

다구찌 방법에 의한 유리-실리콘 양극접합 계면의 파괴인성치 측정 및 양극접합공정 조건에 따른 접합강도 분석

강 태 구* · 조 영 호†

(2001년 11월 12일 접수, 2002년 3월 8일 심사완료)

Measurement of Glass-Silicon Interfacial Fracture Toughness and Experimental Evaluation of Anodic Bonding Process based on the Taguchi Method

Tae Goo Kang and Young-Ho Cho

Key Words: Anodic Bonding(양극 접합), Fracture Toughness(파괴인성치), Bonding Strength Measurement(접합강도 측정), Taguchi Method(다구찌 방법)

Abstract

Anodic bonding process has been quantitatively evaluated based on the Taguchi analysis of the interfacial fracture toughness, measured at the interface of anodically bonded silicon-glass bimorphs. A new test specimen with a pre-inserted blade has been devised for interfacial fracture toughness measurement. A set of 81 different anodic bonding conditions has been generated based on the three different conditions for four different process parameters of bonding load, bonding temperature, anodic voltage and voltage supply time. Taguchi method has been used to reduce the number of experiments required for the bonding strength evaluation, thus obtaining nine independent cases out of the 81 possible combinations. The interfacial fracture toughness has been measured for the nine cases in the range of 0.03~6.12 J/m². Among the four process parameters, the bonding temperature causes the most dominant influence to the bonding strength with the influence factor of 67.7%. The influence factors of other process parameters, such as anodic voltage and voltage supply time, bonding load, are evaluated as 18%, 12% and 2.3%, respectively. The maximum bonding strength of 7.23J/m² has been achieved at the bonding temperature of 460°C with the bonding load of 45gf/cm², the applied voltage of 600V and the voltage supply time of 25minutes.

1. 서론

실리콘과 유리의 양극접합(anodic bonding) 기술^(1,2)은 가속도계, 압력센서 또는 마이크로자이로스코프 등 마이크로머신 소자⁽³⁻⁵⁾의 밀봉접합

(hermetic sealing) 및 진공 패키징에 널리 사용되고 있다. 이러한 양극접합된 마이크로머신 소자의 신뢰도(reliability) 및 안정성(stability)을 평가하기 위해서는 접합강도에 관한 정량적인 평가기준과 이에 관한 실험적 검증이 요구된다. 지금까지 양극접합에 관한 평가기준으로 접합면적⁽²⁾, 기밀성(gas-tightness)⁽³⁾, 인장강도^(7,8) 및 표면 에너지(surface energy)⁽⁹⁾ 등이 사용되었다. 이 중 접합면적과 기밀성은 양극접합의 기계적 강도를 나타내는 직접적인 표현이 될 수 없다는 문제를 내포하고 있으며, 인장강도는 인장시험에서의 하중중

* 회원, 한국과학기술원, 디지털나노구동연구단

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원, 디지털나노구동연구단

E-mail : dnc@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

건과 시편의 기하학적 형상(specimen geometry)에 크게 좌우되는 값으로 접합강도를 나타내는 일괄된 표현으로 보기 힘들다. 더욱이, 인장강도 시험은 취성(brittle) 박막재료(thin material)의 접합계면(interface)에서의 접합강도 측정시 시편의 준비와 측정 과정에 많은 어려움이 있다. 이에, 본 논문에서는 접합강도의 평가기준으로서 시편의 기하학적 형상과 하중 조건에 의한 영향이 민감하지 않은 계면파괴인성치(interfacial fracture toughness)를 사용하며, 계면파괴인성치의 측정을 위해 블레이드(blade)가 미리 삽입된 형태의 블레이드시험(blade test) 시편을 고안하였다. 또한, 접합하중, 온도, 전압, 전압인가시간 등 4가지의 양극접합 공정인자에 따른 접합강도를 분석함에 있어서 Taguchi 방법을 이용하여 실험횟수를 줄였을 뿐 아니라, 접합강도에 영향을 주는 접합공정 인자(bonding process parameter)의 민감성(sensitivity)을 분석하였다. 이러한 민감성 분석으로부터, 접합 강도에 공정의 각 인자가 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 최대 접합강도를 갖는 최적의 공정조건을 분석하였다.

