

시편 두께에 따른 알루미나 세라믹스의 이축 파괴 거동

이홍림 · 박성은 · 이중현
연세대학교 세라믹공학과
(1999년 3월 10일 접수)

Biaxial Fracture behavior of Alumina Ceramics : Thickness Effect on Ball-on-3-ball Test

Hong Lim Lee, Sung Eun Park and Joong Hyun Lee

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
(Received March 10, 1999)

초 록

ball-on-3-ball 시험법에서 두께 1.9, 2.3, 2.6, 2.8 mm와 지름 20 mm의 4가지 알루미나 시편을 제작하여 각각의 파괴 거동을 살펴보고 그 결과를 분산분석(ANOVA)을 실행하였다. ASTM에 규정된 하중속도에 따라 이축 강도 시험을 한 결과 시편의 강도는 두께의 영향을 받지 않는 동일 평균을 가진다고 할 수 있었으며, 하중 볼이 시편에 닿는 면적과 crack-branching number는 두께가 직선적으로 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여 주었다. 또한 crack-branching number는 시편의 강도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었다. Grinding 방향이 표면 결함에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 파괴 후 jog 방향을 조사하였다. 그 결과, #600 grit diamond wheel로 마무리 가공을 하였을 경우 표면 결함에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Biaxial fracture behavior of alumina specimens with the diameter of 20 mm and four kinds of thickness of 1.9, 2.3, 2.6 and 2.8 mm was studied by the ball-on-3-ball test and the fracture results were analyzed by the analysis of variance (ANOVA). The strength, measured with the down speed prescribed in ASTM, showed that the measured strength was not dependent on the thickness of the specimens. Equivalent radius and crack-branching number were observed to increase linearly with the thickness of the specimens. The jog direction was observed to study the effect of grinding direction on surface flaws. It is thought that the surface finishing with #600 grit diamond wheel did not affect the surface flaws of the specimens.

Key words : Biaxial Fracture, Alumina, Thickness, Ball-on-3-ball test, ANOVA, Jog

1. 서 론

막대형 시편의 3점 또는 4점 꺾임 강도 측정 등의 일축 강도 시험은 세라믹의 강도를 결정하는 방법으로 오랫동안 사용되어 왔다. 그러나, 이 3점 또는 4점 꺾임 강도측정에 의해 세라믹 강도를 측정할 때 다음 두 가지의 큰 단점이 보고된다. 첫째, 시편을 준비할 때 야기되는 모서리의 효과가 측정되는 강도에 기여하고, 둘째, 강도는 표면가공 또는 polishing하는 동안 형성되는 결함들의 영향을 강하게 받기 때문에 연마 찰흔(striation)의 효과를 밝히는 두 가지(lateral 및 longitudinal)의 방향으로 시험해보지 않고는 완전히 분석할 수가 없다는 것이다.¹⁾ 이에 반해 취성 물질의 강도를 측정하는데 이축 강도 시험은 3점, 4점 꺾임 법에 의한 일축 강도 측정에 비해

다음의 이점들이 있다. 첫째, 최대 인장 응력이 중앙의 하중 영역 안에서만 일어나기 때문에 모서리 파괴를 막을 수 있다. 둘째, 이축응력상에서의 응력 분포에 대한 연구가 실제 다축의 하중을 받게 되는 일반적인 재료에 적합하다.²⁾ 셋째, 사용시편의 제작이 용이하다. 일반 막대형 시편 제작시 4모서리의 가공이 필요 없는 디스크형의 시편을 사용하며, 디스크형 시편의 지름과 같은 길이의 네 변을 가지는 사각형 시편을 사용해도 같은 결과를 얻을 수 있는 점에서 시편의 제작이 간단하다.³⁾ 일축 강도시험에서의 강도 시험과 이축강도시험에서의 강도를 비교해 볼 때, 내부 결함이 큰 작용을 한다면, 일축에서 강도에 영향을 주는 균열의 성장에 관여하는 결함들은 수직 응력을 받는 그 축선 상의 결함들만이 최종 강도에 영향을 주지만, 이축강도시험에서는 이축 강도를 받는 결

