〈技術解說〉

알 기 쉬 운 電 氣 化 學

편 집 부

14. 界面電気現象이란 무엇인가?

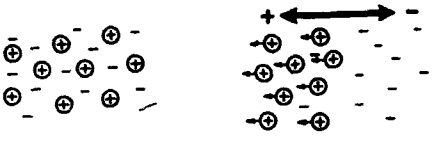
14-1 概 說

이제까지는 주로 金属과 電解質溶液과의 界面에 관해서 論하였다. 이때의 電位差는 金属中의 金属이온이 電解質溶液중으로 들어오는 경향(이온화 경향)과 溶液중의 이온이 金属속으로 들어가는 경향과의 밸런스(balance)에 따라서 발생하는 것으로 化學平衡을 전제로하는 熱力學的 電位差 또는 다른 말로 입시론 電位差라고 불리워지는 것이다. 이에 대하여 電位差의 발생하는 原理가 다른 또 하나의 電位差가 있다는 것을 소개하고자 한다. 지금 塗料의 微粒子가 있다고 하자. 이 塗料가 有機物이며 예를 들어 그것이 Polymer라고 하면 그것은 絶緣体이다. 이것을 적당히 처리하여 물속에 分散시키면 懸濁液이 된다. 이 塗料의 微粒子는 電気를 띄고 있어 서로 반발하므로 그대로는 凝固하지 않으나 外部에서 電気를 주면 微粒子는 그 부호에 따라서 陽 또는 陰極으로 향하여 움직이고 電極표면에서 그 電荷를 잃고 凝固한다. 이것이 초기의 電気泳動塗装의 原理이다.

이와같이 塗料粒子의 표면에 存在하는 電荷는 앞에 나왔든 熱力學的 電位와 같은 것일까? 그 대답은 『電気에 여러가지 종류가 있을리 없으므로 같은 原因이다』라고도 할 수 있으며 또 『그 거동이 다르므로 별개의 것이다』라고도 할 수 있다. 왜 이와같이 상반된 대답을 하여야 되나 그 理由를 설명하면 塗料의 微粒子와 같은 絶緣体 위에 있는 電気는 다분히 靜電気的인 거동을 하며 金属중에 存在하는 電気는 自由電子로서 흐르므로 電流로서 관찰되기 때문이다.

그러면 작은 微粒子의 한개 한개가 가지고 있는 電気는 어떻게 하면 測定할 수가 있을까?

金属과 電解質溶液의 경우에는 앞에서 말한 바와 같이 potentiometer로 測定할 수가 있었다. 그러나 塗料의 微粒子의 경우에는 이 微粒子 하나 하나에 potentiometer를 接続시켜 電位를 測定하는 것은 불가능하다. 그러나 이 微粒子를 어떠한 방법으로 溶液相에 대하여 상대적인 운동을 일으키면 微粒子가 +電気를 띄고 있을 때는 微粒子가 움직여가는 쪽은 +로, 반대로 溶液側은 -電気가 過剩이 되어 거시적인 order로 電位差를 測定할 수 있게 된다. (Fig.1)



(a) 粒子에 charge는 있으나 均一하게 혼합되어 있으므로 外部에 charge는 나타나지 않는다.

(b) 粒子의 거동에 따라 charge의 분리가 일어나서 電位差로 관측된다.

Fig. 1. 界面 動電位의 発生

이와같이 微粒子와 溶液으로 된 系는 그 속에서 微粒子와 溶液이 相対運動을 할 때에 한해서 외부에 거시적인 order의 電位差가 나타난다는 뜻에서 『界面動電位』 electro-kinetic potential 또는 제타(ζ)電位라고 부른다. 그러면 이와같이 하여 測定된 電位差는 微粒子와 溶液과의 界面의 참 電位差를 표시하는 것일까? 그 해답은 유감스럽지만 No 이다. 金属을 비롯한 固相과 溶液相과의 界面의 실태는 아직도 불명한 점이 많고 電気二重層의 구조의 문제로서 電気化學者에게 남아 있는 기초적이고도 어려운 과제이다.

