

해석과 실험을 결합한 구리 박막의 파괴인성 평가

김현규^{*†} · 오세영^{*} · 김광수^{*} · 이행수^{**} · 김성웅^{***} · 김재현^{****}

*서울과학기술대학교 기계자동차공학과, **울산과학기술대학교 디지털기계학부, ***KIMS 재료연구소, ****한국기계연구원

Evaluation of Fracture Toughness of Copper Thin Films by Combining Numerical Analyses and Experimental Tests

Hyun-Gyu Kim^{*†}, Se-Young Oh^{*}, Kwang-Soo Kim^{*}, Haeng-Soo Lee^{**}, Seong-Woong Kim^{***}
and Jae-Hyun Kim^{****}

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology,

** Mechanical Engineering, Ulsan College,

*** Korea Institute of Materials Science (KIMS),

**** Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM)

(Received July 26, 2012 ; Revised September 18, 2012 ; Accepted September 19, 2012)

Key Words: Thin Films(박막), Fracture Toughness(파괴인성), Inverse Problems(역문제), Crack Opening Profile(균열 열림 형상), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

초록: 본 연구에서는 해석과 실험을 결합하여 15 μm 두께 구리 박막의 파괴인성을 평가하였다. 박막의 균열 진전 실험에서 관측된 영상과 동일한 균열 열림 형상을 보이는 국부-전체 유한요소 해석 모델의 원거리장 하중 조건을 역문제로 구성하여 구하게 된다. 단순화시킨 원거리장 하중 조건을 사용하여 유한요소 해석을 하였으며 균열 선단의 J -적분을 통하여 파괴인성을 평가하였다. 실험에서는 균열이 있는 구리 박막을 알루미늄 판에 붙여서 하중을 간접적으로 부여하였으며, 현미경 카메라를 사용하여 균열의 열림을 관측하였다. 마이크로 인장시험기를 사용하여 구리 박막의 응력-변형률 곡선을 구하였으며 구리 박막의 결정립 크기를 관측하기 위하여 투과전자현미경(TEM)을 사용하였다. 본 연구서는 500 nm ~ 1 μm 크기 결정립을 갖는 구리 박막의 파괴인성은 6,962 J/m^2 으로 평가되었다.

Abstract: In this paper, a method of combining numerical analyses and experimental tests is used to evaluate fracture toughness of copper thin films of 15 μm thickness. Far-field loadings of a global-local finite element model are inversely estimated by matching crack opening profiles in experiments with numerical results. The fracture toughness is then evaluated using the J-integral for cracks in thin films under far-field loadings. In experiments, Cu thin films attached to Aluminum sheets are loaded indirectly, and crack opening profiles are observed by microscope camera. Stress versus strain curves of Cu thin films are obtained through micro-tensile tests, and the grain size of Cu thin films is observed by TEM analysis. The results show that the fracture toughness of Cu thin films with 500 nm ~ 1 μm sized grains is 6,962 J/m^2 .

1. 서 론

박막(thin films)의 파괴인성(fracture toughness)은 재료의 중요한 기계적 물성치 중 하나로 박막 구조물의 안전성과 신뢰성에 깊은 관련이 있게 된다.

일반적으로 초기 균열이 가공된 시험편을 이용한 3, 4 점 굽힘 시험으로 정확한 측정이 가능하지만, 박막은 두께방향으로 매우 작은 차원을 가지고 있기 때문에 일반적인 방법으로는 측정하기가 어렵게 된다. 현재까지 제시되었던 박막의 파괴인성 평가 방법으로는 기질(substrate)에 박막을 붙인 구조물의 굽힘 시험법(bending test),⁽¹⁾ 좌굴 시험법(buckling test),⁽²⁾ 인장 시험법(tensile test),⁽³⁾ 긁힘 시험법(scratch test),⁽⁴⁾ 압입 시험법(indentation

† Corresponding Author, khg@seoultech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

test)^(5,6) 등이 있다. 굽힘, 압입 시험법의 경우 시험을 하는 압입자의 반경에 대한 의존성을 띠고, 균열 길이와 적용되는 힘의 측정의 불확실성, 계면균열에서의 박리현상 등과 같은 문제점들을 가지고 있게 된다. 하지만 이 방법들은 사용의 편리함 때문에 박막의 파괴인성 측정에 널리 쓰이고 있다.

