Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 37, No 7, pp. 713~720 2000.

압입에 따른 알루미나 세라믹스의 이축 파괴 거동

정성민 · 박성은 · 이홍림
연세대학교 세라믹공학과
(2000년 5월 26일 접수)

Biaxial Fracture Behavior of Alumina Ceramics : Indentation Effect on Ball-on-3-ball Test

Seong-Min Jeong, Sung-Eun Park and Hong-Lim Lee
Department of Ceramic Engineering, Yonsei University. Seoul, 120-749 Korea
(Received May 26, 2000)

초 록

Ball-on-3-ball test법에 의하여 알루미나 세라믹스의 이축파괴거동에 대한 연구를 수행하였다. 중심에서부터 각각 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm 떨어진 지점에 치구의 지지볼을 사이를 지나는 경로 A와 지지볼을 지나는 경로 B를 구분하여 압입을 가한후 이를 다시 이축강도시험법으로 파괴강도를 측정하였다. 이때 중심에서 압입점까지의 거리가 멀어질수록 파괴강도는 증가하는 양상을 보였으며 지지볼위를 지나는 경로 B의 경우가 지지볼사이를 지나는 경로 A의 경우보다 파괴강도가 큰 경향을 나타내었다. 또한 중심에서 압입점까지의 거리가 1 mm와 2 mm인 경우에는 시편의 파괴가 모두 방사응력보다는 접선응력에 의하여 발생하는 것으로 관찰되었다. 이것은 FEM을 이용한 응력분포와 매우 잘 부합하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The biaxial fracture behavior of alumina ceramics was studied using ball-on-3-ball test. The polished surfaces of alumina specimens were indented at 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm apart from the center of the specimen along path A, passing between the two supporting balls from the center of the specimen, and along path B, passing above the three supporting balls from the center of the specimen. The fracture strength of the indented specimens was measured using the ball-on-3-ball test, a kind of biaxial strength test. The fracture strength increased with increasing the distance from the center to indented position. The fracture strength of the specimen indented along path B was higher than that of the specimens indented along path A. It was presented that the fracture caused by tangential stress rather than radial stress when the indented positions are 1 mm and 2 mm from the center of the specimen. This phenomenon was in good agreement with FEM analysis.

Key words : Alumina, Biaxial strength test, FEM, Indentation, ANSYS

1. 서 론

취성파괴특성을 갖고 있는 세라믹스는 표면에 흠이나 균열등의 결함이 존재할 경우 강도의 저하가 일어나게 된다.[1] 3점 및 4점 꺾임강도 시험법등의 일축강도시험법의 경우에는 인장응력과 평행한 균열이 존재할 경우 강도의 저하가 일어나지 않는 반면, 이축강도시험법(biaxial strength test)의 경우에는 disc형 시편에 방사응력과 접선응력이 인가되어 균열의 방향과 무관한 보다 정확한 강도값을 얻을 수 있다. 또한 최대 인장응력은 중앙부의 하중지역에서 발생하므로 모서리파괴를 배제할 수 있는 장점이 있다.[2,3] 세라믹스의 이축강도시험법은 ASTM에 piston-on-3-ball 시험법에 대한 표준실험방법이 정의되어 있다.[4] 그외의 이축강도시험법에는 시편지지부와 하중인가부의 형태에 따라 ball-on-ring, piston-on-ring, ring-on-ring, uniform-pressure-on-disk, ball-on-3-ball등이 있다. 이러한 이축강도시험법은 일축강도시험법에 비하여 위와 같은 여러가지 장점을 갖고 있으므로 많은 연구가 이루어져왔다. Batdorf등, Evans등, Lamon등, Chao등은 다축응력하에서의 구조세라믹스의 파괴강도에 대한 통계학적인 분석을 했다.[5-9] Giovan등은 다축응력시스템으로 ring-on-ring 시험법을 사용하여 파괴강도를 구하고 이를 4 point bending시험법을 통하여 얻은 이론적인 예측치와 비교하였다.[10] Shetty등은 ball-on-ring, piston-on-3-ball, ring-on-ring시험법을 이용하여 세라믹스의 이축파괴거동에 대하여 연구하였다.[11,12] Park등은 알루미나 시편의 이축파괴강도를 측정하고 그 응력분포를 유한요소법으로 고찰하였다.[3]

세라믹스는 취성파괴특성을 나타내므로 표면에 결함이 존재하면 그 강도가 현저하게 감소하는 특성을 갖는다. 초기 균열에 의한 세라믹스의 파괴거동에 대하여도 많은 연구가

있었다. Lee등은 알루미나 시편에 초기균열로서 노치를 인가하고 그 노치길이에 따른 파괴거동을 관찰하였다.[13] 또한 Meschke등은 Al_2O_3와 Al_2O_3-SiC composite에 대하여 crack-like void를 인가하여 4점 꺾임강도시험법으로 균열에 의한 동적파괴거동을 연구하였다.[14] Marshall등도 soda-lime glass에 indentation을 행하고 압입하중에 따른 잔류강도의 변화를 연구하였다.[15]