지금 가장 확실한 설명으로서는 微粒子 같은 固相의 표면에 강하게 부착하고 있는 電荷의 부분과 약하게 부착하고 있어 外部의 溶液의 흐름에 의해서 흘러갈 가능성이 있는 電荷의 부분과의 차이(간격)에 의한 것이라고 말하고 있다. (Fig.2 참조)

Fig. 2 . 강한 흐름으로 粒子의 표면에 있는 電荷가 튀어 나가고있다.

결국 溶液의 流動으로 固体 표면에 吸着하고 있는 최외부의 電荷의 일부가 튀어나가서 電位差의 原因이 되는 것이다. 따라서 流動을 정지시키면 電荷는 튀어나가지 못하게되고 電位差의 発生도 그치게 된다. 이것이 界面動電位라는 이름의 기원이다.

14-2 . 여러가지 界面動電現象과 이들의 相互関係

界面動電現象은 콜로이드化學의 分野에서는 옛부터 알려졌던 現象이며 다음의 4개의 現象으로 大別되어 얼핏보면 서로 관계없는 것같이 보이지만 실은 같은 原因에 따른다는 것을 알게 되었다.

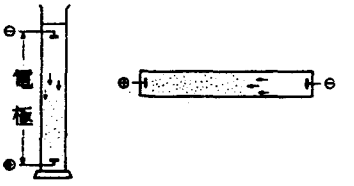
a) 沈降電位 또는 泳動電位

Fig.3의 (i)와 같이 메스시린더속에 懸濁液이 들어 있고 그속의 微粒子는 重力의 힘으로 밑으로 향하여 沈降하고 있다고 하자. 이때 메스시린더의 상단과 하단에 白金電極을 挿入하면 電位差가 발생한다.

이것은 이제까지 말한바와 같이 微粒子가 電気를 띄고 있고, 운동하기 때문에 반대의 電荷가 남게되어 外部에 電位差가 발생하게 된다. 微粒子의 沈降으로 電位差가 발생하므로 沈降電位라는 말이 붙여져 있으나 粒子의 운동을 일으키는 힘은 이밖에도 遠心力이나 磁場의 힘(단, 강자성체의 경우) 등이 생각되고 一般的으로 泳動電位라 부르고 있다.

b) 電気泳動

Fig.3의 (ii)에서와 같이 微粒子를 懸濁시킨 溶液속에 電極을 挿入하고 外部에서 電気를 가하면 微粒子는 어떤 쪽인가의 極을 향하여 움직인다. (i)의 沈降電位와 (ii)의 電気泳動은 原因과 結果가 반대로 되어 있을 뿐 같은 現象인 것을 알았을 것이다.



(i) 沈降電位 (ii) 電気泳動

Fig.3 . 界面動電現象 : 粒子가 움직이는 경우

c) 電気浸透

앞의 두 現象은 모두 溶液속에 微粒

子가 떠있을 경우이었다. 이들의 경우 溶液은 連続体이며 微粒子는 하나 하나 独立한 固相이다. 固相도 連続体이었다면 어떻게 될 것인가?

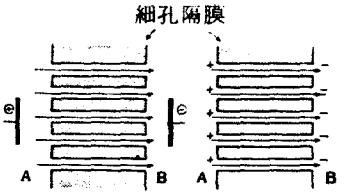
이것을 固相이 多孔質構造를 가진 것으로 Al의 多孔質陽極酸化膜같은 경우를 예로 들어 생각하여 보자. 界面動電現象은 이름 그대로 界面에서 일어나는 現象이므로 固液界面이 넓을수록 測定하기 쉬워진다. 그래서 多孔質固体를 예로 든 것이다. 原理的으로는 한장의 板에서도 그 界面에서는 界面動電現象이 일어나고 있는 것이다.

Fig.4의 (iii)에서 溶液은 多孔質인 隔膜으로 A, B 두 室로 나누어져 있다. 이 두 室에 電極을 두고 外部에서 電位差를 주면 固相의 表面 근방에서는 양 또는 음의 change가 存在하므로 그 부호에 따라서 어느쪽엔가 極에 향하여 이동하려고 한다. 그러나 固相에서는 서로 固定되어 움직일 수 없으므로 그 반동으로 溶液쪽이 움직인다. 이리하여 그 隔膜을 통하여 溶液이 움직이게 되고 두 室 사이에는 静水圧의 차가 생기게 된다. 이것은 電気浸透現象이라고 하여 工業上 여러 방면에 応用되고 있다.

d) 流動電位

Fig.4의 (iv)에서 이번에는 外孔質隔膜을 통하여 한쪽에서 다른 쪽에 静水圧을 加하여 溶液을 강제로 흐르게 하였다면 어떻게 되겠는가? 좁은 隔膜의 구멍을 溶液이 무리하게 통과할때 隔膜 표면의 charge의 일부가 液体에 의하여 운반되므로 隔膜의 両側에 電位差가 발생한다.

