

D(##)  
130

# 미끄럼 미소압입에 의한 소다석회 유리의 변형 및 파괴 거동

안유민 · 최상현\* · 박상신\*

한양대학교 기계공학과  
\*서울대학교 터보동력기계연구센터

## Deformation and Fracture Behaviors of Soda-lime Glass by Sliding Microindentation

Yoomin Ahn, Sang-Hyun Choi and Sang-Shin Park\*

Department of Mechanical Engineering, Hanyang University  
\*Turbo Power Machinery Research Center, Seoul National University

**Abstract**—The various deformation and fracture behaviors under light loads in soda-lime glass under sliding Vickers indentation have been studied. In soda-lime glass, deformation and fracture behaviors can be classified into four different patterns by applied load. At very light load (<0.1N), plastic deformation only occurred. At low loads (0.1~0.8N), median crack appear. At intermediate loads (0.8~3.0N), median and lateral cracking occurred leading to a large chipping. At high loads (3.0~6.0N), a crushed zone was observed with median crack. The friction experiment finds that the increasing in the friction coefficients coincides with the onset of crushing in soda-lime glass.

**Key words**—sliding microindentation, deformation, fracture, cracking, friction.

### 1. 서 론

최근 여러 산업분야에서 구조용 세라믹스 부품의 수요가 증가되고 있다. 세라믹스 부품의 표면가공법으로서 래핑과 연마가공이 널리 이용되고 있다. 래핑과 연마가공에서는 가공물과 공구판 사이에 내재한 연삭입자들이 가공물과 미끄럼 혹은 구름 접촉을 하면서 가공물와의 접촉면을 가공하게 된다. 래핑과 연마가공의 기본적인 가공기구는 단단하고 모가진 압자(연삭입자)들이 가공면을 반복적으로 미끄럼 압입하는 과정으로 모델링될 수 있다. 실제 가공에서 가공물과 공구판 사이에 존재하는 연삭입자들의 수는 무수히 많고 가공면을 눌러주는 가공압력도 일반적으로 낮으므로, 가공면과 하나의 연삭입자 사이에 작용하는 접촉력은 10.0 N보다 훨씬 작으리라 여겨진다. 따라서 취성소재 표면을 낮은 하중으로 미끄럼 압입했을 때에 발생하는 가공면 변형형태에 대한 연구들

이 세라믹스 소재의 래핑과 연마가공의 가공기구를 이해하기 위해서 이용되어져 왔다[1].

낮은 압입하중으로 유리와 세라믹스를 끝이 뾰족한 압자로 정적압입을 하였을 때에 발생하는 변형형태에 대해서는 적지 않은 연구들이 발표되어져 왔다. Cook과 Pharr[2]은 비정질인 여러 종류의 유리에 대해서 실험을 하였는데 정적 압입력이 작을 때에는 레이디얼(radial) 균열과 측면(lateral) 균열이 형성되는 것을 발견하였다. 단결정 세라믹스 경우에는 정적압입의 균열형태가 주로 결정의 격자방향에 따라 결정된다. 단결정의  $Al_2O_3$ ,  $MgAl_2O_4$ ,  $SrTiO_3$ ,  $MgO$ ,  $CaF_2$  등에서는 측면 균열이 발생하는 데, 그 발생 위치는 결정 격자면과 압입된 방향에 의해 결정되어진다[2,3].

매우 단단하고 접촉부위가 날카로운 압자에 의해 세라믹스가 미끄럼 압입될 때에 나타나는 변형형태에 대해서는 정적압입에 비해서 아직 많은 연구가 이루어지지 못한 상태이다. Swain[4]은 소다석회 유리에 대해서

비커스(Vickers) 압자를 이용한 미끄럼 압입실험을 하였다. 압자의 미끄럼 속도가 저속이고 압입하중이 작을 때에는 미끄럼 방향과 평행한 메디안(median) 균열과 측면 균열 등이 생성됨이 관찰되었다. 다결정 알루미늄이 낮은 하중으로 미끄럼 압입될 때에는 뚜렷한 메디안 균열과 측면 균열 보다는 결정계에서의 파손이나 슬립, 쌍정 등의 변형이 주로 발생하는 것이 Misra [5]와 Chaudhri[6] 등에 관찰되었다. 특히 끝이 뾰족한 압자에 의해 미끄럼 압입이 될 때에는 셰브론(Chevron) 균열이 생성되는 것도 발견되었다.

본 논문에서는 취성소재인 비정질 소다석회 유리가 단단하고 뾰족한 단일 압자에 의해 낮은 하중으로 미끄럼 압입될 때에 나타나는 균열등의 변형형태가 압입하중에 따라 어떻게 형성되는가를 실험적으로 구해 보고자 한다. 다양한 형상의 균열과 소성변형층 형성에 의한 압입자국 등의 변형 형태를 보다 자세히 관찰해 보고자 한다. 그리고 미끄럼 압입을 할 때에 발생하는 마찰력을 측정하여 변형형태와 함께 마찰특성을 살펴보고자 한다.

