韓國産業應用學會論文集, 제10권, 제3호, 179-185, 2007.8
J. Korean Society of Industrial Application, Vol.10, No.3, 179-185, Aug, 2007

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

최성대*, 정선환**, 정영관**, 김기만**, 홍영배**

Seong-Dae Choi*, Seon-Hwan Cheong**, Young-Kwan Jeong**,
Gi-Man Kim**, Yong-Bae Hong**

<Abstract>

Quartz glass are used in semiconductor industries as the reaction furnace, wafer carrier and accessaries. During the process the quartz glass received compression by direct contact with other quartz glass ware and metal as the form of weight itself and vacuum pressure and fatigue by vibrations caused by process. Even as the other ceramic materials quartz glass have high compressive strength but often there happened crack and breakage of quartz glass resulted in a great damage in the process. In this paper investigation will be carried out on fracture behavior of quartz glass under local load to give guideline to prevent unintended fracture of quartz glass.

Keywords : Quartz Glass, Compressive Strength, Fracture Behavior, Partial contact

1. 서론

대표적인 취성재료[1]의 하나인 석영유리(Fused Quartz Glass)는 고 순도의 내열성 및 내화학성을 지닌 소재로 반도체 제조공정 중 산화, CVD, Diffusion 및 열처리 공정의 반응로 및 웨이퍼 캐리어 (Carrier) 또는 건식 식각공정의 보호재로 널리 사용되고 있는 소재이다. 대부분의 세라믹 소재와 같이 인장응력에는 취약하나 압축 응력에는 매우 강한 소재로 알려져 있지만 동일한 소재인 다른 석영유리 부품 혹은 금속과 직접 접촉된 상태로 지속적인 압축하중을 받을 경우 매우 작은 국부 압축 응력상태에서 석영유리가 파손되는 경우가 종종 발생하여 반도체 제조공정 수율뿐만 아니라 장비 자체를 훼손시키는 등 커다란 손실을 초래하고 있다.

따라서 본 연구에서는 금속 지그에 의해 지

* 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

속적으로 부하되는 국부 압축 하중의 접촉면적에 따른 석영 유리의 파손에 대해 검토 하였다.

2. 유리 표면의 파괴

유리의 표면 파괴는 유리 표면에 Griffith [2]크랙이라 불리우는 유리가 가지고 있는 본래의 결함에 외력이 가해져 급작스러운 파손이 일어 날 수 있는 임계치 이상 크기로의 성장 후 급작스러운 파괴가 일어나게 되거나 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 된다.

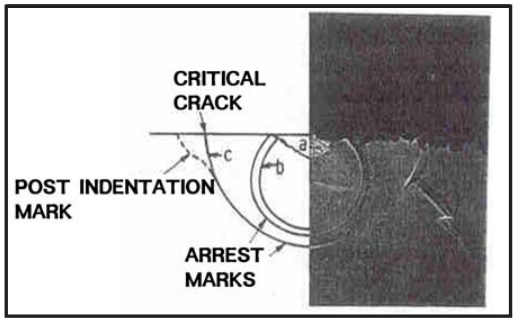

Fig. 1 Fracture surface of glass formed by indentation.

3. 국부하중 및 면취차에 의한 유리 표면파괴

석영 유리의 이론압축강도인[3] 1.1 x 10 ^{9} Pa의 약 1/20,000인 62,000 Pa하에서 발생한 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 제품의 표면 파괴 현상[4),5)]을 분석한 결과, 압축 하중을 부여 받은 4개의 Rod tube 표면의 실 접촉 면적이 전면 접촉이 아닌 국부 접촉으로 증가된 국부하중으로 표면 손상이 발생하였고 각 Rod tube 모서리의 면취 상태 차에 따라 문제된 Rod tube의 경우 상이한 파괴 형상의 파괴가 일어난 것을 알 수 있었다.

Fig.2의 제품은 웨이퍼 캐리어(Wafer Carrier)를 지지하는 패대스탈의 한 종류이다. 반도체 전공정 반응로에 사용되는 석영유리 부품은 Fig.3과 같이 반응관인 Outer , Inner tube, 웨이퍼 캐리어(Carrier) 인 Boat 및 이를 지지하는 패대스탈 (Pedestal)로 구성되어 있다.

Fig. 2 Pedestal base on which 3 kgf of quartz glass carrier is loaded.

