

---

## 論 文

大韓造船學會論文集  
第32卷 第1號 1995年2月  
Transactions of the Society of  
Naval Architecture of Korea  
Vol. 32, No. 1, February 1995

### 사각형의 MHD 추진 덕트 내부유동에 관한 수치해석 및 실험적 연구

이진욱\*, 이상준\*\*, 이정목\*\*

Numerical Analysis and Experimental Investigation  
of Duct Flows of an MHD Propulsion System

by

J. W. Lee\*, S. J. Lee\*\* and C. M. Lee\*\*

#### 要 約

사각형의 MHD 추진 덕트 내부유동을 수치해석과 실험적인 방법으로 연구하였다. 수치해석연구에서는 전기장과 자기장의 영향하에 있는 비압축성 3차원 통전유체에 대하여 유한 차분법으로 계산하였다. 수치계산의 결과 전자기력이 약할 때 충류유동의 전형적인 포물선 유동 형태가 전극 부근에서 M 자 형상으로 변하였고, 균일분포의 일정 전자기력하에서 MHD 덕트 내부 압력은 입구에서부터 하류로 나이감에 따라 선형적으로 증가하였다. 실험에서는 MHD 추진 덕트 내부 유동을 해석할 수 있는 실험장치를 제작 하였으며, MHD 추진은 전류를 변화 시킴으로써 추력을 쉽게 조정할 수 있음을 알았다. 또한 MHD 덕트내 유동방향의 압력구배는 전자기력에 비례하여 증가하며 수치계산 결과와 잘 일치하였다.

#### Abstract

A numerical and experimental investigation on the flow characteristics in the rectangular duct of an MHD propulsion system has been carried out. In numerical analysis, three-dimensional, steady-state, viscous, incompressible electrically conducting fluid flow under the influence of uniformly applied magnetic and electric fields was treated using a finite-difference technique. It was found from the numerical study that when the Lorentz force is weak, the typical parabolic velocity profile under a laminar flow condition changes to an M shaped profile near the electrode region and that the

---

접수일자 : 1994년 8월 23일, 재접수일자 : 1994년 11월 22일

\* 정회원, 한국기계연구원

\*\* 정회원, 포항공과대학 기계공학과

pressure increases linearly from the inlet toward the outlet of the MHD duct under constant electro-magnetic field. In experiment, thrust of the MHD propulsion system can be controlled easily by varying electrode current. The measured pressure gradient along the MHD duct is proportional to the Lorentz force, which is in agreement with the numerical results.

## 1. 서 론

선박의 추진 시스템으로 현재 많이 사용되고 있는 screw propeller 또는 water-jet 방식은 회전동력 발생장치로 인한 소음과 진동, 그리고 cavitation의 발생을 초래하게 된다. 이와 같은 문제점들을 극복할 수 있는 새로운 선박 추진방식으로 MHD (MagnetoHydroDynamics) 추진이 있다. 이는 종래의 추진 장치에서 볼 수 있는 동력전달용 축계가 필요없으므로 진동 및 소음이 적고, 이론상으로 추진 효율을 기존의 추진방식에 비해 높일 수도 있다. MHD 추진의 기본원리는 선체에 고정시킨 자석에 의해, 해수 중에 자기장을 형성시키고 이 자기장과 직교하게 해수 중에 전류를 흘리 보내게 되면, 자기장과 전기장의 상호작용에 의해서 통전 유체는 힘을 받게된다는 플레밍의 원순 법칙이다. 즉, 덕트 내부 해수의 유동방향으로 전자기력(Lorentz force)을 발생시켜 그 반력으로 추진력을 얻는 것이다. 이와같은 MHD 추진방식은 고속선박의 추진이나 소음이 적은 잠수함의 추진장치로 채택될 수 있음을 시사해 준다.

MHD 추진에 대한 기본적인 이론은 1961년 덕트 형의 MHD 추진기(propulsor)를 고려한 Friauf[1]에 의해 제시 되었다. 이것에 기초하여, Rice[2,3]는 MHD pump와 유사한 개념의 MHD 선박추진을 제안하였다. 그동안 미국과 일본을 중심으로 MHD 추진과 관련한 이론 및 실험적 연구, 그리고 추진기의 설계, 초전도 자석의 개발 등과 같은 폭 넓은 연구가 수행되어져 왔다.

먼저 이론적 연구로서, Hunt[4]와 Stewartson[5]은 균일한 자기장을 가진 직사각형의 덕트에서의 자기유체운동을 해석하였다. Winowich와 Hughes[6]는 Navier- Stokes 방정식을 작은 값의 interaction parameter에 대해 풀어서 MHD 덕트 유동을 해석하였다. 이후 Walker[7,8]는 통전 벽면 또는 절연 벽면을 가지는 일정 단면적 또는 점진 확대되는 직사각형 덕트내에서의 MHD 유동을 연구하였다. Holroyd[9]는 절연 벽면을 갖는 직사각관과 원형관에서의 3차원 유동을 수치해석적으로 연구하였다.

Wu[10], Singh와 Lal[11] 그리고 Koksal [12] 등은 유한요소법을 이용하여 완전 발달된 MHD 덕트 유동을 해석하였다. Ramos와 Winowich[13]는 유한차분법을 이용하여 2차원 MHD 유동에서 interaction parameter가 아주 작은 경우에 대하여 압력과 속도장을 구하였다. 여기에서 구해진 M자 형태의 속도 분포는 Winowich & Hughes[6]가 유한요소법을 이용하여 얻어진 결과와 일치하였다.

MHD추진과 관련한 실험적 연구로, 1966년에 Way[14]는 MHD 추진방식의 모형선(EMS-1) 실험을 수행하여 0.39 m/s의 추진 속도를 얻음으로써 이론식의 타당성을 입증하였다. 1960년대 미국에서의 이와 같은 연구는 그 당시 초전도 자석의 응용이 불가능했으므로 벽에 부딪히게 되었다. 일본 Kobe 대학의 Iwata 등[15]은 초전도 자석을 이용한 MHD 추진실험을 수행하였는데 사용된 모델선 SEMD-1은 초전도 코일에 의해 유도된 최대 자속밀도(magnetic flux density) 0.6 Tesla(T)의 외부 자장 시스템을 사용하였다. 1980년 그들은 이를 보완하여 최대 2.0 T의 자장을 발생시킬 수 있는 모델선 ST-500(선체 길이:3.6m 중량:700Kg)을 제작하여 Kobe대학의 시험수조에서 실험한 결과, 15 N의 추진력과 0.6 m/s의 운항 속도를 얻었다. 이 실험으로부터 MHD 추진 원리가 결코 비현실적이 아니며, 간단한 이론에 근거한 MHD추진의 실용화에 대한 확신을 가지게 되었다.