### 2. 실험 방법

미끄럼 압입에 이용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 압입용 압자로서 다이아몬드 비커스 압자를 이용하였다. 비커스 압자는 그림에서와 같이 두 쌍의 I-빔으로 연결된 지지보에 장착된다. 정적압입 하중을 조절하고 미끄럼 압입 때에 생기는 마찰력을 측정하기 위해서 게이지 상수가 높은 150의 고감도 반도체 스트레인 게이지를 이용하였다. 압자 지지보의 중간에 있는 두 쌍의 I-빔에 스트레인 게이지가 부착하여 법선 방향과 접선 방향으로 작용되는 힘을 각각

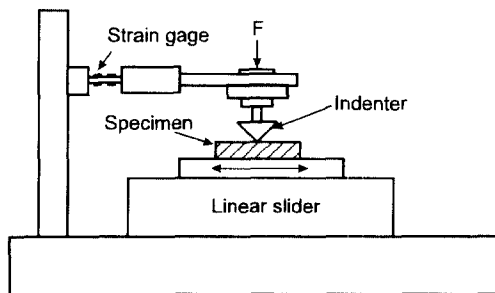


Fig. 1. Schematic of the experimental sliding indentation apparatus.

Table 1. Mechanical properties of workpiece and indenter material

Material	Hardness (GPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Fracture toughness (MPa√m)
Soda-lime glass	5.5	70	0.25	0.25
Polycrystalline diamond	78.5	900	0.20	-

측정하였다. 법선 방향인 압입하중은 분해능 0.005 N에 최고 6.0 N까지 그리고 접선 방향인 마찰력은 분해능 0.001 N에 최고 2.0N까지 측정이 가능하다. 압입하중과 마찰력의 측정 반복성은 각각 0.01 N과 0.005 N이며 측정 오차는 모두 3% 이내이다.

현미경용으로 사용되는 소다석회 유리 슬라이드가 실험시편으로 사용되었다. 시편 크기는 대략 50×20×2 mm<sup>3</sup>이며 시편의 표면은 산술평균 거칠기(Ra) 값이 0.071 μm 정도로 매끄러운 상태이다. 실험전 시편의 표면에 존재할 수 있는 잔류응력을 완전히 소거하기 위해 충분한 풀림 처리를 하였다. 시편으로 사용된 비정질 소다석회 유리와 압자로서 사용된 다결정 다이아몬드의 재료 물성치는 Table 1과 같다. 미끄럼 압입 전에 시편 표면과 압자의 접촉될 부위를 아세톤으로 세척하여 되도록 건조한 상태를 유지하였다. 모든 실험은 25°C 실험실 대기의 환경에서 행하여졌다.

압입하중과 마찰력의 측정뿐만 아니라 미끄럼 압입에 의한 압입면의 변형 형상을 알아보기 위해서 촉침식 표면거칠기 측정기(RTH-Talysurf)를 이용하여 표면 형상을 측정하였다. 시편 표면 아래의 내부에서의 변형형태를 알아보기 위해서 압입된 시편을 절단하여 현미경으로 관찰하였다. 미끄럼 압입자국의 직각방향으로 인위적인 스크래치를 만들고 스크래치를 따라 시편을 굽혀 시편을 절단하였다. 각각의 미끄럼 압입 조건에 대해서 최소한 8개 이상의 시편을 실험 측정하여 마찰력과 균열 크기 등의 평균값을 구했다.

### 3. 마찰 특성

미끄럼 압입 중에 압자에 작용하는 접선력과 법선력을 Fig. 1에의 실험장치를 이용하여 측정하였다. 측정된 접선력과 법선력와의 비율로서 마찰계수를 구하였다. 미끄럼 속도는 5 mm/min부터 50 mm/min까지 그리고 압입 하중은 0.01N부터 6.0N까지 변화시키면

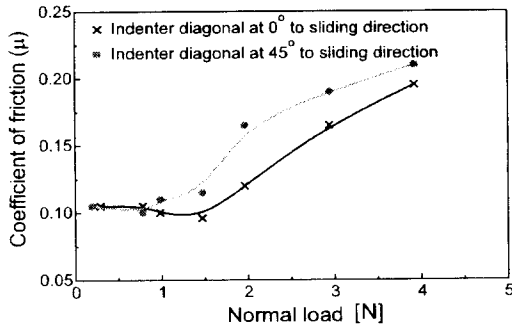


Fig. 2. Variation of the coefficient of friction with normal load.

서 마찰계수를 측정하였다. 측정결과에 의하면 미끄럼 속도의 변화는 마찰계수에 영향을 거의 미치지 못하지만 압입하중에 따라 마찰계수의 변동이 뚜렷이 나타났다.

