

양전자 소멸을 이용한 재료의 비파괴평가



박 용 기

(한국표준연구소 비파괴시험연구실)

1. 머리말

양전자(positron)는 전자의 반물질입자(antimatter particle)로 전자와 동일한 크기와 질량을 가지고 있으며, 전하는 전자와 반대인 양전기를 가지고 있다. 1929년에 P.M.A. Dirac에 의해 이론적으로 양전자의 존재가 예견되고 그 삼년뒤에는 Anderson, 그리고 Occhialini와 Blackett에 의해 각각 실험적으로 확인되었다.⁽¹⁾

1950년대까지 양전자 물리의 기초연구가 진행되어 오다 1960년대 중반에 양전자가 고체의 격자결함에 민감하다는 사실이 실험적으로 밝혀지면서⁽²⁻⁴⁾ 재료내의 미세결함 연구에 양전자가 활발히 이용되기 시작하였다. 근래에는 그 활용 범위가 상당히 넓어져 vacancy, dislocation 등의 격자 결함연구, fatigue, creep 등에 의한 재료변형, 방사선 조사에 의한 재료의 손상, 수소포착현상, 상변태에 관한 연구등에 응용되고 있으며 재료표면 구조의 연구 등에도 점차 응용되기 시작하고 있다. 또한 생체에서도 그 응용이 시작되고 있다.

이 실험방법의 장점은 시편을 손상시키지 않고 내부의 결함을 탐지할 수 있는 비파괴적 방법이라는 점이다. 또 양전자 소멸 방법은 원자크기에 준하는 결함의 직접적인 정보를 제공하는 점에서도 독특하다. 더우기 양전자는 vacancy 형태의 결함에는 대단히 민감하지만 interstitial 형태의 결함에는 민감하지 않기 때문에 두 형태의 결함을 대단히 잘 구별해 낼 수 있는 장점도 있다. 본론에서는 양전자 소멸의 기본적인 원리와 측정장치 및 data 분석을 주로 설명하고 그 응용 예를 간단히 설명하려한다.

2. 양전자 소멸의 기본원리

2-1 양전자 발생

양전자는 양전자를 발생하는 방사성 동위원소의 붕괴 과정에서 얻어진다.⁽⁵⁾ 200여개 이상의 양전자 발생 핵종이 존재하지만 생산 경비와 반감기 등을 고려하여 실제로 양전자 소멸 측정에 이용되는 동위원소는 대략 10여 가지 정도이다. 그중에서도 가장 많이 쓰이는 동위원소는 ²²Na(반감기 2.6년)이며 ⁵⁶Co(반감기 71일)도 비교적 많이 쓰이는 편이다. ⁴⁴Ti는 반감기가 길고(47년) positron의 energy가 높아 침투깊이가 큰 장점들을 가지고 있어 양전자 수명측정 방법에 대단히 유리한 동위원소이나 생산 경비가 높아 현재까지는 널리 사용되지 않고 있다.⁽⁶⁾

2-2 양전자의 침투, 감속 및 확산

양전자의 침투깊이는 양전자의 최고 운동에너지와 침투되는 물질의 밀도에 의해 결정되며 다음 식으로 표현된다.⁽⁷⁾

$$P_+(x) = e^{-\alpha^+ x} \quad (1)$$

여기서 α^+ 는 흡수계수(absorption coefficient)이며 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\alpha^+ = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{-d \ln P_+(x)}{dx} \right) \\ = C_+ \frac{d(g/cm^3)}{E_{max}^{\beta^+} (MeV)} \quad (cm^{-1}) \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서 x 는 침투되는 표면으로부터의 거리이고 C_+ 와 β_+ 는 실험적 상수, d 는 침투되는 물질의 밀도, E_{max} 는 양전자의 최고 에너지(end point

energy)이다. 양전자에 대해 C^+ 는 $16 \pm 1 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이고 β^+ 는 1.43이다.

실제적인 양전자 침투깊이(R_+)는 보통 α^+ 의 역수값으로 표시된다.

$$R_+ = \alpha^+{}^{-1} = (16 \pm 1) (3) \left(\frac{d}{E_{\text{max}}^{1.43}} \right)^{-1} \quad (3)$$