이것은 溶液이 흐름에 따라 発生하는 電位이므로 流動電位라고 한다. 곧 알게 되지만 (iii)의 電気浸透現象과는 原因과 結果가 반대의 관계를 가지고 있다.



(iii) 電位浸透 (iv) 流動電位

Fig.4. 界面動電現象, 液相이 움직이는 경우

14-3 四個現象의 統一的인 見解

위에 말한 4個現象의 근본이 되는 것은 무엇일까? i)과 ii)는 表裏의 관계가 있으며 iii)과 iv)도 또한 表裏의 관계가 있음을 알았다. i)과 ii), iii)과 iv)의 관계는 어떠할까? 이것은 운동하고 있는 것이 固相이냐 液相이냐의 差異뿐이고 相対運動이라는 점에서 보면 同一 現象인 것을 알 수 있다. 결국 이들의 現象은 電気現象과 力學的 現象과의 関連性, 혹은 干渉作用에 原因이 있을 것으로 안다. 이들의 4個現象을 다시 한번 整理하여 Table 1에 나타냈다.

界面動電現象을 간단히 「물이 흐르면 電気가 발생한다」라고 말할 수 있을 것인가? 自然現象에는 서로 무엇인가 관계가 있어 그 관련된 실마리를 찾아가면 생각치도 않은 곳에 영향이 나타나는 것이다.

Table 1의 첫째 列은 現象의 최초의 原因인 駆動力을 나타내며 두째 列은 그것의 직접 결과인 것의 흐름을 나타내고 세째 列은 그 相互作用으로서 최초의 原因과 직접 관계가 없는 것의 흐름을 나타낸다. 네째 列은 움직이지 않는 相을 나타내고 마지막 列은 간

Table 1. 여러 界面動電現象의 綜合

現　象	直接的인 駆動力	直接 움직이는것	연관되어 움직이는것	움직이지 않는 相	연관되어 발생하는 Potential
沈降電位	重　力	코로이드粒子	電　流	液　相	電位差
電気泳動	電位差	電　流	코로이드粒子	〃	(粒子의 重力)
電気浸透	〃	〃	液　相	固　相	圧力差
流動電位	圧力差	液　相	電　流	〃	電位差

접적인 流動의 결과로서 나타나는 現象을 표시하였다.

여기서 직접 관련성이란 電位差에 대해서는 電流이며 圧力差에 대해서는 液体의 流動과 같은 관계를 말한다. 式으로 나타내면 다음과 같다.

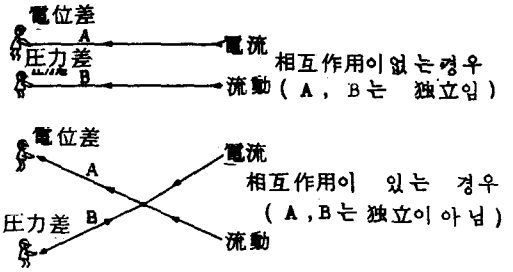


Fig.5. 두 現象이 서로 独立的으로 일어나는 경우와 相互作用을 하는 경우

$$I = \frac{1}{\rho}\triangle E \cdots\cdots(1)$$

$$U = \frac{1}{\eta}\triangle P \cdots\cdots(2)$$

I : 電　流
△E : 電位差
ρ : 比抵抗
U : 流　量
△P : 圧力差
η : 粘　度

그러나 Table 1의 界面動電現象에서는 電気現象과 流動現象에 相互干渉作用이 있다. 이러한 경우에는 (1) (2)式은 다음과 같이좀 복잡해진다.

$$I = L_{11}\triangle E + L_{12}\triangle P$$

$$U = L_{21}\triangle E + L_{22}\triangle P$$

단, $L_{11} = \frac{1}{\rho}$　　$L_{22} = \frac{1}{\eta}$

L_{12} L_{21} : 相互干渉係数

결국 L_{12} 또는 L_{21}이 들어간것 만큼 복잡해진 셈이다. L_{12}나 L_{21}이 0인 경우에는 (3) (4)式은 (1) (2)式과 같게 된다. 이들의 式에서와 같이 電流가 電位差만의 原因이 아니고 圧力差의 영향도 받는다는 것이 (3)式의 뜻이다.

