

계면파괴역학의 접착력 측정에의 응용

이 호 영* · 김 성 룡†

Application of Interface Fracture Mechanics to Adhesion Measurement

Ho-Young Lee* and Sung-Ryong Kim†

요 약

본 원고에서는 계면파괴역학에 관하여 살펴보았고, 이를 실제 접착력의 측정에 응용할 수 있도록 여러 가지 모양의 시편에 대한 소개를 하였다.

ABSTRACT

Interfacial fracture mechanics is introduced and its application to adhesion measurement is reviewed. Various specimens are also introduced for the practical application.

KEYWORDS :

1. 서 론

접착력을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있고,^[1] 이들은 크게 두 가지로 분류될 수 있다. 접착된 상태에서 '파괴에 저항할 수 있는 단위면적당 최대 힘(fracture resistance force per unit area)'을 측정하는 방법과 '파괴에 필요한 에너지(energy required for fracture) 또는 파괴에 소모되는 에너지(consumed energy for fracture)'를 측정하는 방법이다.^[2] 전자는 측정이 쉽다는 장점이 있지만, 시편에 따라 측정값이

많은 차이를 보이기 때문에 각기 다른 시편을 사용하여 측정할 경우 서로간의 비교가 불가능하다는 단점이 있다. 후자의 경우, 물리적 의미는 분명하지만, 측정된 값에서 다른 인자들(잔류응력, 마찰력, 소성변형, 온도의 영향, 변형속도의 영향 등)의 기여를 제외한 파괴에 소모된 일(work)만을 정확히 분리해내기가 사실상 어렵다는 단점이 있다.^[2] 이상적으로는 기본 접착력(basic adhesion) 또는 열역학적 접착력(thermodynamic work of adhesion)^[3] 값을 정확히 측정해야 하지만 이들을 정확히 측정하는 것은 기하인자

· 2003년 12월 7일 접수(received), 2004년 1월 15일 채택(accepted)

· 서울대학교 기계항공공학부, 서울 관악구 신림9동 산 56-1번지(School of Mechanical and Aerospace Engineering, San 56-1, Shillim-Dong, Kwanak-Gu, Seoul, 151-741 Korea)

†충주대학교 고분자공학과, 충북 충주시 이류면 검단리 123번지(Department of Polymer Science and Engineering, 123 Geomdan-ri, Iryu-myon, Chungju, 380-702 Korea)

†주저자(Corresponding author):

(geometrical factor), 온도인자(temperature factor), 응력인자(loading factor), 손실인자(energy loss factor) 등의 영향을 제대로 파악하기 어렵고 번거로워 매우 어려운 일이다. 이의 보완책으로 두 가지 이상의 접착력 측정방법을 이용한 후 서로 보완하여 좀더 정확한 값을 얻고자 하기도 한다.

몇몇 연구자들은 계면파괴역학(Interface Fracture Mechanics)을 접착력 측정에 이용하고자 하였다. 계면파괴역학적으로 잘 정의된 시편을 이용하여 접착력을 측정하면, 균열의 진전에 필요한 에너지 값을 얻을 수 있고, 얻어진 값은 FEM 등을 통하여 실제상황에 자유롭게 적용할 수 있다. 본 원고에서는 이러한 계면파괴역학을 소개하고, 이를 실제 접착력 측정에 적용하기 위한 시편모양에 관하여 소개한다.

2. 계면균열의 특징

이종재료사이에 존재하는 계면(interface)에 있는 균열은 균질균열(cracks in a homogeneous media)과는 다른 거동을 보인다. 계면 균열을 포함하고 있는 각각의 재료가 선형탄성적인 거동을 보일 때, 계면 균열전단의 주위의 응력(σ_{xy} , σ_{yy})이 진동한다는 것은 고유함수전개(eigen function expansion) 방법을 통하여 Williams가 처음으로 정성적으로 보였고,⁽⁴⁾ 그 이후로 많은 연구자들이 계면 균열에 관하여 연구하였다.⁽⁵⁻⁷⁾ 특히 Rice는 해석복소함수 방법을 사용하여 보다 정확하고 정량적인 해를 구하였다.⁽⁸⁾

Dundurs는 Figure 1과 같이 두 재료가 서로 접합되어 있는 경우에 재료의 응력장을 나타내기 위해서 각 재료의 탄성계수(Young's modulus)인 E_1 , E_2 와 프와송 비(Poisson's ratio)인 ν_1 , ν_2 등 네개의 재료상수가 필요한 것이 아니라 단지 두 개의 parameter α , β 만으로 표현이 가능함을 보였으며, Dundurs에 의해서 정의된 Dundurs' Parameter α , β 는 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\alpha = \frac{\mu_1(\chi_2 + 1) - \mu_2(\chi_1 + 1)}{\mu_1(\chi_2 + 1) + \mu_2(\chi_1 + 1)} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{\mu_1(\chi_2 - 1) - \mu_2(\chi_1 - 1)}{\mu_1(\chi_2 + 1) + \mu_2(\chi_1 + 1)} \quad (2)$$

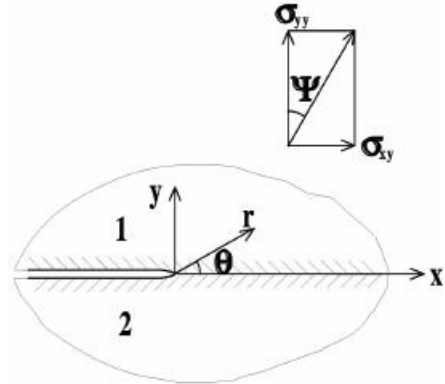


Figure 1. Region near crack tip along bimaterial interface.

