

인장하중하에서의 고분자/거친금속 계면의 파손에 대한 비교연구 II: 접착모델

이호영 · 김성룡*[†]

서울대학교 기계항공공학부
*충주대학교 고분자공학과

Comparative Study on the Failure of Polymer/Roughened Metal Interfaces under Mode-I Loading II: Adhesion Model

Ho-Young Lee and Sung-Ryong Kim*[†]

School of Mechanical and Aerospace Engineering, San 56-1, Seoul National University, Seoul 151-741 Korea
*Department of Polymer Science and Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702 Korea

(2004년 9월 20일 받음, 2004년 12월 11일 최종수정본 받음)

Abstract Copper based leadframe sheets were immersed in two kinds of hot alkaline solutions to form brown-oxide or black-oxide layer on the surface. The oxide-coated leadframe sheets were molded with epoxy molding compound (EMC). After post mold curing, the oxide-coated EMC-leadframe joints were machined to form sandwiched double-cantilever beam (SDCB) specimens. The SDCB specimens were used to measure the fracture toughness of the EMC/leadframe interfaces under quasi-Mode I loading conditions. After fracture toughness testing, the fracture surface were analyzed by various equipment to investigate failure path. An adhesion model was suggested to explain the failure path formation. The adhesion model is based on the strengthening mechanism of fiber-reinforced composite. The present paper deals with the introduction of the adhesion model. The explanation of the failure path with the proposed adhesion model was introduced in the companion paper.

Key words leadframe, brown-oxide, black-oxide, epoxy, adhesion model.

1. 서 론

본 논문에서는 산화물이 형성된 구리계 리드프레임과 EMC 사이의 접착을 모델링하였고, 이를 이용하여 파손 경로의 형성 원인을 설명하고자 한다. 또한 산화물의 종류에 따라 다른 계면파괴인성치와 파손경로가 얻어진 이유에 대하여도 설명하고자 한다.

앞의 논문에서는 다이패드(die pad)로 사용되는 리드프레임과 EMC 사이의 접착불량에 기인하여 발생하는 type I 팝콘 크래킹 현상의 발생 빈도를 줄이고자 EMC로 몰딩(molding)하기 전에 구리계 리드프레임의 표면에 갈색산화물(brown oxide) 및 흑색산화물(black oxide)을 형성시켰으며, 산화물의 형성이 접착력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 파괴역학적 개념에 기반을 두고 제작된 SDCB (Sandwiched Double-Cantilever Beam) 시편을 제작하여 EMC/리드프레임 계면의 접착력을 계면 파괴인성치(interfacial fracture toughness)로 측정하였다. 또한

접착력 측정 후 여러 가지 분석장비를 이용하여 파면을 분석, 파손경로(failure path)를 규명하였고, 규명된 파손 경로를 소개한 바 있다.

2. 접착 모델

갈색산화물과 흑색산화물 모두 크기는 다르지만 바늘모양을 하고 있다는 것을 투과전자현미경 사진을 통하여 확인하였다.^{1,2)} 이러한 모양은 EMC와 접착할 때, EMC내의 에폭시 수지와 기계적 고착을 하는데 매우 유리하며, 실제로 기계적 고착이 주된 접착기구로 판명되었다.^{1,4)} 기계적 고착이란 접착제(adhesive, 여기서는 에폭시)가 기판(substrate, 여기서는 산화물이 형성된 리드프레임)의 빈틈(crevice)이나 구멍(pore, hole)과 기타 불규칙한 표면의 요철(surface irregularities)에 스며들어 기계적으로 고착하여 접착되는 것을 말한다.

기계적 접착 기구를 근거로 간단한 접착 모델을 제시하였다. EMC내의 에폭시 수지가 바늘모양의 구리산화물

[†]E-Mail : srkim@chungju.ac.kr

(CuO)들 사이의 틈으로 스며들면서 기계적 고착을 유발 하지만, 에폭시와 CuO 사이의 제한된 접촉각(non-complete wetting)으로 인하여 에폭시가 완벽하게 스며들지 못하고 CuO의 뿌리부근에 공동(void)을 만들게 되며, 이를 TEM 분석을 통하여 확인하였다. 이를 근거로 접착에는 에폭시, 바늘모양의 CuO, 그리고 공동(void)이 참여하는 것으로 생각할 수 있다.

2.1 기본 접착모델

기본 개념을 설명하기 위하여 CuO/EMC의 접착을 단순화하였고, 이를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 여기서 공동의 존재는 생각하지 않았는데, 그 이유는 기본 개념을 설명하는데 공동의 존재가 필요없기 때문이다. CuO는 바늘모양으로 나타내었고, EMC는 CuO들 사이의 틈으로 완전히 스며들어 있다고 가정하였다. 실제적으로 기계적 고착이 이루어져 있는 지역을 고착지대(interlocking zone)이라 명명하고, 변수 Z 로 나타낼 수 있다. 이 때 Z 는 0과 1 사이의 값을 갖는다($0 \leq Z \leq 1$). 고착지대는 CuO와 EMC가 공존하는 지역이므로 CuO와 EMC가 마치 복합재료를 형성하고 있다고 할 수 있다(CuO는 섬유(fiber)로 행동하고, EMC는 기지(matrix)로 행동). 한편, CuO의 부피비(volume fraction of CuO)를 V_{CuO} 라 하면, Z 와 V_{CuO} 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다(Fig. 1(b)).

