

강구 경사충돌에 의한 유리의 손상 거동에 대한 실험적 연구 및 유한요소 해석

서창민* · 김성호* · 김동균*

(2000년 12월 7일 접수, 2001년 3월 10일 심사완료)

Finite Element Analysis and Experimental Study About Damage Behavior of Glass by Oblique Impact of Steel Ball

Chang-Min Suh, Sung-Ho Kim and Dong-Kyun Kim

Key Words: Cone Crack(콘크랙), Oblique Impact(경사충돌), Finite Element Method(유한요소해석), Particle Impact(입자충돌)

Abstract

The damage behavior of soda-lime glass was studied due to a steel ball of 1mm and 2mm at oblique impact test. The thickness of glass specimen were 3mm and 5mm and oblique degrees of impact were 90°, 70° and 50°. After the steel ball impact test, the crack patterns were investigated using a stereo-microscope. In addition, the finite element method was performed to analyze the stresses distribution and variation in the oblique impacted glass by steel ball. As a result of the impact test, the crack length of 90° impacted glass was the largest and that of 50° impacted glass was the smallest. In particular, as the impact velocity and diameter of the steel ball increased, the difference of crack length was prominent. The finite element analysis showed the maximum principle stresses distribution in contact area of glass specimen. The result of analysis was accorded with the crack growth behavior by the oblique impact test.

기호설명

K^{eff} : 유효강성행렬

D : 변위행렬

R^{eff} : 유효하중벡터

β, γ : 상수

1. 서 론

최근, 열효율 증대 및 에너지 절감을 위하여 고온에서 우수한 특성을 나타내는 구조용 세라믹을 가스터빈 또는 자동차용 엔진 등의 재료에 많

이 사용하고 있다. 이러한 세라믹의 활용 범위는 그 특성 때문에 점차 확대되고 있는 실정이다.⁽¹⁾

특히 세라믹 가스터빈(CGT : Ceramic Gas Turbine)의 경우, 연소가스에 포함된 고경도의 이물질 충돌에 의한 손상(FOD : Foreign Object Damage)은 가스터빈의 세라믹 부재에 균열 발생의 주요한 원인이 되고 있다.⁽²⁾ 따라서, 세라믹 재료를 터빈 등의 고속으로 회전하는 부재에 사용하기 위해서는 동적 강도 특성의 평가와 입자 충돌 손상에 관한 연구가 선행되어야 한다.⁽³⁾

세라믹 부재에 대한 입자 충돌손상에 관한 연구는, 주로 입자를 시험편에 대하여 수직방향으로 정적압입 또는 충돌을 가하는 경우에 관하여 이루어져 왔다. 그러나 실제의 입자의 충돌은 터빈 블레이드와 어느 정도 경사도를 가지고 이루어지는 경우가 일반적이다.⁽⁴⁾

따라서, 본 논문에서는 대표적인 취성재료이면서, 세라믹과 유사한 기계적 성질을 보이며 재료

* 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부

E-mail : cmsuh@bh.knu.ac.kr

TEL : (053)950-5573 FAX : (053)950-6550

* 경북대학교 기계공학과 대학원

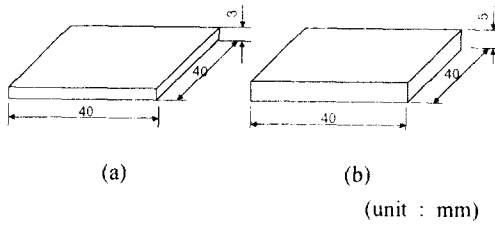


Fig. 1 Schematic diagram of glass specimens
 (a) 3mm thickness glass specimen
 (b) 5mm thickness glass specimen

Table 1 Mechanical properties of glass specimen and steel ball

Material	Young's modulus (GPa)	Hardness (Hv)	Tensile strength (MPa)	Poisson's ratio (ν)
Glass specimen	70	560	50	0.2 ~ 0.27
Steel ball	208	880	1700	0.3

내부의 균열 관찰이 용이한 일반 상업용 유리 (soda-lime glass)를 충돌 시험편으로 사용하여 터빈 블레이드에서 일어나는 입자 경사충돌에 대해 고찰하였다. 경사충돌 실험후 유리 시험편에 발생한 균열을 실체현미경(stereo microscope)을 통하여 관찰하고 그 크기를 정량적으로 분석하였다.

