

## 레이저 열-압착 본딩을 위한 압전 액추에이터로 구동되는 용융실리카 헤더의 취성특성에 관한 연구

이동원<sup>1,2</sup> · 하석재<sup>1</sup> · 박정연<sup>1</sup> · 윤길상<sup>†</sup>

한국생산기술연구원 금형기술그룹<sup>1,†</sup>

인하대학교 기계공학과<sup>2</sup>

### A study on the brittle characteristics of fused silica header driven by piezoelectric actuator for laser assisted TC bonding

Dong-Won Lee<sup>1,2</sup> · Seok-Jae Ha<sup>1</sup> · Jeong-Yeon Park<sup>1</sup> · Gil-Sang Yoon<sup>†</sup>

Molds & Dies Technology R&B Group, Korea Institute of Industrial Technology<sup>1,†</sup>

Department of Mechanical Engineering, INHA University<sup>2</sup>

(Received September 10, 2019 / Revised December 26, 2019 / Accepted December 31, 2019)

**Abstract:** Semiconductor chip is bonded to the substrate by melting solder bumps. In general, the chip bonding is applied by a Reflow process or a Thermo-Compression(TC) bonding process. In this paper, we introduce a Laser Assisted Thermo-Compression bonding (LATCB) process to improve the anxiety of the existing process(Reflow, TC bonding). In the LATCB process, the chip is bonded to the substrate by irradiating a laser with a uniform energy density in the same area as the chip to melt only the solder bumps and press the chip with a Transparent Compression Module (TCM). The TCM consists of a fused silica header for penetrating the laser and pressurizing the chip, and a piezoelectric actuator (P.A.) coupled to both ends of the header for micro displacement control of the header. In addition, TCM is a structure that can pressurize the chip and deliver it to the chip and solder bumps without losing the energy of the laser. Fused silica, which is brittle, is vulnerable to deformation, so the header may be damaged when an external force is applied for pressurization or a displacement difference is caused by piezoelectric actuators at both ends. On the other hand, in order to avoid interference between the header and the adjacent chip when pressing the chip using the TCM, the header has a notch at the bottom, and breakage due to stress concentration of the notch is expected. In this study, the thickness and notch length that the header does not break when the external force (500 N) is applied to both ends of the header are optimized using structural analysis and Coulomb-Mohr failure theory. In addition, the maximum displacement difference of the P.A.s at both ends where no break occurred in the header was derived. As a result, the thickness of the header is 11 mm, and the maximum displacement difference between both ends is 8  $\mu\text{m}$ .

**Key Words:** Brittle, Coulomb-Mohr's failure criterion, Fused silica, Laser assisted thermo-compression bonding, Piezoelectric actuator

### 1. 서 론

반도체 칩의 본딩 공정기술은 솔더 bump 간격 100  $\mu\text{m}$ 를 기준으로 리플로우(Reflow)공정과 열-압착(Thermo-compression, TC)공정으로 나뉜다. 리플로우 공정은 기판 상에 칩 정렬/안착 후 고온의 리플로우

오븐을 통과시킴으로서 솔더 bump를 용융하여 본딩이 이루어지고, 열압착공정의 경우 기판상에 칩 정렬 및 안착 후 히터로 가열된 가압 지그를 이용하여 칩 하나 하나에 개별적으로 열과 압력을 가하여 본딩이 이루어진다. 리플로우 공정은 대량 생산에 유리하나 솔더 bump 피치 100  $\mu\text{m}$  이하에서 이동 중 칩의 위치가 틀어짐 등으로 인해 단선/단락 불량(open/short failure)이 발생하기 쉬우며, 열압착공정