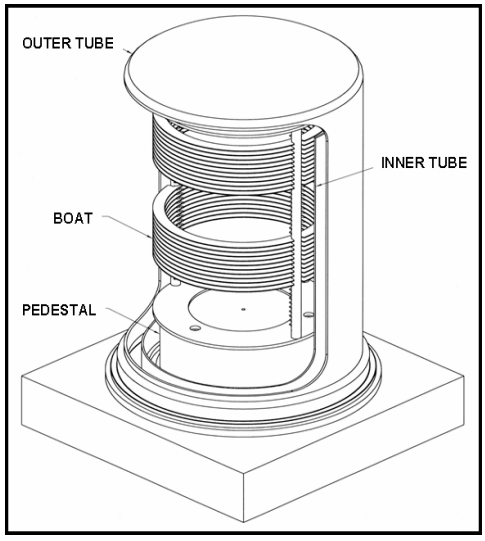

Fig. 3 View of quartz glass ware consisted of reactor used in pre-process of semiconductor.

Fig.4는 상부 웨이퍼 캐리어와 직접 접촉하여 파괴가 일어난 Rod Tube의 파괴 현상을 상세하게 나타낸 것으로, 동일한 하중을 받고 있다고 추정됨에도 불구하고 Rod tube A, B, C 및 D 간에 실접촉 면적 및 모서리 면취 상태에 따라 그에 따른 파괴 크기에 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

따라서 Rod tube의 모서리 면취 상태 및 실접촉 면적과 파괴 크기 간의 상관성을 규명하기 위하여 실험을 실행하였다.

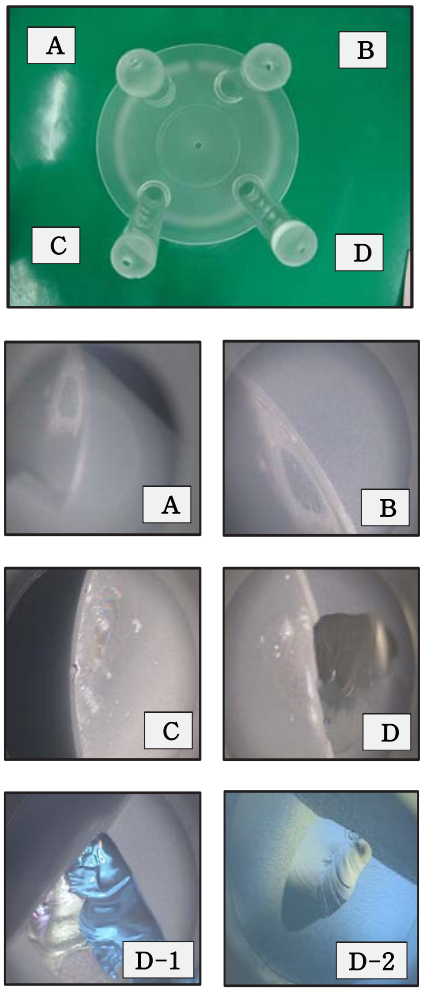

Fig. 4 Pedestal base and Rod tube surfaces having fracture on the edge with small chamfering (D-1,D-2 are detial of D).

3.1 면취 차에 의한 응력 집중 차 분석

우선 동일 접촉 면적을 가정하여 Fig.5에 나타낸 ANSYS Modeling에 의해 화살표로 표시된 모서리의 면취 상태를 Table 1의 조건으로 응력 집중차를 분석한 결과, Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 얻었다.Fig. 6는 “C” 면취 조건에 따른 모서리 최대 응력 집중을 나타낸 회귀 곡선으로 ”C”값이 증가함에 따라 모서리 최대 응력값이 감소하다가 ”C” 값이 1.0mm 이상에서는 더 이상 감소하지 않는 상태를 보였다.또한 Fig.7은 “R” 면취 조건에 따른 모서리 최대 응력 집중을 나타낸 회귀 곡선으로 ”R”값이 증가함에 따라 지속적으로 모서리 최대 응력값이 감소함을 보였다.

