

碩士學位論文

상사성(Analogy)을 이용한  
고부력 열수력 실험방법론 개발



濟州大學校 大學院

에너지工學科

高 祥 赫

2005年 12月

# 상사성(Analogy)을 이용한 고부력 열수력 실험방법론 개발

指導教授 鄭 鈺 津

高 祥 赫

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



康斗赫의 工學 碩士學位 論文을 認准함

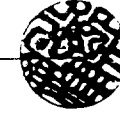
審査委員長 朴 在 雨



委 員 李 憲 周



委 員 鄭 鈺 津



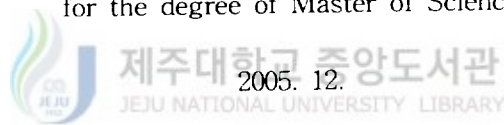
濟州大學校 大學院

2005年 12月

# Development of Analogy Experiment Methodologies

Sang-Hyuk Ko  
(Supervised by professor Bum-Jin Chung)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Science



This thesis has been examined and approved.

*Bum-Jin Chung*

.....  
Thesis director, Bum-Jin Chung, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....  
.....  
.....

*6 Jan 2006*

.....  
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	v
NOMENCLATURE .....	vi
SUMMARY .....	vii
I. 서 론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	3
1. 물질전달과 열전달의 상사성 .....	3
1) 상사성 .....	3
2) 물질전달과 열전달의 상사성 .....	4
2. 전기도금계 .....	6
1) 여러 가지 전기화학반응 .....	7
2) 물질전달 구조 .....	8
3) 한계전류 .....	11
2) 무차원수와 물성치 .....	14
III. 물질전달 실험 .....	16
1. 강제대류 .....	16
1) 수평평판에서의 Poiseuille 유동 .....	16

2) 실험장치 .....	18
3) 실험장비 구성과 실험절차 .....	20
2. 자연대류 .....	22
1) 자연대류 .....	22
2) 실험장치 .....	24
3) 수직전극에서의 자연대류 물질전달 실험 .....	26
<b>IV. 실험결과 및 검토</b> .....	<b>27</b>
1. 강제대류 .....	27
1) 수평평판 내에서의 Poiseuille 유동 .....	27
2) 강제대류에 의한 물질전달 .....	28
2. 자연대류 .....	30
1) 층류 자연대류 .....	30
2) 난류 자연대류 .....	31
<b>V. 결 론</b> .....	<b>34</b>
<b>참 고 문 헌</b> .....	<b>36</b>
<b>부 록</b> .....	<b>38</b>

## LIST OF FIGURES

Fig. 1. Comparison between temperature & concentration boundary layer for $Pr$ or $Sc = 1$ . .....	4
Fig. 2. Schematic diagram of mass transfer in electric field .....	8
Fig. 3. Typical limiting current density curve .....	13
Fig. 4. Poiseuille flow configuration .....	16
Fig. 5. Test facility of forced convection mass transfer .....	19
Fig. 6-a. Designed electrodes for average & local mass transfer test .....	19
Fig. 6-b. Copper electrodes for average & local mass transfer test .....	20
Fig. 7. The system circuit .....	21
Fig. 8. Conceptual diagram for Poiseuille flow experiments .....	22
Fig. 9. Fluid circulation induced by temperature difference .....	23
Fig. 10. Natural convection facility and electrodes for laminar and turbulent flow .....	25
Fig. 11. The experimental equipments and the system circuit .....	26
Fig. 12. Poiseuille flow visualization .....	27
Fig. 13. Test results for measuring average mass transfer rate .....	28

Fig. 14. Test results for measuring local mass transfer rate .....	29
Fig. 15. Natural convection test results under laminar condition .....	30
Fig. 16. Various electrode types used in anode. ....	31
Fig. 17. Natural convection test results under turbulent condition .....	32
Fig. 18. Natural convection correlations for laminar and turbulent flow .....	33



## LIST OF TABLES

Table 1. Governing equations .....	4
Table 2. Dimensionless group for analogy .....	5
Table 3. Model reactions used in electrochemical mass transfer studies .....	7
Table 4. Various property values of the material .....	15
Table A-1. Test matrix for average mass transfer of Poiseuille flow .....	38
Table A-2. Test matrix for local mass transfer of Poiseuille flow .....	39
Table A-3. Test matrix for natural convection under laminar condition .....	40
Table A-4. The similar test results for several copper anodes .....	40



## Nomenclature

$C$	concentration [ $kmole/m^3$ ]
$D$	diffusivity [ $m^2/s$ ]
$F$	Faraday constant, 96,587,000 [ $Coulomb/kmole$ ]
$g$	gravitational acceleration [ $m/s^2$ ]
$H$	electrode height [ $m$ ]
$h_m$	mass transfer coefficient [ $m/s$ ]
$I$	electric current [ $A$ ]
$k$	reaction rate constant
$L$	length of mass transfer section [ $m$ ]
$N_t$	total mass flux [ $kg/m^2 \cdot s$ ]
$N_m$	mass flux caused by electric migration [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]
$N_d$	mass flux caused by diffusion [ $kg/m^2 \cdot s$ ]
$N_c$	mass flux caused by convection [ $kg/m^2 \cdot s$ ]
$n$	number of electrons in charge transfer reaction
$t_n$	transference number
$\alpha$	thermal diffusivity [ $m^2/s$ ]
$\beta$	volumetric expansion coefficient [ $m^3/K$ ]
$\gamma$	dispersion coefficient
$\mu$	viscosity [ $kg/ms$ ]
$\nu$	kinematic viscosity [ $m^2/s$ ]
$\rho$	density [ $kg/m^3$ ]

## SUMMARY

Hydrogen is expected to help address concerns about global climate change and energy security. The HTGR (High-Temperature Gas-cooled Reactor) drew attention as one of the most competitive heat source for producing hydrogen. The knowledge of detailed heat transfer phenomena in gaseous phase emerges as an important factor for HTGR, where buoyancy effect plays a significant role. Large and expensive test facilities are to be constructed to assess the detailed mixed convection phenomena.

However, using analogy concept, heat transfer system can be transformed to mass transfer system(copper electroplating system) and vice versa. If we could devise simple mass transfer system and find experimental solution from that system, then theoretically it is not difficult to find solution for similar heat transfer system. This study explores the applicability of simple mass transfer experiments to heat transfer researches using analogy concept.

A copper electroplating system with limiting current technique has a good advantage to simulate heat transfer system as mass transfer coefficient, analogous with heat transfer coefficient, can be directly obtained from the information of the bulk concentration and electric current between electrodes.

Therefore, the validity of the analogy experimental method was confirmed through comparison between the test results obtained by measuring limiting current and corresponding well-known heat transfer correlations. Three different forced and natural convection mass transfer systems were constructed to simulate Poiseuille flow at horizontal geometry and laminar and turbulent buoyant flows at vertical geometry. It was shown that the close agreement between results for mass transfer experiment and heat transfer

correlation is an encouraging indication of the validity of the analogy theory and the experiment method. It may also be concluded that analogy method using electroplating system make it possible to predict the unknown heat transfer correlations. Thus, Analogy methodology is expected to be a useful tool for heat transfer studies for HTGR development as the electroplating method not only provide with useful information on heat transfer but also has cost-effective advantage than any other experiments.



# I. 서론

수소는 연료전지(Fuel cell)와 내연기관, 그리고 가스터빈과 같은 기존 에너지 시스템에 사용될 수 있는 재생가능한 에너지원으로써 주목받고 있다[Seaworthy System Inc., 2002]. 그러나 수소는 화석연료와는 달리 화석에너지, 태양에너지, 원자력에너지 등의 1차 에너지를 투입해야 생산해낼 수 있는 2차 에너지 [Jong-Hwa Jang, et al., 2003]이다. 따라서 청정에너지로서의 수소를 실생활에 이용하려면, 친환경적인 방법으로 수소를 생산할 수 있어야 한다.

한편, 우리나라의 원자력은 주로 전력생산에 초점을 맞추어 개발되어왔다. 이러한 원자력에너지는 이산화탄소배출이 없고 에너지밀도가 높기 때문에 세계 기후변화와 에너지자립을 도모하는데 효용성이 높다. 따라서 원자력을 이용하여 수소를 생산하는 방법이 친환경적일 뿐만 아니라 다른 에너지원보다 경쟁력이 있다. 이러한 장점 때문에 원자력을 이용하여 수소를 생산하는 방법이 전세계적으로 연구되고 있다. 특히 고온가스로(High Temperature Gas-cooled Reactor)에서의 높은 열을 이용한 수소생산이 가장 효율적인 것으로 평가됨에 따라 열분해 방식의 수소생산기술이 활발히 연구되고 있다[Jong-Hwa Jang, et al., 2003].

고온가스로(HTGR)는 헬륨과 같은 불활성 기체를 냉각재로 사용하여 열전달 사이클을 이루는 원자로형이다. 원자로에서 경수가 아닌 기체가 냉각재로 쓰일 경우, 경수에 비하여 열용량이 작아서 상대적으로 복사열전달과 전도의 비율이 증가하고 온도에 따른 부피팽창이 크기 때문에 부력영향(Buoyance effect)으로 인하여 열수력 문제의 해석상 상당한 차이가 발생한다. 따라서 고온가스로의 열전달은 순수한 강제대류(Forced convection)가 아니라 자연대류(Natural convection)가 동시에 나타나는 혼합대류(Mixed convection) 형태이다.

그러나 우리나라의 원자력기술이나 MARS와 같은 안전해석 전산코드는 가압 경수로(Pressurized Light Water Reactor)를 중심으로 개발되어 왔기 때문에 냉각수가 경수에서 가스로 대체되는 고온가스로를 개발하기 위해서는 기체상의 열전달거동이

나 열전달상관식에 대한 심화된 지식기반이 요구된다.

특히, 혼합대류를 살펴보기 위해서는, 부력자체가 유체의 구동력으로 작용하기 때문에, 충분히 큰 부력을 얻기 위한 실험장치가 필요하다. 따라서 고부력의 기체 거동을 모사하기 위해 실규모(Full scale) 실험이 불가피하다. 가스로(GCR) 선진국인 영국의 경우, 약 10 m 높이의 실험장치를 건조하여 혼합대류연구를 수행한다[Jian Kang Li, 1994]. 하지만 실규모 장치로써 실험을 수행할 경우, 막대한 재원이 소요될 뿐만 아니라 전도에 의해 구조물 표면으로 열의 누설(Heat leakage)이 불가피하고 복사열전달(Radiation heat transfer) 또한 열전달에 기여를 하기 때문에 순수한 대류열전달만을 평가하는데 어려움이 따른다. 그러나 상사성의 개념을 이용하면 이러한 열전달 문제를 보다 간단하고 취급이 용이한 물질전달 실험장치로 전환하여 해결할 수 있다.

물질전달(Mass transfer)과 열전달(Heat transfer)현상은 서로 수학적·물리적 상사가 성립되기 때문에 물질전달현상을 열전달실험으로 또는 열전달현상을 물질전달 실험으로 전환할 수 있다[A. Bejan, 1994]. 물질전달계(Mass transfer system)의 하나인 전기도금계(Electroplating system)의 경우 열전달실험에 비해 측정이 용이하고 경계조건의 제어가 쉬우며 쉽게 큰 Rayleigh 수를 얻을 수 있기 때문에 축소실험장치로 고부력 실험을 수행할 수 있다. 또한 전기도금 실험에서는 열전달 실험에서의 부수적인 효과 즉, 복사와 전도 등의 영향이 나타나지 않는다는 장점이 있다.

