

복합 재료 계면의 잔류 응력 측정을 위한 비파괴 평가 기술

Non-Destructive Measurement of Residual Stresses at the Interfaces of Composites

정용무

한국원자력연구소 비파괴평가기술개발분야

Yong Moo Cheong

NDE R&D Dept. Korea Atomic Energy Research Institute

요약

X-선 회절법에 의하여 Graphite 화이버-알루미늄 매트릭스 복합 재료 계면에서의 잔류 응력을 정량적으로 측정하였다. X-선 회절법으로 측정된 잔류 응력 값과 수치 해석 모델 계산 결과와 비교하였다. 모델 계산 결과보다 낮은 측정 결과를 얻었으며 이는 매트릭스의 응력 이완 또는 화이버의 basal plane sliding 현상에 기인한 것으로 추정된다.

1. 서론

복합 재료의 잔류 응력은 재료의 성능을 평가하는 데 중요한 인자의 하나이다. 특히 매트릭스와 화이버간의 계면에서 두 물질의 열팽창 계수의 차이에 의해서 잔류 응력이 발생하는데 이러한 잔류 응력은 이론적인 해석에 의해서 예측할 수 있다. 그러나 계면에서의 이방성에 의한 잔류 응력을 실제로 측정하는 것은 어려우며 더욱이 잔류 응력의 특성인 물체가 평행에 있어야 한다는 조건 즉 zero resultant force 조건을 고려할 경우 실제로는 상당히 복잡한 응력 패턴을 나타내는 것이 일반적인 현상이다[1].

잔류 응력은 재료 내에서 기계적, 열적, 화학적인 과정에 의해 발생하는 데 이의 결과는 재료의 형상이나 부피가 비균일한 영구 변화로 나타난다. 이론적 관점에서 가공 온도에서 냉각할 경우 복합 재료 내의 두 물질의 열팽창 계수의 차이에 의한 열 응력이 복합 재료 내에 중요한 잔류 응력의 주된 원인이 된다. 예컨대 알루미늄 매트릭스에 일방향성 graphite 화이버로 이루어진 복합 재료를 고려할 때 열팽창계수의 차이에 의한 변위는 $24 \times 10^{-6} \cdot C^{-1}$ 이며 복합 재료가 약 $600 \cdot C$ 에서 용고 후 냉각하는 과정에서 심각한 잔류 응력이 탄성 화이버와 탄

성-소성 매트릭스의 계면에 생성되며 이 응력이 매트릭스의 탄성 변형 한계를 초과할 경우 소성 변형까지도 예상할 수 있다.

그 동안 이러한 잔류 응력을 실험적으로 비파괴적인 방법에 의해 측정하려는 시도가 다각적으로 수행되어 왔으나 불행하게도 측정 인자와 잔류 응력 간의 관계를 완벽하게 기술하여 실제 응력 상태를 정확히 설명할 수 있는 비파괴적인 실험 방법이 현재까지는 개발되어 있지 못하다. 가장 신뢰성이 높은 잔류응력 측정 방법인 X-선 회절에 의한 잔류 응력 측정법도 격자내의 상대적인 변위를 측정하여 응력으로 환산하는 방법이며 다른 방법, 예컨대 초음파, 전자기 바파괴 측정 방법 등도 잔류 응력에 의해 변화되는 물리적 또는 기계적인 성질의 변화를 상대적으로 측정하여 잔류 응력 값으로 환산하는 방식이 대부분으로 측정 인자의 응력 의존성을 원리적으로 설명하기 보다는 경험적 또는 실험적인 관계식을 도출하여 이에 따른 보정을 통하여 측정하는 방식이다.

최근에 복합 재료가 널리 사용됨에 따라 이러한 잔류 응력을 정량적으로 측정해야 할 필요성이 증대되고 있으며 이에 따른 비파괴적인 측정법의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 복합 재료 계면에서의 잔류 응력을 X-선 회절법으로 측정하였으며 이를 기술하는 유한 요소법 모델 계산과 비교하였다.