본 연구에서는 위에서 언급한 이유로 시편의 완전한 접촉을 이루기 힘든 세라믹스의 특성을 고려하여 Fig. 1과 같은 ball-on-3-ball시험법을 이용하여 세라믹스의 이축강도시험을 행하였다. Ball-on-3-ball시험법과 같은 이축강도시험법에 의한 세라믹스의 파괴거동 고찰은 위에서 언급한 바와 같이 여러차례 이루어진바 있으나 초기결함의 위치에 따른 고찰은 이루어진 바가 없었다. 따라서 본 연구에서는 결함에 의한 세라믹스의 파괴거동을 고찰하기 위하여 중심에서부터 일정거리에 diamond indenter로 압입을 하여 인위적인 초기균열을 만들고 그에 따른 ball-on-3-ball시험법에 의한 파괴거동을 관찰하여 강도시험시 시편에 가해지는 방사응력과 접선응력중에서 어느 응력이 파괴에 중요한 영향을 미칠 수 있는가를 압입위치에 따라 고찰하고 유한요소해석을 이용하여 얻은 응력분포와 비교하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 시편은 상용 알루미나 분말(AES-11, Sumitomo, Japan)로부터 제작하였다. 분말을 칭량하여 몰드에 넣고 일축가압성형한후 20,000 psi로 냉간정수압성형(cold isostatic pressing)한 후 1600°C에서 1시간동안 상압소결하여 지름 20 mm의 disc형 시편을 얻었다. 이 disc형 시편을 입자지름 1 μm의 diamond suspension을 이용하여 미세연마하여 거울면을 얻었다. 이후에 microhardness tester (Buehler 1900-2000, HV법)를 이용하여 일정한 위치에 10 kg의 하중을 70 μm/s의 속도로 10초간 인가하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같은 초기균열을 얻었다. Table 1에 본 연구에서 실시한 시편의 notation과 그 각각의 압입위치를 나타내었다.

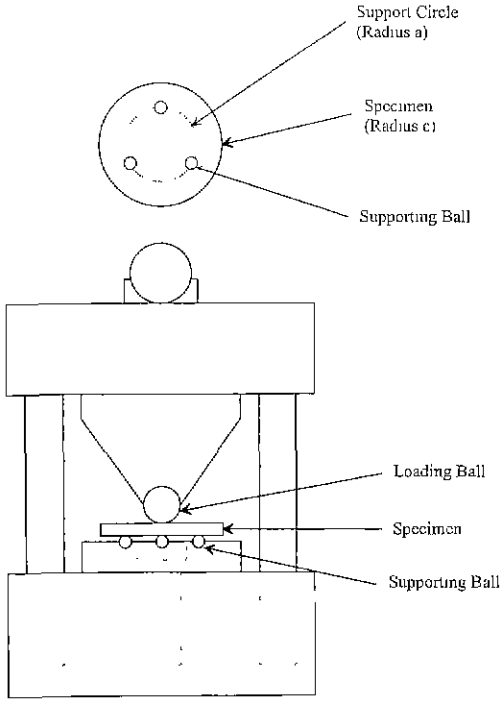

Fig. 1. Schematic diagram of ball-on-3-ball test apparatus.

이축파괴강도는 지지볼이 120° 간격으로 중심으로부터 6 mm 떨어져서 위치하도록 한 ball-on-3-ball 이축강도시험법으로, 만능재료시험기(H10K-C, Hounsfield Test Equipment

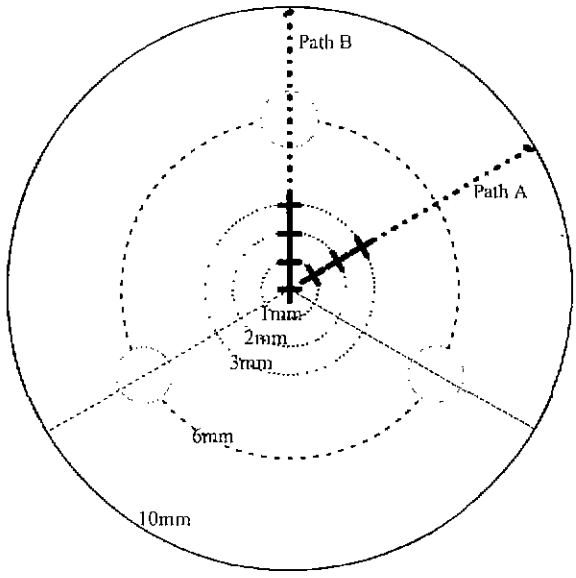

Fig. 2. Schematic diagram of indented specimen.

Table 1. Sample Notation and Indented Location

Notation	Parh	Indented location
NO	-	Not indented
CT	-	Indented at centerof specimen
A1	Path A	Indented at 1 mm along path A apart from center of specimen
A2	PathA	Indented at 2 mm along path A apart from center of specimen
A3	Path A	Indented at 3 mm along path A apart from center of specimen
B1	Path B	Indented at 1 mm along path B apart from center of specimen
B2	Path B	Indented at 2 mm along path B apart from center of specimen
B3	Path B	Indented at 3 mm along path B apart from center of specimen

Ltd., UK)를 이용하여 각 조건에 대해 10개씩 측정하였으며, 이때 crosshead speed는 ASTM에 의거하여 두께에 따라서 0.14 mm/min로 행하였다. 이들 파괴강도의 측정값을 Weibull plot하여 Weibull계수를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 압입 전후의 파괴 강도 및 Weibull 계수의 비교

Fig. 3에 압입하지 않은 시편과 시편 중심에 압입한 시편에 대한 Weibull 도표를 나타내었다. 압입하지 않은 시편, 즉 NI의 평균 이축 강도는 442 MPa이었고, Weibull 계수는 7.0이었다. 또한, 시편 중심에 압입한 시편, 즉 CT의 평균 이축 강도는 173 MPa이었고, Weibull 계수는 17.4이었다. 시편에 압입한 후 평균 강도가 감소하는 것은, 압입에 의해 인위적으로 상당히 큰 초기 균열을 도입하여 압입하기 이전에 존재하던 초기 균열에 의해 파괴가 시작되어 측정된 강도보다 낮은 값이 측정된 것이다. 시편에 하중이 인가되어 파괴될 때 파괴원으로 작용하는 균열의 크기는 강도값과 반비례한다. 즉, 균열의 크기가 커질수록 강도는 감소하게 된다. 시편에 압입한 후 Weibull 계수가 증가하는 것은, 압입하기 전에는 일정하지 않은 크기의 균열들이 시편의 여러 부분에 무작위로 분포해 있지만 시편 중심에 압입한 시편은 그 부분에 일정한 크기의 균열을 만든 것으로 같은 위치에 같은 크기의 균열을 가지므로 강도의 편차가 줄어들었기 때문에 Weibull 계수가 크게 나타나게 된 것이다.