Table 1 Anodic bonding conditions and process parameters

Process Parameters	Bonding Condition ID		
	#1	#2	#3
Bonding Load [gf/cm ²]	45	150	250
Bonding Temperature [°C]	300	380	460
Anodic Voltage [V]	400	600	800
Voltage Supply Time [min]	15	20	25

2. 시험 시편의 설계 및 계면 파괴 역학

기존의 블레이드 시험법에서는 시편을 제작한 후 접합면 사이로 얇은 블레이드를 강제로 밀어 넣는 방법을 사용하여 앞서와 같은 계면의 균열을 유도하는 하중을 발생시켜 왔다. 이와 같이 이중 재료를 접합한 후 계면에 블레이드를 삽입하는 기존의 블레이드시험 시편 및 실험방법과는 달리, 본 연구에서 제안하는 블레이드시험 시편 및 실험방법은⁽¹⁰⁾ Fig. 1에 나타난 바와 같이 이중 재료의 접합 이전에 미리 얇은 블레이드를 두 재료 사이에 삽입하고 나서 접합하중을 가하여 접합을 수행한다. 접합 후 접합하중을 제거하면, 미리 삽입되어 있던 블레이드가 계면의 균열(crack)을 유도하는 하중을 발생시키는 역할을 하게 된다. 본 논문에서 제안하는 시편과 실험방법은 기존의 블레이드 시험 및 실험방법 보다 분명한 균열의 가장자리(crack edge)를 나타내며, 균열진전(crack propagation)의 재현성 있는 측정을 가능하게 한다. 뿐만 아니라, 이 방법은 높은 접합 강도(bonding strength)를 가지는 취성재료간의 접합계면에 발생하는 균열진전의 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

Table 1은 접합하중, 온도, 전압 및 전압인가시간 등 양극접합의 네 가지 공정 인자에 대해 각각 서로 다른 세가지 조건으로 구성된 기존의 접합 조건을 나타내고 있다. 이들 조건들에 대해

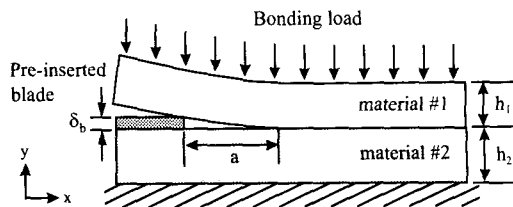


Fig. 1 Proposed blade test specimen with pre-inserted blade: two dissimilar material layers with a pre-inserted blade have been pressurized and bonded anodically: *a* denotes the crack length

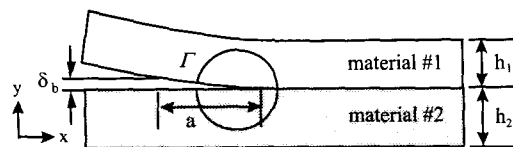


Fig. 2 A crack model of the blade test specimen of Fig. 1

모두 접합시험을 수행할 경우 총 81가지의 시편에 대한 실험적 연구를 수행하여야 한다. 그러나, Taguchi방법을 이용하여 Table 2에 나타나 있는 바와 같이 Table 1의 조건들에 대한 직교열(orthogonal array)⁽¹¹⁾을 적용할 경우 81가지의 경우의 수가 9가지로 줄어들게 된다. 따라서, Table 1에 나타나 있는 접합 조건들을 사용하여 강도 평가를 수행하기 위해서는 총 9가지의 실험만을 수행하면 된다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 도시한 시험 시편의 이론적 균열 모델을 나타낸다. 두 가지 재료가 접합된 형태의 외팔보의 경우, 접합된 두 재료 사이의 계면을 따라 균열이 진전되는 데에 필요한 계면 파괴인성치 또는 에너지 방출율(energy release rate), G , 값은 선형 탄성 재료의 경우 두 재료 사이의 계면 균열을 따라 J 적분 (J-integral)⁽¹²⁾을 함으로써 구할 수 있다.