2. 복합 재료 계면에서의 잔류 응력

복합 재료의 화이버가 매트릭스와 견고하게 부착된 상태에서 열팽창 계수의 차이에 의해서 온도 변화가 발생할 경우, 매트릭스는 물론 화이버에도 변위가 발생한다. 금속 매트릭스 복합 재료 내에 예상되는 가상 응력 분포를 Fig. 1 에 보였다. 이러한 복합 재료 계면에서의 잔류 응력을 X-선 회절법으로 측정할 경우 X-선의 침투 깊이가 가장 문제가 되는 데 Fig. 2 에서 보인 바와 같이 알루미늄-Graphite 복합 재료에서 Graphite 화이버의 직경이 7 - 10 μm 일 경우 X-선의 침투 깊이 ($\text{CuK}\alpha$ X-선인 경우 알루미늄에 대해 약 30 μm 정도 침투)와 비교해 보면 X-선 회절에 의한 잔류 응력 측정은 화이버 몇 개 정도 깊이까지 알루미늄 매트릭스의 평균적인 잔류 응력 값으로 볼 수 있다.

3. 계면의 잔류 응력을 예측하는 유한 요소법 모델

복합 재료의 가공 또는 열처리 공정에서 발생하는 매트릭스와 화이버 계면에서의 미시적인 응력 상태를 기술하는 유한 요소법 모델은 이미 개발되어 있다[2]. 이 유한 요소법 코드는 기본적으로 일방향성 복합 재료의 원통형 화이버를 가상하여 초기 응력이 없는 상태에서 냉각하고 이를 재 가열할 경우에 매트릭스와 화이버의 탄성-소성 변형을 계산하는 것이다. 이 모델에서 화이버는 모든 온도 변화 과정을 통하여 완벽하게 탄성으로 축방향과 원주 방향으로 이방성을 가지며, 매

트릭스는 등방성으로 응력 상태가 항복 응력을 초과할 경우에는 소성 가공이 일어나는 것을 가정하였다. 여기서 항복 응력은 온도와 소성 가공 정도에 따라 변화하도록 하였다.

다양한 열처리 조건에서의 체적 평균 축 응력, hoop 응력을 온도의 함수로 계산하였으며 2024 알루미늄 매트릭스와 Graphite 화이버에서의 전형적인 사례를 Fig. 3 - 4 에 나타내었다. 기본적으로 500° C 에서 모든 응력이 제거되었다고 가정하고 -150° C 까지 급냉한 뒤 이를 상온으로 재가열하는 과정을 모델링하였다. 이렇게 하는 이유는 고온에서 상온으로 급냉하는 것보다 액체 질소를 사용하여 -150° C 까지 냉각한 뒤 상온으로 가열하는 것이 계면에서의 잔류 응력을 상당량 감소시킬 수 있기 때문이다. Fig. 3 에서 보면 같이 알루미늄 매트릭스에서 축 방향 잔류 응력은 -150° C 까지 급냉하였을 경우 약 70 ksi (482 MPa) 이며 이를 상온으로 재가열하면 약 42 ksi (290 MPa) 정도로 감소한다. 2024 알루미늄의 인장강도가 T6 열처리 시 67 ksi (462 MPa) 이며 항복강도가 53 ksi (365 MPa) 이고, T4 열처리 시 인장 강도가 64 ksi (441 MPa), 항복 강도가 42 ksi (290 MPa) 인 점에 비추어 보아 -150° C 에서의 잔류 응력은 거의 인장 강도 수준에 도달하였다가 상온으로 재가열시에 항복 강도 이하로 낮아짐을 예측할 수 있다. 또한 500° C 에서 상온으로 급냉한 경우에는 약 60 ksi (413 MPa) 가 예측되어 항복강도보다 높은 상태의 잔류응력이 존재함을 예측할 수 있다. Fig. 4 에 Hoop 응력은 비교적 크지 않으므로 여기서는 더 이상 고려하지 않았다.

4. X-선 회절 실험 결과 및 고찰

표 1 과 같은 특성의 알루미늄-Graphite 복합 재료 시편을 사용하여 잔류 응력을 x-선 회절법으로 측정하였다.