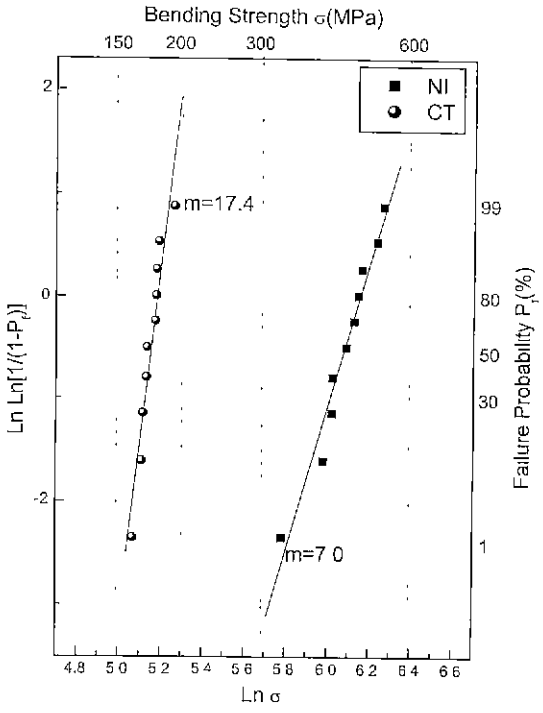

Fig. 3. Weibull plots of indented and unindented alumina specimen.

3.2. 시편 중심에서 압입점까지의 거리 및 경로에 따른 이축 강도

Fig. 4는 시편 중심에서의 거리 및 경로에 따라 압입한 시편의 이축 강도의 Weibull 도표를 나타낸 것이다. 시편 중심에 압입한 시편(CT)의 Weibull 계수는 17.4, 지지볼을 지나지 않는 경로에 압입한 시편, 즉 A1, A2, A3의 Weibull 계수는 각각 43.8, 10.2, 15.0, 지지볼을 지나는 경로에 압입한 시편, 즉 B1, B2, B3의 Weibull 계수는 각각 9.3, 13.0, 15.6이었다. 압입한 7종류의 시편의 Weibull 계수는 모두 압입하지 않은 시편의 Weibull 계수인 7.0보다는 높았으며, 시편 중심에서 압입점까지의 거리 및 경로와의 관련성은 없는 것으로 나타났다. 시편 중심에서의 거리 및 경로에 따른 이축 강도의 변화는, 대체적으로 시편 중심에서의 거리가 멀수록 강도가 커지고, 지지볼을 지나지 않는 경로에 압입한 시편보다는 지지볼을 지나는 경로에 압입한 시편의 강도가 높게 나타났다.

시편 중심에서의 거리 및 경로에 따른 이축 강도의 변화를 명확히 보기 위하여 Fig. 4의 데이터를 Fig. 5의 상자 도표(box chart)로 나타내었다. 시편 중심에 압입한 시편(CT)의 평균 강도는 173 MPa, 지지볼을 지나지 않는 경로에 압입한 시편, 즉 A1, A2, A3의 평균 강도는 각각 178 MPa, 218 MPa, 318 MPa이었으며, 지지볼을 지나는 경로에 압입한 시편, 즉 B1, B2, B3의 평균 강도는 각각 184 MPa, 249 MPa, 348 MPa이었다. 지지볼을 지나지 않는 경로와 지지볼을 지나는 경로 모두 압입점의 위치가 시편 중심에서 멀어질수록 강도는 점점 높아진다. 또한 항상 지지볼을 지

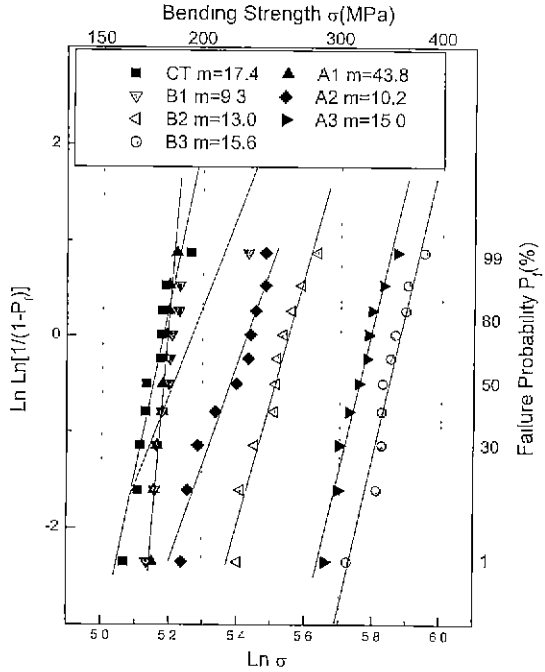

Fig. 4. Weibull plots of indented alumina specimen. (CT, A1, B1, A2, A3, B3).

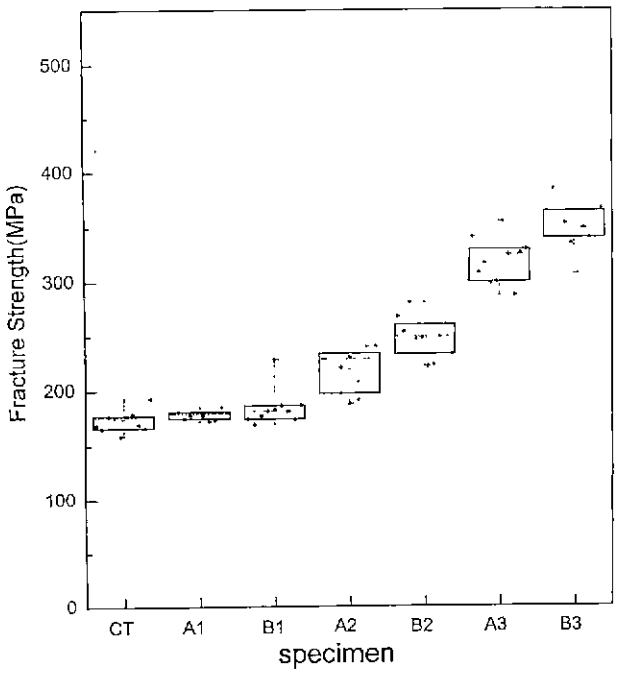

Fig. 5. Box chart for fracture strength distribution of Al_2O_3 specimen by distance from the center to indented position.

