

MHD 추진장치내의 자기유체 유동에 관한 실험적 연구

노창주* · 김윤식* · 공영경** · 이성근***

An Experimental Study on Magnetohydrodynamic Flow in MHD Propulsion System

C. J. Noh · Y. S. Kim · Y. K. Kong · S. K. Lee

Key words : Magnetohydrodynamic flow(전자유체유동), MHD propulsion system(MHD추진 시스템), Thrust(추력), MHD duct(MHD 덕트), MHD thruster(MHD 추력장치).

Abstract

Usually ship is propelled by the conventional propeller. When the conventional propeller is used for ship's propulsion, reduction of propeller noise is a big issue in some special vessel. In order to reduce the acoustic noise of the propeller, novel propulsion system named as MHD propulsion system has been studied among researchers.

In this paper, thruster characteristic analysis and system analysis of MHD propulsion system have been carried out. Firstly basic experimental apparatus is designed, fabricated and installed and test is carried out. Test results are compared with numerical analysis.

It is confirmed that test results agreed with numerical results satisfactorily.

1. 서 론

일반적으로 선박의 추진은 프로펠라 라고 하는 추진기(propeller)에 의해 추진되는 것이 보통이다. 이러한 추진기를 사용할 때 발생하는 추진기 소음은 소음 특성을 중요시하는 특수 선박의 경우에는 추진기 소음 감소를 위해 지속적으로 노력해 왔다. 이러한 추진기 소음 감소에는 그 한계가 있어 최근에는 초전도 물질의 발달에 따라 새로운 추진방식인 MHD(Magneto Hydro Dynamics) 추

진 방식이 활발히 연구되고 있다. MHD 추진 방식은 구동부가 없어 거의 무소음에 가까운 특성을 지니고 있다. MHD 추진의 원리는 전극을 통해 직접 해수에 흘리는 전류와 자석에 의해 만들어진 자속이 직교할 때 플레밍의 왼손법칙에 따라 자장과 전장이 이루는 평면에 직각방향으로 작용하는 로렌츠 힘을 선박의 추진력으로 이용하는 것이다.

MHD 추진에 대한 기본적인 이론은 1961년 MHD 덕트형의 추진기를 고려한 Friauf¹⁾에 의해 제시되었다. 또한 이것에 기초하여 Rice²⁾는 액체

* 정회원, 한국해양대학교

** 정회원, 국방과학연구소

*** 정회원, 충남전문대학

금속을 사용하는 MHD 펌프와 유사한 개념의 MHD ship propulsion을 제안하였다.

1963년 Doragh³⁾는 그 당시로는 실용불가능한 10 T(Tesla) 강도의 자장을 발생시키는 초전도 자석을 MHD 추진에 사용하고자 하였다. 초전도 자석 이용은 강한 자장을 발생시키는 데 필수적이다. 1966년 Westinghouse의 Way⁴⁾는 MHD 추진 방식의 모형선 실험을 수행하여 이론식의 합당성을 입증하였다. 1970년 이후에는 일본에서 주로 MHD 추진에 대해 활발히 연구가 진행되었다. 일본 고베 대학의 Iwata et al⁵⁾는 초전도 자석을 이용한 최초의 MHD 추진 실험을 수행하였다. 그후 보완된 모형선인 ST-500은 최대 2.0T의 자기장을 발생시켜 15N의 추진력과 0.6m/s의 유출속도를 얻었다. 최근에는 일본에서 최초의 실험선인 YAMATO-1을 실제 해수에서 시험 항해시키는데 성공하였다. 이 YAMATO-1은 최고 속도가 4m/s 정도이며, 추진 효율은 1.7%정도로서 추진 효율 측면에서는 아직 기존의 프로펠러 추진기 효율과는 큰 차이를 보이고 있다.

이러한 세계적인 연구 추세에 따라 본 연구에서 국내에서는 처음으로 기본 실험장치를 구성하여 MHD 추진을 위한 기본이론 연구와 실험된 결과를 수치해석 결과등과 비교 검토 하였다.

2. MHD 추력 특성 해석

MHD 추진 시스템의 경우, 추진 효율이나 기타 성능이 자기장의 세기 및 분포, 전류밀도, 유동장, 선박의 형상 및 크기, 평균 유속 등에 의하여 민감하게 변화한다. 부분적으로 제시된 이론식들과 관련된 MHD 추진 효율을 일반적으로 나타내어 해수가 사각 단면의 MHD 덕트를 흘러 지나갈 때의 유동 특성에 대해서 알아보는 것은 의미있는 일이다. MHD 추진 시스템의 추진성능은 무차원 전위 $\zeta = \frac{LzUBy}{\Phi}$ 에 의해 특성지워진다.

유체가 흘러가는 방향의 전체길이 Lx , 자기장이 작용하는 방향의 전체길이 Ly , 전기장이 작용하는 방향의 전체길이가 Lz 인 MHD 덕트를 고려하고, 덕트 길이 방향의 유속을 U , 단위면적당 자장의 세기를 By , 전위 포텐셜을 Φ 라 하면, 이때 도입된 가

정은 다음과 같다.