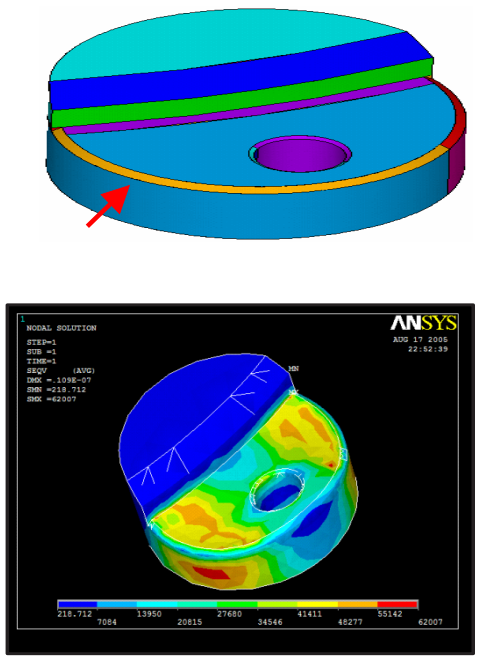

Fig. 5 Stress concentration Modeling by ANSYS.

Table 1. Simulation conditions (Unit mm)

Load (Kgf)	Chamfered with C	Chamfered with R
3	1.2	1.2
3	1	1
3	0.5	0.5
3	0.2	-
3.2	1.2	1.2
3.2	1	1
3.2	0.5	0.5
3.2	0.2	-

즉 R형상의 면취보다는 C 형상의 면취가 응력 집중이 적고 또한 C=1.0일 경우가 최소 응력 집중 값을 나타냄을 알 수 있었으며 면취 상태와 응력 집중간의 관계식을 Minitab의 회귀분석을 이용하여 식(1)과 식(2)의 결과를 얻었다.

C 면취인 경우

$$\text{Max 응력 집중 (Pa)} = 159{,}604 - 170{,}357\ C + 74504.9\ C^2 \quad (1)$$

R 면취인 경우

$$\text{Max 응력 집중 (Pa)} = 264{,}093 - 242{,}130\ R + 68{,}477.1\ R^2 \quad (2)$$

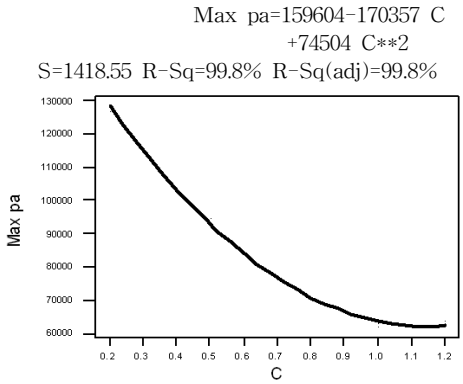

Fig. 6 Regression equation of Max. Stress concentration depending on C value.

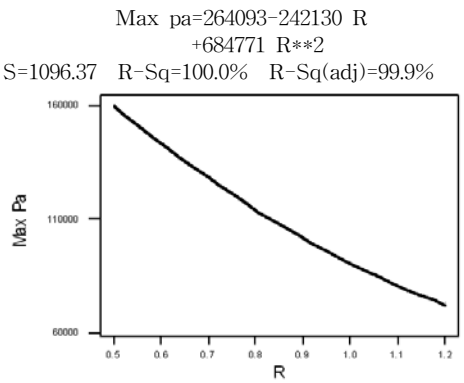

Fig. 7 Regression equation of Max. Stress concentration depending on R value.

3.2 Quartz Glass 접촉면적 및 waviness차에 의한 석영 유리 압축 응력 파괴 거동

금속과 직접 접촉 시 석영 유리 압축 응력 파괴 거동을 살펴보기 위하여 Fig. 8과 같이 50(L)*30(W)*25(H) 크기의 석영유리 시편 A을 압축 응력 부여 고정 지그 B에 고정 시킨 후 접촉 면적이 상이한 3가지 압력 부여 지그 C를 DB Type의 토크 렌치로 Table 2.의 조건으로 압축 응력을 부가하여 파괴가 발생할 때까지의 토오크를 산출하고, 파괴응력과 각기 시험 조건간의 상관성을 조사하여 아래와 같은 결과를 얻었다. Fig. 9는 압력을 인가하는 금속 지그의 직경과 석영유리 시편표면에 부여되는 응력 집중 간의 상관관계를 나타내는 회귀그래프이다. 금속직경이 클수록 응력집중이 작아지며 이때의 금속 직경과 응력 집중간의 상관계수는 62.7%로 높은 상관성을 나타내었다.