여기에서, μ 는 전단탄성계수(shear modulus)이고, κ 는 평면변형률상태일 경우 $3-4\nu$, 평면응력상태일 경우 $(3-\nu)/(1+\nu)$ 인 상수이다. 보통 평면변형률상태를 많이 취급하는데, 평면변형률 상태에서의 α 와 β 는 각각

$$\alpha = \frac{(1-\nu_2)/\mu_2 - (1-\nu_1)/\mu_1}{(1-\nu_2)/\mu_2 + (1-\nu_1)/\mu_1} = \frac{\mu_1(1-\nu_2) - \mu_2(1-\nu_1)}{\mu_1(1-\nu_2) + \mu_2(1-\nu_1)} = \frac{\overline{E}_1 - \overline{E}_2}{\overline{E}_1 + \overline{E}_2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{(1-2\nu_2)/\mu_2 - (1-2\nu_1)/\mu_1}{(1-\nu_2)/\mu_2 + (1-\nu_1)/\mu_1} = \frac{1}{2} \frac{\mu_1(1-2\nu_2) - \mu_2(1-2\nu_1)}{\mu_1(1-\nu_2) + \mu_2(1-\nu_1)} \quad (4)$$

으로 표현할 수 있고, 위에서 \overline{E} 는 평면변형률 상태에서의 탄성계수(Young's modulus)로서 $\overline{E} = E/(1-\nu^2) = 2\mu/(1-\nu)$ 로 표현된다(단, E 는 탄성계수).

Rice의 표현방식을 따른 2차원 계면 균열주위의 응력분포 및 변위에 관한 점근해(asymptotic solution)는 다음과 같이 쓸 수 있다⁽⁸⁾.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \{ \text{Re}[Kr^{i\epsilon}] \tilde{\sigma}_{ij}^I(\theta, \epsilon) + \text{Im}[Kr^{i\epsilon}] \tilde{\sigma}_{ij}^{II}(\theta, \epsilon) \} \quad (5)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{2\mu_1} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \{ \text{Re}[Kr^{i\epsilon}] \tilde{u}_{ij}^I(\theta, \epsilon, \nu_1) + \text{Im}[Kr^{i\epsilon}] \tilde{u}_{ij}^{II}(\theta, \epsilon, \nu_1) \} \quad (6)$$

여기서 Re , Im 는 인수의 실수부와 허수부를 각각 나타내며, K 는 복소응력강도계수(complex stress intensity factor) $K=K_1+iK_2$ ($i=\sqrt{-1}$)를, ε 은 oscillary index를 나타낸다. ε 의 표현식은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{x_1\mu_2 + \mu_1}{x_2\mu_1 + \mu_2}\right) \quad (7)$$

또한, $\tilde{\sigma}_{ij}(\theta, \varepsilon)$ 와 $\tilde{\sigma}_{ij}^n(\theta, \varepsilon)$ 는 단위가 없는 분포함수로서, $\varepsilon=0$ 인 경우에는 균질균열(cracks in a homogeneous media)에 대한 각도의존함수와 일치하며, 재료 1에 대한 표현식은 다음과 같다.^[10] 재료 2에 대한 표현은 $\pi\varepsilon$ 을 $-\pi\varepsilon$ 으로 바꾸어 주기만 하면 된다.

$$\tilde{\sigma}_{rr} = -\frac{\sinh\varepsilon(\pi-\theta)}{\cosh\pi\varepsilon} \cos\frac{3\theta}{2} + \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{\cosh\pi\varepsilon} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 + \sin^2\frac{\theta}{2} + \varepsilon \sin\theta\right) \quad (8)$$

$$\tilde{\sigma}_{\theta\theta} = \frac{\sinh\varepsilon(\pi-\theta)}{\cosh\pi\varepsilon} \cos\frac{3\theta}{2} + \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{\cosh\pi\varepsilon} \cos\frac{\theta}{2} \left(\cos^2\frac{\theta}{2} - \varepsilon \sin\theta\right) \quad (9)$$

$$\tilde{\sigma}_{r\theta} = \frac{\sinh\varepsilon(\pi-\theta)}{\cosh\pi\varepsilon} \sin\frac{3\theta}{2} + \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{\cosh\pi\varepsilon} \sin\frac{\theta}{2} \left(\cos^2\frac{\theta}{2} - \varepsilon \sin\theta\right) \quad (10)$$

