

# 현장실무자를 위한 설비진단 테크닉 (16)

전기는 응용하는 기술의 발달에는 실로 눈부신 바가 있다.

전기를 깨끗하고 안전한 에너지원으로써

또, 컴퓨터나 통신에 이용되는 정보전송의 매체로서

널리 사용되어 최근에는 광이나 초음파의 분야도 포함하여

쉽줄 모르는 진보를 계속하고 있다.

우리들은 그 전부를 볼수는 없으나, 미래기술이라는 거대한 양상에 대하여

비록 기술의 단편이라도 많이 모아 쌓이면 많은 참고가 될 것이다.

본고에서는 이를 위해 전 13장을 번역, 이번호 로 그 마지막장을 게재한다.

## 글 싣는 순서

- |       |                   |        |                       |
|-------|-------------------|--------|-----------------------|
| 제 1 장 | 예지보존에의 기초기술       | 제 6 장  | 변압기의 예지보전             |
|       | • 이상예지를 위한 데이터 처리 | 제 7 장  | 케이블 열화의 간이측정          |
|       | • 열화 프로세스에서의 이상예지 | 제 8 장  | 롤러베어링의 진단 테크닉         |
| 제 2 장 | 운전감시로 되는 상태의 추정   | 제 9 장  | 전력전자기기의 수명예측          |
|       | • 운전감시로 되는 상태의 추정 | 제 10 장 | 콘덴서 개폐와 보수유지          |
|       | • 이상 발생후의 상태진단    | 제 11 장 | 큐비클의 방식기술             |
| 제 3 장 | 기기에 의한 외부진단 테크닉   | 제 12 장 | 보전용 계기와 사용법           |
| 제 4 장 | 가스절연기기의 내부진단      | 제 13 장 | 센서에 사용되는 여러가지 성질과 활용법 |
| 제 5 장 | 리모트 센싱에 대한 설비진단   |        |                       |

# 제13장

## 센서에 사용되는

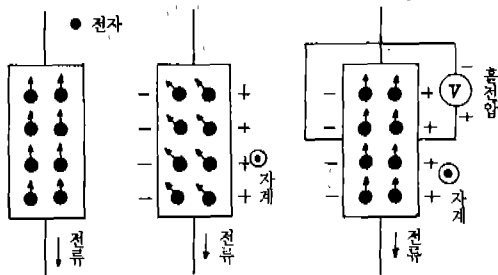
### 여러가지 성질과 활용법(하)

역/대한전기기사협회 기술실

#### 4. 홀효과와 설효과(자기→전기)

##### (1) 홀효과

<그림 16>의 (a)와 같이 예를 들면 N형 반도체에 전압을 인가하여 전류를 보낸다. N형 반도체 안에서는 전자가 전기를 운반한다. 전자는 마이너스의 전하를 가지고 있으므로 전자가 움직이는 방향과 전류의 방향은 반대이다. 여기서 (b) 그림과 같이 자계를 전류의 흐름과 수직 방향으로 가한다(이 지면의 밑에 자석의 N극이 있고 지면의 윗쪽, 즉 독자 쪽으로 S극이 있는 경우를 생각한다). 그렇게 하면 전자에 힘이 작용하고 그림과 같이 진행 방향이 구부러진다. 그 결과로 반도체의 좌측은 전자의 수가 증가하기 때문에 마이너스, 우측은 플러스로 대전하고 좌측과 우측 사이에 전압이 발생한다. 이러한 전압을 홀전압(Hall Voltage), 그리고 이 효과를 홀효과라고 한다. 이것은 1879년에 홀(E. H. Hall)에 의하여 발견된 효과이므로 홀효과라고 한다.



