

Hall Effect에 의한 流速 測定

俞 洪 善
李 大 遠

Measurements of Fluid Velocities with an Electromagnetic Flowmeter

by

Yu Hongsun
Lee Daewon

目 次

1. 序 論
2. 原 理
3. 實驗器具

4. 測 定
5. 結 論
參考文獻

Abstract

An electromotive force is induced in a fluid moving at right angles to a magnetic field. The emf is proportional to the fluid velocity. And this effect can be used to measure the velocities. The aim of this paper is to make an electromagnetic flowmeter of this kind and investigate its various characteristics, considering the possibility of the domestic production of it.

1. 序 論

磁場 속에서 흐르는 유체는 그 속에 용해된 이온들이 받는 Lorentz force 에 의하여 기전력을 갖는다. 이 기전력과 流速은 비례하므로 기전력을 측정함으로써 유속을 계산할 수 있다. 이 실험은 이와 같은 電磁流速計(electromagnetic flowmeter)를 제작하고 국산 실용화를 염두에 두어 그 특성을 조사하였다.

2. 原 理

그림 1과 같은 矩形단면의 pipe 나 그림 2와 같은 圓形단면의 pipe 를 통해서 흐르는 유체 속

에 전하량 dq , 속도 \mathbf{v} 인 이온은 흐름에 수직하게 걸러준 자장 \mathbf{B} 로 말미암아

$$d\mathbf{F} = dq(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \dots\dots\dots(1)$$

의 Lorentz force 를 받는다. 이것은

$$\mathbf{E} = \frac{d\mathbf{F}}{dq} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}^{(1)} \dots\dots\dots(2)$$

의 電場 \mathbf{E} 가 형성된 것을 뜻한다. \mathbf{B} 가 일정하거나 혹은 교류자장의 경우라도 유기기전력의 관측을 자장의 peak 에서 관측한다면 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ 는 0이므로

$$\text{curl } \mathbf{E} = 0 \dots\dots\dots(3)$$

가 된다. 따라서

$$\mathbf{E} = -\text{grad } V \dots\dots\dots(4)$$

에 의해서 기전력 V 가 유기됨을 관측할 수 있을 것이다.

1. 구형단면의 경우⁽²⁾

(4)식에서 경로 L 을 따른 전위차

dV 는

$$dV = -\mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \dots\dots(5)$$

따라서 그림 1에서 경계면 간의 기전력 ΔV 는

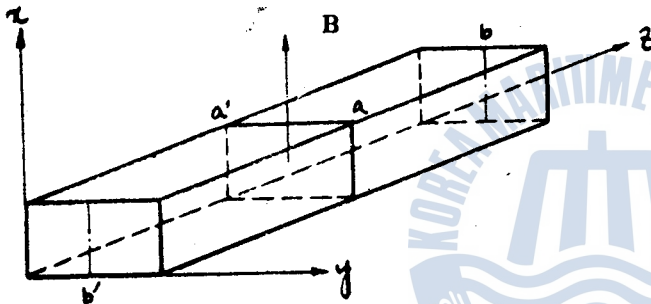


그림 1 구형단면 pipe

$$\Delta V = - \int_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int_L (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{L} \dots\dots\dots(6)$$

여기서 L 은 경계면 간의 거리임. \mathbf{v} 와 \mathbf{B} 는

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \dots\dots\dots(7)$$

$$\mathbf{B} = B \mathbf{i} \dots\dots\dots(8)$$

로 단위 vector 를 써서 표현 할 수 있으므로

$$\Delta V_y = B \int_0^y v_x dy \dots\dots\dots(9)$$

$$\Delta V_x = -B \int_0^x v_y dz \dots\dots\dots(10)$$

의 결과를 얻을 수 있다. 여기서 ΔV_y 및 ΔV_x 는 각각 y 축 및 x 축 방향을 따라서 생기는 기전력을 나타낸다. 따라서 aa' 간의 그리고 bb' 간의 평균기전력은

$$\Delta V_{y,av} = (B/x) \int_0^x \int_0^y v_x dy dx \dots\dots\dots(11)$$

$$\Delta V_{x,av} = -(B/x) \int_0^x \int_0^y v_y dz dx \dots\dots\dots(12)$$

로 된다. 한편 속도의 평균치는

$$v_{x,av} = (xy)^{-1} \int_0^x \int_0^y v_x dy dx \dots\dots\dots(13)$$

$$v_{y,av} = (xz)^{-1} \int_0^x \int_0^y v_y dz dx \dots\dots\dots(14)$$

로 정의될 수 있다.