본 논문에서는 실험과 유한요소 해석을 결합한 물성치 평가하는 효율적인 방법⁽⁷⁾을 사용하여 구리 박막의 파괴인성을 평가하였다. 이 방법은 실험을 통해 관측된 박막의 균열 열림 형상과 유한요소 해석을 통해 얻은 균열 열림 형상을 일치시키는 방법이다. 유한요소 해석을 수행하기 위하여 원거리장(far-fields) 하중 조건을 역문제(inverse problems) 해석으로 구하고 해석 결과에서 박막의 파괴인성을 평가하는 방법이다. Pallares 등⁽⁸⁾은 William 급수를 바탕으로 실험에서 측정된 균열 열림 형상과 유한요소 해석의 균열 열림을 일치시켜 응력 확대계수와 파괴인성을 평가하는 방법을 제안하였다. 하지만 본 연구에서 국부-전체 해석 모델과 원거리장 하중 부여 방법 등을 사용한 방법은 보다 일반적이고 간편하면서 효율적으로 파괴인성을 평가할 수 있는 방법이다. 균열을 포함하는 국부 영역을 둘러싸는 전체 영역 경계에 부여하는 원거리장 하중 조건은 유한요소 해석과 실험의 균열 열림 형상을 일치시켜 구하게 된다. 이를 위해, 유한요소 해석과 실험에서 얻은 균열 열림 거리의 오차를 최소화하는 역문제를 구성하여 반복 계산을 통해 하중 조건을 찾게 된다. 결과적으로 실험에서 관측한 균열 열림 형상과 일치하는 유한요소 해석 결과에서 균열 선단의 J -적분을 통하여 박막의 파괴인성을 평가하게 된다. 본 연구에서는 15 μm 두께의 구리 박막에 대하여 실험과 해석을 수행하였으며 응력-변형을 관계를 구하기 위하여 마이크로 인장시험을 하였고 결정립 크기를 알기 위하여 투과전자현미경(TEM)을 사용하였다. 투과전자현미경 관찰을 위하여 15 μm 두께의 구리 박막을 투과전자현미경 용 3 mm-grid에 붙인 후, 이온 밀링(ion milling) 방법을 이용하여 100 nm 까지 얇게 가공하였다. 투과전자현미경은 JEOL 사의 2010 TEM 을 사용하였으며, 200 kV의 가속전압을 가하여 명시야상(bright field)과 암시야상(dark field)을 관찰하였다.

본 연구에서 사용하는 방법은 앞서 제시된 굽힘, 압입 시험법 등에 비해 간편하고 저비용으로 박막의 파괴인성 평가가 가능하며, 실험을 수행할 때

적용되는 힘을 측정할 필요가 없는 장점이 있다.

2. 국부-전체 모델과 원거리장 하중 조건

박막의 균열이 진전하면서 균열 선단의 특성은 균열 형상과 작용하는 하중 조건에 따라 변화하게 된다. 일반적으로 균열 선단 근처 응력 상태의 분석은 비선형 재료 거동이 포함되며 국소 영역의 실험적 측정을 요구하는데 현실적으로 상당히 어려움이 있게 된다. 또한 박막의 파괴인성을 구하기 위하여 일반적인 굽힘 시험을 적용하기가 어렵고 압입이나 굽힘 시험과 이론적 또는 경험적 근사식을 적용하여 간접적으로 구하게 된다. 하지만 이러한 방법들은 정확한 실험적 측정이 요구되며 근사식의 사용으로 인한 오차가 발생하게 된다. 본 연구에서는 박막의 균열 진전에서 관측된 균열의 열림 변위 이미지를 사용하여 유한요소 해석 결과와 일치하도록 하는 원거리장 하중을 구하는 역 문제를 구성하여 파괴인성을 결정하게 된다.