또한, 수치해석 기법인 유한요소 해석법(Finite Element Method, FEM)을 이용하여, 경사충돌시 발생하는 시험편의 응력변화를 고찰함으로써 입사 각도에 따른 균열 발생 거동에 대해 해석적으로 분석하고자 하였다.

2. 실험방법 및 해석모델

2.1 충돌 입자 및 충돌 시험편

본 연구에 사용된 충돌 입자는 볼 베어링 강으로 사용되고 직경 1mm, 2mm의 STB2 강구(steel ball)를 사용하였다. 시험편으로는 40×40×5mm, 40×40×3mm의 두 가지 치수로 제작된 일반 상업용 유리를 사용하였다.

Fig. 1은 본 실험에 사용한 시험편의 형상을 나타내며 (a)는 3mm (b)는 5mm 두께의 유리시험편을 각각 나타내고 있다. 시험편 모재로 사용한 유리는 취성 재료로서 다른 세라믹 재료와 유사

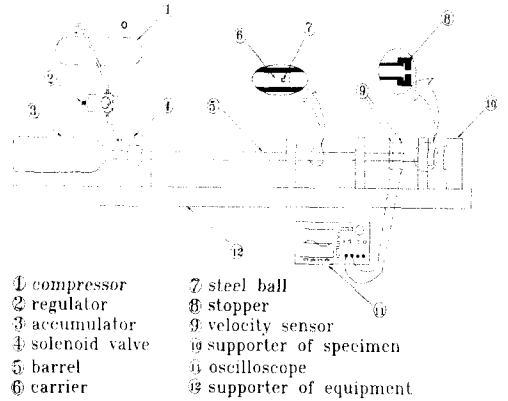


Fig. 2 Schematic illustration of experimental equipment of a particle impact test

한 파괴 거동을 보이며, 투명성을 이용하여 충돌에 의한 내부 크랙 관찰이 용이한 장점이 있다. Table 1은 본 실험에 사용한 유리 시험편과 충돌입자인 강구의 기계적 성질을 나타내고 있다.

2.2 충돌시험 장치

본 실험에서 사용한 입자 충돌 시험장치는 공기의 압력을 이용한 에어건(air gun)으로서, Fig. 2에 그 개략도를 나타내고 있다. 이때 강구의 충돌속도는 분사 압력 조절에 의한 간접적인 조절 방식을 택하였고, 두 개의 광센서와 오실로스코프를 사용하여 측정하였다.

유리시험편은 강재로된 블록형 지지대 상에 목재로 된 고정단에 시험편의 뒷면과 옆면을 단단히 고정시켰으며, 지지대의 각도를 조절함으로써 강구 입자의 충돌각도를 변화시켜가며 실험하였다.

2.3 유한요소해석과 모델링

강구의 입사각도가 유리시험편의 응력변화에 미치는 영향을 분석하기 위해 상용 해석프로그램인 MSC/MARC K7.3를 사용하였다.

Fig. 3은 강구와 유리 시험편의 3차원 해석 모델을 각각 총 1650개와 9516개의 8절점 육면체요소로 분할한 그림을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 5mm 두께의 유리 시험편을 모델링한 형상을 나타내며, 강구의 충돌 지점으로 큰 응력변화가 예상되는 유리시험편 부분은 Fig. 4(b)에서 확대하여 보여주고 있듯이 해석의 정밀성을 기하기 위해 요소의 크기를 작게하여 노드(node)수를 증가

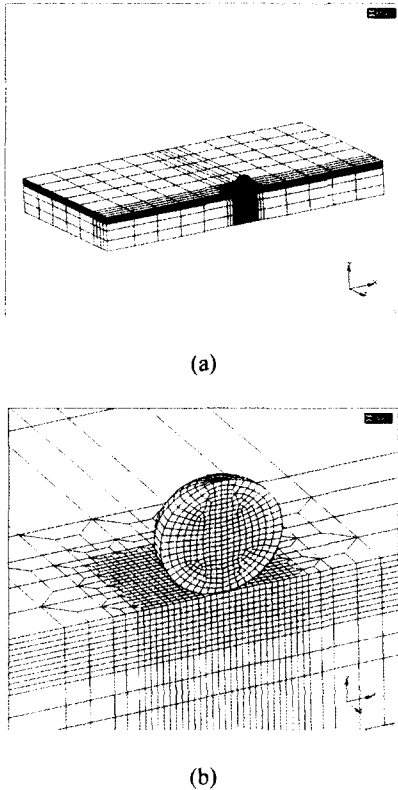


Fig. 3 Finite element model of glass specimen and steel ball
 (a) 5mm thickness specimen
 (b) Magnified figure of model