이것을 (11) 및 (12)식에 대입하면

$$V_{y_{00}} = B v_{x_{00}} y \dots \dots \dots (15)$$

$$V_{x_{00}} = -B v_{y_{00}} z \dots \dots \dots (16)$$

를 얻는다.

그림 1과 같이 z 축방향으로 유체가 흐르며, 자장은 x 축방향으로 걸려있고 그리고 유체는 균일한 이온분포를 가졌다고 가정하면 이 조건하에서 $v_{x_{00}}$ 는 유체의 평균속도가 되고 $v_{y_{00}}$ 는 0가 된다. 따라서 aa' 간의 평균기전력은 (15)식에 의해 주어지고 $V_{x_{00}}$ 는 0이 된다. 그러므로 a 및 a' 에 전극을 설치하면 兩極間에 (15)식에 의해 주어지는 기전력을 측정할 수 있을 것이다.

2. 원형단면의 경우⁽¹⁾

(4)식에서 양변에 divergence 를 취하면

$$\nabla^2 V = -\text{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \dots \dots (17)$$

로 Poisson's eq. 을 얻는다.

pipe 의 단면직경에 걸리는 기전력을 얻으려면 이 방정식을 적당한 경계조건을 택해서 풀어야 한다. 그림 2와 같이 z 축방향으로 유체가 흐르고 자장이 x 축 방향으로 걸려 있을 때 우리가 구하는 기전력은 y 축방향의 직경 aa' 에 걸리는 기전력이다. 그러므로 (17)식은

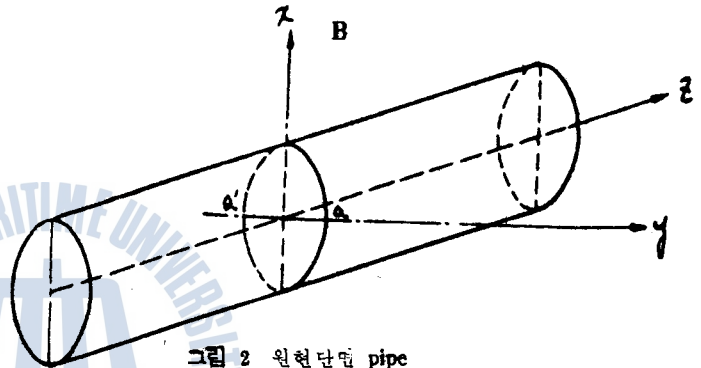


그림 2 원형단면 pipe

$$\nabla^2 V = -\mathbf{B} \cdot \text{rot} \mathbf{v} = B \frac{\partial v_y}{\partial z} - B \frac{\partial v_z}{\partial y} \dots \dots \dots (17')$$

이 된다. 여기서 첫항의 $\frac{\partial v_y}{\partial z}$ 의 pipe 단면에 걸친 평균은 0이 될 것이므로 마지막 항만을 생각하면 된다. 그리고 흐름이 圓筒形對稱性을 가지고 있으므로 원통좌표를 사용하면 ($x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$) v_z 는 r 만의 함수, 즉 $v_z = f(r)$ 이 되고 윗 식을 고쳐쓰면

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = -B f'(r) \sin \theta \dots \dots (18)$$

이 된다. 대칭성으로 보아서 V 는 z 에 무관하므로

$$V = -F(r) \sin \theta \dots \dots \dots (19)$$

형의 해를 가정해 보면 (19)식에서 다음 결과를 얻는다.

$$F''(r) + \frac{1}{r} F'(r) - \frac{1}{r^2} F(r) = B f'(r) \dots \dots \dots (20)$$

혹은

$$F''(r) + \left(\frac{F(r)}{r} \right)' = B f'(r) \dots \dots \dots (20)'$$

$r=R$ 인 pipe 의 벽에서는 $v_z = f(r) = 0$, 따라서 電場도 0, 즉 $\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{\partial F(R)}{\partial r} \sin \theta = 0$, 즉 $F'(R) = 0$ 이다.

