

초소형 박막구조물의 기계적 특성 평가소자 설계 및 분석 기법

이세호, 박병우, 권동일
서울대학교 재료공학부

Analytical Methodology and Design Consideration of Advanced Test Structure for the Micromechanical Characteristics of MEMS

Se-Ho Lee, Byung-Woo Park, Dongil Kwon
School of Materials Science and Engineering, Seoul National University

Abstract In micromechanical system (MEMS) such as microactuators, thin film has been widely used as structural material. MEMS materials have difference with bulk in terms of mechanical properties. So, we design the advanced test structure for micromechanical properties of MEMS. The designed structure includes the newly developed pre-crack and it is driven by electrostatic force. To measure the fracture toughness, the pre-crack formation in the test structure is developed with conventional etching process. The advanced test structure is fabricated by application of semiconductor technology. After this, we propose analytical methodology to evaluate the fracture toughness and fatigue properties through a prediction of crack behavior from the variations of stiffness and frequency. Additionally, life time of a mirror plane used in DVD(Digital Video Disk) is measured as a function of capacitance and applied voltage under the accelerated conditions. Ultimately, we propose the method to evaluate the micromechanical reliabilities of the MEMS materials using the advanced test structure.

1. 서 론

마이크로센서 및 액추에이터와 같은 초소형정밀기계 시스템이 미세화 되는 추세에 따라 이를 구성하는 박막 소재는 기계적, 전기적으로 벌크 재료와 다른 특성을 나타내고 있다. 따라서 점차 박막구조물의 명확한 기계적 미소물성 평가에 대한 관심이 증대하고 있다. 초소형 미세구조물의 기계적 거동은 박막재료의 기계적 특성 평가에 대한 지식이 없이는 예측될 수 없을 뿐만 아니라 우수한 성능의 센서 및 액추에이터 설계와 제조가 불가능한 실정이다. 따라서 이를 구성하는 박막재료의 정확한 기계적 미소물성에 대한 연구가 매우 중요하다.

박막재료의 몇 가지 기계적 특성에 대한 측정기법과 수치가 보고되고 있으나, 평가용 미세구조물의 설계 및 제조에 있어서 어려움을 지니고 있으며, 벌크재료에서 큰 영향을 미치지 못하던 미세한 힘과 결합 등의 인자들에 대한 고려가 미흡하여 기존에 제시된 평가기법으로는 박막구조물의 신뢰성 있는 기계적 물성치의 평가가 어려운 상태이다. 압입시험을 이용하여 박막구조물의 기계적 물성의 측정이 이루어지고 있으나[1,2], 응력상태의 해석이 매우 복잡할뿐만 아니라 모재의 영향을 고려해야 하는 어려움을 지니고 있다. 이밖에도 몇몇 파괴특성에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으나[3], 시험편의 구조가 매우 복잡하며 파괴위치의 정확한 평가가 매우 어렵다고 보고되고 있으며, 하중인가의 어려움과 실험결과와

오차가 큰 단점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 박막재료의 기계적 특성 분석법을 기초로 하여 다양한 분야에 응용이 될 초소형 박막구조물용 재료의 기계적 미소물성의 분석을 위하여 초기 미세 균열이 도입된 평가용 미세 단위소자의 설계 및 제조공정을 제시할 것이며, 정전기력에 의한 박막구조물의 탄성계수 및 변위분석, 균열성장거동에 대한 해석 기법을 바탕으로 박막 구조물의 미소파괴인성의 정량적인 분석을 제시하였다. 또한 DVD용 반사막의 가속화 실험을 행함으로써 피로특성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 평가용 미세단위소자

2.1.1 설계

초소형 박막구조물의 기계적 특성을 명확히 분석하기 위하여, 표준화된 평가용 단위소자의 설계 및 제조가 매우 중요하다. 이를 위하여 평가용 박막구조물의 기하학적 형태, 크기, 미세구조, 작동상황, 하중인가, 전기적 성질 등의 다양한 인자의 고려가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 사항을 고려한 시험편의 설계를 하였다.