시켰다. 그리고, 충돌 강구의 크기는 실제 실험결과가 비교적 명확한 2mm 강구 충돌에 대해서만 해석하였다.

특히, 충돌해석 시에는 접촉문제에서 수렴성이 뛰어난 Implicit NEWMARK 방법을 적용하였다. NEWMARK 방법은 다음과 같이 나타낸다.

$$\{D\}_{n+1} = \{D\}_n + \Delta t \{\dot{D}\}_n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1-2\beta)\{D^{(2)}\}_n + 2\beta\{D^{(2)}\}_{n+1}] \quad (1)$$

$$\{\dot{D}\}_{n+1} = \{\dot{D}\}_n + \Delta t [(1-\gamma)\{D^{(2)}\}_n + \gamma\{D^{(2)}\}_{n+1}] \quad (2)$$

$$[K^{eff}]\{D\}_{n+1} = \{R^{eff}\}_{n+1} \quad (3)$$

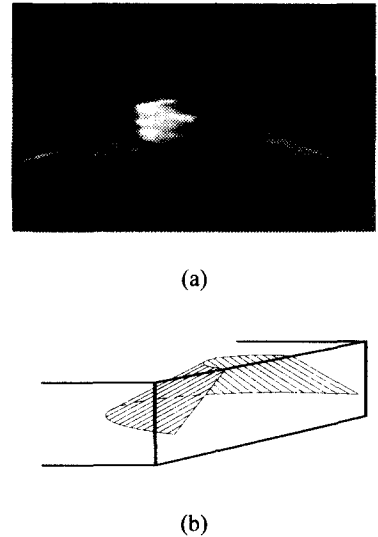


Fig. 4 Shape of cone crack in the 90° impact
 (a) Photograph of cone crack
 (b) Schematic sketch of cone crack

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유리시험편의 충돌시험 결과

평활한 유리에 대해서 강구의 충돌 각도를 변화시켜가며 시험한 결과 다양한 형태의 크랙이 발생하였다. 이러한 크랙들은 충돌속도가 증가함에 따라서 충돌각중의 크기와 응력 분포의 변화에 따라 여러 가지 형태의 균열이 발생하였다. 그 가운데, 본 연구에서는 시험편 내부로 성장하여 강도저하를 유발하게 되는 콘 크랙(cone crack)의 성장 거동에 대하여 분석하였다. Fig. 4(a)는 90° 충돌에서 발생한 콘 크랙의 형상을 시험편 측면에서 촬영한 사진을 보여주고 있으며, Fig. 4(b)는 입체적인 형상을 개략적으로 스케치한 그림을 나타낸다.

충돌각도를 달리하여 충돌실험을 행하였을 때, 콘크랙의 길이는 유리시험편의 두께와 충돌각도에 따라 조금씩 다른 결과를 보여주었다. 먼저, 충돌각도를 달리 하였을 때 나타나는 콘 크랙의 형태는 Fig. 5와 같이, 강구의 입사쪽 콘크랙길이 반사쪽 콘 크랙길이보다 길었으며 그 각도도 입사쪽이 25° ~ 30° 정도이고, 반사쪽이 15° ~ 17° 였다. Fig. 6은 본 논문에서 관찰한 콘 크랙의 길이를 정의하고 있다.