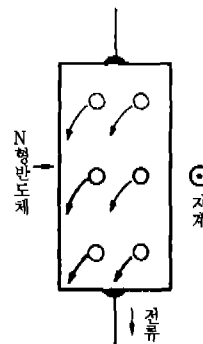
(a) 자계없음 (b) 자계를 가한 직후 (c) 정상상태

<그림 16> 홀효과

이 효과에 대해서는 좀더 상세하게 설명해 둔다. 전류가 흐르고 있는 반도체에 자계를 가하면 대부분 순간적으로 홀전압이 발생한다. 홀전압이 발생한 뒤에는 전자는 (c) 그림과 같이 똑바로 진행하게 된다. 이것은 전자의 진행 방향을 바꾸려고 하는 자계의 작용과 홀전압에 의한 작용이 반대 방향에서 평형되기 때문이다.

##### (2) 설효과

설효과(Suhl Effect)를 홀효과로부터 분리할 수는 없다. <그림 17>과 같이 홀효과가 일어나고 있는 N형 반도체에 정공을 주입한다. 정공은 플러스의 전하를 가지고 있으므로 전류와 동일한 방향으로 움직이는데 움직이는 경로는 좌측으로 기울어진다. 이와 같이 기울어지는 것은 자계를 강하게 할수록 심해지



○ 주입된 정공

(그림에는 없으나 전자도 많이 존재하고 <그림 1>의 (c)와 같이 정공과는 반대방향으로 똑바로 나가고 있다)

<그림 17> 설효과

고 좌측에 정공이 많이 모인다.

<그림 17>에는 그려지고 있지 않으나 N형 반도체이므로 실제로 전자가 많이 존재하고 있는 것이다. 이러한 전자는 <그림 16>의 (c)와 같이 똑바로 진행하고 있다. 정공의 진로가 구부러지는 것은 자계와 홀전압에 의한 힘이 동일한 방향, 즉 왼쪽 방향으로 작용하기 때문이다.

이 효과는 쉴(H. Suhl)들에 의하여 발견되었으며로 설효과라고 한다. 이 효과에 의하여 정공이 좌측 표면 가까이에 모이므로 이의 도전율이 높아진다. 표면이 거칠게 되어 있거나 깨끗하게 되어 있는가에 따라 모이는 방법에 차이가 있으므로 표면 상태에 따라라도 도전율을 제어할 수 있다. 좌측과 우측의 표면 상태를 바꾸어서 자계나 전류의 방향을 역전시키면 반도체의 전기적인 특성을 여러가지로 변화시킬 수 있다.

홀효과는 주로 자기 센서(Magnetic Sensor)로서 여러가지 반도체를 사용한 것이 많이 개발되어 왔다. 그외의 사용 방법도 많이 있으며 현재로는 계측과 제어 및 정보처리 기술의 분야에 여러가지 사용 방법이 이루어지고 있다. 지금부터라도 여러가지 사용 방법이 개발될 것이다. 설효과는 홀효과와 불가분의 현상이든가 또는 홀효과만큼 연구는 되어 있지 않다. 이 효과의 특징을 살린 사용 방법을 우선 생각할 필요가 있다.

### 5. 프란츠 · 켈디시 효과

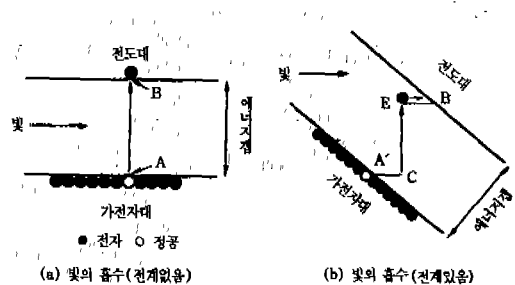
제1항에서 설명한 바와 같이 반도체 안의 전자가 얻을 수 있는 에너지에는 갭이 있다. 이것을 에너지 갭이라고 한다<그림 3 참조>. 반도체에 빛을 댈 경우를 생각하면 에너지갭과 같은가 또는 그 이상의 에너지를 갖는 빛을 대지 않으면 빛은 흡수되지 않는다. 즉, 가전자대의 전자를 전도대에 올릴 수 있는 에너지를 가진 빛이 아니면 흡수되지 않는다. 따라서 에너지갭에 의하여 작은 에너지를 갖는 빛은 흡수되지 않고 반도체를 관통해버린다(빛의 에너지는 빛의 파장으로 결정된다. 파장이 짧을수록 에너지는

크고, 길수록 에너지는 적다).