본 연구에서는 상사성 개념을 이용하여 물질전달 실험으로써 열전달 현상을 모사할 수 있는 실험방법론을 개발하였다. 전기도금계에 대하여 개발된 실험 방법론을 검증하기 위해 수평평판에서의 강제대류와 수직벽면에서의 자연대류 열전달 현상을 모사하였다. 이러한 실험결과들은 기하학적으로 복잡한 고온가스로(HITGR)에서의 열전달상관식 개발에 적용할 수 있는 가능성을 시사한다.

## II. 이론적 배경

### 1. 물질전달과 열전달의 유사성

#### 1) 유사성

물리적 현상이나 역학에서 나타난 문제들은 이에 대한 지배방정식을 해석적·수치적으로 규명하여 수학적으로 해결할 수 있다. 그러나 Navier-Stokes 방정식과 같이 복잡하거나 해를 구할 수 없는 경우, 실험을 통하여 그 현상에 대한 문제를 해결할 수 있다. 특히 “유사성(Analogy)”을 이용한 실험기법은 물질의 거동에 관한 정보도 제공하기 때문에 현상과악에 유용하게 쓰일 수 있다[G. Murphy, 1950].

유사성(Analogy)이란, 상이한 두 시스템에서 시스템기능이나 거동이 서로 유사(Similar)하게 나타나는 시스템간의 특성이다. 그리고 이러한 유사성을 이루는 두 시스템은 “서로 유사(Analogous)하다”라고 표현한다. 시스템간의 유사성이 성립하는 이유는 각각의 시스템을 구성하는 요소들 간에 일정한 상관관계가 나타나기 때문이다. 즉 시스템을 모델링하는 지배방정식이 똑같은 형태를 취하기 때문에 유도되는 결과나 현상이 유사하게 나타난다[A. Bejan, 1994].

따라서 유사성을 이용하면 간단한 시스템을 파악함으로써 이와 상사를 이루는 복잡한 시스템을 이해할 수 있다. 그 대표적인 예가 전기회로와 수로(Water circuit)이다 - 전압과 전류, 저항은 수로에서의 양정, 유량, 압력강하와 유사하다. 그리고 두 시스템의 경계조건과 초기조건을 동일하게 취해주면, 하나의 시스템(Prototype)을 규명함으로써 이와 유사한 시스템(Model)의 물리적 현상을 논리적으로 밝혀낼 수 있다[E. Wilfred, 1973].

2) 물질전달과 열전달의 유사성

Table 1. Governing equations.

Heat Transfer	Mass Transfer
$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$ (Continuity equation)	
$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + X$ (Momentum equation)	
$\frac{DT}{Dt} = \alpha \nabla^2 T$ (Energy conservation equation)	$\frac{DC}{Dt} = D \nabla^2 C$ (Concentration equation)

표 1에서 열전달계와 물질전달계의 지배방정식을 살펴보면, 연속방정식(Continuity equation)과 운동량방정식(Momentum equation)은 일치하고 열전달의 에너지방정식과 물질전달의 농도방정식은 수학적으로 서로 유사하다. 따라서 이들의 경계조건과 초기조건이 같다면 특정 입력조건에 해당하는 열전달과 물질전달의 현상이나 거동은 서로 유사한 형태를 취한다[A. Bejan, 1994; J. Wilk, 2003]. 이것은 물질전달 실험을 통하여 열전달 실험에서 나타나는 결과를 얻을 수 있으며 반대로 열전달실험으로 물질전달 실험을 대체할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 시스템의 상호 전환이 가능하다 - 에너지방정식의 온도( $T$ )를 농도방정식의 농도( $C$ )로 변환하고 열확산계수( $\alpha$ )를 농도확산계수( $D$ )로 변환함으로써 열전달계를 물질전달계로 전환할 수 있다.

이렇게 물질전달과 열전달에서의 유사한 변수끼리 변환을 하면 열전달에서의 무차원수와 대응되는 물질전달의 무차원수가 나타난다 - 열전달계의 무차원수, Prandtl수와 Nusselt수, 그리고 Rayleigh수는 물질전달계의 Schmidt수와 Sherwood수, 그리고 Rayleigh수로 각각 변환된다(표 2). 그리고 대응되는 무차원수끼리는 구성(Structure)과 조직형태가 똑같기 때문에 물리적 의미가 유사하다. 그러므로 열전달 상관식은 표 2의 무차원수 변환을 통하여 물질전달 상관식으로 나타낼 수 있다.

Table. 2. Dimensionless group for analogy.

Heat transfer	Mass transfer
Prandtl No. $\frac{\nu}{\alpha}$	Schmidt No. $\frac{\nu}{D}$
Nusselt No. $\frac{h_h L}{k}$	Sherwood No. $\frac{h_m L}{D}$
Rayleigh No. $\frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}$	$\frac{gH^3}{D\nu} \frac{\Delta\rho}{\rho}$
Reynolds No. $\frac{\bar{u}L}{\nu}$	

그림 1은 열전달과 물질전달에 대한 Blasius 유동형상이 같은 경계조건에서 유사하게 나타난다는 것을 보여준다.

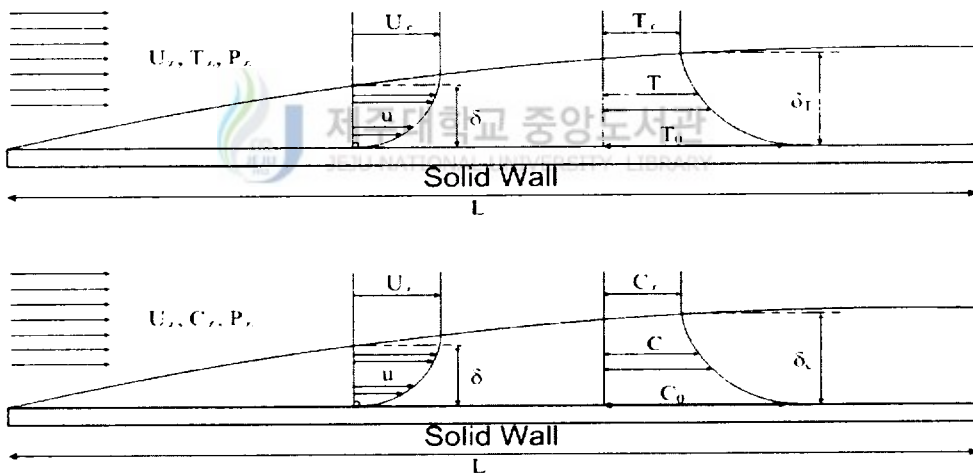


Fig. 1. Comparison between Temperature & Concentration boundary layer for Prandtl or Schmidt No.=1.



## 2. 전기도금계

전기도금계(Electroplating system)는 금속이온을 포함하는 전해액을 물질전달이 일어나는 유체로 사용한다. 이는 전극에 인가된 전위차로 인해 금속이온이 전극(환원전극: Cathode) 표면으로 도금이 진행될 때의 반응을 이용하여 물질전달 특성을 파악하는 시스템이다.

전극 표면에서 금속이온이 전극과 전자교환을 하여 도금이 진행되면 전극 표면 근처에서 금속이온의 농도는 모액에 비해 작아진다. 이렇게 모액과 농도차가 생기면 유동에 따라 경계층(Boundary layer)을 형성한다. 농도차가 심화되어 용액의 점성을 극복할 만큼 밀도차가 커지면 전극 표면에서 부력이 발생한다. 그리고 이러한 현상들은 온도차를 통한 열전달의 거동과 흡사하다. 따라서 전기도금계를 이용한 물질전달 실험으로 예상되는 열전달 거동과 현상을 예측할 수 있다. 또한 전기도금 과정에서 나타나는 물질전달 상관식은 상사성에 따라 열전달 상관식과 똑같은 형태를 취하기 때문에 열전달실험을 물질전달 실험으로 대체할 수 있다. 그러므로 전기도금기법을 통한 물질전달 연구는 전기화학분야 뿐만 아니라 유체역학과 열전달 연구 분야에서도 그 중요성이 고조되고 있다.

전기도금기법은 1940년경에 Levich의 회전디스크 전극에서 개발된 대류확산(Convective diffusion) 관계식과 자연대류에 대한 대류확산이론(Convective diffusion theory)[V. G. Levich, 1962]이 정립되면서부터 물질전달연구에 활발히 이용되기 시작하였다. 그 후 여러 가지 조건에서 개발된 물질전달 상관식들을 Selman과 Tobias가 체계적으로 정리[J. R. Selman and C. W. Tobias, 1978]하여 물질전달 연구분야에 공헌을 하였다. 그리고 전기도금기법으로 측정된 물질전달 상관식은 동일한 조건에서 측정된 열전달상관식과 유사하다는 주장[J. N. Agar, 1947; B. Thomas, et al., 1978]에 따라 해석적으로 유도된 상관식을 검증하는 과정으로 이용하고 있다. 이러한 물질전달 실험기법은 그 이후로도 다각도로 연구되어 물질전달과 열전달이 동시에 발생하는 시스템에서 확대이용 연구되고 있다[J. Wilk, 2003].

1) 여러 가지 전기화학반응

Table. 3. Model reactions used in electrochemical mass transfer studies.

Electrochemical reactions	Electrode metal	Supporting electrolyte
<b>Cathodic</b>		
1. $Cd^{2+} + 2e \rightarrow Cd$	<i>Cd(Hg)</i>	None
2. $Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu$	<i>Cu</i>	$H_2SO_4$
3. $Fe(CN)_6^{3-} + e \rightarrow Fe(CN)_6^{4-}$	<i>Ni, Pt</i>	<i>NaOH</i> <i>KOH</i>
4. $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$	<i>Pt, Ag</i>	<i>NaOH</i> <i>NaCl</i>
5. $I_3^- + 2e \rightarrow 3I^-$	<i>Pt</i>	<i>KI</i>
6. $Fe^{3+} + e \rightarrow Fe^{2+}$	<i>Pt, Cu</i>	$H_2SO_4$
7. $Ag^+ + e \rightarrow Ag$	<i>Ag</i>	$HClO_4$
8. $Ce^{4+} + e \rightarrow Ce^{3+}$	<i>Pt, Cu</i>	$H_2SO_4$
<b>Anodic</b>		
9. $CuCl_4^{3-} \rightarrow CuCl_4^{2-} + e$	<i>Pt</i>	$CaCl_2$
10. $Fe(CN)_6^{4-} \rightarrow Fe(CN)_6^{3-} + e$	<i>Ni, Pt</i>	<i>NaOH</i> <i>KOH</i>
11. $Ce^{3+} \rightarrow Ce^{4+} + e$	<i>Pt</i>	$H_2SO_4$

물질전달실험에 이용 가능한 전기화학반응으로 표 3의 금속이온 반응식들이 사용될 수 있다. 그러나 물질전달의 주체인 금속이온은 화학적으로 안정하고 용해도가 높아야 하며 특히, 물성치가 광범위한 조성에 걸쳐 잘 알려진 것이라야 한다. 따라서 다음의 두 가지 반응식이 전기도금기법을 이용한 전기화학실험으로 주로 사용되고 있다[B. Thomas, et al., 1978].

- ① 황산구리 전해액에서 구리이온이 구리음극판으로의 침전(전기도금)반응
- ② 백금을 첨가한 니켈전극에서 철-철산염의 환원반응

본 연구에서는 구리전극에서 구리이온의 침전반응(전기도금반응)을 이용하여 물질전달 실험을 하였다. 구리이온은 비교적 용해도가 높고 침전반응을 통하여 부산물을 만들지 않는다는 장점을 갖고 있다. 또한 다른 전해액에 비해 상대적으로 큰 밀도차를 유발하여 고부력을 얻을 수 있기 때문에 자연대류 현상 모사에 적합하다.