$$Z = 1 - V_{CuO} \quad (1)$$

연속적인 섬유가 한 방향으로 정렬되어 존재하고, 섬

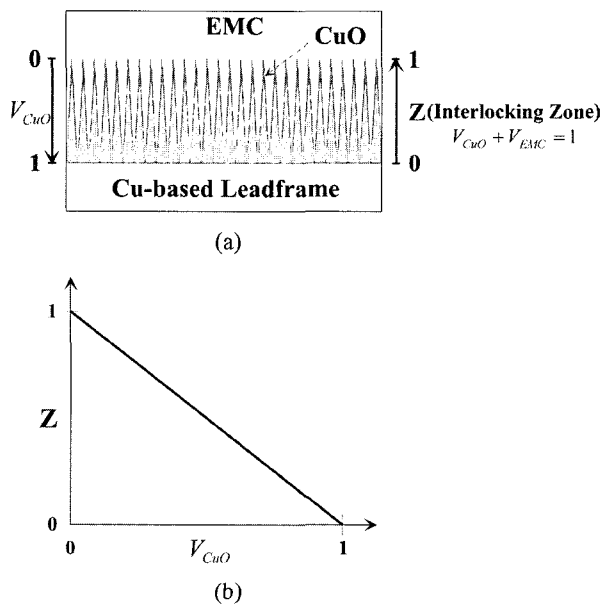


Fig. 1. (a) Simplified EMC/CuO interface. (b) Relationship between interlocking zone range, 'Z' and volume fraction of the CuO nanowires, V_{CuO} .

유의 정렬 방향으로 외부응력이 작용하는(isostress) 섬유 강화복합재료의 강도(strength, σ_{comp})와 V_{CuO} 사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다는 것은 이미 잘 알려져 있다(rule of mixture). 여기서, σ_{CuO} 는 CuO의 강도를 의미하고, σ_{EMC} 는 EMC의 강도를 의미한다.

$$\sigma_{comp} = \sigma_{CuO} V_{CuO} + \sigma_{EMC} (1 - V_{CuO}) \quad (2)$$

Kelly와 Davies는 섬유가 기지내로 첨가되어 복합재료를 형성할 때, 섬유의 부피분율이 어떤 최소값(V_{CuO}^{min}) 이상을 가져야만 섬유강화효과가 나타난다고 하였다.⁵⁾ 그 이유는 섬유 가닥의 크기가 어느 일정 개수 이상되어야만 섬유가 효과적으로 하중을 지탱할 수 있기 때문이며, 만일 V_{CuO} 가 V_{CuO}^{min} 이하의 값을 갖게 되면, 섬유는 부피만 차지할 뿐 하중을 효과적으로 지탱하지 못하기 때문에 하중이 인가될 경우 곧바로 끊어지게 된다.

모든 섬유가닥들이 동일하고(identical) 균일하다고(uniform) 가정하면, 모든 섬유가닥들은 동일한 강도(the same ultimate tensile strength, UTS)를 갖는다고 할 수 있다. 즉, 모든 CuO 섬유의 강도는 σ_{CuO}^{UTS} 의 동일한 값을 갖는다고 할 수 있다. 복합재료의 강도(σ_{comp}^{UTS})는 EMC의 파손변형률(strain to failure of EMC, ϵ_{EMC}^{UTS})이 CuO의 파손변형률(strain to failure of CuO, ϵ_{CuO}^{UTS})보다 크다고 가정할 경우($\epsilon_{EMC}^{UTS} > \epsilon_{CuO}^{UTS}$) 다음 식에 의하여 계산될 수 있다.

$$\sigma_{comp}^{UTS} = \sigma_{CuO}^{UTS} V_{CuO} + \sigma_{EMC}^{flow} (1 - V_{CuO}) \quad (V_{CuO} > V_{CuO}^{min}) \quad (3)$$

여기서, σ_{EMC}^{flow} 는 CuO가 끊어질 때(=복합재료의 파손이 일어날 때)의 변형률에서 EMC가 감당하는 응력(flow stress of EMC)이다(Fig. 2(a)).

앞에서 설명했듯이, 섬유의 부피분율이 적을 경우, 섬유는 부피만 차지할 뿐 강도에는 기여하지 못한다. 따라서 섬유가 실질적으로 하중을 분담하여 지탱하려면 다음의 조건이 성립하도록 V_{CuO} 를 지정해 주어야 한다.

$$\sigma_{comp}^{UTS} = \sigma_{CuO}^{UTS} V_{CuO} + \sigma_{EMC}^{flow} (1 - V_{CuO}) \geq \sigma_{EMC}^{UTS} (1 - V_{CuO}) \quad (4)$$

등호(=)가 성립할 경우의 V_{CuO} 값이 바로 CuO의 최소 부피분율(V_{CuO}^{min})이 된다.

섬유를 첨가하였을 때, 섬유를 첨가하기 전에 비하여, 강도가 증가하여야만 섬유를 첨가하는 의미가 있다. 따라서 다음의 조건이 성립하도록 V_{CuO} 를 지정해 주어야 한다.

$$\sigma_{comp}^{UTS} = \sigma_{CuO}^{UTS} V_{CuO} + \sigma_{EMC}^{flow} (1 - V_{CuO}) \geq \sigma_{EMC}^{UTS} \quad (5)$$

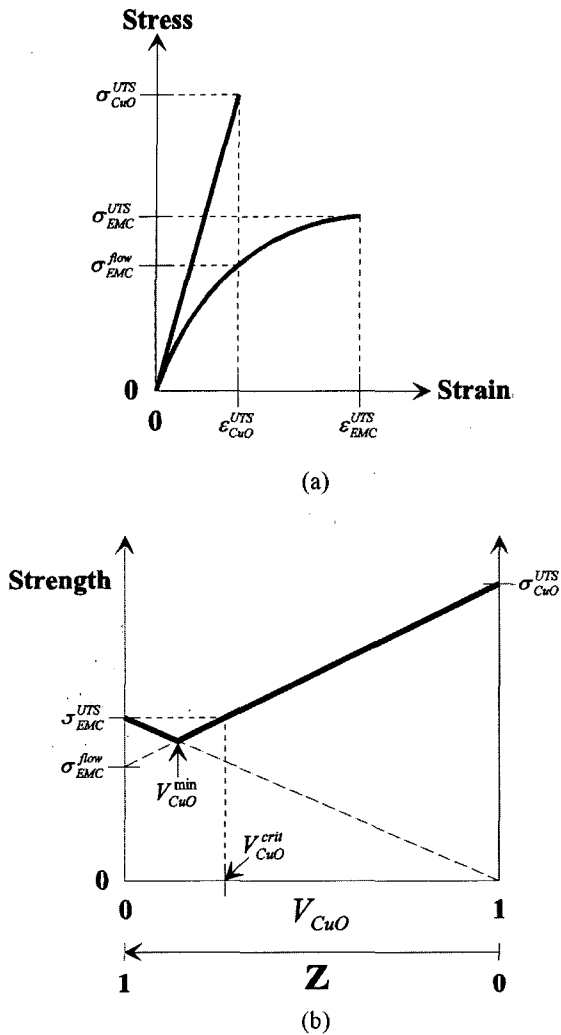


Fig. 2. (a) Stress-strain curves of the CuO and the EMC. (b) Correlation between the strength of the EMC-CuO composite and the volume fraction of the CuO nanowires, V_{CuO} .