$$\tilde{\sigma}_{rr}^I = \frac{\cosh\varepsilon(\pi-\theta)}{\cosh\pi\varepsilon} \sin\frac{3\theta}{2} - \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{\cosh\pi\varepsilon} \sin\frac{\theta}{2} \left(1 + \cos^2\frac{\theta}{2} - \varepsilon \sin\theta\right) \quad (11)$$

$$\tilde{\sigma}_{\theta\theta}^I = -\frac{\cosh\varepsilon(\pi-\theta)}{\cosh\pi\varepsilon} \sin\frac{3\theta}{2} - \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{\cosh\pi\varepsilon} \sin\frac{\theta}{2} \left(\sin^2\frac{\theta}{2} + \varepsilon \sin\theta\right) \quad (12)$$

$$\tilde{\sigma}_{r\theta}^I = \frac{\cosh\varepsilon(\pi-\theta)}{\cosh\pi\varepsilon} \cos\frac{3\theta}{2} + \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{\cosh\pi\varepsilon} \cos\frac{\theta}{2} \left(\sin^2\frac{\theta}{2} + \varepsilon \sin\theta\right) \quad (13)$$

한편, $\tilde{u}_y^I(\theta, \varepsilon, \nu_1)$ 와 $\tilde{u}_y^n(\theta, \varepsilon, \nu_1)$ 도 단위가 없는 분포함수로서, $\varepsilon=0$ 인 경우에는 균질균열(cracks in a homogeneous media)에 대한 각도의존함수와 일치하며, 재료 1에 대하여는 다음과 같이 표현된다.^[10] 마찬가지로 재료 2에 대한 표현은 $\pi\varepsilon$ 을 $-\pi\varepsilon$ 으로 바꾸어 주기만 하면 얻을 수 있다.

$$\tilde{u}_r^I = \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{(1+4\varepsilon^2)\cosh\pi\varepsilon} \left[x_1 \left(\cos\frac{\theta}{2} + 2\varepsilon \sin\frac{\theta}{2} \right) - e^{2\varepsilon(\pi-\theta)} \left(\cos\frac{3\theta}{2} + 2\varepsilon \sin\frac{3\theta}{2} \right) - (1+4\varepsilon^2) \sin\theta \sin\frac{\theta}{2} \right] \quad (14)$$

$$\tilde{u}_\theta^I = \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{(1+4\varepsilon^2)\cosh\pi\varepsilon} \left[x_1 \left(-\sin\frac{\theta}{2} + 2\varepsilon \cos\frac{\theta}{2} \right) - e^{2\varepsilon(\pi-\theta)} \left(-\sin\frac{3\theta}{2} + 2\varepsilon \sin\frac{3\theta}{2} \right) - (1+4\varepsilon^2) \sin\theta \cos\frac{\theta}{2} \right] \quad (15)$$

$$\tilde{u}_r^n = \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{(1+4\varepsilon^2)\cosh\pi\varepsilon} \left[x_1 \left(-\sin\frac{\theta}{2} + 2\varepsilon \cos\frac{\theta}{2} \right) - e^{2\varepsilon(\pi-\theta)} \left(-\sin\frac{3\theta}{2} + 2\varepsilon \sin\frac{3\theta}{2} \right) + (1+4\varepsilon^2) \sin\theta \cos\frac{\theta}{2} \right] \quad (16)$$

$$\tilde{u}_\theta^n = \frac{e^{-\varepsilon(\pi-\theta)}}{(1+4\varepsilon^2)\cosh\pi\varepsilon} \left[-x_1 \left(\cos\frac{\theta}{2} + 2\varepsilon \sin\frac{\theta}{2} \right) + e^{2\varepsilon(\pi-\theta)} \left(\cos\frac{3\theta}{2} + 2\varepsilon \sin\frac{3\theta}{2} \right) - (1+4\varepsilon^2) \sin\theta \sin\frac{\theta}{2} \right] \quad (17)$$

특히, 계면 균열선단 전방($\theta=0$)에서의 응력분포는 Dundurs' Parameter를 사용하여 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.^[11]

$$\sigma_{22} + i\sigma_{12} \Big|_{\theta=0} = \frac{K_I r^{i\varepsilon}}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{(K_1 + K_2) r^{i\varepsilon}}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{|K|}{\sqrt{2\pi r}} e^{i\psi} \quad (18)$$

여기서, ψ 는 균열선단의 전단응력과 인장응력의 비를 나타내는 위상각(phase angle)이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{22}} \right)_{\theta=0} = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(Kr^{\epsilon})}{\text{Re}(Kr^{\epsilon})} \right] \quad (19)$$

또한 균열선단(crack tip) 후방에서의 변위(평면응력상태)는 다음과 같이 표현된다.

$$(u_2 + iu_1)_{\theta=\pi} - (u_2 + iu_1)_{\theta=-\pi} = \left[\frac{(1+x_1)/\mu_1 + (1+x_2)/\mu_2}{2\sqrt{2\pi}(1+2i\epsilon)\cosh(\pi\epsilon)} \right] K\sqrt{r} r^{i\epsilon} \quad (20)$$