Fig. 1 과 같이 균열이 있는 국부 영역을 둘러싸는 전체 영역을 연결하고 균열에서 먼 영역의 경계에 하중을 부여하여 실험에서 관측한 균열 열림 변위가 나오는 원거리장 하중을 구하게 된다. 원거리장 하중은 다양한 형태로 부여할 수 있는데 관측된 균열 열림과 거의 동일한 결과가 나오는 어떠한 형태의 원거리장 하중도 파괴인성을 평가하는데 사용될 수 있다. 본 연구에서는 원거리장에 단순하게 일정 응력 $\{\sigma_{11}^{\infty}, \sigma_{22}^{\infty}, \sigma_{12}^{\infty}\}$ 인 선형 탄성 무한 평판에서 전체 영역 경계에 해당하는 변위 $u_E^{\infty}(\{\sigma_{11}^{\infty}, \sigma_{22}^{\infty}, \sigma_{12}^{\infty}\})$ 로 하중을 부여하였다. 하중을 직접 부여하는 방법에 비하여 선형 탄성 무한 평판에 해당하는 변위를 부여하는 것이 해석에서 하중을 부여하기가 편리하므로 이 방법을 사용하였는데, 언급된 바와 같이 원거리장에 하중을 부여하는 방법은 다양하게 선택하여 적용할 수 있다. 그러므로 실험과 해석에서 균열 열림 변위의 L_2 -놈 오차가 최소가 되는 원거리장 하중을 구하는 문제를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\min \left[\sum_{j=1}^M \left| \Delta u^j \left(\{\sigma_{11}^{\infty}, \sigma_{22}^{\infty}, \sigma_{12}^{\infty}\} \right) - \Delta \bar{u}^j \right|^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서 Δu^j 는 균열 면의 열림 거리 벡터이고 $\Delta \bar{u}^j$ 는 실험에서 관측한 균열 열림 거리 벡터이

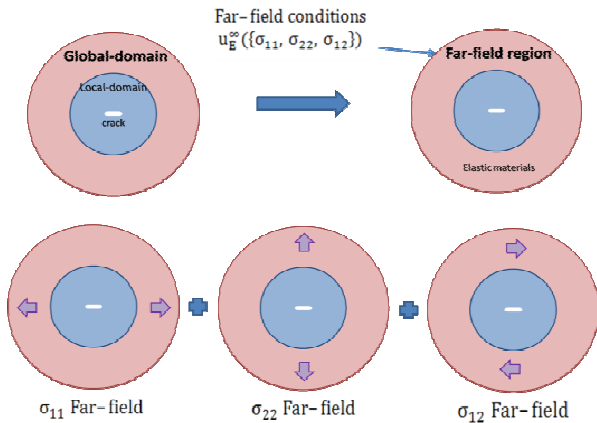


Fig. 1 Schematics of global-local models and far-field loadings

다. 따라서 식 (1)은 측정된 균열 열림 거리와 해석의 균열 열림 거리의 오차를 최소화하는 원거리장 하중을 구하는 역문제가 된다. 식 (1)을 사용하여 원거리장 하중을 구하고 유한요소 해석에서 J -적분을 사용하여 에너지 방출률을 구하면 박막의 파괴인성을 평가할 수 있게 된다.

3. 균열 진전 실험

3.1 구리 박막의 응력-변형을 관계와 미시 구조

균열 선단 근처의 소성영역이 균열의 길이에 비해 매우 작지 않으면 선형 탄성 파괴역학으로는 균열의 특성값들을 정확하게 도출할 수 없다. 따라서 균열 선단의 소성 변형을 고려할 수 있는 구리 박막의 응력-변형을 관계를 필요로 한다. 본 연구에서 사용한 구리 박막의 두께는 $15 \mu\text{m}$ 이고 Fig. 2 와 같은 구리 박막 시편에 대한 마이크로 인장 시험을 수행하였다. 이를 통하여 Fig. 3 과 같이 실험적 데이터를 얻게 되었고 초기의 응력-변형을 선도 이후에 안정화된 상태의 탄성계수와 전체적인 소성 변형 선도를 통하여 Fig. 4 와 같은 진응력-진변형을 곡선을 구하였다. 구리 박막의 탄성계수는 104 GPa , 0.2% 오프셋 항복 강도는 325 MPa 를 얻었고 구리 박막의 균열 열림 해석에 적용하였다. 결과적으로 균열 선단 근처에서 항복 강도 보다 높은 응력이 발생하면 소성 변형이 나타나게 되고 균열 열림 형상이나 J -적분의 계산에 반영이 되게 된다.