표 1. 알루미늄-graphite 복합 재료 시편의 특성 및 열처리

매트릭스 : 6061-T6 알루미늄
화이버 : Pitch P100 Graphite
표면 foil : 6061 알루미늄

열처리 :

- 1) 2.2 psi, 529 ° C 에서 1 시간 Solution Treatment
- 2) 상온 물 속으로 수직 급냉
- 3) 2.2 psi, 160 ° C 에서 18 시간 Aging
- 4) 액체 질소 속으로 급냉

X-선 회절에 의한 잔류 응력 측정은 기본적으로 시편을 X-선 입사 방향에 대해 각도를 변화해 가면서 격자 간격의 변화를 측정하여 계산한다. 금속 결정의 특정한 격자면에 대해 x-선 회절이 나타나는 것은 잘 알려진 Bragg's law,

$$\lambda = 2 d \sin \theta \quad (\lambda = \text{파장}, d = \text{격자면간 거리}, \theta = \text{회절각도})$$

에 따르며 Fig. 5 에 보인 바와 같이 x-선 입사 방향과 시편의 수직 방향과의 각도, ψ 를 변화시키면서 특정한 면 hki 에서의 면간 거리, d_{hki} 을 측정하면 d_{hki} 과 $\sin^2\psi$ 간에 선형적인 관계가 나타나고 여기서 기울기를 최소 자승법으로 계산하면 기울기는

$$m = \frac{1+\nu}{E} d_{\psi=0} \sigma$$

으로 나타난다. 여기서 재료상수인 E , ν , $d_{\psi=0}$ 은 이미 알고 있으므로 응력 σ 를 계산할 수 있다.

Philips 사 제품 자동 x-선 회절장치를 사용하였으며 Cu target를 40 kV, 40 mA에서 ψ -회절법을 적용하였다. 시편 위치의 정확한 조정을 위하여 알루미늄 분말로 장치를 보정하였으며 조사 빔의 시편에 대한 회전에 따른 변위 오차를 측정하였다. 회절각도는 0.05° 간격으로 측정하여 컴퓨터 프로그램에 의해서 측정하였다. 측정된 잔류응력 값과 측정 오차와 관련된 상관 계수는 표 2 와 같다.[3]

표 2. X-선 회절에 의한 복합재료 계면에서의 잔류응력

시편 상태	Biaxial Stress [MPa]	Correlation Coefficient
As received, and electropolished	100.6 ± 21.4	0.96
500°C, 1 hr and electropolished	66.6 ± 3.7	0.99
400°C, 1hr and electropolished	55.3 ± 8.6	0.97
As received and mechanical polished	29.4 ± 8.8	0.89
500°C, 1 hr and mechanical polished	103.3 ± 25.7	0.94
400°C, 1hr and mechanical polished	48.6 ± 20.2	0.86
As received and mechanical polished	-57.6 ± 0.4	0.99
500°C, 1 hr and mechanical polished	-49.1 ± 0.5	0.99
400°C, 1hr and mechanical polished	50.1 ± 6.6	0.98
As received and mechanical polished	14.3 ± 6.1	0.85
500°C, 1 hr and mechanical polished	44.7 ± 7.8	0.97
400°C, 1hr and mechanical polished	15.8 ± 3.2	0.96

매트릭스와 화이버간의 열팽창계수의 차이에 의한 잔류응력은 다음과 같이 간단한 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_{m,r} = E_m \Delta\alpha\Delta T \frac{E_f V_f}{E_m V_m + E_f V_f}$$

