

전자 유체 (MHD) 추진장치에 관한 연구 (I)

○ 공영경*, 최태인*, 공관식*, 김윤식**, 노창주**
 *국방과학연구소, **한국해양대학

A Study on the magnetohydrodynamic propulsion system.

Y.K.KONG, T.I.CHOI, K.S.KONG, Y.S.KIM, G.J.NOH
 *Agency for Defense Development, Chinhae, **Korea Maritime University

Abstract

The propulsion of a ship is generally generated by the propeller motion.

When we consider the importance of the acoustic noise of a ship, the epochal noiseless magnetohydrodynamic (MHD) propulsion system is studying now because the noise reduction of propeller has it's own limitation. This paper describes the characteristic analysis, theoretical analysis and efficiency versus thrust characteristics of MHD propulsion system.

When we generate 1 Tesla using normal conductor magnet, the efficiency is lower than 10 percent. It is essential to use superconducting magnet in order to increase the useful efficiency up to 50%.

The validity of MHD propulsion system can be confirmed by analyzing other countries model test result.

1. 서론

일반적으로 선박의 추진은 추진기(propeller)에서 발생 되는 추력에 의해 추진되는 것이 보통이다.

추진기 선박의 경우에는 추진기 소음이 상당히 크게 발생되기 때문에 소음감소를 위한 노력이 지속적으로 경주되고 있다. 이러한 소음감소 노력의 일환으로 추진기 선박과 비교하여 거의 무소음에 가까운 특성을 지닌 전자 유체(MHD) 추진장치가 초전도 물질의 발달과 더불어 획기적인 추진장치로 주목을 받고 있다. MHD 추진 개념은 1961년 W.A.Rice⁽¹⁾의 "propulsion system" 특허에서 처음으로 도입되어 1960년대에 주로 미국에서 J.B.Friauf⁽²⁾, O.M.Phillips⁽³⁾ 등에 의하여 그 가능성과 추진 이론 등에 대한 이론적 해석이 수행되었고, 그 후 D.Bryson⁽⁴⁾에 의해 해수에서 전자기적 기본이론을 바탕으로 한 로렌츠 힘(Lorentz Force)이 발생함을 실험적으로 입증하였다. 1963년 R.A.Doragh⁽⁵⁾는 MHD 펌프개념의 MHD 펌프제트 추진 시스템 특성을 규명하였으며, 1965년 S.Way⁽⁶⁾는 R.A.Doragh의 내부자장식에 비해 외부자장식 MHD 추진 이론을 정립하였다. 이러한 외부자장식 추진이론을 근거로 미국에서 상

전도자석을 사용한 EMS-1 모형실험선을 제작 실험한 바 있다. 1976년 일본 고베대학의 Saji 교수는 0.6T 정도의 초전도 코일을 이용한 소형 전자추진 모형선 SEMD-1에 의한 수조실험을 실시하였고, 1979년에는 길이 3.6m 크기와 2.0T 정도의 초전도 전자 추진 모형선(ST-500)에 의한 수조시험으로써 이론해석과의 일치함을 확인하였다. 최근에 이르러서는 일본의 조선 진흥재단이 1991년 완성을 목표로 4T 정도의 초전도 전자 추진선인 YAMATO-1호를 연구개발하고 있다. 아직 국내에서는 MHD 추진에 대한 연구가 그리 많지 않는 점을 고려, 본 논문에서는 전자 유체 추진장치에 대한 특성 분석, 이론 및 실험적 고찰 및 추력-효율특성에 대하여 연구하였다.

2. MHD 추진 특성

2.1 추진원리

그 원리는 전자기학 기본법칙의 한가지인 플레밍의 왼손법칙을 응용한 것으로서 그림 1에 표시하는 바와 같이 선체에 고정된 자석과 전극에 의해 해수 중에 형성된 전장과 자장과의 상호작용에 따라 발생된 전자력(로렌츠 힘)을 배의 추진력으로 이용한 것이다.