미끄럼 속도가 5 mm/min일 때에 여러 압입하중에 대한 마찰계수의 측정값을 Fig. 2에 도시하였다. 압자의 대각선 모서리가 미끄럼 방향에 대해 이루는 각도가 0°와 45°인 두 가지 경우에 대해서 실험을 하였다. 실험결과에 의하면 마찰 특성은 두 가지 경우에서 거의 같게 나타났다. Fig. 2에서 보면 압입하중이 1.5 N 보다 작은 경우에는 마찰계수 값이 0.1~0.13 정도로 거의 일정하게 유지된다. 그러나 압입하중이 임계값인 약 1.5 N 정도보다 커지게 되면 압입하중이 커짐에 따라 마찰계수 값도 비례적으로 증가한다. 압입하중이 4.0 N까지 커지면 마찰계수 값이 약 0.2 정도까지 증가된다. 이와같이 낮은 압입하중 하에서는 마찰계수 값이 일정하게 유지되다가 임계하중 이상에서는 하중 증가와 더불어 마찰계수 값도 증가되는 현상은 다른 세라믹스에 대해서도 발견되었다[7,8,9]. 예를 들면 MgO을 다이아몬드 압자로 미끄럼 압입할 때나 단결정 세라믹스들을 반구형 다이아몬드로 미끄럼 압입할 때에도 비슷한 마찰현상이 발견되었다.

## 4. 변형 및 파괴 거동

### 4-1. 압입면 표면에서의 관찰

미끄럼 압입에 의해 압흔 주위에 야기되는 변형형태를 광학현미경과 전자주사현미경을 이용하여 관찰하였다. Fig. 3부터 Fig. 6까지는 여러 압입하중 조건에서 관찰된 압입표면의 변형형태들을 현미경으로 찍

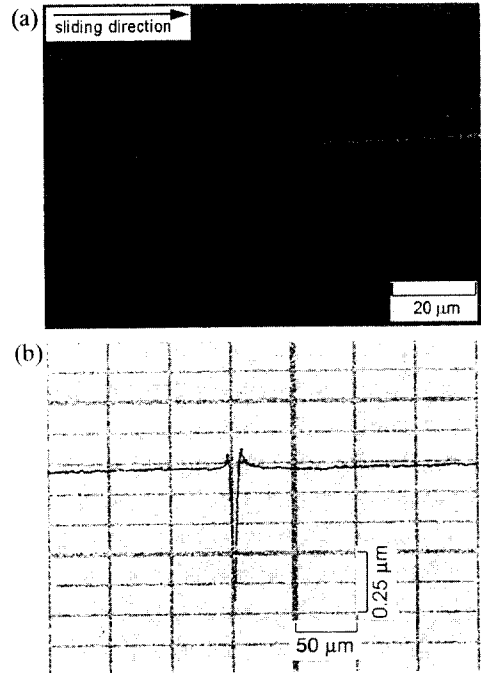


Fig. 3. (a) Optical micrograph and (b) talysurf trace of scratch track when indentation load is 0.2 N.

은 사진들과 표면거칠기 측정기로 이용하여 얻은 압입자국의 표면형상들이다. 모든 실험결과는 미끄럼 압입속도가 5 mm/min이며 압자의 대각선 모서리가 미끄럼 방향과 이루는 각도가 0°인 경우이다.

압입하중이 매우 작아 약 0.8 N 이하인 경우에는 Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 소재가 미끄럼 압입에 의해 소성변형 되어진 압입자국 만이 관찰될 뿐 압입된 표면에서는 아무런 균열도 발견할 수가 없다. 소성변형층 만이 표면에 생성되어 압입자국은 매끄러운 상태이다. 연삭입자가공 측면에서 보면 일체의 칩 발생이 없이 경작(ploughing)에 의해서만 소재 표면이 가공되었다. 압입하중이 0.2 N일 때에 미끄럼 압입자국의 표면형상인 Fig. 3(b)에서 보면 압입자국의 양쪽 모서리 부위가 주변의 평면보다 약간 올라간 능선을 발견할 수 있다. 이와같은 표면형상의 변형은 소재가 압입되자 압입된 부피만큼의 소재 내부가 소성변형되면서 옆으로 유동된 것이다. Fig. 3(b)의 형상은 일반적으로 금속이 미끄럼 압입될 때에 나타나는 형상과 비슷하다.