$$\sigma_{f,r} = E_f \Delta\alpha\Delta T \frac{E_m V_m}{E_m V_m + E_f V_f}$$

여기서 아랫첨자 m, f, r 은 각각 매트릭스, 화이버, 잔류응력을 의미하며 E , $\Delta\alpha$, ΔT , V 는 각각 Young's modulus, 열팽창 계수 차이, 온도 차이, 체적 비율을 뜻한다. 시편의 재료 상수, P100 Graphite 화이버의 열팽창 계수 $\alpha_f = -1.6 \times 10^{-6} \cdot C^{-1}$ [4] 과 6061 알루미늄 매트릭스의 열팽창 계수 $\alpha_m = 23 \times 10^{-6} \cdot C^{-1}$ [5] 를 고려할 때 냉각 시에는 매트릭스에 인장 응력이, 가열 시에는 압축 응력이 발생하며 열팽창 계수의 차이는 $\Delta\alpha = 24.6 \times 10^{-6} \cdot C^{-1}$ 이다. $E_f = 690 \text{ MPa}$, $E_m = 69 \text{ GPa}$, $V_f = 0.4$, $V_m = 0.6$ 을 고려하여 완전 탄성 조건 가정 하에 냉각 시 잔류 응력을 유한 요소법으로 계산한 결과는 앞서 보인 바와 같이 대략 300 - 400 MPa 의 인장 잔류 응력이 매트릭스 예상된다. 그러나 이러한 높은 응력 수준은 x-선 회절 실험에 의한 잔류 응력 계산으로는 관측되지 않았다. 또한 기계 연마한 경우에는 압축 응력 상태이었으나 이 시편을 열처리한 결과 인장 응력 상태로 바뀌었다. 표면을 기계 연마한 경우 압축 응력이 발생한다는 것은 이미 잘 알려진 사실이며 [1] 따라서 시편의 표면 거칠기가 잔류응력 측정에는 영향을 끼치지 않았음을 나타내고 있다.

이 복합 재료는 500 °C 에서는 모든 응력이 이완되어 잔류 응력이 존재하지 않는다고 볼 수 있으며 이를 상온으로 냉각하였을 경우 앞서 유한 요소법 계산에서도 볼 수 있듯이 250 - 300 MPa 의 인장 잔류 응력이 매트릭스에 발생하는 것을 예상할 수 있다. 그러나 X-선 회절을 통하여 실험적으로 구한 잔류 응력 값은 이에 미치지 못함을 알 수 있다. 이러한 차이가 나타나는 이유를 명확히 규명하는 것은 여기서는 어려우나 다음과 같은 원인 중에 하나일 것으로 판단된다. 본질적으로 잔류 응력은 시편 전체에 대해 평형을 유지해야 하는 데 화이버와 매트릭스의 결합 상태가 완벽하다고 가정하면, 측정된 낮은 잔류 응력 값은 복합 재료의 응력 이완이 발생하였다고 볼 수 있으며 이는 금속 매트릭스의 항복이나 소성 가공 또는 화이버의 Basal Plane 으로의 Sliding 등이 가능하다. 이것은 다른 연구 결과 [6] 에서도 관측되고 있는데 6061 알루미늄의 항복응력이 열처리조건에 따라 150 -200 MPa 범위인 점을 고려하면 상당히 낮은 잔류 응력 값이 측정되었다고 볼 수 있다. 한편 매트릭스와 화이버 계면의 박리 현상도 생

각해 볼 수 있는 데 다른 연구 [7] 에서 이 복합 재료를 SEM 하에서 온도 사이클을 할 경우 화이버와 매트릭스가 분리되어 따로 따로 팽창과 수축 과정을 하고 있음을 SEM 사진으로 확인할 수 있었다.

5. 결론

- 1) 알루미늄-Graphite 복합 재료의 잔류 응력을 X-선 회절 방법으로 측정하였다.
- 2) 알루미늄 매트릭스와 Graphite 화이버 간의 열팽창 계수의 차이에 의한 잔류 응력은 알루미늄 매트릭스의 항복 응력 근처 (250 - 300 MPa) 일 것으로 예측하였으나 실제 실험 결과는 이보다 낮은 값 (50 - 100 MPa)이 측정되었다.
- 3) 이에 대한 원인을 여기서는 정확히 설명할 수는 없으나 알루미늄 매트릭스의 응력 이완, 소성 가공, 화이버의 Basal Plane Sliding, 계면의 박리 등으로 추정된다.