일본은 1992년 6월 세계 최초로 초전도 MHD 추진 실험선인 YAMATO-1을 일본 고베 앞 바다에서 시험항해 시키는데 성공하였다. 180 t급으로서, 길이 30 m 인 이 배는 일본 SOF (Ship & Ocean Foundation)이 6년의 연구 끝에 개발한 것으로 4 T의 초전도 자석을 이용한 내부 자장방식을 도입하고 있다.

일본의 초전도 MHD 추진선 개발에 자극을 받은 서구제국에서도 1980년대 후반부터 MHD 추진에 대한 폭 넓은 연구가 시작 되었다. 예를들면 MHD 추진의 효율 증진을 위한 기초연구로 Meng et al.[16], Mine & Ito[17]는 초전도 자석을 이용한 순환회로 실험을 수행하였고, Beatty & Hughes[18]는 자장

이나 전장의 강도가 추진 효율에 미치는 영향을 이론적으로 고찰 하였다.

현재 MHD추진선박의 실용화에는 아직 해결해야 할 문제점이 많으며 그중에서도 가장 핵심되는 기술은 10 T 이상의 자속밀도를 낼 수 있는 고온 초전도자석의 개발이다. 현재 초전도기술 개발 경쟁은 미국과 일본, 유럽사이에서 치열하게 전개되고 있다.

이와같이 선진국에서 고온 초전도체의 상용화를 기다리고 있는 동안, 국내에서도 MHD 추진선과 관련한 핵심기술을 축적하여 선진국과의 기술격차를 줄이도록 노력해야 될 것이다. 특히 MHD 추진의 경우 성능이나 추진 효율이 자장의 세기 및 분포, 전류밀도, 선박의 형상 및 크기, 유동장 등에 민감하게 변화한다. 그러나 이제까지 발표된 자료들은 몇가지 특수한 경우에 대한 간략화된 결과 뿐이므로 MHD 추진선 설계에 이용할 수 있는 일반적인 결과를 얻기 위한 체계적인 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 MHD 덕트유동을 해석하기 위하여 수치해석과 실험적 연구를 병행하였다. 수치 해법은 관성력, 점성력 그리고 전자기력을 모두 고려하여 여러가지 변수 변화에 따른 MHD 유동장을 연구하였다. 이러한 수치 해석과 함께 직사각형 MHD 덕트내부 유동에 대한 실험적 연구를 수행하여 MHD 추진의 유동특성에 대한 이해의 폭을 넓히고자 하였다. 실험적 연구에서는 사각단면을 갖는 MHD 덕트 내에서 자장의 세기와 전류밀도를 변화시켜가면서 덕트 길이방향의 압력변화를 측정함으로써 MHD 추진시스템의 추력특성과 함께 수력학적 유동특성을 해석하였다.

## 2. MHD 추진 덕트 내부유동에 관한 수치해석

### 2.1 수치해석

본 연구에서는 2차원 CHAMPION 코드를 기본 구조로 하여, 3차원 비정상 층류 유동을 해석할 수 있는 수치해석 프로그램을 유한 차적법으로 구성하였다. MHD 덕트유동을 해석하기 위하여, Navier-Stokes 방정식과 Maxwell 방정식이 사용되어지며 횡방향 자기장의 영향하에서 수직방향으로 전류를 통과시키는 정상 상태의 자기유체 유동에 대하여 수치해석하였다. 층류 유동에서는 내부 마찰로 인한 에너지 소산때문에 상승되는 온도변화는 무시될 수 있

다. 유체의 연속 방정식과 운동 방정식은 다음과 같은 일반적인 미분 방정식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{D(\rho\Phi)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_\Phi$$

여기서 사용된 변수는 Table 1에 정의 되었다.

Table 1 Representation for  $\Phi$ ,  $\Gamma_\Phi$  and  $S_\Phi$

Equation		$\Phi$	$\Gamma_\Phi$	$S_\Phi$
Continuity		i	0	0
x-Momentum	(1)	u	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + f_{bx}$
	(2)	u	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial x} - \sigma B_y (\frac{\partial \Phi}{\partial z} + u B_y)$
y-Momentum		v	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial y}$
z-Momentum	(1)	w	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial z}$
	(2)	w	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \sigma B_y (\frac{\partial \Phi}{\partial x} - w B_y)$

Table 1의  $\Phi$ 는 각 방정식에서 사용되는 유동 변수,  $p$ 는 밀도,  $P$ 는 압력,  $f$ 는 체력(body force),  $\mu$ 는 점도,  $u,v,w$ 는 각각 X,Y,Z 방향 속도성분,  $\sigma$ 는 전기 전도율(mho/m),  $B$ 는 자속밀도를 의미하며, (1)은 일정한 전자기력의 경우, (2)는 전류가 변수인 경우이다. 주유동방향을 X, 자기장의 방향은 Y, 전기장의 방향은 Z 방향으로 하며, 덕트 양 끝단에서의 가장자리 자기장과, 전기장은 무시하기로 한다. 전하 입자가 전기장과 자기장이 있는 공간 영역을 통과하는 경우에는 이 입자는 다음식과 같이 두 field에 영향을 받게 된다.

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \\ &= \sigma \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \vec{k} \right) + (u \vec{i} + v \vec{j} + w \vec{k}) \times (B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k}) \right] \\ &= \sigma \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} - u B_y \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} + u B_y \right) \vec{k} \right] \\ &= J_x \vec{i} + J_y \vec{j} + J_z \vec{k} \end{aligned}$$

여기서,  $J$ 는 전류 밀도 ( $A/m^2$ ),  $V$ 는 해수의 속도 ( $m/s$ ), 그리고  $\Phi$ 는 전위(Volt)이며  $E$ 는  $\vec{E} = -\nabla \Phi$ 의 전위차를 나타낸다. 또한 하침자는 벡터의 성분을 표시한다.