한편 평면변형률상태에서의 변위는

$$(u_2 + iu_1)_{\theta=\pi} - (u_2 + iu_1)_{\theta=-\pi} = \left[\frac{(1-\nu_1)/\mu_1 + (1-\nu_2)/\mu_2}{\sqrt{\pi}(1+2i\epsilon)\cosh(\pi\epsilon)} \right] K\sqrt{2r} r^{i\epsilon} / \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \frac{Kr^{i\epsilon}}{(1+2i\epsilon)\cosh(\pi\epsilon)} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad (21)$$

으로 표현된다. 여기서, $r^{i\epsilon} = \cos(\epsilon \ln r) + i \sin(\epsilon \ln r)$ 이고, 소위 oscillatory singularity라고 불리는데, 균질균열(cracks in a homogeneous media)에 대한 응력의 표현식인 $\sigma_{22} + i\sigma_{12} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}}$ 과 식 (18)을 비교해 보면 $r^{i\epsilon}$ 항이 추가되어 있음을 알 수 있다. 따라서, r 이 0에 근접함에 따라 균열선단 부근에서는 응력이 진동하고, 균열면은 상호 침투(interpenetration) 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 균질균열(cracks in a homogeneous media)에서는 볼 수 없는 계면 균열만이 갖는 특징으로 균열선단근처에서의 응력진동과 균열면 접촉의 원인으로 작용한다.

균열선단에서 접촉(contact)이 일어나는 접촉거리 r_{con} 은 작은 $\epsilon(\ll 0)$ 에 대하여 식 (22)와 같이 표현된다. 접촉거리는 $\delta_2(u_2|_{\theta=\pi} - u_2|_{\theta=-\pi})$ 또는 σ_{22} 가 처음으로 음수가 되는 거리의 2배가 되는 거리를 의미한다. 균열선단에서의 접촉에 관한 좀더 정확한 해석은 Comninou의 논문을 참조하기 바란다.^(12,13)

$$r_{con} \approx 2L \exp[-(\Psi + \pi/2)/\epsilon] \quad (22)$$

여기서 L 은 균열길이, 잔여길이 등과 같은 특성길이이다. $\epsilon \ll 0$ 인 경우 ϵ 를 $-\epsilon$ 으로, Ψ 를 $-\Psi$ 로 바꾸어주면 된다. 비록 이러한 균열면 접촉영역(contact zone)과 비선형재료거동(nonlinear material behavior)영역 내부에서는 선형탄성

과괴역학의 해가 부정확하지만, 그 크기가 "small scale"이면 균질균열(cracks in a homogeneous media)의 경우와 유사하게 복소응력강도계수 K 가 유일한 "crack tip characterizing parameter"가 되어 선형탄성과괴역학을 적용할 수 있다. 실제로 관심 있는 이중재료의 ϵ 값에 대해 계산된 응력진동 및 균열면 접촉영역은 균열길이에 비해 무시할 수 있을 만큼 매우 작다.^(5,6) 한편 K_I , K_{II} 는 균질균열(cracks in a homogeneous media)의 K_I , K_{II} 와 같이 열림모드(opening Mode), 전단모드(shearing Mode) 등의 명확한 물리적 의미를 갖지 못한다. 복소응력강도계수 K 는 일반적으로 식 (23)과 같은 형태를 가지므로 균질균열(cracks in a homogeneous media)과는 달리 물리적으로 부적절한 단위를 가지고 있다.

$$K = AT\sqrt{L} L^{-i\epsilon} \quad (23)$$

T 는 외부에서 작용하는 트랙션(traction), L 은 균열길이, 잔여길이 등과 같은 특성길이이고, A 는 외부응력의 위상각, 특성길이와 다른 길이와의 비, 물성치 등에 의존하는 단위가 없는 복소상수이다.

복소응력강도계수 K 의 단위가 (응력)×(길이)^[1/2-iε]이 되어 균질균열(cracks in a homogeneous media)과는 달리 단위에 복소수가 포함되는 문제점을 해결하기 위해, Rice는 $Kr^{i\epsilon}$ 이 r 에 거의 무관하다는 조건하에 주어진 범위에 속하는 임의의 특성길이(characteristic length) \hat{r} 를 도입하여 다음과 같은 응력강도식을 제시하였다.⁽⁸⁾

$$K_I + iK_{II} = (K_I + iK_{II}) \hat{r}^{i\epsilon} = K \hat{r}^{i\epsilon} = AT\sqrt{L} (\hat{r}/L)^{i\epsilon} \quad (24)$$

특성길이를 도입했을 때의 위상각은 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{\Psi} = \tan^{-1} \left(\frac{K_{II}}{K_I} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[K \hat{r}^{i\epsilon}]}{\text{Re}[K \hat{r}^{i\epsilon}]} \right) \quad (25)$$

식 (24)의 관계식을 이용하면 계면 균열의 응력강도계수의 단위가 균질균열(cracks in a homogeneous media)이 갖는 응력강도계수단

위인 (응력)×(길이)^{1/2} 과 같아지게 되어 기존의 실험결과들과의 비교가 용이하게 된다.