## 2) 물질전달 구조

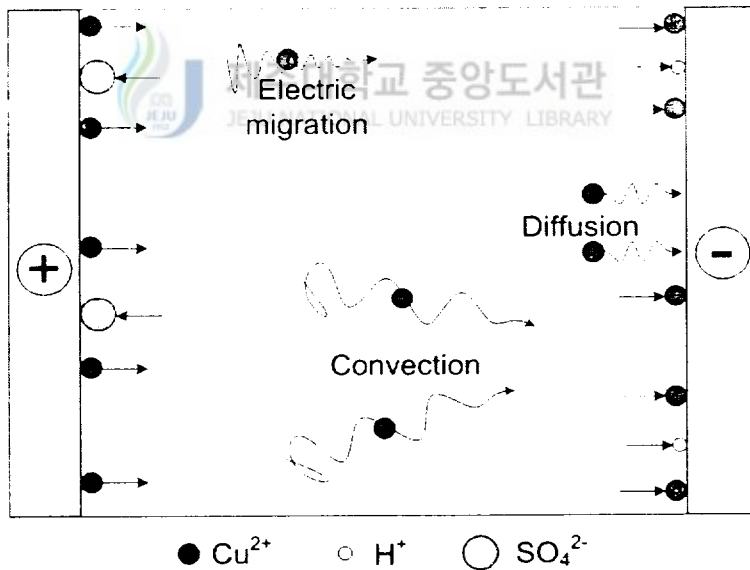


Fig. 2. Schematic diagram of mass transfer in electric field.

전해질 용액(Electrolyte)이 채워져 있는 두 전극 사이에 전압을 걸어주면 전위차가 발생하여 양이온은 음극으로 음이온은 양극으로 이동하는 물질전달이 일어난다.

황산-황산구리 수용액에서는 구리양극(Copper anode)에서 산화반응으로 구리이온이 녹아 나오며 음극에서는 환원반응에 의해 구리가 석출된다.



전기도금에 의한 물질전달은 전기영동(electric migration)과 농도차에 의한 확산(Diffusion), 그리고 유체의 대류(Convection)에 의해 일어난다(그림 2). 따라서 단위 면적을 통한 전체 물질전달량은 아래의 식으로 나타낼 수 있다[C. R. Wike and C. W. Tobias, 1953].

$$N_t = N_m + N_d + N_c \quad [kg \cdot mole / m^2 \cdot s] \quad (1)$$

여기서  $N_r$ ,  $N_m$ ,  $N_d$ ,  $N_c$ 는 각각 전체 물질전달 플럭스(Flux)와 전기영동, 그리고 확산과 대류에 의한 물질전달 플럭스를 나타낸다. 여기서 전체물질 전달량은 Faraday 법칙을 따라 다음과 같이 전류밀도에 비례하는 관계식이 얻어진다 [Newman, 1992].

$$N_t = \frac{I}{nF} \quad (2)$$

여기서  $I$ 는 전류밀도(Current density),  $n$ 은 전극반응에서 교환되는 전자수 즉, 이온의 원자가(Valence charge)를 나타내며  $F$ 는 패러데이 상수(Faraday constant)이다.

한편, 전기영동에 의한 물질전달 플럭스,  $N_m$ 은 열전달에서 나타나지 않는 현상으로 물질전달 현상을 열전달 현상으로 전환하기 위해서 이에 대한 이해가 필요하다. 정상상태에서 전기영동에 의한 이온의 물질전달량은 Faraday 법칙과 전달수(transference number)를 이용하여 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$N_m = \frac{t_n I}{nF} \quad (3)$$

전달수  $t_n$ 은 전기영동에 의해 전달되는 구리이온중에 전극반응에 참여하는 이온의 분율을 나타낸다. 만약 구리이온 10개가 식 (1)과 같은 구조로 전달된다면 그 중 4개의 구리이온은 전기영동으로 물질전달이 일어난다[V. G. Levich, 1962]. 따라서 전기도금에 의한 물질전달 현상으로 열전달계를 해석하기 위해서 전기영동 효과를 억제해야 한다. 이러한 전기영동에 의한 물질전달은 과량의 “고정 전해액(supporting electrolyte)” 또는 “비활성전해액(inert electrolyte)”을 첨가하여 최소화할 수 있다[C. R. Wike and C. W. Tobias, 1953]. 즉 고정전해액을 다량 첨가하여 전해질 용액의 전도도를 증가시킴으로써 금속이온이 받는 전기장의 세기를 줄인다. 본 실험에 사용된 전해질 용액은 황산구리수용액( $CuSO_4$ )에 과량의 황산( $H_2SO_4$ )을 첨가한 것을 사용하였다. 전해액에 따라 강염기를 사용하기도 한다.

전기영동 효과를 제외하고 열전달과 상사한 확산 및 대류에 의한 물질전달은 식 (1) ~ (3)에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$N_d + N_c = N_t - N_m = \frac{(1 - t_n)I}{nF} = h_m (C_b - C_s) \quad (4-a)$$

$$h_m = \frac{(1 - t_n)I}{nF(C_b - C_s)} \quad (4-b)$$

여기서  $C_b$ 는 금속이온의 모액 농도이고  $C_s$ 는 전극 표면에서의 이온의 농도이며  $h_m$ 은 물질전달계수(Mass transfer coefficient)이다. 이는 확산 및 대류에 의한 물질전달 과정에서 나타난 물질전달계수이므로 열전달계에서의 열전달계수(Heat transfer coefficient)와 같은 의미를 갖는다. 따라서 열전달 실험을 물질전달 실험으로 전환할 수 있다.

### 3) 한계전류

한계전류는 물리적으로 특정 전극반응에서 나타날 수 있는 최대 전류값을 의미한다. 즉 한계전류는 전해용액의 조성, 물성치, 그리고 전극표면의 수력학적 조건에 따라 결정된다[B. Thomas, et al., 1978]. 이처럼 한계전류는 특정 상황에 대해 일정한 값을 갖기 때문에 물질전달특성(물질전달계수)을 파악하는데 중요한 인자가 된다.

황산-황산구리 수용액을 사용하여 전기도금반응을 진행시키면, 구리이온은 전극표면에서 전자를 얻으면서 전극 표면에 도금이 된다. 즉, 구리이온 자체가 전극반응을 통하여 다시 구리전극으로 작용한다. 이러한 전극표면반응을 다음의 2 가지 반응경로로 나타낼 수 있다.

- ① 모액에서 전극표면으로의  $Cu^{+2}$ 이온의 물질전달
- ②  $Cu^{+2}$  이온이 도금되는 전극표면반응

과정 ①에서 일어나는 물질전달 플럭스는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_1 = h_m (C_b - C_s) \quad (5)$$

그리고 전극표면반응을 1차 반응이라 가정하면 ② 과정은 아래의 반응 속도식으로 나타낼 수 있다.

$$N_2 = kC_s \quad (6)$$


여기서  $k$ 는 반응속도상수(Reaction rate constant)이다. 정상상태에서는  $N_1=N_2$ 이므로 아래와 같은 관계가 성립된다.

$$h_m (C_b - C_s) = kC_s \quad (7)$$

따라서 표면에서의 농도  $C_s$ 는 다음과 같다.

$$C_s = \frac{h_m C_b}{h_m + k} \quad (8)$$

이제 두 전극 사이에 주어지는 전위차를 점점 증가시키면 반응속도상수  $k$ 는 전위차가 증가함에 따라 급격하게 증가하는 반면, 물질전달 계수  $h_m$ 은 전위차에 무관한 일정한 값을 갖는다[W. J. Moore, 1972]. 따라서 전위차가 계속 증가하여  $k \gg h_m$ 이 되면 모액의 농도는 일정하기 때문에 표면농도  $C_s$ 는 무시할 수 있을 만큼 작아진다. 이때, 이 영역에서 물질전달(구리이온의 도급)은 최대가 되고 전위차를 증가시켜도 두 전극 사이에 흐르는 전류가 일정한 한계전류(Limiting current) 영역을 나타낸다. 이렇게 한계전류영역에서는 전극 표면의 농도를 Zero로 취급할 수 있기 때문에 식 (4-b)처럼 표면농도를 구해야하는 어려움을 극복할 수 있다. 한계전류 영역에서 식 (4-b)는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$h_m = \frac{(1 - t_n) I_{\text{lim}}}{n F C_b} \quad (9)$$

여기서  $I_{\text{lim}}$ 은 전극의 한계전류 밀도( $A/m^2$ )이다.

실험에서는 인가된 전압에 대한 전류를 도시하여 한계전류곡선을 구함으로써 한계전류값을 찾아낼 수 있다. 이러한 한계전류곡선은 전류가 일정한 플래토우 영역을 포함하여 3 단계의 물질전달 과정을 나타낸다. 첫 번째는 도급되는 구리이온 만큼 전류가 측정되는 영역이다. 따라서 환원전극과 산화전극(Anode) 간의 전위차를 조금씩 증가시킴에 따라 두 전극 사이의 전류는 선형적으로 증가한다. 두 번째는 한계전류 영역이다. 이 구간에서 전극 표면의 농도는 0에 가까워지면서 전류증가율이 급속히 감소하기 때문에 플래토우 영역이 나타나게 된다. 세 번째는 기체 환원 영역이다 - 전극에 비교적 큰 전압을 인가하게 되면 환원전극에 가스거품이 생성하면서 전류가 증가한다. 이것은 황산-황산

구리 수용액에서 불활성물질로 작용하였던 수소이온이 충분한 활성화 에너지를 얻어 아래와 같은 반응으로 전극반응에 참여하기 때문이다[W. J. Moore, 1972].

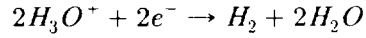


그림 3은 Reynolds수 152 영역의 Poiseuille 유동에서 나타난 한계전류 곡선이다. 이처럼 전위차의 증가에도 불구하고 전류가 일정한 영역이 존재하는 한계전류구간이 나타난다.

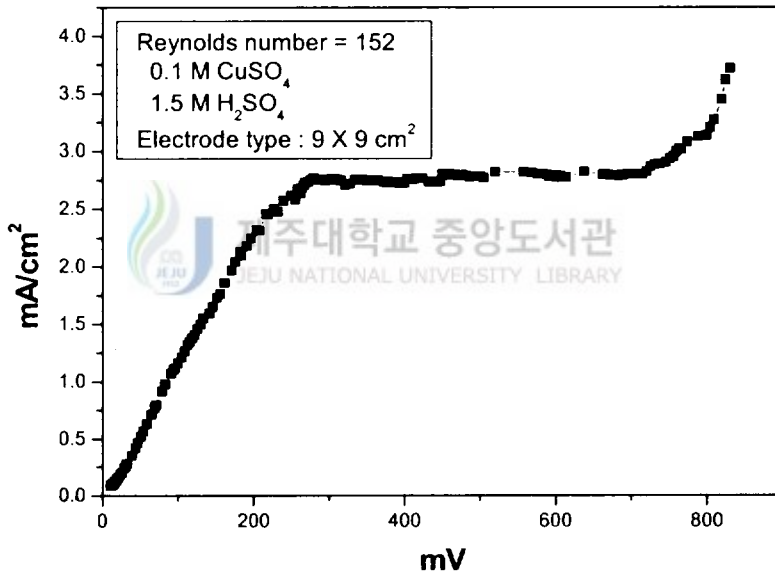


Fig. 3. Typical limiting current density curve



#### 4) 무차원수와 물성치

상사성 실험기법을 검증하기 위해 기지의 열전달상관식을 물질전달상관식으로 변환한 다음, 물질전달 실험결과와 비교하였다. 따라서 표 2의 물질전달계에 대한 주요 무차원 수를 구하기 위해서는 많은 물성치가 필요하다.