이상의 경계조건하에서 (20)'식을 적분하면

$$\frac{1}{r} (F(r)r)' = Bf(r) + \frac{F(R)}{R} \dots\dots\dots(21)$$

이 된다. pipe의 중심 $r=0$ 에서 $V=0$, 즉 $F(0)=0$ 라고 정하고 (21)식을 다시 적분해서 정리하면

$$F(r) = \frac{B}{r} \int_0^r f(r) r dr + \frac{F(R)}{R} \frac{r}{2} \dots\dots\dots(22)$$

이 된다. 그림 2의 점 a 에서 (y 축상 $r=R$, $\sin\theta = +1$)

$$F(R) = \frac{2B}{R} \int_0^R f(r)r dr = \frac{2B}{R} \int_0^R v_r r dr \dots\dots\dots(23)$$

이 된다. 여기서 v_r 의 평균치는

$$v_{r,av} = \frac{\int_0^R 2\pi r f(r) dr}{\pi R^2} \dots\dots\dots(24)$$

로 정의되므로 y 축방향의 직경 aa' 에 걸리는 기전력은

$$\Delta V = 2RBv_{r,av} \dots\dots\dots(25)$$

이 되어 (15)식과 같은 결과를 얻었다.

이상의 논의에서 얻어지는 결론을 정리하면 다음과 같다.

(a) (15)식과 (25)식으로 표현되는 기전력은 유체흐름방향의 평균유속 혹은 流量에 비례한다. 그리고 이 기전력은 유속의 x 및 y 성분에 무관하므로 흐름의 상태(層流 혹은 亂流 등)에 무관하다.

(b) 교류자장을 사용할 경우에도 peak 기전력 혹은 rms 기전력을 측정함으로써 (15)식 혹은 (25)식은 여전히 유효하다⁽¹⁾.

(c) 기전력은 유속에 비례할 뿐 아니라 자장에도 비례하므로 유속을 줄으로써 자장을 구하는 방법으로 이용될 수도 있다.

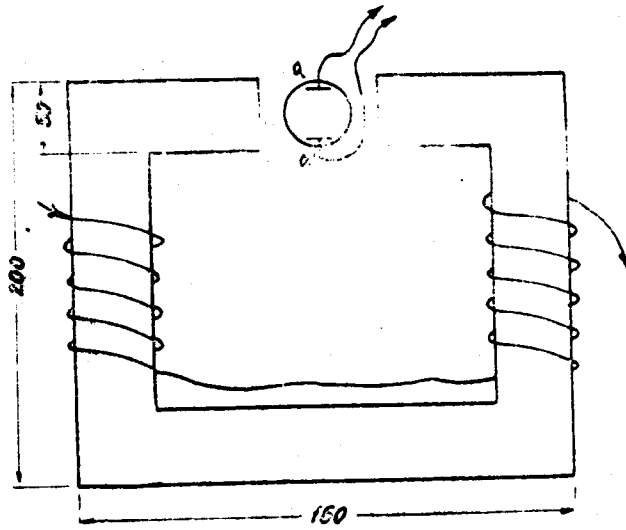
(d) 上記式은 기전력이 유체의 傳導度 혹은 저항에 무관함을 즉 유체의 이온 농도에 무관함을 나타내고 있다. 이론상으로는 이온농도가 0인 유체의 흐름에도 같은 원리가 적용될 수 있다^{(2), (3)}.

3. 實驗器具

자장은 그림 3과 같은 core를 가진 자석을 제작 사용했다. 卷線은 4 mm 鋼線을 800회 감았고 core 물질은 교류자장도 사용하기 위해 矽素鐵板 core를 썼다. 극간의 간격은 3 cm였다. 극의 단면은 5 cm × 8 cm.

같은 그림 3에서 磁極 사이에 flowmeter의 핵심부인 원형단면의 tube 및 그 속의 전극 aa' 이 그려져 있다. aa' 간의 거리, 즉 pipe의 직경은 16 mm이고 전극으로는 본극작용을 감소시키기 위해서 흑연과 백랍을 사용했다. 전극의 면적은 흑연을 사용했을 경우 직경 2 mm의 연필심을 사용했고 백랍의 경우는 직경 4 mm의 원판전극으로 만들어 사용했다.