1) 덕트 양단에서의 가장자리 자장과 양전극에서의 유도 전류에 의해 발생하는 자장을 무시한다. 즉, 자장은 덕트 내에서 균일한 것으로 가정한다.

2) 덕트 양단의 가장자리 전장은 무시하며, 전장은 덕트 내에서 균일한 것으로 가정한다.

3) 덕트 내부유동은 층류로 간주한다.

이상과 같은 가정하에서 MHD 추진과 관련된 이론식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f &= J \times B \quad [N/m^3] \\ \mathbf{F}x &= |Jz \times (-By)| \\ Fx &= fxLxLyLz \\ &= \sigma By \left(\frac{\Phi}{Lz} - UBy \right) LxLyLz \\ &= \frac{\sigma By \Phi}{Lz} \left(1 - \frac{LzUBy}{\Phi} \right) LxLyLz \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 σ 는 해수의 전기전도율(mho/m)을 의미하며, 수식 유도에 사용될 변수들인 I, R, ζ , 그리고 $K(\zeta)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} I &= JxLxLy \quad [A] \\ &= \sigma \left(\frac{\Phi}{Lz} - UBy \right) LxLy \\ &= \frac{\Phi}{R} (1 - \zeta) = \frac{\Phi}{R} K(\zeta) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} R &= \frac{Lz}{\sigma LxLy} \\ \zeta &= \frac{LzUBy}{\Phi} \end{aligned}$$

압력항과 전자기력항 외의 다른 항들은 이들 항에 비해 상대적으로 매우 적은 값이므로 추진력 f_x 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} fx &= \frac{\sigma By \Phi}{Lz} \left(1 - \frac{LzUBy}{\Phi} \right) \\ &= \frac{\sigma By \Phi}{Lz} K(\zeta) \\ &= \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (3)$$

위식을 덕트의 전 구간에서 적분하면

$$\begin{aligned} \Delta P_{th} &= \frac{Lx}{Lz} \sigma By \Phi K(\zeta) \\ &= \frac{\Phi}{R} \frac{By}{Ly} K(\zeta) = \frac{By}{Ly} I \end{aligned} \quad (4)$$

ΔP_{th} 가 positive 일 때 추진 시스템은 MHD 펌프로 작동하게 되는데 이 경우의 조건식은 다음과 같다.

$$K(\zeta) = 1 - \zeta = 1 - \frac{LzUBy}{\Phi} > 0, \Phi > LzUBy$$

또한 종합 MHD 추진 시스템의 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{MHD} = \eta_e \cdot \eta_m$$

여기서

η_e : electric efficiency

η_m : mechanical/hydrodynamic efficiency

MHD 추진체의 출력(MHD 추진력과 유속의 곱)과 입력전력(전류와 전압의 곱)의 비, 즉, 전극 사이에 작용하는 동력과 전자석에 필요한 동력을 수동력으로 변환시키는 효율인 η_e 의 계산에는 자장형성에 필요한 전력 소모를 고려하지 않으면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta_e &= \frac{FxU}{\Phi I + \Phi m Im} \\ &= \frac{(JzByLxLyLz)U}{\left(\frac{JzLz}{\sigma} + UByLz\right)(JzLxLy) + \Phi m Im} \\ &= \frac{ByU}{\left(\frac{Jz}{\sigma}\right) + UBy + \Phi m Im} \\ &= \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{Jz}{\sigma UBy}\right) + \Phi m Im\right)} \end{aligned} \quad (5)$$

윗 식에서 Φm 과 Im 은 각각 전자석에 소요되는 전위와 전류, Lz 은 두 전극 사이 간격, Φ 는 두 전극 사이의 전압, Jz 는 전류밀도, By 는 자속밀도를 나타낸다. Φm 과 Im 을 고정시킬 경우, η_e 를 증대시키기 위해서는 Jz 를 낮추거나, σUBy 를 증가시켜야 한다. 따라서 해수의 온도나 염도를 높임으로써 해수의 전기 전도율(σ)을 높이고 또한 자속밀

도(By)를 증대시킴으로써 실질적인 효율 증대 효과를 얻을 수 있다.

3. 수치해석 알고리즘

유도된 이산화 방정식은 Spalding에 의해 제안된 Simple Algorithm⁶⁾을 적용하여 계산하는데, 이때 계산된 속도 값들은 가정된 압력 분포로부터 구해지므로 연속적인 하향 이완(SUR : Successive Under Relaxation)을 적용하여 새로운 값으로 대체되어 진다.

