

기판단위 밀봉 패키징을 위한 내압 동공열의 설계 및 강도 평가

강 태 구* · 조 영 호**
(1999년 8월 26일 접수)

Design and Strength Evaluation of an Anodically Bonded Pressurized Cavity Array for Wafer-Level MEMS Packaging

Tae Goo Kang and Young-Ho Cho

Key Words: Anodic Bonding(양극접합), Wafer-Level Packaging(웨이퍼 단위 패키징), Pressurized Cavity Packaging(내압 동공 패키징), MEMS(마이크로머신)

Abstract

We present the design and strength evaluation of an anodically bonded pressurized cavity array, based on the energy release rate measured from the anodically bonded plates of two dissimilar materials. From a theoretical analysis, a simple fracture mechanics model of the pressurized cavity array has been developed. The energy release rate (ERR) of the bonded cavity with an infinite bonding length has been derived in terms of cavity pressure, cavity size, bonding length, plate size and material properties. The ERR with a finite bonding length has been evaluated from the finite element analysis performed for varying cavity and plate sizes. It is found that, for an inter-cavity bonding length greater than the half of the cavity length, the bonding strength of cavity array approaches to that of the infinite plate. For a shorter bonding length, however, the bonding strength of the cavity array is monotonically decreased with the ratio of the bonding length to the cavity length. The critical ERR of 6.21J/m^2 has been measured from anodically bonded silicon-glass plates. A set of critical pressure curves has been generated for varying cavity array sizes, and a design method of the pressurized cavity array has been developed for the failure-free wafer-level packaging of MEMS devices.

1. 서 론

양극 접합 기술은 압력 센서,⁽¹⁾ 진동형 마이크로 자이로스코프⁽²⁾ 및 가속도계,⁽³⁾ 마이크로 펌프 및 마이크로 유체소자⁽⁴⁾ 등과 같은 미소소자의 밀봉 접합에 광범위하게 사용되어 왔다. 밀봉 접합된 미소소자의 양산을 위해서는 저압 또는 고압의 유체에 의해 채워진 상태의 동공열(cavity array)의 웨이퍼 단위 접합이 필요하다. 저가, 고

신뢰도 동공열 접합을 위해서는 요구되는 동공 압력에 견딜 수 있는 접합 강도를 유지하는 범위 내에서 동공 및 접합부의 최소 크기를 설계하여야 한다.

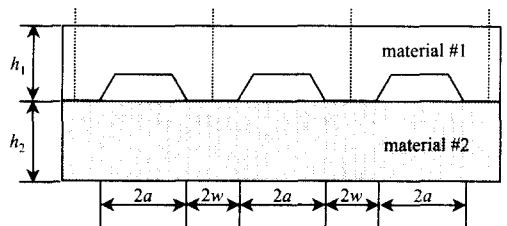


Fig. 1 Cross-sectional view of the pressurized cavity array, fabricated by the wafer-level anodic bonding of two dissimilar materials

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과
** 회원, 한국과학기술원 기계공학과
마이크로머신 및 마이크로시스템 연구실
E-mail : mems@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3038 FAX : (042)869-3050

본 논문에서는 서로 다른 두 재료를 기관단위로 양극 접합한 내압 동공열(Fig. 1)의 기계적 접합강도의 평가 방법과 치수설계의 지침을 제공하고자 한다. 또한, 본 논문에서는 양극 접합된 동공열의 기계적 접합강도는 이중 기관으로 제작된 시험시편⁽⁵⁾으로부터 임계 에너지 방출률(energy release rate)을 측정하고, 동공의 크기와 임계에너지 방출률의 측정치를 기준으로 하여 동공내 내압에 의해 동공열의 접합이 파괴되지 않기 위한 최소 접합면적 혹은 동공간의 간격을 설계하는 방법을 제시하였다.

2. 이론적 모델링 및 해석

Fig. 2(a)는 내외부간 상대 압력차(p)가 있는 양극 접합된 동공열 (Fig. 1)의 단위소자에 대한 물리적 모델(physical model)을 나타낸다. 계면 파괴 역학으로부터 두개의 서로 다른 선형 탄성 재료 사이의 동공은 균열(crack)로 생각할 수 있다. Fig. 2(a)의 경우, 동공의 높이(d)가 재료의 두께(h_1, h_2)와 동공의 크기($2a$)에 비하여 아주 작다고 가정하면, 중첩의 원리⁽⁶⁾를 적용하여 Fig. 2(b)와 같은 동가의 이론적인 균열 모델로 치환할 수 있다. 즉, Fig. 2(a)와 같은 내압을 받고 있는 물리적 모델을 Fig. 2(b)와 같은 외압을 받고 있는 이론적 모델로 변환하였다.