균열 진전 시험에 사용한 $15 \mu\text{m}$ 두께의 구리 박막의 결정립 크기를 확인하기 위하여, 100 nm 까지 가공 후 관찰하였으며, 암시야상(dark field) 투과

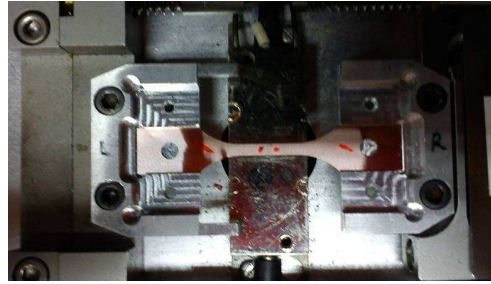


Fig. 2 Micro tensile system for testing copper thin films

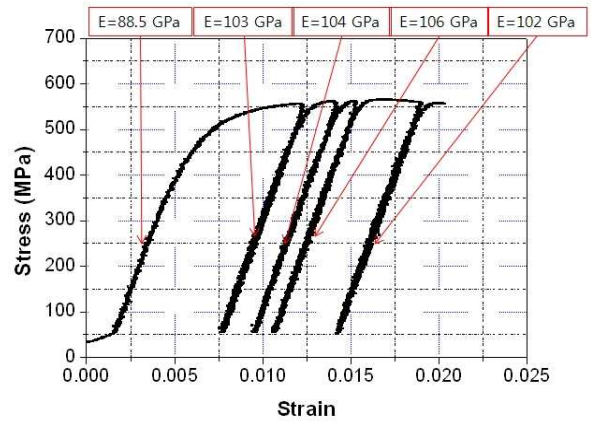


Fig. 3 Stress-strain curves of copper thin films

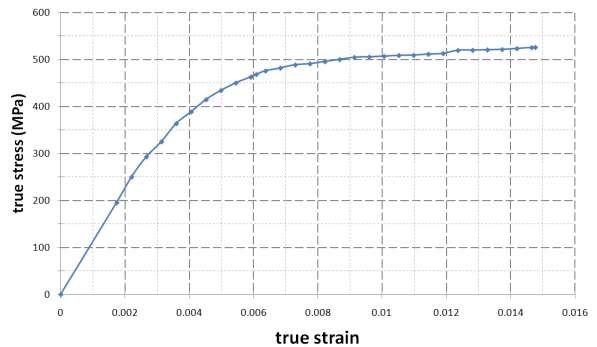


Fig. 4 True stress versus true strain curve of copper thin films

전자현미경(TEM) 이미지를 Fig. 5 에 보여주고 있다. 명시야상(bright field) 이미지에서는 결정립계를 파악하기 어려웠고 암시야상 이미지에서 결정립 크기가 $500 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 정도의 초미세 결정립(ultra-fine grain)을 갖는 구리 박막임을 알 수 있었다. 결정립의 크기가 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 정도의 일반적인 구리의 항복 강도는 200 MPa 보다 작는데,⁽⁹⁾ 본 연구에서 사용한 구리 박막은 이 보다 높은 325 MPa 의 항복 강도를 보였다. 이는 결정립 크기가 작아지면서 전위의 이동이 결정립계의 제한되면

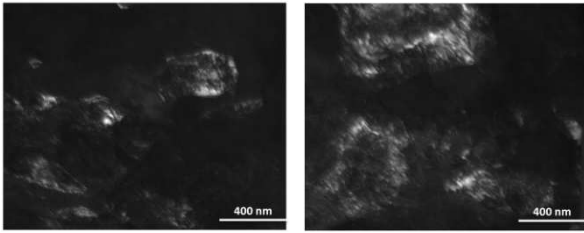


Fig. 5 Dark field TEM images of copper thin films

서 항복 강도가 올라가는 현상으로 설명되며, 이에 대한 많은 연구들이 진행되었다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 하지만 결정립의 크기와 파괴인성과의 관계에 대한 평가와 분석은 아직 연구가 부족한 상황이다.