이 물성치들은 Fenech와 Tobias[E. J. Fenech and C. W. Tobias, 1960]가 제안한 먹급수 형태의 관계식을 사용하였다.

$$\rho(g/cm^3) = 0.9978 + 0.06406M_H - 0.00167M_H^2 + 0.12755M_{Cu} + 0.01820M_{Cu}^2 \quad (10)$$

$$\mu(cp) = 0.974 + 0.1235M_H + 0.0556M_H^2 + 0.5344M_{Cu} + 0.5356M_{Cu}^2 \quad (11)$$

$$\mu D_{CuSO_4}(cm^2/sec) = (0.7363 + 0.00511M_H + 0.02044M_{Cu}) \times 10^{-5} \quad (12)$$

$$t_{Cu^{2+}} = (0.2633 - 0.1020M_H)M_{Cu} \quad (13)$$

$$\frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_b} = M_{Cu} \left( \beta_{CuSO_4} - \beta_{H_2SO_4} \frac{\Delta M_H}{\Delta M_{Cu}} \right) \quad (14)$$

$$\frac{\Delta M_H}{\Delta M_{Cu}} = -0.000215 + 0.113075\gamma^{1/3} + 0.85576\gamma^{2/3} - 0.50496\gamma \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{M_{Cu}}{M_{Cu} + M_H} \quad (16)$$

$$\beta_j = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial C_j} \right]_{T, C_i \neq j} \quad (17)$$

여기서  $M_H$ 와  $M_{Cu}$ 은 각각 황산과 황산구리의 몰농도( $M : kmol/m^3$ )를 나타낸다. 위 식들은 22°C에서  $\pm 5\%$  이내의 오차로 잘 맞는다고 알려져 있다. 온도가 다른 경우에는 Ching과 Goldstein[H. D. Chiang, et al., 1991]에 의해 정리되어 있는 식을 이용하여 온도의 효과를 보정한다. 다음의 표 4는 강제대류 실험에서 사용된 물성치들이다. 황산 1.5 M, 황산구리 0.1 M일 때 위의 관계식을 사용하여 계산하였다.

Table 4. Various property values of the material.

$\rho$ (density)	$1.103 \text{ kg/m}^3$
$\mu$ (viscosity)	$1.343 \text{ cp} = 1.283 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$
$D$ (diffusivity)	$5.554 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
$t_{\text{Cu}^+}$ (transference number)	0.01103
$n$ (valence number of copper ion)	2
$F$ (Faraday constant)	96485 coulomb/mole
$C_b$ (bulk concentration)	0.1 mole

### Ⅲ. 물질전달 실험

#### 1. 강제대류

강제대류 물질전달 실험으로 수평평판에서의 Poiseuille 유동을 선택하였다. Poiseuille 유동은 거동특성과 열전달상관식이 잘 알려져 있기 때문에 실험장치가 적절하게 제작되었는지, 실험결과가 상사성과 잘 부합하는지 판단하는데 유용한 잣대가 된다.

##### 1) 수평평판에서의 Poiseuille 유동

Poiseuille 유동은 외부의 균질한 유동(Uniform stream)이 상하로 고정된 평행 평판(혹은 튜브)을 만났을 때 평판사이의 유동방향으로 경계층(Boundary layer)이 완전히 발달된 유동이다. 이는 압력구배에 비례하는 속도분포를 갖으며 유동방향에 불룩한 속도형상(Velocity profile)을 갖는다는 특징이 있다[M. White, 1996].

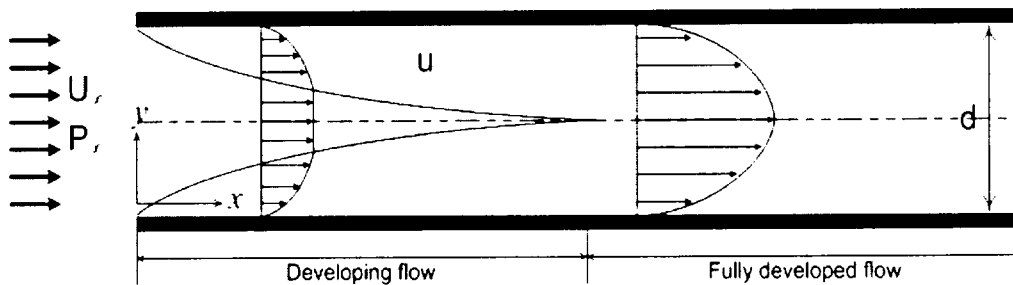



Fig. 4. Poiseuille flow configuration.

본 연구에서 사용한 황산구리-황산 수용액은 *Schmidt*수가 2,000이상으로 1보다 아주 큰 경우이다. 이때는 물질전달 경계층이 속도 경계층보다 아주 작게 발달된다 [A. Bejan, 1994]. 따라서 Poiseuille 유동에 대한 물질전달 실험은 속도경계층이 완전히 발달되어 있고 농도경계층은 발달할 때의 열전달 상관식을 이용하였다. 이러한 상황에서의 강제대류 국부열전달상관식은 다음과 같다[E. J. Fenech and C. W. Tobias, 1960].

$$N_r = 0.978 \left( Re Pr \frac{d}{x} \right)^{1/3} \quad (18)$$

여기서  $d$ 는 덕트의 높이 즉, 전극 평판 사이의 거리이다.

상사성에 따라 식 (18)은 무차원수 변환을 통하여 물질전달상관식으로 나타낼 수 있다.



$$Sh_r = 0.978 \left( Re Sc \frac{d}{x} \right)^{1/3} \quad (19)$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Nusselt No.} \rightarrow \text{Sherwood No.} \\ \text{Reynolds No.} \leftrightarrow \text{Reynolds No.} \\ \text{Prandtl No.} \rightarrow \text{Schmidt No.} \end{array} \right]$$

그리고 전극의 길이  $L$ 을 기준으로 평균 *Sherwood*수를 아래와 같이 정의한다.

$$Sh_{av} = \frac{1}{L} \int_0^L Sh_r dx \quad (20)$$

따라서 국부 *Sherwood*수로부터 아래와 같이 평균 *Sherwood*수를 구할 수 있다.

$$Sh_{ac} = 1.467 \left( Re Sc \frac{d}{L} \right)^{1/3} \quad (21)$$

물질전달 실험은 일정면적 이상의 전극으로 실험을 하기 때문에 열전달 실험과

물질전달 실험은 일정면적 이상의 전극으로 실험을 하기 때문에 열전달 실험과 달리 국부 물질전달량을 측정하기가 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 유한한 길이 내에서 국부 평균물질전달량을 측정하였다.

길이  $L_{i-1}$ 에서  $L_i$ 까지의 국부 평균물질전달 Sherwood수는 다음과 같다[C. W. Tobias and R. G. Hickman, 1965].

$$\begin{aligned} \overline{Sh}_{x_i} &= \frac{1}{L_i - L_{i-1}} \int_{L_{i-1}}^{L_i} Sh_x dx \\ &= 1.467 \left( Re Sc \frac{d}{x_i} \right)^{1/3} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서  $\overline{x_i}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\overline{x_i} = \left( \frac{L_i - L_{i-1}}{L_i^{2/3} - L_{i-1}^{2/3}} \right)^3 \quad (23)$$


국부 물질전달 실험에서는 위의 관계식과 실험결과를 비교하여 실험방법의 타당성을 확인하였다.

## 2) 실험장치

Poiseuille 강제대류 유동 실험장치의 목적은 수평평판에서 Poiseuille 유동을 유도하여 유동중에 설치된 구리전극으로 한계전류를 측정하는 것이다.

실험장치는 황산에 대한 부식이 없고 관찰이 용이한 아크릴수지로 제작되었다. 그리고 펌프의 진동을 억제하고 유체의 안정적 유동을 위해 수두로써 유속을 조절할 수 있도록 설계하였다. 수평평판의 높이, 0.02 m와 0.7 m의 입구 길이(Entrance length)는 속도경계층이 완전 발달된 Poiseuille 유동을 유도한다[E. J. Fenech and C. W. Tobias, 1960]. 그리고 0.3 m의 종결부는 말단효과(End effect)를 없애기에 충분한 길이이다. 이를 바탕으로 설계된 실험장치 도면과 사진이 그림 5에 나타나있다.

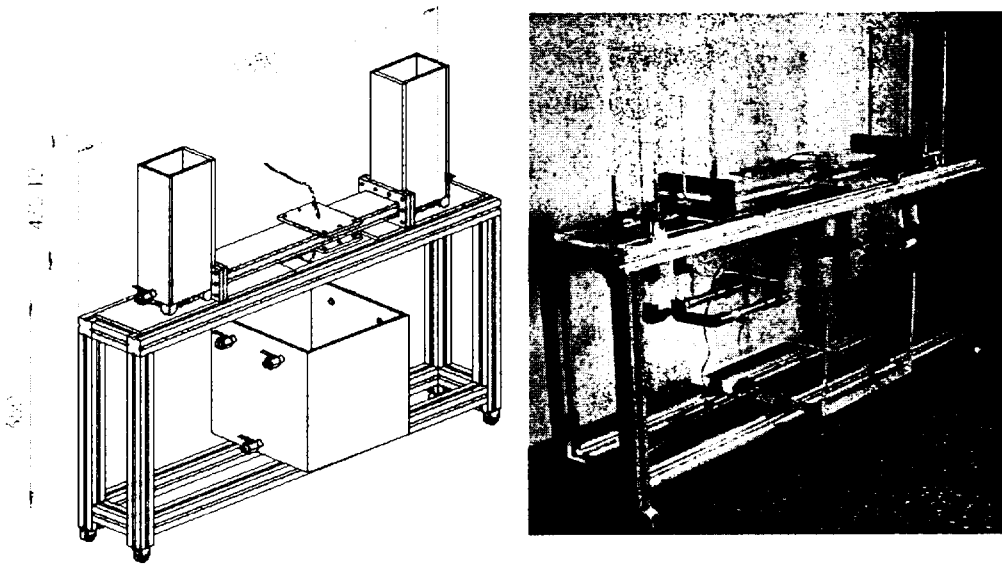


Fig. 5. Test facility of forced convection mass transfer.

구리전극(Copper electrode)은 평균 물질전달(Average mass transfer)과 국부 평균물질전달(Local mass transfer)에서의 한계전류를 측정하기 위한 것으로 각각 제작되었다. 평균물질전달 실험을 위해 가로·세로  $0.09\text{ m}$ 의 길이의 구리판으로 구리전극판을 제작하였다. 국부 평균물질전달 실험에서는 너비  $0.09\text{ m}$ , 길이  $0.022\text{ m}$ 의 구리평판 4개를 유동방향으로 배열한 Piece-wise 전극을 사용하였다 (그림 6-a, b).

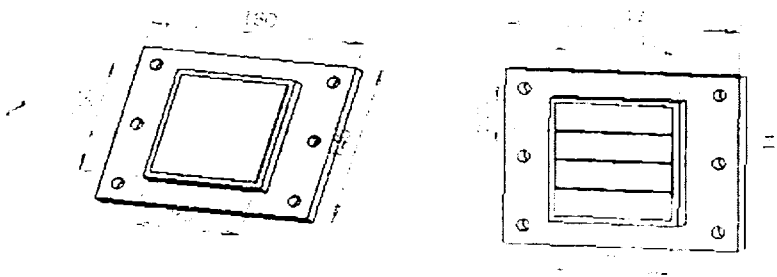


Fig. 6-a. Designed electrodes for average & local mass transfer test.