예를들면 철에서 양전자의 침투깊이(R_+)는 ^{23}Na 를 쓰는 경우 ($E_{\text{max}} = 0.54 \text{ MeV}$) 약 $35 \mu\text{m}$ 이고 ^{44}Ti ($E_{\text{max}} = 1.47 \text{ MeV}$)을 쓰면 약 $140 \mu\text{m}$ 가 된다. 투과 전자 현미경의 경우 일반적으로 시편의 두께가 약 $0.2 \mu\text{m}$ 인데 반해 양전자를 이용하면 투과전자 현미경의 100-1000배 정도 깊이의 결합에 관한 정보를 알아 낼 수 있음을 알 수 있다. 최근에는 대단히 낮은 에너지의 양전자를 가속시켜 수 keV 정도까지의 단일한 에너지를 갖는 양전자 흐름을 만드는 장치가 개발되어 재료표면층의 구조 연구에 활용되고 있다.⁽⁹⁻¹⁰⁾

고체 내부로 침투된 양전자는 여러가지 산란에 의해 급속히 에너지를 잃고 kT 정도의 저에너지 상태로 되는데 이 과정을 thermalization 이라 한다. thermalization 은 몇가지의 산란과정에 의해 이루어지는데 높은 에너지 상태 일때는 금속내의 자유전자와의 비탄성 충돌 및 전자-홀(hole)쌍의 생성을 통해 에너지를 잃게 되어 낮은 에너지상태(수 eV 정도)가 된다. 낮은 에너지 상태에서는 주로 phonon 과의 산란을 통해 에너지를 잃고 열에너지(-kT)정도의 운동에너지만을 갖게 되는데, 이 과정이 thermalization 에 필요한 시간의 대부분을 차지한다. 그 밖에 이온 중심부와의 탄성 충돌도 존재하지만 큰 비중을 차지하지는 않는다. phonon 과의 산란이 중요하기 때문에 thermalization 시간은 온도가 높을수록 짧아 지는데 상온에서는 보통 10 ps 이내이다. 보통 금속내에서 양전자의 수명이 100-200 ps 이므로 수명의 대부분을 kT 정도의 낮은 에너지 상태로 보내게 된다.

Thermalized 된 양전자는 phonon 과의 산란을 계속하면서 전자를 만나 소멸할 때까지 재료내에서 random walk 에 의한 확산을 하게 된다. 양전자가 소멸하기 까지의 평균 확산거리는 약 100-200m 정도로 이는 대략 10^6 개 원자를 포함하는 부피내를 움직인 것이 된다. 그러므로 수 keV 정도 이상의 에너지를 갖는 양전자가 금속내에 침투되면 침투깊이가 확산거리에 비해 훨씬 크기 때문에 침투되는 표면으로 다시 빠져나오는 양전자는 거의 없게 되고 대부분이 재료내에서 전자와 소멸하게 된다.

2-3 양전자의 분포 및 소멸

양전자는 고체내에서 이온들과 반발력을 지니기 때문에 파동함수의 진폭이 이온이 있는 격자점에서는 낮아지고 이온과 이온의 사이 즉 interstitial 자리에서 최대가 된다. 그러므로 평균 이온밀도 보다 낮은 이온밀도의 자리는 양전자와 인력을 지니게 되어

vacancy 형태의 결합, 즉 vacancy, dislocation, micro-void 등이 양전자 포착의 중요한 자리가 된다.

Thermalize 된 양전자가 고체내에서 interstitial 자리사이를 확산중이거나, 결합에 포착된 뒤 전자를 만나게 되면 소멸하게 되는데 이때 511 keV 의 γ 선이 두개 발생하게 된다. 그림 1은 ^{23}Na 로부터 양전자가 발생하는 과정과 시편내에 침투한 양전자가 소멸하는 과정을 도식적으로 나타낸 그림이다. ^{23}Na 에서는 양전자 발생과 거의 동시에 1.274 MeV 의 γ 선이 발생되므로 이 초기 γ 선과 양전자 소멸시 발생하는 511 keV 의 γ 선을 각각 측정하여 그 시간차를 측정하면 시편내에서의 양전자 수명(lifetime)을 알 수 있다.

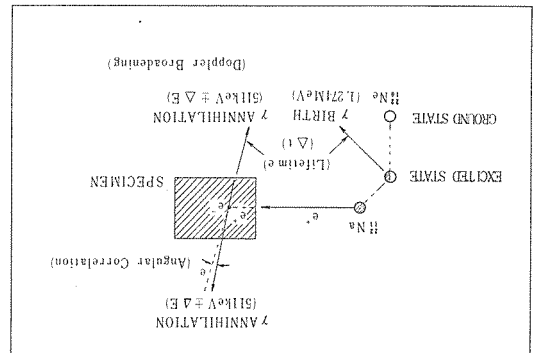


그림 1 양전자의 발전과 소멸과정

시편내에서 양전자가 전자와 소멸하면서 발생하는 두개의 γ 선을 소멸하는 전자가 momentum 을 가지고 있지 않다면 서로 180° 방향으로 방출되지만 실제로 전자가 momentum 을 지니고 있기 때문에 두 방향은 직선으로부터 벗어나게 된다. 이 각도 측정을 각 상관(angular correlation) 측정이라 하며 시편내의 전자 momentum 분포상황과 밀접한 관계를 나타낸다.