일반적인 미분방정식의 생성항에 포함되는 단위

부피당의 체력에 해당되는 전자기력(Lorentz force)은 다음과 같은 전기장과 자기장의 벡터적(cross product)이 되게 된다.

$$\vec{J} \times \vec{B} = (J_x \hat{i} + J_y \hat{j} + J_z \hat{k}) \times (B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k}) \\ = (J_x B_z - J_z B_y) \hat{i} + (J_z B_x - J_x B_z) \hat{j} + (J_x B_y - J_y B_x) \hat{k}$$

여기서  $\vec{J} = (0, 0, J_z)$  그리고  $\vec{B} = (0, B_y, 0)$   
인 경우는

$$\vec{J} \times \vec{B} = -J_z B_y \hat{i} \\ = -\sigma \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + u B_y \right) B_y \hat{i} [ N/m^3 ]$$

이와 같은 지배방정식과 더불어, 경계조건으로 덕트 입구에서의 유동은 완전 발달된 형태의 유체가 덕트내로 들어 오는 것으로 하였으며, 벽면에서는 no-slip 조건을 적용하였다. 중심선에 대한 대칭성이 존재하나 본 수치해석에서는 생성항의 고려로 인하여 해의 거동을 예측할 수 없기 때문에 전 구간을 고려하였다. 본 연구에서는 대류항과 확산항을 처리하기 위해서 hybrid scheme을 사용하였으며, 압력보정은 SIMPLE algorithm을 적용하였다.

본 연구에서는 크게 2가지 경우에 대해서 수치해석을 수행하였다. 첫번째로 Navier-Stokes 운동 방정식에서 생성항(source term)인 전자기력을 일정 상수로 가정하고, 이 전자기력 값의 변화에 따른 덕트내 유동 변화를 계산하였다. 이는 즉  $\phi$  및  $\vec{B}$ 의 함수는 유동장내에서 균일하게 주어진 상수라 가정하기 때문에  $\phi$ 를 위한 Laplace 방정식 그리고  $\vec{B}$ 를 위한 Maxwell 방정식의 해는 추구하지 않았음을 의미한다. 두번째로 MHD 유동과 관련하여 전류를 주어진 변수로 하여 수치해석을 수행하였다.

## 2.2 수치해석 결과

### 2.2.1 일정 전자기력의 경우

Navier-Stokes 운동방정식에서 자기장( $B_y$ )과 전기장( $E_z$ )이 균일한 경우 전자기력을 상수로 간주할 수 있다. 왜냐하면  $E_x$ 는 0이므로 단지 X 방향의 힘  $f_{bx}$ 만 작용하기 때문이다.

$$f_{bx} = -(\sigma B_y E_z) - (\sigma u B_y^2) \\ \approx -\sigma B_y E_z = \text{constant value}$$

여기서 유속  $u$ 가 크지 않을 경우 미소량  $\epsilon$ 에 대해

$(u B_y)/E_z = O(\epsilon)$  이므로, 웃 쇠의 첫번째 항이 두 번째 항보다 훨씬 큰 값을 갖으며 두번째 항은 무시될 수 있다. 또한 실험 결과와의 비교를 위해  $B_y < 0$ ,  $E_z > 0$ 인 경우에 대해 수치해석을 하였다.

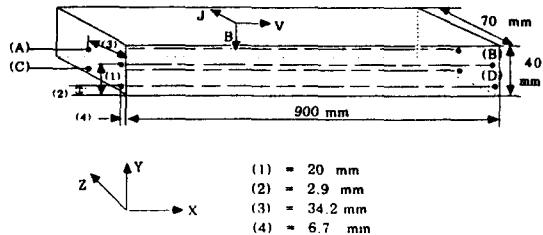


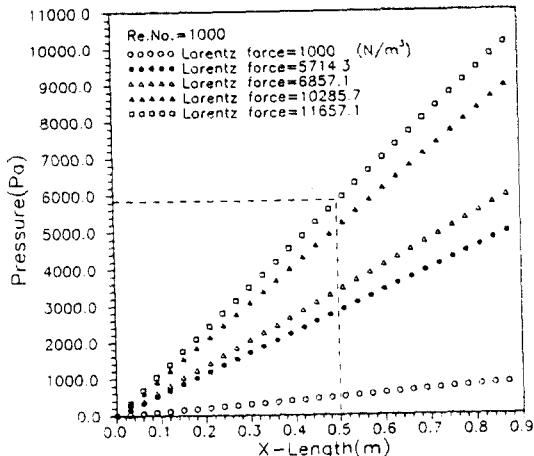
Fig.1 Coordinate system for the MHD duct and the location of axial lines along which pressures are calculated

작동 유체는 해수(sea water)로 하였으며, 전기전도율은 4 mho/m로 하여 계산하였다. MHD 덕트 내부 유동해석에 사용된 격자수는 61x17x19이며 양쪽 벽 부근에서는 조밀하게 밀집시켰다. Fig.1은 수치계산에 사용된 MHD duct 좌표계와 계산치를 얻기위해 택한 위치를 나타낸다. Reynolds 수(Re) 계산에 사용된 특성길이는 수력직경(hydraulic diameter)으로  $D=50.9\text{mm}$ 이며, 단면적은  $40 \times 70 \text{ mm}$ 이다.

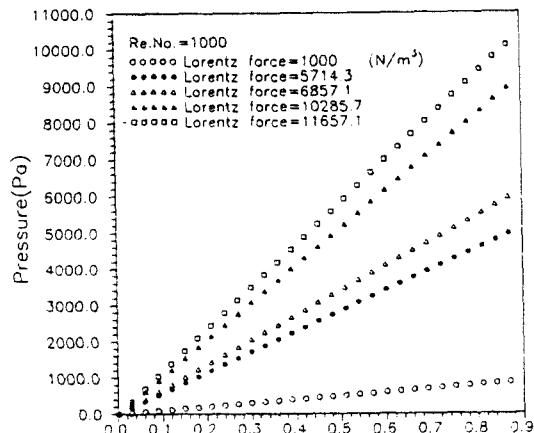
$Re = 1000$ 인 경우, 덕트중앙(위치A)에서의 압력변화를 Fig.2에 나타내었다. Fig.2 (a)는 전자기력(Lorentz force)변화에 따른 A 지점에서의 압력분포로 덕트 길이에 비례하여 선형적으로 증가할뿐더러 전자기력이 증가함에 따라 압력 구배도 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 그림중의 사각형의 점선은 Lorentz 힘이 제일 큰 경우 압력이 덕트 길이에 비해 1대 1의 비례로 증가함을 보여주기 위한 것이다. Fig.2 (b)는 D 지점에서의 압력 거동으로 A 지점에서처럼 압력이 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 이러한 선형적인 압력분포는 A, B, C, D 위치에 관계없이 동일하게 나타났다. 이것은 전자기력이 크게 작용하는 경우 Navier-Stokes 방정식의 각 항들 중에서 압력항과 전자기력항이 지배적이며 다른 항들은 이들에 비해서 상당히 작은 값을 가지기 때문이다.

Fig.3은 전자기력의 작용 유무에 대하여 Reynolds 수 변화에 따른 압력변화를 나타낸 것이다.