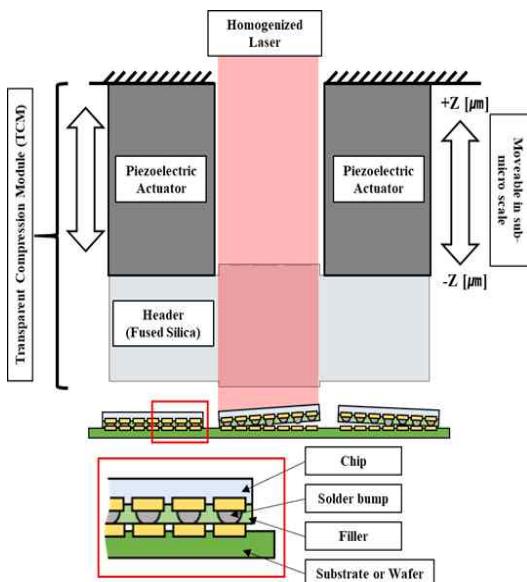
1, † 교신저자: 한국생산기술연구원 금형기술그룹  
E-mail: seviaygs@kitech.re.kr

은 리플로우 공정 대비 양산성이 감소하는 단점이 있다<sup>1)</sup>.

기존 공정의 단점을 개선하기 위한 Laser-Assisted Bonding(LAB)공정이 Jung 등에 의하여 제안되었다. LAB공정은 조사 면적에 대하여 균일한 에너지 밀도를 갖는 레이저(Homogenized Laser)를 이용하여 칩을 선택적으로 가열함으로써 본딩이 완성되며, 공정 시 칩의 이동이 적고, 열-압착 공정 대비 빠른 가열속도로 인하여 기존 공정의 단점을 보완한 차세대 본딩 기술이다<sup>2)</sup>.

본딩 공정의 외적인 문제로서 솔더 범프의 높이 편차에 기인한 칩의 기울어짐이 있다. 칩과 기판을 연결하는 솔더 범프는 제조 공정 내 오차에 의한 높이 편차를 지니고 있다. 솔더 범프가 갖는 직경의 편차로 인하여 솔더 범프 위의 칩은 임의의 방향으로 기울어지게 된다. 기울어진 칩을 수평의 지그로 가압 시 솔더 범프에는 수평방향의 분력이 작용하게 되고 이는 불량의 원인이 될 수 있으므로 칩의 기울어짐을 보정하여 가압하는 방법이 적용되어야 한다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 LAB 공정을 응용한 레이저 열-압착 본딩(Laser Assisted Thermo-Compression Bonding) 공정에 적용이 가능한 가압 지그인 헤더(Header)를 설계하였다.



**Fig. 1** Schematic of Transparent Compression Module for Laser Assisted Thermo-compression Bonding equipment

Fig. 1은 레이저 열-압착 본딩장치의 개요도이다. 레이저가 가급적 손실 없이 헤더를 통과하기 위하여, 헤더는 투명한 소재를 필수적으로 적용해야한다. 투명 소재의 경우 Polycarbonate, Poly(methyl-methacrylate), Poly(dimethyl silicone)등의 폴리머 계열과 SiO<sub>2</sub>를 기반으로 한 투명 glass계열, 그리고 SiO<sub>2</sub>기반이 아닌 Ceramic 계열 소재로 분류된다. 폴리머 계열은 헤더가 적용될 장비의 레이저 파장범위(970 ~ 1,070 nm)에서 열팽창하는 성질이 강하기 때문에 헤더용 소재로는 적합하지 않다. 따라서 상용 소재 중 열팽창 계수가 20 ppm/°C 이하인 투명 Glass 계열과 Ceramic 계열 소재를 대상으로 950 ~ 1,100 nm 파장에서 레이저 투과율, 열팽창계수, 굴절율, Knoop 경도를 비교하여 Fused Silica(HPFS 7980, Corning Inc., U.S)를 헤더의 소재로 적용하였다.

헤더 양단에는 피에조 액추에이터(Piezoelectric Actuator, PA)를 결합하여 양단의 변위를 마이크로 스케일 수준으로 제어함으로써 솔더 범프에 의한 칩의 기울어짐을 보정(Tilt align)할 수 있도록 하였다.