나지 않는 경로에 압입한 시편보다는 지지볼을 지나는 경로에 압입한 시편의 평균 강도가 높게 나타났다.

시편 중심에서의 거리 및 경로에 따른 이축 강도의 변화는 시편에 인가되는 응력 분포에 의존하며, 이를 살펴보기 위해서 유한 요소법을 이용하였다. Ball-on-3-ball 시험에서 시편에 인가되는 응력 해석을 위해서 ANSYS FEM package를 이용하였다.[16] 응력 해석에 사용된 모델은 실제 ball-on-3-ball 시험 시스템과 동일하게 모사하였다. 시편의 반지름은 10 mm, 시편의 두께는 2 mm, 중심에서 지름 2 mm의 지지볼까지의 거리는 6 mm, 하중 인가볼의 지름은 5 mm로 하였다. 모델은 지지볼이 120° 간격으로 놓여 있어 3회축 대칭이고, 또한 지지볼 사이의 면(중심에서 지지볼 방향과 60°를 이루는 면)은 거울면으로 대칭이므로, 해석 시간을 줄이기 위해서 Fig. 6과 같이 전체의 1/6만을 모사하였다.

모델에 사용된 재료의 물성은 Table 1에 나타내었다. 알루미나 시편의 탄성률은 3점 꺾임법으로 측정한 330 GPa을, 프와송비는 0.27을 사용하였다.[17] 하중 인가볼과 지지볼에 사용된 합금공구강의 탄성률은 210 GPa을, 프와송비는 0.285를 사용하였다.[18]

메시종류는 Fig. 6과 같이 알루미나 시편에는 육면체 모양의 요소를 사용하였고, 하중 인가볼과 지지볼에는 사면체 모양의 요소를 사용하였다. 또한 지지볼과 시편, 시편과 하중 인가볼 사이는 접촉 요소(contact element)를 만들어, 하중이 인가됨에 따라 볼과 시편이 접촉하게 되어 생기는 면

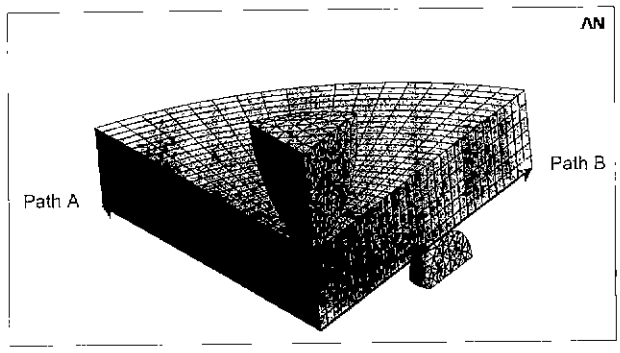

Fig. 6. Finite element mesh used for numerical calculation in ball-on-3-ball test.

을 고려하였다. 알루미나 시편과 하중 인가볼 및 지지볼 간의 마찰 계수는 0.4로 하였다.[19] 모델에 사용한 요소의 수는 2754개, 절점의 수는 3493개이었다.

하중, 초기 및 경계 조건은 다음과 같이 설정하였다. 초기 조건은 지지볼의 아래면을 z축(높이) 방향으로 변위 0로 설정하여 하중을 인가하였을 때 아래로 내려가지 않도록 구속하였다. 경계 조건은 대칭성을 이용하여 전체의 1/6만을 모델링하였으므로, 하중 인가볼, 지지볼, 시편의 옆면을 모두 대칭면으로 설정하였다. 하중 조건은 하중 인가볼의 윗면을 z축 방향으로 -0.04 mm 변위로 설정하였다. 이것은 실제로 시편이 하중을 받을 때 하중 인가볼이 0.04 mm 아래 방향으로 내려가는 것을 의미한다.

Fig. 7과 Fig. 8에는 각각 ball-on-3-ball 시험에서 시편 아랫부분에 인가되는 방사 응력과 접선 응력의 분포를 나타내었다. 최대 응력이 인가되는 부분에서의 응력값을 100%로, 응력이 인가되지 않는 부분에는 0%로 하고, 응력이 같은 부분을 선으로 연결한 것이다. 이 선을 등응력선이라고 하고, 등응력선의 간격이 좁을수록 응력의 변화가 급격하고 간격이 넓을수록 응력의 변화가 완만한 것이 된다. 시편 중심부분에서 접선 응력보다는 방사 응력에서 등응력선의 간격이 좁으므로, 방사 응력이 더 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 8의 방사 응력 분포도에서 보면 잘 알 수 있듯이, 지지볼을 지나지 않는 경로 A보다는 지지볼을 지나는 경로 B 방향으로 등응력선의 간격이 좁으므로, 이 방향으로의 접선 응력이 더 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 시편 아랫부분에서 지지볼을 지나는 경로 A와 지지볼을 지나지 않는 경로 B에 대하여 각각의 방사 응력과 접선 응력을 시편 중심에서의 거리에 대하여 나타낸 것이다. 4가지 응력 모두 시편 중심에서 최대 인장 응력을 나타내고 시편 가장자리로 갈수록 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 경로 A의 방사 응력이 가장 급격히 감소하고, 경로 B의 방사 응력, 경로 B의 접선 응력, 경로 A의 접선 응력으로 갈수록 점점 완만하게 감소한다. 그 결과 시편 중심에서는 4가지 응력은 거의 같지만 중심에서 조금만 벗어나면