Fig. 5 Photograph of cone crack on the oblique impact (3mm thickness specimen, $d=2\text{mm}$, $V=36.34\text{m/s}$, $\theta = 70^\circ$)

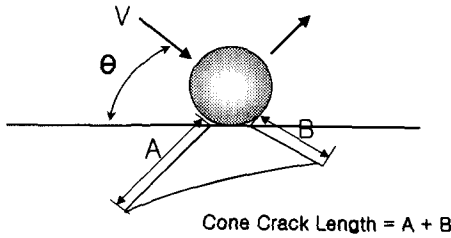
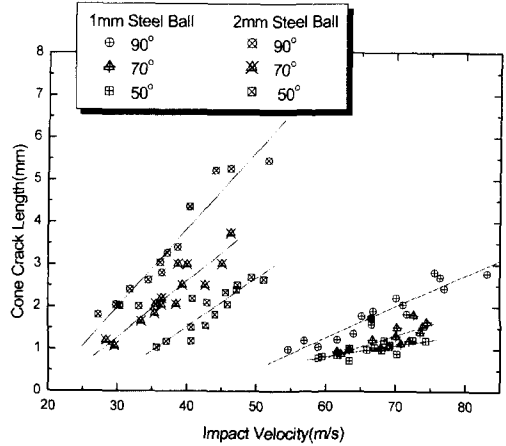


Fig. 6 Schematic illustration of cone crack length definition

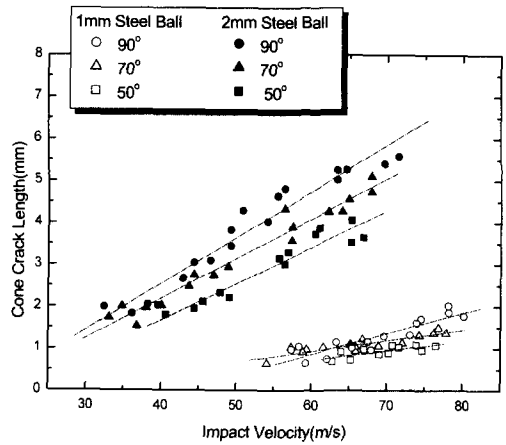
Fig. 7(a)는 유리시험편의 두께가 3mm이고 충돌강구의 직경이 1mm, 2mm일 때의 콘크랙 길이를 충돌 각도에 따라 비교한 그래프이다. 이 그래프에서 같은 속도에서 입사각이 시편과 90° 일 때 콘 크랙길이가 가장 길고 70° , 50° 의 순서로 크랙길이가 긴 것을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 5mm 유리시험편의 두께일 때 강구의 입사 각도에 따른 콘 크랙의 길이를 비교한 그래프이다. 3mm 두께의 시험편일 때와 같이, 같은 속도에서 90° , 70° , 50° 의 충돌순으로 크랙 길이가 길다는 것을 알 수 있다. 또한 1mm 강구의 경사충돌일 때 보다 2mm 강구의 경사충돌시 각도의 영향이 더 크게 나타났다.

Fig. 8은 유리시험편의 두께에 대해서 각각 입사각에 따라 정리한 그래프이다. 1mm 강구일 때와 2mm 강구일 때 모두 같은 속도에서 3mm 두께의 유리시험편의 콘 크랙길이가 더 길게 나타났음을 확인할 수 있다. 한편, 이러한 크랙의 길이차이는 충돌각도가 작을수록, 더 작게 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison of cone crack length according to impact degrees

- (a) 3mm thickness specimen
- (b) 5mm thickness specimen

3.2 응력분포의 유한요소해석 결과

콘 크랙의 발생원리는 구형입자가 충돌하면서 평판과 접촉하기 시작한 직후부터 최대 충돌하중이 가해지기 직전까지의 과정동안 발생하며, 초기에 발생하는 링크랙을 발생 기점으로 해서 충돌부 아래의 인장응력선을 따라 내부로 성장하는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁾

본 연구에서는 이러한 콘 크랙의 발생에 영향을 미치는 인장응력부를 해석하여 그 결과를 실험결과와 비교 분석하였다.