또한 헤더는 본딩 시 발생하는 하중에도 파손되지 않는 충분한 강도를 갖도록 설계되어야 한다. Fused silica는 취성재료로서, 취성재료는 연성재료와는 달리 탄성영역과 소성영역의 구분이 명확하지 않으며 항복직후 파단으로 이어지는 특성을 보이므로 적합한 파손이론을 적용하여 안전율을 고려한 설계가 이루어져야한다. Fused silica는 압축강도(1140 MPa)대비 낮은 인장강도(54 MPa)를 갖기 때문에 인장과 압축에서 성질이 다른 취성재료로 가정하고 쿨롱-모어의 파손 기준(Coulomb-Mohr failure criterion)을 적용하였다<sup>4)</sup>. 쿨롱-모어의 파손 기준에서 안전율(Safety Factor, S.F.)은 식(1)과 같이 극한 인장/압축강도와 최대/최소 주응력의 비로서 도출되며 본 연구에서는 S.F.=15 이상을 고려하였다.

$$S.F. = \frac{(\sigma_{ult})_t}{\sigma_{11}} + \frac{(\sigma_{ult})_c}{\sigma_{33}} \quad (1)$$

$(\sigma_{ult})_t$  : Ultimate tensile stress

$(\sigma_{ult})_c$  : Ultimate compressive stress

$\sigma_{11}$  : Maximum principal stress

$\sigma_{33}$  : Minimum principal stress

또한 본 논문에서는 30±10 μm 높이의 솔더 범프

위에  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  칩을 최대 500 N의 힘으로 가압하는 것으로 공정을 가정하고 설계를 진행하였으며 이때 솔더범프의 높이 편차에 의한 칩의 최대 기울어짐 각(tilt angle)은 약 0.2°이다.

## 2. 헤더의 설계

Fig. 2는 헤더의 개략적인 구조이다. 헤더는 레이저 투과부(A)와 PA의 결합을 위한 구조물(B)로 구성된다. A의 높이방향 단면적은 본 연구의 적용 대상이 되는 칩의 크기( $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ )와 동일하며, B의 너비(11 mm)는 PA가 레이저 경로의 방해가 되지 않도록 설정하였다. 상부노치길이( $t_2$ )는 PA의 접합자리의 표시를 위한 것이다. 이 때 헤더의 형상을 결정하는 변수는 총 두께( $H$ )와 노치 길이( $t_1$ )이다.

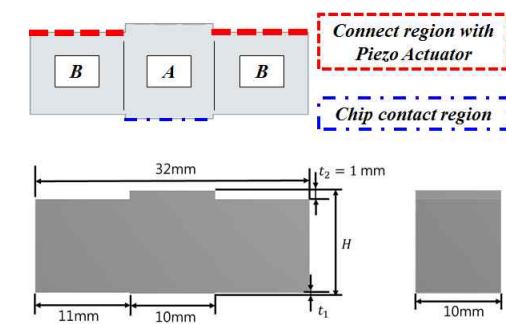


Fig. 2 Variables of fused silica header

### 2.1. 헤더 높이 $H$ 의 선정

#### 2.1.1. 유한요소해석 모델

헤더의 높이  $H$ 의 최소 치수를 도출하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 3은 해석에 적용된 형상이다. 헤더의 총 두께( $H$ )변화의 따른 응력 발생경향을 예측하기 위하여  $t_1$ 의 값은 0으로 하여 해석을 진행하였으며 적용된 총 두께의 범위는

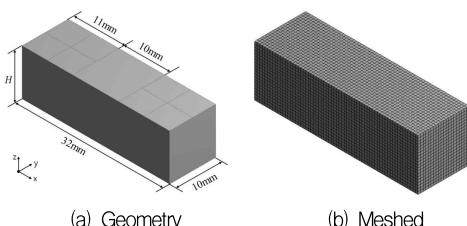


Fig. 3 Geometry and FE model applied to structural analysis for  $H$  selection

$5 \leq H \leq 15$ 이다. 유한요소 모델은 크기 0.5 mm의 유효면적 격자를 사용하여 구성하였으며, 생성된 요소의 개수는 25,600개, 절점의 개수는 111,489개이다. 해석에 적용된 Fused silica의 기계적 물성(HPFS 7980, Corning Inc., U.S.)은 Table.1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of Fused Silica(HPFS 7980)

Elastic (Young's) modulus	73 GPa
Shear modulus	32 GPa
Bulk modulus	35.9 GPa
Poisson's ratio	0.16
Density	2.20 g/cm <sup>3</sup>
Tensile strength	54 MPa
Compressive strength	1.14 GPa

#### 2.1.2. 경계조건

안전율을 고려한 헤더의 두께선정을 위해서는 본딩 시 외력에 의하여 헤더에 발생하는 응력 및 변형 거동을 예측하여야한다. 칩과 닿는 면적에 대하여 3축 방향(x, y, z축)에 대한 병진자유도를 0으로 하였고, 헤더 양단에는 본딩하중(500 N)을 분포하중으로 적용하였다. 실제의 경우 양단의 PA의 접합부의 중심이 너비방향(x축)의 선단에 정확히 일치하지 않을 확률이 높으므로 x축 방향으로 비틀림이 발생하도록 Fig. 4와 같이 적용하였다.