Fig. 2(b)에 도시한 접합길이(w)가 무한히 긴 경우, 무한 판의 계면을 따라 나타나는 균열 진전에 대한 에너지 방출률(G_i)⁽⁷⁾은 다음과 같이 표시된다.

$$G_i = \frac{c_i p^2 a^4}{6h_i^3} (1 + \gamma^3) \tag{1}$$

여기서, a, p 및 h_i 는 각각 균열의 길이, 동공에 가해지는 압력 및 i 번째 재료의 두께를 나타내며, γ 와 η 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \frac{c_2}{c_1} \tag{2a}$$

$$\eta = \frac{h_2}{h_1} \tag{2b}$$

여기서 c_i 는 아래 식 (3)과 같이 표현되는 i 번째 재료의 연성계수(compliance)이다.

$$c_i = \frac{8(1-\nu_i^2)}{E_i} \tag{3}$$

식 (3)에서 E_i 와 ν_i 는 각각 i 번째 재료의 탄성계수(Young's modulus)와 푸아송의 비(Poisson's ratio)를 나타낸다.

Fig. 2(b)에 도시된 접합길이(w)가 유한한 경우, 에너지 방출률⁽⁸⁾에 관한 이론적 해석해가 존재하지 않으므로 Fig. 3(a)와 같은 유한 요소 모델을 사용하여 분석하였다.

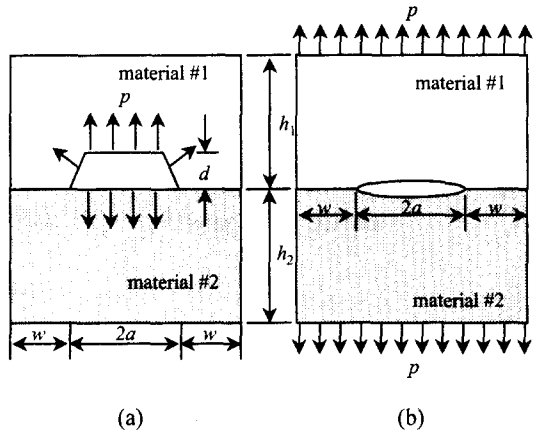


Fig. 2 Fracture mechanics models of the pressurized cavity cell: (a) physical model; (b) equivalent theoretical model

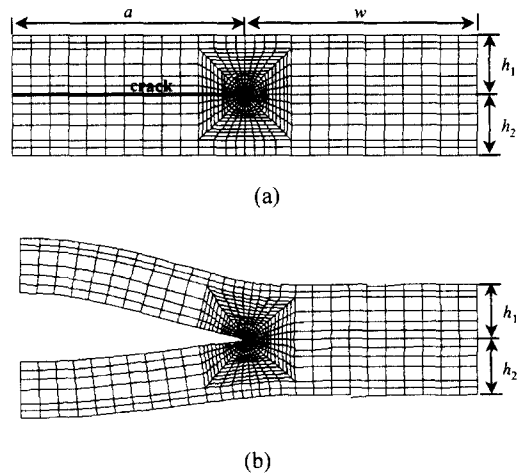


Fig. 3 Finite element analysis of an interfacial crack problem for the bonded plates with finite width: (a) finite element model; (b) result of a finite element analysis

유한 판의 에너지 방출률을 구하기 위해서, 위쪽 판의 재료와 아래쪽 판의 재료가 각각 Pyrex #7740 유리와 단결정 실리콘인 경우에 대하여, Fig.3(a)와 같은 유한 요소 모델의 a 와 h_2 를 각각 2mm와 500 μ m로 고정시켜 놓고 w/a 와 h_1/h_2 의 값을 변화시켜 가면서 반복적으로 유한요소 해석을 수행하였다. 각각의 경우에 대하여 Fig. 3(b)와 같은 유한 요소 해석 결과를 도출한 후 그 결과로부터 유한 판의 에너지 방출률(G_f)을 구하였다. Fig. 3(b)에 나타나 있는 바와 같이, 유한 평판의 경우 바깥쪽 경계부분의 응력 분포가 무한 판의 경우와 비교해 볼 때, 상당히 다르다는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서는 유한 요소 해석 결과로부터 구한 유한 판의 에너지 방출률(G_f)을 무한 판의 에너지 방출률(G_i)로 정규화(normalize)하였다. Fig. 4의 결과로부터, 유한 판의 에너지 방출률은 접합 넓이(w)가 동공 크기(a)의 반 이상이 되면 무한 판의 에너지 방출률로 근사화 할 수 있음을 알 수 있다.