실질적인 강도증가를 유발하기 위한 임계 CuO부피분율(V_{CuO}^{crit})은 식 (5)에서 등호가 성립할 경우에 얻어지면, 다음과 같이 표현된다.

$$V_{CuO}^{crit} = \frac{\sigma_{EMC}^{UTS} - \sigma_{EMC}^{flow}}{\sigma_{CuO}^{UTS} - \sigma_{EMC}^{flow}} \quad (6)$$

이상을 통하여 섬유강화 복합재료의 강도와 섬유의 부피분율 사이의 관계를 설명하였다. 한 가지 주목할만한 것은 Fig. 2(a)와 같은 관계가 존재하는 한 섬유강화 복합재료가 최소의 강도를 갖게하는 CuO의 부피분율(V_{CuO}^{min})이 고착지대(interlocking zone)의 어디인가 반드시 존재한다는 것이다(Fig. 2(b)).

일반적으로 파손은 항상 가장 약한 부분에서 일어난다. 따라서 파손의 결과로 형성되는 파손경로는 국부적인 강도와 밀접한 관련이 있다(Fig. 3). 따라서, 먼저 CuO/EMC 계면의 국부강도가 어떻게 주어지는지를 생각해 보아야 한다.

2.2 A-형 파손

본 연구에서는 가루 형태(powder type)의 EMC를 압축몰딩장치(compression-molding system)를 이용하여 몰딩하였다. 가루들 사이에는 많은 공극이 있어 공기가 차 있다. 압축몰딩장치를 사용하여 몰딩을 할 경우, 공극에 차있던 공기의 일부는 몰딩이 끝날 때까지 밖으로 빠져나가지 못하고 결국 경화된 EMC내부에 포획되거나 또는 적당한 위치(예를 들어 CuO/EMC 계면)에 포획된다. 한편, CuO 또한 바늘모양을 하고 있기 때문에 많은 틈(gap)들이 CuO들 사이에 존재하는데, 이러한 틈에도 공기가 차 있으며, 틈에 차있던 공기의 일부도 압축몰딩시 밖으로 빠져나올 수 없어 CuO/EMC 계면 등에 포획된다. 그런데, CuO의 길이가 작을 경우(산화시간이 짧으면 CuO의 길이 또한 짧음), CuO들 틈 사이로 EMC가 비교적 쉽게 젖어들어갈 수 있어, 실제로 CuO들 틈 사이에 포획되는 공기의 양은 그리 많지는 않게 된다. CuO틈에 차있던 공기는 틈에서 CuO/EMC 계면 근처의 EMC 내부에 포획되어 미세공동(microvoid)을 형성한다. CuO 틈에 차있던 공기가 CuO/EMC 계면 근처의 EMC 내부에 포획되어 미세공동을 형성하는 과정을

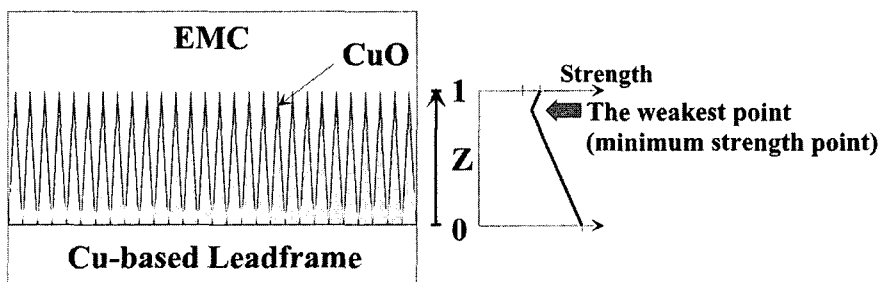


Fig. 3. Failure path expectation based on the simple micromechanical model for longitudinal tensile strength of a composite material developed from the 'rule-of-mixtures'. The weakest point which has a minimum strength existing somewhere in the interlocking zone satisfying $V_{CuO} = V_{CuO}^{min}$.

Fig. 3에 나타냈다. 그림에서 EMC 내부의 공기는 나타내지 않았는데, 그 이유는 가루형태의 EMC 내부에 포획되어 있던 공기는 경화된 EMC 내부에 비교적 균일하게 분포되어 계면강도에 미치는 영향이 거의 없다고 생각하였기 때문이다.

일반적으로 재료 내부에 공동이 존재하면 재료는 취약해져서 재료의 강도를 저하시키고, 결국에는 파손경로에 영향을 미치게 된다. Fig. 4에 나타냈듯이, A-형 파손은 EMC 내부의 공동에 따라 일부 일어나고, EMC 내부에 공동이 충분치 않은 경우에는 CuO/EMC 계면에서 일어난다. EMC 내부에 공동이 충분치 않은 경우에 파손이 CuO/EMC 계면에서 일어나는 이유는 앞의 2.1절에서 설명하였듯이 CuO-EMC 복합재료의 최소강도가 되는 곳이 고착지대(interlocking zone) 내의 어디엔가 반드시 존재하는데, 바로 이곳에서 파손이 일어나는 것이다.

2.3 B-형 파손

B-형 파손에 대한 해석도 A-형 파손에 대한 해석과 유사하다. 즉, 바늘모양의 CuO들 사이의 틈에 있던 공기들이 포획되어 국부적으로 강도가 저하되는 것으로 설명할 수 있다.