합들의 수가 훨씬 많다는데서 강도의 저하를 예상할 수 있다. 실제 구조재료로서의 세라믹스는 다축 하중을 받기 때문에 실제 강도 실험에서도 다축 강도에 대한 실험과 그 결과의 고찰이 요구된다. 이러한 이축 강도 측정 장치는 ball-on-ring, piston-on-3-ball, ring-on-ring 등 3가지 측정방법이 주로 연구되어왔는데³⁾ 본 실험에서는 ball-on-3-ball Test 장치를 이용하였다. ball-on-3-ball Test 장치는 시편이 3개의 ball에 의해 지지됨으로써 표면이 조금 휜 시편이라도 3개의 ball에 모두 안정되게 접촉하게 함으로써 ball-on-ring Test 장치의 단점을 보완한 장치이다. 이러한 장점 등을 지닌 이축 강도 시험을 위해 ball-on-3-ball 시험법을 이용하여 시편 두께에 따른 강도의 변화, grinding 방향과 jog 방향과의 관계, 시편 두께에 따른 하중 ball과 시편이 닿는 유효 면적의 변화, crack branching number 등의 변화를 분산분석(Analysis of Variance : ANOVA)^{4,5)}를 통해 고찰하였다.

2. 시편과 실험 방법

두께가 각각 1.9, 2.3, 2.6, 2.8 mm이고 지름이 20 mm 인 4종류의 디스크형 시편을 제작하여 두께의 ball-on-3-ball 측정에서 강도, 파괴원, 동일 하중을 받는 면적의 변화에 관한 영향을 살펴보았다. 모든 실험은 상온에서 시행되었다.

본 연구에서의 시편의 종류는 구조재료용 세라믹으로 널리 사용되고 있는 알루미나 시편을 제작하여 실험하였다. 상용 알루미나 분말은 AES-11(Sumitomo, Japan)이며, 각 27, 3.3, 3.6, 3.9 g씩 칭량하고 냉간 정수압 성형(cold isostatic pressing)을 한 후 1600°C에서 소결한 후 평균 두께가 1.9, 2.3, 2.6, 2.8 mm의 디스크형 시편 20개씩을 제작하였다. 이 시편을 정밀 절단 연삭기(SFG-200M, Samsung clover, Korea)를 사용하여 #140 및 #600의 다이아몬드 휠로 표면 연마를 하였다. 사용된 알루미나 세라믹스의 물성은 Table 1에 나타내었다. 시편의 파괴인성(K_{IC})은 SENB(single edge notched beam)

Table 1. Properties of Alumina Specimens

Property	Value
Four point bending strength	360 ± 23 Mpa
Fracture toughness	3.91 ± 0.15 MPa · m ^{1/2}
Density	3.91 ± 0.01 g/cm ³ (98.2%)
Grain size	2.3 μm
Elastic modulus	330 ± 29 GPa
Poisson's ratio(compression)	0.27

법을 사용하여 구하고, 영율(Young's modulus, E)의 측정과 시편의 밀도 측정에는 아르키메데스 원리를 이용하여 계산하였으며 시료 및 측정 방법은 한국 산업 규격을 따랐다.^{6,7)}

3점 또는 4점 꺾임 강도측정 등에 쓰이는 관형 시편의 모서리에 존재하는 균열을 제거하기 위하여 45°로 모서리 가공을 하는 반면 이축 응력 강도 시험에서 시편의 모서리 가공이 필요하지 않으므로 앞, 뒤 두 면만 표면 마무리 가공을 하였다. 이는 아래 하중을 받는 3개의 ball을 포함하는 원 밖에 있게 되는 시편의 모양이나 상태 등은 응력 분포를 결정하는데 무시할 정도이기 때문이다.⁸⁾ 시편 두께에 따른 down speed는 ASTM표준 그래프에 의거 결정하였으며⁸⁾ 강도 측정은 만능 재료 시험기(H10K-C, Hounsfield Test Equipment, UK)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

ball-on-3-ball 이축 응력 측정장치에서 시편 두께에 따른 강도의 변화, grinding 방향과 jog 방향과의 관계, 강도와 jog 길이와의 관계 그리고 시편 두께에 따른 하중 ball과 시편이 닿는 면적의 변화에 대해 결과를 살펴 보았다.

