

석영 유리의 파괴 거동에 관한 연구(II) A Study on the Fracture Behavior of Quartz Glass(II)

최성대*, 정선환**, 권현규**, 정영관**, 홍영배**
Seong-Dae Choi*, Seon-Hwan Cheong**, Hyun-Kyu Kwon**,
Young-Kwan Jeong**, Yong-Bae Hong**

<Abstract>

Glass-to-metal contact should be prevented in the design of any structural glass component. Because glass is extremely brittle and will fracture readily if even a small point load is applied. If the assembly includes a glass component supported by metallic structure, designers should provide a pliable interface of some kind between the two parts. But there happens high demand of glass-to-metal contact in semiconductor industries due to adoption of dry cleaning process as one of the good solution to reduce running cost - carry out equipments cleaning with high corrosive and etching gas such as CF₄ with keeping process temperature as the same as high service temperature. Therefore the quartz glass have to be received compression by direct contact with metal as the form of weight itself and vacuum pressure and fatigue by vibrations caused by process during the process. In this paper investigation will be carried out on fracture behavior of quartz glass contacted with metal directly under local load and fatigue given by process vibration with apparatus which can give local load and vibration through PZT ceramics to give guideline to prevent unintended fracture of quartz glass.

Keywords : Quartz Glass, Glass-to-metal contact, Compressive Strength, PZT Ceramics, Fracture Behavior, Partial contact, Fatigue

* 교신저자, 정회원 금오공과대학교 기계공학부 교수, 工博
Email : sdchoi@kumoh.ac.kr
** 준회원, 금오공과대학교 대학원

* Corresponding Author, Prof., School of Mechanical Engineering , K.I.T
Tel:+82-11-9812-8130 Fax:+82-54-478-7100
** School of Mechanical Engineering , K.I.T

1. 서론

고순도, 높은 내열성 및 내화학성을 지닌 소재로 반도체 전처리 제조공정 중 산화, CVD, Diffusion 및 열처리 공정의 반응로 및 웨이퍼 캐리어 (Carrier) 또는 건식 식각 공정의 보호재로 널리 사용되고 있는 석영 유리는 매우 취성이 커서 작은 하중이 부여되더라도 쉽게 파손이 일어나기 때문에 일반적으로 금속과의 직접 접촉이 없이 O-Ring이라는 완충재를 이용하여 금속과 조립 될 수 있도록 구조 설계되고 사용되어 왔으나¹⁾ 최근 반도체 제조 공정운영 비용절감을 위해 공정 온도가 유지된 상태에서 높은 식각성 가스에 의한 설비 세정이 가능하도록 채택된 건식 세정 때문에 O-Ring등과 같은 완충재를 사용할 수 없어 금속과 직접 접촉한 상태로 사용해야 하는 부품의 수가 증가되고 있다. 대부분의 세라믹 소재와 같이 석영유리도 구조적으로 인장응력에는 취약하나 압축응력에는 매우 강한 소재²⁾로 알려져 있으나 안전율 이하로 부가된 압축 하중 하에서도 공정 중 발생하는 진동에 의해 동반되는 피로에 의해 예측치 못한 석영유리의 파손이 종종 일어나 반도체 제조공정 수율 뿐 아니라 장비 자체를 훼손시키는 등 손실을 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실 공정과 유사한 조건인 직접적인 파손을 야기 시키지 않는 최대 압축 하중을 부여하여 표면 크랙(Crack)을 형성시킨 후 압전세라믹(PZT)³⁾을 이용하여 실 공정 중 발생 가능한 범위의 진동을 부여하여 파괴실험을 실시하고, 그 파단면 해석을 통하여 국부하중 및 피로에 의한 석영 유리의 파괴 거동을 규명하고자 한다.