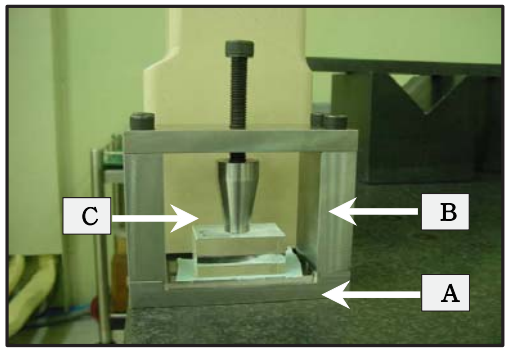

Fig. 8 Quartz glass specimen with impression Jigs.

Table 2. Test conditions

No. of Quartz Glass specimen	#1	#2	#3
Size of specimen (mm)	50 (L) x 30 (W) x 25 (H)		
Φ of contact area of impression Jig(mm)	4	8	16
Contact Area (㎟)	13	50	201
Waiveness of Specimen (㎛)	0.056	0.253	0.434
Torque applied (Kgf x ㎝)	50		
	100		
	200		
	300		
	400		
	500		

Fig. 10는 압력을 인가하는 금속 지그의 면적과 석영 유리 시편 표면에 부여되는 응력 집중간의 상관관계를 나타내는 회귀그래프이다. 금속지그의 석영 유리시편과의 접촉 면적이 클수록 응력 집중값은 작아지며 이때의 금속 지그면적과 응력 집중간의 상관계수는 38.1%로 그다지 높지 않은 상관성을 나타내었다..Fig. 11은 압력을 인가하는 금속 지그면의 Waviness와 석영 유리 시편 표면에 부여되는 응력 간의 상관관계를 나타내는 회귀그래프이다.

석영유리시편의 Waviness가 클수록 응력집중이 커지며 Waviness와 응력 집중간의 상관계수는 84.6%의 높은 상관성을 나타내었다.

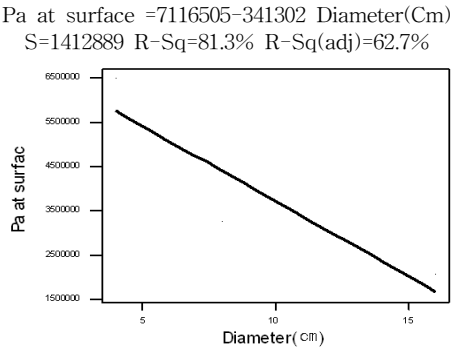

Fig. 9 Regression equation of pressure concentration dependency on diameter of contact metal.

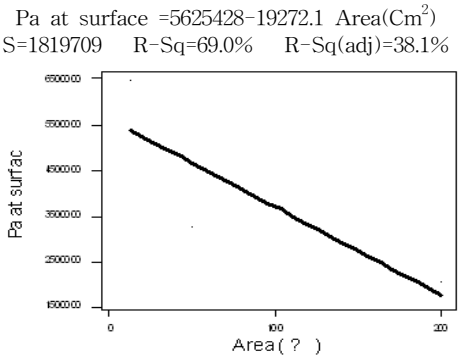

Fig. 10 Regression equation of pressure concentration dependency on the area of contact metal.

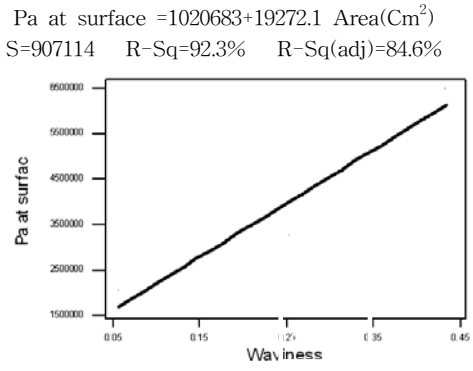

Fig. 11 Regression equation of pressure concentration dependency on the waviness of specimen.

응력 집중 영향요소와 응력 집중간의 상관계수를 정리하면 Table. 3과 같다

Table 3. Regression index

Classification	R-sq(%)
Pressure concentration with Diameter	62.7
Pressure concentration with Area	38.1
Pressure concentration with Waviness	89.4

Fig.12는 70kgf의 동일 하중에서 직영이 다른 지그에 의해 석영 시편에 나타난 응력 분포 상황을 Polariscope을 이용하여 얻은 사진이다. 금속 지그의 직경이 작을수록 즉 집중 하중 면적이 작을수록 응력 집중의 크기가 크며 부여 하중 중심에 집중되는 것을 지그 중심아래 뚜렷하게 발달된 색상차에 의해 알 수 있었다. 각기 시험 조건별 석영 유리 시편에 표면 크랙이 형성되는 시점의 응력 분포 상황을 Polariscope를 이용하여 얻은 사진을 Fig. 13, 14 및 15에 나타내었다.