일반적으로 모평균의 동일성을 검증하는 방법으로 분산분석(Analysis of Variance : ANOVA)을 주로 사용한다. 이 방법에서는 '모든 모평균이 동일하다' 라는 귀무가설(null hypothesis)을 전제로, 실제 측정된 값들로부터 p-value를 통계적으로 구한 후 유의수준(significance level, α)과의 비교를 통해 모평균의 동일성을 검증한다. 여기서 p-value는 표본 결과로부터 귀무가설을 입증해 주는 크기를 나타낸 값으로써 대체로 작으면 작을수록 귀무가설을 기각할 가능성이 크다고 판단하게 된다. 유의수준은 통계적 가설 검정에서 귀무가설의 기각과 채택을 결정해 주는 판정의 기준 크기로서 여기서는 일반적으로 통계학에서 널리 이용되는 0.05를 사용하였다. 즉, 측정 실험 값으로부터 통계학적으로 계산한 p-value가 유의수준 0.05보다 크면 귀무가설을 채택하게 되어 모평균이 동일하다고 말할 수 있고, 유의수준 0.05보다 작으면 귀무가설을 채택하게 되어 비교한 두 값들이 동일하지 않다고 말할 수 있다.^{4,9)}

Fig. 1은 실험에 사용한 4가지 시편에 대해 측정된 강도 값들의 Weibull plot을 나타내었다. 두께가 각각 1.9, 2.3, 2.6, 2.8 mm인 시편의 Weibull 계수는 각각 6.5, 11.2, 9.6과 10.9이었다.

3.1. 시편 두께에 따른 강도의 변화

유리나 세라믹스에서는 다양한 종류의 결함들이 있

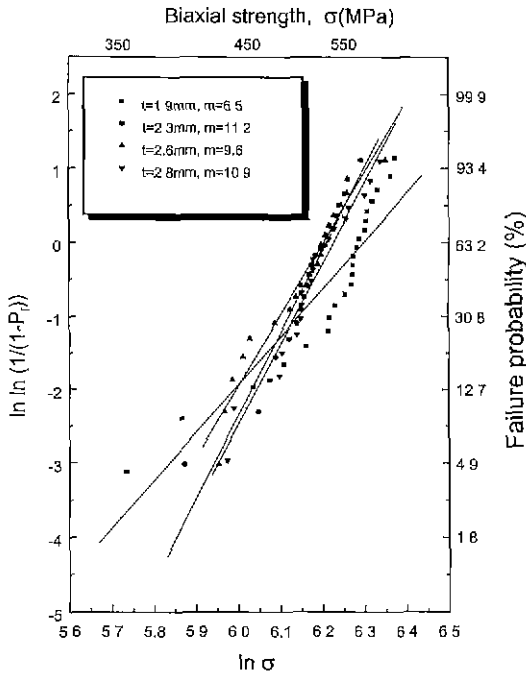


Fig. 1. Weibull plot of the biaxial strength of alumina specimens with various thickness.

므로 표면균열, 시편 내부에 분포되어 있는 결함 등 어느 것이 강도에 결정하는데 중요한 요소인지를 결정해야 한다. 시편의 부피의 변화에 따른 파괴 강도와 파괴 확률의 변화에 관한 연구는 Weibull 등에 의해 오랫동안 연구되어 왔다.^{11,12)} 일반적으로 노치를 주지 않은 시편의 경우에는 down speed가 감소함에 따라 하중시간이 길어져 재료의 강도가 저하되는 동적파괴거동을 보임을 보여 준다.¹³⁾ ASTM은 ball-on-3-ball 시험에서 강도를 일정하게 유지시켜 주기 위해 시편의 두께에 따라 down speed를 달리하고 있다. 시편의 두께에 따라 down speed를 달리하여 실험을 한 후 각각의 평균강도가 Table 2에 나타나 있다. 4종류의 두께가 서로 다른 시편의 강도를 측정 한 후 결과를 분산분석(Analysis of Variance: ANOVA)을 행한 결과 분산비율(variance ratio) F는 1.66163이었고, 검정에 대한 P 값은 0.18225로 유의 수준 0.05보다 크므로 4개의 평균강도는 동일하다고 할 수 있다.^{4,5)}