2. 유리의 파괴 및 취성 파면 특성

유리의 파괴는 유리 표면에 Griffith 크랙⁴⁾이라 불리는 유리가 가지고 있는 본래의 결함에 외력이 가해져 급작스러운 파손이 일어 날 수 있는 임계치 이상 크기로의 성장 후 급작스러운 파괴가 일어나거나 아래 Fig.1과 같이 외력에 의해 강제로 형성된 표면 결함에 추가적인 힘이 가해져 급작스러운 파괴가 일어 날 수 있는 임계치 이상 크기로의 성장 후 급작스러운 파괴가 일어나게 되며 그 파면은 Fig.2 및 Fig.3처럼 미러 (Mirror), 미스트(Mist) 및 해클(Hackle)⁴⁾면이 뚜

렷하게 구분되는 취성재료의 전형적인 파면 특성을 나타낸다.

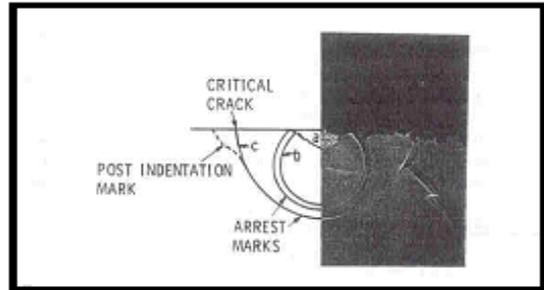


Fig. 1. Fracture surface of glass formed by indentation.

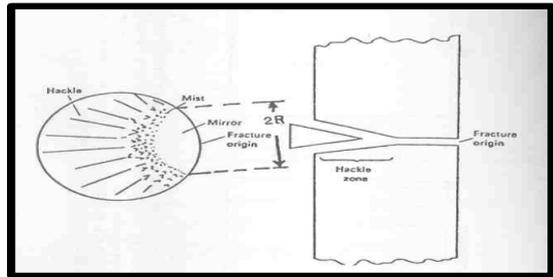


Fig. 2. Scheme of typical Fracture surface of formed by bending load.

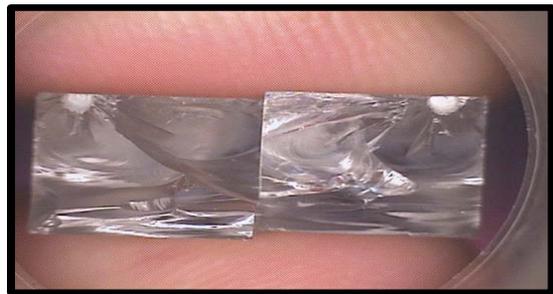


Fig. 3. Fracture surface of quartz glass formed by bending load.

3. 실험 방법

3.1 적정 최대 토오크 선정

본 연구에 사용될 석영유리 시편 및 압전 세라믹의 파손이 일어나지 않고 부가할 수 있는 최대 토오크를 구하기 위하여 석영 유리 시편 A, 압전세라믹 B 및 압력 부가 지그 C 로 구성된 Fig. 4의 장치와 DB Type 토오크 렌치를 사용하여 Table 1, 2, 및

3 의 조건으로 시험하여 Table 4의 결과를 얻었다.

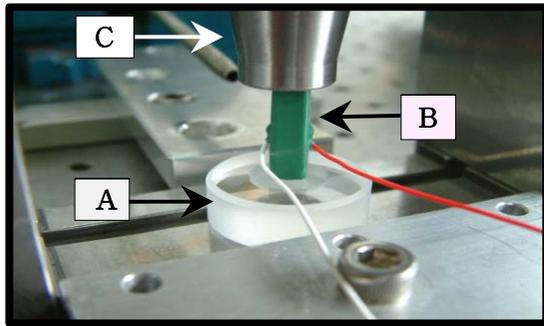


Fig. 4. Test apparatus including specimen.

Table 1. Test conditions to determine proper torque

Specimen	Fused Quartz Glass	
	Φ of contact area	0.56 cm
PZT received the pressure		AE0505D16
Type of Torque Wrench		DB Type

Table 2. Physical properties of Fused Quartz glass

Density	$2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Hardness	5.5~6.4 Mohr's scale 570KHN ₁₀₀
Design tensile strength	$4.8 \times 10^7 \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$
Design compressive strength	Greater than $1.1 \times 10^9 \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$
Young's modulus	$7.2 \times 10^{10} \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$
Poisson's ration	0.17
Coefficient of thermal expansion	$5.5 \times 10^{-7} \text{ cm/cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$
Thermal conductivity	$1.4 \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$
Specific heat	$670 \text{ J/kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$