양전자 소멸에는 또다른 측면이 있는데 그것은 소멸하는 전자의 momentum 때문에 소멸시 발생하는 γ 선의 에너지가 $E = mc^2(511 \text{ keV})$ 으로부터 Doppler 효과에 의해 변화하게 되는 현상이다. 즉 소멸 γ 선의 에너지를 측정함으로써 Doppler 효과를 측정하여 시편내의 전자 momentum 분포상태를 파악할 수 있게 된다. 이 측정방법을 Doppler broadening 측정이라 한다.

양전자의 수명(τ)은 양전자의 소멸속도(λ)의 역수로 표현되는데 전자밀도(n)에 반비례하고 있다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾

$$\tau = 1/\lambda = [\pi \gamma_0^2 \text{cn} \gamma(n)]^{-1} \quad (4)$$

이 식에서 γ_0 는 e^2/mc^2 로 주어지는 고전적인 전자반경이며 c 는 광속, $\gamma(n)$ 은 전자밀도에 의존

하는 보정항이다. 양전자는 자유전자 뿐만 아니라 구속전자(core electron)와도 소멸을 하게 되므로 자유전자 밀도 n 을 보정하여 사용한다. 실제로 천이 금속에서는 구속전자와의 소멸비율이 크게 증가한다. 그림 2는 이론적인 양전자 소멸속도(λ)와 실험적으로 구한 소멸속도를 전자밀도의 함수로 나타내고 있다. 전자밀도는 밀도인자 $\gamma_s = (3/4\pi n)$ 의 형태로 표현되어 있다.

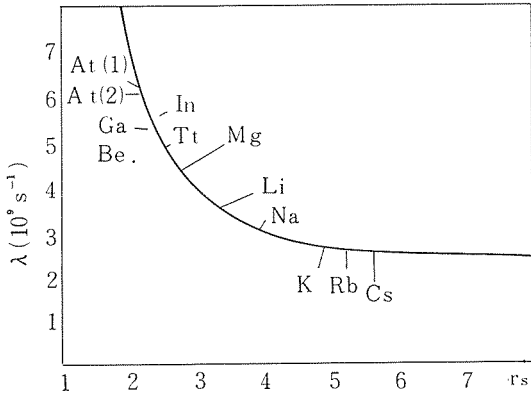


그림 2. 양전자 소멸속도 : 실선은 이론적인 계산값이고 각 점은 실험적으로 측정된 값이다(참고문헌 11)

결합에 포착된 양전자는 대부분 소멸할 때까지 결합내에 남아 있는데, 그 수명은 결합의 종류에 따라 특정한 값을 지닌다. 이는 각 형태의 결합마다 특정한 전자밀도 분포를 지니고 있기 때문이다. 그러므로 양전자 수명은 각 결합의 지문과 같은 역할을 하여 결합의 종류를 알아내는데 대단히 유용하다.

각 상관관 Doppler broadening 측정에서는 소멸하는 전자와 양전자쌍의 momentum 분포를 측정하게 되는데 일반적으로 쓰이는 long-slit 각 상관 측정방법으로는 momentum 분포의 한 성분(P_x)만을 측정하게 된다.

또한 소멸시 발생하는 γ 선의 에너지는 측정하는 방향의 momentum 성분(P_L)에 의해 Doppler broadening 을 일으킨다.

$$E = m_0 c^2 \pm (P_L/2) = 511 \pm \Delta E(\text{keV})$$

여기서 m_0 는 전자의 정지질량이며 c 는 광속이다. 자유전자와의 소멸만을 생각하면 각상관이나 Doppler broadening curve는 위로 볼록한 이차곡선이 되지만 구속전자와의 소멸이 존재하므로 위로 볼록한 이차곡선이 넓은 Gaussian 부분과 겹쳐져 있게 된다.

3. 양전자 소멸의 측정

재료내의 미세결합 연구에는 주로 수명측정과 Doppler broadening 방법이 많이 쓰이고 있으므로 본장에서는 이 두 방법에 대해서만 설명하기로 한다.