3.2. 시편 두께에 따른 하중 불과 시편이 달는 면적의 변화

ASTM에 규정되어 있는 piston-on-3-ball 시험에서의 강도계산식⁸⁾을 등가 반지름(equivalent radius) \bar{b} 를 이용하여 ball-on-3-ball 시험에서도 사용할 수 있음은 이전

Table 2. Data for Biaxial Strength, Weibull Modulus, Real Radius, Equivalent Radius and Crack-Branching Number of Alumina Specimens

Thickness (mm)	1.9	2.3	2.6	2.8
Biaxial strength (MPa)	506 ± 72	477 ± 42	471 ± 51	485 ± 46
	ANOVA F=1.66163 p=0.18225 > 0.05 ⇒ not significantly different			
Weibull modulus	6.5	11.20	9.64	10.91
Real radius (mm)	0.626 ± 0.028	0.653 ± 0.026	0.724 ± 0.036	0.753 ± 0.038
	ANOVA F=69.01247 p=0 < 0.05 ⇒ significantly different			
Equivalent radius (mm)	0.774 ± 0.012	0.883 ± 0.020	1.009 ± 0.017	1.072 ± 0.033
	ANOVA F=784.95857 p=0 < 0.05 ⇒ significantly different			
Crack-branching number	3.95 ± 0.90	4.20 ± 0.62	4.35 ± 0.93	4.74 ± 0.87
	ANOVA F=3.06749 p=0.03283 < 0.05 ⇒ significantly different			

논문에서 제시한 바 있다. 여기서 시편 중심에 균일한 하중이 인가되는 영역의 등가 반지름(equivalent radius) \bar{b} 는 다음 식을 이용할 수 있다.¹⁰⁾

$$\bar{b} = \sqrt{16b^2 + t^2} - 0.675t \quad (b < 0.5t) \tag{3}$$

여기서 b 는 실제 균일한 하중이 시편에 인가되는 반지름을 나타내고, \bar{b} 는 ASTM에 나와있는 piston-on-3-ball 시험에서의 강도식을 ball-on-3-ball 시험에 적용하기 위한 보정 반지름이라고 생각 할 수 있다. Fig. 2에서는 두께에 따라 실제 균일한 하중에 인가되는 영역의 반지름을 측정 한 값 \bar{b} 의 값이 시편 두께의 증가와 함께 직 선적으로 증가함을 알 수 있다. 위 식에 의해 계산된 \bar{b} 는 b 보다 더 큰 기울기를 가지고 두께에 따라 변함을 알 수 있다. Table 2에서 볼 수 있듯이 b 와 \bar{b} 값들을 분산분석한 결과 분산비율(variance ratio) F는 각각 69.012, 784.959이었고 p 값은 둘 다 거의 0에 가까운 값으로 유의수준 0.05보다 작으므로 두께에 따라 반지름의 크기가 증가함을 알 수 있다. Scheff test는 일반적으로 표본의 수가 다르거나 두 개 이상의 표본을 비교하고 싶을 때 사용하는 방법으로 이를 통해 표본의 검정 결과는 어디에 그러한 차이가 있는지를 밝혀 줄 수 있다. Table