그런데 반도체에 대단히 큰 전계를 인가하면 에너지갭보다 적은 에너지의 빛이라도 흡수되는 것을 알았다. 어느 정도로 작은 에너지의 빛까지 흡수되는가는 전계의 크기에 의한다. 반도체에 가할 수 있는 전계의 크기에는 제한이 있다. 전계가 너무 크면 반도체의 결정은 균열되거나 용해되어서 파괴한다. 따라서 너무 큰 전계를 가할 수는 없다. 이상과 같은 이유도 있기 때문에 실제로는 전계를 가해서 에너지갭보다 약간 적은 에너지의 빛이 흡수하게 될 뿐이다.

이 효과는 프란츠(W. Franz)와 켈디시(L. V. Keldysh)에 의하여 발견되었으므로 이들의 이름을 붙이고 있다.

이 효과의 원인을 설명하는 것은 어려우나 여기서는 에너지 밴드의 구조를 사용하여 간단하게 설명해둔다. 전계를 가하기 전에는 <그림 18> (a)의  $\overline{AB}$ 에 상당하는 에너지(즉, 에너지갭에 상당하는 에너지) 이상의 에너지를 갖는 빛을 대지 않으면 흡수는 일어나지 않는다. 반도체에 전계를 가하면 <그림 18>의 (b)와 같이 에너지 밴드는 기울어진다. 기울어지는 것은 전계가 클수록 크게 기울어진다. 그렇게 되면  $\overline{CE}$ 에 상당하는 에너지를 갖는 빛이라도 흡수하게 된다.  $\overline{CE}$ 는  $\overline{AB}$ 보다 작으므로 전계가 없는 경우보다 작은 에너지의 빛에서도 흡수가 일어난다. 이것은 큰 전계 때문에 C점과 E점에도 전자가 존재할



<그림 18> 프란츠-켈디시 효과

수 있게 되었기 때문이다. 그림 안의 A'C사이, EB' 사이는 전자가 자유로이 움직일 수 있다.

에너지갭 속에는 전자가 존재할 수 없었는데 큰 전계를 가하였기 때문에 존재할 수 있게 된 것이다. 이것이 프란츠-켈디시 효과의 기인이다.

이 효과를 사용하면 에너지갭보다 약간 적은 에너지의 빛을 반도체에 대고(이 빛은 반도체를 통과할 수 있다) 전계를 가하므로 빛을 통과하지 못하도록 할 수 있다. 즉, 빛의 스위치가 된다. 이 효과는 대단히 빠르므로(전계를 가하면 즉시 일어난다) 고속 스위치로 할 수 있다. 따라서 광통신에 응용하기 위한 연구가 한창 이루어지고 있다. 센서에 응용하는 것은 지금부터인 것 같다.

**6. 포톤 드래그 효과(빛→전기)**

이것은 반도체에 빛을 대면 반도체 안의 전자나 정공이 빛 (포톤, Photon)에 끌리기(드래그, Drag) 때문에 전압이 발생하는 현상이므로 포톤 드래그 효과(Photon Drag Effect)라고 한다. 빛은 일반적으로 전자파로서 전기와 자기의 파(Wave)로 취급되고 있으나 전자, 중성자, 중간자 등과 같이 입자로 생각할 수 있기 때문에 이 입자를 광자라고 한다.