참고문헌

1. M. E. Hilley, J.A. Larson, C.F. Jaczak, and R.E. Ricklefs eds., "Residual Stress Measurements by X-ray Diffraction", SAE Information Report J784(a), (1971)
2. M.H. Rice and G. A. Gurtman, "Residual Stresses and Thermo-Mechanical Behavior of Metal-Matrix Composites", Naval Research Lab. (1984)
3. Y. M. Cheong, PhD Dissertation, The University of Texas at Austin (1987)
4. E. G. Wolff, B. K. Min, and M. H. Kural, "Thermal Cycling of Unidirectional Graphite-Magnesium Composite", J. Materials Science (20) pp. 1141 (1985)
5. Metals Handbook, 8th ed. Vol. 1
6. Swe-Den Tsai, PhD Dissertation, The University of Texas at Austin (1980)
7. Y. M. Cheong and H. L. Marcus, " In-Situ Thermal Cycling in SEM of a Graphite-Aluminum Composites", Scrip. Met., Vol. 21 pp. 1529-1534 (1987)

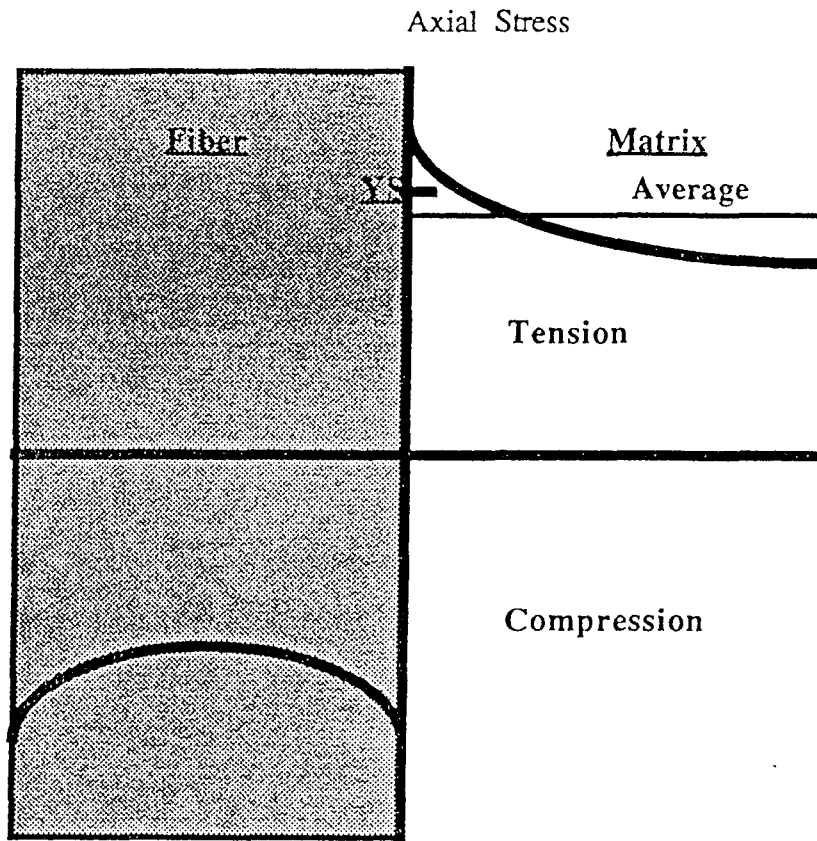


Fig. 1 A model of residual stress distribution in a Al-Gr metal matrix composite. Both fiber and matrix respond to the difference of thermal expansion during cooling.