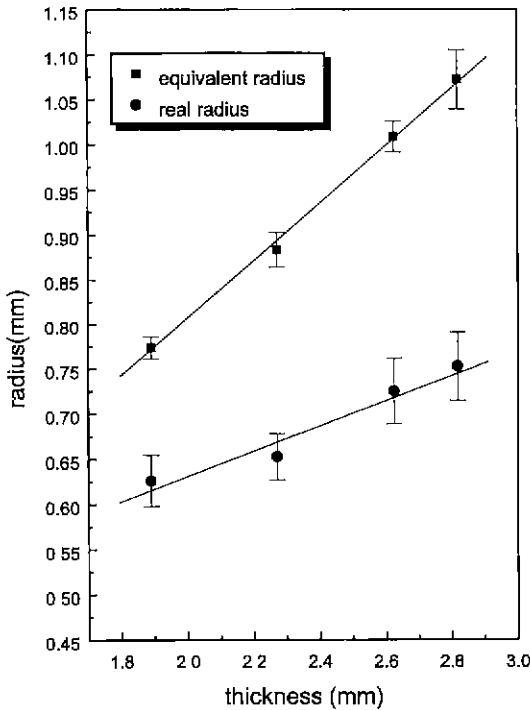


Fig. 2. Real and equivalent radius as a function of thickness of alumina specimens for biaxial test.

Table 3. Scheff Test for Real Radius of Alumina Specimens with Various Thickness

Thickness (mm)	1.9	2.3	2.6	2.8
1.9		0.009763	0.000000	0.000000
2.3	significantly different		0.000000	0.000000
2.6	significantly different	significantly different		0.028059
2.8	significantly different	significantly different	significantly different	

3와 Table 4은 Scheff Test를 통해 각 시편의 두께별로 b 와 \bar{b} 를 분석한 결과를 나타내는데 각 두께의 시편 모두가 서로 다른 모평균을 가짐을 알 수 있다. 이렇게 증가하는 b 와 \bar{b} 값들이 강도 식에서 4종류의 시편이 동일한 평균 강도를 가질 수 있도록 기여함을 확인 할 수 있었다.

3.3. 두께와 강도의 변화에 따른 Crack-Branching Number의 변화

ball-on-3-ball 치구의 시편 받침이 3 ball 이므로 3조각으로 파괴될 것이 예상되지만 전체 평균 4.3개의 조각으로 예상보다는 1조각 이상 더 많은 조각으로 파괴가

Table 4. Scheff Test for Equivalent Radius of Alumina Specimens with Various Thickness

Thickness (mm)	1.9	2.3	2.6	2.8
1.9		0.000000	0.000000	0.000000
2.3	significantly different		0.000000	0.000000
2.6	significantly different	significantly different		0.000000
2.8	significantly different	significantly different	significantly different	

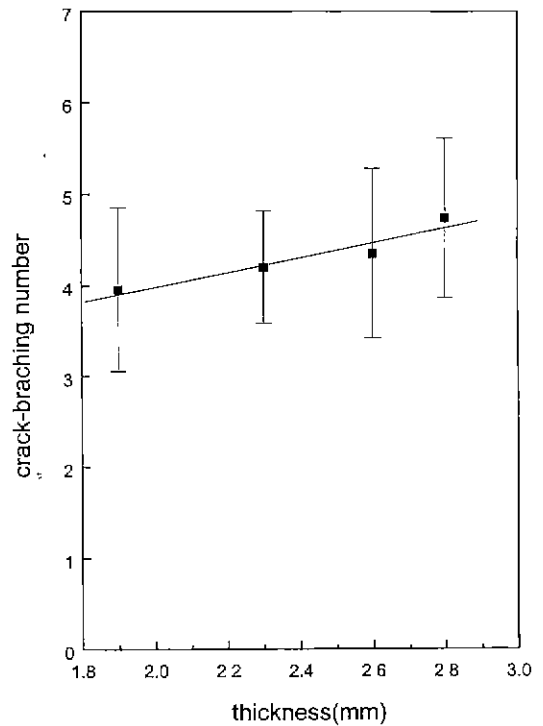


Fig. 3. Crack-branching number of alumina specimens with various thickness.