Table 3. Characteristic of PZT

Model Number	AE0505D16
Max drive voltage (V)	150
Displacement at 150V (μm)	17.4 ± 2.0
Generated force (N)	580
Tensile strength (N)	100
Young's modulus (N/m^2)	4.4×10^{10}

Table 4는 DB 형 토오크 렌치를 이용하여 압력 부여 지그에 하중을 부여할 경우, 석영 유리 시편의 파괴가 일어났을 때의 하중 값을 얻은 표로 석영 유리의 이론 압축 강도의 1/10 배인 45kgf 정도의 압축 하중하에서 석영 유리 시편의 파괴가 일어남을 알 수 있었다. 따라서 석영 유리 시편 및 압전세라믹에 직접 파손을 일어나지 않고 부가 할 수 있는 최대 적정 토오크 값을 그보다 약 10% 적은 40 kgf 로 설정하였다

Table 4. Test results of compressive strength

Torque (kgf.cm)	Force (kgf)	Area (cm^2)	P (kgf/cm^2)	P ($\times 10^9 \text{ Pa}$)
50	500	0.24	2,031	0.20
50	500	0.24	2,031	0.20
50	500	0.24	2,031	0.20
45	450	0.24	1,828	0.18
50	500	0.24	2,031	0.20

3.2 시험편의 진동 모드 분석

해석 상용 프로그램인 Ansys WorkBench 10.0을 이용하여 샘플의 진동 모드를 분석한 결과 Fig. 5 및 Table 5 에 나타난 것과 같이 샘플의 고유 주파수는 82KHz 이상으로 매우 높아 실제 공정 중에 공진이 일어날 확률은 매우 낮은 것으로 분석되었다.

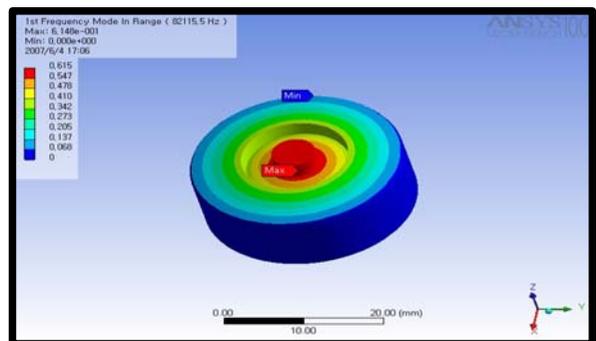


Fig. 5. 1'st Frequency mode of the glass.

Table 5. Natural frequency of glass

First natural frequency	82,115 Hz
Second natural frequency	122,129 Hz
Third natural frequency	122,158 Hz

3.3 피로 시험

진동 부가에 사용할 압전세라믹의 하중 특성치를 Fig. 4장치의 압전세라믹에 토오크 렌치를 이용하여 압력 부여 지그를 통하여 하중을 부여하여 Fig.

6의 상관 그래프와 회귀식(1)을 도출하였다.

Output Voltage (mV)
 = 90.6923 + 3.08440 x 하중 Kgf. cm (1)

국부 하중 및 진동 하 석영 유리의 파괴 거동⁵⁾⁻⁸⁾을 검토하기 위해 석영 유리 샘플에 파손이 이루어지지 않는 범위의 최대 하중인 40kgf.cm의 하중으로 표면 크랙(Crack)을 형성 한 후 상기 특성이 확인된 압전세라믹에 제너레이터와 오실로스코프로 구성된 Fig. 7에 나타난 장치에 의해 Table 6.에 표시된 조건으로 진동을 부여하여 진동에 의한 크랙이 진전되도록 하여 Table 7의 결과를 얻었다.