3.2 균열 진전 시험

본 연구에서는 시편에 가공된 초기 노치에서 균열이 시작되도록 하고 소형 인장 시험기에서 변위 제어를 통하여 균열을 안정적으로 진전시키는 실험을 수행하였다. 균열이 하중에 수직 방향으로 어느 정도 진전한 상태에서 새롭게 균열이 진전되는 바로 직전에 관측된 균열의 열림 형상이 구리 박막의 파괴인성을 평가하는데 적용하게 된다. 15 μm 두께의 구리 박막에 하중을 부여하기 위하여 Fig. 6(a)와 같이 구리 박막에 초기 노치를 가공하였다. 박막의 두께가 작아서 인장 시험기에서 직접 하중을 부여하는 것은 어렵기 때문에, Fig. 6(b)와 같이 가공한 2 mm 두께의 알루미늄 판에 박막을 접착시켜 실험하였다. Fig. 6(c)와 같이 알루미늄 판 중앙에 원형의 구멍을 가공 하고 구리 박막의 앞면과 뒷면 양쪽으로 m-bond 200 을 사용하여 접착시킨다. 이를 통하여 Fig. 6(d)와 같이 구리 박막의 균열 진전 시험 시편을 제작하였다. 실험은 소형 인장 시험기 (INSTRON 5848)를 사용하였다.

초기 노치의 크기는 길이가 3.0 mm 이고 높이가 1.025 mm 로 가공하였으며 노치 끝 단에서 안정적으로 진전된 균열을 얻기 위하여 알루미늄 판 양쪽 끝단부에 순차적인 변위 하중을 부여하였다. 알루미늄 판을 통하여 간접적으로 구리 박막에 하중이 부여되게 되므로 원거리장 하중은 단순하지 않을 수 있으나 관측된 균열 열림 변위를 오차가 작게 표현될 수만 있으면 단순한 형태의 하중 조건을 사용할 수 있게 된다.

안정적으로 진전된 균열에서 새롭게 균열이 진전을 시작하기 직전의 균열 열림 모습을 마이크로 현미경(DIMIS-M)으로 Fig. 7 과 같이 균열 열림

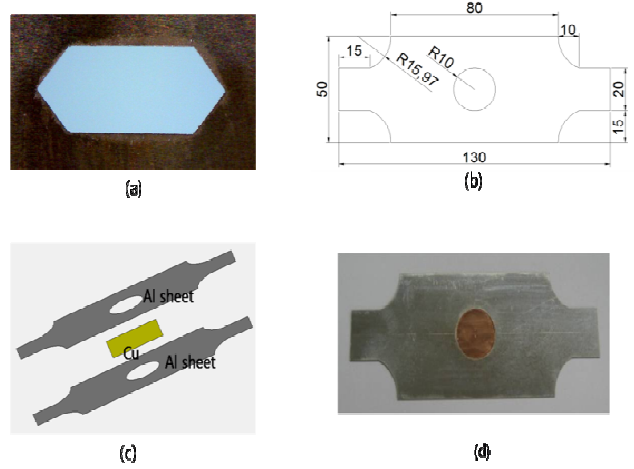


Fig. 6 Tensile test specimens: (a) initial notch in a copper thin film, (b) the dimension of aluminum sheets, (c) a deal drawing of the specimen and (d) copper thin film attached to aluminum sheets

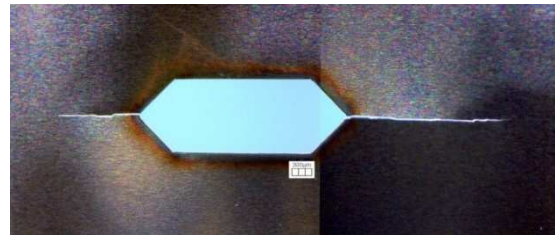


Fig. 7 Captured image of crack opening profile in copper thin films

형상을 촬영하였다. 실험에서 촬영한 균열 열림 형상을 기반으로 유한요소 해석을 통하여 구리 박막의 파괴인성을 평가하게 된다. 구리 박막의 초기 노치에서 진전된 균열의 좌우 길이가 동일하지 않았는데 노치의 형상과 알루미늄 판에 대한 노치의 위치 그리고 하중 부여 조건 등이 정확히 대칭성을 유지하지 않으므로 좌우의 균열 길이에 차이가 발생하였다. 본 실험에서는 좌우 균열에 작용되는 하중 조건 등의 차이로 좌우 균열 진전 길이의 차이가 발생하였지만, 균열 선단의 응력장은 거의 유사할 것으로 판단되며(Fig. 10) 좌우 균열의 파괴인성도 비슷하게 평가될 것이다.