즉 A_p 는 $\frac{Ap}{\alpha}$ 로, $b + \phi_p^n \frac{(1-\alpha)}{\alpha} A_p$ 로 대체된다. 여기서 n 는 바로 직전의 반복 횟수를 의미하며, α 는 이완 계수인데, 최적 α 값은 문제의 성질, 격자수, 격자간격, 그리고 사용된 반복 계산법 등의 인자에 관련되어진다. 본 계산에서는 유동 변수를(P, U, V, W)에 따라 이완계수를 각각 다르게 고려하였는데, 대략 0.1~0.5 사이의 값을 택하였다. 가정된 압력 분포로부터 속도 등의 변수값을 구하는데, 정확한 압력장이 가정되지 않는한, 결과로 얻은 속도장은 연속방정식을 만족시키지 못하게 된다. 그래서 가정된 압력장 P^* 로부터 *표 속도장이 점차적으로 연속방정식을 만족시키도록 P^* 를 보정하는데, 이때 연속방정식을 이용한다.

연속방정식을 만족시키는 유동 변수 P, U, V, W는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= P^* + P' \\ U &= U^* + U' \\ V &= V^* + V' \\ W &= W^* + W' \end{aligned}$$

여기서, P' 는 압력 보정(pressure correction), U' , V' , W' 는 속도 보정(velocity correction)을 의미한다. 이들을 연속방정식에 대입하면 압력 보정 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \sum A_p P p' &= \sum_i A_i P i' + b' \\ \text{여기서는 } & E, W, N, S, T, B \end{aligned} \quad (6)$$

결국, 압력 수정은 질량 생성항인 b' 을 0으로 만 들어야 한다.

압력 보정 방정식은 유동변수의 수렴 여부를 판

정하는 기준이 되는데, 이에 근거하여 해를 구하는 과정은 TDMA(Tridiagonal Matrix Algorithm)를 이용한 반복 계산 방식을 수행하게 된다. 수치해를 반복법을 이용하여 구하는 과정에 있어서 충분히 수렴했는지를 조사하는 일은 매우 중요하다.

본 계산에 있어서, 계산 종료는 주어진 반복 계산 횟수와 U, V, W, P 등 새로 계산된 값과 바로 이전 이들 값과의 상대적인 차이로 정의되는 Residual의 최대치의 평가에 의해 이루어진다. 각 격자점에서의 Residual은 다음과 같다.

$$\text{Residual} = \sum_{all\,c,v} \left(\left(Ap\phi_p^n - \sum_i Ai\phi_i^n - b^{n+1} \right) \right) \quad (7)$$

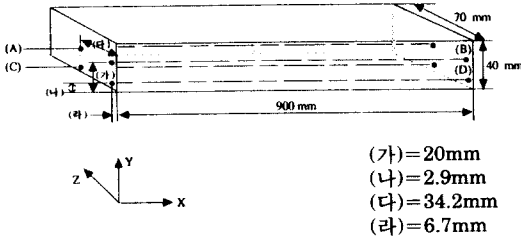


Fig. 1 Representation of duct used for numerical analysis

여기서, n은 iteration step을 의미하며, 수렴기준은 Residual의 최대값이 주어진 기준치 보다 작게 되었을 때 수렴한 것으로 판정하였다.

본 알고리즘을 사용하여 계산에 이용된 덕트 크기, 격자점 정의, 격자점은 Fig. 1~3에 나타나 있으며, 계산된 속도 분포 및 압력 분포는 Fig. 4, 5에