압입하중이 약 0.8 N에서 1.5 N사이가 될 때에는 균열이 발생하는 변형형태가 관찰되었다. Fig. 4(a)는

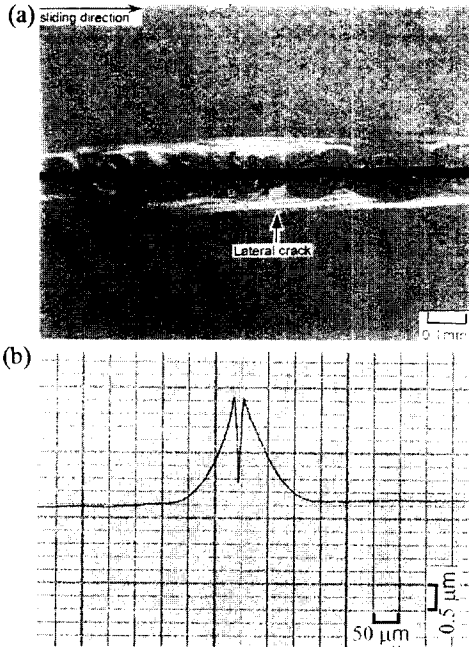


Fig. 4. (a) Optical micrograph and (b) talysurf trace of scratch track when indentation load is 1.0N.

압입하중이 1.0 N일 때에 미끄럼 압입된 투명한 유리 시편의 압입면에 빛을 투사시켜 반사된 상을 광학현미경에서 찍은 사진이다. 사진에서 보면 미끄럼 압입 자국 주위에 작은 균열과 미끄럼 방향으로 발달된 측면 균열이 관찰된다. 압입자국 주위에 미끄럼 방향과 직각으로 형성된 작은 균열을 면밀히 관찰한 결과로는 이러한 균열들은 표면에 존재하는 세브론 균열과는 달리 표면 아래 내부에 존재하는 것으로서 레이디얼 균열과 메디안 균열의 중간 형태로 간주된다. 측면 균열 역시 표면아래 내부에만 존재하며 사진에서는 균열의 끝단에서 빛이 간섭된 것이 밝게 보이고 있다 (Fig. 4.(a)에서 화살표 부위). Fig. 4.(b)에서 시편 표면에서의 미끄럼 압입된 자국의 형상을 보면 압입된 부위 전체가 주위의 표면보다 많이 올라가 있음을 알 수가 있다. 이러한 현상은 잘 발달된 측면 균열의 틈새가 벌어진 만큼 균열위에 놓인 압입자국 부위가 부상된 것으로 여겨진다.

압입하중이 약 1.5 N보다 커지게 되면 압입된 표면 아래의 소재 내부에서만 존재하던 측면 균열이 표면 쪽으로 계속 커져 결국 표면과 만나게 된다. 이렇게 되면 측면 균열과 표면 사이에 존재하던 소재 부위가 표면으로부터 떨어져 나가는 치핑(chipping)현상이 발

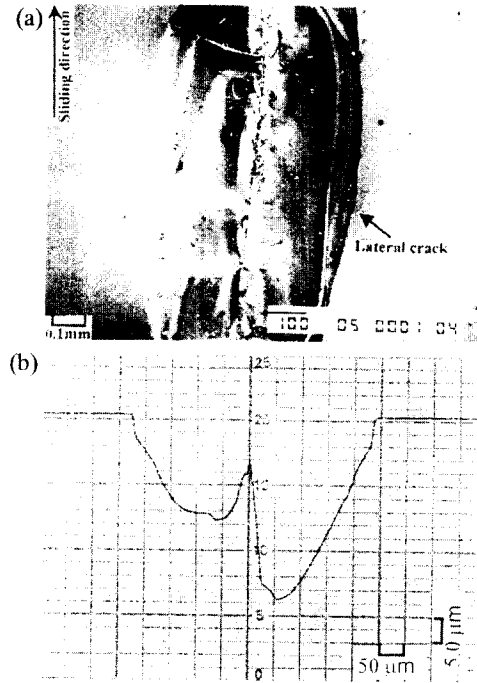


Fig. 5. (a) Scanning electron micrograph and (b) talysurf trace of scratch track when indentation load is 2.0N.

생된다. 이와같은 치핑은 압입하중이 약 3.0 N이 될 때까지 계속된다. 압입하중이 2.0 N인 경우의 Fig. 5. (a)의 압입면 사진과 Fig. 5.(b)의 표면형상을 보면 이러한 치핑 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 변형형태에서는 시편 표면에서의 소재 가공이 측면 균열에 의한 칩 발생 즉 치핑현상에 의해 크게 결정되어짐을 알 수가 있다. 실제로 미끄럼 압입 후에 압입자국 주위에서 두께가 얇고 길쭉한 판 형태의 마멸칩들을 발견할 수 있다.