다. Fig.3 (a) 는 전자기력이 작용하지 않은 경우에 대하여, A 지점에서의 압력을 나타낸 것인데, Reynolds 수가 클수록 압력의 감소가 큼을 알 수 있다. Fig.3 (b) 는 전자기력이  $10[N/m^3]$ 인 경우의 압력변화를 Reynolds 수 변화에 따라 나타낸 것으로 압력 증가는 Reynolds 수에 무관함을 알 수 있고 여기에 계산결과는 보여주지 못했지만 이러한 현상은 측정 위치에 관계없이 거의 일치함을 알 수 있었다. 이상의 수치해석 결과로 부터 Navier-Stokes 방정식에서의 x성분 운동량 방정식을 다음과 같이 근사 시킬 수 있다.

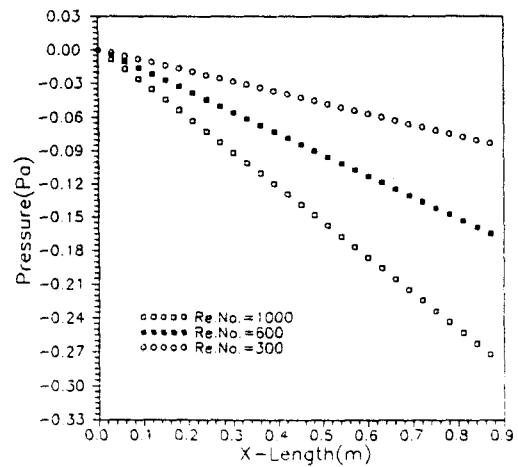


(a) At line A

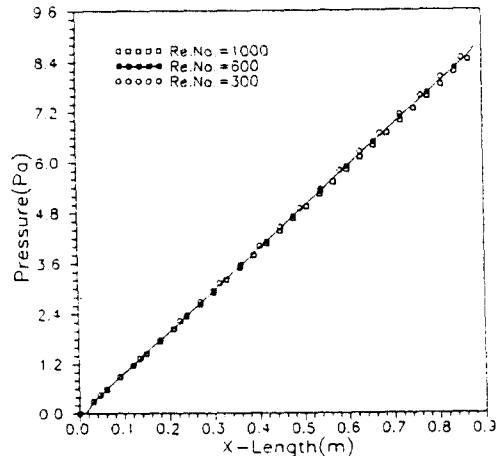


(b) At line D

**Fig.2 Pressure distribution along the lines A and D at  $Re=1000$**



(a) Lorentz force = 0

(b) Lorentz force =  $10 [N/m^3]$ 

**Fig.3 The effect of the Lorentz force on the pressure distribution along the line A**

$$\frac{\partial p}{\partial x} \approx -\sigma B_y E_z$$

따라서 전기장과 자기장이 가해진 덕트내에서의 압력변화는 다음과 같은 근사식으로 표시할 수 있음을 알 수 있다.

$$p \approx -\sigma B_y E_z x + \text{constant}$$

여기서  $x=0$ 에서  $p=0$ 로 가정하면 위의 constant는 0이 되어야 하고 본 논문에서 제시된 계산들은

모두 이 경우에 속한다.

### 2.2.2 전류가 변수인 경우

균일한 자기장 영향하에서 이에 수직한 방향으로 작용하는 전기장을 변화시켜 가면서 전기장이 MHD 덕트 내부 유동에 미치는 영향을 알아보았다. 여기서 유체의 흐름을 정상, 비압축성이라고 가정하고 입구로부터  $x=0.15 \sim 0.45$  (m) 사이에서만 전기장이 Z 방향으로 작용하며 Y 방향으로는 자기장이 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다. 또한 자기장이 유동에 의해 변형되지 않음을 의미하는 magnetic Reynolds number( $Re_m$  : 유도된 자기장의 세기에 대한 주어진 자기장의 세기의 비)가 1보다 훨씬 작은 경우를 생각하였다.

작동유체를 비압축성 유체로 가정하면 Maxwell 방정식으로부터 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{H} = (\vec{H} \cdot \nabla) \vec{V} + \frac{1}{\eta \sigma} \nabla^2 \vec{H}$$

여기서  $H[A/m]$ 은 자장의 강도(magnetic field intensity)를  $\eta[N/A^2]$ 는 투자율을 나타낸다. 수력적 경계 D라하면, magnetic Reynolds수  $Re_m$ 은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$Re_m = \frac{VD}{\nu_m} = \eta \sigma V D$$

여기서  $\nu_m$ 은 자기 확산도(magnetic diffusivity)

를 나타내는 것으로  $\nu_m = \frac{1}{\eta \sigma}$ 로 정의 된다. 이

magnetic Reynolds 수가 1보다 훨씬 작은 경우에서 위의 Maxwell 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \nu_m \nabla^2 \vec{H}$$

윗 식에서  $Re_m \ll 1$ 인 경우 자장의 거리(L)에 대하여 감소되는 시간( $\tau$ )은

$$\tau = \frac{L^2}{\nu_m} \approx \frac{L(vt)}{\nu_m} = Re_m t \ll t$$

이다. 따라서 자기장이 균일 강도를 유지하는데 걸리는 시간( $\tau$ )은 유체가 덕트를 통과하는데 걸리는 시간( $t$ )에 비해 매우 작으므로 덕트내 자기장은 균일하다고 가정 할 수 있다. 본 연구의 경우  $Re_m \ll 1$ 이므로 Maxwell 방정식을 풀 필요가 없음을 알게 된다.

MHD유동과 관련되는 다른 무차원수로는 interaction parameter ( $I_p$  : 자성력에 대한 관성력의 비)와 Hartmann number ( $Ha$  : 자성력에 대한 점성력의 비)가 있으며 다음과 같이 정의 되어 진다.

$$I_p = \frac{\sigma B_y^2 L_y}{\rho u}, Ha = \sqrt{Re I_p} = |B_y| L_y \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}, B_y < 0$$

