있다.

MHD방식의 이론적 계산식을 유도하여 자기장과 전류, 유속의 크기에 따라 분리율을 계산하였다. 그 결과 자기장과 전류에 대한 분리율  $S_C$ 는 선형적 관계를 가지며 대체적으로 1A, 10T 하에서는 0.67정도를 나타내었다. 유속의 경우는 작을수록 분리율이 컷으며, 0.03m/s에서 약 0.93 이었다.

결론적으로 MHD방식을 이용한 분리이론식에 의한 분리율의

결과를 살펴 볼 때 강한 자기장을 이용함으로써 작은 전류 하에서도 해양에 유출된 기름의 분리, 회수가 가능하고, 분리시의 유속을 가급적 작게 할수록 그 효과가 큼을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 한국해양연구원(2004), 해상유출사고 방제지원 시스템
- [2] 小原健司, 渡辺恒雄, 西嶋茂宏, 岡田秀彦, 佐保典秀(2002),  
應用物理, 第71卷, 第1号, pp.57-61.