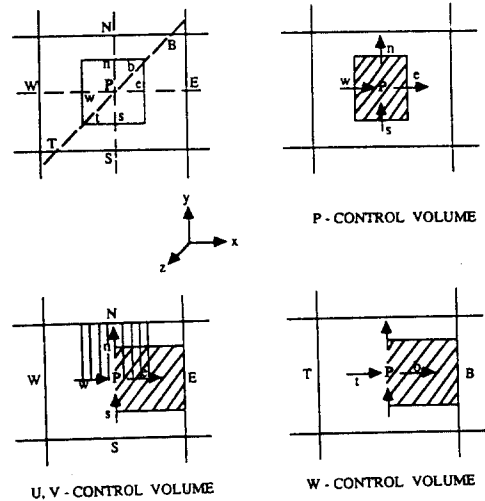


Fig. 2 Definition of the staggered control volume

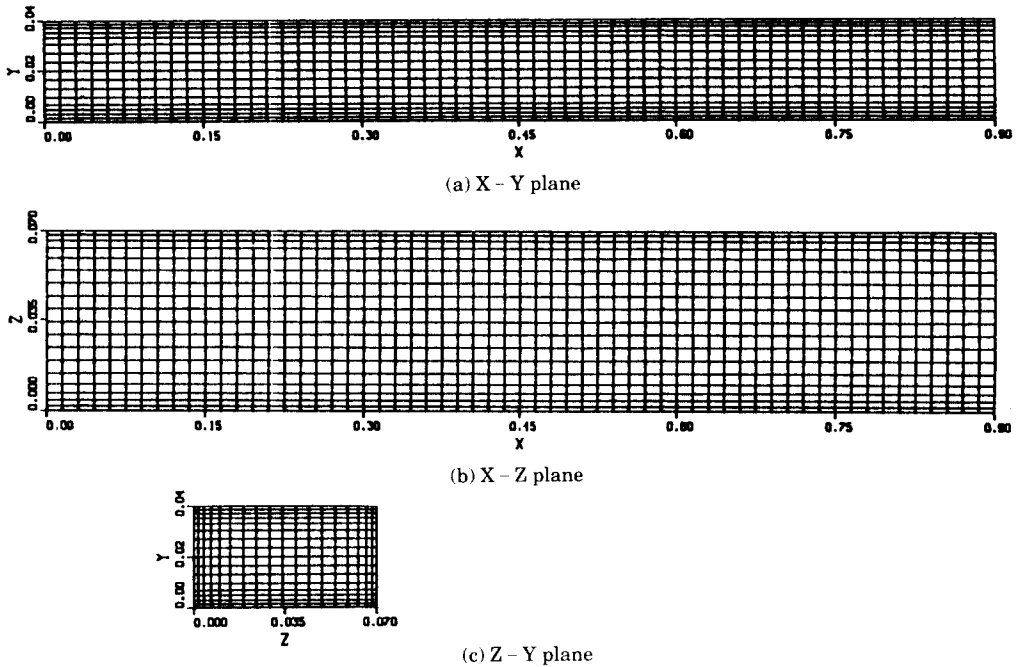


Fig. 3 Grid system used for the flow in duct(61 × 18 × 26)

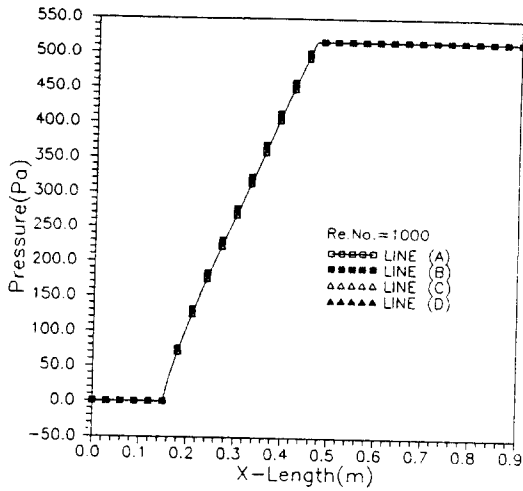


Fig. 4 Behavior of pressure along the line (A),(B), (C) and (D) with Lorentz force=0.0857 [N/m³]

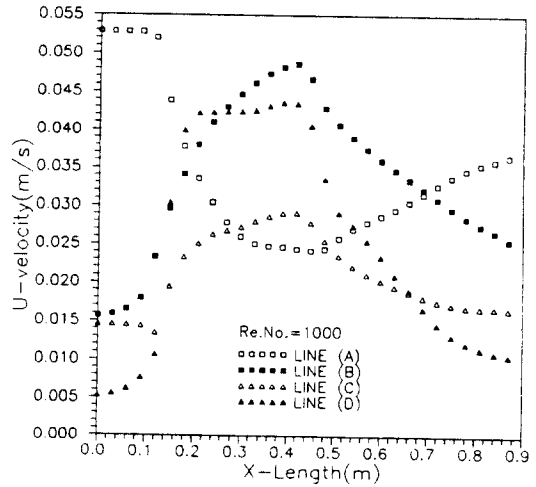


Fig. 5 Behavior of u-velocity along the line (A), (B), (C) and (D) with Lorentz force=0.0857 [N/m³]