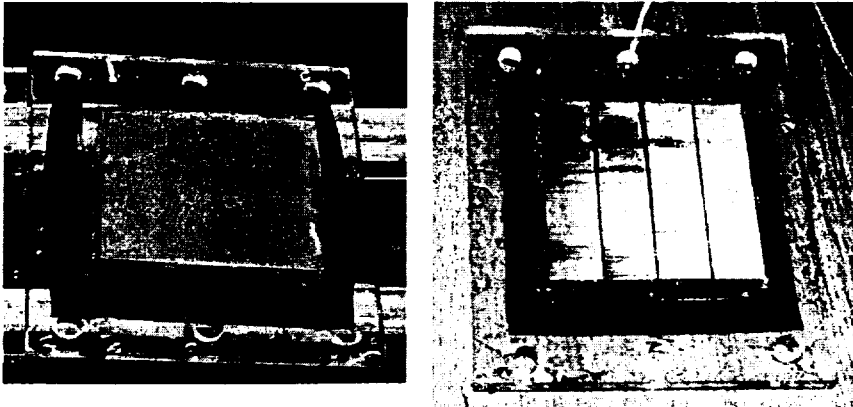


Fig. 6-b. Copper electrodes for average & local mass transfer test.

### 3) 실험장비 구성과 실험절차

시중에는 한계전류를 자동으로 측정하는 AMETEK사의 Potentiostat이 통용되고 있다. 그러나 장비가 고가이고 정격용량도 낮으며 최대 측정전류도 2 A밖에 안되기 때문에 활용범위가 좁다.

따라서 본 실험에서는 실험장치에 전압을 인가할 수 있는 직류 전원 (Toyotech DP30-5A)과 전극의 전위차를 증가시키면서 한계전류를 유도하는 가변 저항(RU-410)을 사용하였다. 그리고 Dual Display Multimeter(Fluke-45)로 전압과 전류를 측정하였다. 특히 Fluke-45는 전압과 전류값을 화면에 함께 표시해주기 때문에 한계전류 감시에 유용하다. 또한 구성된 실험 장비들의 정격용량이 10 W이상이고 10 A까지 측정할 수 있기 때문에 높은 한계전류가 나타나는 고부력 실험에서도 적절하다. 이처럼 실험에 적합한 실험장비가 갖춰지면 그림 7처럼 회로를 구성하여 한계전류를 구한다. 측정절차는 다음과 같다.

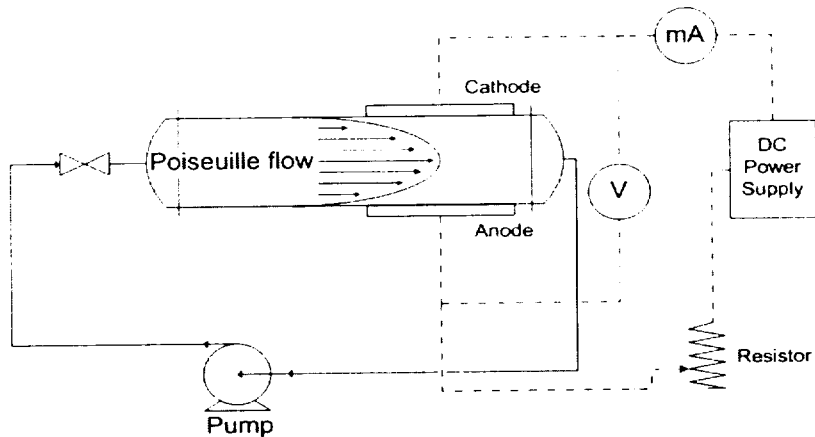


Fig. 7. The system circuit.

- ① 구리 전극판을 사포(#1500)를 사용하여 연마하고 아세톤으로 유기물을 제거한 뒤에 증류수로 세척한다.
- ② 펌프를 가동하여 기포가 생기지 않도록 황산구리-황산 수용액을 상류부(Upstream reservoir)로 방출한다(그림 8).
- ③ 유동이 안정화될 때까지 기다린 후 상류부(Upstream reservoir)에 설치된 수도조절 밸브를 사용하여 유속을 조절한다(그림 8).
- ④ 유량을 다섯 번 측정하여 평균 유량을 구한다.
- ⑤ 전극에 전압을 인가한 후 가변저항을 이용하여 전위차를 서서히 증가시킨다.
- ⑥ 전압과 전류의 변화를 관찰하면서 한계전류를 측정한다.
- ⑦ 환원전극에 기포가 생기기 시작하면 실험을 중단한다.
- ⑧ 다시 ① ~ ⑦ 과정을 반복하여 원하는 유속에서의 한계전류를 측정한다.

Poiseuille 유동에서의 강제대류 물질전달을 실험하기 위해서는 그림 8에서처럼 구리이온이 도금되는 환원전극이 산화전극보다 위에 설치되어야 한다. 만약 환원전극이 아래에 위치하면 도금이 진행되면서 부력이 발생하기 때문에 자연대류와 강제대류가 동시에 일어나는 혼합대류가 된다.



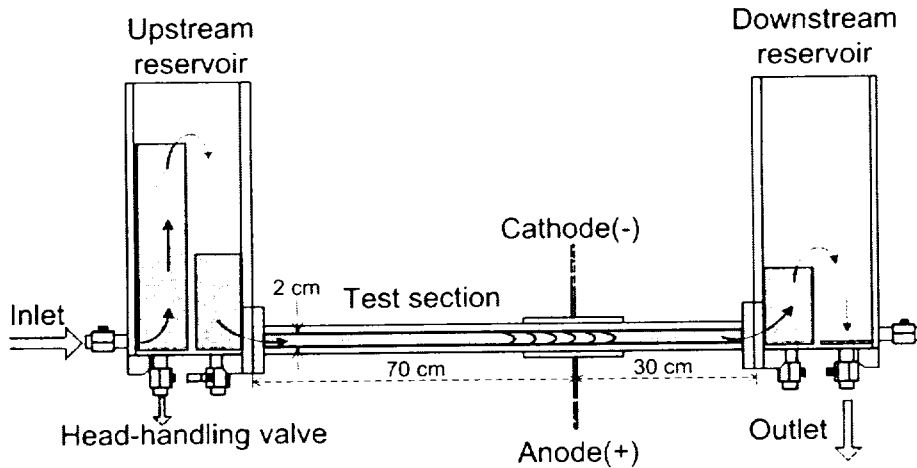


Fig. 8. Conceptual diagram for Poiseuille flow experiments.

## 2. 자연대류



혼합대류에서 부력이 심화되면 자연대류는 그 시스템에서의 열전달량에 많은 영향을 끼친다[Jian Kang Li, 1994]. 특히, 고온가스로(HTGR)개발에 있어서 자연대류는 중요한 요소로 부각되기 때문에 자연대류에 대한 물질전달 실험을 통하여 실험결과가 기존의 열전달상관식을 잘 모사하는지 확인하였다.

### 1) 자연대류

자연대류는 온도 또는 농도차에 의하여 발생하는 부력이 그 유체의 점성 및 확산을 극복할 때 나타난다. 그리고 자연대류의 *Grashof*수가  $10^9$  이상이 되면 부력 효과로 인한 상향구동력만으로도 난류로 천이(Transition)되기 때문에 열전달에 많은 영향을 미친다[A. Bejan, 1994; Jian Kang Li, 1994]. 따라서 외부의 에너지로 열 및 물질전달을 발생시키는 강제대류와 근본적으로 다르다. 그림 9는 열전달계에서 온도차로 발생한 부력에 의해 유체의 순환(자연대류)이 일어나는 메커니즘을

설명한다. 그리고 전기도급계로 시스템 전환이 이루어지면, 뜨거운 벽면(Heated wall)과 차가운 벽면(Cold wall)은 각각 환원전극과 산화전극으로 대체됨을 나타내고 있다.

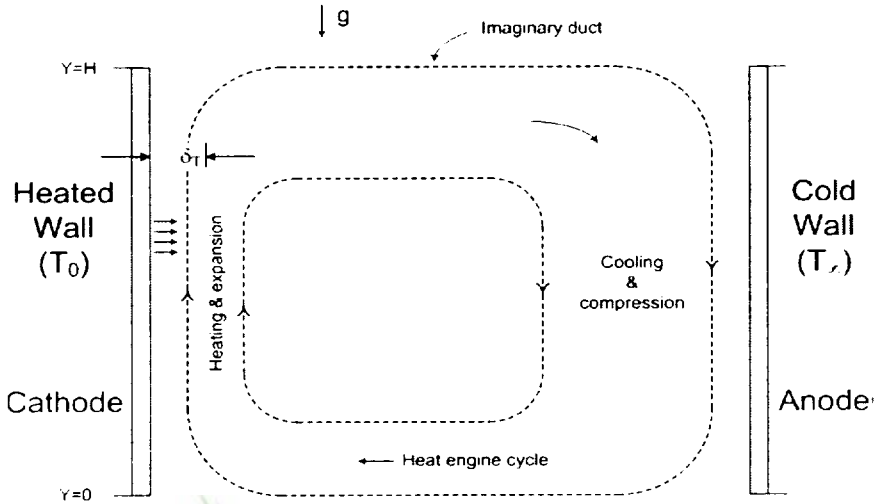


Fig. 9. Fluid circulation induced by temperature difference.

자연대류 물질전달 실험은 *Grashof* 수를 기준으로 층류( $Gr < 10^9$ )와 난류( $Gr > 10^9$ )에 대한 두 가지 열전달상관식을 모사하였다. 따라서 기존의 열전달상관식을 표 2와 같이 물질전달에 대한 무차원수로 변환한 다음 똑같은 형태의 물질전달상관식으로 나타내어 물질전달 실험결과와 비교하였다.

우선, 수직벽면에서 층류 자연대류에 대한 열전달 상관식은 다음과 같다[A. Bejan, 1994].

$$Nu_{nr} = 0.67 (GrPr)^{1/4} \quad \text{at } Gr < 10^9 \quad (24)$$

이를 물질전달에 대한 무차원 수로 변환하면 다음의 물질전달 상관식을 얻을 수 있다.

$$Sh_{nr} = 0.67 (GrSc)^{1/4} \quad \text{at } Gr < 10^9 \quad (25)$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Nusselt No.} \rightarrow \text{Sherwood No.} \\ \text{Grashof No.} \rightarrow \text{Grashof No.} \\ \text{Prandtl No.} \rightarrow \text{Schmidt No.} \end{array} \right]$$

마찬가지 방법으로 난류 자연대류에 대한 열전달상관식을 물질전달상관식으로 전환하였다[B. Thomas, 1978].

$$Sh_{nr} = 0.31 (GrSc)^{0.28} \quad \text{at } Gr > 10^9 \quad (26)$$

## 2) 실험장치

실험장치는 아크릴을 사용하여 사각 컨테이너 형태로 제작하였다(그림 10). 전극간의 거리는 Scale analysis를 통하여 농도경계층(Concentration boundary layer)과 속도경계층(Velocity boundary layer) 발달에 영향을 받지 않도록 0.3 m의 충분한 거리를 확보하였고, 전극의 너비는 조작의 편이와 예상되는 한계전류로부터 안정적인 전류값을 얻을 수 있도록 0.12 m로 정하였다.

자연대류의 층류와 난류영역은 *Grashof*수를 기준으로 분류된다. 그리고 *Grashof*수는 전극높이(또는 열전달에서 수직벽면의 높이)의 세제곱에 비례하기 때문에 전극의 높이가 유동영역을 분류하는 중요한 인자가 된다. 따라서 실험장치의 높이는 실험에 적당한 황산구리 농도(0.01 ~ 0.25 M)범위 내에서 층류와 난류 유동에 부합하도록 전극 높이를 정하였다. *Grashof*수  $10^9$ 를 기준으로 계산된 층류 실험 전극판의 높이는 0.1 m이고, 난류의 경우 0.28 m이다. 따라서 장치의 높이는 난류유동에 대한 전극판높이에 0.1 m 정도의 마진을 두어 약 0.41 m로 정하였다. 다른 한편으로, 단일전극으로 원하는 유동영역의 *Grashof*수를 얻기 위해 황산구리의 농도를 조절하는 방법도 고려할 수 있다. 그러나 경우에 따라, 과도한 황산구리를 첨가해야 하기 때문에 황산구리의 용해도를 초과할 우려가 있고 전기영동에 의한 물질전달량이 늘어나기 때문에(식 13) 열전달현상을 모사하기가 곤란해진다.