CuO가 바늘모양을 하고 있기 때문에 많은 틈(gap)들이 CuO들 사이에 존재하고 이러한 틈에 차 있던 공기가 압축몰딩시 밖으로 빠져나올 수 없어 CuO들 사이의

틈에 포획되어 미세공동을 형성한다. Fig. 5는 brown-oxide가 형성된 구리계 leadframe이 EMC로 몰딩되었을 때, CuO의 뿌리부근에 미세공동이 형성된 것을 TEM을 이용하여 촬영한 것이다.

B-형 파손이 형성되는 과정을 Fig. 6에 나타냈다. 결

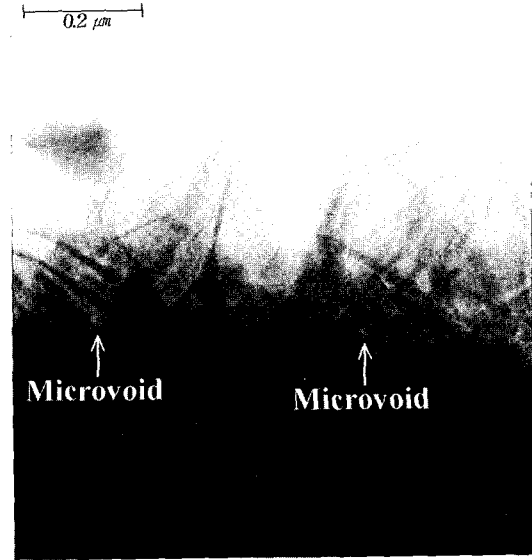


Fig. 5. Cross-sectional transmission electron micrograph of 20 min oxidated brown-oxide coated copper-based leadframe molded with EMC.

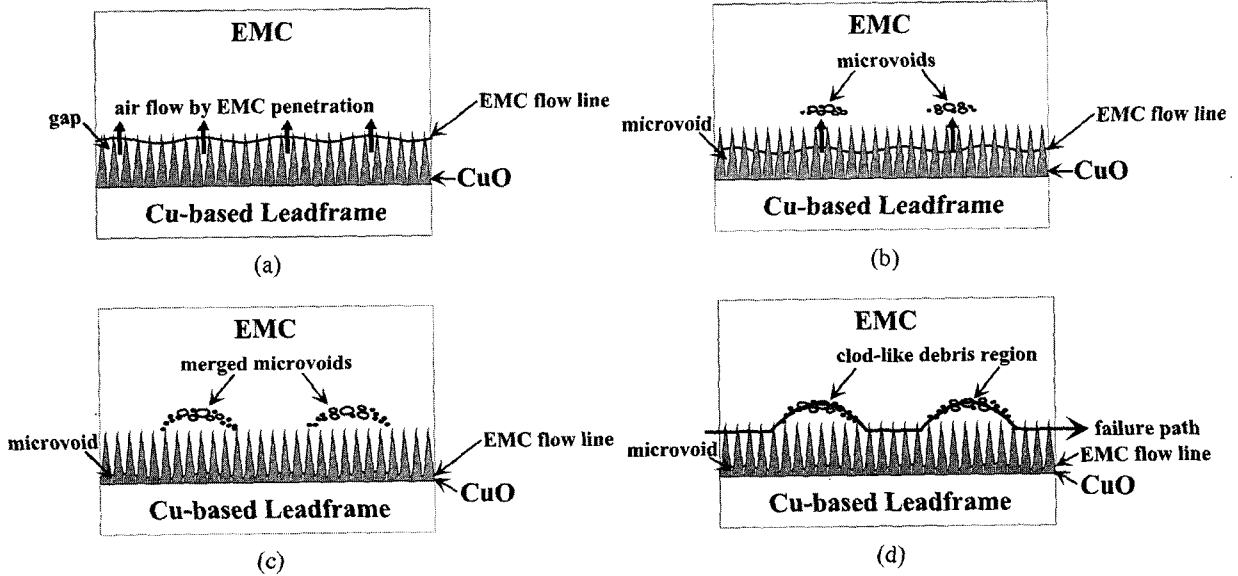


Fig. 4. Schematic diagrams illustrating the failure occurrence within the EMC on the clod-like debris region. (a) As the epoxy resin included in the EMC penetrates into the gaps among the CuO nanowires, the air trapped in the gaps move into the EMC. (b) As the amount of the air in the EMC increases, microvoids are formed in the EMC. (c) As the compression-molding process continues, the microvoids coalesce with each other and finally compression-molding process is completed. (d) Eventually, the united microvoids may form microscopic cracks in the EMC near the quasi-macroscopic EMC/CuO interface, which results in a local weakening of EMC near the quasi-macroscopic EMC/CuO interface; thus, the failure is likely to occur within the EMC near the quasi-macroscopic EMC/CuO interface because cracks always select the weakest propagation path.

국 파손은 Fig. 6(c)와 (d)에 나타난 것과 같이 CuO 내부의 공동과 CuO/EMC 계면을 따라 일어난다. 이는 2.2 절에서도 설명했지만 재료 내부에 공동이 존재하면 그 부분이 취약해지기 때문이며, 또한 CuO-EMC 복합재료의 최소강도가 되는 곳이 고착지대(interlocking zone) 내의 어디엔가 반드시 존재하기 때문이다.

2.4 C-형 파손

C-형 파손은 비교적 쉽게 설명할 수 있다. Cu₂O와 EMC가 직접 접촉하는 경우, 이들 둘 사이에 접착력이

강하지 않아 가장 약한 강도를 갖는 곳이 계면이고, 따라서 계면을 따라 쉽게 파손이 일어나는 것이다(Fig. 7).

2.5 D-형 파손

D-형 파손에 대해서는 약간 복잡한 설명이 필요하다. 리드프레임 위에 Cu₂O가 형성되어 있는 상태에서, 그 위에 바늘모양의 CuO가 형성되어 산화시간에 따라 준연속적인 CuO층을 형성해 가는 과정에서 EMC와 접착하는 것이다. 따라서, 파손경로 및 강도에 직접적인 영향을 미치는 것은 바로 Cu₂O위에 형성된 CuO의 밀도이다.