$$G = J = \int_{\Gamma} \left(w dy - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (1)$$

여기서 s 는 적분 구간을 나타내며, x 와 y 는 Fig. 2에서 정의된 좌표를 각각 나타낸다. 또한, 식 (1)의 Γ 와 t_i 및 u_i 는 균열선단(crack-tip)을 포함하는 임의의 적분경로(integration path)와 적분경로의 트랙션 벡터(traction vector) 및 변위 벡터(displacement vector)를 각각 나타낸다. 또한 식 (1)의 w 값은 아래의 식 (2)와 같이 정의되는 변형률 에너지 밀도(strain energy density)를 나타낸다.

$$w = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \quad (2)$$

여기서 σ_{ij} 와 ϵ_{ij} 는 각각 응력과 변형률 텐서를 나타낸다.

블레이드시험 시편의 계면파괴인성치는 Fig. 2의 이론적 모델에 대한 Airy 응력함수 (Airy stress function)로부터 유도된 응력(σ_{ij}), 변형률(ϵ_{ij}), 트랙션(t_{ij}) 및 변위(u_{ij})를 식 (1)과 식 (2)에 대입함으로써 아래와 같이 구할 수 있다.

$$G = \frac{3h_1^3 \delta_b^2}{c_1 a^4 (1 + \gamma \eta^3)} + \frac{c_1 h_1 \sigma_o^2}{16(1 + \gamma \eta)^2} \times \left[1 - \frac{\gamma(1 + \eta)(1 + \gamma \eta^2)}{(1 + \gamma \eta)} D_o h_2 + \frac{\gamma}{3\eta} \left\{ \gamma \eta^3 + 3\gamma \eta^2 \frac{(1 - \gamma \eta^2)}{2(1 + \gamma \eta)} + 3\gamma \eta \frac{(1 - \gamma \eta^2)^2}{4(1 + \gamma \eta)^2} + \eta^2 \frac{1 + 2\gamma \eta + \gamma^2 \eta^2 (4 + 6\eta + 3\eta^2)}{4(1 + \gamma \eta)^2} \right\} (D_o h_2)^2 \right] \quad (3)$$

여기서 δ_b 는 미리 삽입된 블레이드의 두께를, a 는 균열의 진전 길이를, h_i 는 i 번째 재료의 두께를 각각 나타낸다. 또한, 식 (3)의 c_i 는 i 번째 재료의 연성(compliance)을, γ 는 재료간 연성비를, η 는 재료간 두께의 비를, σ_o 는 두 재료 사이의 열팽창 계수의 차이로 인해 발생하는 잔류응력을, D_o 는 보의 두께 인자를 각각 나타내며, 이들은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$c_i = \frac{8(1 - \nu_i)}{E_i} \quad (4a)$$

$$\gamma = \frac{c_2}{c_1} \quad (4b)$$

$$\eta = \frac{h_1}{h_2} \quad (4c)$$

$$\sigma_o = \frac{E_i}{1 - \nu_i} (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \quad (4d)$$

$$D_o = \frac{(1 + \eta^2) h^2}{2\eta(\gamma I_1 + I_2)} \quad (4e)$$

여기서 E_i 는 탄성 계수(Youngs modulus)를, ν_i 는 포아송의 비(Poissons ratio)를, α_i 는 열팽창 계수를, ΔT 는 주변의 온도와 접합온도의 차이를 각각 나타낸다. 또한, I_1 과 I_2 는 각각 아래와 같이 표현되는 두 재료의 단면 모멘트(cross-sectional moment)를 나타낸다.

$$I_1 = \frac{h_1^3}{12} \left[1 + 3 \left\{ \frac{(1 + \eta)}{\eta(1 + \gamma \eta)} \right\}^2 \right] \quad (5a)$$

$$I_2 = \frac{h_2^3}{12} \left[1 + 3 \left\{ \frac{\gamma \eta(1 + \eta)}{(1 + \gamma \eta)} \right\}^2 \right] \quad (5b)$$