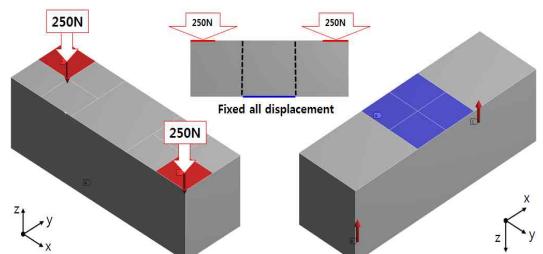


Fig. 4 Variables of fused silica header

#### 2.1.3. 해석결과

Fig. 6은 헤더의 총 두께( $H$ )의 선정을 위한 구조해석의 대략적인 결과를 나타내고 있다. 처짐량(Deflection)의 관찰 결과 외력의 작용방향(-z)으로 변형이 발생하였으며 처짐량은  $H$  값의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다.

취성재료의 파괴는 인장/압축파괴를 모두 고려하

여야하므로 최대 인장응력에 해당하는 최대 주응력과 최대 압축응력에 해당하는 최소주응력을 관찰하였다. 헤더의 상단에서는 최대 주응력(인장응력)의 최댓값이, 헤더의 하단에서는 최소주응력(압축응력)의 최솟값이 관찰되는 것으로 보아 본딩하중을 받는 헤더는 Fig. 5와 같이 거동함을 알 수 있다. 또한  $H$  값이 증가할수록 헤더에 작용하는 인장응력 및 압축응력이 감소됨을 확인하였다.

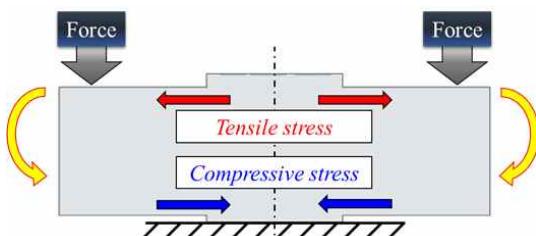


Fig. 5 Behavior of Header Subjected to Bonding Load

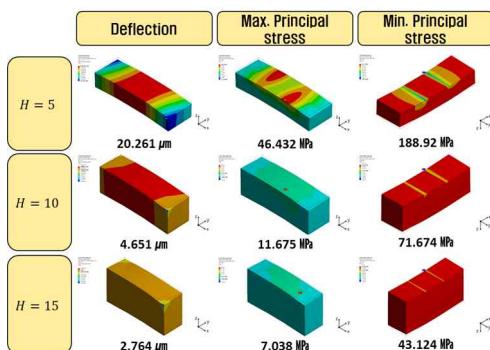


Fig. 6 Comparison of Deflection, Maximum principle stress and Minimum principle stress according to total thickness  $H$

Table 2는  $H$  값에 따른 쿨롱-모어의 안전율이다.  $H$ 가 증가함에 따라 안전율 또한 증가하며,  $H = 8.25 \text{ mm}$  이상에서 안전율 15 이상의 설계가 가능한 것으로 나타났다.

## 2.2. 가압부 단자 $t_1$ 의 선정

기울어짐 보정 및 가압 구동 시 PA 결합을 위한 구조물 B는 양 옆의 인접 칩 영역을 침범하게 되므로 단자  $t_1$ 를 두어 인접 칩에 대한 간섭을 회피하였다. 단자  $t_1$ 의 치수는 Fig. 7과 같이

- ① 각 칩간의 두께 편차 ( $15 \mu\text{m}$ )
- ② 본딩시 칩이 가압되는 깊이 ( $5 \mu\text{m}$ )
- ③ 기울어짐 각( $0.2^\circ$ )에 의한 헤더 양단의 높이 변

화 ( $73.3 \mu\text{m}$ )

④ 본딩 하중에 의한 헤더 양단의 처짐량( $6.64 \mu\text{m}$ )을 고려하여  $100 \mu\text{m}$ 로 선정하였다.