기전력 측정에 사용한 계기는 TOA Electronics Ltd. 제품의 Model PM-14A, μV meter (electro-



단위 : mm

그림 3 전자석

4. 測 定

(1) 400 gauss 및 200 gauss 의 자장에서 유속변화에 대한 기전력변화를 측정한 Graph 가 그림 4이다.

(2) 1 m/sec 및 0.5 m/sec 의 유속에 자장변화에 대한 기전력변화를 측정한 graph 가 그림 5이다.

(3) 물의 염분농도에 의한 영향을 살펴 본 결과는 graph 6와 같다. 염분농도는 정확히 측정하지 않았고 다만 바닷물과 수도물의 혼합비로만 표시하였다. 작은 Range 의 기전력 측정에 사용했던 potentiometer 의 최소눈금은 $10 \mu V$ 였지만 분극현상으로 인한 불안정 때문에 $50 \mu V$ 이하에서는 Galvanometer 의 null detect 가 곤란, 기전력 측정이 곤란해졌다. 그러나 그림 4 의 200 gauss, 0.1 m/sec 의 기전력과 그림 5의 50 gauss, 0.5 m/sec 의 기전력은 측정상 무리는 있었으나 측정의 한계를 나타내는 data 로 생각해서 그대로 표시해 놓았다. graph 상 직선은

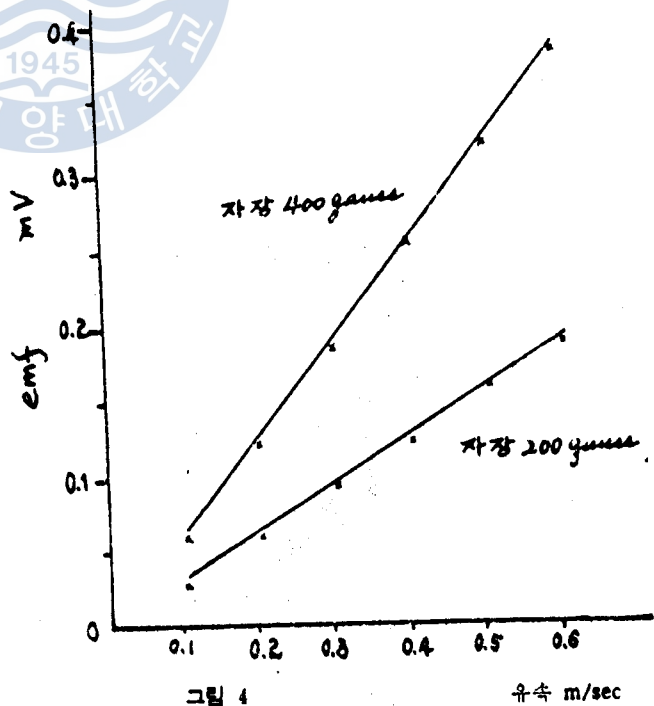


그림 4

유속 m/sec

meter 형)과 Shimadzu Seisakusho Ltd 제품의 Portable mV Potentiometer (PD-86)를 사용했다. 前者의 경우 내부 저항은 $100 \mu V$ Range 에서 $2 M \Omega$, $300 \mu V$ Range 에서 $5 M \Omega$, $1 mV$ Range 에서 $20 M \Omega$ 등이었다. 후자의 경우 최소눈금은 $10 \mu V$ 이었다.

자장 측정은 Denshijiki Industry Co. Ltd. 제품 Gauss Meter 를 사용하였다. Model GM-003, 측정 Range 는 $0.3 \text{ gauss} \sim 10 \text{ K gauss}$. 유속의 측정은 유량을 측정하여 전극간의 pipe 단면적으로 나눔으로써 계산하는 간접 측정을 하였다. 유량은 Messcylinder 와 stop watch 로 측정하였다.