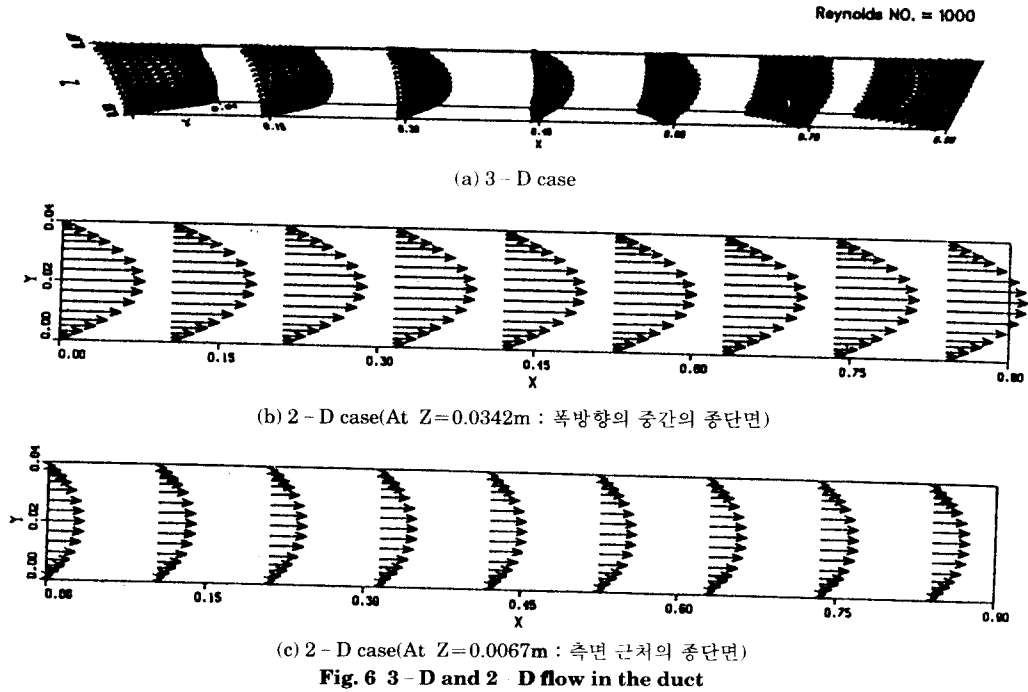


Fig. 6 3-D and 2-D flow in the duct

표시하였다. 또한 일반적인 덕트 흐름과 MHD 덕트 흐름을 Fig. 6, 7에 나타내었다.

4. 실험장치 및 실험결과 고찰

4.1 실험장치

철심용 소재는 인성과 연성이 매우 큰 극저탄소

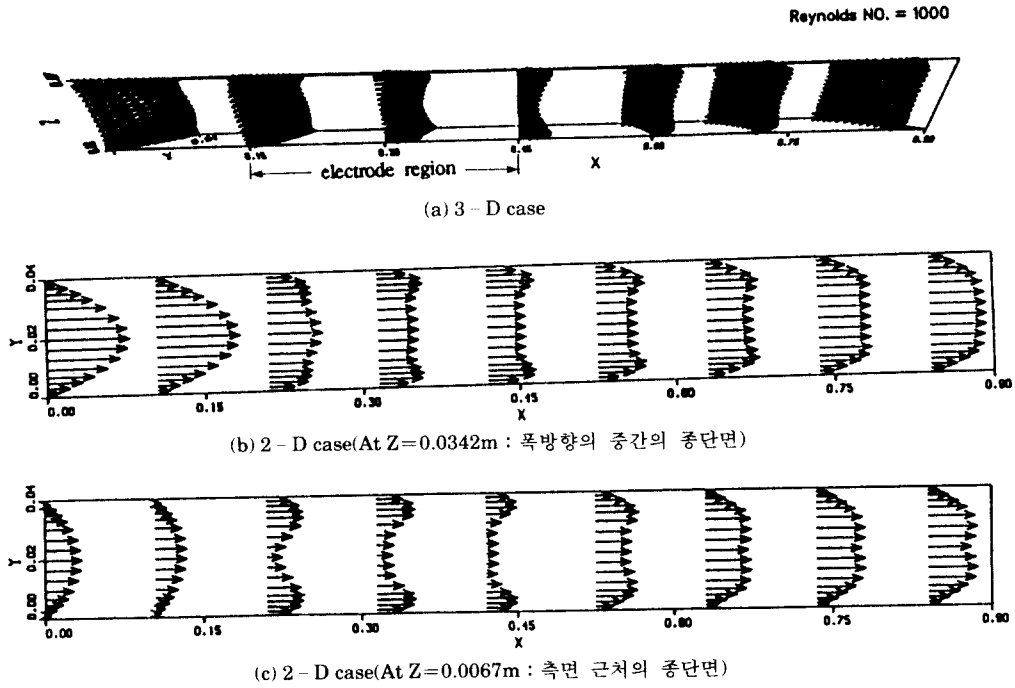


Fig. 7 3 - D and 2 - D flow in MHD duct

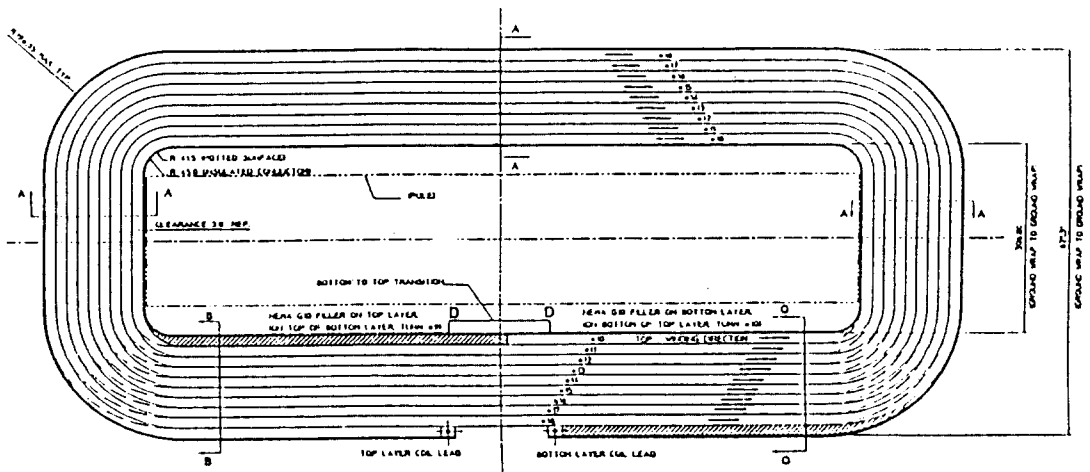


Fig. 8 Coil of dipole magnet

강인 0.25% 규소 함유 얇은 철판을 두께 1.0mm로 냉간 압연한 후 750℃에서 3분간 소둔한 제품을 사용하였다. Fig.8은 이와같은 소재를 사용하여 만든 2극 전자석 설계 도면이다. Fig.9는 길이 2000mm, 폭 1000mm, 두께 300mm의 정반위에 놓인 전자석 시스템이다. Fig.10은 전자석의 윗쪽