대부분의 박막구조물은 정전기력에 의하여 구동이 되고 있으며, 전기적 하중에 의한 영향을 받게된다. 박막의 기계적 특성을 평가하기 위하여 외부에서 기계적 하중인가에 의하여 미소부위의 특성을 측정하였으나[4], 이는 실제 박막구조물이 전기적 하중에 의한 반복동작을 하는 작동상황을 모사하는 데 적합하지 않은 한계를 지니고 있다. 이와는 다르게 본 연구에서는 정전기력에 의한 구동 및 하중인가가 가능한 기계적 특성 평가용 미세 단위소자를 설계하였으며, 충분한 전기적 하중을 전달하기 위하여 전극부분의 면적을 효율적으로 고려하였다.

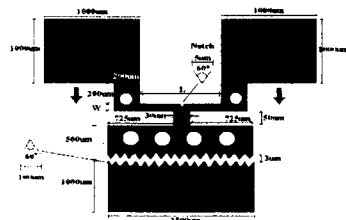


Fig. 1 Designed test structure for micromechanical properties

전기적 하중에 의한 작동 및 평가시 시험편의 복잡한 형상 및 제조공정이 수반되고 있으나, 본 구조물의 경우 일반적인 반도체 공정을 응용하여 비교적 간단하게 제조

할 수 있도록 기하학적 형태를 단순화하였다. 무엇보다도 본 단위소자의 가장 큰 특징은 탄성계수, 항복강도, 잔류응력 등의 평가와 더불어 단위소자 내부에 미세한 초기결함을 도입하여 파괴인성 및 피로 특성의 평가가 가능하게 설계하였다. 또한 마이크로 액츄에이터 등에 사용되는 박막구조물에 전압이 인가되었을 때 정전특성, 전하밀도, 저항 등의 다양한 전기적 특성의 측정이 가능하도록 고려하였다. 궁극적으로 기계적 특성의 종합적인 측정 및 분석을 수행할 수 있도록 단위 소자를 설계하였으며, 시험편의 길이, 폭, 두께 등의 크기를 달리함으로써 기하학적 인자에 의한 영향을 평가할 수 있게 하였다. 설계된 평가용 미세 단위소자는 fig. 1과 같으며, 충분한 정전기력의 인가 및 이를 통한 초소형 박막구조물의 신뢰성 있는 기계적 미소물성을 비교적 용이하게 평가할 수 있으리라 예상된다.

2.1.2 제조법

Fig. 1과 같은 초소형 박막구조물의 기계적 미소물성을 평가하기 위한 단위소자는 벌크 재료와는 다르게 표면미세가공 및 반도체 공정 기술을 이용하여 제조된다. 이러한 공정은 매우 복잡하며, 제조 공정시 다양한 인자들의 영향을 제어하는데 매우 많은 어려움을 가지고 있어서 보다 효율적이며, 간단한 공정 설계 및 기법이 요구된다. 본 평가용 단위소자의 제조를 위한 공정은 단지 1개의 포토마스크만을 이용하여 평가용 구조물의 제조를 가능하게 하였다. 실리콘 웨이퍼 위에 절연막으로 실리콘 산화막을 형성시킨 이후 박막구조물의 형성을 위한

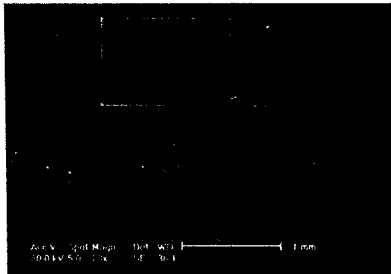


Fig. 2. SEM micrograph of test structure with Al film

회생층으로써 PSG를 APCVD에 의하여 2μm 증착하였다. 이후 Al 박막을 D.C. sputter를 이용하여 1μm 증착하였으며, e-beam, x-ray 등을 이용하여 포토마스크를 제조하였다. U.V aligner를 이용하여 증착된 시편의 포토리토그래피, 에칭 공정을 행한 후 PSG 위에 형성된 Al 박막을 건식식각을 통하여 원하는 형태의 단위소자를 형성시켰다. 이렇게 제조된 단위소자의 구동을 위하여 회생층인 PSG를 Buffered HF를 이용하여 제거시켰다. 이러한 공정시 정전기력에 의한 구동을 위하여 형성된 전극과 전극 사이의 크기가 매우 작기 때문에 정밀한 에칭조건을 만족시켜야하며, 본 평가용 단위소자의 경우 이에 대한 충분한 고려를 하였다. 이와 같은 공정을 통하여 얻어진 평가용 미세 단위소자의 구조는 Fig. 2와 같다.