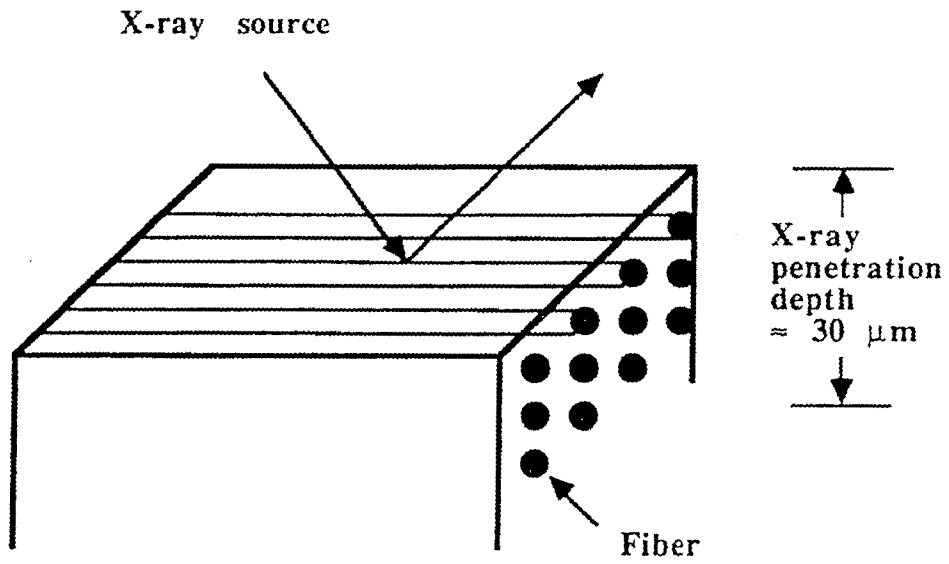


Fig. 2 X-ray penetration depth of a Al-Gr metal matrix composite with *CuK α* radiation.