이 효과가 발생하는 메커니즘은 상세하게 분류하면 많이 있으나 여기서는 그중 한 가지에 대하여 설명하기로 한다. <그림 19>와 같이 N형의 반도체를 생각한다. 이것에 빛을 대면 N형 반도체 안에 수 많은 자유 전자에 광자가 부딪힌다. 그 결과로 전자는 빛이 진행하는 방향으로 힘을 받아서 움직이게 된다. 그러면 그림의 오른쪽은 전자의 수가 증가하

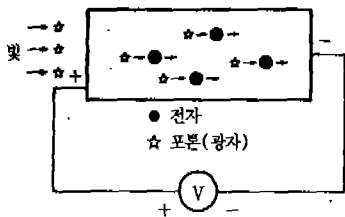
고 왼쪽에서는 그 몫만큼 감소한다. 그 결과 오른쪽은 마이너스, 왼쪽은 플러스로 대전하기 때문에 양 끝 사이에 그림과 같이 전압이 발생한다. P형 반도체인 경우에는 반대 방향의 전압이 발생한다. 이것이 포톤 드래그 효과이다. 여기서 설명하기 위하여 사용된 빛은 에너지갭보다 훨씬 적은 에너지의 빛(파장이 긴 빛, 즉 적외선이다)이다.

포톤 드래그 효과에 의하여 발생하는 전압은 대단히 작으므로 강한 빛을 대지 않으면 관측은 곤란하다. 그러나 이 효과의 응답 속도(빛을 대고 전압이 발생하는 속도)는 대단히 크다. 따라서 이 효과를 사용하여 초고속 적외선 센서가 된다. 현재는 큰 출력의 탄산 가스 레이저의 광펄스 검출기 등에 응용되고 있다(탄산 가스 레이저의 광파장은 1mm의 100분의 1, 적외선이다). 앞으로 이 효과의 고속성을 살린 더 효율이 좋은 센서의 개발이 기대된다.

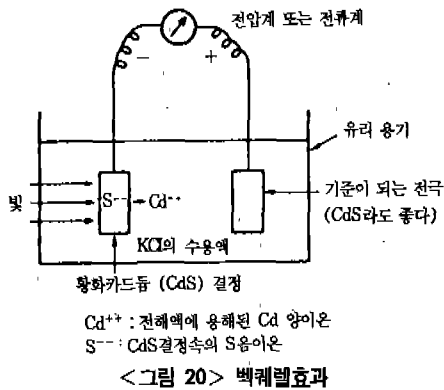
**7. 베크렐 광기전력효과(빛→전기)**

베크렐(E. Becquerel)이 1839년에 이 효과를 처음으로 발견하였다. 그는 다음과 같은 실험을 한 것이다. 염화은의 얇은 막으로 피복한 백금판과 아무 것도 하지 않은 백금판을 도선으로 연결하고 전해액(Electrolyte)에 양쪽의 백금판을 담구어서 염화은의 막을 붙인 백금판에 빛을 쬐다. 그러면 이 두 사이에 전압이 발생하고 도선에 전류가 흐르는 것을 발견한 것이다. 그 뒤에 이 효과는 반도체에서도 일어난다는 것을 알고 대단히 주목하게 되었다.

여기서는 화합물 반도체를 사용한 예에 대하여 설명한다. <그림 20>과 같이 염화 칼륨(KCl)을 물에 용해시킨 용액(전해액)을 넣은 유리 용기(그릇)에 화합물 반도체인 황화 카드뮴(CdS, N형)과 이것과 도선으로 연결한 기준이 되는 전극을 넣어서 이 두 가지를 용액에 담근다. 그림에서는 기준 전극에도 황화 카드뮴을 사용한 예를 나타내고 있다. 도선의 중간에 전압계나 전류계를 연결해 둔다. 이와 같이 해서 한쪽의 황화 카드뮴에 빛을 대면 전압이 발생한다. 빛이 닿은 쪽의 전극이 마이너스로 된다. <그