2.2. 기계적 특성 분석

2.2.1 정전기력에 의한 변형거동

미세단위소자의 두 전극 사이에 인가된 전압은 정전기력을 발생시키며, 이러한 정전기력에 의하여 대부분의 마이크로 액츄에이터 및 센서 구조물이 구동이 된다. 정전기력(F_e)의 크기는 전극 사이의 거리(d), 유전상수

(ϵ) 및 인가된 전압(V)의 크기에 의하여 결정이 되며 이는 다음과 같이 표현된다(5).

$$F_e = \frac{nA\epsilon V^2}{d} \quad (1)$$

여기에서 n 은 전극의 개수를 나타낸다. 이를 통하여 평가용 단위소자의 설계시 전극면적의 고려가 매우 중요함을 알 수 있으며, 이러한 정전기력에 의한 구동시 발생하는 변위(δ)는 선형적인 변화거동을 보인다 가정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{F_e}{S} \quad (2)$$

여기에서 S 는 stiffness를 나타내며, $S=48EI/L^3$ 로 정의된다. 즉, 재료의 stiffness는 탄성계수(E), 구조물의 길이(L), 모멘트(I)에 영향을 받으며, 이때 $I=tw^3/12$ 로 표현된다. 여기에서 t 와 w 는 각각 두께와 폭을 나타낸다. 이와 같은 관계로부터 정전기력에 의한 박막구조물의 변위(δ)는 다음과 같이 정리되어 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{nA\epsilon V^2 L^3}{4Etdw^3} \quad (3)$$

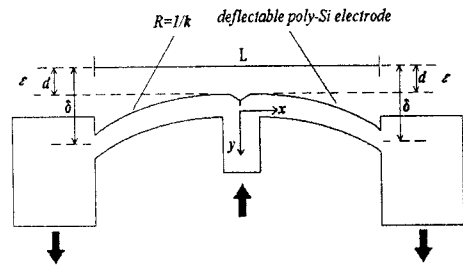


Fig. 3. Schematic drawing of deflection under the driving condition

이때 변위는 fig. 3에 나타낸 것처럼 정전기력에 의한 끝 부분의 변위를 나타내며, 단위소자 빔의 곡률(κ)과 다음의 관계를 나타낸다.

$$\kappa = \frac{2\delta}{L^2} \quad (4)$$

이와 같은 곡률값에 대한 분석은 다양한 박막구조물의 정전기력에 의한 구동변위 해석에 매우 중요한 요소가 되며, 각각의 위치에서 빔의 deflection curve의 해석을 통하여 구동소자의 동작 및 기계적 특성의 평가가 가능하다. 평가용 단위소자 빔 끝 부분의 변위에 대한 함수로써 위치에 따른 deflection curve($y(x)$)는 다음과 같이 표현된다(6).

$$y(x) = \frac{\delta}{3} \left[3 - 4 \frac{L-x}{L} + \left(\frac{L-x}{L} \right)^4 \right] \quad (5)$$

이를 통하여 구동소자의 특정 위치에서 deflection 정도를 예측할 수 있으며, 본 평가용 단위소자의 경우 정전기력에 Fig. 3과 같은 형태를 보이리라 예상되며, 식 (3)-(5)를 이용하여 변위 및 곡률변화 거동에 대한 분석이 가능 할 것이다.

2.2.2 탄성계수

박막구조물 내부에 미소균열 등의 형성 및 성장은 재료의 stiffness를 감소시키며, 공명주파수의 변화를 유발한다. 일반적으로 공명주파수(f_r)는 다음과 같은 관계를 가지고 있다(5).