Fig.5를 보면 電気現象과 流動現象 사이에 相互作用이 없는 경우에는 電位差의 실을 잡아당기면 電流의 부분만이 영향을 받고 圧力差의 실을 잡아 당기면 流量의 부분만이 움직인다. 그러나 相互作用이 있을 때에는 이들 두 실은 도중에서 매어 있어 電位差의 실을 잡아당겨도 주로 영향을 받는 것은 電流이지만 流量 쪽도 관계가 없는 것은 아니고 조금은 움직이며 다시 영향은 圧力差의 原因 부분까지 feedback (전달)하고 있다.

이와같은 관계가 界面動電現象의 本質인 것이다. L_{12} 및 L_{21}은 서로의 干渉의 크기를 결정하는 係数이며 이들은 比抵抗 ρ 粘度 η를 포함하는 복잡한 定数이지만 그 속에는 ζ電位라고 하는 共通의 parameter가 들어 있다.

(3), (4)式과 같은 表現法을 現象論的인 表現

이라고 하는데 두개 이상의 現象이 相互 作用하면서 進行할 때의 一般的인 表現法이다. 이것으로부터 非可逆過程의 熱力學이라고 하는 지금까지의 熱力學(化學平衡의 경우만을 취급)보다 한거름 더 發展하게 되는 것이다.

이러한 의미에서 界面動電現象은 이제까지 論한 可逆電位의 槪念과 여러 現象과를 전혀 別個의 것이라고 하지 않으면 안된다.

지금 (3)式에서 $I=0$라 하면 다음과 같이 된다.

$$L_{11}\triangle E + L_{12}\triangle P = 0$$

이것에서 $$\triangle E = \frac{L_{12}}{L_{11}}\triangle P$$

이것은 界面動電 現象을 電流가 0의 상태에서 測定한다. 결국 potentiometer로 測定하는 것을 뜻하고 있다. L_{11}은 溶液의 比抵抗 ρ와 관련되어 있으므로 L_{11}이 작을수록 결국 ρ가 클수록 圧力変化에 대한 電位差가 크게 나타난다. 그러므로 界面動電現象의 測定에는 溶液의 比抵抗이 클수록 좋다. 또 이때에 그림(4)의 (iv)에서 隔膜의 양측에는 圧力差가 있으므로 液相의 流動이 일어나고 있으며 동시에 U가 0이 되지는 않는다.

$U=0$인 경우에는 (4)식은

$$L_{21}\triangle E + L_{22}\triangle P = 0 \quad \text{에서}$$

$$\triangle P = \frac{L_{21}}{L_{22}}\triangle E \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

이며 圧力差와 電位差의 관계를 얻을 수 있다. 이때 液相의 流動은 최초의 조건으로 0이지만 電流 I는 반드시 0이 되지는 않는다.

이들의 식에서 알 수 있는 바와같이 界面動電現象을 測定할 때에 電流 또는 流動이 함께 0의 상태에서 測定하는 일은 없고 항상 変化가 進行하고 있는 상태에서 測定하게 되는 것이다. 결국 非可逆的으로 変化가 일어나면서 외견상 定常狀態가 되어 있는것을 測定하는 셈이다.

이점이 종래의 可逆電位의 測定原理와 根本的으로 다르다.

界面動電現象의 工業上의 応用例로는 앞에서 말한 電気泳動塗装 외에 逆浸透法에 의한 바닷물의 淡水化, 電解透析, 細工電解, 電気集塵法 이온성 靜電鍍金등 유망한 연구과제가 많다.

15. 電気化學의 講座 結論

15-1 電気二重層이야말로 電気化學의 모든 問題를 解決하는 열쇠이다.