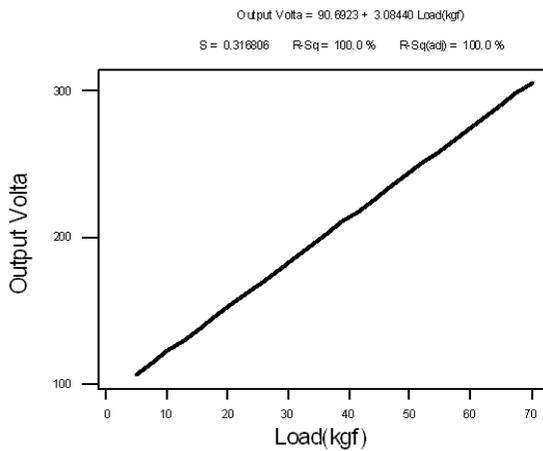


Fig. 6. Output Voltage of PZT depending on load applied.

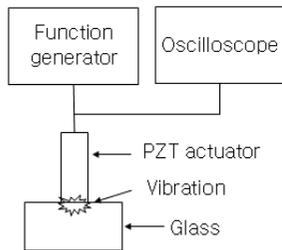
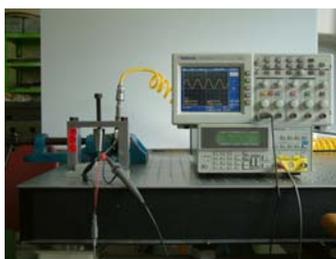


Fig. 7. Scheme and view of experiment apparatus.

Table 6. Test Conditions

Load	Frequency applied	Voltage applied (V)
40 kgf	82 Hz	2
		4
		6
		8
		10

Table 7. Test Results

Voltage applied(V)	Time initiation of crack development(Hr)
2	Above 72
4	Above 72
6	Above 72
8	Above 72
10	7 Hr

Table 7.에서 볼 수 있듯이 가진 가능 최대 전압인 10 V이하의 전압에서는 72시간 이상의 가진(加振) 하에서도 크랙의 진전을 관측 할 수 없었으나 10V 전압하에서는 7시간만에 크랙 진전의 개시 및 발전이 관측되었다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 시험편 파면 분석

Fig. 8는 의도적으로 파손시킨 시편의 거시적 형상으로 40kgf.cm의 단일 하중으로 표면에 크랙을 생성 시킨 후 압전세라믹을 이용하여 10V , 82 Hz로 7시간 가진 시킨 후 추가적인 단일 하중으로 형성시킨 파단면을 나타낸다. 붉은 화살표는 파괴 진행 방향을 나타내며 #1은 단일 압축 하중에 의해 형성된 표면크랙을#2는 압전 세라믹에 의해 부가된 피로 파괴면을 또한 #3은 최종 파괴에 이르기 위해 가해진 단일 하중 파괴면을 나타낸다.

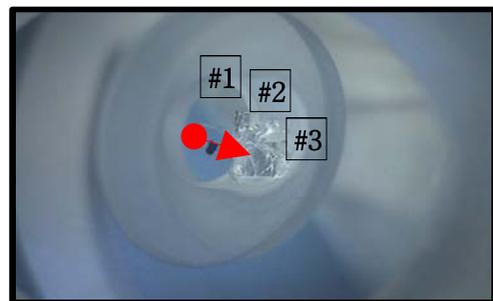


Fig. 8. Macroscopic view of fracture specimen.

Fig.9는 Fig.8의 거시적 파면을 SEM을 이용하여 얻은 미시적 파면을 나타낸다. 붉은 화살표 방향이 파면 진행 방향을 나타내며 #1은 단일 압축 하중에 의해 형성된 표면 크랙면을, #2는 압전 세라믹에 의해 부여된 피로 파괴면을 또한 #3은 최종 파괴에 이르기 위해 가해진 단일 하중에 의한 파괴면을 나타낸다. Fig.10은 단일 압축 하중에 의해 형성된 파괴면으로 리버 패턴을 포함한 전형적인 벽개면을 나타내고 있으며 Fig. 11은 화살표로 표시된 부분의 확대 사진으로 리버 패턴을 잘 나타내고 있다.

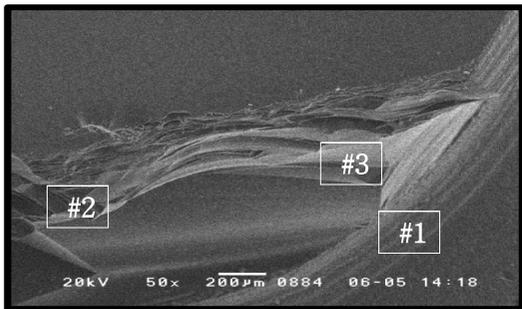


Fig. 9. Microscopic view of fracture surface.