플레밍의 왼손법칙은 식(1)과 같이 표시된다.

$$F = I \times B \times L \quad (1)$$

단, F : 전자력 (N)

I : 전류밀도 (A/m²)

B : 자속밀도 (T)

즉 전자력은 전류와 자장의 크기에 비례하고, B와 I가 직교할때 F는 최대가 된다.

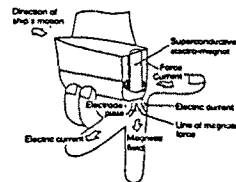


그림 1. 전자 유체 추진 원리도

2.2 MHD 추진 특성

전자 유체 추진방법은 표 1과 같이 크게 4종류로 분류할 수 있다. 자장으로는 교류자장 또는 직류자장을 이용하는 방법이 있고, 또한 자장의 작용영역에 따라 자장이 선체 외부에 형성되는 외부 자장방식과 선체에 형성되는 내부 자장방식이 있다.

표 1. 전자 유체 추진방식

자장영역 자장종류	선 내	선 외
직 류	직류 내부 자장방식	직류 외부 자장방식
교 류	교류 내부 자장방식	교류 외부 자장방식

교류자장을 이용한 방법은 해수 중에 형성된 교류자장과 이것에 의해 유기된 유도전류와의 상호작용에 의해 추진력을 얻는 방식으로서 해수 중에 직접 통전할 필요가 없는 잇점이 있으나 강력한 진행자장을 초전도 코일로써 발생시켜야 하는 등의 기술적 어려움이 있다.

외부 자장방식의 경우는 선체 주위에 자장과 전장을 형성하기 때문에 해양 환경에 미치는 영향을 무시할 수 없다. 한편 내부 자장방식의 경우는 자장과 전장의 작용영역이 선체를 관통하는 닥트의 일부에 한정되기 때문에 이러한 해양환경에 미치는 영향이 극히 미소하다. 표 2에 내부 자장방식과 외부 자장방식과의 비교를 나타내주고 있다.

표 2. 내부 자장방식과 외부 자장방식

항 목	내부 자 장 방 식	외부 자 장 방 식
추진방법	닥트내 해수가압, 분사	선체주위 해수 가속
전자장 분포형태	닥트내에서 거의 일정	거리에 따라 변화
전자장누설	닥트 외부로 누설이 적다	외부로의 누설이 크다
자기차폐	닥트내에서 처리가 용이	선체보호 자기차폐 가능하나 선외에 대해서는 처리가 곤란
추진성능	외부 자장방식에 비해 추정 용이	추정이 곤란
외부환경 영향	미 소	크 다

전자 유체 추진선의 최대 특징은 동력 전달축이 없으므로 종래의 추진기 선박과 비교하여 다음과 같은 여러가지 특성을 지니고 있다.

- 기계적 회전부분이 없으므로 이것에 기인되는 진동, 소음이 없어 정속 운전이 가능하고 보수, 관리가 용이하다.
- 자장 세기가 일정할 경우 전류 세기에 비례하기 때문에 속도제어가 용이하고 속용성이 좋다.

- 추력의 발생방법이 추진기에 의존하지 않고 자장과 전장의 상호작용에 의한 전자력을 이용하기 때문에 이론적으로 고속 영역에도 적합하다.
- 선체 관통 회전축계가 없으므로 선형과 선미형상 설계에 용용성을 발휘할 수 있다.

3. 이론 및 실험적 고찰

3.1 기본 이론

전자력을 생각할 때에는 항상 자장 H가 존재한다. 자장의 발생은 전류에 의해 발생되며, 일반적으로 자장이 변화하면 전장 E가 유기되고, 유도전류가 발생한다. 이러한 자기학에서의 기본이론이 곧 전자추진의 기본이라 할 수 있으며 Maxwell 방정식이 곧 그것이다.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

또한

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (8)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

3.2 이론해석

표 1에서 분류된 자장방식에 따른 이론적 해석을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 직류 외부 자장식인 2극 구조를 가진 방식에 대해 살펴보기로 한다. 그림 2-3에 각각 전·자계 형태와 좌표계를 표시하고 있다. 2극 좌표에서

$$\phi = \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad \theta = \theta_1 - \theta_2, \quad \text{전극 표면에서는 전극높이 } \epsilon \text{과}$$