반평면에서의 자속 분포(magnetic flux line)를 나타내는 것으로 MHD 덕트가 놓일 부분에 균일한 자장분포를 가지며 Magnet yoke 바깥 부분의 잔류 자장은 100 Gauss 이하이며, 최대 자속밀도는 1.7T이다. Fig. 11는 MHD 덕트가 놓일 부분의 Magnet pole 형상과 폭 방향 자속밀도 변화를 최

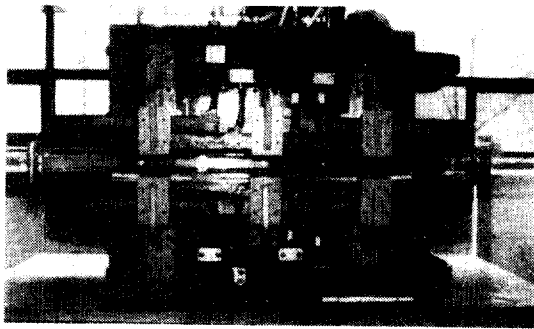


Fig. 9 Photograph of dipole magnetic system

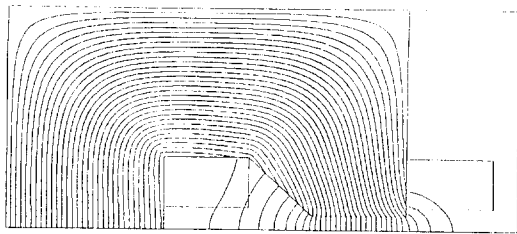


Fig. 10 Magnetic flux lines of half plane for the dipole magnet

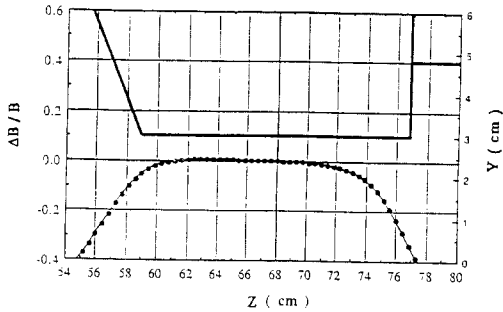


Fig. 11 Magnetic flux density in which direction

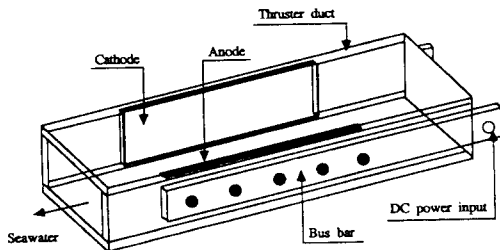


Fig. 12 Schematic view of Electrodes and Bus Bar



Fig. 13 Schematic diagram of MHD thruster experimental apparatus

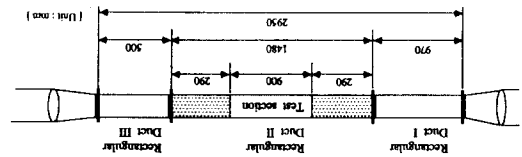


Fig. 14 Design of MHD thruster duct

대 자속 밀도 $B=1.7$ T의 경우에 대해 계산한 결과를 나타낸다. 여기서 보면 $X=61\sim 70$ cm 사이에서 거의 균일한 자기장 분포를 가진다.

본 실험에 사용된 전극판이 설치된 덕트 모양과 전극 부분 단면도를 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 13은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이며, MHD 덕트는 40×70 mm의 사각 단면적이며, 길이는 900mm이다. MHD 덕트와 연결 덕트에 대한 설계도를 Fig. 14에 나타내었는데, 그림에서 보는 바와 같이 MHD 덕트 상류측에 약 1.5m 길이의 입구 사각 덕트를 설치하여, 완전히 발달된 형태의 유동을 MHD 덕트 입구조건으로 가지도록 하였다.