3-1 양전자 수명측정

양전자의 수명은 time spectrometer로 측정하는데 초기 γ 선과 소멸 γ 선이 동일한 소멸현상에 속하는지를 결정하는 coincidence 방식에 따라 몇가지로 분류될 수 있다. Fast/slow coincidence 방식이 많이 쓰여왔는데, 최근에는 fast coincidence 혹은 fast-fast coincidence 방식등이 쓰이고 있으며 최근의 방식이 보다 간편하면서도 빠른 계수능력을 보유하고 있어 능률적이다.⁽¹²⁾

그림 3은 fast-fast coincidence 방식을 이용한 양전자 수명측정장치의 개략도이다. γ 선은 Scintillator 과 photomultiplier tube(PMT)에 의해 검출되어 γ 선의 energy와 비례하는 전압의 pulse가 발생된다. 이 신호는 constant fraction differential discriminators(CFDD)로 보내지는데 CFDD에는 energy window가 설정되어있어 start side와 stop side를 구별하여 측정할 수 있다. 측정된 start 신호와 stop 신호가 delay line을 거쳐 시간 분석장치에 각각 도달하면 그 시간 차이를 time-to-amplitude converter(TAC)가 측정하게 된다. 만일 이 시간차이가 미리 설정해 놓은 시간 차이내에 들어오게되면 time single channel analyzer(SCA)가 TAC로 하여금 logic 출력을 발생하게 하여 이 시간의 정보가 analog-digital-converter(ADC)를 거쳐 multichannel analyzer에 기록되어 time spectrum을 형성하게 된다.

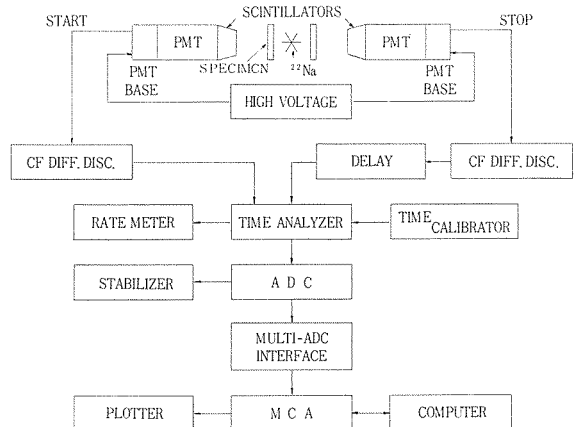


그림 3. 양전자 수명 측정장치 개략도

3-2 Doppler broadening energy spectrometer

Doppler broadening 측정은 양전자 수명측정에 비해 비교적 간단한 편이다. 핵심장치는 소멸 γ 선 에너지를 검출하는 Ge(Li) detector 혹은 고순도 Ge detector 이다.

그림 4는 이 장치의 개략도이다. 소멸 γ 선의 에너지가 검출기에 검출되면 흡수된 에너지에 비례하는 크기의 펄스가 발생되고 증폭기를 통하여 MCA에 기록되어 에너지 spectrum을 형성하게 된다.

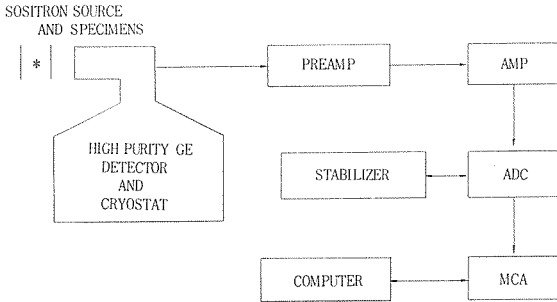


그림 4. Doppler broadening 측정장치 개략도

Ge(Li) 검출기와 고순도 Ge 검출기의 에너지 분해능(resolution)은 보통 1.33 MeV의 γ 선에서 1.7 keV 내외이고 122 keV의 γ 선에서 0.8 keV 내외이다. 검출기는 액체질소 온도에서 사용해야 하므로 냉각장치가 필요하다. 고순도 Ge 검출기의 경우에는 고전압이 걸려있을 때만 저온을 유지해 주면되므로 항상 액체 질소온도로 유지해야 되는 Ge(Li) 검출기보다는 관리가 용이하다. 실험장치의 자세한 작동원리는 참고문헌(5)와 (6)을 참조하기 바란다.