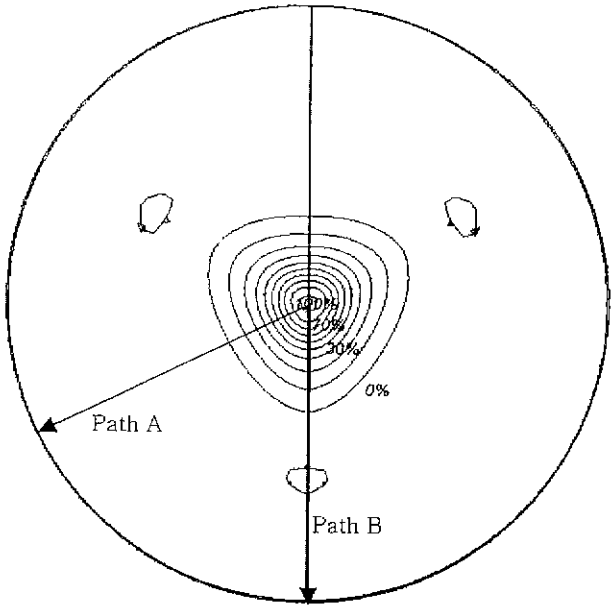

Fig. 7. Radial stress distribution on the lower face of the specimen in ball-on-3-ball test by Finite Element Analysis.

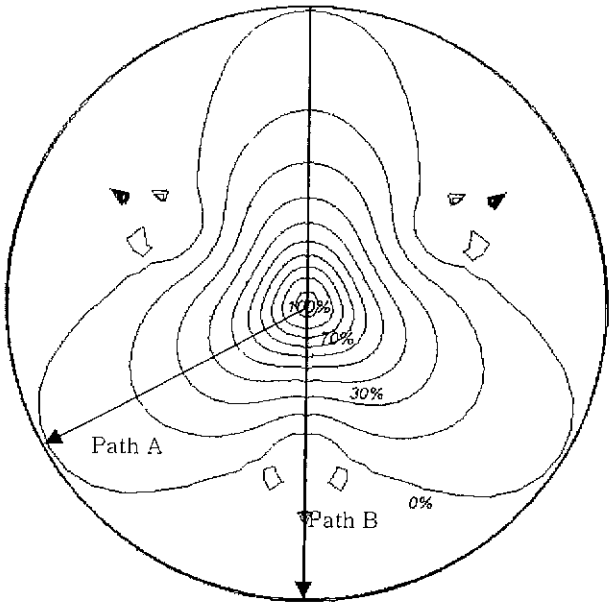

Fig. 8. Tangential stress distribution on the lower face of the specimen in ball-on-3-ball test by Finite Element Analysis.

력의 크기는 다음과 같아진다. 경로 A의 접선 응력 > 경로 B의 접선 응력 > 경로 B의 방사 응력 > 경로 A의 방사 응력. 지지볼이 있는 시편 중심에서의 거리 6 mm 부근에서 경로 B의 방사 응력과 접선 응력은 급격한 변화를 보인다. 시편과 지지볼과의 접촉에 의해서 매우 큰 압축 응력이 인가됨을 알 수 있다. 시편 가장자리에서는 경로 A의 접선 응력을 제외하고는 모두 응력이 인가되지 않는다.

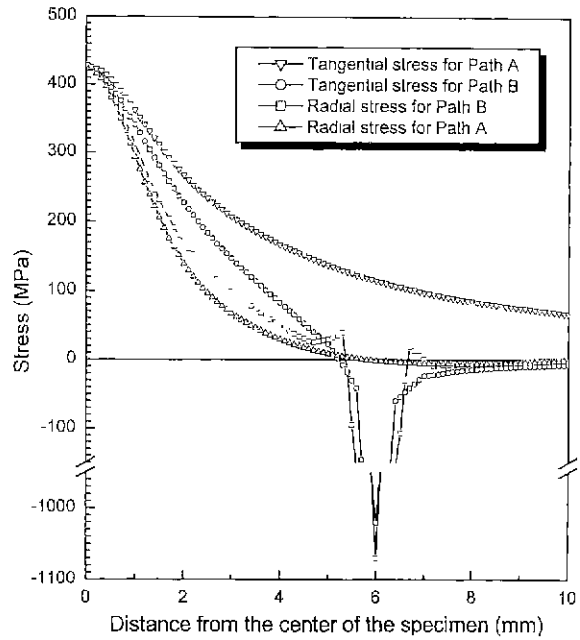

Fig. 9. Stress distribution on the lower face of the specimen in ball-on-3-ball test.

지지볼을 지나지 않는 경로에 압입한 시편과 지지볼을 지나는 경로에 압입한 시편 모두 접선 응력이 방사 응력보다 크므로 접선 응력에 의해서 파괴를 일으킨다. 이 응력해석 결과는 Fig. 5에서 나타난 압입점의 위치에 따른 파괴강도의 양상을 잘 설명하고 있다. 시편 중심에서 압입점까지의 거리와는 무관하게 항상 경로 A의 접선 응력이 경로 B의 접선 응력보다 크므로, 압입에 의해서 균일한 초기 균열을 형성시킨 시편에 대해서 경로 A에 압입한 시편의 강도가 경로 B에 압입한 시편의 강도보다 더 낮게 나타난 것이다. 또한 시편 중심에서 거리가 멀어질수록 시편에 인가되는 응력이 감소하므로, 시편 중심에서 압입점까지의 거리가 멀수록 강도는 증가하게 된다.