3. 시험시편의 제조 및 양극접합의 계면파괴인성치 측정

계면파괴인성치의 측정을 위한 본 연구의 블레이드시험 시편은 Fig. 3과 같이 접합하중, 온도, 전압 및 전압인가시간을 각각 독립적으로 조절할 수 있는 접합 장치를 사용하여 제작하였다. Table 2에 나타나 있는 각각의 접합 조건에 대해 시험 결과의 재현성(constistance)과 안정성(stability)을 평가하기 위하여 동일 조건하에서 3개씩의 시험 시편을 제작하였으며, 제조 공정에 있어서는 517 μm 두께의 Pyrex 7740 유리기판(재료#1)와 535 μm 두께의 실리콘 기판(재료#2)의 사이에 80 μm 두께의 알루미늄 블레이드를 미리 삽입하였다. 측정 가능한 정도의 균열진전 길이를 발생시키기 위한 블레이드의 두께는 실험적인 방법을 사용하여 80 μm 로 결정하였다. 또한, 균열 진전에 의한 가장자리 효과(edge effect)를 줄이기 위해 실리콘 기판의 크기(15 \times 40mm²)를 Pyrex 유리 기판의 크기(20 \times 50mm²)보다 작게 결정하였다.

실리콘과 Pyrex 7740 유리 기판의 양극접합에 있어서는 두 재료의 열팽창 계수가 거의 일치함으로써 열응력의 효과는 무시될 수 있다($\sigma_o \approx 0$). 이 경우에 있어서 식 (3)의 계면파괴인성치는 아래의 식 (6)과 같이 단순화 되어진다.

$$G_c = \frac{3h_1^3\delta_b^2}{c_1a^4(1+\gamma^3)} \quad (6)$$

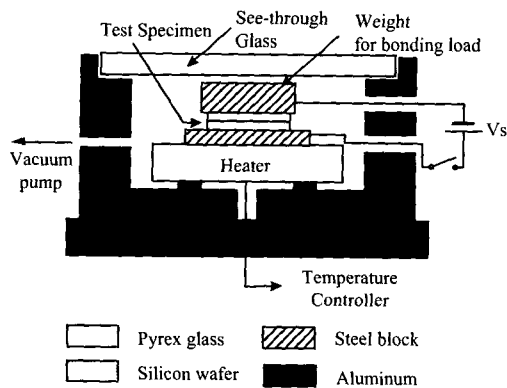


Fig. 3 Apparatus for the anodic bonding with controlled bonding load, temperature, anodic voltage and voltage supply time

여기서 a 는 시험 시편으로부터 측정된 균열의 진전 길이를, δ_b 는 80 μm 의 블레이드 두께를, h_1 은 Pyrex 유리 기판의 두께인 517 μm 를 나타내며, c_1 , γ 및 η 는 식 (4a), (4b) 및 (4c)에서 정의된 바와 같다.

Fig. 4는 시험 시편 상에 나타난 균열의 진전을 나타내는 사진이며, 각각의 시험 시편으로부터 측정된 균열의 진전 길이를 Table 3에 정리하였다. Table 3의 균열진전 길이의 분포는 본 논문에서 제안하는 새로운 블레이드 시험법의 재현성과 안정성을 잘 보여주고 있다. Table 4에 정리한 계면파괴인성치는 측정된 균열 진전 길이 값을 사용하여 식 (6)으로부터 계산한 값들이다. 아홉가지 접합 실험의 경우로부터 측정된 계면파괴인성치는 0.03~6.12 J/m²의 범위를 나타내었다.

Table 2 Test specimens fabricated by nine anodic bonding conditions, resulted from the Taguchi analysis⁽¹¹⁾ of Table 1

Specimen No.	Bonding Condition ID of Table 1			
	Load	Temperature	Voltage	Time
1	#1	#1	#1	#1
2	#1	#2	#2	#2
3	#1	#3	#3	#3
4	#2	#1	#2	#3
5	#2	#2	#3	#1
6	#2	#3	#1	#2
7	#3	#1	#3	#2
8	#3	#2	#1	#3
9	#3	#3	#2	#1