4. 구리박막의 파괴인성 평가

구리 박막의 균열 진전 실험을 통하여 얻은 균열 진전 이미지와 시편의 인장 시험을 통하여 얻은 응력-변형률 관계를 이용하여 Fig. 8 과 같은

균열을 갖고 있는 국부 영역과 전체 영역을 연결한 유한요소 해석 모델을 만들고 ABAQUS/ Standard v6.10 을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석 모델은 사각형 2 차 평면 응력 요소를 사용하였다. 균열 열림 거리 벡터는 Fig. 9 에서 표시된 총 7 개 지점에서 측정하였다. 식 (1)을 사용하여 오차가 최소가 되는 원거리장 하중 조건 $\{\sigma_{11}^{\infty}, \sigma_{22}^{\infty}, \sigma_{12}^{\infty}\}$ 을 찾아 해석 모델의 전체 영역 경계에 부여하게 된다. 본 연구에서는 원거리장 하중이 부여된 선형 탄성 무한 평판의 변위를 전체 영역 경계에 부여하였다. 원거리장 하중을 변화시키는 반복 계산을 통하여 찾아낸 $\sigma_{11}^{\infty}, \sigma_{22}^{\infty}, \sigma_{12}^{\infty}$ 는 각각 165 MPa, 260 MPa, 1 MPa 의 값을 가지게 된다. 이와 같은 원거리장 하중을 사용한 유한요소 해석 결과에서 von-Mises 응력 분포를 Fig. 10 에 보여주고 있는데, 전체 영역은 모두 탄성 변형을 하고 있지만 국부 영역의 균열 선단 근처에서는 소성 변형(Fig. 10 의 하얀색 영역)이 나타나고 있다. 해석 결과를 사용하여 Fig. 11 과 같이 좌우 균열 선단을 둘러싸는 요소들에서 J -적분을 평가하였는데 균열 선단에서 멀어질 수록 소성 변형의 영향도가 작아져서 수렴하는 값들을 얻을 수 있었다. Fig. 10 과 Fig. 11 을 비교해 보면 J -적분 영역에 약간의 소성 변형이 포함되어도 탄성 영역에서의 결과와 유사한 값을 얻을 수 있었다. 균열 열림 거리는 표 1 과 같은데 해석 결과와 실험에서 식 (1)에 주어져 있는 균열 열림 거리의 오차가 0.00575 값으로 최소화 되었다. 균열 선단의 J -적분을 통하여 구리 박막의 파괴인성을 구하면 표 2 와 같이 얻을 수 있다.

본 연구에서 평가된 좌우 균열의 평균적인 구리박막의 파괴인성 $6,962 J/m^2$ 는 일반적으로 결정립의 크기가 50~100 μm 인 구리의 파괴인성⁽¹²⁾ $\sim 1 \times 10^5 J/m^2$ 보다 10 배 이상 작은 값이다. 이는 상대적으로 작은 결정립 크기로 인하여 균열이 결정립계를 따르는 경로로 진전하는 경우가 많아지면서 균열 진전에 수반되는 전위 이동이 상대적으로 적게 발생하는데 원인이 된 것으로 판단이 된다.⁽¹³⁾ 즉, 결정립의 크기가 작아지면 항복 강도는 올라가지만 균열이 진전하는데 요구되는 전위 이동에 대한 에너지는 작아지게 된다. 또한 동일한 결정립 크기에 대하여 박막 두께와 산화층(oxide layer) 두께 변화에 따라서 파괴인성은 변하게 된다.^(14,15) 이와 같이 박막의 파괴인성에 대하여 미시구조나 크기 효과 영향에 대한 체계적인 연구는 상당히 부족한데, 본 연구에서 제시하는 방법을 사용하여 결정립 크기, 박막 두께

그리고 산화층 두께 영향에 대한 심도있는 연구를 수행할 수 있게 될 것이다.