일어남을 관찰 할 수 있었다. Fig. 3과 Fig. 4에서 알 수 있듯이 시편의 두께와 강도의 증가에 따라 crack branching number가 증가함을 알 수 있었는데, Table 5에서 알 수 있듯이 두께 1.9 mm 시편과 2.8 mm 시편 사이의 p 값은 0.038158로써 유의 수준 0.05보다 작으므로, 특히 시편의 두께에 따른 crack-branching number의 변화는 1.9 mm 시편과 2.8 mm 시편 사이에 차이가 있음을 보여 준다.^{4,5)} Fig. 3은 시편의 두께가 두꺼워질수록 시편이 파괴될 때까지 인가되는 하중이 커지고, 또한 하중이 커지면 시편과 볼이 닿는 면적도 증가함을 나타낸다. Fig. 4는 강도가 낮으면 crack-branching number

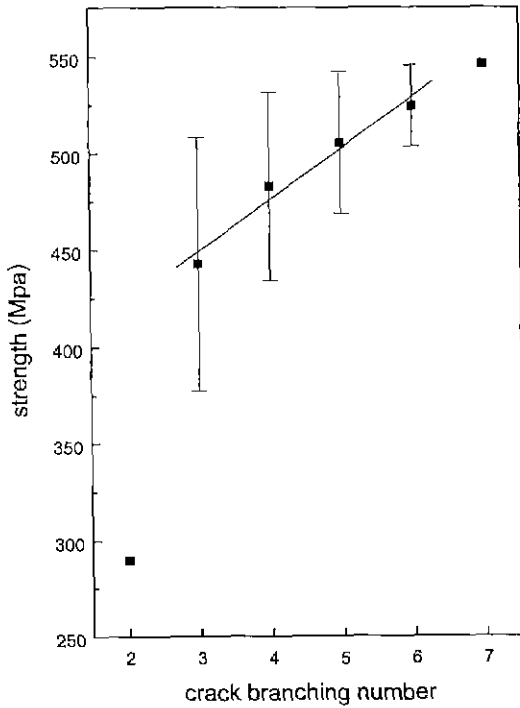


Fig. 4. Biaxial strength of alumina specimens as a function of crack branching number.

Table 5. Scheff Test for Crack-Branching Number with Various Thickness

Thickness (mm)	1.9	2.3	2.6	2.8
1.9		0.826838	0.512542	0.038158
2.3	Not significantly different		0.956237	0.27233
2.6	Not significantly different	Not significantly different		0.562049
2.8	significantly different.	Not significantly different	Not significantly different	

가 작고 강도가 높으면 반대로 큰 경향을 나타낸다 Table 6은 강도의 변화에 따른 crack-branching number의 변화를 ANOVA를 행한 결과인데 여기서 보듯이 p값이 1.18196E-5로 0.05보다 작아 강도에 따른 crack-branching number의 증가를 알 수 있다. 왜냐하면 큰 균열이 있으면 그 균열 방향으로 빠른 균열 성장을 하여 강도가 낮고, crack-branching number도 작고, 큰 균열이 없으면 작은 균열이 성장할 때까지 하중이 증가하여 강도가 높게 나타난다. 또한 여러 갈래로 균열이 성장하

Table 6. ANOVA for Biaxial Strength of Alumina Specimens with Various Crack-Branching Number

Crack-branching number	2	3	4	5	6	7
Biaxial strength (MPa)	289 ± 0	443 ± 66	483 ± 49	506 ± 37	524 ± 21	546 ± 0
ANOVA	F=7.47498 p=1.18196E-5 < 0.05 ⇒ significantly different					

게 되기 때문이다.

3.4. Grinding 방향과 Jog 방향과의 관계

일반적으로, 파괴는 파괴원에서부터 시작된다고 알려져 있는데, 이 파괴원은 표면 결함이나, inclusion 또는 기공 등의 물질결함에 의해 시작되고 대개 그곳에 집중되는 응력확대계수가 파괴인성치에 이를 때 발생한다고 알려져 있다. 특히 ball-on-3-ball 이축 응력 강도 측정에서 가장 큰 인장 응력을 받는 부분은 loading ball축의 시편 아래면 가운데 점으로써 표면에 다음 식 (4)로 나타나는 가장 큰 응력이 걸린다고 알려져 있다.¹⁰⁾

$$\sigma_{max} = 1.81(P/t^2) \tag{4}$$

P는 인가 하중이고 t는 시편의 두께이다. 따라서 ball-on-3-ball 강도 측정에서 파괴시 가장 고려되어야 할 사항은 가장 큰 응력이 걸리는 그 점에서의 표면 결함의 분포가 될 것이다. 이 표면 결함의 제어는 grinding의 제어 문제와 결부되어야 할 것이다.