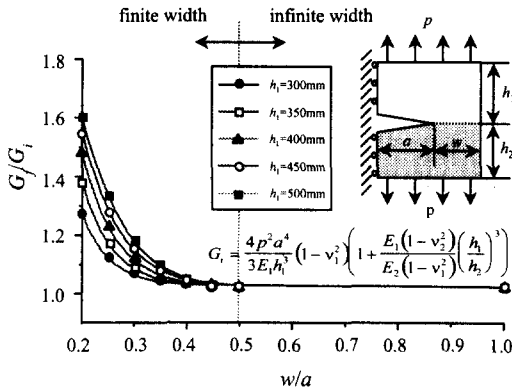


Fig. 4 The energy release rate, G_f , of the finite width plate and that, G_i , of the infinite width plate with an identical crack

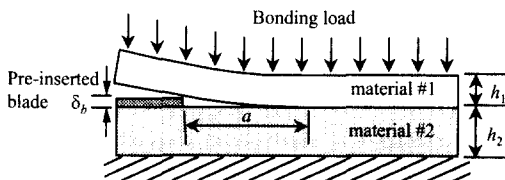


Fig. 5 Blade test specimen with a pre-inserted blade

3. 접합강도 측정시험

실험적 연구에서는 높은 압력 조건에 놓여 있는 양극 접합된 동공열의 접합 강도를 정량적으로 평가하기 위해서 Fig. 5와 같은 블레이드 시험 시편(blade test specimen)⁽⁵⁾을 사용하여 임계 에너지 방출률 (critical energy release rate)을 실험적으로 측정하였다. 시험 시편은 Pyrex #7740 유리 기판(재료 #1)과 단결정 실리콘 기판(재료 #2) 사이에 박막형 알루미늄 블레이드(blade)를 접합 계면에 미리 삽입한 후 양극 접합하여 제작하였으며, 이는 종전의 접합 후 블레이드를 삽입하던 경우에 비해 안정되고 일관성 있는 실험결과를 제공한다. 양극 접합은 45gf/cm²의 하중 조건에서 800V의 DC 전압을 25분 동안 가하여 주었으며, 온도는 460 $^{\circ}$ C로 하였다. 세 개의 시험 시편으로부터 균열 진전길이를 측정하였으며, 그 결과로부터 임계 에너지 방출률의 평균값, 6.21J/m²을 구하였다.

4. 내압 동공열의 설계

Fig. 2(a)에 도시한 바와 같이 동공 내외부의 상대 압력이 존재하는 양극 접합 동공열의 경우, 동공 내외의 상대압에 의한 에너지 방출률이 접합강도 시험에서 측정된 임계 에너지 방출률을 초과할 때 접합부의 기계적 파손이 발생한다. Fig. 4에 도시한 에너지 방출률 곡선과 블레이드 시험법으로 구한 임계 에너지 방출률로부터, h_1/h_2 및 w/a 의 값에 따라 접합부의 기계적 파손을 초래하지 않는 최대 임계 압력을 구할 수 있다.



Fig. 6 Measurement of the interfacial crack length, propagated from the blade edge into the bonded area

무한 판 또는 $w/a > 0.5$ 인 경우에는 식 (1)의 에너지 방출률에 관한 해석해가 동공의 압력에 관한 항을 포함하고 있으므로(Fig. 4) 기계적 파손이 일어나지 않는 범위 내에서의 최대 임계 압력(p_c)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_c = \left[\frac{6h_1^3 G_c}{c_1 a^4 (1 + \gamma^3)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서, G_c 는 Fig. 6의 블레이드 시험 시편으로부터 측정된 임계 에너지 방출률이다. 식 (4)의 임계 압력은 $w/a > 0.5$ 인 경우에 해당하며, 유한 판의 경우($w/a < 0.5$)에 대해서는 Fig. 4에 제시된 식(G_1)과 유한요소 해석의 결과(G_1/G_2)를 이용하여 임계 압력을 구하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

Fig. 7을 이용하면 두께(h_1, h_2)와 동공의 크기(a) 및 동공내의 압력(p)이 주어진 동공열에 대하여 접합면의 기계적 파손을 방지하기 위한 최소한의 동공열 사이의 거리, 즉, 접합 길이(w)를 결정할 수 있다. 또한, 동공열의 치수와 내압조건이 기술된 경우 동공열 계면의 기계적 파손 여부를 Fig. 7로부터 예측할 수 있다. 따라서 본 논문의 결과는 동공 내외부 상대 압력이 존재하는 기관단위 MEMS 소자의 접합 또는 패키징 설계 및 강도 평가에 응용이 가능하다.