식 (24)를 살펴보면, 특성길이 \hat{r} 를 어떤 값으로 정하느냐에 따라 응력강도계수와 위상각이 달라져서 외부에서 가해지는 하중각(load angle)과 균열선단에서의 위상각(phase angle)의 차이가 변한다. 그렇지만 ϵ 이 작은 경우 \hat{r} , L 에 따른 응력강도계수와 위상각의 변화를 무시할 수 있기 때문에 실제로 유발되는 차이는 그다지 크지 않다. 일반적으로 취급하는 실제 이종재료계에서의 ϵ 값은 매우 작다고 알려져 있다.^[5,6]

특성길이 \hat{r} 를 정할 때 특별한 규칙은 없다. 일반적으로 특성길이를 결정하는 방법은 크게 두 가지가 있는데,^[42] 첫 번째는 파괴진전영역(fracture process zone)이나 소성영역(plastic zone)의 크기 등과 같이 미시적인 거동에 관계된 재료 고유의 특성에 기초를 둔 절대크기로 설정하는 방법으로써 이는 실험적인 결과와 깊은 연관이 있다. 예를 들어 $\hat{r} = 1 \mu\text{m}$ 로 고정시키면 응력강도계수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_I + iK_{II} = K(\mu\text{m})^{\epsilon} = \Delta T \sqrt{L} (\mu\text{m}/L)^{\epsilon} \quad (26)$$

두 번째 방법은 균열길이, 잔여길이 등과 같은 시편의 형상에 기초를 둔 상대크기로 설정하는 방법으로써, 이는 계면 균열의 혼합모드 특성을 나타내는데 편리하다. 예를 들어 $\hat{r} = L$ 로 정하면 응력강도계수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_I + iK_{II} = KL^{\epsilon} = \Delta T \sqrt{L} \quad (27)$$

식 (7)에 의하면 $\epsilon = 0$ 이 되려면 $\beta = 0$ 이 되어야 하는데, $\beta = 0$ 이 되려면 두 재료의 탄성계수가 정확히 일치하여야 한다. 탄성계수가 일치하려면 계면 균열 위의 재료와 아래의 재료가 정확히 일치하지 않고서 불가능한데, 이러한 경우의 계면 균열은 더 이상 계면 균열이 아닌 균질균열(cracks in a homogeneous media)이다.

식 (24)에 의하면 $\epsilon = 0$ 인 경우, $\hat{r}^{\epsilon} = 1$ 이 되어서 $K_I + iK_{II}$ 와 $K \hat{r}^{\epsilon}$ 사이에는 아무런 위상각의 차이도 없다. 그러나, $\epsilon \neq 0$ 인 경우, $\hat{r}^{\epsilon} \neq 1$ 이 되어서 $K_I + iK_{II}$ 와 $K \hat{r}^{\epsilon}$ 사이에는 항상 위상각의 차이가 있게 된다. $K_I + iK_{II}$ 는 외부하중이 유발하는 응력장을 의미하며, $K \hat{r}^{\epsilon}$ 는 계면 균열선단

근처의 응력장을 의미하므로, 이 둘 사이에 위상각의 차이가 있다는 것은 외부하중에 의한 위상각이 0°로 주어지더라도 계면 균열선단에서는 위상각은 0°가 아닌 어떤 다른 값이 된다는 것을 의미한다. 즉, 외부하중이 단순인장으로 주어지더라도 균열선단에서는 인장하중과 전단하중이 함께 주어진다는 것이다. 이처럼 계면 균열은 $\beta \neq 0$ 이기 때문에 균질균열(cracks in a homogeneous media)과는 다른 특성을 보인다. 따라서, 계면 균열에 관한 문제를 해석할 때에는 항상 하중혼합도(Mode mixity)를 염두에 두어야 한다. 예를들어, 계면 파괴 인성치(interface fracture toughness)를 측정할 때에는 하중혼합도를 고려해서 위상각의 함수로써 측정하여야 한다.

일반적으로 계면 파괴 인성치는 위상각의 함수이며, 일반적으로 위상각의 절대값이 증가함에 따라 계면 파괴 인성치는 증가한다고 알려져 있고,^[14-18] 위상각 0°를 기준해서 대칭되지 않기 때문에,^[11,15] 음과 양의 위상각 전 범위에 대하여 실험을 하여야 하며, 실험결과에는 반드시 특성길이를 명시하여야 한다.

계면 파괴 인성치가 위상각이 증가함에 따라 증가하는 이유에 관해서는 균열선단에서 Mode II 성분이 증가함에 따라 소성영역 및 균열면의 접촉영역이 증가하기 때문이라는 주장^[19]과 균열면의 거칠기 영향이 증가하여 균열면의 마찰력이 증가하기 때문이라는 주장^[20]이 있다. 아직까지 균열선단에서의 재료거동이 정확히 알려져 있지 않기 때문에 위상각에 따른 계면 파괴 인성치의 예측은 불가능하고, 오로지 실험에 의해서만 그 값을 알 수 있을 뿐이다.