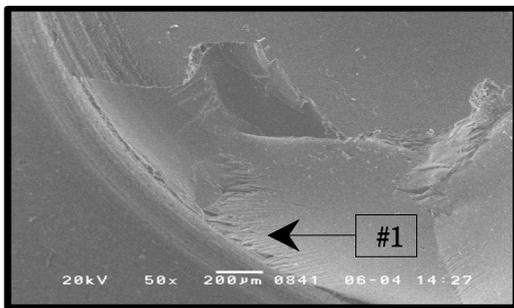


Fig. 10. Microscopic view of fracture surface formed by simple compressive load shows typical cleavage surface identified with section #1 in Fig. 9.

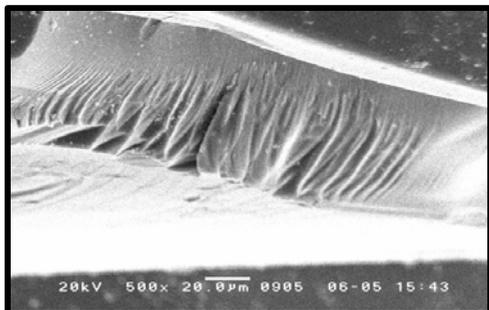


Fig. 11. Detail view on section indicated with blue arrow shows river pattern.

Fig.12는 Fig.9의 #2로 구분된 압전 세라믹에 의해 가진된 진동에 의해 진전 및 발전된 피로 파괴면으로 많은 비치 마크와 벽개단을 보여주고 있으며 Fig. 13은 Fig.12의 벽개단과 비치 마크를 좀 더 확대한 상세한 파면 형상을 나타낸다. Fig.14는 Fig. 9의 #3으로 구분된 7시간 가진된 변동 부하 후에 추가적인 단일 하중을 부여하여 형성된 중첩 파괴면으로 화살표로 표시된 부분에 선단 균열(Crack Boundary)을 관측 할 수 있었다

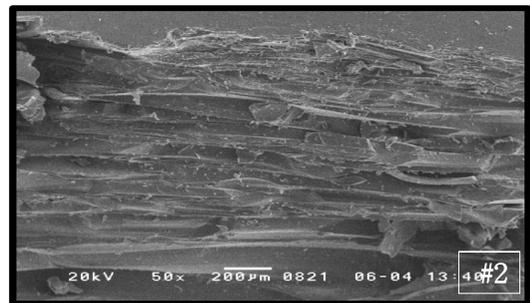


Fig. 12. Microscopic view of fracture surface formed by vibration load shows a lot of beach mark and cleavage steps identified with section #2 in Fig.9.

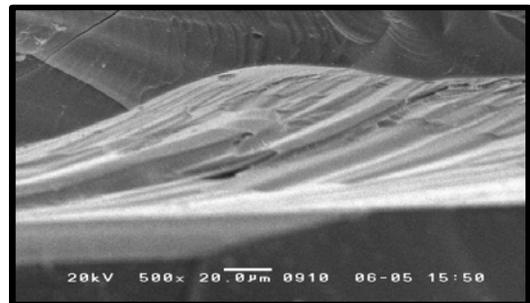


Fig. 13. Detail microscopic view of fracture surface in Fig. 12 shows a lot of beach mark and cleavage steps.

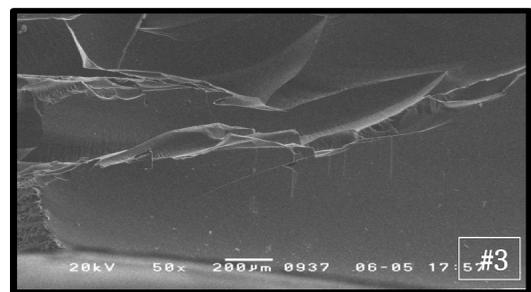


Fig. 14 Microscopic view of fracture surface formed by the additional simple compressive load identified with section #3 shows crack boundaries between mode of load.