압입하중이 약 3.0 N보다 크게 증가되면 또 다른 변형형태가 관찰된다. 압입하중이 4.0 N인 경우인 Fig. 6.(a)을 보면 측면 균열 대신에 미끄럼 압입방향을 따라 거칠게 파손된 분쇄자국이 나타난다. 분쇄자국의 파손된 부위를 크게 확대하여 관찰해 보면 많은 수의 미소균열들에 의해 형성된 것이 관찰된다. 그리고 미끄럼 압입되어 생긴 압흔자국 주위에 형상이 불규칙한 미소 칩들이 다수 발견된다. 소성변형된 압입자국은 미소 균열들에 의해 분쇄 파손되어 제거된 것으로 여겨진다. Fig. 6.(b)을 보면 양쪽 도서리 부분이 약간 올라가지 않았다는 것만 제외하면 분쇄 파손된 표면형상이 소성변형만으로 형성된 압입자국(Fig. 3.

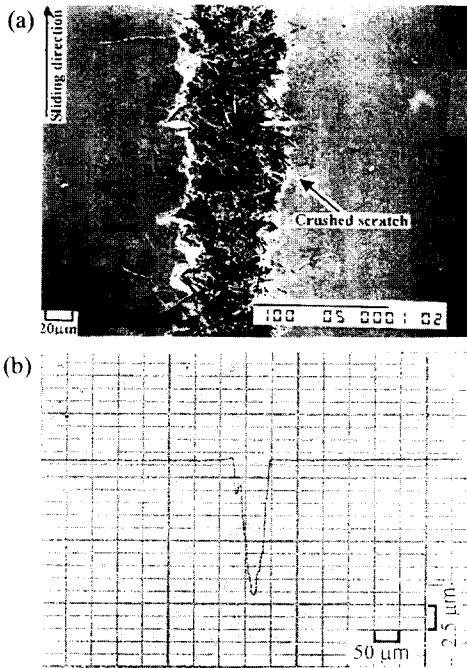


Fig. 6. (a) Scanning electron micrograph and (b) talysurf trace of scratch track when indentation load is 4.0 N.

(b)과 비슷하다.

압자의 대각선 보서리가 미끄럼 방향과 이루는 각도가  $45^\circ$ 가 되게 하여 여러 압입하중 조건에서 미끄럼 압입실험을 하였다. 실험결과는 앞서 살펴보았던 압자가 이루는 각도가  $0^\circ$ 인 경우와 별 다른 없는 같은 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4-2. 압입자국 절단면에서의 관찰

Fig. 7부터 Fig. 10까지는 미끄럼 압입속도가 5 mm/min일 때에 여러 압입하중 조건에서 시편의 절단면에서 관찰된 균열형태들의 사진이다. 압입하중이 약 0.1 N보다 작을 때에 절단면에서 발견할 수 있는 것은 압입자국 밑에 거의 반원형상의 소성변형층 뿐이고 전혀 어떤 형태의 균열도 발견할 수가 없다. 압입하중이 보다 증가되어 약 0.1~0.8 N일 때는 소성변형층 아래에 압입면과 직각을 이루는 메디안 균열이 생성되는 것이 관찰되었다. Fig. 7는 압입하중 0.5 N일 때의 절단면을 찍은 광학현미경 사진으로서 압입자국 아래에 반원형상의 소성변형층이 있다. 그리고 소성변형층 아래에 탄성변형 영역과의 경계점에서 메디안 균열이 시작되어 압입하중이 작용되는 방향인 압

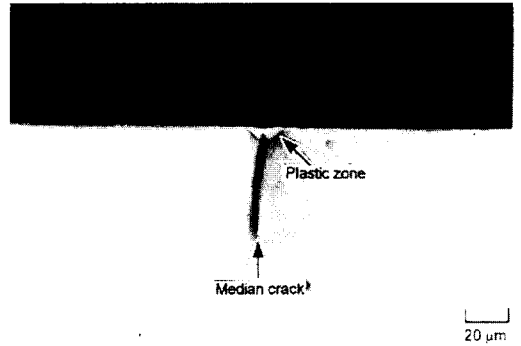


Fig. 7. Optical micrograph of cross sectioned scratch track when indentation load is 0.5 N.

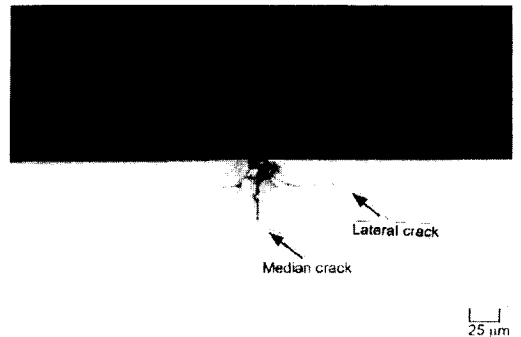


Fig. 8. Optical micrograph of cross sectioned scratch track when indentation load is 1.0 N.

입면의 거의 직각방향으로 깊게 생성되어 있다. 이러한 메디안 균열이 길이 방향으로는 미끄럼 방향과 거의 평행하게 길게 생성되어 있는 것을 압입면 쪽에서 관찰할 수 있다.