Table 1 Crack opening distances of experiments and FE analyses

Locations	Experiments (mm)	FE analyses (mm)
1	0.0253	0.0241
2	0.0263	0.0253
3	0.0234	0.0266
4	0.0244	0.0280
5	0.0356	0.0334
6	0.0338	0.0329
7	0.0338	0.0324

Table 2 Crack tip fracture toughness of copper thin films

Fracture toughness	Average	Crack tip (left)	Crack tip (right)
J/m^2	6,962	7,003	6,921

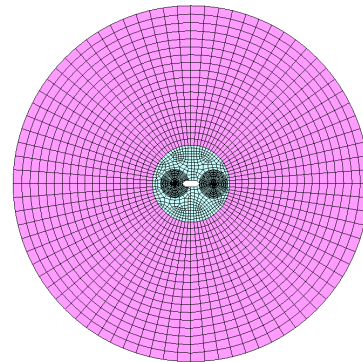


Fig. 8 Local-global finite element model

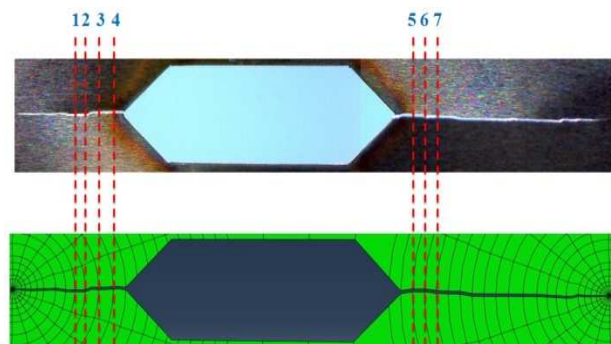


Fig. 9 Measurement locations of crack opening profile

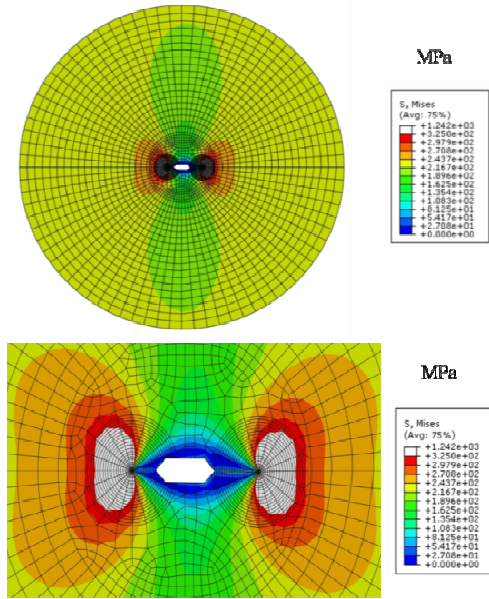


Fig. 10 von-Mises stress distribution of copper thin films; the white contour indicates plastic deformation zone

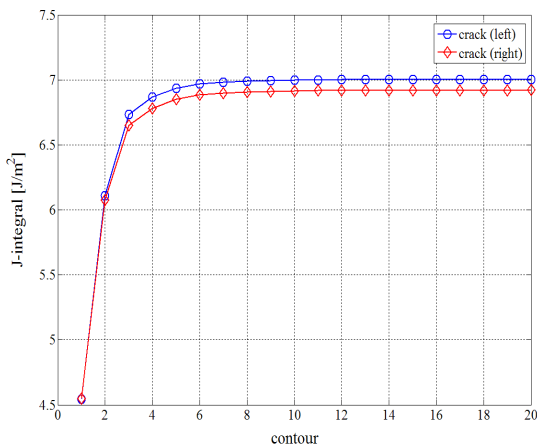


Fig. 11 J-integrals for left and right cracks in copper thin films

5. 결 론

본 연구에서는 15 μm 두께에 균열이 있는 구리 박막에 대하여 균열 주변의 국부 영역과 전체 영역을 연결한 해석 모델을 구성하고, 실험에서 관측한 균열 열림 형상과 가장 근접하는 원거리장 하중을 구하는 역문제를 해석하였다. 원거리장 하중을 부여한 유한요소 해석 결과에서 균열 선단의 J-적분을 통해 박막의 파괴인성을 평가하였다. 실험적으로 박막의 파괴인성을 측정하기가 상당히 어려운데 여기서 제안하는 실험과 해석의 결합 해석