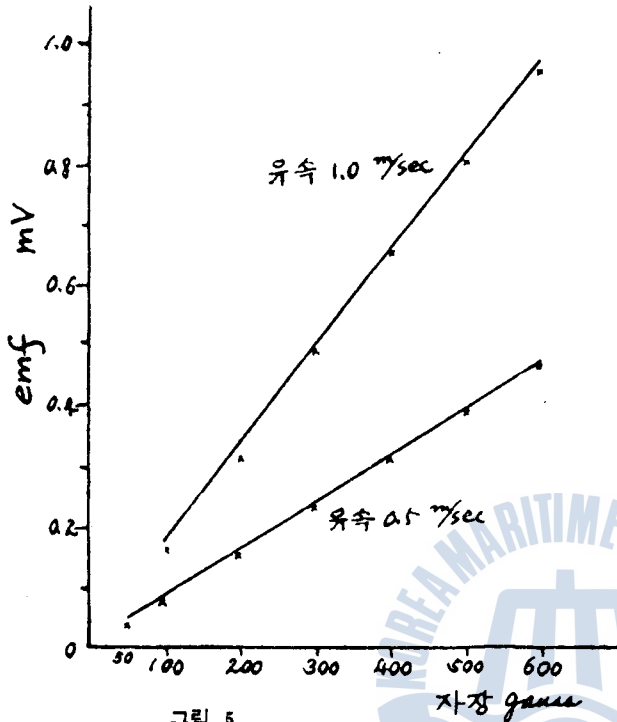


그림 5

이나 교류자장을 걸어주어 교류기전력을 측정하는 방법⁽¹⁾ 등이 해결책이 될 수 있다. 교류자장을 걸어줄 경우 생기는 문제는 측정 계기회로에 들어오는 다른 source로부터 오는 noise(이것은 shield를 잘 함으로써 감소시킬 수 있다⁽²⁾), 및 전극과 측정계기로 이루어지는 loop에 교류자장으로 인하여 유도되는 기전력(이것은 회로 조작으로 제거가능하다)^{(2),(3)} 등이다. 그러나 교류기전력은 증폭이 수월하므로 측정이 좀 더 용이해 진다는 利點도 있다.

직류기전력의 경우 측정계기는 flowmeter의 내부 저항보다 훨씬 큰 내부 저항을 가져야 한다. 이것은 측정 Range가 작은 potentiometer와 여기에 DC amplifier를 결합해서 측정하는 방법⁽⁵⁾을 택하면 해결될 수 있다.

이 논문에서 가장 관심의 초점으로 삼은 점은 국산 실용화를 위한 electromagnetic flowmeter의 소형화 가능성이 있다. 이 소형화의 요구는 자석의 크기와 flowmeter pipe의 크기에 제약을 주고 이 제약은 측정 기전력을 작아지게 한다.

계산치의 것이고 ×표가 실측치의 plot이다. 양자의 차이는 분극, 측정오차, 및 flowmeter 전극간저항으로 인한 drop으로 해석된다.

5. 結 論

유속과 기전력간의 비례관계는 flowmeter로 사용하는데 지장이 없을 정도였다. 자장과 기전력관계도 역시 같았다.

그러나 전극의 분극현상으로 인한 불안정성과 기전력의 감소는 작은 자장, 작은 유속에서의 기전력측정에 制約이 되었다. 이 제약은 분극문제를 해결한 후라고 하더라도 측정계기의 측정한계로 인한 제약으로 남게 된다.

분극문제는 전극을 개선함으로써 해결하는 방법(platinized Pt^{(4),(5)})

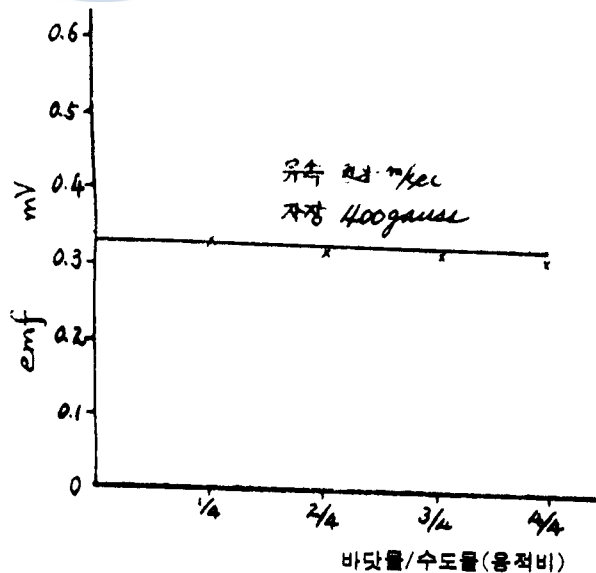
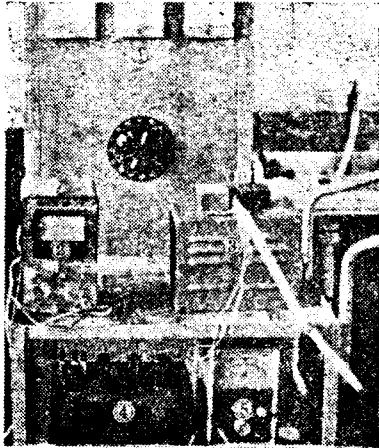