경계조건은 MHD덕트 입구에서 주유동 방향의 속도성분은 자기장과 전기장이 없는 경우의 완전발

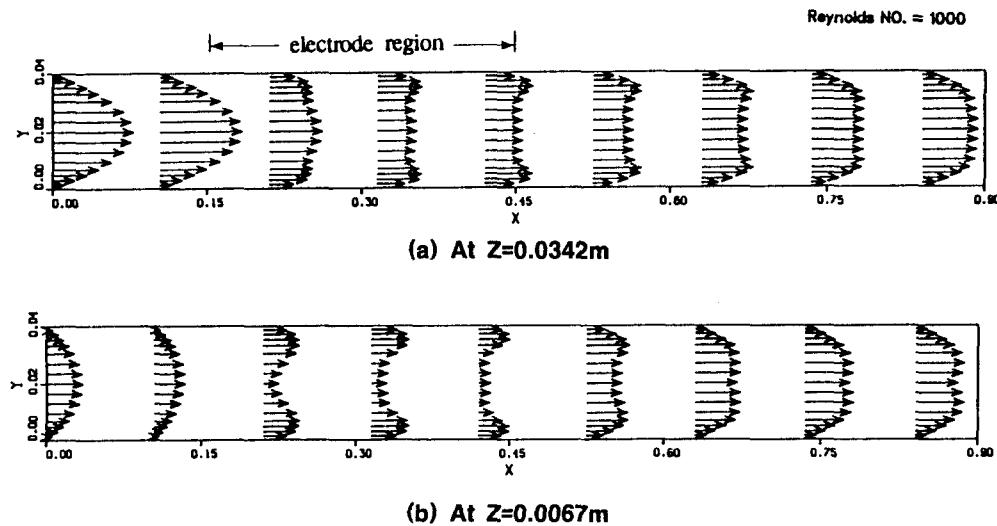
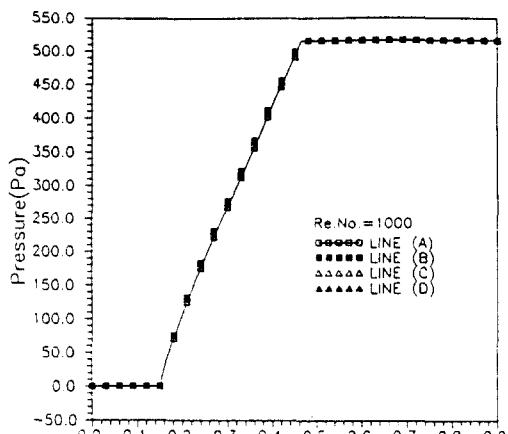
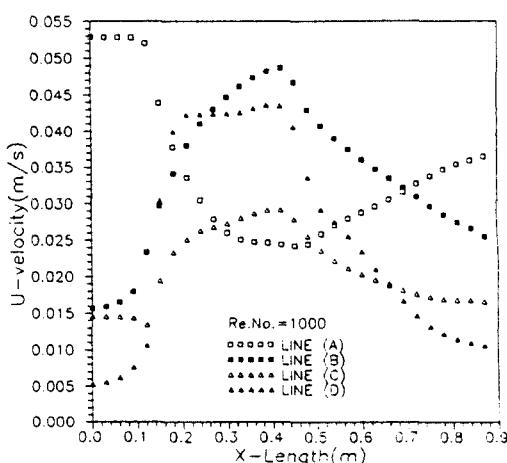


Fig.4 2-D velocity profiles in the duct

달된 속도분포를 가지며, 주유동 방향과 직각인 방향의 속도성분은 없다고 가정한다. 전체 덕트의 크기와 불균일 분포의 격자계는 앞의 일정 전자기력의 경우에서와 동일하게 하였다.



(a) Pressure distribution



(b) x-component velocity

**Fig.5 Profiles of pressure and x-component velocity at Re=1000, and Lorentz force= 0.0857 [N/m<sup>3</sup>]**

덕트 입구로부터  $L_x = 0.15$  m에서  $L_x = 0.45$  m 사이에서만 전류가 Z 방향으로 흐르는 것으로 간주하기 위하여, 경계 조건으로  $L_z = 0$  에서는 0.15 V 를,  $L_z = 0.07$  (m) 에서는 -0.15 V 를 주었으며, 그 외 부분은 전류가 흐르지 않는 것으로 간주하였

다. Y 방향의 자속밀도는 0.01 T로, 전기장과 마찬가지로  $L_x = 0.15$ 에서  $L_x = 0.45$  (m) 사이만 균일하게 작용시켰다. 이 경우  $I_p$  와  $Ha$ 는 매우 작은 값인  $I_p = 5.98 \times 10^{-7}$ ,  $Ha = 0.0245$  이다.

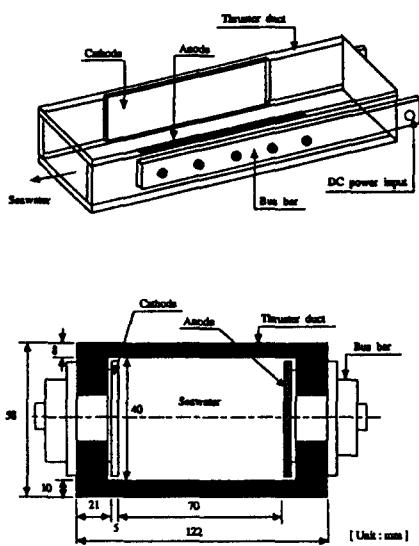
이상의 조건에서  $Re = 1000$  인 경우의 X 축 방향에 따른 Z 위치에서의 2차원 속도분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5.(a)는 A, B, C, D 지점에서의 압력분포변화를 나타낸 것이며, Fig. 5.(b)는 주유동 방향의 속도분포를 나타낸 것이다. 초기의 완전히 발달된 축방향 속도 분포가 전극 부분을 지나면서 전체적으로 납작해지며, 전자석이 놓인 측면쪽으로 가까이 갈수록 가파른 M자형의 속도분포를 가짐을 볼 수 있다. 출구 부분에서는 자기장과 전기장의 상호작용이 거의 무시되므로, 유체 유동은 점차 발달되어져 자기장과 전기장이 작용하지 않는 경우의 완전 발달된 포물선형의 속도분포로 다시 발달하게 된다.

### 3. MHD 추진 시스템에 관한 실험적 연구

#### 3.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 MHD 덕트 상하에 설치된 전자석에 의해 수직 방향으로 균일자장이 작용하며 덕트 양측면에 전극을 부착하여 자기장과 직각방향으로 균일한 전기장을 갖도록 하였다. 실험 변수로는 자속밀도 (B), 전극에 가해지는 전류 (I) 등이며, 실험장치는 크게 전자석, 전극, 그리고 MHD 덕트 및 순환회로 부분으로 나누어진다.