앞 節에서 論한 바와같이 界面電気現象을 支配하는 根源이 되는 ζ電位는 콜로이드粒子表面의 電気二重層의 形成 때문에 생기는 것이다. 電極電位를 決定하는 ion과 金属間의 平衡電位나 電極反応의 속도를 制御하는 活性化過程 그리고 金属의 結晶成長을 支配하는 것 모두가 이 電気二重層內에서 일어나는 現象이므로 이것의 構造나 機能을 아는 것이야말로 電気化學의 모든 現象을 根本으로부터 理解하는 열쇠라고 할 수 있다.

15-2 메모리와 機動隊와의 충돌 — Graham의 모델

金属의 表面에는 여러 음이온이 特異吸着하는 것이 水銀電極을 사용한 電気毛管現象의 研究에서 알려졌다. 이와같은 特異吸着現象이 金属鍍金에 있어서 소위 음이온 効果와 관련이 있는 것이며 일반으로 양이온 보다도 음이온쪽이 特異吸着하기가 쉽다.

이것은 吸着의 세기에서 보면 化學吸着의 크기이므로 金屬과 음이온과의 거리는 1 ~ 2 Å 정도이다. 음이온이 特異吸着하고 있는 層은 內部 Helmholtz層이라고도 하고 있다. (Fig.6 參照)

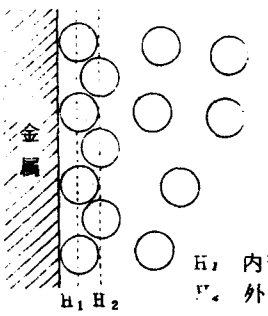


Fig.6. Grahame의 電気2重層 모델

그리고 그 外側에는 特異吸着하지 않은 그 밖의 이온이 主로 Coulomb 引力으로 吸着하고 있다. 앞의 內部 Helmholtz層은 化學吸着이지만 이 部分은 物理吸着정도의 힘으로 吸着되어 있으로 생각하여도 좋을 것이다. 이것은 金屬表面에서 3Å쯤되는 곳에 그 中心이 있다. 이 吸着層을 外部 Helmholtz層이라 하며 內部 Helhoultz層과 함께 電気二重層의 主要한 部分을 形成하고 있다.

다시 그 外側에는 外部 Helmholtz層을 形成하고 있는 電荷는 拡散的으로 점점 감소하여 溶液의 먼 쪽을 향하여 変化하고 있다. 減少하는 정도는 진한 溶液의 경우에는 속히 묽은 溶液의 경우에는 천천히 변화하여 大体로 外側에 10 Å 쯤까지 펼쳐 있는 것으로 생각된다 (Fig.7 參照).

電極界面에서 主要한 機能을 하고 있는 것은 이들 內部 및 外部 Helmholtz層이며 다른 말로 固定層이라고도 하며 溶液側의 流動등의 영향을 받지 않는다고 하고 있다.

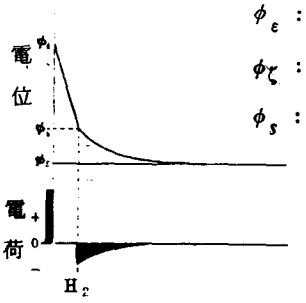


Fig.7. 電気二重層의 電位 및 電荷分布

이 부분이 金屬과 溶液 사이의 電極電位의 主要한 部分을 맡고 있으며 電位勾配로 고치면 10^6 V/cm에 이르는 강한 電場을 形成하고 있다. Fig.8의 만화는 데모隊와 機動隊가 서로 노려보고 対立하고 있는 강한 緊張狀態를 나타내고 있으나 電気二重層도 溶液層과 金屬側이 対立하고 있는 最前線이므로 똑같이 생각할 수 있다.