그림 6



- | | |
|---------------|------------------|
| ① 전원 | ④ Potentiometer |
| ② Gauss Meter | ⑤ μ Vmeter |
| ③ 전자석 | ⑥ Flowmeter tube |

flowmeter pipe의 크기는 어쩔 수 없더라도 자석의 크기 축소에 의한 자장의 감소는 자속누설을 작게 하는 자석 design을 함으로써 어느 정도 보상할 수 있다.

본 실험에서는 유속이 큰 경우에는 별 문제가 안 되므로 유속이 0.5 m/sec \approx 1 knot 근방에서, 특히 본 실험에 사용된 계기로 측정이 가능한 한도내에서 작은 자장, 작은 유속에 의한 기전력을 관심에 두고 관찰하였다. 그림 4와 5의 data에 의하면 200gauss 자장에서 유속 0.1 m/sec \approx 0.2 knot 정도까지 0.5 m/sec의 유속에 대해서는 50 gauss 정도의 자장으로써도 기전력 측정이 가능했다.

따라서 자속누설을 작게 design한 소형자석과 내부 저항이 충분히 크고 측정 Range가 좀 더 작은 측정 계기 set를 사용할 경우 flowmeter가 상당한 규모로 소형화 될 수 있고 경제성까지 고려해서 국산실용화가 가능함을 결론으로 얻을 수 있다.

参考文献

- (1) W. T. Scott.
The physics of Electricity and Magnetism 479, 570 and 571.
- (2) J. S. Arnold.
An Electromagnetic Flowmeter for Transient Flow Studies. Rev. sci. Instrum., 22(1): 43-47.
- (3) A. Kolin.
An Alternating Field Induction Flowmeter of High Sensitivity. Rev. sci. Instrum., 16(5): 109-116.
- (4) W. V. R. Malkus and M. E. Stern.
Determination of Ocean Transports and Velocities by Electromagnetic effects. Journal of Marine Research, 9(2): 97-105. 1952.
- (5) William S. Von Arx.
An Electromagnetic Method for Measuring the Velocities of Ocean Currents from a Ship under Way, 1950.

(1)

Determination of Copper, Lead, Cadmium and Zinc in Water by the Square Wave Polarography with Dithizone-Chloroform Extraction Method

By

Sang-Yun Park

Su-Chan Moon

디디존-크로로포름 抽出, 矩形波 포-라로그래피에
依한 水中의 구리, 납, 카드뮴 및 亞鉛의 定量

朴 相 潤
文 壽 贊

Contents

- | | |
|-----------------|---------------------------|
| 1. Introduction | 3. Results and Discussion |
| 2. Experimental | 4. References |

Abstract

A combination of square wave polarography with the dithizone-chloroform extraction method was applied to the simultaneous determination of trace amounts of copper, lead, cadmium and zinc in water. When those ions forming dithizone chelate in chloroform layer were back-extracted with aqueous solution of 0.5 N KCl-0.1N HCl containing an excess of mercuric ion, the only free metal ions were extracted into aqueous layer. This aqueous solution was washed with chloroform twice and polarograms were recorded directly without further treatment. This method can be used to determine the concentrations of copper, lead and cadmium up to about 3 ppb and of zinc 14 ppb with an error of 10%.

要 約

水中에 極微量 存在하는 구리, 납, 카드뮴 및 亞鉛을 디디존-크로로포름 溶液으로 抽出한 것

* 한국해양대학 전임강사(一般化學)

** 부산대학교 문리과대학 화학과 조교수(分析化學)