먼저 MHD 덕트에 균일자장을 발생시키기 위해 사용되어진 2극 전자석(dipole magnet)은 얇은 철판을 충전율 0.98로 적층한 철심에 구리 코일을 감아 제작하였다. 철심용 소재는 인성과 연성이 매우 큰 극저탄소강인 0.25 % 규소함유 얇은 철판을 두께 1.0 mm로 냉간 압연한 후 750°C에서 3분간 소둔한 제품을 사용하였다. 전자석의 최대 자속밀도가 1.7 T이며 자장균일도가 0.01 % 이내이다. 전자석 코일을 고정시키고 있는 magnet yoke는 MHD 덕트가 놓이는 공간에 균일 자장을 만들어 준다. 이 magnet yoke 중앙부분의 높이 60 mm, 폭 180 mm, 길이 990 mm의 공간에 MHD 덕트가 놓이게 된다. 이 전자석의 전원공급장치로는 30 V, 1000 Amp.의 DC power supply를 사용하며 전압 안정도는 ± 0.3% 이내이다.

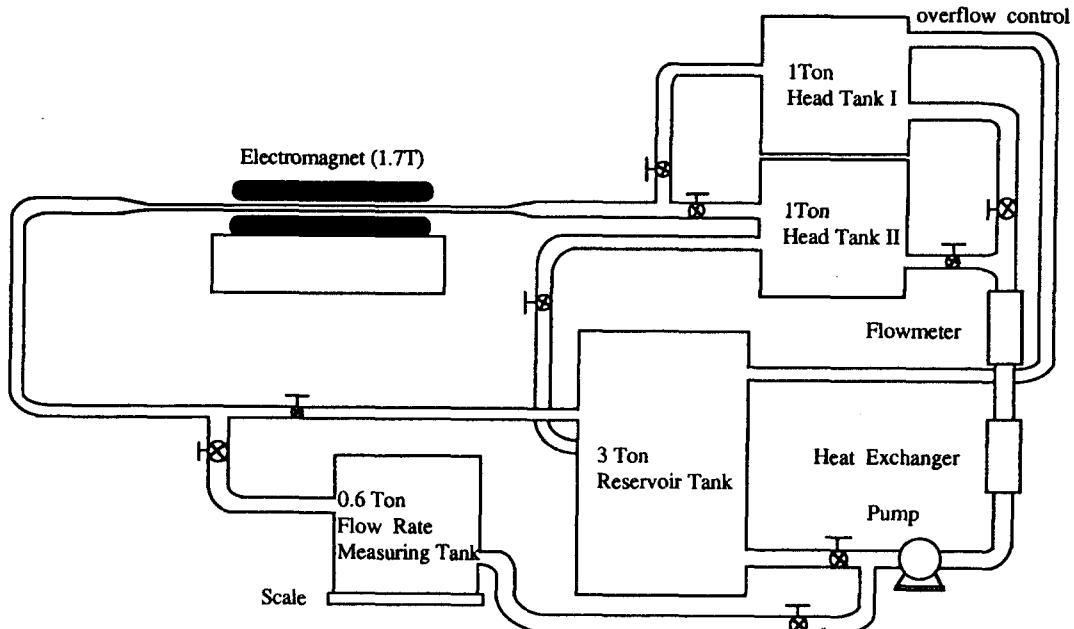


**Fig.6 Electrodes for MHD thruster duct**

MHD추진에서 전극은 해수에 직접 전류를 통하여 하는 중요한 역할을 하는데, 전극 시스템은 2개의 전극판 (anode & cathode), 전원공급장치, 그리고 직류전류를 전극에 공급하는 bus bar 등으로 구성되

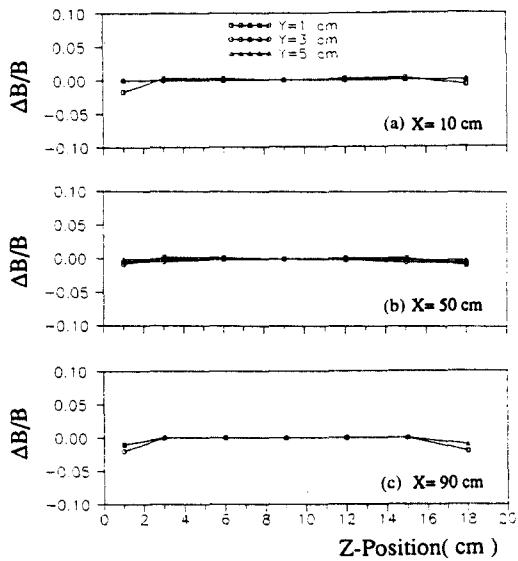
어진다. MHD 턱트 내부에 들어가는 전극판의 크기는 높이 38 mm, 길이 900 mm, 두께 5 mm 이다. 전극 설계시 주의할 사항으로는 작동유체가 해수이고, 전해작용으로 인하여 화학물질이 생성되므로 부식에 강한 재료를 사용해야 한다는 것이다. 양극판은 항상 부식의 위험에 처해 있으므로, 내식성이 크고 수명이 긴 재료를 이용해야 한다. 본 연구에서는 양극판 재료로 titanium(Ti) 판에 산화 iridium 피막을 코팅한 DSA(Dimensionally Stable Anode)로 정하였으며, 음극판 재료로 백금을 코팅(5 μm 두께) 한 Ti 판으로 결정하였다. 본 연구에서 bus bar는 해수에 직접 접촉하지 않고 턱트 외부에 위치하도록 하였으므로 부식문제는 없으나 전기전도성과 구조적 강성을 높이기 위하여 Ti clad 구리판을 사용하였다. 그리고 bus bar 와 전극판의 체결은 MHD 턱트를 사이에 두고 bolt로 체결하여 필요시 분리 가능하도록 하였다. 본 연구에 사용되어진 전극판과 bus bar는 일본 Permelec Electrode Ltd. 에 주문제작하였다. 전극판이 설치된 턱트 모양과 전극 부분의 단면도를 Fig. 6에 표시하였다. 전극용 전원공급장치로 120 V, 200 A 의 DC power supply 를 사용하였다.

Fig. 7 은 본 연구에 사용되어진 실험장치의 개략도이다. 턱트재료로 자기장에 영향을 주는 금속성 재

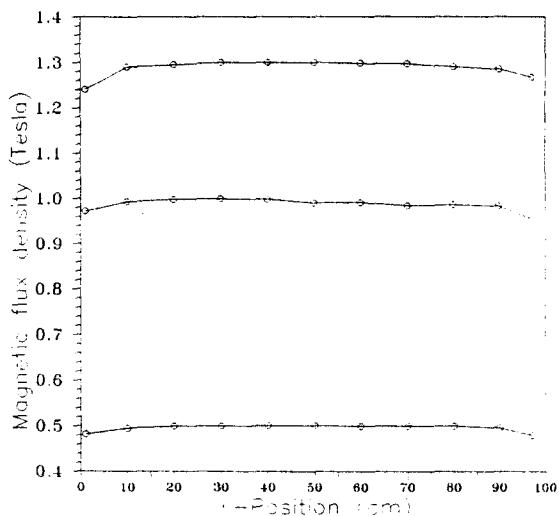


**Fig.7 Schematic diagram of MHD thrust experimental loop**

질을 사용할 수 없기 때문에 아크릴 판 및 PVC 보울트/너트를 사용하였다.