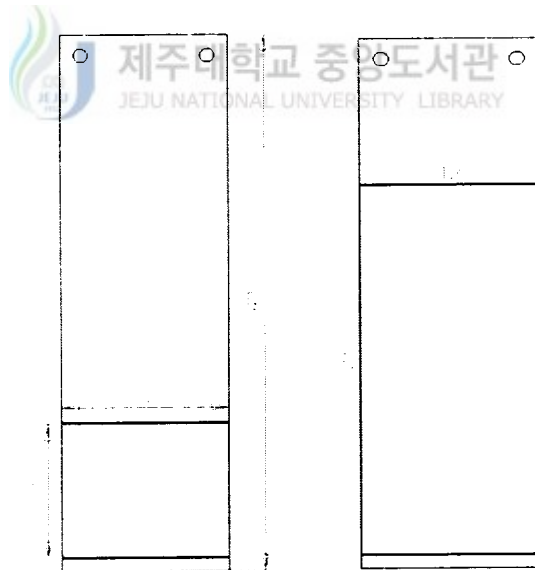
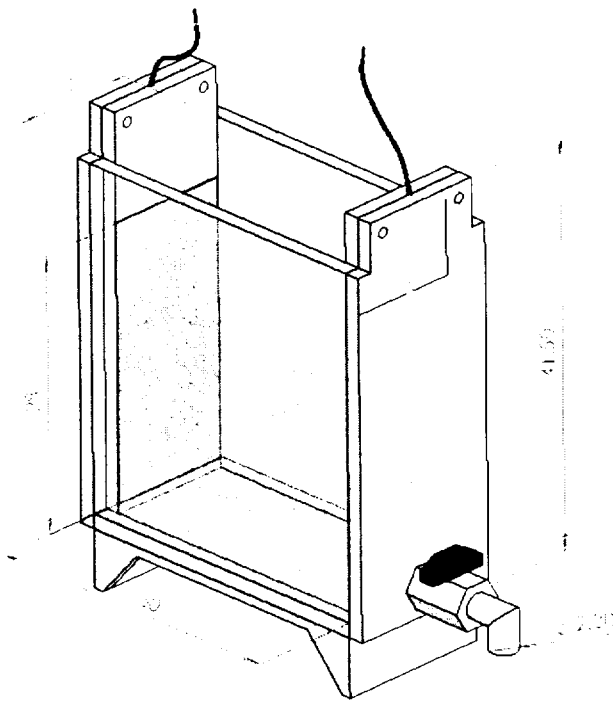


Fig. 10. Natural convection facility and electrodes for laminar and turbulent flow.

### 3) 수직전극에서의 자연대류 물질전달 실험

유동조건에 따라 주어진 구리전극평판을 사용하여 전기도금 실험을 수행하였다. 이때 층류와 난류유동영역에 만족하는 *Grashof*수를 얻기 위해 황산구리의 농도를 조절하였다. 무차원수의 물성치는 황산농도 변화에 둔감하므로 황산의 농도를 1.5 M 로 고정하고 황산구리의 농도만을 변화시켰다. 따라서 자연대류 실험은 저농도 황산구리 전해액으로부터 점차 고농도 실험으로 전이함으로써 고른 분포영역에서 실험결과가 나타날 수 있도록 하였다. 황산구리 농도 변화에 따른 물성치와 무차원수 값들을 부록에 수록하였다.

실험절차는 강제대류실험의 유속조절 부분이 농도조절로 바뀐다는 점 외에 강제 대류 실험과 같다. 그리고 강제대류실험에서 쓰인 동일한 장비로 한계전류를 측정 하였다.

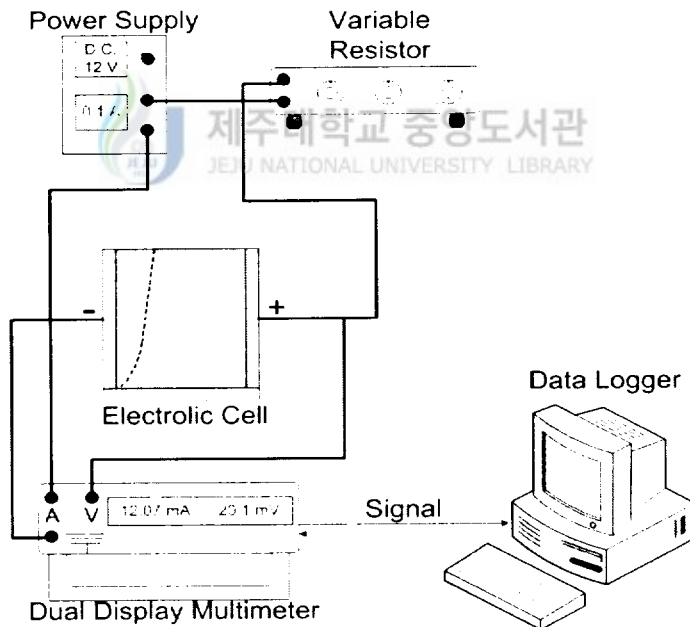


Fig. 11. The experimental equipments and the system circuit.

## IV. 실험결과 및 검토

### 1. 강제대류

본 실험을 통하여, 실험결과와 열전달 상관식을 비교함으로써 *Sherwood*수가 *Reynolds*수와 *Schmidt*수의 1/3 승에 비례함을 확인하였다. 이를 통하여 열전달 현상을 물질전달 실험으로 모사할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 1) 수평평판 내에서의 Poiseuille 유동

본 연구에서는 전극 부분에서 Poiseuille 유동이 유지되는 것을 확인하기 위해 물과 염료를 사용하여 유동특성을 가시화 하였다. 그림 12는 Reynolds 수가 210 일 때 도관의 입구측부터 약 60 cm 흐른 후에 유체의 유동형태를 가시화한 것이다. 유체의 흐름이 잘 발달된 2차원적 Poiseuille 유동을 보여주고 있다.

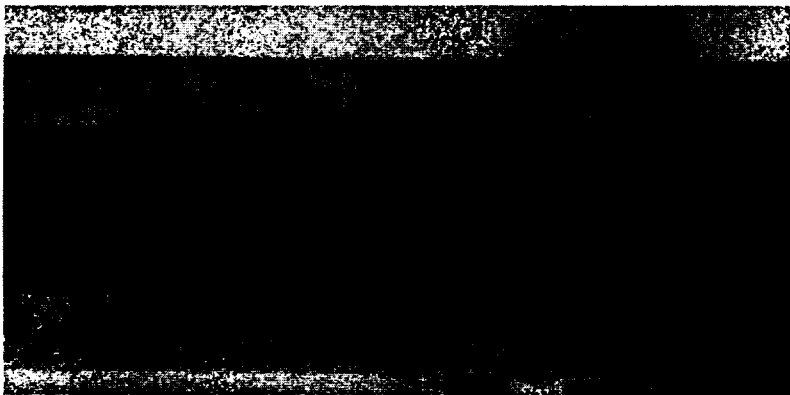


Fig. 12. Poiseuille flow visualization.

## 2) 강제대류에 의한 물질전달

한계전류기법을 이용하여 수평평판에서 강제대류에 의한 물질전달 실험결과를 얻었다. 그리고 이를 열전달상관식과 비교하여 실험장치 및 실험방법론에 대한 타당성을 확인하였다.

1.5 M의 황산과 0.1 M의 황산구리 수용액을 물질전달이 일어나는 전해질 용액으로 사용하였다. 황산과 황산구리의 농도로써 계산된 전해액의 *Schmidt* 수는 2,094의 일정한 값을 지닌다. *Reynolds* 수의 경우, 정해진 전해액의 농도에 따라 특정 점성을 지니지만 수두차로 인한 유속에 따라 그 값이 가변적이다. 각각의 유속에 대한 *Reynolds*수 범위는 18에서 400까지 나타난다.

그림 13은 Poiseuille 강제유동에 의한 평균물질전달 실험결과를 나타낸 그래프이다. 열전달상관식과 비교하였을 때 5%이내의 오차로 상사성 실험방법론에 대한 타당성을 잘 설명해주고 있다. 일반적으로, 유체의 유속이 빠를수록 즉, *Reynolds* 수가 높을수록 높은 한계전류가 나타났다.

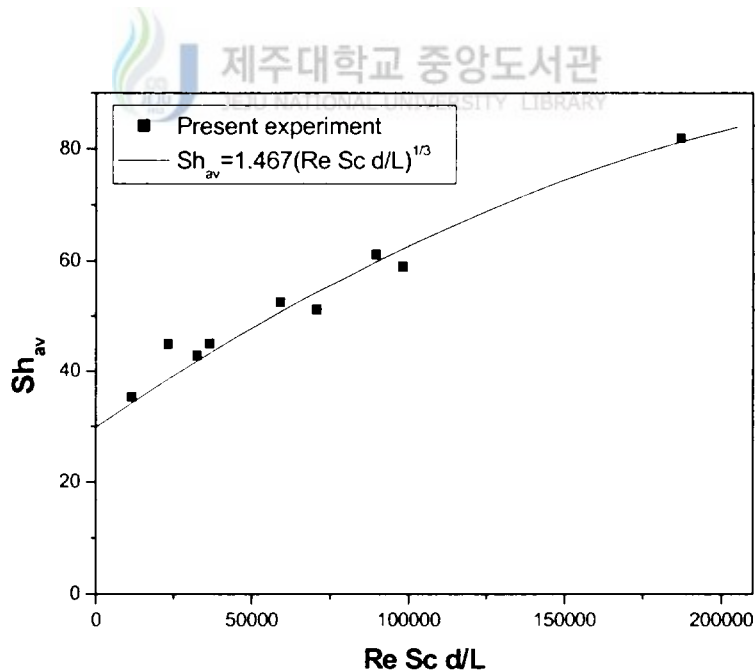


Fig. 13. Test results for measuring average mass transfer rate.

물질전달 실험에서는 열전달 실험과는 달리 국부 물질전달 특성을 살펴보기가 어렵다. 따라서 Piece-wise 전극을 사용하여 유한한 길이(0.022 m) 내에서의 국부 평균 물질전달 특성을 파악함으로써 국부 물질전달 특성을 살펴보고자 하였다. 국부 물질전달 실험을 수행한 결과가 그림 14에 나타나 있다. 실험결과와 상관식을 비교하였을 때 약 10%의 오차범위로 열전달 상관식을 잘 모사하고 있다.