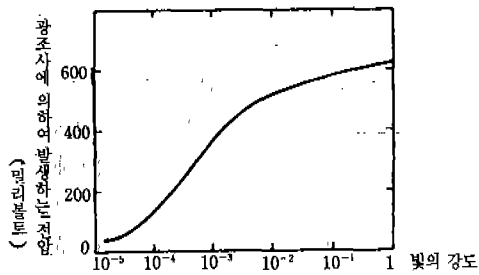


<그림 19> 포톤 드래그효과

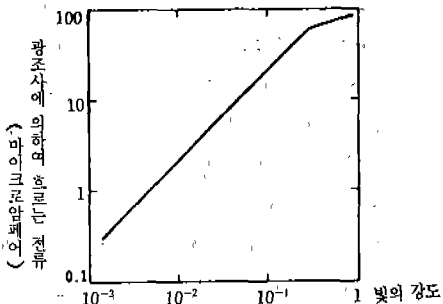


림 21>과 같이 빛의 강도를 증가시키면 발생하는 전압은 커진다. 또한 <그림 22>와 같이 빛의 강도를 증가시키면 전류는 증가한다.

이 효과의 원인에 대해서는 상세한 것을 알 수 없으나 대개 다음과 같이 생각되고 있다. 황화 카드뮴을 전해액에 담그면 플러스로 대전한 카드뮴 이온(Cd<sup>2+</sup>)이 전해액 속에 용해된다. 한편 황화 카드뮴 속에는 마이너스로 대전한 유황 이온(S<sup>2-</sup>)이 남는



<그림 21> 빛의 강도와 발생하는 전압과의 관계



<그림 22> 빛의 강도와 광전류와의 관계

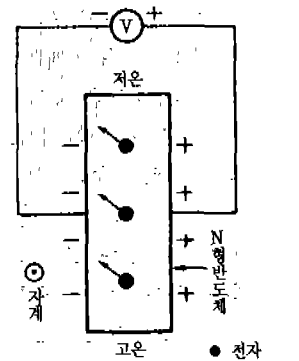
다. 따라서 황화 카드뮴은 마이너스, 용액은 플러스로 대전하다. 빛을 대면 황화 카드뮴 안에서 마이너스로 대전한 유황 이온에 포착되어 있던 전자가 빛 때문에 자유로이 움직이게 된다. 그리하여 전류가 흐른다.

현재로 보아 이 효과는 센서에 응용하는 것보다 태양빛의 에너지를 인출하기 위한 태양 전지로서 주목되고 있다. 백케렐이 처음에 실험할 때에도 그는 태양빛을 대고 있었다. 태양 전지이든 센서이든 간에 이것을 실용화 하는데는 아직도 기초 연구가 필요하다.

### 8. 네른스트 효과(열, 자기→전기)

N형 반도체인 경우를 생각해 본다. 이 반도체에 있는 한쪽 끝의 온도를 다른 쪽 끝보다 높게 했다고 하자. 그러면 <그림 23>과 같이 온도가 높은 쪽서부터 낮은 쪽으로 전자가 확산에 의하여 이동한다. 전자의 이동에 의하여 고온측서부터 저온측으로 열이 흐르게 된다.

이와 같은 반도체에 자계를 가하면 어떠한 일이 생기는가? 홀효과나 선택효과의 항에서 설명한 것과 같이 자계 속을 전기가 있는 입자(여기서는 전자)가 움직이면 그것은 자계에 의한 힘을 받아서 진행하는 방향이 구부러진다. 그 결과, 그림과 같이 한쪽 면이



{ 저온의 뒷쪽에 자석의 N극, 독자측에 S극이 있는 것으로 생각한다. }

<그림 23> 네른스트효과

마이너스, 다른 면이 플러스로 대전한다. 따라서 이 사이에 전압이 발생한다. 이런 현상을 네른스트 효과(Nernst Effect)라고 하며 이 전압을 네른스트 전압이라고 한다.

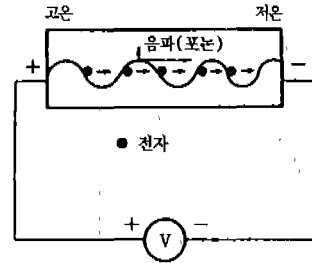
이 효과는 열의 흐름이나 온도 차이 등의 센서에 이용된다고 생각되나 현재로는 별로 응용에 관한 연구는 이루어지고 있지 않다. 그것은 이 효과가 대단히 적기 때문이라고 생각된다. 그러나 무언가 재미있는 이용 방법이 있을 것 같다.