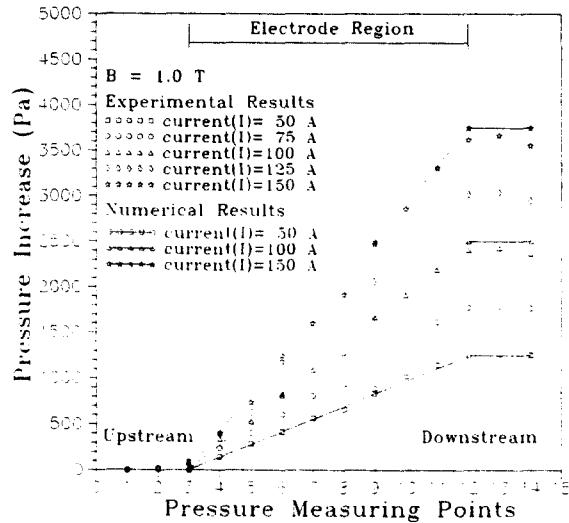
**Fig.8 Magnetic flux density in breadthwise direction**



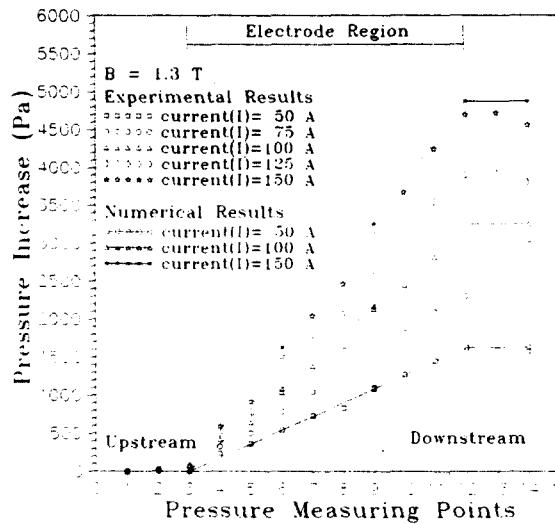
**Fig.9 Magnetic flux density in longitudinal direction**

자기장과 전기장이 작용하는 MHD 덕트는 내부 단면적이 높이 40 mm, 폭이 70 mm, 그리고 길이가 0.9 m이며, 덕트 상류측에는 약 1.5 m 길이의 입구 덕트를 설치하여 거의 완전히 발달된 형태의 유동을 MHD 덕트 입구조건으로 가지도록 하였다.

본 연구에서 덕트 길이방향으로의 압력 측정을 위하여 덕트 바닥면 중앙을 따라 길이 방향으로 14개의 압력 tap 을 10 cm 간격으로 설치하였다. 작동유체로는 포항 근해에서 채취한 해수를 사용하였다.



**Fig.10 Pressure increase due to increase in electrode current at constant  $B=1.0$  T**



**Fig.11 Pressure increase due to increase in electrode current at constant  $B=1.3$  T**

실험시, head tank와 저장용기를 연결하는 모든 밸브는 열어서 덕트내에 해수를 가득 채워서 정적

평형상태를 유지시킨다. 이 상태에서 실험조건에 맞추어 MHD 덕트내부 해수에 자기장을 균일하게 가한 상태에서 전극판에 전류를 공급하여 전기장을 가한다. 어느 정도의 시간이 경과하면 덕트 내부유동이 정상상태에 도달하게 되는데, 이때 MHD 덕트 벽면을 따른 압력변화를 측정하였으며 각 실험조건에서의 유량은 중량측정(weight measurement) 기법으로 구하였다.

### 3.2 실험결과

실험에 앞서 MHD 덕트가 놓일 공간에서의 자속밀도분포를 자속계(RFL Model 902K)를 사용하여 측정하였다. Fig. 8 은  $X = 10, 50, 90$  cm 인 경우,  $Y = 1, 3, 5$  cm 위치에서 측정한 폭방향 자장분포를 나타낸 것이다. Fig. 9 는 덕트 중앙을 따라 길이방향 ( $x$ ) 으로 측정한 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 길이 방향의 양 끝단부와 폭 방향의 양 끝단부를 제외하고는 거의 균일한 자기장이 형성됨을 알 수 있다. Fig.10 과 Fig. 11 은 각각 자속밀도를 1 T 또는 1.3 T 로 고정한 상태에서 전극에 가하는 전류를 변화시켜 가면서 덕트 길이방향을 따라 측정한 압력분포의 변화를 나타낸 것이다. 균일한 자기장과 전기장이 작용하는 구간인 측정 위치 3번과 12번 사이에서 거의 선형적인 압력증가를 볼 수 있다. 1번에서 3번, 12번에서 14번 구간은 dipole magnet 코일의 곡선부에 해당하며, 자장의 세기가 코일의 직선부에 비해 작으며 이 구간에는 전기장이 작용하지 않는다. 자기장이 균일하게 유지되는 구간에서 전자기력에 의한 선형적인 압력증가를 나타낸 수치해석의 결과와 실험결과는 잘 일치하고 있다. 덕트 길이방향으로 나타나는 작은 실험오차는 덕트 벽면의 마찰, 해수의 전해로 생성된 기포의 영향, 자기장이 덕트벽면에 미치는 영향 등에 기인함을 알 수 있다.

본 실험과 같은 경우는 덕트의 단면이 균일하기 때문에 Lorentz 힘의 크기는 덕트의 출구와 입구간의 압력 차로서 구할 수 있다. Fig. 12 는 MHD 덕트의 출입구간의 압력증가와 전극에 가해지는 전류사이의 관계를 나타낸 것인데, 일정 자기장하에서 전자기력은 전류의 세기에 비례함을 알 수 있다. 전기장과 자기장이 가해졌을때, MHD 덕트 출구측 연결 덕트의 해수 유동을 관찰해 보면, MHD 덕트 내부에서 생성된 미세한 기포들이 유동속에 존재함을 볼 수 있다. 이 기포들은 해수에 잠긴 전극판에서 전해작용으로 발생되는 수소, 산소, 염소 개스들이다. 그

러나, 이러한 기포들은 자속밀도와 전류의 세기가 증가함에 따라 흐름에 밀려나가게 된다. Fig. 13 은 출구 유속과 전자기력 사이의 관계를 나타낸 것인데, 추력과 밀접한 관계가 있는 유속은 자속밀도가 커질수록 전류의 세기에 따른 전자기력의 강도가 더 크게 증가함을 알 수 있다.