3. 계면균열의 에너지 방출률

탄성거동을 보이는 계면 균열에 대하여 J -적분, 에너지 방출률 G , 응력강도계수 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.^[21]

$$J = G = \left[\frac{(1+x_1)/\mu_1 + (1+x_2)/\mu_2}{16 \cosh^2(\pi\epsilon)} \right] |K|^2 \quad (28)$$

특히, 평면변형률상태에서는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J = G &= \left(\frac{1-\nu_1}{\mu_1} + \frac{1-\nu_2}{\mu_2} \right) \frac{|K|^2}{4 \cosh^2(\pi\epsilon)} = \\
 &= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \frac{|K|^2}{2 \cosh^2(\pi\epsilon)} = \\
 &= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \frac{1-\beta^2}{2} |K|^2 = \\
 &= \left(\frac{1-\beta^2}{1+\alpha} \right) \frac{1}{E_2} |K|^2 \quad (29)
 \end{aligned}$$

4. 계면파괴인성치의 측정을 위한 시편들

계면 파괴 인성치의 측정을 위한 시편의 형태로는 3-Point Bending,^[22] 4-Point Bending,^[22] 4-Point Shear,^[22] Delamination,^[18,23] DCB (Double Cantilever Beam),^[18] ENB (End Notched Bending),^[24] SENB (Sandwiched ENB),^[25] Sandwiched 3-Point Bending,^[26] Sandwiched 4-Point Bending,^[27] Sandwiched 4-Point Shear,^[26] SDCB (Sandwiched Double Cantilever Beam),^[28,29] BN (Brazil-Nut),^[22] SBN (Sandwiched Brazil-Nut),^[16,30] MSBN (Modified Sandwiched Brazil-Nut),^[16] Peel,^[31,32] Blade,^[33] Pull-out,^[34-36] Blister,^[37] 등이 있다. 시편의 크기가 매우 작거나 시편에 직접 하중을 가하기 어려울 경우에는 Fixture를 시편에 붙여 Fixture에 하중을 가하는 방식을 쓰기도 한다. 'Sandwiched'라는 접두어가 붙은 시편

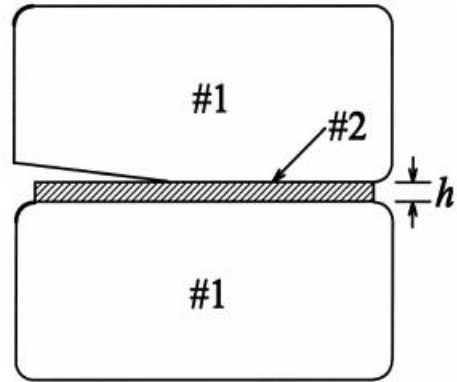
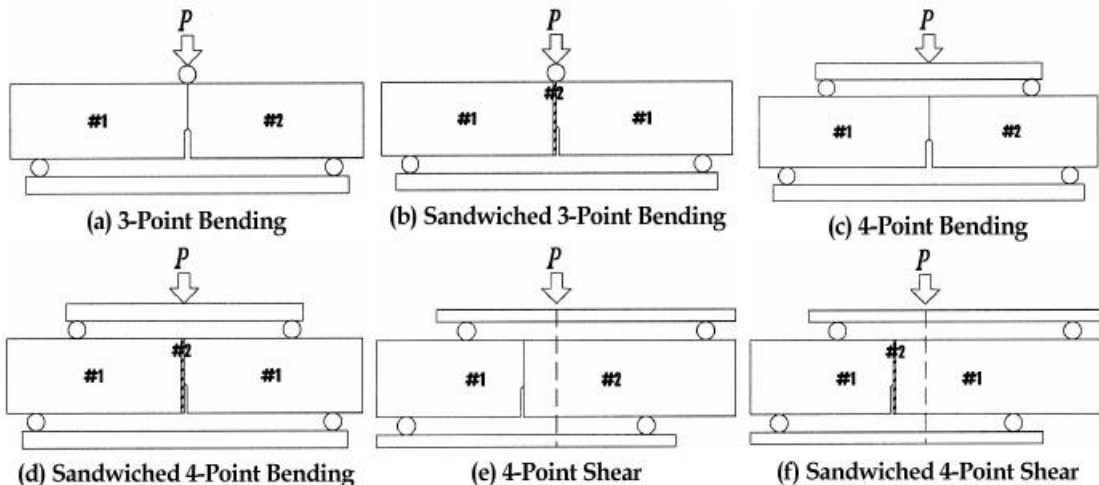


Figure 2. A sandwiched specimen.

은 균질재료로된 시편에 얇은 이종재료층을 삽입하여 만든 것으로서 삽입층의 두께(Figure 2에서의 h)가 바깥층의 두께에 비하여 매우 얇을 경우, 시편은 바깥층만으로 구성된 균질시편이라고 생각할 수 있다.^[29] Sandwich 시편모양을 Figure 2에 나타내었으며, 계면 파괴 인성치의 측정을 위한 시편모양과 실험 방법을 Figure 3에 나타내었다.