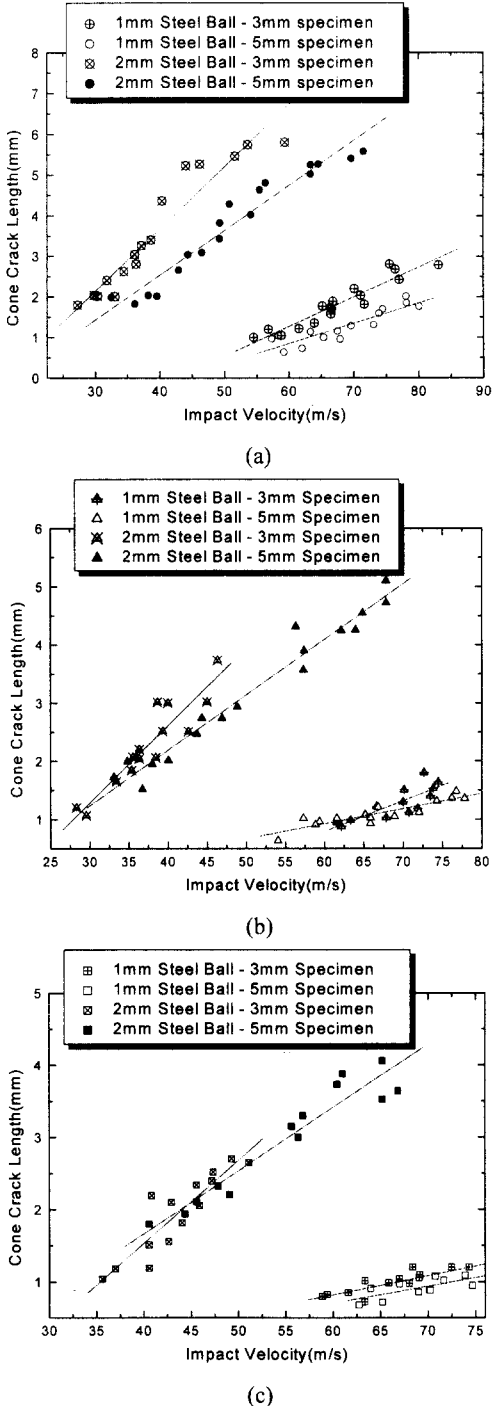


Fig. 8 Comparison of cone crack length according to impact velocity ; (a) 90° impact (b) 70° impact (c) 50° impact

이때, 경계조건 및 재료의 물성치는 앞서 기술한 실험조건과 동일하게 적용하였으며, 강구의 충돌 속도는 50m/s로 설정하였고, 강구와 유리 시험편 사이의 마찰계수는 0.18로 하였다.

Fig. 9(a)는 3mm 두께의 유리 시험편 모델에 대해 직경 2mm 강구의 충돌 각도가 90° 일 때 시험편 내부에 작용하는 최대 주응력의 분포를 나타낸다. 강구의 접촉면 바로 아래에 링 크랙이 발생하는 인장응력이 존재하며, 그 안쪽에는 압축응력이 작용함을 알 수 있다. 또한, 링 크랙 하부에는 콘 크랙을 발생시키는 콘 모양의 인장응력이 형성되었으며, 이는 실험결과와 일치하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 9(b)는 강구가 70° 각도로 경사충돌시 발생하는 유리시험편의 내부의 응력분포를 나타내고 있으며, 콘 크랙의 입사각쪽의 응력이 반사각 쪽 보다 더 길게 형성되었다. 이는 강구와 유리 사이의 마찰력으로 인한 전단력이 내부에 작용함으로써 내부 콘 크랙의 발생을 좌우하는 내부 인장응력에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

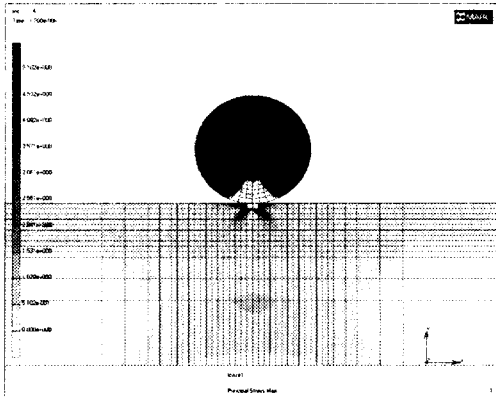
Fig. 9(c)는 (b)의 접촉부를 확대한 그림으로, 표시한 바와 같이 콘 크랙이 성장하는 방향의 노드 (A, B)에서의 시간에 따른 응력변화를 분석하였다.

Fig. 10은 시간에 따른 노드 A에서의 응력변화를 강구의 충돌입사각도에 따라 나타낸 것이다. 이때, 노드의 응력변화는 접촉 지점으로부터 충돌에 의한 탄성 응력파의 발생으로 인하여 진동을 가지면서 증가한 후, 다시 감소함을 알 수 있다.