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{S/m} \quad (6)$$

여기에서 m 은 질량을 나타낸다. 공명주파수의 측정으로부터 박막구조물 소재의 탄성계수를 직접적으로 평가하

는 것은 어려운 일이다. 하지만 평가용 미세단위소자 빔 길이의 함수로써 공명주파수의 변화를 측정함으로써 박막구조물 소재의 탄성계수를 평가할 수 있다. 이는 앞에서의 stiffness와 식 (6)을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{tW^3E}{mL^3}} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 평가용 단위소자 빔의 길이 변화에 따른 공명주파수의 변화를 측정함으로써 탄성계수의 평가가 가능하다. 이러한 진동주파수와 재료의 미소 물성에 대한 관계를 응용하여 박막구조물의 제조 및 작동시 미세구조, 열팽창계수차이 등에 의하여 발생하는 잔류응력 및 반복동작에 의한 피로특성 등의 해석이 가능할 것으로 예상된다. 특히 잔류응력은 미세구조물의 변형 및 파손을 일으키는 요인으로 작용하며, 이에 대한 제어를 위한 연구가 비교적 활발히 이루어지고 있는 추세이다.

2.2.3 응력확대계수

박막구조물의 내부에 미소균열 존재시 전기적 하중에 의한 균열 첨단 부근의 응력장에 대한 해석은 응력확대계수의 평가에 의하여 이루어질 수 있다. 이에 대한 분석을 위하여 하중(F)에 따른 균열크기(a)와 compliance (C)변화에 대한 함수로써 균열전파에 대한 에너지방출율(G)을 다음과 같이 표현할 수 있다[7].

$$G = \frac{F^2}{2t} \left(\frac{dC}{da} \right) \quad (8)$$

Irwin의 분석식이 응력확대계수(K_I)에 관계함을 근거로 이를 적용하면 $G=K_I^2/E'$ 로써 표현된다. 여기에서 $E' = E/(1-\nu^2)$ 를 나타내며, 이를 식 8에 적용함으로써 compliance test에 의한 응력확대계수(K_I)의 변화를 분석할 수 있다.

$$K_I = \left[\left(\frac{E'F^2}{2t} \right) \left(\frac{dC}{da} \right) \right]^{0.5} \quad (9)$$

일반적으로 벌크 재료의 경우 균열길이의 함수로써 하중과 변위에 대한 관계로부터 응력확대계수를 평가할 수 있으나, 박막소재의 경우 공명주파수와 compliance 또는 stiffness 변화로부터 미소균열길이의 측정이 가능하며, 이를 응용하여 응력확대계수의 체계적인 해석이 이루어질 수 있다. 식 (6)을 통하여 박막구조물에 진동을 인가시킴에 따라 내부에 존재하는 미소균열의 생성 및 성장에 따라 stiffness가 감소하며, 이는 공명주파수의 감소를 가져오게 됨을 알 수 있다. 2.5nm의 미소균열 길이의 증가시 1Hz 정도의 공명주파수의 변화를 유발시킨다고 보고되고 있으며[8], 이를 바탕으로 정전기력에 의한 미소균열의 전파시 응력확대계수 크기의 변화와 공명주파수의 상관관계를 유도할 수 있게 된다. 또한 공명주파수 변화를 근거로 박막구조물 내부에 존재하는 미소균열의 전파속도를 분석할 수 있게 된다. 박막구조물의 경우 벌크 재료와 다르게 미소균열의 성장 및 거동에 대한 해석이 매우 어려우며, 비록 그 크기가 미소한 이 자라도 매우 큰 영향을 미치게 된다. 궁극적으로 평가용 단위소자 내부에 초기 도입된 균열의 진전 개시점의 측정과 인가된 하중 및 모멘트를 고려함으로써 미소파괴인성의 평가가 가능하다.

위에서의 분석에 대한 이해를 바탕으로 제안된 기계적 특성평가용 미세 단위소자의 하중인가 방향 기하학적 인자 및 균열 모양을 만족시키는 응력확대계수(K_I)와 균열임변위(δ)를 다음과 같은 식을 적용하여 구체화할 수 있다[9].

$$K_I = \frac{3LF_c}{2tw^2} \sqrt{\pi a} Y(a) \quad (10)$$

where $a = \frac{\delta}{w} \leq 1.0$.

$$Y(a) = \frac{1.99 - a(1-a)(2.15 - 3.93a + 2.7a^2)}{(1+2a)(1-a)^{1.5}}$$

이러한 분석은 벌크 재료의 기계적 특성 평가시 적용되는 관계식을 기초로 하였으며, 이에 대한 적절한 보안을 통하여 미세 박막구조물의 기계적 특성 분석에 적용될 수 있다.