방법을 사용하면 실험에서 균열 열림 형상과 유한요소 해석을 통하여 쉽게 박막의 파괴인성을 평가할 수 있게 된다. 본 연구에서 평가된 500 nm ~ 1 μm 결정립 크기를 갖는 구리 박막의 파괴인성은 6,962 J/m^2 로 일반적인 구리보다 약 10 배 이상 작은 값을 얻었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (2012-0431)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Jaeger, G, Endler, I., Heilmaier, M., Bartsch, K. and Leonhardt, A., 2000, "A New Method of Determining Strength and Fracture Toughness of Thin Hard Coating," *Thin Solid Films*, Vol. 332, pp. 195~201.
- (2) Cottrell, B. and Chen, Z., 2000, "Buckling and Cracking of Thin Films on Compliant Substrate Under Compression," *Int. J. Fracture*, Vol. 104, pp. 169~179.
- (3) Oh, C.S., Lee, H.J., Ko, S.G., Kim, S.W. and Ahn, H.G., 2003, "Comparison of the Young's Modulus of Polysilicon Film by Tensile Testing and Nanoindentation," *Sensor and Actuators A: Physics*, Vol. 117, No. 1, pp. 151~158.
- (4) Holmgerg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Willin, K. and Varjus, S., 2003, "A Model for Stresses, Crack Generation and Fracture Toughness Calculation in Scratched TiN-Coated Steel Surface," *Wear*, Vol. 254, pp. 278~291.
- (5) Bravo-Leon, A., Morikawa, Y., Kawahara, M. and Mayo, M.J., 2002, "Fracture Toughness of Nanocrystalline Tetragonal Zirconia with Low Yttria Content," *Acta Mater.*, Vol. 50, No. 18, pp. 4555~4562.
- (6) Xia, Z., Curtin, W.A. and Sheldon, B.W., 2004, "A New Method to Evaluate the Fracture Toughness of Thin Films," *Acta Mater.*, Vol. 52, pp. 3507~3517.
- (7) Kim, H.-G., Yi, J.-W., Kim, S.-W., Kim, K.-S. and Kumar, S., 2012, Fracture Toughness Measurement of Free-Standing Nanocrystalline Copper-Chromium Composite Thin Films, Submitted for Publication.
- (8) Pallares, G., Ponson, L., Grimaldi, A., George, M., Prevot, G. and Ciccotti, M., 2009, "Crack Opening Profile in DCDC Specimen," *Int. J. Fracture*, Vol. 156, pp. 11~20.
- (9) Masumura, R.A., Hazzledine, P.M. and Pande, C.S., 1998, "Yield Stress of Fine Grained Materials," *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 13, pp. 4527~4534.
- (10) Gertsman, V.Y., Hoffmann, M., Gleiter, H. and Birringer R., 1994, "The Study of Grain Size

- Dependence of Yield Stress of Copper for Wide Grain Size Range," *Acta Mater.*, Vol. 42, No. 10, pp. 3539~3544.
- (11) Lefebvre, S., Devincere, B. and Hoc, T., 2007, "Yield Stress Strengthening in Ultrafine-Grained Metals: A Two-Dimensional Simulation of Dislocation Dynamics," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 55, pp. 788~802.
- (12) Ashby, M.F. and Jones, F.R.H., 1980, *Engineering Materials I: An Introduction to Their Properties and Applications*, Pergamon Press.
- (13) Kumar, K.S., Suresh, S., Chisholm, M.F., Horton, J.A. and Wang, P., 2003, "Deformation of Electrodeposited Nanocrystalline Nickel," *Acta Mater.*, Vol. 51, No. 2, pp. 387~405.
- (14) Kang, Y.-L., Zhang, Z.-F., Wang, H.-W. and Qin, Q.-H., 2005, "Experimental Investigations of the Effect of Thickness on Fracture Toughness of Metallic Foils," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 394, pp. 312~319.
- (15) Lee, H.Y. and Yu, J., 2000, "Effects of Oxidation Treatments on the Fracture Toughness of Leadframe/Epoxy Interfaces," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 277, pp. 154~160.