3.3. 시편 중심에서 압입점까지의 거리 및 경로에 따른 파괴 양상

Fig. 10은 압입을 하지 않은 시편(NI)의 파괴 양상을 나타낸 것이다. 10개의 시편 중, Fig. 10(a)와 같이 시편이 3조각으로 파괴되는 것이 5개, (b)와 같이 4조각으로 파괴되는 것이 4개, (c)와 같이 5조각으로 파괴되는 것이 1개이었다. 3조각으로 파괴된 Fig. 10(a)에서 보듯이, 지지볼을 지나지 않는 경로로 파괴되는 경우가 많다. 이것은 응력 분포 해석 결과에서 알 수 있듯이, 지지볼을 지나는 경로보다는 지지볼을 지나지 않는 경로로 더 높은 응력이 인가되므로 파괴는 지지볼을 지나지 않는 경로를 따라 진행되기가 쉽기 때문이다.

Fig. 11은 시편 중심에 압입한 시편(CT)의 파괴 양상을 나타낸 것이다. 10개의 시편 중, Fig. 11(a)와 같이 가로 방

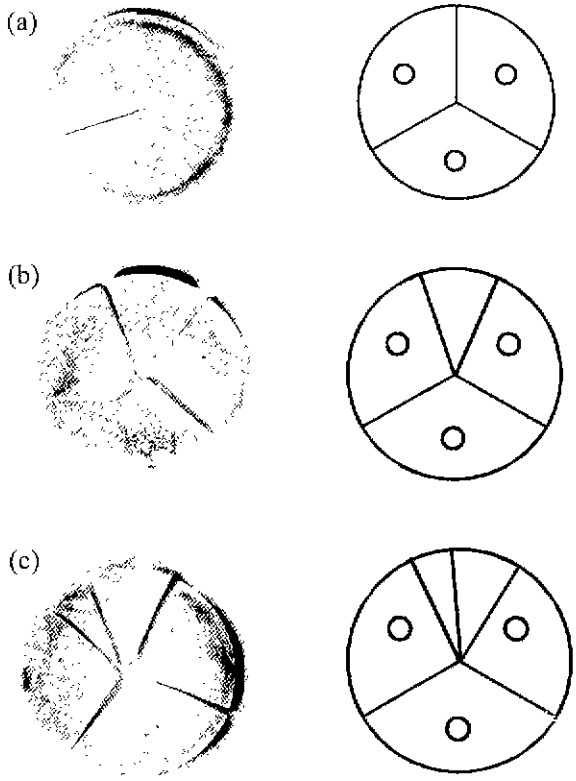

Fig. 10. Fracture morphology of alumina specimen without indentation ((a),(b),(c)NI).

향으로 2조각으로 파괴된 것이 3개, (b)와 같이 세로 방향으로 2조각으로 파괴된 것이 6개. (c)와 같이 3조각으로 파괴된 것이 1개이었다. 시편 중심에 큰 균열이 존재하고 시편 중심에 최대 응력이 인가되므로, 시편의 파괴는 압입점에서부터 시작된 것을 알 수 있다. 압입에 의해서 가로 방향과 세로 방향으로 거의 같은 길이로 균열이 생성되므로, 시편 중심에 압입한 시편에서의 파괴는 가로 방향으로, 또는 세로 방향으로 전파될 수 있다

Fig. 12는 시편 중심에서 1 mm 떨어진 곳에 압입한 시편의 파괴 양상을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 경로 A의 방향으로 시편 중심에서 1 mm 떨어진 곳에 압입한 시편으로, 10개의 시편 모두 같은 파괴 양상을 나타내었다. 파괴는 압입점에서부터 시작되어 세로 방향으로 전파되었다. 이것은 압입에 의해 생성된 균열에 응력이 집중되어 시편 중심에서보다 더 높은 응력이 인가된 것을 의미한다. Fig. 9의 응력 해석 결과, 시편 중심에서 1 mm 떨어진 곳에서는 방사 응력보다 접선 응력이 더 크므로 세로 방향으로 파괴가 진행된 것으로 생각된다. Fig. 12(b)는 경로 B의 방향으로 시편 중심에서 1 mm 떨어진 곳에 압입한 시편으로, 10개의 시편 모두 같은 파괴 양상을 나타내었다. 파괴는 역시 압입점에서부터 시작되어 세로 방향으로 전파되었다.

Fig. 13은 시편 중심에서 2 mm 떨어진 곳에 압입한 시편의 파괴 양상을 나타낸 것이다. Fig. 13(a)는 경로 A의

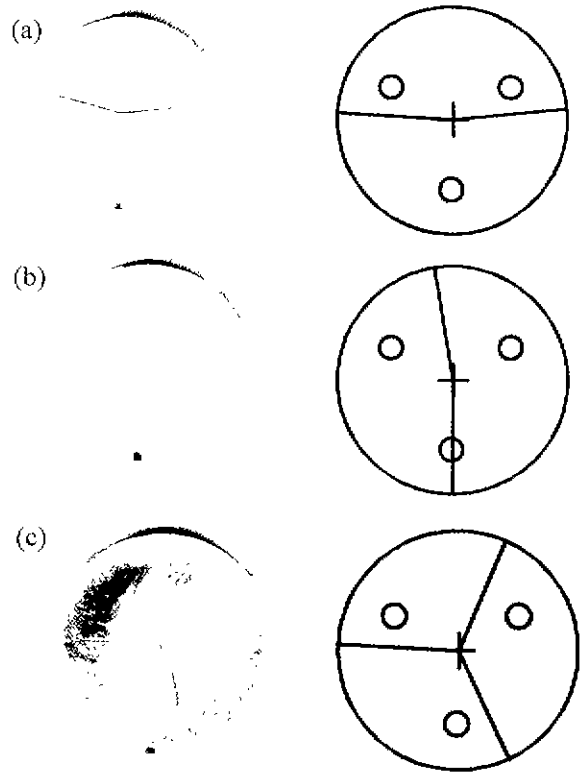

Fig. 11. Fracture morphology of alumina specimen indentation at center ((a),(b),(c)CT).