### 9. 포논 드래그 효과(구레비치 효과, 열→전기)

네른스트 효과일 때와 같이 반도체(또는 금속)에 있는 한쪽 끝의 온도를 다른 쪽 끝의 온도보다 높게 한다. 그러면 전자는 고온측서부터 저온측으로 확산에 의하여 움직인다(N형 반도체인 경우를 생각한다). 그러면 저온측은 마이너스, 고온측은 플러스로, 대전하기 때문에 양쪽 끝 사이에 전압(기전력)이 발생한다. 이것을 열기전력 효과(Thermoelectromotive Force Effect)라고 한다.

그런데 이 현상을 대단히 낮은 온도 환경하에서 관측한 결과, 전자의 움직임만으로는 설명할 수 없는 크기의 전압이 발생하는 것을 알았다. 규칙 있게 배열하여 반도체 결정을 형성하고 있는 원자(실리콘인 경우에는 실리콘 원자)는 정해진 위치의 주위에서 진동하고 있으며 그 진동의 크기는 온도가 높을수록 크다. 이 진동이 고온측서부터 저온측으로 전달될 때에 전자를 끈다. 이로 인하여 발생하는 전압이 커지는 것을 알았다. 이것을 <그림 24>에 나타내고 있다. 이 진동은 일종의 음파(Acoustic Wave)이며 전자와 같이 입자로 간주되어서 음자(Phonon)라고 하는 경우도 있다. 따라서 이 현상은 포논이 전자를 끄는 효과이므로 포논 드래그 효과(Phonon Drag Effect)라고 한다(앞에서 말한 포논 드래그 효과와 비슷하다). 구레비치(L. Gurevich)가 이 효과에 대하여 최초로 발표하였기 때문에 구레비치 효과라고도 한다.

이 효과는 저온이 아니면 잘 관측되지 않는다. 그



(여기서는 포논을 파로 해서 그리고 있으나 <그림 4>와 같이 포논의 입자가 전자와 충돌하는 것으로 생각해도 좋다.)

<그림 24> 포논 드래그효과

것은 온도가 높아지면 다른 현상도 발생하게 되어 이 효과가 감추어지기 때문이다. 이 효과에 대해서는 물리적인 흥미로 보아 기초 연구가 주로 이루어지는 것이 현재 상태이다.

### 10. 조세프슨 효과(전기, 자기→전기)

어떤 종류의 금속(납), 수은, 니오브(Niobium) 등이나 합금(Pb<sub>2</sub> Au, NbC, NbN 등)을 점점 냉각시켜서 -269°C(액체 헬륨의 온도)정도로 하면 갑자기 이들의 전기 저항이 영으로 되는 초전도현상이 1911년에 카머링 온네스(H. Kamerlingh-Onnes)에 의하여 발견되었다. 초전도 상태에서는 전기 저항이 없으므로(0Ω) 링 모양의 초전도 금속이나 합금에 전류를 보내면 영구히 전류는 계속해서 흐른다.

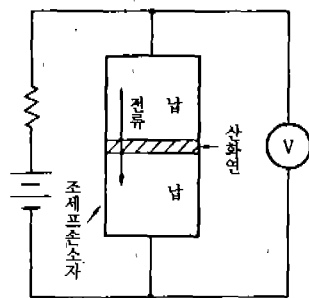
최근에 전자 계산기나 센서에 응용하는 것에 관해서 대단히 주목되고 있는 조세프슨 효과도 초전도현상의 일종이며 1962년에 당시 캠브리지 대학의 대학원생이었던 조세프슨(B. D. Josephson)이 이론적으로 발견한 것이다. 이것을 실험에 의하여 확인한 것은 앤더슨(P. W. Anderson) 등이며 1963년의 일이다. 카머링 온네스와 조세프슨, 앤더슨 등은 각각 노벨상을 받았다.