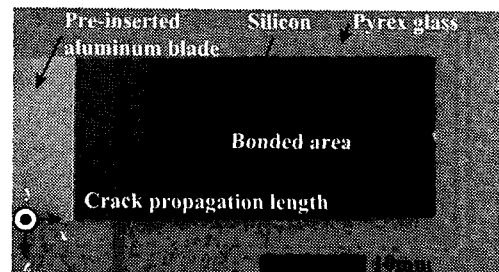


Fig. 4 Interfacial crack line propagated from the pre-inserted blade edge into the bonded area

Table 3 The crack propagation length, measured from the repeated test of specimens

Specimen No.	Crack Propagation Length [mm]			Mean Value (Distribution)
	Test I	Test II	Test III	
1	28.5	27.4	27.8	27.9(0.21)
2	12.7	11.7	12.6	12.1(0.24)
3	8.1	6.3	7.4	7.3(0.57)
4	17.0	17.3	18.4	17.6(0.36)
5	15.5	17.5	15.7	16.2(0.81)
6	13.1	12.6	12.5	12.7(0.07)
7	24.7	23.2	23.0	23.6(0.57)
8	18.5	19.0	18.0	18.5(0.17)
9	12.0	12.0	12.4	12.1(0.03)

Table 4 The interfacial fracture toughness, deduced from the measured crack propagation length of Table 3

Specimen No.	Interfacial Fracture Toughness [J/m^2]			Mean Value (Distribution)
	Test I	Test II	Test III	
1	0.028	0.032	0.031	0.030(0.000)
2	0.741	1.029	0.766	0.845(0.016)
3	4.482	7.450	6.430	6.121(1.516)
4	0.220	0.237	0.162	0.206(0.001)
5	0.330	0.208	0.316	0.285(0.002)
6	0.630	0.736	0.747	0.704(0.002)
7	0.049	0.064	0.066	0.059(0.000)
8	0.157	0.142	0.176	0.158(0.000)
9	0.895	0.895	0.785	0.858(0.002)

Table 5 Influence of the process parameters on the bonding strength

Process Parameters	Contribution Ratio [%]
Bonding Temperature [$^{\circ}C$]	67.7
Anodic Voltage [V]	18.0
Voltage Supply Time [min]	12.0
Bonding Load [gf/cm^2]	2.3

4. 양극접합공정의 주요 공정인자 분석 및 토의

양극접합공정의 평가를 위해서, 본 논문에서는 Taguchi 해석⁽¹¹⁾을 수행하였다. 접합공정 조건 (Table 2)과 접합강도(Table 4) 사이의 상관관계를 규명하기 위해 Taguchi 해석을 통해 Table 5와 Fig. 5를 구하였다.

Table 5는 접합강도에 대한 공정 인자의 영향을 정량화 한 것으로서, 접합온도가 접합강도에 영향을 주는 가장 주된 공정인자라는 것을 나타내고 있다. 또한, 높은 인가전압과 높은 접합하중은 접합 속도^(13,14)와 접합 면적^(2,13,14)의 향상을 가져올 수는 있으나, Table 5에서 알 수 있는 바와 같이, 접합하중, 인가전압 및 전압인가시간 등의 여타 공정 변수들이 접합강도의 향상에 미치는 영향은 접합온도에 비해 미약한 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 접합강도에 대한 공정인자들의 민감도를 나타낸다. 평균 SN비값(average SN ratio values)⁽¹¹⁾의 범위 또는 평균 SN비선(average SN ratio line)의 기울기의 크기는 접합 강도에 대한 공정 인자들의 민감도를 나타내는 척도이며, 기울기의 부호는 공정 인자가 접합 강도에 미치는 효과의 방향을 나타낸다. 즉, Fig. 5에서 평균 SN비선의 기울기가 양의 값을 가지면, 공정인자의 값이 증가할수록 접합강도도 강해지는 것을 의미하며, 음의 기울기 값은 그 반대를 나타낸다.