대개 rough하게 grinding 한 시편의 파괴 후 파단면을 살펴보면 grinding에 의해 생겨나서 다른 곳보다 더 깊이 파여진 결함으로부터 파괴가 시작되고, 최대 인장 응력의 방향은 grinding의 방향과 일치함을 알 수 있다.

ball-on-3-ball 시험에서 시편은 특징적인 파괴면을 보여주는데, 파괴원은 항상 하중을 가장 많이 받는 시편의 중심, 즉, loading ball 바로 밑부분에 존재하며 파괴는 초기에 단일 면(single plane)을 따라 진행한다. : 'jog'라 불리는 이 면이 형성된 후, 그곳을 중심으로 crack은 여러 방향으로 진행해 수 개의 crack-branching number가 관찰된다.³⁾

ball-on-3-ball 이축 강도 시험에서 grinding에 의해 형성될 수 있는 불균일한 응력 분포의 가능성과 표면에 존재할 수 있는 미세구조결함 등은 측정되는 파괴 강도를 부정확하게 할 수도 있다. 이는 파괴 실험을 한 후 grinding 방향에 따른 jog의 방향을 조사해 보면 표면 결함의 유무를 알 수 있다. 즉 random하게 분포하게 되면 표면 마무리가 잘 되었음을 증명하는 것이 되고 이러한

조건은 미세 표면 결합 구조들의 영향이 없는 순수 알루미늄의 강도를 측정하는데 신뢰성을 높이는 것이 된다 따라서 강도에 큰 영향을 줄 수 있는 표면 결함들에 관해 등방성을 얻는 표면 마무리 과정 기술이 사용되어야 한다. 이에 이번 실험에서 #600 grit 이 다이아몬드휠로 표면 마무리를 하였을 경우, grinding이 표면에 미치는 영향을 고찰하기 위해 grinding 방향과 jog 방향성을 관

찰하였다 Fig. 5에는 이번 실험에 사용된 총 81개의 시편 모두에 대해 jog 방향의 빈도수를 나타내었다. 이를 바탕으로 Table 7은 15° 간격으로 빈도수를 계산한 결과를 나타내는데 카이 지승 분포(Chi-square(χ^2) distribution)를 이용한 균일분포검정에 의해 χ^2 을 계산 한 결과 9.280으로써 유의수준 0.05, 계급수 6으로 계산한 χ^2 값인 11.070보다 작으므로 실험 데이터와 균일 분포간에 유의한 편차가 있다고 할 수 없다.⁴⁾ 즉, #600 grit 다이아몬드 휠로 표면 마무리 가공을 한 알루미늄 시편의 경우 연마 방향은 jog 방향에 대해 영향을 미친다고 할 수 없다.

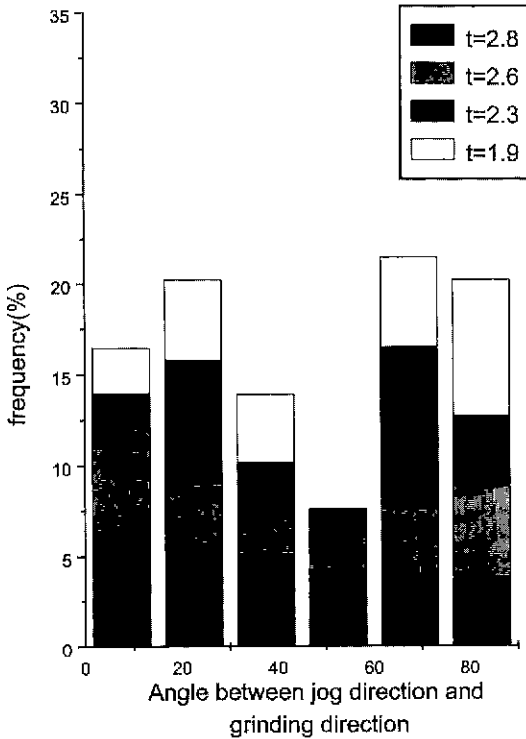


Fig. 5. Distribution of angle between jog direction and grinding direction for alumina specimens with various thickness.