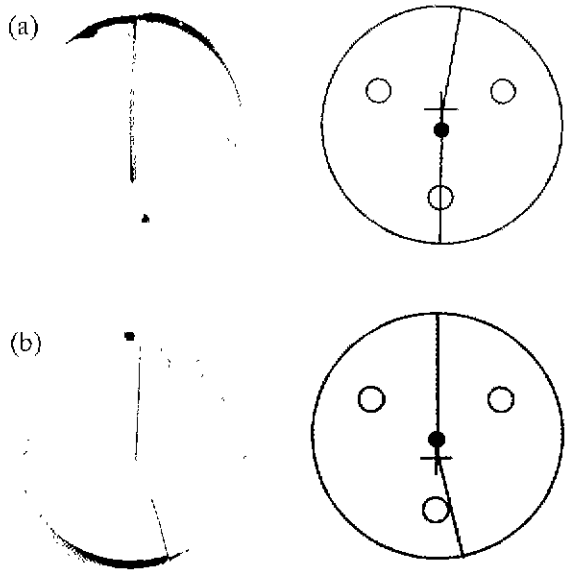

Fig. 12. Fracture morphology of alumina specimen indentation at 1 mm apart from center ((a) A1, (b) B1).

방향으로 시편 중심에서 2 mm 떨어진 곳에 압입한 시편으로, 10개의 시편 모두 같은 파괴 양상을 나타내었다. 파괴는 압입점에서부터 시작되어 세로 방향으로 전파되었다. 이것은 압입에 의해 생성된 균열에 응력이 집중되어 시편 중심에서보다 더 높은 응력이 인가된 것을 의미한다. Fig. 9의

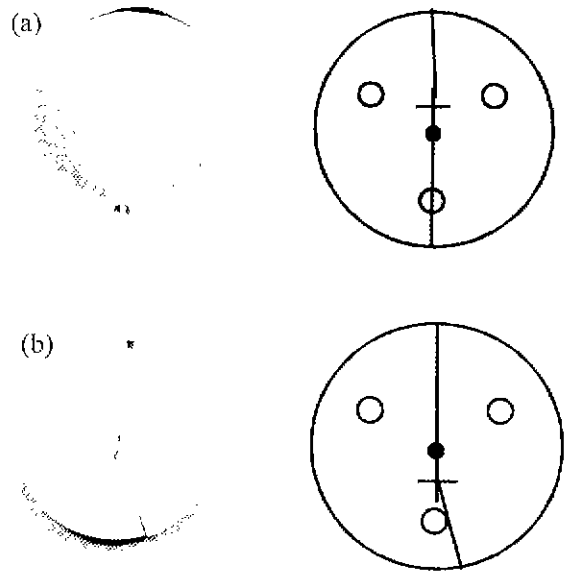

Fig. 13. Fracture morphology of alumina specimen indentation at 2 mm apart from center ((a) A2, (b) B2).

응력 해석 결과, 시편 중심에서 2 mm 떨어진 곳에서도 방사 응력보다 접선 응력이 더 크므로 세로 방향으로 파괴가 진행된 것으로 생각된다. Fig. 13(b)는 경로 B의 방향으로 시편 중심에서 2 mm 떨어진 곳에 압입한 시편으로, 10개의 시편 모두 같은 파괴 양상을 나타내었다. 파괴는 역시 압입점에서부터 시작되어 세로 방향으로 전파되었다. 이와 같이 시편 중심에서 1 mm와 2 mm 떨어진 곳에 압입한 시편에 대해서는 그 파괴양상이 동일하게 나타났다.

Fig. 14는 시편 중심에서 3 mm 떨어진 곳에 압입한 시편의 파괴 양상을 나타낸 것이다. Fig. 14(a)는 경로 A의 방향으로 시편 중심에서 3 mm 떨어진 곳에 압입한 시편으로, 10개의 시편 모두 같은 파괴 양상을 나타내었다. 파괴는 압입점에서부터 시작되지 않고 시편 중심에서부터 시작되었고, 10개의 시편 모두 3조각으로 파괴되었다. 파괴가 압입점에서 시작되지 않고 시편 중심에서 시작되었다는 것은, 시편 중심에서 3 mm 떨어진 곳에 압입하여 생성된 균열에 응력이 집중되었지만 시편 중심에서의 응력보다는 작다는 것을 의미하는 것이다. 경로 B의 방향으로 시편 중심에서 3 mm 떨어진 곳에 압입한 시편 중, 9개의 시편은 Fig. 14(b)와 같이 3조각으로, 1개의 시편은 Fig. 14(c)와 같이 4조각으로 파괴되었다. 또한, 10개의 시편 모두 파괴는 시편의 중심에서부터 시작되어 진행되었다.

4. 결 론

ball-on-3-ball test에서 중심에서부터 결함까지의 거리에 따른 세라믹스의 파괴거동을 관찰하기 위하여 각각 중심으로부터 경로 A, B에 대하여 각각 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm떨어진 위치에 압입을 하여 강도측정을 하고 이를 다시 유한요소법을 통하여 응력해석을 실시하여 비교하였다. 그 결과, 압입전과 후를 비교할때 압입시의 파괴강도가 압입전에 비해 현저히 저하되었으며 와이불계수는 증가하여 압입후의 강도편차는 줄어듦을 알 수 있었다. 중심에 압입한 시편의 경우 파괴의 방향이 random하게 나타났으며 파괴는 압입점에서부터 시작되었다. 중심으로부터 1 mm와 2 mm 떨어진 위치에 압입한 시편의 경우 파괴는 모두 접선응력에 의하여 일어났으며 압입점에서부터 시작되었다. 중심으로부터 3 mm 떨어진 위치에 압입한 시편의 경우 모두 3조각으로 파괴되었으며 파괴는 시편의 중심에서부터 시작되었다. 파괴강도는 중심으로부터 압입점까지의 거리가 멀수록, 경로 B의 경우에서 더 큰 파괴강도를 나타내었다. 유한요소해석 결과, 접선응력이 방사응력보다 크게 나타나 접선응력이 주도적으로 파괴에 영향을 미치는 것을 잘 설명할 수 있었다. 중심에서부터 압입점까지의 거리가 멀어질수록 강도가 증가하는 것도 유한요소해석을 통하여 나타난 응력분포로 잘 설명할 수 있었다.