4. 2 실험결과 고찰

Fig. 15.1, 15.2, 15.3은 $L_x=100, 500, 900$ mm 경우, 세가지 높이 방향의 위치 $L_y=1, 3, 5$ cm에 대해서 폭 방향을 따라 특정한 자장 분포를 나타낸 것이다. Fig. 15. 4는 덕트 중앙에서 길이 방향 (L_x)을 따라 측정된 자장의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 길이방향의 양 끝단부와 폭 방향

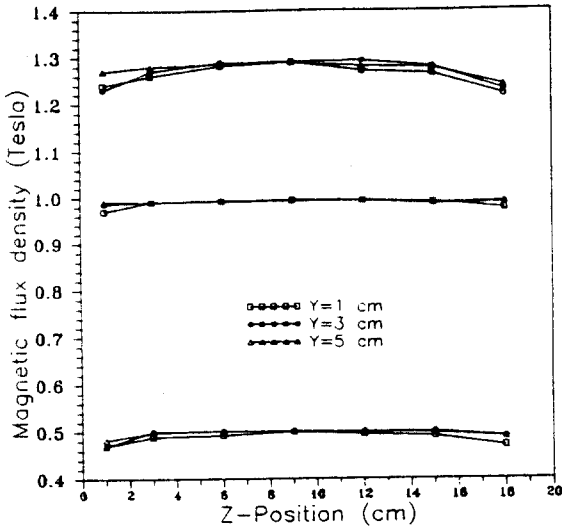


Fig. 15.1 Distribution of magnetic flux density at $x=10\text{cm}$

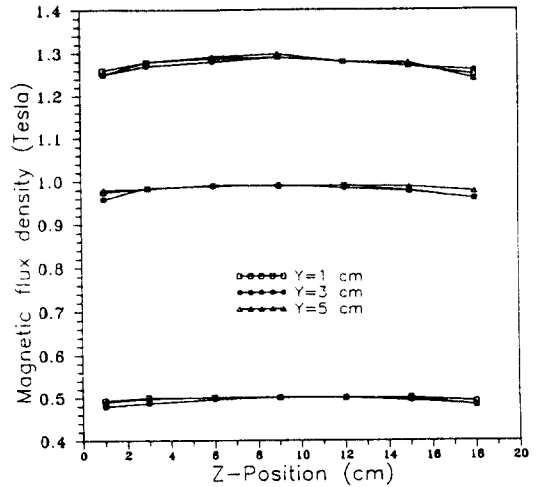


Fig. 15.3 Distribution of magnetic flux density at $x=90\text{cm}$

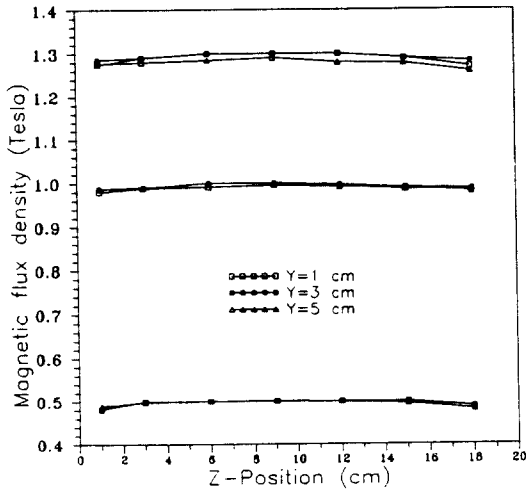


Fig. 15.2 Distribution of magnetic flux density at $x=50\text{cm}$

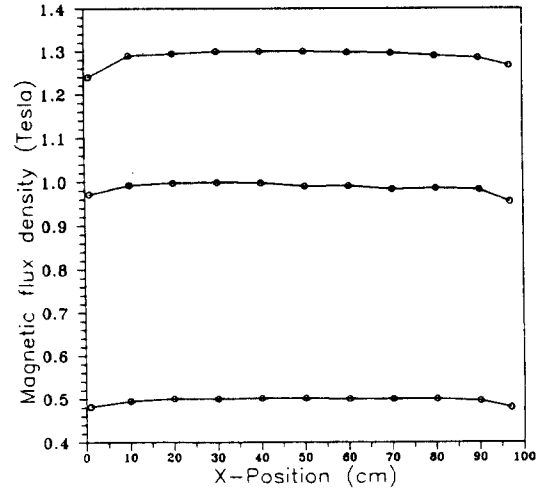
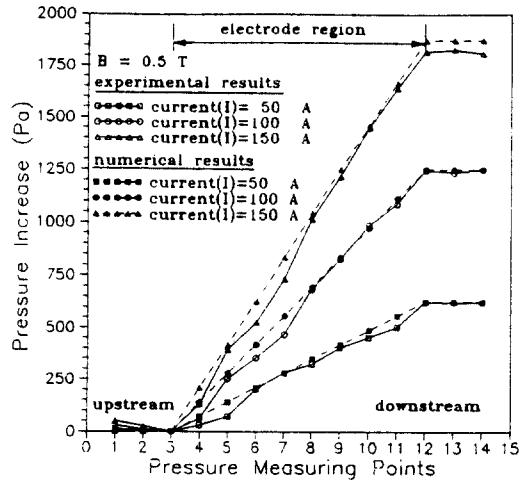


Fig. 15.4 Magnetic flux density vs DC output current for dipole magnet

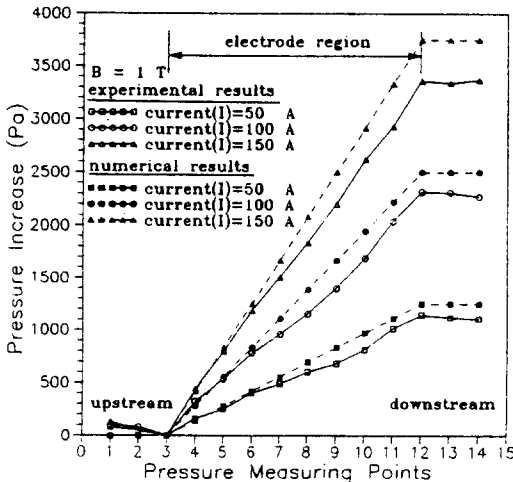
의 양 끝단부를 제외하고는 거의 균일한 자장을 보여주고 있다.