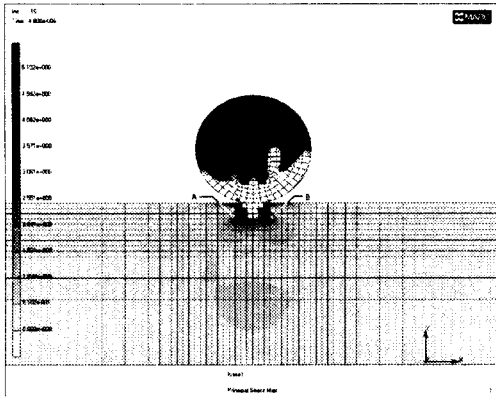
충돌각도에 따른 응력을 비교한 결과, 90° 로 강구가 입사했을 때의 최대응력이 가장 높았으며 다음으로 70°, 50° 순으로 높았다. 즉, 90° 충돌시 최대 약 6kg/mm²의 응력이 발생하였고, 70° 경사충돌에서는 5.7kg/mm², 50° 일 때 4.6kg/mm²의 최대 응력이 발생하였다.

한편, 70° 경사충돌의 경우, 노드 A와 B의 응력변화를 서로 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 노드 A와 노드 B의 최대응력이 약 6.2kg/mm²과 5.7kg/mm²로 다소 차이가 남을 알 수 있다.

이러한 응력의 차이는 강구와 유리의 접촉시 발생하는 마찰력에 의한 것으로, 결과적으로 입사쪽과 반사쪽의 균열길이의 차이를 유발할 것으로 판단된다.



(a)



(b)

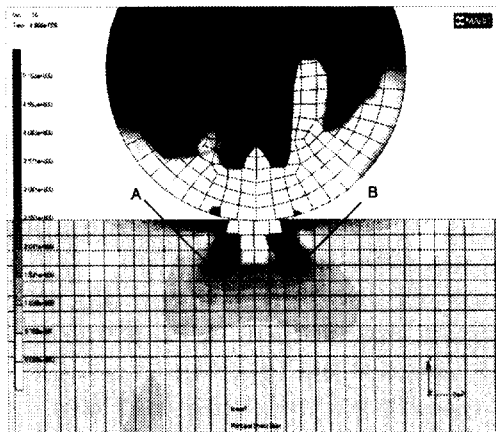


Fig. 9 Contour band graphic of FEM analysis ; (a) 90° impact (b) 70° impact (c) Magnified graphic of (b)

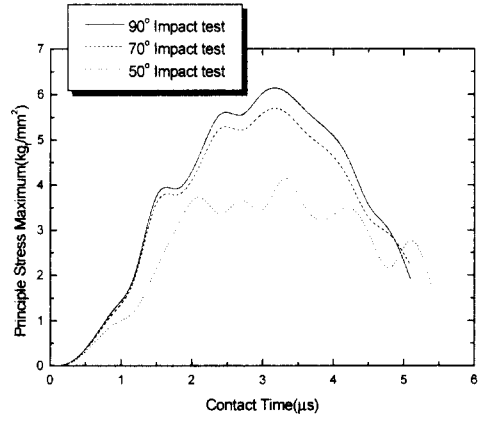


Fig. 10 Principle stress maximum at A node of 3mm thickness specimen

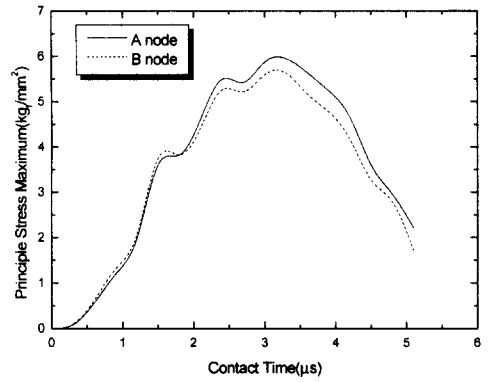


Fig. 11 Principle stress maximum stress at A and B node of 3mm thickness specimen