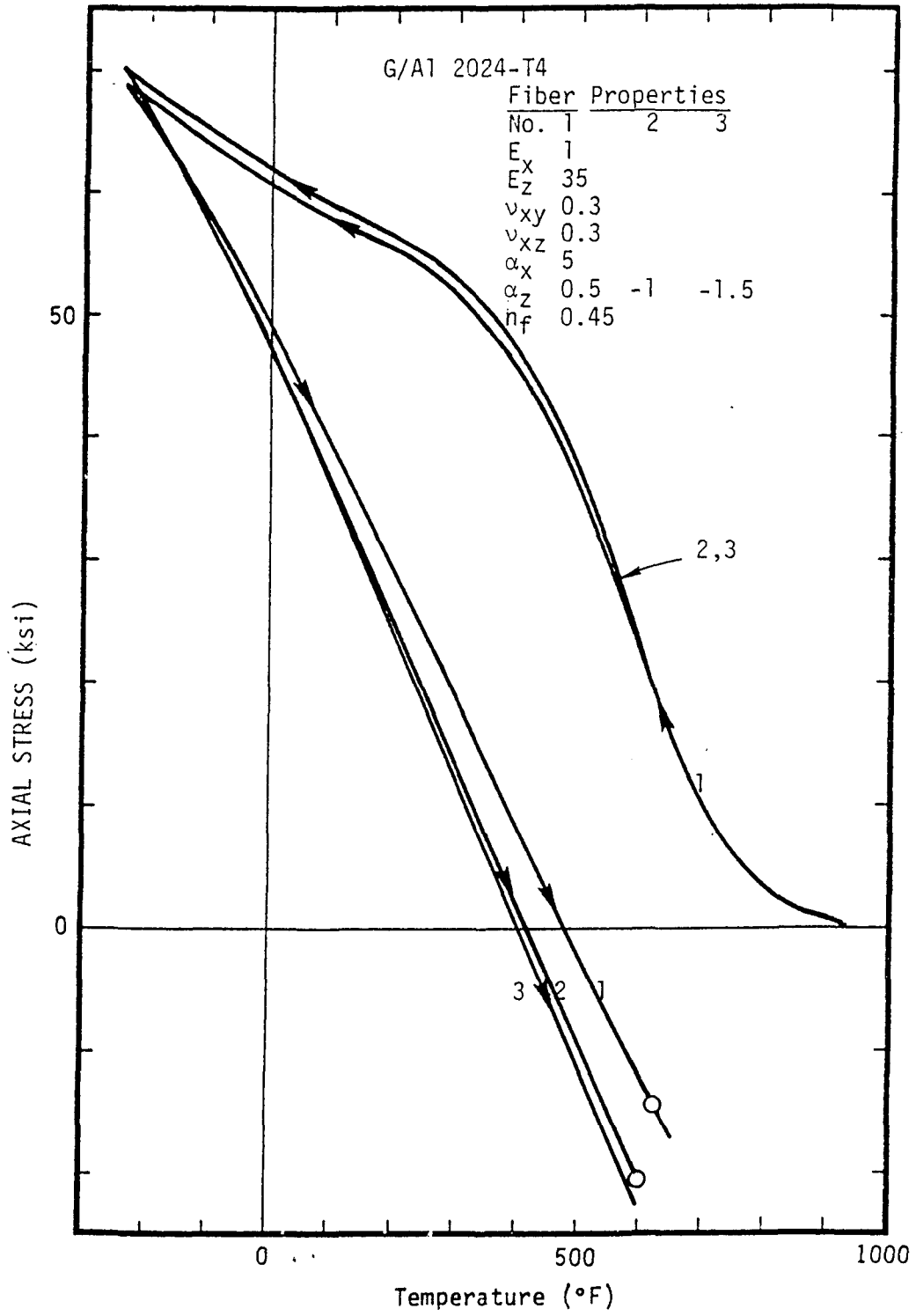


Fig. 3 Volume-averaged axial stress versus temperature for the matrix of graphite/aluminum composite (rapid cooling).