2.2.3 피로특성

마이크로머시닝 기술로 제작된 반사막(mirror plane)은 CD 혹은 DVD(Digital Video Disk) 등의 데이터 저장기구와 표시소자 구동에 적용될 수 있는 가능성이 큰 기술이다. 본 연구에서는 기본적인 구조의 반사막 소자를 제작한 후 이 소자에 반복하중을 가한 후 박막의 전기적, 기계적 성질의 변화를 측정하여 피로특성을 평가하였다. 반사막 소자의 개략적인 공정도를 fig. 4에 나타내었다. 액츄에이터의 상하전극에 정전기력을 이용하여 굽힘 실험을 수행하기 위하여 소자에 반복응력을 가하는 가속실험을 위한 fig. 5와 같은 회로를 구성하였다. 전원 공급장치는 ED-330 DC Power Supply를 사용했으며, 가속주파수를 주기 위한 신호발생기는 50 MHz 까지 인가가 가능한 Wavetec 295를 장착했고, 신호발생기로부터 나오는 ± 15 volt의 전압을 증폭시키기 위하여 증폭단을 설계 및 제작하여 신호 인가회로에 설치하여 최대 ± 40 volt 까지 증폭이 가능하도록 하였다. 공진주파수의 변화를 측정시간대별로 소자방전을 행한 후에 C-V 측정을 하여 주파수대역의 변화를 점검하였다. 측정시간대별로 인가전압에 따른 공진주파수의 변화양상과 시간에 따른 소자의 전하축적량의 변화를 각각 fig. 6과 7에 나타내었다.

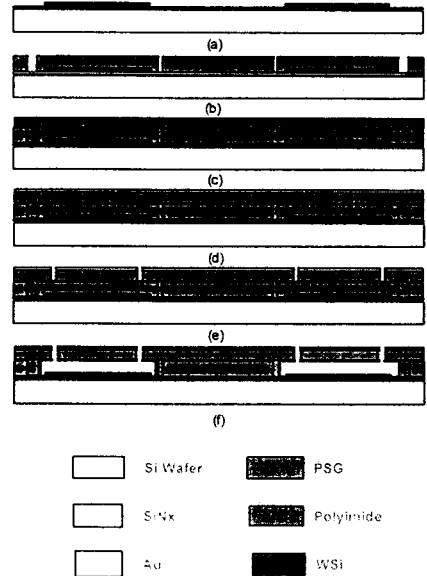


Fig. 4. ASM fabrication steps.: a) bottom electrode deposition, b) PSG coating and patterning, c) polyimide coating and curing, d,e) gold deposition and patterning, f) HF dipping.

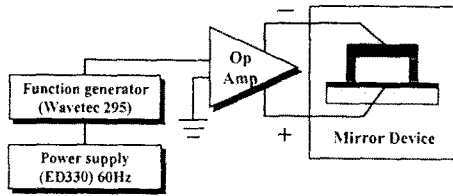


Fig. 5. Schematic drawing of acceleration test system.

Fig. 6에 나타난 것처럼 반사소자의 공진주파수는 가속주파수의 지속시간에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 반복동작에 의한 피로특성 실험시 반사막 내부의 미세 결함 및 영구굽힘 변형 발생으로 인한 stiffness 감소에 기인한 것으로 생각된다. 가속전압은 30 volt에서 45 volt까지 5 volt간격으로 인가하여 비교하였으며, 가속전압이 커질수록 공진주파수의 포화값에 이르는 시간이 적게 되는 경향을 보였다. 최소 공진주파수 대역으로 이르게 되는 측정값 변화의 기울기는 인가전압이 클수록 절대값이 크게 나타났으므로 이는 가속전압이 클수록 반사면에 주는 피로효과가 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

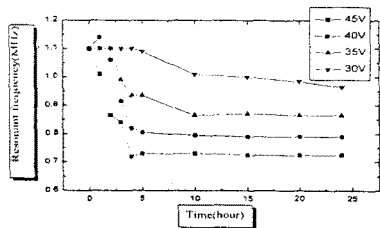


Fig. 6. The resonant frequency change as a function of time and voltage.