Fig.16은 자속밀도 $T=0.5, 1, 1.3$ Tesla로 고정된 상태에서 전극에 가해지는 전류를 변화시키면서 덕트 표면을 따라 측정된 압력분포의 변화를 나타낸 것이다. 균일한 자장과 전장이 작용하는 구간인 측정위치 3번과 12번 사이에서는 거의 선형적인 압력 증가를 볼 수 있다. 1번에서 3번, 12번에서 14번 사이 구간은 dipole 코일의 곡선부에 해당

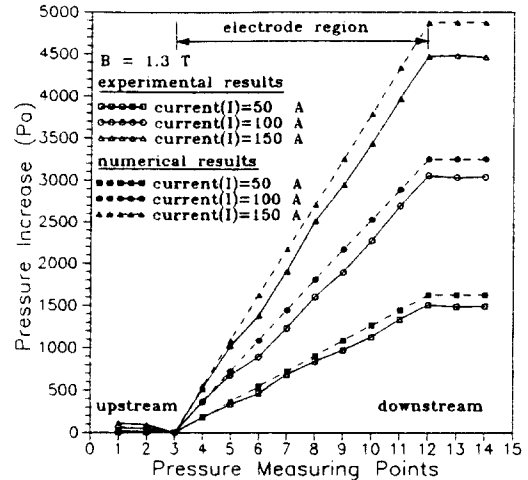
하며, 자장의 세기가 코일 직선부에 비해 작으며 전장이 작용하지 않는다. 본 연구에서 얻은 실험결과를 같은 조건에서 얻은 수치해석 결과와 비교하여 점선으로 표시하였다. 자장이 균일하게 유지되는 구간에서 전자기력에 의한 선형적인 압력 증가를 나타낸 수치해석의 결과와 실험결과는 잘 일치하고 있다.



(a) B = 0.5 T



(b) B = 1.0 T



(c) B = 1.3 T

Fig.16 Comparison between the numerical and experimental results in the areas of a uniform magnetic flux density

5. 결 론

본 연구에서는 사각단면을 갖고 해수로 가득 채워진 관에 깊이 방향으로 균일 자장을, 폭 방향으로 전류를 통하게 하였을 때 생성되는 Lorentz 힘에 의한 MHD 덕트 유동에 관한 수치해석과 실험에 관한 연구를 수행하였다.

수치해석 결과를 실험으로 검증하기 위하여 MHD 추진 실험장치를 설계, 제작하였다. 사각 단

면의 MHD 덕트에 최고 1.7 Tesla의 균일 자장을 부여할 수 있는 전자석, 그리고 최고 전위 1700volt/m 를 가해줄 수 있는 해수 부식에 강한 전극을 제작하여 관내에 생성되는 최대 Lorentz 힘이 11655 N/m³ 되도록 하였다.

실험은 자장의 세기, 전류밀도를 변화시켜 가면서 MHD 덕트 길이 방향의 압력 변화를 측정하였다. 실험결과 직교하는 전장과 자장하에서 MHD 덕트내 길이 방향 압력 분포는 선형적으로 증가하

며 압력구배는 Lorentz 힘의 강도에 비례하였는데, 이는 수치해석 결과와도 일치한다.

또한 일반적인 덕트의 정상 유동에서는 \cap 자 모양의 흐름 모양을 갖추고 있는 것에 비해 MHD 덕트의 유동 흐름은 M자 모양을 가지게 됨을 확인할 수 있었다. 금후 이러한 연구 결과를 바탕으로 정도 높은 유동해석과 종합추진 효율을 향상 시킬 수 있는 최적덕트 형상에 관한 연구가 계속되어야 하리라 생각된다.

참고문헌

- 1) James B. Friauf, "Electromagnetic Ship Propulsion", ASNE J., pp. 139 - 142, Feb. 1961.
- 2) W. A. Rice, U. S. patent 2997013(Aug. 22, 1961).
- 3) Doragh R. A., "Magnetohydrodynamic Ship Propulsion Using Super-conducting Magnets", SNAME Trans. Vol. 71, pp. 370 - 386, 1963.
- 4) S. Way, "Electromagnetic Propulsion for Cargo Submarines", Journal of Hydraulics, Vol 2, pp. 49 - 57, 1968.
- 5) A. Iwata, Y. saji, & S. Sato, Proc. ICE, Vol 8, 775, 1980.
- 6) Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation. 1980.

1) James B. Friauf, "Electromagnetic Ship