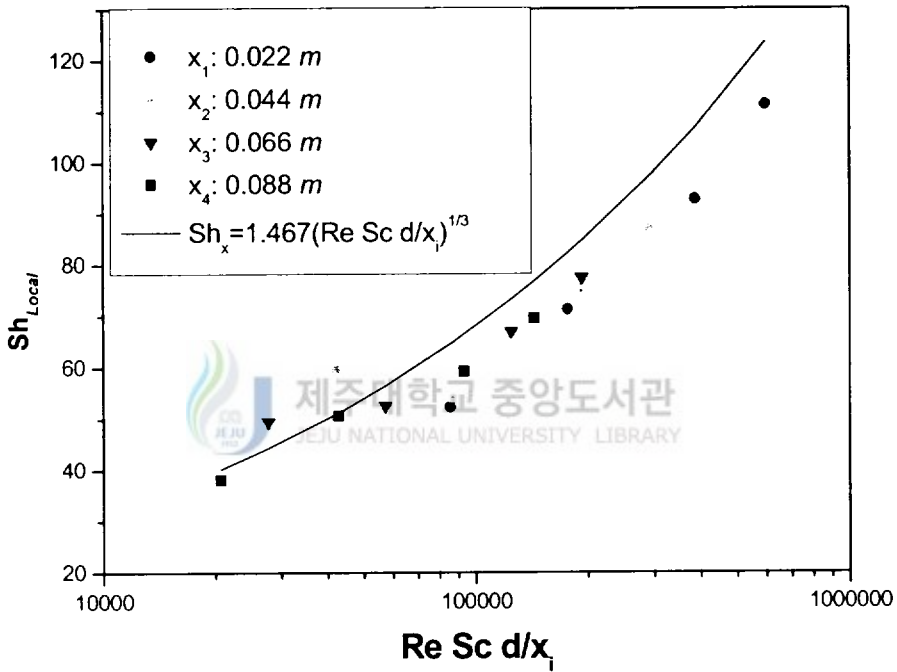


Fig. 14. Test results for measuring local mass transfer rate.



## 2. 자연대류

자연대류 물질전달 실험결과는 열전달 상관식을 잘 나타내고 있다. 산화전극 교체실험은 기하학적으로 복잡한 구조에서도 열전달현상을 물질전달실험으로 전환할 수 있다는 것을 설명한다.

### 1) 층류 자연대류

높이 0.1 m의 구리전극평판으로 층류영역의 자연대류 물질전달실험을 수행하였다. 황산구리의 농도를 조절하면서  $8.83 \times 10^6$ 에서  $1.48 \times 10^8$ 까지 *Grashof*수를 얻을 수 있었다. *Schmidt*수는 황산구리의 농도가 0.01 ~ 0.2 M로 변화함에 따라 1,957에서 2,282까지 증가하였다.

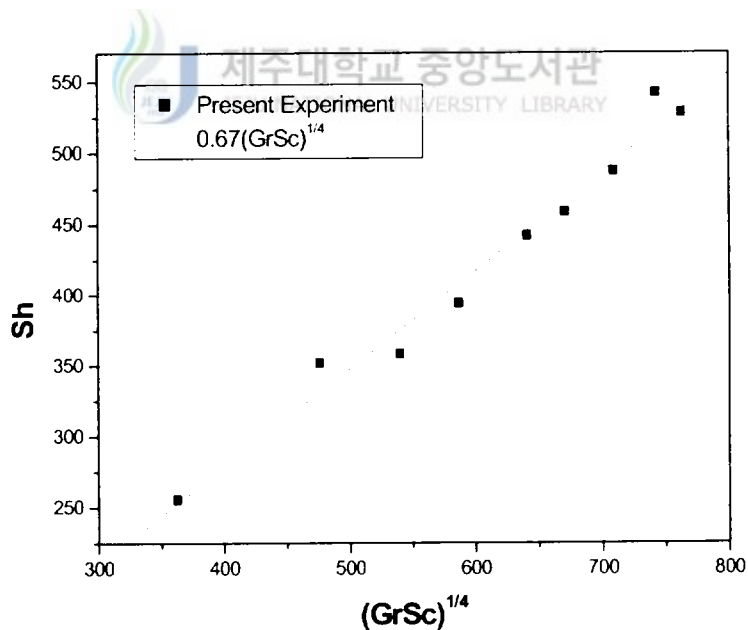


Fig. 15. Natural convection test results under laminar condition.

그림 15는 중류 자연대류에 대한 물질전달 실험결과이다. 그래프에서처럼 *Sherwood*수는 *Grashof*와 *Schmidt*수의 1/4승에 비례하고 물질전달 실험결과는 5%의 오차범위 이내로 열전달상관식에 잘 적용됨을 알 수 있다.

## 2) 난류 자연대류

난류영역의 자연대류 물질전달 실험에서는 높이 0.28 m의 구리평판전극을 사용하였다. 황산구리의 농도를 0.07 ~ 0.25 M까지 높임에 따라 *Grashof* 수는  $1.27 \times 10^9$ 에서  $3.89 \times 10^9$ 까지 증가한다.

또한 한계전류는 환원전극 표면에서 도금되는 구리이온의 전달양이 제한될 때 나타나는 현상이기 때문에 산화전극의 기하학적 모형이나 크기와는 상관없을 것이라는 결론에 이르렀다. 따라서 산화전극을 여러 가지 형태의 구리전극으로 대체함으로써 똑같은 결과가 나타나는지 확인하였다. 그림 16은 산화전극으로 사용된 여러 가지 형태의 구리전극을 나타낸 사진이다.

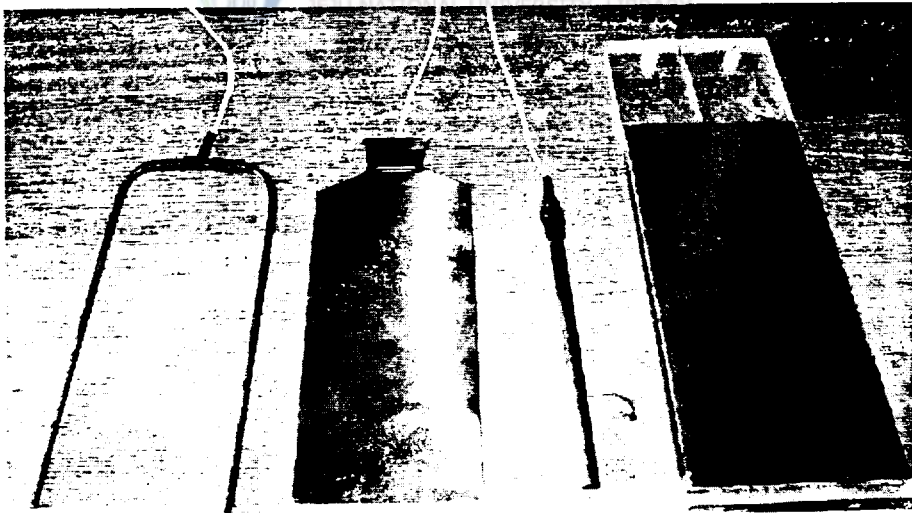


Fig. 16. Various electrode types used in anode.

실험결과 산화전극의 형태나 크기에 무관하게 거의 일정한 한계전류를 나타내었다. 다음의 그림 17이 이러한 한계전류의 특성을 잘 설명해 주고 있다. 이러한 결과는 기하학적 형상이 복잡한 열전달 실험도 쉽게 물질전달 실험으로 전환할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 열전달이 일어나는 요소를 환원전극으로 대체하여 기하학적 상사를 이루면, 적절한 지점에 산화전극을 설치함으로써 물질전달 실험 장치를 만들 수 있다. 다른 실험결과와 마찬가지로 구리이온의 물질전달은 오차 범위 5% 이내로 열전달에서 기대되는 것과 유사한 거동을 하고 있음을 보여준다.

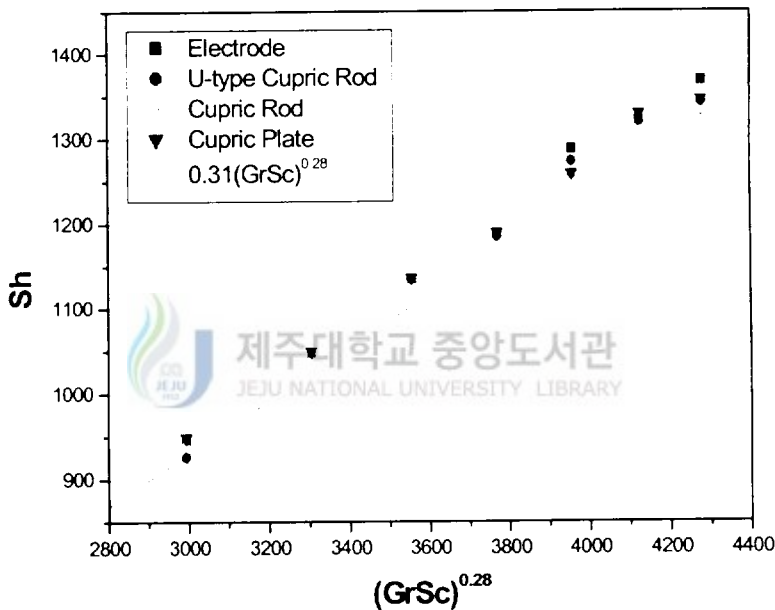


Fig. 17. Natural convection test results under turbulent condition.

그림 18은 층류 자연대류와 난류 자연대류의 실험결과를 같이 나타낸 그래프이다. 이 그래프는 층류 또는 난류에서의 열전달상관식이 각각의 조건에서 측정된 결과들을 중복 없이 잘 적용하는지, 그리고 층·난류의 유동영역에서 상관식이 물질(열)전달 현상을 얼마나 잘 설명하는가를 가늠하고자 제시하였다. 그래프에서 층류 특히, 낮은 *Grashof*수 범위에서 상관식이 상충한다. 그러나 각각의 실험결과는

대응되는 상관식과 잘 부합하고 있다. 또한 점차 난류로 전이됨에 따라 각각의 유동조건에 맞는 상관식의 특성을 나타내고 있다.

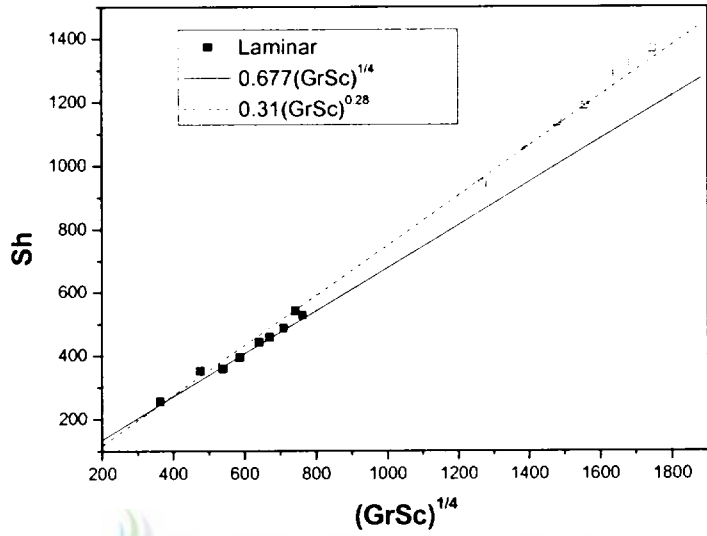


Fig. 18. Natural convection correlations for laminar and turbulent flow.

## V. 결 론

물질전달과 열전달과의 상사성을 이용하면 물질전달실험으로써 열전달 현상을 모사할 수 있다. 물질전달계의 하나인 구리 전기도금계는 이론적, 물리적으로 열전달과 상사하기 때문에 구리 전기도금계에서 얻어진 전해액의 거동과 열전달에서의 유체의 거동은 서로 유사한 결과를 나타낼 것으로 기대된다. 본 연구에서는 강제대류와 자연대류에 대한 전기도금 실험결과를 열전달 상관식과 비교함으로써 상사성 실험방법론에 대한 적용가능성을 모색하였다.

본 연구에서는 한계전류기법을 활용한 전기도금계를 상사계로 채택하였다. 강제대류와 자연대류에 대하여 열전달 상관식이 알려진 대표적인 계를 전기도금계를 통하여 모사하였다.