조세프슨 효과란 어떠한 현상인가를 간단하게 설명한다. <그림 25>와 같이 예를 들면 초전도 금속인 납으로 절연체인 산화연을 끼운 샌드위치 구조를

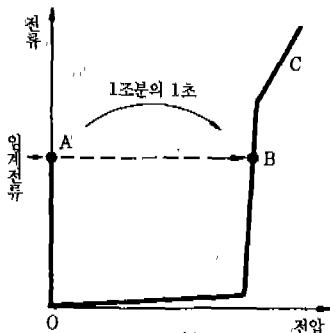
만든다. 산화연의 두께는 1mm의 10만분의 1 이하가 되도록 한다. 이것을 조세프슨 소자(Josephson Device)라고 한다. 이 소자의 전류와 전압의 관계를 그림과 같은 회로에서 측정해 본다. 일반적으로는 절연물이 도중에 끼여 있으면 전류는 대단히 흐르기 어렵다. 그런데 초전도 상태에서는 절연물이 없는 것과 같이 전류가 흐른다. 이 전류의 크기는 일정하며 조세프슨 임계 전류라고 한다.

이 때의 전류와 조세프슨 소자에 가해지고 있는 전압의 관계를 <그림 26>에 나타내면 A의 부분이다. 소자에 가해지고 있는 전압은 0V이다. 여기서 전류를 임계 전류 이하로 하면 전류와 전압의 관계가 B점으로 이동한다. 전압을 증가시키면 C쪽으로 이동한다. 이 상태에서 전압을 내리면 C→B→0으로 변환한다. 이상과 같은 현상을 조세프슨 효과(Josephson Effect)라고 한다.

조세프슨 소자가 전자 계산기의 스위치 소자로서



<그림 25> 조세프슨효과 측정회로



<그림 26> 조세프슨소자의 전류-전압특성

실용화하기 위한 연구가 한창 이루어지고 있는 것은 A점(전압=0)의 상태에서 B점(전압 $\approx$ 0)으로 변화(스위칭)하는 것이 약 1조분의 1초로 대단히 짧은 시간에서 일어나고 스위칭에 요하는 전력도 100만분의 1W 이하로 대단히 작기 때문이다. 현재 실리콘 등과 같은 반도체에 의한 LSI(Large Scale Integration)나 초 LSI(Super Large Scale Integration)와 비교하면 조세프슨 소자는 현격하게 빠르고 또한 소비 전력도 적다. 따라서 다음 시대의 컴퓨터는 조세프슨 컴퓨터가 될 지도 모른다고 한다.

또한 조세프슨 소자는 대단히 감도가 높은 자기 센서로서 사용할 수가 있다. 인간의 뇌가 작용할 때에 발생하는 뇌파의 자계 등, 지금까지의 센서로는 미치지 못했던 미약한 자계를 측정할 수 있게 된다. 인간을 진단하는 외에 지구의 내부 구조도 진단할 수 있다. 그밖에 전압이나 전류 등을 자기로 변환되는 것은 조세프슨 효과에 의하여 정밀한 측정을 할 수 있게 된다. 이 이외에도 여러가지 분야에 응용하는 것을 고려하고 있으며 한창 연구가 이루어지고 있다.

### 결론

지금까지 센서에 사용되는 여러가지 효과를 소개하였다. 그러나 이밖에도 실용화되어서 사용되고 있는 효과나 실용화 도상에 있는 효과도 많이 있다. 예를 들면 가스 경보기라든가 변형의 센서(신축 센서) 또는 소리의 센서 등과 같이 기초로 되어 있는 효과이다.

어떤 효과가 실용화되는 데는 그 효과가 일어나는 원인과 메커니즘을 확실히 이해해야 한다. 그리고 그 효과가 가장 효과있게 일어나는 재료를 찾아 내거나 제조하지 않으면 안된다. 현재로 보아 효과가 적고 실용화가 불가능해도 새로운 재료를 개발함으로써 달성할 수 있다. 이를 위해서는 기초 연구와 응용 및 개발을 위한 연구가 병행해서 이루어져야 한다고 생각된다.

<연재 끝>