관련하여

$$\phi_0 = \ln \frac{c}{2b + \epsilon} \quad \text{또는} \quad \phi_0 = \ln \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \quad (10)$$

단 θ_0 는 전극 표면이 선체의 만나는 각도
직각 좌표계에서

$$\phi = \frac{1}{2} \ln \frac{X^2 + (y-b)^2}{X^2 + (y+b)^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{y-b}{X} - \tan^{-1} \frac{y+b}{X} \quad (11)$$

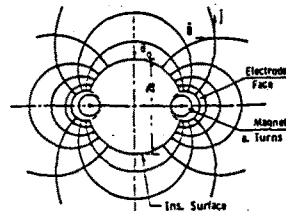


그림 2. 전·자계 형태

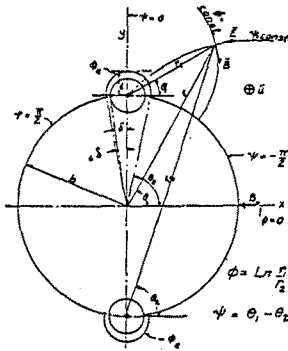


그림 3. 전·자계 좌표

ϕ 와 φ 의 크기는 동일하므로 h 로 표시하면

$$|\text{grad } \phi| = |\text{grad } \varphi| = h \quad (12)$$

복소함수 $w(\zeta)$ 로 ϕ, φ 의 실수, 허수부로 표시할 수 있으므로

$$w(\zeta) = \ln \frac{\zeta - ib}{\zeta + ib} \quad (13)$$

ϕ, φ 에 관해 전, 자장 벡터로 나타내면

$$B = -B_0 \cdot \text{grad } \varphi \quad (14)$$

$$E = -\frac{V_e}{\phi_0} \text{grad } \phi \quad (15)$$

단, B_0 는 $r = b, \theta = 0$ 에서 크기이고, V_e 는 $(\phi = \phi_0)$ 좌편 전극 전위, $-V_e$ 는 우편 전극 전위이다.

입의점에서 $\text{grad } \varphi$ 의 성분은

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{b-y}{x^2+(y-b)^2} + \frac{b+y}{x^2+(y-b)^2}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{x}{x^2+(y-b)^2} + \frac{x}{x^2+(y-b)^2}$$

$\text{grad } \phi$ 성분은

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (17)$$

전극에 의한 전위 V 는

$$V = \frac{V_e \phi}{\phi_0} \quad (18)$$

전류 벡터 J 는

$$J = \sigma(E + U \times B) \quad (19)$$

(19) 식의 $U \times B$ 는

$$U \times B = -U \frac{B E}{E} \quad (20)$$

B 와 E 의 크기는

$$B = B_0 h, \quad E = -\frac{V_e}{\phi_0} h \quad (21)$$

$\frac{UB}{E}$ 를 n 로 표시하면

$$n = \frac{UB}{E} = -\frac{UB_0 \phi_0}{V_e} \quad (22)$$

따라서

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}(1-n) \quad (23)$$

$$J = \sigma E(1-n) \quad (24)$$

단위체적당 로런츠 힘은

$$jB = -\sigma(1-n) \frac{V_e h^2 B_0 b}{\phi_0} \quad (25)$$

전체 추진력 F 는

$$F = 4a \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\phi_0}^{\phi_0} J \frac{B d\phi d\theta}{b^2} = 2\pi a \sigma B_0 V_e (1-n) \quad (26)$$

추력 P_t 는

$$P_t = F U = 2\pi a \sigma B_0 V_e U (1-n) \quad (27)$$

선체 한측면에 흐르는 전류 I 는

$$I = a \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (J)_{y=0} dx = -\frac{\pi \sigma}{2 \phi_0} (1-n) V_e a \quad (28)$$

입력 전력 P_E 는

$$P_E = 4V_e I = -2\pi \sigma a (1-n) \frac{V_e^2}{\phi_0} \quad (29)$$

추진효율 η 는

$$\eta = \frac{P_t}{P_E} = n \quad (30)$$

3.3 실험적 결과 분석

1960년대에 확립된 이론에 의거하여 1966년도에 0.015 Tesla 정도의 상전도 자석을 사용한 EMS-1 모형선에서는 그 당시로서는 초전도 자석의 개발이 미진한 관계로 상전도 자석을 사용하였다. 얻어진 효율이 1% 이하로서 실용효율을 얻기 위해서는 초전도 자석의 사용이 필수적이어야 됨을 확인시켜 주었다. 또한 지금까지 알려진 주요 전자유체 추진선의 실험자료는 표 3과 같다.