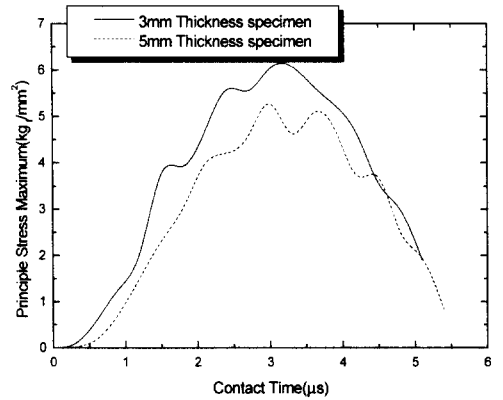


Fig. 12 Principle stress maximum at 3mm and 5mm thickness specimen model

Fig. 12는 Fig. 9(c)에 표시한 A노드에서 90° 로 충돌해석한 경우의 응력변화를 시간에 따라 3mm 와 5mm의 경우를 서로 비교한 것이다. 이 그래프에서 3mm 두께의 시험편 응력해석 결과가 5mm 두께의 시험편 응력해석 결과보다 높게 나타남을 알 수 있다.

5mm 두께의 시험편에서는 최대 응력이 5.7kg/mm²로 나타나며, 3mm 두께 시험편은 6.17kg/mm²의 최대 응력값을 나타내었다. 이러한 차이는, 유리의 두께에 따라 전파되는 응력파의 영향과 흡수되는 충돌력의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

특히, 이와같은 일련의 해석결과는 실제 충돌 실험 결과와 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

(1) 강구 충돌에 의해 유리시험편에 발생한 콘 크랙의 크기는 90° 입사각도로 충돌했을 때 가장 크게 발생했으며, 각도가 작을 수록 작게 나타났다.

(2) 유한요소해석 결과, 강구 충돌시 유리시험편에 발생하는 최대 주응력에 따라 콘 크랙 모양이 결정되어 그 경향이 실제 충돌실험 결과와 일치함을 알 수 있었다.

(3) 강구의 경사충돌시 발생하는 콘 크랙의 형상은 입사쪽과 반사쪽의 차이가 발생하였으며, 충돌 과정에서의 마찰력으로 인해 입사쪽이 길게 성장된다고 판단된다.

후 기

본 연구는 Brain Korea 21 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Mencik, J., 1992, "Strength and Fracture of Glass and Ceramics," ELSEVIER SCIENCE PUBLISHING Co., Inc., Glass Science and Technology, Vol. 12.

(2) 山田幸生, 1990, "セラミックス ガスタビンの 研究開發," 日本機械學會誌, Vol. 93, pp. 129~135.

(3) Donald A. Shockey, David J. Rowcliffe, Kim C. Dao and Lynn Seaman, 1990, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, pp. 1613~1619.

(4) 신형섭, 前川一郎, 서창민, 1993, "강구의 경사충돌에 의해 취성재료에 생기는 헤르쯔 콘크랙 형상에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(1), pp. 421~425.

(5) Chaudri. M. M. and Chen, L., 1989, "The Orientation of the Hertzian Cone Crack in Soda-Lime Glass Formed by Oblique Dynamic and Quasi-Static Loading with a Hard Sphere," J. Mater. Sci., Vol. 24, pp. 3441~3448.

(6) Lawn. B. R., Wiederhorn, S. M. and Roberts, D. E., 1984, "Effect of Sliding Friction Forces on the Strength of Brittle Materials," J. Mater. Sci., Vol. 19, pp. 2561~2569.

(7) Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., 1989, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis," John Wiley & Sons, 3rd Ed.

(8) 서창민, 이문환, 김성호, 이동화, 1999, "입자 충돌에 따른 Al₂O₃-TiO₂ 플라즈마 코팅유리의 손상체적 변화에 관한 연구," 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 98~104.

(9) 서창민, 이문환, 김성호, 1999, "Cr₂O₃ 용사 코팅된 유리의 저속 입자 충돌에너지에 따른 손상 거동," 대한기계학회 논문집, 제23권, 제9호 pp. 1484~1490.

(10) B. Ostle, K. V. Turner, C. R. Hicks, G. W. McElrath, 1996, "Engineering Statistics-The Industrial Experience," International Thomson Publishing Asia.

(11) Knight. C. G., M. V. Swain and M. M. Chaudhri, 1977, "Impact of small steel spheres on glass surfaces," Journal of Materials Science Vol. 12, pp. 1573~1586.

(12) Zhong, Z. H., 1993, "Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems," Oxford Univ. Press.