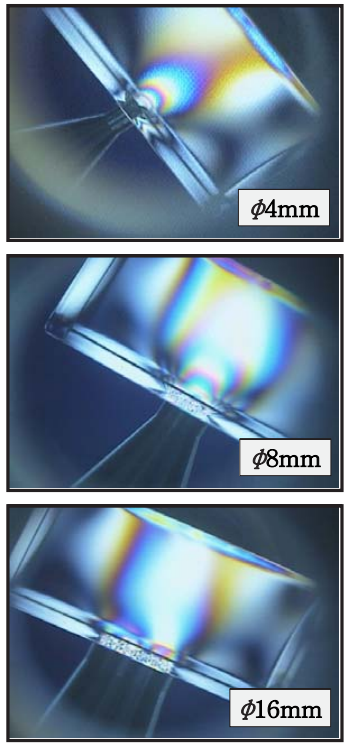

Fig. 12 Stress distribution difference dependence diameter of Jigs.

Fig.13는 직경 4mm의 금속 지그를 이용하여 압축 응력을 부여하고 표면 크랙이 발생한 시점에 형성된 응력 분포를 나타낸 것으로 크랙하단에 형성된 화살표로 표시된 중심에 강한 응력 집중을 볼 수 있다. Fig.14은 직경 8mm의 금속 지그를 이용하여 압축 응력을 부여하고 표면 크랙이 발생한 시점에 형성된 응력 분포를 나타낸 것으로 Fig.13에 비해 중심에 강한 응력 집중 보다는 표면 크랙의 끝단의 방사형의 응력 집중을 볼 수 있다. Fig.15는 직경 16mm의 금속 지그를 이용하여 압축 응력을 부여하고 표면 크랙이 발생한 시점에 형성된 응력 분포를 나타낸 것으로 표면 크랙 끝단의 방사형 응력 집중을 볼 수 있다. 즉 직경 8mm 및 16mm 지그에 의한 응력 집중은 접촉면보다는 접촉 선단에 응력이 집중되고 있음 알 수 있다.

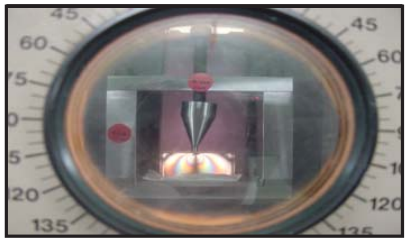

Fig. 13 Stress and surface fracture formed by 4mm diameter Jig.

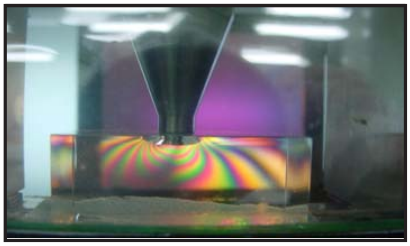

Fig. 14 Stress and surface fracture formed by 8mm diameter Jig.

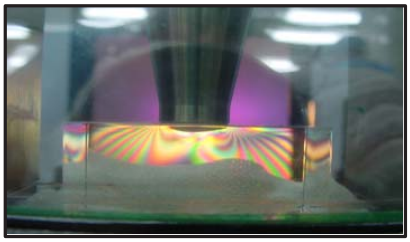

Fig. 15 Stress and surface fracture formed by 16mm diameter Jig.

3.3 석영유리 접촉면의 Waviness차에 의한 압축 응력차 분석

상기 3.2의 실험에서 확인된 금속 접촉 시 석영 유리 표면에 부가되는 압축 응력과 금속 접촉면의 Waviness와의 높은 상관성을 추가로 검토하기 위하여 Fig 15.의 Modeling 및 Table 4.에 나타낸 조건처럼 3가지 Waviness를 가진 시편에 단계적으로 500ton 까지 하중을 부여한 ANSYS simulation 결과 Fig. 16처럼 Waviness 차에 따른 부여 응력값에 큰 차이를 보이지 않았다. Fig.16은 3가지 상이한 Waviness를 갖는 석영 유리와 금속을 직접 접촉 시킨 후 각각 500ton 까지 부하를 부여할 수 있는 Modeling을 나타내었다.3.2항의 실제 상황과는 달리 Waviness 차에 압축 응력 차를 Simulation 한 결과 Fig.17.처럼 Waviness 차에 의한 압축 응력 차를 관측 할 수 없었다.