첫 번째로 Poiseuille 유동에 대한 강제대류 물질전달 실험결과를 열전달 상관식과 비교하였다. 그리고 물질전달에서 국부물질전달 특성을 파악하기 위해 Piece-wise 전극을 이용하여 국부 평균물질전달 특성을 살펴보았다. 두 번째로는 수직전극평판에서 모액과 전극표면에서의 농도차(밀도차)로써 유발되는 자연대류 현상을 모사하였다. 자연대류에서는 전극판 높이가 높을수록 부력이 증가하여 쉽게 난류로 천이하기 때문에 두 가지의 구리전극평판을 갖고 층류와 난류에서의 자연대류 물질전달 실험을 수행하였다. 그리고 한계전류의 특성을 살펴보고자 몇가지 종류의 산화전극으로 교체하면서 똑같은 한계전류가 나타나는지 살펴보았다.

실험결과 전기도금계를 이용한 물질전달 실험결과는 최대 오차 10% 이내로 기존의 열전달 상관식과 잘 부합하고 있다. 이로써 전기도금계를 이용한 물질전달실험으로써 열전달 실험을 대체할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 산화전극 교체 실험에서도 산화전극의 기하학적 형태와 크기는 환원전극에서의 도금 반응으로 결정되는 한계전류에 영향을 끼치지 않음을 알 수 있었다. 즉, 열전달이 일어나는 부분을 환원전극으로 대체하면 적당한 부분에 산화전극을 설치함으로써

실험 회로를 완성할 수 있음을 의미한다. 그리고 전기도금계를 이용하여 자연 대류를 모사할 경우, 공기를 이용한 열전달 실험에서 요구되는 장치의 높이를 1/50 정도 규모로 줄이고도 비슷한 Rayleigh수를 얻을 수 있었다. 또한 열전달 실험에서 수반되는 복사열전달을 원천적으로 방지할 수 있었다.

그러므로 고온가스로(HITGR)와 같은 복잡한 기하학적 구조에서의 열전달현상도 물질전달 실험으로 대체할 수 있을 것이다. 또한 전기도금계를 이용한 물질전달 실험은 열전달에서의 복사와 전도로 인한 열전달 효과를 제거할 수 있기 때문에 복사열전달이 배제된 순수 대류열전달에 관한 정보를 얻을 수 있다. 그리고 작은 규모의 실험장치로도 고부력의 혼합대류를 모사할 수 있기 때문에 제어측면이나 비용절감 효과를 고려한다면 열전달이나 열수력 안전해석코드개발을 위한 연구에 있어서 다른 실험방법보다 경쟁력이 있는 것으로 평가된다.



## 참 고 문 헌

A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, 2nd ed., p. 466-514, New York, John Wiley & Sons, INC.(1994).

Chiang, H. D. and Goldstein, R. J., "Application of the Electro Chemical Mass Transfer Technique to the study of Buoyancy-Driven Flows", Proc. 4th Int., Symp., Transport Phenomena in Heat Mass Transfer, Sydney, vol. 1, p1-25, 1991.

C. R. Wike and C. W. Tobias, et al., "Free-Convection Mass Transfer at Vertical Plates," *Chemical Engineering Progress*, 49, No. 12, p663-674(1953).

C. W. Tobias, and R. G. Hickman, "Ionic Mass Transfer by Combined Free and Forced Convection", *Z. phys. Chem.*, vol. 229, pp 145-166, 1965.

E. J. Fenech and C. W. Tobias, "Mass Transfer by Free Convection at Horizontal Electrodes," *Electrochemical Acta*, 2, p311-325, 1960.

Frank M. White, *Fluid Mechanics*, 4th ed., p. 325-426, 1996.

G. Murphy, *Similitude in Engineering*, New York, Ronald Press(1950).

J. N. Agar, "Diffusion and Convection at Electrodes," *Discussion of Faraday Soc.*, 1, pp.27-37, 1947.

J. R. Selman and C. W. Tobias, "Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique," *Adv. Chem. Eng.*, 10, pp.211-318 (1978).

Jong-Hwa Jang, et al., "Basic Study on High Temperature Gas-Cooled Reactor Technology for Hydrogen Production," RR-2435, Korea Atomic Energy Research Institute(2003).

Joanna Wilk, Mass/Heat Transfer Coefficient in the Radially Rotating circular Channels of the Rotor of the High-speed Heat Regenerator, International Journal of Heat and Mass Transfer, p1979-1988, 2004.

Jian Kang Li, Studies of Buoyancy-Influenced Convective Heat Transfer to Air in a Vertical Tube, A thesis for Ph. D. degree, The Department of Engineering, University of Manchester, 1994.

Moore, W. J., Physical Chemistry, Prentice-Hall, Englewood, 1972.

Seaworthy System Inc., "One-demand Hydrogen Generating System Demonstration Concept Development," PHASE I: TASK 5.0 : Final report, Center for Commercial Deployment of Transportation Technology(2002).

Thomas B. Drew, et al., *Advances in Chemical Engineering*, Academic Press, New York/London, **10**, p211-336(1978).

V. G. Levich, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood (1962).

Wilfred E. Baker and Peter S. Westine, *Similarity Methods in Engineering Dynamics-Theory and Practice of Scale Modeling*, Southwest Research Institute, 1973.



## 부 록

### 1. Poiseuille 유동 강제대류실험

Table A-1. Test matrix for average mass transfer of Poiseuille flow.

No.	Velocity (cm/s)	$Re$	$ReScd/L$	$I_{Lim}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Sherwood No.	
					Eq (21)	Eq (9)
-	0.107	18.485	8603.641	1.650	30.060	30.470
-	0.144	24.718	11504.869	1.915	33.117	35.343
1	0.251	43.195	20105.011	2.134	39.890	39.394
2	0.29	49.866	23209.824	2.43	41.846	44.349
3	0.406	69.855	32513.762	2.317	46.822	42.765
4	0.456	78.572	36571.031	2.434	48.694	44.934
5	0.738	126.900	59065.000	2.838	57.131	52.383
6	0.88	151.776	70643.229	2.765	60.643	51.049
7	1.119	192.414	89557.907	3.309	65.634	61.077
8	1.224	210.546	97996.999	3.191	67.634	58.898
9	2.338	402.082	187145.877	4.437	83.912	81.893

Table A-2. Test matrix for local mass transfer of Poiseuille flow.

$\bar{x}_i$	$Re$	$Sc$	$I_{Lim}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$Re Sc d/x$	Sherwood No.	
					Eq (22)	Eq (9)
2.2	44.9082	2094.49	2.839962	85508.89	64.62996	52.41597
	92.79694	2094.49	3.861616	176693	82.31959	71.2722
	202.6458	2094.49	5.025253	385854.2	106.8	92.74895
	312.7813	2094.49	6.030303	595561.2	123.4257	111.2987
4.4	44.9082	2094.49	3.23575	41990.97	50.98966	59.72086
	92.79694	2094.49	2.929012	86768.87	64.94585	54.05952
	202.6458	2094.49	4.055556	189482	84.2596	74.85167
	312.7813	2094.49	4.712121	292463.1	97.37642	86.96961
6.6	44.9082	2094.49	2.684538	27664.64	44.3682	49.54737
	92.79694	2094.49	2.850168	57165.37	56.51206	52.60433
	202.6458	2094.49	3.628694	124835.2	73.31775	66.97326
	312.7813	2094.49	4.195286	192681.6	84.73123	77.4306
8.8	44.9082	2094.49	2.067551	20672.48	40.2619	38.15991
	92.79694	2094.49	2.745341	42716.98	51.28184	50.66959
	202.6458	2094.49	3.210859	93283.43	66.53216	59.26145
	312.7813	2094.49	3.767677	143981.8	76.88932	69.53841

2. 자연대류실험

Table A-3. Test matrix for natural convection under laminar condition.

$CuSO_4$ (M)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (g/cms) $\times 10^{-4}$	D (cm <sup>2</sup> /s) $\times 10^{-6}$	$\frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_b}$	$t_n$ $\times 10^{-5}$	Gr $\times 10^9$	Sc	$0.31 \times (GrSc)^{0.28}$	Ampere (mA)	Eq (9)
				$\times 10^{-5}$						
0.07	1.099	127	5.63	781	772	1.27	2045	928	838	943
0.10	1.103	128	5.55	1110	1103	1.77	2094	1025	1317	1048
0.13	1.107	130	5.48	1438	1434	2.24	2147	1103	1836	1135
0.16	1.111	132	5.40	1766	1765	2.69	2202	1169	2339	1188
0.19	1.115	134	5.32	2094	2096	3.11	2262	1227	2977	1287
0.22	1.119	136	5.24	2423	2427	3.51	2325	1279	3495	1321
0.25	1.123	139	5.16	2753	2757	3.89	2392	1326	4063	1368

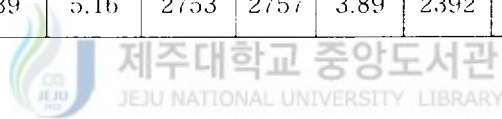


Table A-4. The similar test results for several copper anodes.

$CuSO_4$ (M)	$0.31(GrSc)^{0.28}$	Sh No. (Eq (9))			
		Regular	U-rod	Rod	Plate
0.07	928	943	926	942	950
0.1	1025	1048	1045	1041	1050
0.13	1103	1135	1135	1125	1137
0.16	1169	1188	1184	1208	1190
0.19	1227	1288	1273	1257	1259
0.22	1279	1321	1319	1295	1330
0.25	1326	1368	1343	1330	1346

## 감사의 글

뒤돌아 생각하면 후회와 반성이 많은 시간이었지만, 이렇게 주위의 인연이 있어 미소가 절로 나는 추억과 이러한 작은 결실을 맺을 수 있었습니다. 지금까지 저를 지켜봐주시고 관심을 갖어주신 모든 분들께 감사의 말씀 전합니다.

우선, 몽매한 저를 일깨우쳐주시고 다듬어 주신 정범진 지도교수님께 감사의 말씀 전합니다. 제자들을 위해 기꺼이 발판이 되고자 하는 교수님의 헌신과 열정은 항상 저를 각성하게 했고 이제는 제가 베풀어야 할 덕목이자 삶의 지혜가 되었습니다. 그리고 논문의 세심한 검토와 조언을 주신 박재우 교수님과 이현주 교수님께 감사의 말씀 전합니다.

4년여간의 시간을 원자력안전실험실에서 보내면서 가족처럼 보듬어 주고 자신의 일과 같이 도와준 형석이 형과 유일한 동기 두혁이, 후배 덕원이에게 감사의 말과 함께 앞으로의 건투를 기원합니다. 그리고 이제 갓 입실한 후배 봉진이가 분발하여 발전하는 모습을 기대해 봅니다. 또한 실험과 관련하여 많은 도움과 조언을 아끼지 않은 고영주 선배님과 과중한 업무에도 불구하고 항상 더 많은 것을 가르치고자 했던 지훈이 형, 항상 웃는 낯으로 맘 편하게 해주시는 준호형, 그리고 월성에 계신 시우형에게 지면을 빌어 감사의 말씀 전합니다.

학교에 입학하면서부터 지금까지 남다른 우애와 정을 쌓아온 우리 97학번 병찬이, 동욱이, 정근이, 그리고 제가 지칠 때 위로와 격려가 되어준 형학이와 영익이, 상욱이에게 저를 떠받치는 기둥이 되어주어서 고맙다는 말 전합니다.

본 연구활동을 하면서 제반 연구비를 지원해주신 과학기술부와 한국과학재단에 감사드립니다.

마지막으로, 저를 건강하게 길러주시고 항상 따스한 눈길과 믿음으로 응원해 주신 아버지, 어머니께 이 논문을 바치고 싶습니다.