Table 2 Safety factor according to total thickness  $H$

$H, \text{mm}$	Max. of Tensile stress, MPa	Max. of Compressive stress, MPa	Safety Factor
5	46.43	188.92	7.20
6	31.34	146.61	9.50
7	22.73	117.96	12.04
8	17.42	97.68	14.77
8.25	16.428	94.326	15.37
8.5	15.54	89.707	16.18
9	14.00	82.83	17.62
10	11.68	71.67	20.53
11	10.04	63.10	23.45
13	7.87	51.01	29.21
15	7.04	43.12	34.11

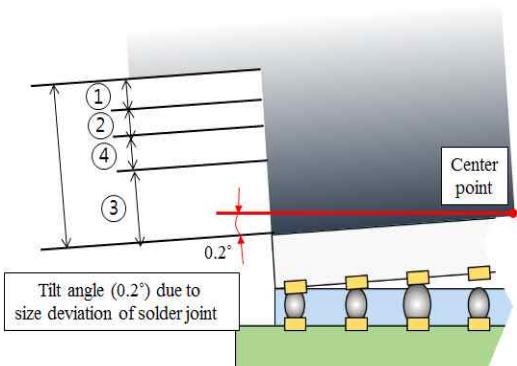


Fig. 7 Select value of  $t_1$

## 2.3. $H$ 의 최적화 해석

헤더의 최종 설계안을 도출하기 위하여  $H$ 에 대한 최적화 해석을 수행하였다.

최적화 해석에 적용된 형상은 Fig. 2와 같으며 적용된 격자크기와 재료물성 및 경계조건은 2.1과 동일하다.  $t_1$ 은 2.2에서 도출된  $0.1 \text{ mm}$ ,  $H$ 의 범위는  $8.25 \text{ mm} \leq H \leq 15 \text{ mm}$ 를 적용하였다. 또한 최적화의 목적함수는 최대주응력의 최소화와 최소 주응력의 최대화로 설정하였다.

최적화 해석은 상용 구조해석 프로그램의 최적화 tool을 이용하였으며 screening 기법을 적용하여 총 100 case의 해석이 수행되었으며, 100개의 case 중

안전율 15이상의 값을 갖는 경우 중  $H$ 의 최솟값은 10.92 mm이며 이때의 최대/최소 주응력은 Table 3과 같다. 가공에 적용이 가능한  $H$ 값 11 mm가 반영된 최종 설계안을 Fig. 8에 나타내었다.

Table 2 Safety factor according to total thickness H

$H$ , mm	Max. of Max. Principal Stress, MPa	Min. of Min. Principal Stress, MPa	Safety Factor
10.92	38.49	82.98	15.14

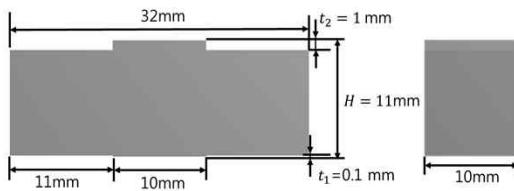


Fig. 8 Final design of Header

### 3. PA의 변위차가 헤더에 미치는 영향

헤더는 좌우 양단에 PA가 결합되어 높이 방향으로 이송되며, PA의 변위차를 이용하여 기울어진 칩에 대한 기울어짐 보정 후 가압 및 압착할 수 있는 기능을 갖는다. PA의 직선구동이 헤더의 기울어짐 운동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 힌지 구조물을 PA와 헤더 사이에 설치하는 경우 가공 오차의 영향으로 정밀한 제어가 어렵고, 힌지 구조물의 탄성변형으로 본딩하중이 감쇠될 가능성이 존재하므로 본 연구에서는 PA와 헤더를 직접 접합하는 방식을 채택하였다.