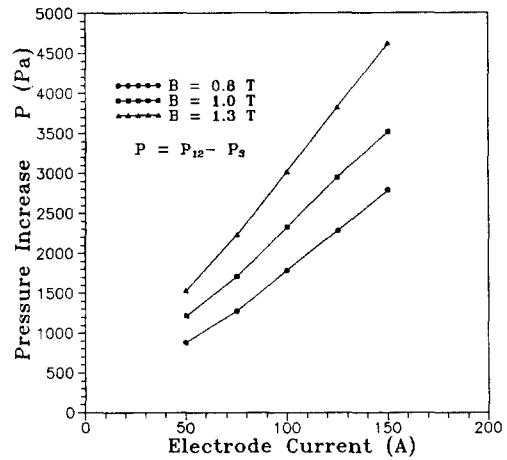


Fig.12 Relation between pressure increase and electrode current

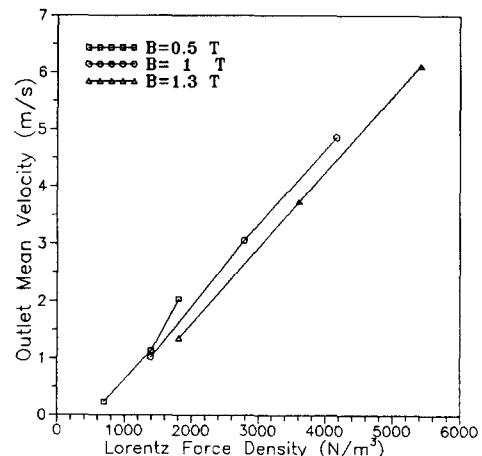


Fig.13 Relation between outlet mean velocity and Lorentz force density

### 4. 결론

본 연구에서는 MHD추진 덕트 내부 유동에 대한 수치해석 및 실험적 연구를 수행 하였다. 수치계산의 결과 전자기력이 약할때 총류유동의 전형적인 포물

선 유동 형태가 전극 부근에서 M 자 형상으로 변하였고, 균일분포의 일정 전자기력하에서 MHD 턱트 내부 압력은 입구에서부터 하류로 나아감에 따라 선형적으로 증가하였다. MHD 추진 실험장치는 사각단면의 MHD 턱트, 최고 1.7T의 자장을 부여할 수 있는 전자석, 그리고 해수 부식에 강한 전극으로 구성되어 있다. 자속밀도와 전류의 세기를 변화시켜가면서 MHD 턱트 길이방향의 압력변화를 측정한 결과 MHD 턱트내 압력분포는 길이방향으로 선형적으로 증가하며 압력구배는 전자기력의 강도에 비례하는데, 이는 수치해석 결과와도 일치한다.

### 후 기

본 연구는 국방과학 연구소의 장기 기초 연구 사업의 일환(ADD-90.1.3)으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드린다. 본 연구수행에 과학재단 지정의 포항공과대학교 부설 첨단유체공학연구센터의 지원에도 감사드린다. 본 원고 작성에 많은 수고를 해준 포항공대 기계공학과 대학원생 김준택군에게도 감사를 표한다.

### 참 고 문 헌

- [1] Friauf J. B., "Electromagnetic ship propulsion", *ASNE J.*, pp. 139-142, Feb., 1961.
- [2] Rice W. A., U.S. Patent 2997013
- [3] Metrey Richard E., "United States activities in MHD ship propulsion" *Proc. MHD 91*, pp. 11-15, 1991.
- [4] Hunt,J.C.R., "Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts", *J. Fluids Mech.*, Vol. 21, pp. 577-590, 1965.
- [5] Hunt,J.C.R. and Stewartson,K., "Magneto-hydrodynamic flow in rectangular ducts.II", *J. Fluids Mech.*, Vol.23, pp. 563-581, 1965.
- [6] Winowich,N.S. and Hughes,W.F., "Liquid-metal flows and magnetohydrodynamics", *AIAA progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.84,pp.313,1983.
- [7] Walker,J.S.,*AIAA progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.84, pp.3, 1983.
- [8] Walker,S.,et al,"Three-dimensional MHD duct flows with strong transverse magnetic fields. Part 2. variable-area rectangular ducts with conducting sides", *J. Fluids Mech.*, Vol.46, pp. 657-684, 1971.
- [9] Holroyd,R.J.,et al,"A theoretical study of the effects of wall conductivity, non-uniform magnetic fields and variable-area ducts on liquid metal flows at high Hartmann number", *J. Fluids Mech.*, Vol.84, pp. 471-495, 1978.
- [10] Wu, S. T., "Unsteady MHD duct flow by the finite element method", *Int. J. for Num. Meth. in Engg.*, Vol.6, pp.3-10, 1973.
- [11] Singh, B. and Lal,J., "Finite element method for unsteady MHD flow through pipes with arbitrary wall conductivity", *Int. J. for Num. Meth. in Engg.*, Vol.4, pp.291-302, 1984.
- [12] Koksal, S. and Tezer-sezgin, M., "Finite element method for solving MHD flow in rectangular duct", *Int. J. for Num. Meth. in Engg.*, Vol.28, pp. 445-459, 1989.
- [13] Ramos,J.I. and Winowich,N.S., "Magneto-hydrodynamic channel flow study", *Physics of Fluids*, Vol. 29 (4), pp. 992-997,1986.
- [14] Way,S., "Electromagnetic propulsion for cargo submarines", *J. of Hydraulics*, Vol.2 ,pp.49-57, 1968.
- [15] Iwata, A. et al., "Construction of model ship ST-500 with superconducting electromagnet thrust system", *Proc.ICE*, 8, pp.775-784,1980.
- [16] Meng J. C. S. et al., "Experimental studies of a superconducting elecltrmagnetic thruster for seawater propulsion", *Proc. MHDS 91*, pp. 79-85, 1991.
- [17] Mine S.,and Ito S., "Performance test of superconducting magnet for YAMATO-1", *Proc. MHD 91*, pp. 119-121, 1991.
- [18] Beatty P. A., and Hughes W. F., "Propulsive efficiencies of magnetohydrodynamic propulsors considering electrical and magnetic channel end effects", *Proc. MHD 91*, pp. 227-235, 1991.