압입하중이 약 0.8 N보다 커짐에 따라 메디안 균열과 더불어 측면 균열이 생성됨이 발견되었다. 압입하중이 2.0 N일 때의 모습인 Fig. 8을 보면 메디안 균열을 기준으로 양쪽으로 잘 발달된 두개의 측면 균열들을 볼 수가 있다. 측면 균열 역시 압입자국 밑의 소성변형층과 탄성변형 영역과의 경계점에서 시작되어 거의 압입 표면과 평행하게 진행된다. 절단면의 직각방향으로는 미끄럼 방향으로 길게 발전하여 생성된다 (Fig. 5.(a)). 낮은 압입하중 조건에서는 측면 균열의 끝이 표면 아래에 놓이게 되지만, 압입하중이 약 1.5 N에서 약 3.0 N 까지 증가하게 되면서 측면 균열의 끝이 압입표면 쪽으로 발전되어 결국 표면과 만나게 된다. Fig. 9를 보면 압입 하중이 2.0 N일 때에 측면 균열이 압입 표면까지 진행됨에 따라 압입자국과 소

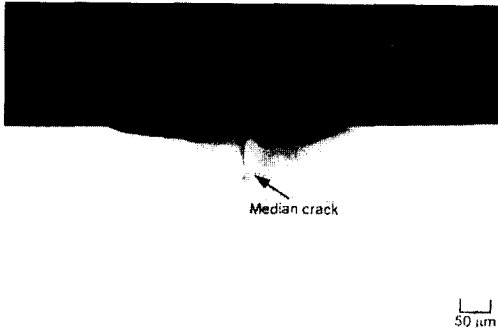


Fig. 9. Optical micrograph of cross sectioned scratch track when indentation load is 2.0N.

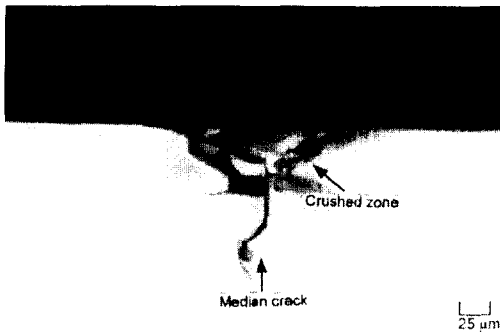


Fig. 10. Optical micrograph of cross sectioned scratch track when indentation load is 4.0N.

성변형층을 포함한 측면 균열의 위 부분에 있던 소재 모두가 치핑에 의해 떨어져 나갔다. 소재 표면이 얇고 길게 제거됨에 따라 소재 내부에는 메디안 균열 만이 남아 있음을 알 수가 있다.

압입 하중이 약 3.0~6.0 N 일 때의 균열형태는 Fig. 10에서 살펴볼 수가 있다. 측면 균열과 소성변형층은 사라지고 다수의 미소 균열들로 구성된 분쇄파손이 관찰된다. 메디안 균열은 사라지지 않고 분쇄 파손된 영역 아래에 존재하는 것이 발견된다. Fig. 9와 Fig. 10을 비교해 보면 미소 균열들에 의해 파손되어 제거된 소재의 면적이 측면 균열에 의해 치핑 제거된 소재의 면적에 비해 훨씬 작은 것을 알 수가 있다.

## 5. 실험결과에 대한 고찰

소다석회 유리가 비커스 압자에 의해 미끄럼 압입 될 때에 관찰된 결과는 Table 2에 정리하였다. 이 결과는 Swain에 의해 발견된 사실과 잘 일치하고 있다[4].

Table 2. Classification of experimentally observed deformation patterns

Normal load	Deformation pattern
0.0~0.1 N	No crack
0.1~0.8 N	Median crack
0.8~1.5 N	Median crack and lateral crack under plastic scratch
1.5~3.0 N	Median crack and lateral crack intersecting the surface
3.0~6.0 N	Median crack and crushed scratch track

압입하중이 약 0.1N보다 작을 때에는 압입자국 주위에서 균열이 전혀 발생되지 않는다. 미끄럼 압입에 의한 변형을 보면 취성적인 성질은 사라지고 금속과 같은 소성적인 형태만 나타난다. 상온에서 유리가 비커스 압자에 의해 미끄럼 압입될 때에 소성변형이 발생하는 것은 Marsh에 의해 처음 발견되었다[10]. Marsh는 이와 같은 현상이 압입된 부위에서 생성되는 높은 등방항응력 때문이라고 설명하였으며, Hagan은 유리 소재가 비커스 압자에 의해 정적압입될 때에 압입된 부위에서 금속소재에서와 유사한 슬립 띠가 매우 밀집되어 존재하는 것을 실험을 통해 발견하였다[11].