PA와 헤더를 직접 접합하는 경우 좌/우 PA의 과도한 변위차가 PA와 헤더의 접합부에 파손을 야기 할 수 있으므로 헤더가 파손되지 않는 PA간의 변위 차를 유한요소해석을 통하여 예측하였다.

#### 3.1. 유한요소해석 모델

헤더에 부착된 PA의 변위차를 발생시키기 위한 유한요소해석모델을 Fig. 9에 나타내었다. 헤더와 두 PA의 접촉조건은 Bonded로서 외력에 의하여 분리될 수 없는 조건이다. (a)PA는 상부의 3축 자유도를 0으로 구속하여 움직임이 없도록 하였고 (b)PA는 높이방향으로  $-1 \mu\text{m}$  ~  $40 \mu\text{m}$  변위차를 발생시켜  $0 \sim 40 \mu\text{m}$ 의 변위차가 발생하는 동안 PA와 헤더의 접합부에서 Header에 발생하는 최대 및 최소 주응력을 관찰하였다.

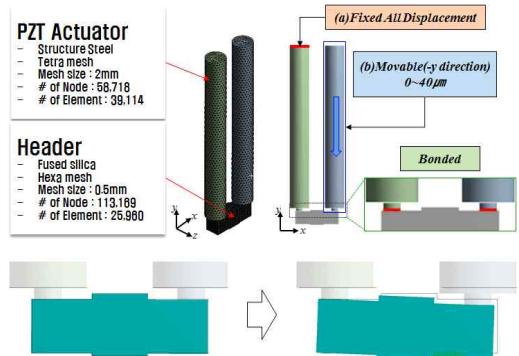


Fig. 9 FE model for estimation of stress concentration of Header by displacement difference of PA

#### 3.2. 유한요소해석 결과

Fig. 10는 PA의 변위차가 증가함에 따라 헤더에 발생한 최대/최소 주응력의 분포 경향을 나타낸 그림이며,  $1 \sim 40 \mu\text{m}$  까지의 헤더에 발생한 최대/최소 주응력 값은 Table 3과 같다. 최대/최소 주응력은 PA 접합부에서 나타나며 PA의 변위차가 증가할수록 헤더의 최대/최소 주응력 또한 증가하는 것으로 나타났다. 모어의 파손이론에 따르면 최대주응력과 최소주응력은 각각 인장강도와 압축강도 미만이어야 하므로 Table 3에서 Fused Silica의 인장강도(54 MPa)와 압축강도(1140 MPa)을 고려한다면 헤더의 파손이 발생하지 않는 PA의 변위차는  $8 \mu\text{m}$  이하이다.

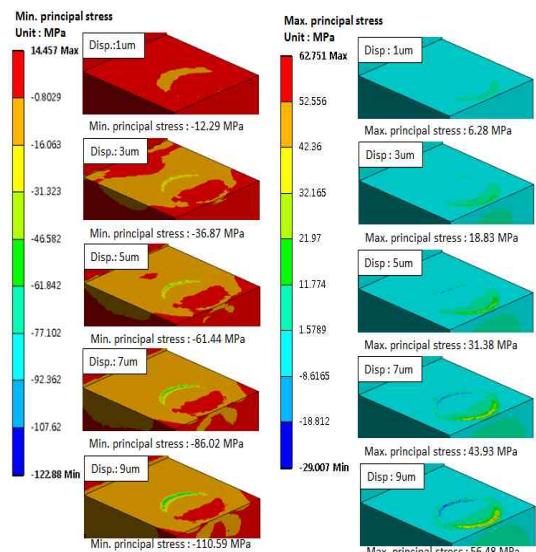


Fig. 10 Max/Min principle stress distribution occurring in Header due to displacement difference of PA

**Table 3** Max/Min principle stress in Header due to displacement difference of PA

Displacement of (b)Piezo actuator, $\mu\text{m}$	Max. of Tensile stress, MPa	Max. of Compressive stress, MPa
1	6.28	12.29
2	12.55	24.58
3	18.83	36.87
4	25.10	49.15
5	31.38	61.44
6	37.65	73.73
7	43.93	86.02
8	50.201	98.31
9	56.48 (Tensile Strength : 54 MPa)	110.59 (Compressive Strength : 1140 MPa)
10	62.75	122.88
:	:	:
39	244.73	479.24
40	251.01	491.53

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 반도체 칩 본딩 공정(리플로우, 열압착 본딩)의 불안요소를 개선하기 위한 방법으로 레이저 열-압착 본딩을 소개하였고, 레이저 열-압착 본딩 장비의 가압 지그인 헤더의 설계에 대하여 논하였다.