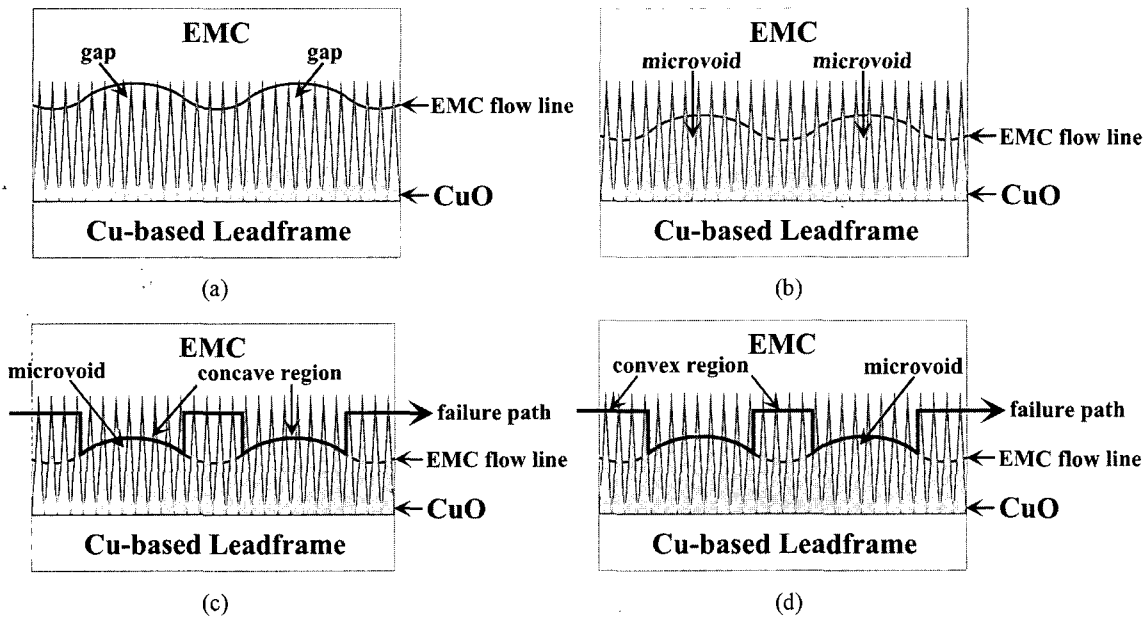


Fig. 6. Schematic diagrams illustrating the failure occurrence within the CuO layer on the concave regions of the separated leadframe side. (a) As the epoxy resin included in the EMC penetrates into the gaps among the CuO nanowires, the air trapped in the gaps is compressed. (b) As the EMC flow line advances, microvoids are formed near the roots of the CuO nanowires. (c) Eventually, the microvoids weaken the local strength of the EMC-CuO composite, thus failure is likely to occur within the CuO layer on the concave regions of the separated leadframe side because cracks always select the weakest propagation path. (d) Failure occurred near the quasi-macroscopic EMC/CuO interface on the convex regions of the separated leadframe side in a nearly interfacial mode. According to the 'rule-of-mixtures', failure is expected to occur at the weakest point satisfying $V_{CuO} = V_{CuO}^{min}$. The weakest point is close to the EMC/CuO interface.

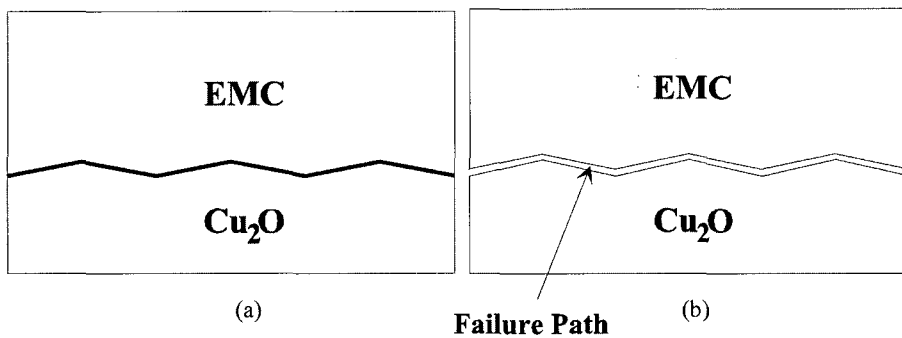


Fig. 7. Schematic diagrams for C-type failure in the EMC/black-oxide-coated copper-based leadframe system at oxidation times less than 1 min. (a) Before failure and (b) After failure.

우선 고착지대(interlocking zone), Z를 Fig. 8(a)와 같이 정의하면($0 \leq Z \leq 1$), CuO의 부피비(volume fraction of CuO), V_{CuO} 와 Z사이에는 Fig. 8(b)와 같은 관계가 성립한다. 여기서 V_{CuO}^i 는 계면($Z=0$)에서의 V_{CuO} 를 의미하고, σ_{CuO}^i 는 $V_{CuO}=V_{CuO}^i$ 일 때의 계면강도이다.

V_{CuO}^i 가 작은 값을 가질 경우($V_{CuO}^i < V_{CuO}^{i,crit}$), 강도상 측면에서 계면이 가장 약하여 계면($Z=0$)에서 파손이 일어난다(Fig. 9(a)). 여기서 $V_{CuO}^{i,crit}$ 는 σ_{CuO}^i 가 σ_{EMC}^{flow} 와 같을 때의 V_{CuO}^i 값으로 정의된다. $V_{CuO}^i = V_{CuO}^{i,crit}$ 일 때는 Fig. 9(b)에 나타낸 것처럼 약간 넓은 범위의 Z에서 파손이 일어난다. $V_{CuO}^i > V_{CuO}^{i,crit}$ 일 경우에는 CuO-EMC 복합재료의 최소강도가 되는 고착지대(interlocking zone) 내의 어디에선가 파손이 일어난다(Fig. 9(c)). Fig. 10에는 Cu_2O 위에 CuO가 성장해 가면서 파손경로가 변하는 것을 나타내었다.