4. 실험 Data 분석방법

4-1 양전자 수명의 분석

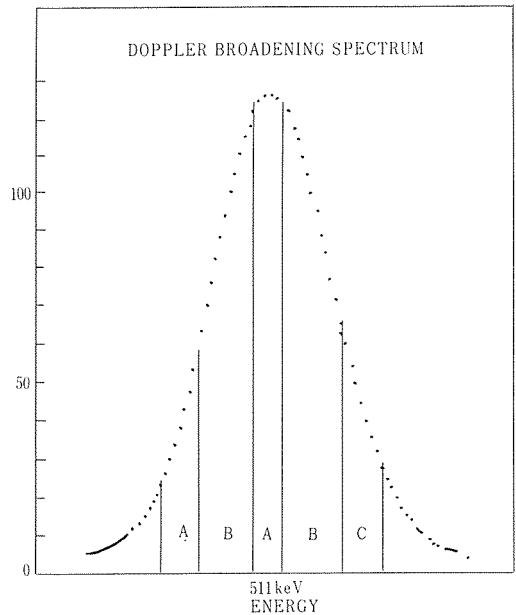
측정된 시간 spectrum은 원하는 정보외에 몇가지의 다른 정보가 혼합되어 있다. 측정장치의 시간 분해능은 일반적으로 300 ps 정도이고 이 분해능 곡선이 양전자 수명 분포에 convolution 되어 있다. 또한 양전자가 발생되어 시편내로 침투하기전 일부는 발생원이나 시편표면등에 포착되어 소멸하면서 그 정보가 측정된 시간 spectrum에 포함되게 된다. 이 성분을 source component라 한다. 분해능 곡선은 보통 Gaussian 곡선이나 그 변형곡선으로 나타낼 수 있는데 실험적으로는 ^{60}Co 과 같이 동시에 에너지가 다른 두개의 γ 선을 내는 동위원소를 이용하여 측정할 수 있다.

시간 spectrum에서 먼저 균일한 background를 제거하고 source component를 빼낸 뒤 분해능 곡선

을 deconvolute 하면 순수한 수명 spectrum이 남게 된다. 이 수명 spectrum을 trapping model⁽¹⁰⁾에 fitting하여 몇개의 양전자 수명성분과 각각의 포착율(trapping rate)등을 분리해 낼 수 있다. 이런 분석과정은 computer에 의해 가능하며 이에 필요한 program이 개발되어 있다.⁽¹³⁾

4-2 Doppler broadening line-shape 분석

일반적으로 Doppler broadening 에너지 spectrum은 line-shape parameter를 이용하여 분석한다. Doppler broadening 에너지 spectrum은 중심부에 위로 볼록한 이차곡선이 넓은 Gaussian 곡선위에 있는 형태인데, 중심부는 양전자와 conduction 전자의 소멸현상에 의한 것이며 Gaussian 부분은 양전자와 core 전자의 소멸현상에 의한 것이다. 그러므로 결함의 농도가 증가하면 결함에 포착되어 소멸하는 양전자 수가 증가하게 되어 conduction 전자와의 소멸현상이 증가하므로 중심부의 면적이 증가하게 되고 양쪽 가의 면적이 감소하게 된다.



* PEAK PARAMETER (P)

$$P = A / (A + B + C)$$

* WING PARAMETER (W)

$$W = C / (A + B + C)$$

* R PARAMETER (R)

$$R = \frac{P - P_f}{W - W_f} = \frac{P_t - P_t}{W_t - W_t}$$

그림 5. Doppler broadening energy spectrum과 lineshape parameter의 정리

그림 5에는 Doppler broadening spectrum 과 P, W, R parameter 가 정의되어 있다. 식중에 있는 Pf 와 Wf 는 결함이 없는 상태의 P 와 W parameter 값이며 Pt 와 Wt 는 양전자가 결함에 완전히 포착 되었을 때의 값이다. 또 ρ 는 defect density, λf 는 격자내에서 양전자의 소멸속도이며 μ 는 specific trapping rate 이다. 결함농도가 증가하면 P 는 증가 하고 W 는 감소하여 spectrum 이 좁아지게 되는데 R parameter 는 결함농도에 무관하며 양전자 수명과 같이 종류에 따라 특정값을 지니게 된다.