표 3. 주요 전자 유체 추진선

종류 내용	EMS-1	SEMD-1	ST-500	SEMD-4A	YAMATO-1
년 도	'66	'76	'79	'76	'85-'91
전자석	상전도 (Cu)	초전도 (Nb-Ti)	초전도 (NbTi/ZrTa)	초전도 (Nb-Ti)	초전도 (NbTi/Cu)
자장세기(T)	0.015	0.6	2	(7)	4
속도(m/s)	0.4		0.6	(5)	4
전류(A)	91.3	20	65		2,000
효 율		0.1%		50%	

MHD 추진효율에 영향을 미치는 요소들로서는 효율식

$$\eta = \frac{1}{\frac{J}{\sigma \cdot B \cdot U} + 1} \quad \text{에서 보는 바와 같이 해수 통전전}$$

류를 낮추어 Joule 열에 의한 전력 손실을 감소시키거나, 해수의 전도도 σ , 자장의 세기 B 를 증대시켜야 한다. 이 중에서도 자장의 세기를 증대시키는 방안이 표 3에서와 같이 초전도 자석의 발달과 더불어 가장 주목을 받고 있는 실험

이다. 이러한 초전도 자석의 사용에 수반하여 자석의 지지 문제가 필수적으로 해결되어야 할 것이다.

MHD 추진의 실용화를 위해 해결해야 할 또다른 기술로서는 누설자장의 차폐화와 해수의 전기분해에 따른 독성가스 발생 방지 기술이다.

누설자장의 차폐화기술은 초전도 필름을 이용하여 $0.27T/\mu m$ 차폐능력을 가질 수 있는 초전도 필름개발이 진행 중에 있으며, 독성가스인 $NaOCl$ 대신 O_2 발생이 될 수 있는 새로운 형태의 전극개발이 연구 중에 있다.

4. 결론

이상의 MHD 추진장치에 대한 이론 및 실험적 연구로부터

- (1) 실용효율을 얻기 위해서는 초전도 자석의 사용이 필수적이며 최소한 5T 이상의 자장 세기를 가져야 한다.
- (2) 누설자장의 차폐와 독성가스 발생방지가 해결된다면 추진효율은 다소 떨어지나 외부 해양환경에의 영향, 추진 시스템 설계 및 제작 등을 고려할 때 적류 내부자장 방식이 유리하다.
- (3) 향후 초전도 전자 유체 추진선의 구성을 위해서는 초전도 자석에 대한 냉각장치와 여자용 전원장치 등도 효율적으로 고려되어야 한다.

참 고 문 헌

- (1) W. A. RICE : U. S. Patent 2, 997, 013 (1961)
- (2) J. B. Friauf : Electromagnetic Ship Propulsion, Journal of American Society of Naval Engineers, Feb. 1961, pp 139-142.
- (3) O. M. Phillips : The prospects for Magneto hydrodynamic Ship Propulsion, J of ship Res., (1962), 43.
- (4) D. Bryson : Design and Testing of a Magnetohydrodynamic System, Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Pittsburg, 1959.
- (5) R. A. Doragh : Magnetohydrodynamic Ship Propulsion Using Superconducting Magnets, Society of Naval Architects and Marine Engineering Annual Meeting, New York, Nov. 14-15, 1963
- (6) S. Way : Propulsion of Submarine by Lorentz Forces in the Surrounding Sea, paper 64WA/ENER7, Nov. 1964.
- (7) Akira Iwata : Superconducting Electromagnetic propulsion system, Journal of the MESJ, Vol.24, NO.2, 1988.