2.6 E-형 파손

E-형 파손은 비교적 쉽게 설명할 수 있다. 즉, E-형 파손은 CuO-EMC 복합재료의 최소강도가 되는 고착지대

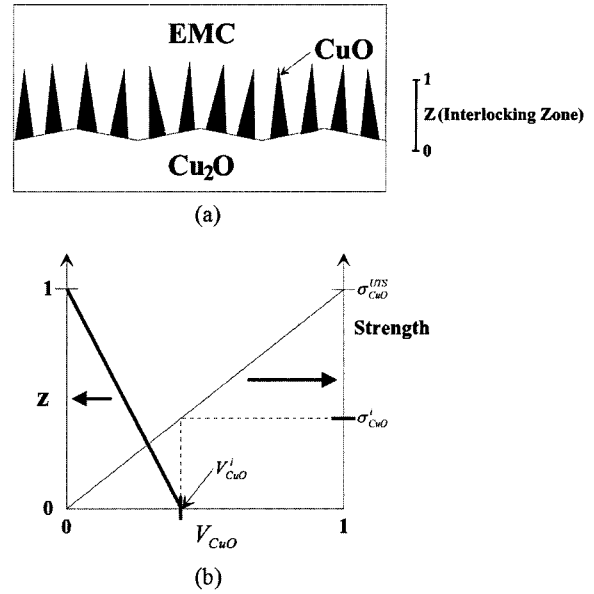


Fig. 8. (a) Definition of the interlocking zone. (b) Idealized correlations between thickness of the interlocking zone, Z, and the volume fraction of the CuO, V_{CuO} ; as well as between strength and V_{CuO} .

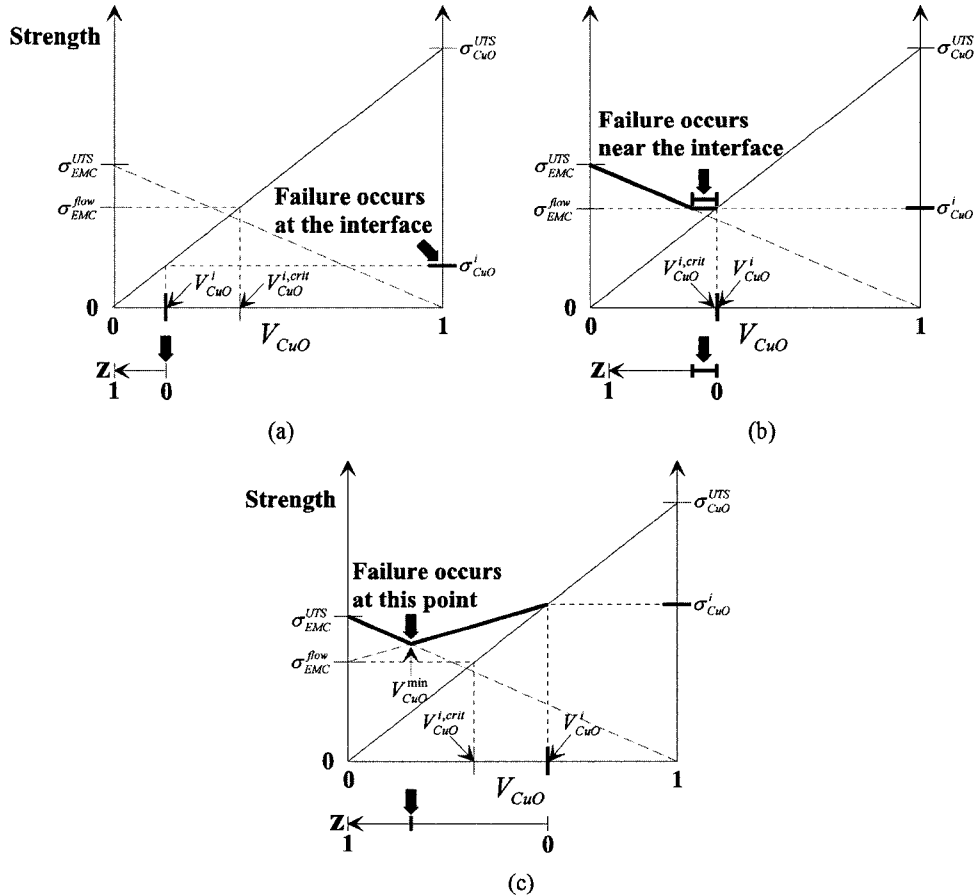


Fig. 9. Modified composite strength vs. V_{CuO} relationships. (a) When $V_{CuO}^i < V_{CuO}^{i,crit}$, failure is expected to occur at the Cu_2O/CuO interface. (b) When $V_{CuO}^i = V_{CuO}^{i,crit}$, the failure is expected to occur near the Cu_2O/CuO interface. (c) When $V_{CuO}^i > V_{CuO}^{i,crit}$, the failure is expected to occur somewhere in the interlocking zone satisfying $V_{CuO} = V_{CuO}^{min}$.