Table 4. Waviness dependency test condition

Waviness	0.05um	0.08um	0.1um
Load applied	self weight + 500 torr		
	self weight + 500 torr + 25 ton		
	self weight + 500 torr + 50 ton		
	self weight + 500 torr + 100 ton		
	self weight + 500 torr + 400 ton		
	self weight + 500 torr + 500 ton		

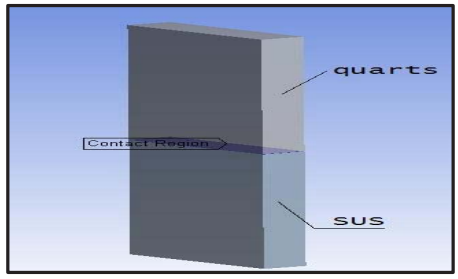

Fig. 16. Modeling for waviness dependency.

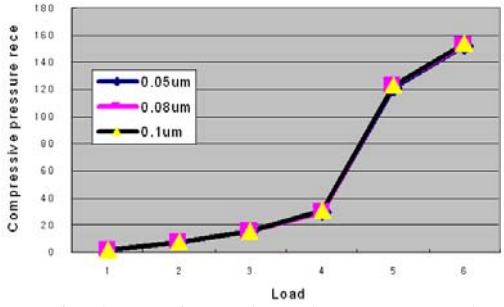

Fig. 17 Waviness dependency test results.

4. 결 론

이론압축강도가 높은 석영 유리이지만 동일 재질의 석영 유리 혹은 금속재와 직접 접촉되어 공정이 진행 될 경우에는 전면 접촉이 아닌 국부 접촉에 의해 작은 압축 하중 하에서도 표면 손상 및 파괴를 일으킬 수 있다. 특히 접촉 부품의 모따기 상태 , 접촉면적의 형상과 접촉부품 표면의 waviness 조건에 따라서 파괴 응력 값이 커져 쉽게 파괴가 발생할 수 있음을 알 수 있었다 . 따라서 접촉 부품의 설계 시에는 모따기, 접촉면적과 접촉면 waviness 등 파괴를 가속화 시킬 수 있는 요소 들의 크기를 제한하는 조건을 부여하여 제품이 설계되고 제작되어야 한다.

1) 모서리 면취 상태와 응력 집중의 관계에서 모서의 응력 집중 값은 면취량이 증가함에 따라 감소하며 그 감소량의 R 형상의 면취보다 C 형상의 면취가 상대적으로 크고 C형상의 면취의 경우"C"값을 증가 시켜도 응력 집중 값이 감소되지 않는 특정 "C"값이 존재하였다.

2) 접촉면적과 국부 응력 집중의 관계에서 접촉면적이 큰 경우는 접촉면보다 접촉 선단에 응력이 집중되었다.

3) 접촉면의 Waviness와 응력 집중의 관계에서 실제 실험에서는 실직적인 접촉 면적을 결정하는 접촉면의 Waviness 값이 커짐이 따라 응력 집중 값이 커짐을 나타내었으나 Modeling에 의한 Simulation 결과에서는 Waviness 값이 클 경우 응력 집중 값이 다소 크긴 하였어도 뚜렷한 상관성을 나타내지는 않았다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원한 과제로서 대학 당국에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1) 오세욱, 윤한기, 차용훈, 남기우 1999 " 재료 강도학" 원창 출판사 Page 29-36, 122-147
2) John M. Barsom, Stanly T. Rolfe 1999 " Fracture and Fatigue Control in Structure " : Applications of Fracture mechanics 3rd edition ASTM Page 237-263
3) V.D Frechette 1990 " Failure Analysis of Brittle Materials" Advances in Ceramics . Volume 28 The American Ceramic Society Page 3-42
4) Terry A. Michalske and Bruce C. Bunker " The Fracture of Glass " Scientific American page 78-85 1987
5) R. Morrel 1995 " Standard Guideline for Fractography of Advanced Ceramics" Fractography of Glasses and Ceramics III page 71-89

(2007년 5월 10일 접수, 2007년 8월 24일 채택)