Fig. 7에 나타난 것처럼 전하축적량의 변화는 측정시간에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 그리고 공진주파수 측정값과 마찬가지로 전하축적량의 변화도 측정시간이 지남에 따라서 최대값에 포화되는 경향을 나타내었다. 이 전하축적량의 변화는 $C = \epsilon(A/d)$ (C : 전하축적량, ϵ : 유전율, A : 전극의 면적, d : 전극간 거리)로 표시되는 전하축적량에 있어서 상부 반사면의 하부 전극측으로의 영구굽힘 변형이 일어나서 상부전극과 하부전극사이의 공간이 감소함을 나타낸다.

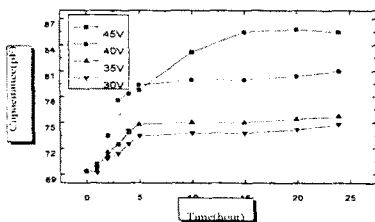


Fig 7. The capacitance changes as a function of time and driving voltages.

시간에 따른 공진주파수의 변화량과 전하축적량의 변화로부터 반사소자의 상부전극인 Au층에 영구적인 굽힘

이 일어났다는 것과 다른 하나는 상부전극인 Au 박막 내에 반복하중인가에 의한 원자재배열과 같은 박막의 내부적인 성질변화 등이 일어났음을 예측 할 수 있었다.

3. 결 론

초소형 전기기계시스템용 박막구조물의 기계적 특성 평가를 위하여 실제 작동 상황에 적합한 하중인가가 요구되며, 적절한 시편의 기하학적 형태와 초기균열의 도입 및 다양한 특성의 동시 복합적 평가가 가능해야한다. 본 연구에서는 이를 만족시키는 평가용 미세 단위소자의 설계와 구동원리를 제시하였다. 표면미세가공 및 반도체 공정을 응용하여 비교적 간편한 공정으로 평가용 단위소자의 제조가 가능하였다. 미세 박막구조물의 기계적 특성의 분석을 위하여 빔 이론을 근거로 변위특성을 전개하였으며, 공명주파수 및 파괴역학이론을 결합하여 균열 첨단 부근의 응력해석 및 미소 파괴인성 평가기법을 제시할 수 있었다. 또한 가속화 실험 기법을 통하여 실 구조물로서 DVD용 반사막의 피로특성을 평가하였다. 궁극적으로 박막소재의 다양한 기계적 특성 분석을 토대로 초소형박막구조물의 응용시 기계적 안정성에 대한 평가가 가능하리라 예상된다.

(참 고 문 헌)

- [1] C.J. Wilson, A. Ormeaggi and M. Narbutovskih, "Fracture testing of silicon microcantilever beams", J. Appl. Phys., 79(5), 2386, 1996
- [2] C.J. Wilson and P.A. Beck, "Fracture testing of bulk silicon microcantilever beams subjected to a side load", J. Micromechanical System, 5(3), 142, 1996
- [3] H. Ogawa, K. Suzuki, S. Kaneko, Y. Nakano, Y. Ishikawa and T. Kitahara, "Measurements of mechanical properties of microfabricated thin films", The 10th Annual International Workshop on MEMS, 430, 1997
- [4] P. Ericson and Jan-Åke Schweitz, "Micromechanical fracture strength of silicon", J. Appl. Phys., 68(11), 5840, 1990
- [5] R.R.A. Syms, B.M. hardcastle and R.A. Lawes, "Bulk micromachined silicon comb-drive electrostatic actuators with diode isolation", Sensors and Actuators, A63, 61, 1997
- [6] I. Schiele, J. Huber, B. Hillerich and F. Kozlowski, "Surface-micromachined electrostatic microrelays", Sensors and Actuators, A66, 345, 1998
- [7] M. Sakai and R.C. Bradt, "Fracture toughness testing of brittle materials", International Materials Reviews, 38(2), 53, 1993
- [8] J.A. Connally and S.B. Brown, "Slow crack growth in single crystal silicon", Science, 256, 1537, 1992
- [9] S. Murakami, Stress Intensity Factors Handbook, 1, 13, 1987