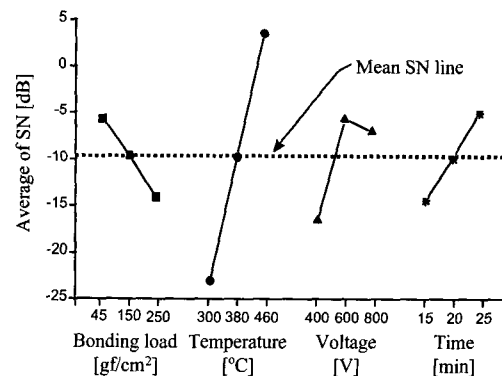


Fig. 5 Comparison of the average SN(signal-to-noise)⁽¹¹⁾ values, indicating the effect of bonding conditions and process parameters on the interfacial fracture toughness

Table 6 Results of the additional experiment, performed at the bonding condition of 460°C, 45gf/cm², 600V and 25minutes

	Test I	Test II	Test III	Mean Value (Distribution)
Measured Crack Length [mm]	7.2	6.9	7.1	7.07(0.12)
Interfacial Fracture Toughness [J/m ²]	6.61	7.96	7.11	7.23(0.56)

Fig. 5에서 접합온도가 가장 큰 SN비값의 범위를 나타내고 있으며, 이것은 접합온도가 접합강도에 가장 민감한 공정조건이라는 것을 나타낸다. Table 5에서도 마찬가지로 접합온도가 접합강도에 영향을 주는 가장 주된 인자라는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라, Fig. 5의 접합온도에 대한 SN선의 기울기가 양의 값을 보이는 것은 접합온도가 높아지면 질수록 접합강도가 강해진다는 것을 나타낸다.

또한, Fig. 5에서는 접합강도에 미치는 영향이 그다지 심각하지는 않지만, 접합하중이 증가할수록 접합강도가 약해지는 것을 알 수 있는데, 이러한 결과는 미리 삽입된 블레이드(Fig. 1)에 의해 발생한 부수적인 접합하중에 의한 것이라고 할 수 있다. 즉, 블레이드에 의해 발생하는 부수적인 접합하중은 블레이드의 끝 부분이 재료#1의 지지대 역할을 함으로써 재료#1에 부수적인 굽힘 모멘트를 발생시키는 것이다. 이러한 블레이드의 끝부분에서 발생한 굽힘 모멘트는 접합공정 중 두 재료간의 완전한 접촉을 방해하여 기대 이상의 큰 초기 균열 길이(a)를 발생시키게 된다. 만일 접합하중이 재료#1에 균일하게 가해질 수 있다면, 접합되어지는 두 재료사이에 보다 완전한 접촉을 제공함으로써 접합강도는 증가하게 될 것으로 기대된다.

이상과 같은 Fig. 5의 민감도 해석을 근거로 하여, Table 2에서 이미 수행한 조건에는 포함되어 있지 않은 460°C, 45gf/cm², 600V 및 25분의 접합 조건이 최대 접합강도를 가지게 되는 조건임을 예측할 수 있다. 이러한 최대접합강도에 대한