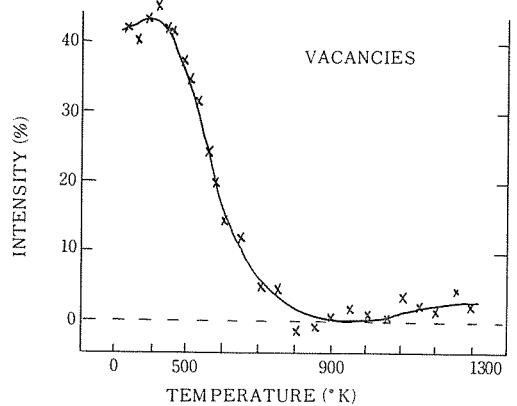
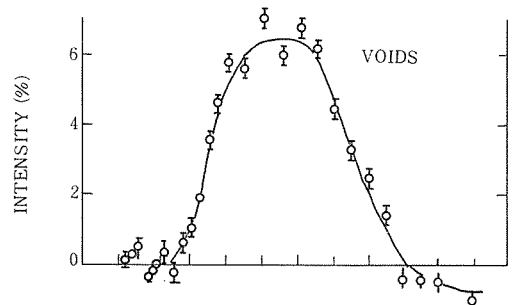
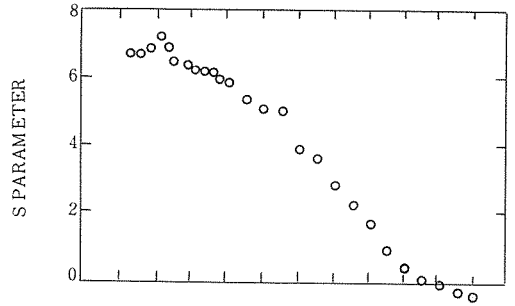
5. 미세결합연구에의 응용

양전자는 재료내에서 국부적으로 전자밀도가 낮은 부분에 대단히 민감하여 ppm정도의 vacancy, 작은 vacancy cluster, void 등의 종류와 크기 및 농도등을 측정하는데 가장 많이 응용되고 있다. Vacancy 형태의 결함외에도 dislocation, grain boundary, 계면 등 정상적인 격자보다 전자밀도가 낮은 부분에서도 양전자의 포착이 가능하므로 이런 결함의 연구에도 응용되고 있다. 양전자 소멸을 이용하면 10^{-7} atomic fraction 까지의 vacancy 를 측정할 수 있는데 vacancy 의 양이 10^{-4} 정도가 되면 모든 양전자가 vacancy 내에 포착되어 소멸하므로 그 이상의 농도는 측정이 불가능해진다. 몇가지 대표적인 응용예를 간단히 소개한다.

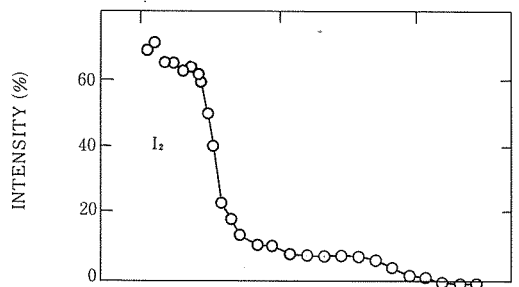
5-1 Vacancy 생성 및 이동

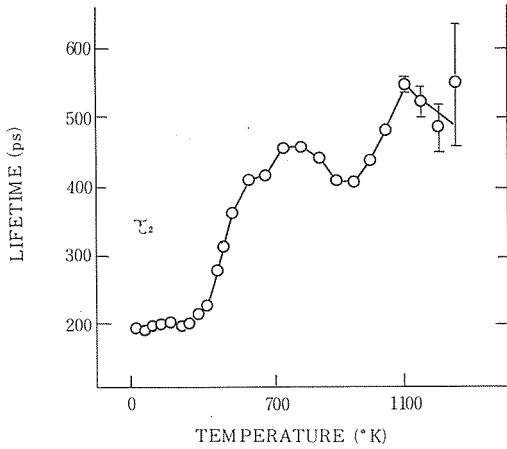
열역학적으로 평형을 이루고 있는 vacancy 의 농도를 온도의 함수로 측정하면 monovacancy 의 생성 에너지를 계산할 수 있다. 양전자 방법은 lifetime 분석을 통하여 monovacancy 와 divacancy 를 구별할 수 있고 열역학적인 평형상태에서 농도를 직접 측정할 수 있으며 또 감지능도 높기 때문에 다른 방법에 비해 우수하다. 용융점이 높은 V, Nb 및 Ta 과 같은 고온재료에서 monovacancy 의 생성열 측정 도 양전자를 이용하여 비로서 가능하여졌다.⁽¹⁴⁾

양전자는 vacancy 에 대한 감지능과 선택성이 좋기 때문에 방사선 조사손상을 연구하는데 유용하게 활용되고 있다. 예를들면 고에너지로 조사된 철의 annealing 과정중 제 3단계는 vacancy 의 이동에 기인하는지 interstitial 의 이동에 의한 것인지가 20여 년동안 논란의 대상이 되어왔으나, 양전자 Doppler broadening 과 lifetime 측정을 통하여 vacancy 의 이동에 의한 annealing 임이 확실하게 밝혀졌다.⁽¹⁵⁾ 또한 micro void 의 생성 및 소멸명도 vacancy 와 구별하여 측정이 가능하다. 양전자수명은 void 의 크기에 따라 변하는데 Mo 의 경우 완전 annealing 된 시편은 118 ± 2 ps, monovacancy 에서는 193 ± 5 ps, 그리고 10 A 이상의 큰 void 에서는 474 ± 10 ps 이 된다.⁽¹⁶⁾ 그림 6에는 Mo 에 고에너지의 전자를 조사시킨 후 annealing 과정을 양전자의 Doppler broadening 과 lifetime 으로 측정할 예이다.⁽¹⁷⁾