Table 7. Uniform Distribution Test for Angle Between Jog Direction and Grinding Direction of Alumina Specimens

Angle	f_0	f_e	$\frac{(f_0-f_e)^2}{f_e}$
0°~15°	16.04938	16.67	0.02311
15°~30°	22.22222	16.67	1.84926
30°~45°	13.58025	16.67	0.57268
45°~60°	7.40741	16.67	5.14671
60°~75°	20.98765	16.67	1.1183
75°~90°	19.75309	16.67	0.57021
Sum	100.00	100.00	9.28026

4. 결 론

ball-on-3-ball 시험에서 두께에 따른 알루미늄 시편의 파괴 거동을 살펴본 결과 다음의 결과를 얻을 수 있었다. 이 시험법에서 두께에 따라 down speed 속도를 달리하여 하중을 가한 결과 각 시편사이의 강도는 차이가 나지 않음을 알 수 있었다. 그러나 등가 반지름은 두께가 증가함에 따라 증가함을 볼 수 있었고, crack branching number와 두께의 관계에서는 1.9 mm시편과 2.3 mm 및 2.6 mm시편사이에는 경향을 관찰 할 수 없었지만, Table 5에서 볼 수 있듯이 1.9 mm와 2.8 mm시편 사이에는 p값이 0.038158로서 0.05보다 작으므로 두께의 변화에 따라 crack branching number가 증가함을 알 수 있었다. 그러나 crack branching number는 강도가 증가함에 따라 현저히 증가함을 관찰 할 수 있었다. 또한 #600 grit 다이아몬드 휠로 표면 마무리 공정을 한 후 grinding 방향이 jog 방향에 미치는 영향을 관찰한 결과 jog의 방향에 영향을 주지 않았다

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국과학기술원 재료계면공학 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며 이에 감사드리는 바입니다.

REFERENCES

1. K. C. Radford and F.F. Lange, "Loading(L) Factors for the Biaxial Flexure Test," *J. Am Ceram. Soc.*, **61**(5-6), 211-213 (1977).
2. D. B. Marshall, "An Improved Biaxial Flexure Test for Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **59**(5), 551-553 (1980).
3. D. K. Shetty, A. R. Rosenfield, P. McGuire, G. K. Bansal and W. H. Duckworth, "Biaxial Flexure Tests for Ceramics," *Ceramic Bulletin*, **59**(12), 1193-1197 (1980).
4. 이중현, "통계분석," pp. 400-472. 대영 문화사, 1998.

5. 성용현, 최영훈, 이승천, 박동련, 변종석, "STATISTICA를 이용한 통계정보분석," pp. 210-238, 도서출판 탐진, (1998).
6. "고기능 요업제품의 탄성률 시험방법." 한국산업규격 KS L 1594, 한국표준협회, 1993.
7. "내화 벽돌의 결보기 기공률·흡수율 및 비중 측정 방법," 한국산업규격 KS L 3114, 한국표준협회, 1995.
8. ASTM Standard F394-78. pp 466-490 in ASTM Annual Book of Standards Vol. 15.02, Section 15. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1996.
9. 박성은, 이종현, 이홍립, "Ball-on-3-ball 시험에서의 이축 감도의 결정," 요업학회지, **36**(3), 225-230 (1999).
10. D. K. Shetty, A. R. Rosenfield, G. K. Bansal and W. H. Duckworth, "Biaxial Fracture Studies of a Glass-Ceramic," *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**(1), 1-4 (1981)
11. W. A. Weibull, "Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *J. Appl. Mech.*, **18**(3), 293-297 (1951).
12. N. A. Weil and I. M. Daniel, "Analysis of Fracture Probabilities in Nonuniformly Stressed Brittle Materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, **47**(6), 268-274 (1964).
13. 이홍립, 이규형, 박성은, "알루미늄 세라믹스의 등적 파괴 거동," 한국요업학회지, **34**(10), 1053-1059 (1997).
14. 이준형. "통계분석," pp. 354-360, 대명 문화사, 1998