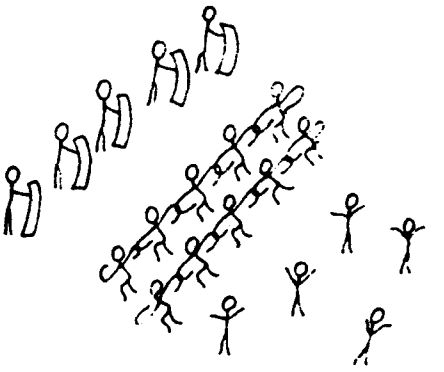


Fig.8. 電気二重層의 例로 볼수 있는 緊張한 場面

그리고 스크럼을 짜고 整列하고 있는 데모隊 뒤에는 그다지 思想이 堅固하지 못한 「들축이는 참견자가 散在하고 있다. 그들은 狀況에 따라 右로 또는 左로 흐르는 拡散二重層을 形成하고 있어 界面動電現象의 原因이 되고 있다. 결국 機械的인 流動이나 그밖의 여러 原因으로 電荷의 分布가 変化하는 것이다.

電極反応이 일어난다는 것은 이렇게 강하게 緊張한 電気二重層 사이를 이온이 通過하며 동시에 電子를 주고 받는다는 것이다.

10^6 V/cm라는 電位勾配가 이온 또는 原子에 電子를 주고 받게 하는 原動力을 준다. 보통의 化學反応에서는 反応을 進行시키는 原動力으로서 粒子의 濃度(化學 potential)나 温度, 圧力등 統計力學에 支配되는 힘이 分子나 原子에 電子를 주고 받게하는 것이지만 電極反応의 경우에는 지금말한 바와 같이 平面的으로 整列한 吸着이온에 의한 강한 電場(그것에 外部에서 加한 電場을 加하여)의 힘으로 電子를 강하게 잡아 끌든지 밀어내어 反応을 進行시키는 셈이므로 反応으로서는 가장 「組織的으로 計劃된」方法으로 進行시킬수 있는 셈이다. 이와같이 反応을 「計劃的」으로 進行시킬 수 있는 것이 電池로서 Energy 変換의 効率이 理想的인 原因이기도 하다.

한편 colloid 粒子등의 帶電을 支配하는 拡散二重層의 부분이 溶液의 流動의 영향을 받기 쉬운 것은 앞에도 말하였다. 이 부분이 받는 電場의 세기는 대단한 것은 아니므로 電極反応에는 그다지 영향을 주지 않으나 電気量으로서는 無視할 수 없는 크기를 가지고 있고 colloid粒子의 安定性에는 큰 영향을 가지고 있다. 또 粒子와 流体 사이의 相対運動의 결과 생기는 커다란 自然現象으로서 空電이나 천둥같은 気象現象도 界面動電現象이지만 이에 対해서는 명확하지 않은 점도 많다.

電気二重層과 같은 界面에서의 緊張은 다른 경우에도 있는가?

(1) 半導体와 溶液과의 接触

이제까지는 金属과 溶液과의 接触面에 対하여 論議하였지만 相이 다른 것 사이의 接触에는 다음과 같은 여러 경우가 있다.

1. ion的 接触
   - 1a 金属－溶液
   - 1b 半導体－溶液
   - 1c 金属－固体電解質
   - 1d 半導体－固体電解質
   - 1e 固体電解質－固体電解質

2. 電子的 接触
   - 2a 金属－金属
   - 2b 金属－半導体
   - 2c 半導体－半導体

ion的 接触이란 두相 사이에서 ion의 移動이 이루어져 平衡이 成立하는 系이며, 결국 物質移動이 일어나는 電気化學系이다. 이에 対하여 電子的 接触에서는 電荷의 移動뿐이고 物質의 移動은 일어나지 않는다. 그러므로 두 分類에 속하는 事項은 주로 電子工學에서 取扱되는 事項이므로 여기서는 省略한다. 1a의 金属과 溶液과의 接触에 対해서는 이미 말하였으므로 1b의 半導体와 溶液과의 接触으로부터 시작하기로 한다.