4.2 실제 파단면과의 비교

상기 거시적 혹은 미시적 파단면 분석을 토대로 실 공정 중 파손된 제품의 거시적 파단면 Fig. 15 및 Fig 16을 비교 해석한 결과, 해당 제품의 파괴는 석영 유리 표면에 공정 중 발생하는 진동에 의한 변동 부하 파괴가 일어난 후, 가해진 국부 하중에 의해 일시적인 파괴가 일어난 것으로 추정되었다. 화살표 방향이 파괴가 진전된 방향이며 Fig. 16은 금속 커플링에 석영 유리 외곽에 압축 응력이 주어진 상태에서 개스 공급으로 가해지는 변동 부하에서 약 3개월 사용 중 발생한 파손의 단면이다. 붉은색 화살표가 파괴진전 방향이며 파란색 화살표로 표시된 변동 부하에 의한 것으로 추정되는 작은 주기의 벽개면에 이어 단일 하중에 의한 단일 벽개면의 형상을 띄고 있다.



Fig. 15. Macroscopic view of fracture on Fused Quartz Glass happened during process.

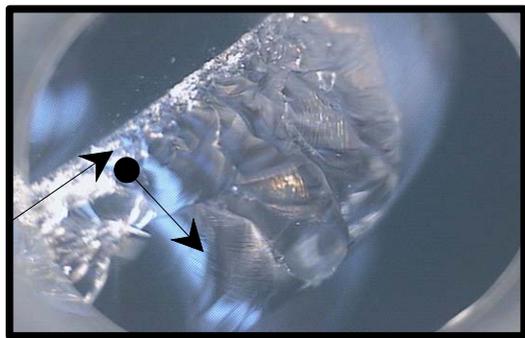


Fig. 16. Fracture surface shows fatigue fracture on the surface.

5. 결론

대표적인 취성 재료의 하나인 석영 유리의 금속 접촉 하 국부하중 및 피로에 의한 파괴 거동

을 관측하기 위해 인위적으로 조건을 부여하여 형성시킨 파괴면의 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단일 하중에 의한 파괴면에서도 벽개단 및 리버패턴을 관측할 수 있었다
2. 압전세라믹에 의해 부여된 반복 하중에 의한 파괴면에서는 부하 변동에 의해 형성된 유사 스트레이션 마크와 벽개단을 관측 할 수 있었다.
3. 추가 부여된 단일 하중에 의해 형성된 파괴면 선단에서는 선단 Crack을 관측 할 수 있었다.
4. 상기 파괴 거동에 대한 해석을 바탕으로 파손된 석영 유리 제품의 파괴 거동을 추론할 때 변동 부하에 의해 형성된 표면 크랙이 부여된 국부 하중에 의해 일시적으로 파손된 것으로 추정할 수 있었다.

6. 후기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원한 과제로 대학 당국에 감사를 드립니다..

참 고 문 헌

1. Karen S. Bernstin NASA-Lyndon B. Johnson Space Center " Structural Design of Glass and Ceramic Components for Space System Safety " Page 1-9
2. 오세욱, 윤한기, 차용훈, 남기우 " 재료 강도학" 원창 출판사 Page 29-36, 122-147
3. James F. Shackelfford " Introduction to materials Science for Enginners " 5th Edition Page 607-608
4. 배성인, 한민구 역 " 파괴 역학 실험법" 원창출판사 Page 43-67
5. John M. Barsom, Stanly T. Rolfe " Fracture and Fatigue Control in Structure " : Applications of Fracture mechanics 3rd edition ASTM Page 237-263
6. V.D Frechette " Failure Analysis of Brittle Materials" Advances in Ceramics .

- Volume 28 The American Ceramic Society Page 3-42
7. Terry A. Michalske and Bruce C. Bunker
" The Fracture of Glass " Scientific American 1987 Page 78-85
8. R. Morrel " Standard Guideline for Fractography of Advanced Ceramics"
Fractography of Glasses and Ceramics III Page 71-89

(2007년 7월 10일 접수, 2007년 11월 23일 채택)