위의 시편들 중에서 4-Point Shear류 시편들 및 Brazil-nut류 시편들은 외부하중을 변수로 해서 변화시킬 수 있는 위상각의 범위가 다른 시편들에 비하여 크다. Peel test의 경우, 얻어지는 peel strength의 대부분은 peeling되어지는 금속막의 소성변형에 필요한 일이 차지하므로 금속막의 탄소성 거동을 정확히 알아야만 peel strength로부터 계면 파괴 인성치의 분리가 가능하다. Pull-out test는 계면 파괴 인성치가 잔



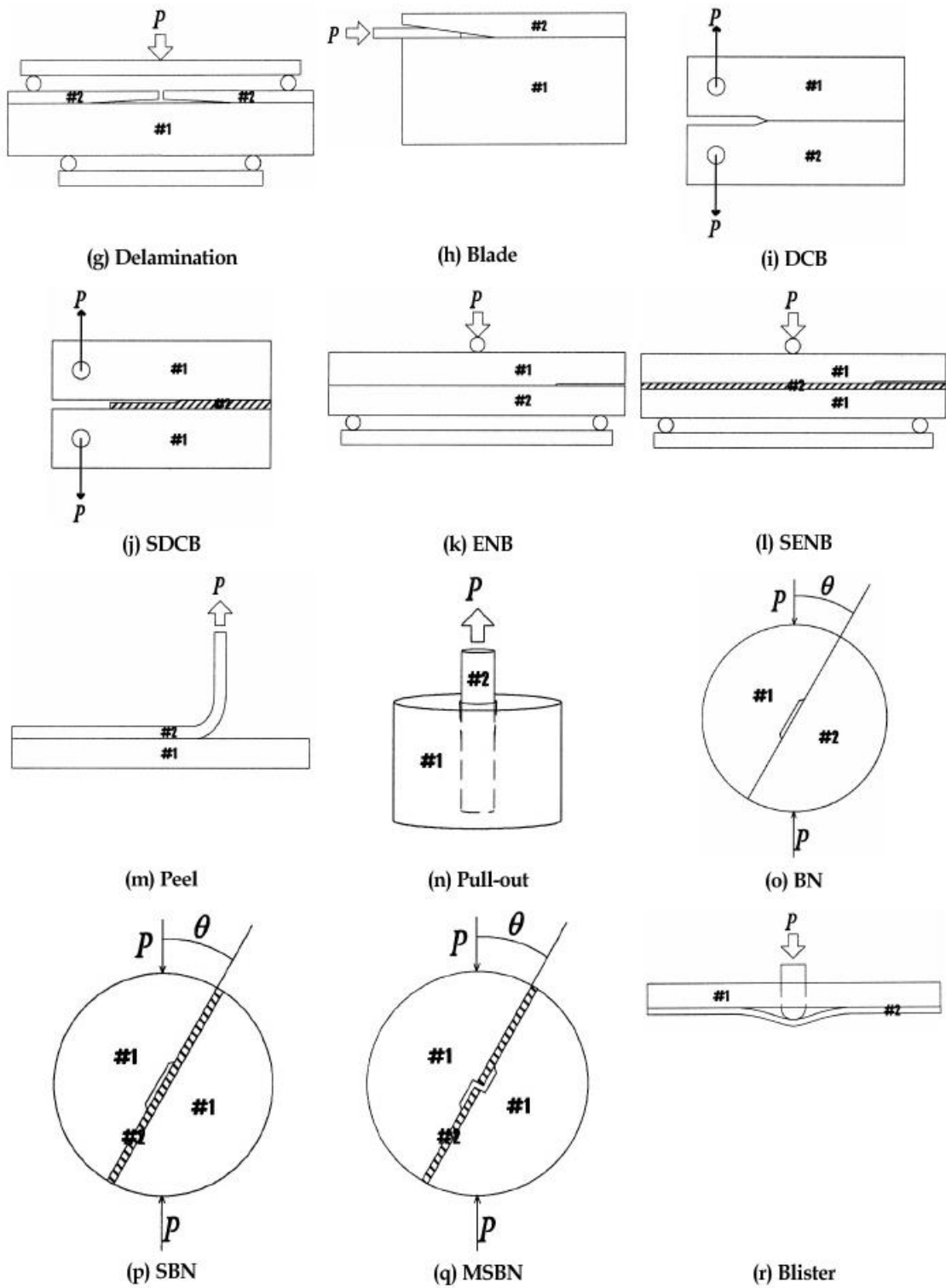


Figure 3. Various specimens and their experimental method.