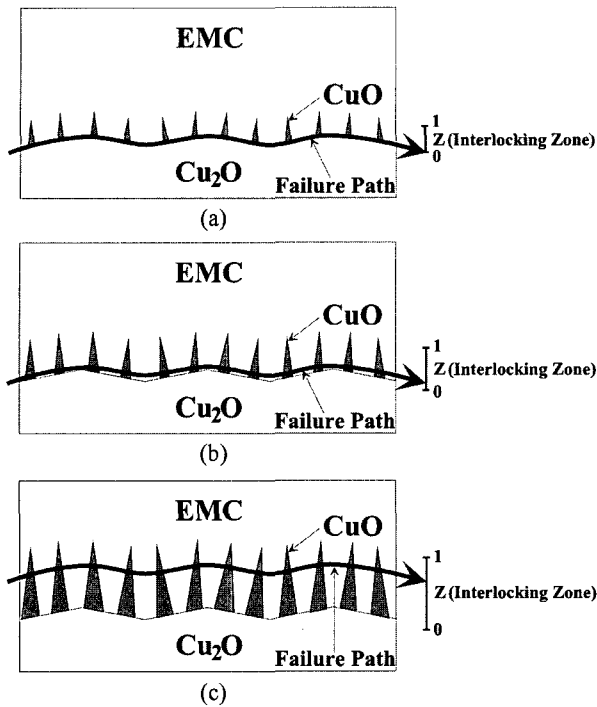


Fig. 10. Schematic diagrams for D-type failure in the EMC/black-oxide-coated copper-based leadframe system at oxidation times between 1 and 2 min. (a) is for $V_{CuO}^i < V_{CuO}^{i,crit}$, (b) is for $V_{CuO}^i = V_{CuO}^{i,crit}$, and (c) is for $V_{CuO}^i > V_{CuO}^{i,crit}$.

(interlocking zone) 내의 어디선가에서 파손이 일어나기 때문에 형성되는 것을 설명할 수 있다(Fig. 11). 여기서 공동의 형성을 고려하지 않았는데, 그 이유는 앞의 갈색 산화물에 비하여 흑색산화물은 그 크기가 훨씬 크다. 따라서, 공동이 형성되지만 CuO의 뿌리 부근에 형성되어 실제적인 강도저하 및 파손경로의 형성에 영향을 미치지 않기 때문이다. 이는 A-형 파손을 상기해보면 쉽게 이해가 간다.

3. 표면거칠기가 젖음성에 미치는 영향

리드프레임 표면에 바늘모양의 산화물들이 형성되는 것은 접착력과 밀접한 관련이 있는 표면의 화학적 성질과 표면형상에 변화를 주게 된다. 특히 표면거칠기의 증가는 접촉면적을 증가시키고 기계적 고착효과를 유발하게 된다. 흡착이론(adsorption theory)에 의하면 접착력은 표면 젖음성과 밀접한 관련이 있다. 갈색산화물과 흑색산화물 모두에 대하여 산화시간에 따른 deionized(DI) water의 접촉각 변화를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 낮은 접촉각은 젖음성이 좋다는 것을 의미한다. 갈색산화물의 경우 산화시간에 따라 접촉각이 심하게 변하지 않은 반면, 흑색산화물은 산화시간에 따라 접촉각이 상대적으로 심하게 변하였다. 이처럼 다른 결

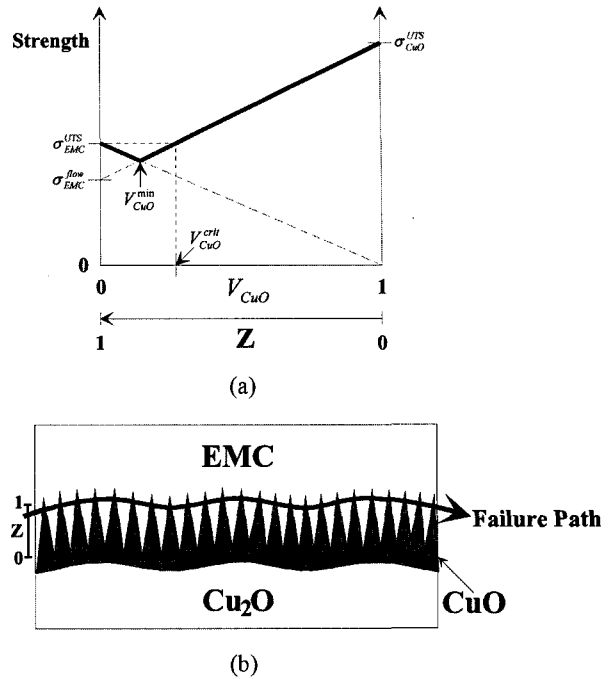


Fig. 11. (a) When $V_{CuO}^i = 1$, the failure is expected to occur somewhere in the interlocking zone satisfying $V_{CuO} = V_{CuO}^{min}$. (b) Schematic diagrams for E-type failure in the EMC/black-oxide-coated copper-based leadframe system at oxidation times longer than 2 min. The failure is expected to occur somewhere in the interlocking zone satisfying $V_{CuO} = V_{CuO}^{min}$.

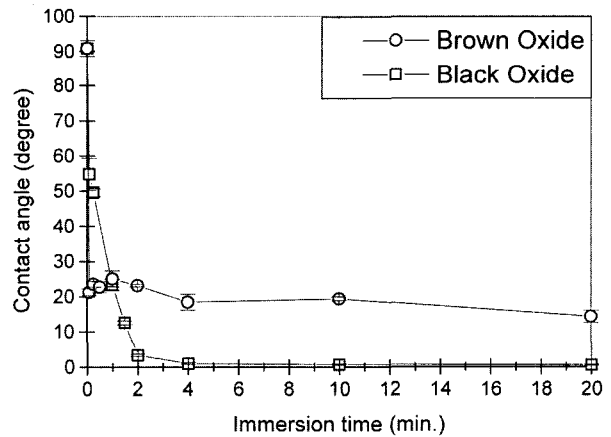


Fig. 12. Variation of static contact angle of deionized water to oxide-coated copper-based leadframe with oxidation time.

과를 얻은 이유를 알아내고자 AFM을 이용하여 표면거칠기를 분석하였고, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 갈색산화물은 산화시간에 따라 표면거칠기의 변화가 거의 없는 반면, 흑색산화물은 산화시간이 증가하면서 표면거칠기가 크게 증가하였다.