공정조건을 평가하기 위하여 본 논문에서는 앞서 예측한 최대접합강도 조건에 대하여 추가 실험을 수행하였으며, 그 결과로 Table 6에 나타낸 바와 같은 반복적인 실험 결과를 얻었다. 이 추가적인 실험 결과(Table 6)와 앞서의 실험 결과(Table 3 및 Table 4)를 비교하여 보면, 앞서 예측한 바와 같이 최대 접합 강도 조건이 7.23 J/m²의 최대 접합강도를 가지는 최적의 접합조건이라는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 계면파괴인성치를 사용하여 접합의 정도를 평가하는 실험적인 방법을 제안하였다. 계면파괴인성치의 측정을 위한 새로운 블레이드 시험 시편을 설계하였으며, 파괴역학에 근거한 시험시편의 이론적 모델을 해석하였다. 기존의 블레이드시험 시편에 비하여, 본 논문에서 제안하는 시험시편은 보다 선명한 균열 가장자리를 제공하여 재현성 있는 균열진전 길이를 측정할 수 있으며, 이로 인해 보다 재현성 있고 안정적인 시험 결과를 얻을 수 있었다. 실험적 연구에 있어서는 Taguchi 방법을 사용하여 기존의 양극 접합 조건과 접합강도를 평가하기 위해 필요한 실험의 경우의 수를 줄였으며, 접합하중, 온도, 전압 및 전압인가시간의 네 가지 양극접합의 공정인자에 대해 서로 다른 접합조건으로 시험 시편을 제작하고 이들의 계면파괴인성치를 각각 측정하였다. 실험 결과의 Taguchi 해석을 통하여 네 가지의 서로 다른 접합 공정 인자들 중 접합 온도가 양극접합의 강도에 영향을 주는 가장 주된 인자라는 것을 실험적으로 입증하였으며, 접합강도에 영향을 주는 양극접합 조건의 효과를 각각 정량적으로 평가하였다. 실험 결과의 Taguchi 해석을 통하여, 계면파괴인성치는 460°C의 접합 온도에서 45gf/cm²의 접합 하중을 가해주면서 600V의 인가전압을 25분동안 가해주는 양극접합 조건일 때 최대가 됨을 알 수 있었다. 추가실험을 통하여 최대의 접합강도를 위한 최적의 접합조건에서의 계면파괴인성치는 7.23J/m²으로 나타났다.

후 기

본 논문은 과학기술부에서 주관하는 창의적연구진흥사업의 일환인 "생체모사를 응용한 디지털 나노구동기판의 구현에 관한 연구"의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Albaugh, K.B. and Cade, P.E., 1988, "Mechanisms of Anodic Bonding of Silicon to Pyrex," *Tech. Dig. of Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 109~110.
- (2) Anthony, T.R., 1985, "Dielectric Isolation of Silicon by Anodic Bonding," *J. Appl. Phys.*, Vol. 58, No. 3, pp. 1240~1247.
- (3) Audet, S.A. and Edenfeld, K.M., 1997, "Integrated Sensor Wafer-Level Packaging," *Int. Con. on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 287~289.
- (4) Henmi, H., Shoji, S., Shiji, Y., Yoshimi, K. and Esashi, M., 1994, "Vacuum Packaging for Microsensors by Glass-Silicon Anodic Bonding," *Sensors and Actuators*, A43, pp. 243~248.
- (5) Esashi, M., Ura, N. and Matsumoto, Y., 1992, "Anodic Bonding for Integrated Capacitive Sensors," *Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 43~48.
- (6) Mack, S., Baumann, H. and Gösele, U., 1997, "Gas Tightness of Cavities Sealed by Silicon Wafer Bonding," *Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 488~493.
- (7) Müller, B. and Stoffel, A., 1991, "Tensile Strength Characterization of Low-Temperature Fusion-Bonded Silicon Wafers," *J. Micromech. and Microeng.*, Vol. 1, pp. 161~166.
- (8) Abe, T., Takei, T., Uchiyama, A., Yoshizawa, K. and Nakazato, Y., 1990, "Silicon Wafer Bonding Mechanism for Silicon-on-Insulator Structures," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 29, No. 12, pp. L2311~L2314.
- (9) Maszara, W.P., Goetz, G., Caviglia, A. and McKitterick, J.B., 1988, "Bonding of Silicon Wafers for Silicon-on-insulator," *J. Appl. Phys.*, Vol. 64, No. 10, pp. 4943~4950.
- (10) 강태구, 조영호, 2001, "기판단위 밀봉 패키징을 위한 내압 동공열의 설계 및 강도 평가," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권 제1호, pp. 11~15.
- (11) Roy, R.K., 1990, *A Primer on the Taguchi Method*, Van Nostrand Reinhold.
- (12) Anderson, T.L., 1995, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, CRC Press.
- (13) Stengl, R., Tan, T. and Gösele, U., 1989, "A Model for the Silicon Wafer Bonding Process," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 28, No. 10, pp. 1735~1741.
- (14) Kanda, Y., Matsuda, K., Murayama, C. and Sugaya, J., 1990, "The Mechanism of Field-assisted Silicon-Glass Bonding," *Sensors and Actuators*, Vol. A21~A23, pp. 939~943.