(a)





(b)

5-2 Dislocation

양전자의 활용은 vacancy의 측정에서 활발히 이루어졌지만 실제로 양전자를 이용하여 검출한 최초의 결함은 dislocation이었다.⁽²¹⁾ 그러나 dislocation은 vacancy보다 구조가 복잡하고 양전자 포착과정의 해석이 어려워 그 연구가 늦어졌다. 그러나 냉간 가공된 금속의 annealing 과정이나 fatigue 그리고 균열주위에서 나타나는 연구변형 부위의 크기와 결함구조의 연구등에 점차 응용을 시작하고 있다. 최근에는 철 단결정에서 양전자를 이용하여 edge와 screw dislocation의 밀도를 최초로 구별하여 측정함으로써 비파괴적인 결함측정의 좋은 가능성을 제시하였다.⁽¹⁸⁾ 그러나 아직도 양전자가 실제로 dislocation의 어느부분에 포착이 되고 그 결함에너지가 어느정도인지에 대한 정확한 지식이 없는 상태이므로 많은 연구가 필요한 분야이다.

5-3 기타 분야

앞에 기술한 두가지의 기본적인 격자결함의 연구와 그와 관련된 응용이외에도 양전자의 활용가능분야는 많다. 양전자 수명측정과 Doppler broadening 측정으로 비정질금속의 결정화 온도측정⁽¹⁹⁾, 각 상관측정을 통한 합금의 order-disorder 과정과 변태온도 연구,⁽²⁰⁾ G. P. Zone 생성과 석출 현상의 연구⁽²¹⁾등에 이용되고 있다. 또한 금속의 상변태나 ferro-para dielectric 변태등의 연구에도 이용되고 있다. 그림 7은 철의 상변태 과정을 양전자 Doppler broadening을 이용하여 측정된 결과이다.⁽²²⁾

5-4 앞으로의 방향

양전자 소멸 측정방법의 특징은 여러종류의 결함의 영향이 복합적으로 나타나는 조건에서도 각 결함종류의 영향을 구별하여 측정함으로써 복합적인 현상의 기구(mechanism)나 동력학적인 정보를 알 수 있다는 점이다. 그러나 현재까지의 측정과 분석기술

로는 많아야 3가지 성분까지만을 분리해 낼 수 있다.

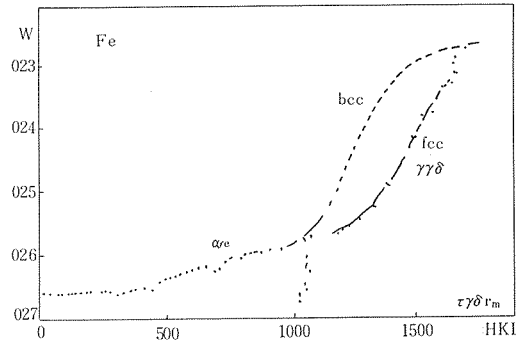


그림 6. 고 에너지 전자로 조사시킨 Mo의 isochronal annealing 과정(참고문헌 16 및 17)

그러므로 측정과 분석기술을 향상시키는 연구가 필요하다.

현재 사용하는 측정장치는 보통 방사성동위원소로부터 직접 방출되는 양전자를 사용하기 때문에 그 에너지 분포가 대단히 넓어 침투깊이를 용이하게 조절할 수 없다. 그러나 최근 낮고 단일한 에너지의 양전자 선원을 개발하여 1eV부터 10keV 정도까지 조절할 수 있으므로 표면부위부터 침투깊이를 용이하게 조절하면서 미세결함의 구조를 측정할 수 있게 되었다. 이런 저속 양전자(slow positron)는 앞으로 금속-반도체 또는 반도체-반도체의 경계면등의 결함 연구에 활용될 전망이다.

또한 저에너지 양전자 회절(low energy positron diffraction), 양전자 channeling, 양전자 현미경 및 양전자 γ 선 현미경등 대단히 흥미로운 과제들에 대한 연구가 진행중이다.