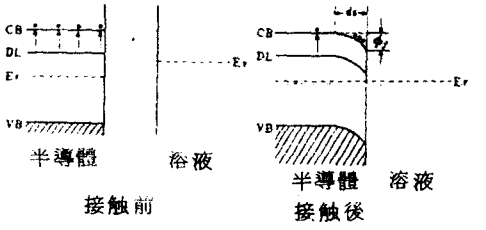


Fig.9 . 半導体와 溶液 (空間電荷層의 発生)

一般的으로 두 相이 接触하여 平衡이 成立하려면 두 相 사이에서 Fermi level이 一致하여야 한다. Fig.9는 n型 半導体와 溶液이 接触한 경우의 energy 상태를 표시하고 있다. 이때 半導体는 charge carrier를 그다지 많이 갖지 않으므로 電解液에 接한 부분만에 電荷의 過不足이 생겨 半導体의 本体内部까지는 그 영향이 미치는 않는다. 이 부분은 金属과 溶液과 接触할 때의 拡散二重層에 해당하며 空間電荷層 (space charge) 이라고 부르고 있다. 溶液중의 電気二重層과 本質的으로 같은 것이다. 다만 固体内의 일이므로 溶液에서와 같이 流動으로 나타나는 ζ電位라고 하는 것은 없다.

半導体중에는 움직일 수 있는 Charge Carrier는 극히 적으므로 이 空間電荷層의 두께는 수백 Å 까지 이른다. 溶液의 경우의 電気二重層의 두께가 커봐야 10 Å 인 것에 比하면 좀 두꺼운 편이다. 溶液의 경우에는 濃度가 낮을수록 電気二重層은 두꺼워지나 半導体의 경우에는 Charge Carrier의 濃度가 작아진다. 결국 電気伝導度가 작을수록 두꺼워진다. 金属의 Charge Carrier의 濃度는 半導体에 比하면 대단히 크므로 만일 金属内에도 空間電荷層 (電気二重層) 이 생긴다면 그 두께는 대단히 작은 것이 될 것이다.

그러므로 金属内에는 사실상 空間電荷層이 생기지 않는 理由를 이해하게 된 것이다.

半導体와 溶液과 接触한 溶液側에는 물론 보통의 電気二重層이 存在하고 있다. 그러므로 이 系에서는 溶液側과 半導体側과 두 電気二重層이 存在하는 셈이고 강조하면 二重의 電気二重層이 存在한다고도 말할 수 있다. (Fig.10 参照)

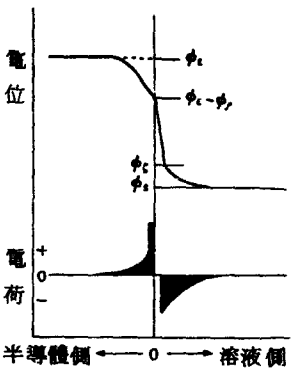


Fig.10 . 半導体와 溶液과의 界面의 電位 및 電荷分布

Fig.9 또는 Fig.10에서 半導体側의 伝導帶의 界面 근방의 굽은 정도를 flatband potential (ϕf) 라고 하며 半導体의 電極의 거동을 알아내는데 있어서 중요한 parameter가 되고 있다. 이 값은 界面의 impedance를 測定하므로서 구할 수가 있다.

(2) 固体電解質과 金屬과의 接触은 記憶 素子의 作用을 한다.

지금 1c의 金屬과 固体電解質과의 接触에 对하여 생각하여 보자. 이때에도 原理的으로는 溶液의 경우와 같으나 物質의 移動이 극단적으로 방해되어 있으므로 平衡에 달하는 것이 느리다. 그러나 일단 電気二重層이 形成되면 그것이 消失되는 것도 극히 느리다. 그 예로 電解를 할 때 그때문에 생긴 電気二重層의 새로운 상태는 電流를 끊은 후에도 그대로 固体속에 保存된다. 이 現象으로 固体記憶素子로서의 応用이 가능하며 현재 研究中에 있다.

半導体와 固体電解質이 接触할 경우에는 半導体側에 空間電荷層이 固体電解質側에 電気二重層이 생길 것은 이제까지 말한 것으로 賢明한 読者들께서는 곧 알았을 것으로 생각된다.

16. 맺는말

위와 같이 電気化學의 基礎理論에 对하여 길게 이야기하였으나 풀기 어려운式이나 모델의 이해를 돕기 위하여 독단적인 몇개의 만화를 넣었다 그러나 만화는 어디까지나 만화이고 초점을 잘 잡아도 참 모습과는 조금 다를지도 모른다. 読者들께서 이 만화를 보고 조금이라도 참 모습에 가까워질 기회를 가지게 된다면 다행으로 생각한다.