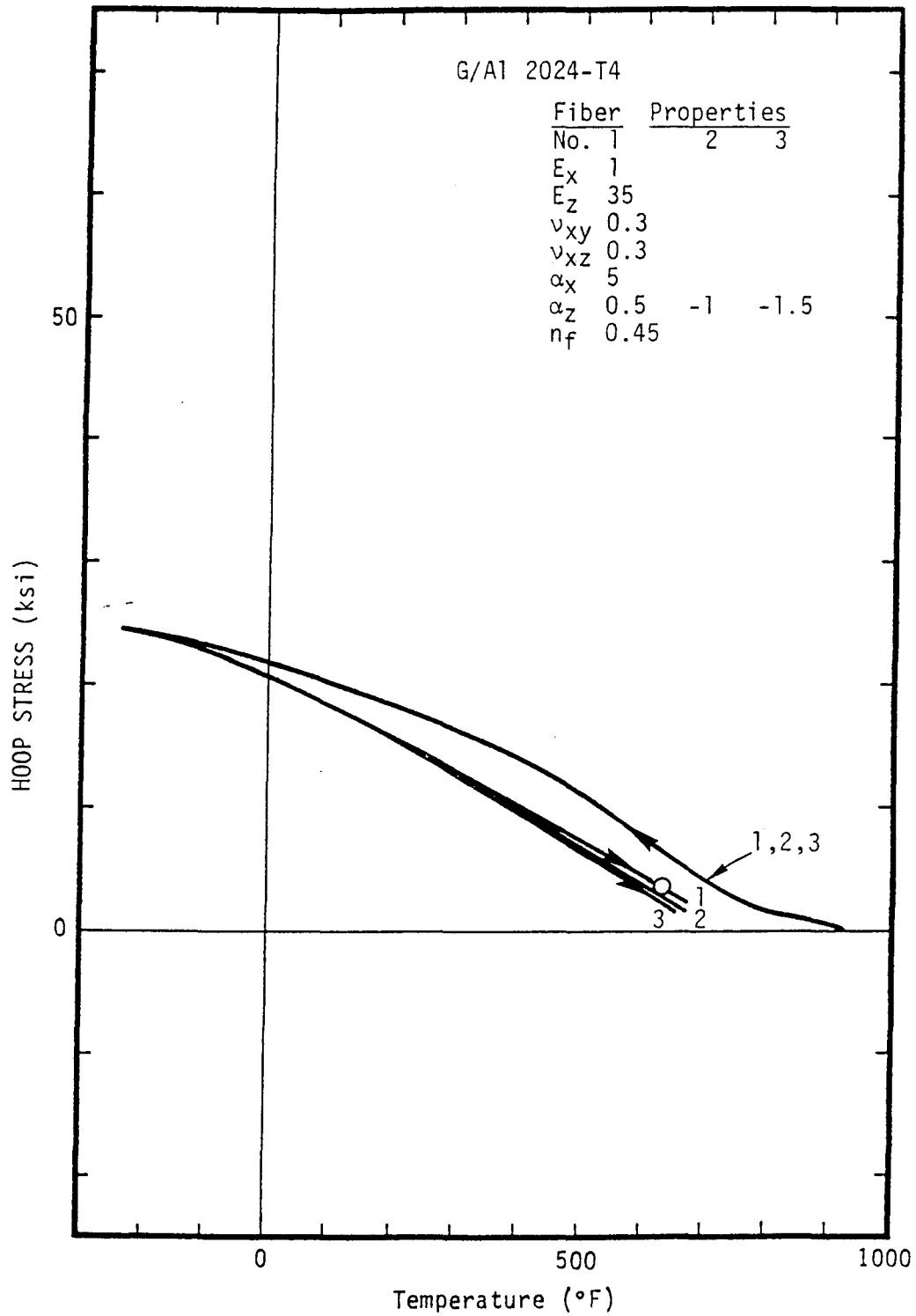


Fig. 4 Volume-averaged hoop stress versus temperature for the matrix of graphite/aluminum composite (rapid cooling).

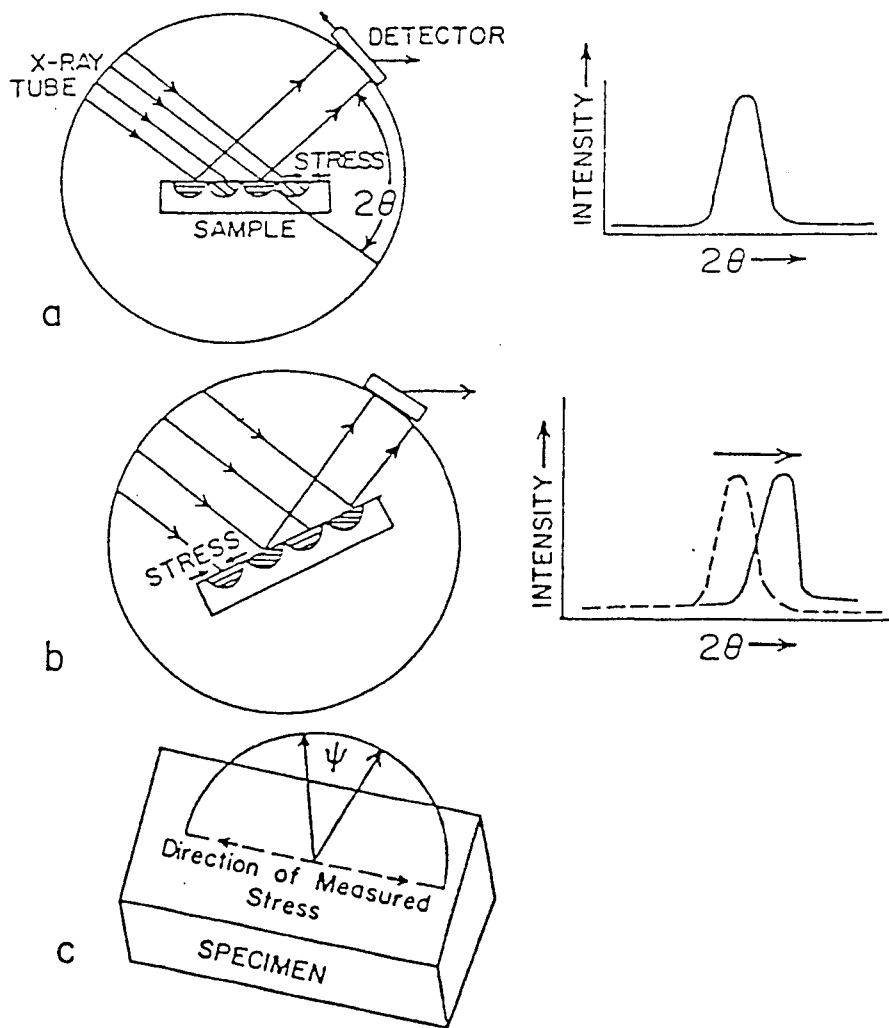


Fig. 5 Principle of XRD residual stress measurement.