류응력의 영향을 많이 받아 좀더 주의 깊은 실험이 요구된다. Brazil-nut류 시편들은 공통적으로 압축하중 때문에 균열면의 접촉이 다른 시편에 비해 크다는 단점이 있다. BN과 SBN 시편은 두 균열의 위상각이 동일하지 않기 때문에 불안정 균열성장시 어느 균열이 먼저 진전하는지 알 수 없는 단점이 있다. 이와 같은 단점은 두 균열의 위상각이 동일한 MSBN 시편을 사용하면 극복될 수 있다.^[16]

5. 맺음말

지금까지 계면파괴역학에 관하여 살펴보았고, 이를 실제 접착력의 측정에 응용할 수 있도록 여러 가지 모양의 시편에 대한 소개 및 설명을 하였다. 계면파괴역학을 이용하여 접착력을 측정하면, 균열의 진전에 필요한 에너지 값을 얻을 수 있고, 얻어진 값들의 활용에 있어서 거의 제약이 없다. 아무쪼록 본 원고가 여러 접착 연구자들에게 많은 도움이 되기를 바란다.

참고 문헌

1. 김성룡, 이호영, *접착 및 계면학회지*, **4**(3), 21 (2003).
2. 이호영, 김성룡, *접착 및 계면학회지*, **3**(4), 37 (2002).
3. K. L. Mittal, *Electrocomp. Sci. Technol.*, **3**, 21 (1976).
4. M. L. Williams, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **49**, 199 (1959).
5. A. N. England, *ASME J. Appl. Mech.*, **32**, 400 (1965).
6. F. Erdogan, *ASME J. Appl. Mech.*, **32**, 403 (1965).
7. J. R. Rice and C. G. Sih, *ASME J. Appl. Mech.*, **32**, 418 (1965).
8. J. R. Rice, *ASME J. Appl. Mech.*, **55**, 98 (1988).
9. J. Dundurs, *ASME J. Applied Mech.*, **36**, 650 (1969).
10. Z. Suo, "Mechanics of interface fracture", Ph. D. thesis, Harvard Univ., 8 (1989).
11. J. W. Hutchinson, M. E. Mear, and J. R. Rice, *ASME J. Appl. Mech.*, **54**, 828 (1987).
12. M. Comninou, *J. Appl. Mech.*, **44**, 631 (1977).
13. M. Comninou and D. Schmueser, *J. Appl. Mech.*, **46**, 345 (1979).
14. J. W. Hutchinson and Z. Suo, *Advances in Applied Mechanics*, **29**, *Academy Press, Orlando*, 63 (1992).
15. K. M. Leichti and Y. S. Chai, *ASME J. Appl. Mech.*, **59**, 295 (1992).
16. J. S. Wang and Z. Suo, *Acta Metall.*, **38**, 1279 (1990).
17. M. R. Shanbhag, K. Eswaran, and S. K. Maiti, *Engng. Fract. Mech.*, **44**, 75 (1993).
18. H. C. Cao and A. G. Evans, *Mech. of Mater.*, **7**, 295 (1989).
19. V. Tvergaard and J. W. Hutchinson, *J. Mech. Phys. Solids*, **41**, 1119 (1993).
20. A. G. Evans and J. W. Hutchinson, *Acta Metall.*, **37**, 909 (1989).
21. B. M. Malyshev and R. L. Salganik, *Int. J. Fract.*, **5**, 114 (1965).
22. N. P. O'Dowd, C. F. Shih, and M. G. Stout, *Int. J. Solids Suruct.*, **29**, 571 (1992).
23. P. G. Charalambides, J. Lund, A. G. Evans, and R. M. McMeeking, *ASME J. Appl. Mech.*, **56**, 77 (1989).
24. A. Nishimura, I. Hirose, N. Tanaka, *Trans. ASME J. Electronic Packaging*, **114**, 409 (1992).
25. H. Chai, *Int. J. Fract.*, **60**, 311 (1993).
26. M. Y. He, C. F. Shih, and A. G. Evans, *Int. J. Fract.*, **59**, 377 (1993).
27. R. F. Pabst and G. Elssner, *J. Mater. Sci.*, **15**, 188 (1980).
28. T. S. Oh, R. M. Cannon, and R. O. Ritchie, *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**, C-352 (1987).
29. Z. Suo and J. W. Hutchinson, *Mater. Sci. and Engng.*, **A107**, 135 (1989).
30. A. R. Akisanya and N. A. Fleck, *Int. J. Fract.*, **58**, 93 (1992).
31. K. S. Kim, N. Aravas, *Int. J. Solid Struct.*, **24**, 417 (1988).
32. N. Aravas, K. -S. Kim, M. J. Loukis, *Mater. Sci. and Engng.*, **A107**, 159 (1989).
33. M. D. Thouless, *Acta Metall.*, **38**, 1135 (1990).
34. C. H. Hsueh, *Mater. Sci. Engng.*, **A154**, 125 (1992).

35. S. Kim, *IEEE Trans. on CHMT*, **14**, 809 (1991).
36. H. Y. Lee and J. Yu, *J. Electron. Mater.*, **28**, 1444 (1999).
37. K. M. Liechti and Y-M. Liang, *Int. J. Fract.*, **55**, 95 (1992).