Kelly와 Macmillan 등은 매우 높은 등방항응력이 작용하는 취성소재의 압입된 부위가 매우 작게되면 균열 발생원이 될 수 있는 결함들이 압입부위 내에 존재할 확률이 급격히 감소되어 소성변형만이 형성될 수 있다고 해석하였다[12]. 이러한 경우 연삭입자가공 측면에서 살펴보면 압입면에서의 소재 제거율을 매우 작으나 균열 파손이 없는 가공면을 얻게 된다. 압입하중이 약 0.1~0.8 N일 때에는 압입자국 주위의 표면에서는 전혀 균열이 발견되지 않지만 압입자국 밑에 형성되는 소성변형층 아래에서 메디안 균열이 생성된다.

압입하중이 약 0.8~3.0 N일 때에는 메디안 균열과 함께 측면 균열이 생성된다. 미끄럼 압입이 종료된 후 얼마간의 시간이 지난 후에 측면 균열이 발생하는 것이 때때로 관찰된다. 이것은 압입하중이 약 0.8 N보다 커지면 소성변형층 주위의 탄성변형 영역에 발생하는 잔류응력이 충분히 커져서 측면 균열을 발생시키는 것으로 여겨진다. 압입하중이 약 1.5 N보다 작을 경우에는 측면 균열이 압입면 표면까지 진행되지 않고 표면 아래에 남게 된다. 압입하중이 증가되어 약 1.5~3.0 N일 때에는 측면 균열이 대부분 압입표면에 까지 진행되어 치핑이 발생하게 된다. 압입하중이 약 1.5

N보다 커지게 되면 압입자극 주변에 미소 균열들이 조금씩 나타난다. 그리고 압입하중 증가에 비해 소성 변형 압입자극과 측면 균열의 크기 증가가 둔화됨을 관찰할 수 있다. 이것은 측면 균열의 생성에 주로 소모되던 압입 에너지가 메디안 균열과 미소 균열의 생성에 더 많이 사용되는 것 같다. 압입하중이 3.0 N보다 커지게 되면 잘 발달되던 측면 균열은 사라지고 미소 균열들에 의한 분쇄파손과 메디안 균열 만이 생성된다.

마찰특성을 살펴보면 낮은 압입하중이 작용할 때에는 거의 일정하게 유지되던 마찰계수 값이 압입하중이 약 1.5 N보다 커지게 되면 압입하중 증가와 더불어 마찰계수 값도 증가하게 된다. 이와같은 마찰계수의 변화는 변형 및 파괴 형태의 변화와 잘 일치하고 있다. 즉 압입하중이 약 1.5 N보다 커지게 되면 Fig. 6(a)의 전자주사현미경 사진에서 관찰되었듯이 미소 균열들에 의한 분쇄파손이 발생하기 시작한다. 이와 비슷한 마찰특성이 다이아몬드에서도 발견되었다. Enomoto[7,8]와, Chandrasekar[9] 등에 의하면 다이아몬드가 미끄럼 마찰될 때에 법선력이 임계값 이상으로 커지게 되면 마찰 표면에서 파손부위가 발생되면서 큰 변동이 없던 마찰계수 값이 뚜렷이 증가된다. 소다석회 유리에서 분쇄파손은 무수히 많은 미소 균열들에 의하여 형성되기 때문에 측면 균열을 생성하는데 필요한 에너지보다 분쇄파손이 만들어지는데 소모되는 에너지가 클 것으로 여겨진다. 에너지 증가는 마찰력의 증가로 해석될 수 있으며, 결국 마찰계수가 증가되는 것으로 추측된다. 그러나 마찰 에너지의 증가와 변형 및 파괴 형태의 변화와의 상관관계에 대해서는 확실하게 해석하지 못한 상태이다.

관찰된 변형 및 파괴 형태로부터 소다석회 유리의 연삭입자가공에 대해서 개략적인 고찰을 할 수가 있다. 래핑이나 연마가공에서 가공물에 가해지는 가공 압력은 가공물과 접촉되는 연삭입자들에게 압입하중으로 작용된다. 연삭입자 각각에 작용하는 압입하중의 크기는 가공에 사용된 연삭입자들의 크기와 가공액에 대한 연삭입자들의 혼합율에 의해 결정된다. 예를 들면, 크기가 작은 연삭입자들을 사용하고 혼합율을 높게 하면 가공물과 접촉되는 연삭입자의 개수가 많아져 연삭입자 각각에 작용되는 압입하중은 작아지게 된다. 따라서 매우 낮은 압입하중 상태가 형성되어 유리 소재의 표면제거는 취성이 아닌 주로 소성적으