취성재료인 Fused silica로 이루어진 헤더의 500 N의 본딩하중과 비틀림이 작용하는 경우, 헤더의 총 두께  $H$ 와 인접 칩에 대한 영향을 회피하기 위한 노치 길이  $t_1$ 을 정의하였다. 또한 재료의 취성 특성을 고려하여 해당 조건에서 최대/최소 주응력의 최소화를 목적으로  $H$ 에 대한 최적화 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 쿨롱-모어 과손 기준에 근거한 안전율(S.F.=15)을 적용한 분석을 통하여 헤더의 치수를 도출하였다.

또한 PA와 헤더가 직접 접합된 경우에, 솔더 범프의 직경 편차에 기인한 칩의 기울어짐 보정을 위하여 헤더 양단의 PA에 변위차가 발생할 때 헤더가 받는 영향을 구조해석을 통하여 예측함으로써 구동 가능한 최대 변위차 8  $\mu\text{m}$ 를 도출하였고, 향후 칩의 기울어짐 보정 및 가압을 위한 알고리즘에 반영 될 예정이다.

#### 후기

본 연구는 산업핵심기술개발사업(기변영역 레이저를 이용한 이종 패키지 제조용 초정밀 스택 본딩 장비 개발, 과제번호 10067512)의 지원으로 진행되었음.

#### 참고문헌

- 1) K.-S. Choi, H. Lee, H.-C. Bae, Y.-S. Oem, “Recent Trends of Flip Chip Bonding Technology”, Electronics and Telecommunications Trend, Vol. 28, No. 5, pp. 100-110, 2013.
- 2) Y. Jung, D. Ryu, M. Gim, C. Kim, Y. Song, J. Kim, J. Yoon, C. Lee, “Development of Next Generation Flip Chip Interconnection Technology using Homogenized Laser-Assisted Bonding”, IEEE 66<sup>th</sup> Electronic Components and Technology Conference, pp. 88-94, 2016.
- 3) A. Laor, D. Athia, A. Rezvani, H. Clauberg, M. Mayer, “Monitoring of thermo-mechanical stress via CMOS sensor array:Effects of warpage and tilt in flip chip thermo-compression bonding”, Microelectronics Reliability, 73, pp. 60-68, 2017.
- 4) R. C. Hibbeler, “Mechanics of Materials Eighth Edition”, pp. 524-525, 2011.

#### 저자 소개

##### 이 동 원(Dong-Won Lee)

##### [학생회원]



- 2017년 8월: 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 9월~현재: 인하대학교 기계공학과 박사과정
- 2015년 3월~현재: 한국생산기술연구원 금형기술그룹, 학연협동과정생

< 관심분야 >  
구조해석, 미세구조 가공/성형

하 석 재(Seok-Jae Ha)

[정회원]



- 2015년 8월: 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2015년 9월~2017년 1월: 인하대학교 산학협력단 기계기술연구소, 박사후연 구원
- 2017년 2월~현재: 한국생산기술연 구원 금형기술그룹, 박사후연구원

< 관심분야 >

CADCAM, 마이크로 절삭가공, Maskless Lithography

윤 길 상(Gil-Sang Yoon)

[정회원]



- 2004년 2월: 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2015년 3월~2018년 2월: 과학기술 연합대학원(UST) 폐기징공학과, 교수
- 2018년 3월~현재: 한국생산기술연 구원, 금형기술그룹, 그룹장

< 관심분야 >

CADCAM/CAI, 사출금형, 마이크로 가공, 정밀측정

박 정 연(Jeong-Yeon Park)

[정회원]



- 2016년 2월 : 인하대학교 고분자공학과 (공학석사)
- 2011년 11월~현재: 한국생산기술연 구원 금형기술그룹, 연구원

< 관심분야 >

고분자기공·물리화학, 사출성형해석, 마이크로구조 성형