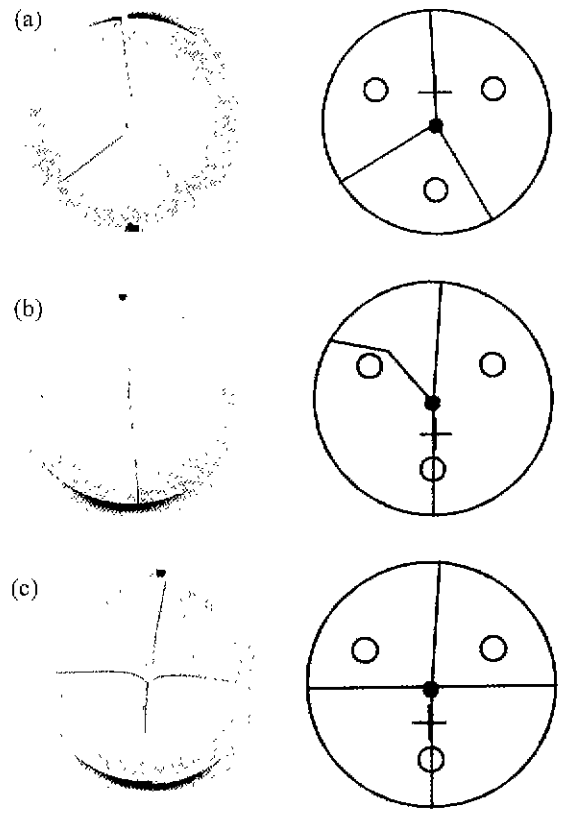

Fig. 14. Fracture morphology of alumina specimen indentation at 3 mm apart from center ((a) A3, (b), (c) B3).

감사의 글

본 연구는 2000년도 한양대학교 세라믹공정연구센터를 통

한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며 이에 감사드리는 바입니다.

REFERENCES

1. J. Mencik, "Strength and Fracture of Glass and Ceramics," p. 40, Elsevier, Amsterdam (1992).
2. D. B. Marshall, "An Improved Biaxial Flexure Test for Ceramics," *Ceram. Bull.*, **59**(5), 551-553 (1980).
3. 박성은, 이중현, 이홍림, "Ball-on-3-ball 시험에서 이축 강도의 결정," 요업학회지, **36**(3). 225-230 (1999).
4. ASTM Standard F394-78. pp. 466-490 in ASTM Annual Book of Standards Vol. 15.02. Section 16. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1996).
5. S. B. Batdorf. "Some Approximate Treatments of Fracture Statistics for Polyaxial Tension International Journal of Fracture." *Int. Journ. of Fracture*, **13**(1), 5-11 (1977).
6. A. G. Evans, "A General Approach for the Statistical Analysis of Multiaxial Fracture," *J. Am. Ceram. Soc.*, **61**(7-8), 302-303 (1978).
7. J. Lamon, "Ceramics Reliability : Statistical Analysis of Multiaxial Failure Using the Weibull Approach and the Multiaxial Elemental Strength Model." *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(8), 2204-2212 (1990).
8. L. Chao and D. K. Shetty, "Equivalence of Physically Based Statistical Fracture Theories for Reliability Analysis of Ceramics in Multiaxial Loading," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(7), 1917-1921 (1990).
9. L. Chao and D. K. Shetty. "Reliability Analysis of Structural Ceramics Subjected to Biaxial Flexure," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**(2), 333-344 (1991).
10. M. N. Giovan and G. Sines, "Biaxial and Uniaxial Data for Statistical Comparisons of a Ceramic's Strength," *J. Am. Ceram. Soc.*, **62**(9-10). 510-515 (1979).
11. D. K. Shetty, A. R. Rosenfield, G. K. Bansal and W. H. Duckworth. "Biaxial Fracture Studies of a Glass-Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**(1), 1-4 (1981).
12. D. K. Shetty, A. R. Rosenfield, P. McGuire, G. K. Bansal and W. H. Duckworth, "Biaxial Flexure Tests for Ceramics." *Ceram. Bull.*, **59**(12), 1193-1197 (1980).
13. 이홍림, 이규형, 박성은, "알루미나 세라믹스의 동적피로거동," 요업학회지, **34**(10), 1053-1059 (1997).
14. F. Meschke, P. Alves-Riccardo, G. A. Schneider and N. Claussen, "Falure Behavior of Alumina and Alumina/silicon Carbide Nanocomposites with Natural and Artificial Flaws," *J. Mater Res.*, **12**(2), 3307-3315 (1997).
15. D. B. Marshall and B. R. Lawn, "Flaw Characteristics in Dynamic Fatigue· The Influence of Residual Contact Stresses," *J. Am. Ceram. Soc.*, **63**(9-10), 532-536 (1980).
16. A. J. Swanson, "ANSYS-Engineering Analysis System User's Manual." Swanson Analysis System. Inc., Johnson Rd., P. O. Box 65. Houston, PA 15342.
17. J. Men k. "Strength and Fracture of Glass and Ceramics," pp. 20-22, Elsevier, Amsterdam (1992).
18. P. D. Harvey, "Engineering Properties of Steel." American Society for Metals, Ohio (1982).
19. A. Melander, "A Finite Element Study of Conditions for Early Crack Growth at Inclusions in Contact Fatigue," *Proceedings of the Sixth International Fatigue Congress*, **2**. 1081-1086 (1996).