로 이루어지고 가공된 표면의 거칠기는 양호한 상태가 될 것이다. 가공압력을 증가하거나 크기가 큰 연삭입자를 사용하고 혼합율을 감소시키면 연삭입자 각각에 작용하는 압입하중이 증가된다. 이 때에 증가된 압입하중의 값이 유리소재에 대해 측면 균열을 발생시키는 압입하중 범위에 놓이게 되면 가공면에서는 칩핑이 발생된다. 가공물 표면은 거칠어져도 소재의 제거율이 급격히 증가될 것이다. 표면정도는 떨어져도 높은 가공율이 필요한 황삭가공에서는 소재표면에서 측면 균열이 잘 발생될 수 있도록 가공조건을 설정하고, 가공율 보다는 매끄러운 가공면과 높은 치수정밀도가 요구되는 정삭가공에서는 연삭입자에 의한 가공이 소성변형적으로만 이루어질 수 있도록 가공조건을 설정한다면 최적의 연삭입자 가공이 될 것이다. 유리 이외의 세라믹스 소재들에 대해서도 기본적인 미끄럼 압입실험을 하여 변형 및 파괴 거동을 보다 자세히 분석하게 된다면 취성소재들에 대한 연삭입자가공 해석에 도움이 되리라 본다.

## 6. 결 론

소다석회 유리가 비커스 압자에 의해 5 mm/min의 속도로 미끄럼 압입될 때에 발생하는 변형 및 파괴 형태들이 실험적으로 관찰되었다. 압입하중이 매우 작을 때에는 취성이 아닌 소성적인 변형형태가 나타난다. 따라서 취성소재도 매우 작은 체적만이 압력을 받으면 소성변형 만이 발생할 것이라고 추측된다. 압입하중이 약 0.1 N보다 커지게 되면 유리의 주된 변형이 취성파괴가 되어 잘 발달된 메디안 균열과 측면 균열이 형성된다. 이러한 균열 생성에 의해 압입표면에서의 소재제거율은 급격히 증가된다. 압입하중이 약 3.0 N보다 커지게 되면 미소 균열들이 다수 심하게 발생되어 소성변형에 의한 압입자극은 사라지고 분쇄 파손된 스크래치(scratch) 자국만이 관찰된다.

마찰력을 측정할 결과에 의하면 압입하중이 약 1.5 N보다 작을 때에는 마찰계수에 별다른 변화가 없다. 그러나 압입하중이 약 1.5 N보다 큰 경우에는 하중이 증가됨에 따라 마찰계수 값도 비례하여 증가된다. 마찰계수의 이러한 변동이 일어나는 임계 압입하중 값은 변형거동에서 무수히 많은 미소균열들에 의해 분쇄파손이 발생되기 시작하는 압입하중 값과 잘 일치한다.

## 참 고 문 헌

1. Ahn, Y. and Park, S.S., "Surface Roughness and Material Removal Rate of Lapping Process on Ceramics," *KSME International Journal*, Vol. 11, No. 5, pp. 494-504, 1997
2. Cook, R.F., and Pharr, G.M., "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 74, No. 4, pp. 787-817, 1990.
3. Lankford, J., "Threshold Microfracture during Elastic-plastic Indentation of Ceramics," *J. Mater. Sci.*, Vol. 16, pp. 1177-1182, 1981.
4. Swain, M.V., "Microfracture about Scratches in Brittle Solids," *Proc. R. Soc. Lond.*, Vol. A366, pp. 575-597, 1979.
5. Misra, A. and Finnie, I., "On the Scribing and Subsequent Fracturing of Silicon Semiconductor Wafers," *J. Mater. Sci.*, Vol. 14, pp. 2567-2574, 1979.
6. Chaudhri, M.M., Hagan, J.T., and Wells, J.K., "Observations of Contact Damage in MgO and LiF Crystals by Cathodoluminescence," *J. Mater. Sci.*, Vol. 15, pp. 1189-1193, 1980.
7. Enomoto, Y., "Deformation by Scratches and Frictional Properties of MgO Crystals," *Wear*, Vol. 89, pp. 19-28, 1983.
8. Enomoto, Y. and Tabor, D., "The Frictional Anisotropy of Diamond," *Proc. R. Soc.*, Vol. A373, pp. 405-417, 1981.
9. Chandrasekar, S. and Bhushan, B., "Friction and Wear of Ceramics for Magnetic Recording Applications-Part II : Frictional Measurements," *ASME Jour. of Tribology*, Vol. 113, pp. 313-318, 1991
10. Marsh, D.M., "Plastic Flow in Glass," *Proc. R. Soc.*, Vol. A279, pp. 420-435, 1964
11. Hagan, J.T., "Shear Deformation under Pyramidal Indentations in Soda-Lime Glass," *J. Mater. Sci.*, Vol. 15, pp. 1417-1424, 1980
12. Kelly, A. and Macmillan, N.H., *Strong Solids*, 3rd ed., Chap. 4, pp. 144, Clarendon Press, Oxford, 1986.