일반적으로 고체 기판의 표면거칠기는 액체의 걸보기 젖음성에 영향을 미친다고 알려져 있다.⁶⁾ 평탄한 고체기판과 90° 이하의 접촉각을 갖는 액체는 미세한 기공(fine

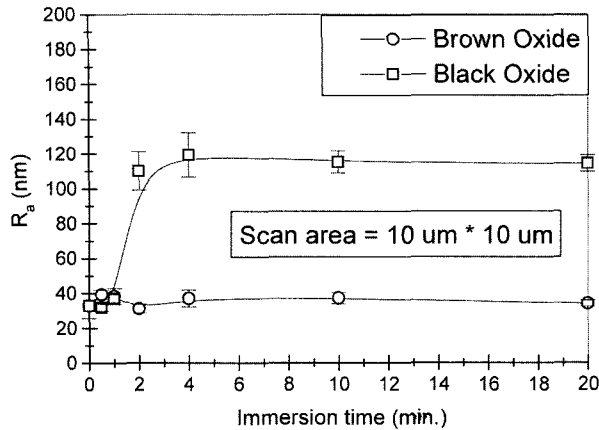


Fig. 13. Variation of the average roughness measured by AFM (Atomic Force Microscopy) with oxidation time.

pore), 찰상(scratch) 등을 따라 모세관 현상을 통하여 퍼진다. Wenzel은 겉보기 접촉각(θ_{app})과 실제 접촉각(θ_c) 사이에 다음과 같은 관계가 있다는 것을 보였다.⁷⁾

$$\cos \theta_{app} = r \cos \theta_c \quad (7)$$

여기서 'r'은 실제표면적에 대한 투사된 표면적의 비(ratio of the actual area to the projected area)로 정의되는 거칠기 인자이다. 식 (7)에 의하면 θ_c 가 90° 보다 작을 경우, 겉보기 접촉각은 작아지지만, θ_{app} 가 90° 보다 클 경우, 겉보기 접촉각은 증가한다. de Bruyne는 실리더 모양과 잉크병 모양의 패인 곳(pit)이 있는 고체기판의 표면에 액의 젖음이 일어날 때, 패인 곳에 포획된 공기의 압력과 액체가 패인 곳에 침투하는 깊이 사이의 관계를 얻었다.⁸⁾ 이를 통하여 그는 패인 곳의 직경과 액체의 실제 젖음각이 거시적인 액체의 젖음각에 영향을 미친다는 것을 알게 되었다.

본 연구에서 형성한 갈색산화물과 흑색산화물은 CuO의 크기에 있어서 차이를 보였다. 즉, 흑색산화물의 CuO 크기가 갈색산화물의 CuO 크기 보다 더 크다. 이러한 차이는 표면거칠기에 영향을 미치고 이러한 표면거칠기가 곧바로 액체의 겉보기 접촉각에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 바늘모양 CuO들 사이에 틈(gap)이 존재하고, 이러한 틈은 마치 표면의 패인 곳(pit)처럼 역할을 해서 공기를 포획할 것으로 생각된다. 포획되는 공기의 양은 틈의 모양과 크기에 따라 달라질 것으로 생각된다. 틈의 크기를 살펴보면 갈색산화물의 틈이 흑색산화물의 틈보다 더 적은데, 이러한 틈 크기의 차이가 산화물 내에 포획되는 공기양의 차이로 이어질 것으로 생각된다.

4. 계면파괴인성치와 파손경로

리드프레임 표면에 바늘모양의 CuO가 충분히 표면을

덮을 정도로 형성된 후(산화시간 20분)에 측정된 계면파괴인성치는 갈색산화물이 약 80 J/m^2 이었고, 흑색산화물이 약 100 J/m^2 이었다. 두 산화물의 계면파괴인성치가 차이를 보인 것은 두 산화물 사이의 미세구조 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, 두 산화물 사이의 미세구조 차이에 의하여 바늘모양의 CuO들 사이에 존재하는 틈의 크기에 차이가 있고, 이러한 틈의 차이에 의하여 접촉각 및 틈에 포획되는 공기의 양에 차이가 생기고, 포획되는 공기의 양은 파괴경로에 영향을 미치며, 파괴경로의 차이가 계면파괴인성치의 차이로 이어지는 것으로 생각된다. 갈색산화물의 경우 틈의 크기가 작아서 흑색산화물보다 더 많은 공기를 포획할 수 있고, 이에 따라 CuO층 내부에 많은 공동을 형성, 공동으로 인한 접착력 저하를 유발하여 결국 흑색산화물에 비하여 높은 접촉각을 보이는 것으로 생각된다.

5. 결 론

1. 갈색산화물과 흑색산화물이 임혀진 EMC/리드프레임 계면의 파손경로를 설명하기 위하여 접착모델을 제안하였다.

2. 접착모델은 섬유강화 복합재료의 강화기구에 기반을 두고 만들어졌으며, 제안된 접착모델을 이용하여 파손경로 형성과정을 잘 설명할 수 있었다.

3. 갈색산화물과 흑색산화물이 계면파괴인성치와 파손 경로에 있어서 차이를 보였는데, 그 이유는 산화물의 미세구조 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, 두 산화물 사이의 미세구조 차이에 의하여 바늘모양의 CuO들 사이에 존재하는 틈의 크기에 차이가 있고, 이러한 틈의 차이에 의하여 접촉각 및 틈에 포획되는 공기의 양에 차이가 생기고, 포획되는 공기의 양은 파괴경로에 영향을 미치며, 파괴경로의 차이가 계면파괴인성치의 차이로 이어지는 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. H. Y. Lee and S. R. Kim, J. Korean Inst. Surf. Eng., **33**(4), 241 (2000).
2. H. Y. Lee and S. R. Kim, J. Microelectron. Packag. Sci., **7**(2), 7 (2000).
3. H. Y. Lee and J. Yu, Korean J. Mater. Res., **9**(10), 992 (1999).
4. H. Y. Lee, Trans. Electric. Electron. Mater., **1**(3), 23 (2000).
5. A. Kelly and G. J. Davies. Metall. Rev., **10**, 1 (1965).
6. A. J. Kinloch, J. Mater. Sci., **15**, 2141 (1980).
7. R. N. Wenzel, Ind. Eng. Chem., **28**, 988 (1963).
8. N. A. de Bruyne, Aero Research Technical Notes, **168**, 1 (1956).