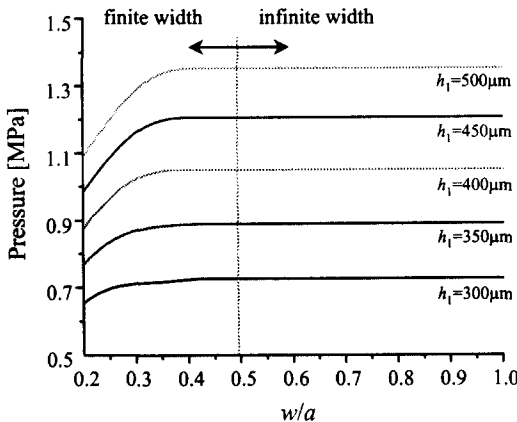


Fig. 7 Critical cavity pressure lines based on the bonding strength criterion in terms of energy release rate

5. 결론

본 논문에서는 내압이 존재하는 양극 접합 동공열의 강도를 평가하는 방법을 제시하였으며, 이를 근거로 하여 웨이퍼 수준의 MEMS 접합 또는 패키징에 적용할 수 있는 설계의 기준을 제공하였다.

이론적 연구에서는 두개의 서로 다른 선형 탄성 재료의 양극 접합으로 형성된 내압 동공열에 대한 파괴 역학적 모델을 유도하였다. 무한 판의 경우, 에너지 방출률을 계면균열의 길이와 재료의 성질 및 동공의 압력에 대한 함수로 구하였으며, 유한 판의 경우는 유한 요소 해석을 통해서 에너지 방출률을 평가하였다. 또한 유한 요소 해석으로부터, $w/a > 0.5$ 인 경우에 대해서는 유한 판의 접합강도가 무한 판의 접합강도로 근사화 될 수 있음을 알았으며, $w/a < 0.5$ 인 유한 판의 접합강도는 w/a 의 값에 따라 단조 감소한다는 것을 알 수 있었다.

마지막으로, 유리와 실리콘 웨이퍼를 양극 접합시킨 블레이드 시험 시편으로부터 측정된 임계 에너지 방출률 값을 사용하여, 기계적 파손을 방지할 수 있는 내압 동공열의 치수 설계 방법을 제시하였으며, 이는 마이크로 자이로스코프, 미소 압력 센서, 미소 공진 소자 등 내압동공열의 기관단위 MEMS 패키징에 적용이 가능하다.

후 기

본 연구는 국가선도기술개발 사업(G7)인 초소형 정밀기계기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 삼성종합기술원의 위탁연구인 마이크로 자이로 설계 및 패키징 기술개발과제의 일부로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Rogers, T., and Kowal, J., 1995, "Selection of Glass, Anodic Bonding Conditions and Material Compatibility for Silicon-Glass Capacitive Sensors," *Sensors and Actuators A* 46-47, pp. 113~120.
- (2) Lee, K.B., Yoon, J.-B., Kang, M.-S., Choi, Y.-H. Youn, S.-K., and Kim, M.S., 1996, "A Surface-micromachined Tunable Micro-gyroscope,"

- Proc. IEEE Workshop on Emerging Technologies and Factory Automation*, Kauai, Hawaii, pp. 498~502.
- (3) 고종수, 조영호, 광병만, 박관흠, “에어백용 압저항형 외팔보 미소 가속도계의 설계, 제작 및 시험,” *대한기계학회논문집*, 제20권, 제2호 (1996) pp. 408~413.
- (4) Gravesen, P., Branebjerg, J., and Jensen, O.S., 1993, “Microfluidics-a Review,” *J. Micromech. Microeng.*, 3, pp. 168~182.
- (5) Go, J.S., and Cho, Y.-H., 1998, “Experimental Evaluation of Anodic Bonding Process using Taguchi Method for Maximum Interfacial Fracture Toughness,” *Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Heidelberg, Germany, pp. 318~321.
- (6) Anderson, T.L., 1995, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, CRC Press, p. 65.
- (7) Suo, Z., and Hutchinson, J.W., 1990, “Interface Crack Between Two Elastic Layers,” *Int. J. of Fractures*, Vol. 43 pp. 1~18.
- (8) Liechti, K.M. and Chai, Y.-S., 1991, “Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness,” *J. of Appl. Mech.* Vol. 58, pp. 680~687.