6. 맺는말

지금까지 국내에서는 양전자 소멸에 관한 해설이나 논문이 발표된 예가 거의 없는 것 같아 한정된 지면에서나마 그 소개를 하여 이해에 도움이 되고자 하였다. 미비한점 등은 참고문헌을 통하여 깊은 이해를 하기 바라며 앞으로 이 분야가 새로운 비파괴평가 기술이 되어 재료내의 미세결함 연구에 많이 활용되는 계기가 되었으면 한다.

文獻

1. A. T. Stewart, "The Importance of Milestones", Proc, 5th Int. Conf. Positron Annihilation(Japan. 1979). 8A-1-1
2. I. Ya G. Dekhtyar. D. A. Levine. and V. S. Mikhalekov, "Electron-Positron annihilation in

- plastically deformed metals”, *Sov. Phys. Doklady*. Vol. 9. 492-494(1964)
3. S. Berko and J. C. Erskine. “Angular Distribution of Annihilation Radiation from Plastically Deformed Aluminum”, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 19. 307-309(1976).
 4. T. K. Mackenzie. T. L. Khoo. A. B. McDonald, and B. T. A. McKee. “Temperature Dependence of Positron Mean Lives in Metals”, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 19. 946-948(1967)
 5. G. F. Knoll. “Radiation Detection and Measurement”, John Wiley & Sons. NY. 1979
 6. T. K. Mackenzie. “Experimental Methods of Annihilation Time and Energy Spectrometry”, *Positron Solid-State Physics. L X X X III Corso*.
 7. W. Brandt and R. Paulin, “Positron implantation-profile effects in solids”, *Phys. Rev. B* Vol. 15. 2511-2518(1977)
 8. K. G. Lynn, h“Slow-Positron Studies on Metals”, *Scripta Met.* Vol. 14. pp. 9-14(1980)
 9. K. G. Lynn and P. J. Schultz, “Vacancy Formation Energy Measurements in Single Crystal Aluminum Using a Variable-Energy Positron Beam”, *Appl. Phys. A*, Vol. 37. pp. 31-36(1985)
 10. R. N. West. “Positron Studies of Condensed Matter”, *Advances in Physics*. Vol. 22, 263-383(1973)
 11. R. M. Nieminen and M. J. Manninen. “Positrons in Imperfect Solids:Theory”, , *Positrons in Solids*. ed. by P. Hautojarvi, Springer-Verlag. 145-195(1979)
 12. M. O. Bedwell and T. J. Paulus, “A New high Rate Positron Lifetime Measuremet System”, *Proc. 5th Int. Conf, Positron Annihilation, Japan*(1979)
 13. P. Kirkegaard and M. Eldrup. *computer phys. Comm.* Vol. 3. 240-255(1972). 7, 401-409(1974)
 14. K. Maier. M. Peo. B. Saile, H. E. Schaefer. A. Seeger, *Phil. Mag. A* 40. 701(1979)
 15. R. M. Nieminen et al., “Defects in Metals and Alloys-Present Status Future Prospects(A Round-Table Discussion)”, *Positron Annihilation*. ed. by P. C. Jain. R. M. Singru & K. P. Gopinathan, World Sci. Publ. co. PP. 437-449(1985)
 16. L. Granatelli and K. G. Lynn. “Defect Characterization with Positron Annihilation”, *Nondestructive Evaluation:Micro Structural characterization and Reliability Strategies*. ed. by Otto Buck and Stanley M. Wolf., *Met. Soc. AIME*, pp. 169-198(1981)
 17. M. Eldrup. O. E. Mogensen, and J. H. Evans, “A positron annihilation study of the annealing of electron irradiated molybdenum”, *J. Phys. F:Met-al Phys.* Vol. 6, 499-521(1976)
 18. Young-Ki Park, James T. Waber, and C. L. Snead, Jr., “Determination of Edge and Screw Dislocation Density in Single Crystals of High-Purity Iron”. *Positron Anniyhilation*, Ed. by P. C. Jain. R. M. Singru & K. P. Gopinathan, world Sci. Publ. Co. pp. 580-588(1985)
 19. S. Tanigawa, K. Hinode. R. Nagai, M. Doyama. and N. Shiotani,. *Phys. Stat. sol.* Vol. 51a, 249(1979).
 20. K. Kuribayashi, S. Tanigawa, s. Nanao, M. Doyama, *Scripta Met.* Vol. 9. 423(1975)
 21. R. Nagai, S. Tanigawa, M. Doyama, *Scripta Met.* Vol. 10, 529(1976)
 22. H. E. Schaefer, K. Maier, M. Weller, D. Herlach, A. Seeger. and J. Diehl, *scripta Met.* Vol. 11, 803(1977)

