

유리에서 미끄럼시의 마모전이

조성재 · 방건웅 · 김종집 · 문한규

한국표준연구소

Wear Transition during Sliding in Glass

Seong-Jai Cho, Gun-Woong Bahng, Jong-Jip Kim, Hahngue Moon

Korea Standards Research Institute

Abstract—A wear transition mechanism during sliding in glass has been observed. Disk specimens of soda-lime-silicate glass were slid against AISI 52100 steel with paraffin oil as lubricant. Observations of the microstructural change on the worn surface showed that semi-circular cone cracks (SCCCs) were suddenly produced after a certain critical sliding time. These SCCCs brought about the severe damage in the form of extensive microchipping during further sliding. It was shown that the abrupt appearance of the SCCCs is attributable to the grooves formed during sliding, which act as surface flaws.

1. 서 론

최근 요입재료에서 미끄럼시에 일어나는 마모전이 현상이 주목을 받고 있다. 마모전이 현상이란 마모속도가 어느 미끄럼시간 후에 갑자기 크게 증가하는 것을 일컫는 것으로, 재료의 응용에서 마모수명과 관련하여 중요한 의미를 가진다. 이 마모전이 현상은 다결정 및 단결정 요입재료 그리고 유리에서도 관찰되는 일반적인 현상이다. 그러나 마모전이의 기구는 재료에 따라 다르다.

단결정 알루미늄에서 조동[1-3]은, 어느 미끄럼시간 후의 갑작스런 마모속도의 증가 (즉 마모전이)는 입자 (grain) 들이 갑자기 떨어져 나오기 때문임을 보였다. 그리고 입자들이 떨어져 나오는 (grain pull-out이 일어나는) 이유는, 전위 (dislocation) 의 pile-up에 의하여 생성된 잔류응력이 입계균열을 생성시키고 이입계균열이 표면으로 연결되기 때문임을 보여 주었다. Hertz이론에서 알 수 있는 바와 같이, 전위생성의 구동력인 shear stresses는 표면으로부터의 어떤 깊이에서 최대가 되기 때문에 입계균열은 표면으로부터의 어떤 깊이 즉, 부표면에서 먼저 생성된다.

반면에, 단결정 요입재료나 유리에서 blunt body와의 미끄럼시에 일어나는 마모전이 현상은, Brookes등 [4], Shaw와 Brookes [5], 조동[6, 7]이 보고한 바와 같이 표면에서의 소위 semi-circular cone crack (SCCC)의 생

성과 밀접한 관계가 있다. 즉, 어느 일정한 미끄럼시간 후에 SCCC가 갑자기 생성되며, 이 SCCC로부터 chipping이 일어남으로써 마모속도가 크게 증가한다. 따라서 이 경우에는 SCCC생성기구를 밝히는 것이 마모전이 현상을 이해하는 데에 있어서 중요하다. Brookes등 [4], Brookes와 Shaw [5]는 단결정 요입재료에서는 전위의 생성이 SCCC생성에 중요한 역할을 할 것이라고 보고한 바 있다. 그러나, 전위의 개념이 적용될 수 없는 유리에서는 SCCC가 어떻게 생성되는 지가 분명하지 않다.

따라서 본연구의 목적은 SCCC생성기구를 실험적으로 밝혀 유리에서의 마모전이 기구를 밝히는 것이다.

2. 실험방법

마모시험은 소위 three-balls-on-disk장치를 이용하여 행하였는데, 그 장치의 모식도는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 유리시편으로 직경이 약 4mm, 두께가 약 2mm인 전형적인 소석회유리를 택하였다. 마모시험을 행하기 전에 모든 시편들을 헥산과 아세톤으로 세척하였다. 볼은 AISI 52100 steel을 사용하였으며, 윤활유로써 파라핀 오일을 사용하였다. 모든 마모시험은 상온에서 행하였다.

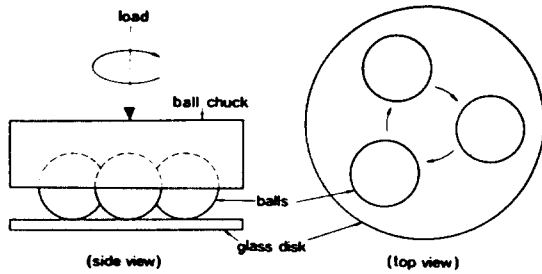


Fig.1. Schematic illustration of the specimen contact geometry in the three-balls-on-disk configuration.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 미끄럼시간에 따른 표면에서의 damage를 보여 주는 미세조직이다. 미끄럼시험의 초기에는 Fig. 2-(a)에서 보는 바와 같이 얇은 groove들이 형성되었다. 미끄럼시간이 길어지면 Fig. 2-(b)에서 보는 바와 같이 groove들의 수가 증가하였으며 깊이도 깊어졌다. 미끄럼시간이 더욱 길어지면 Fig. 2-(c)에서 보는 바와 같이 SCCC들이 갑자기 생성되었으며 심한 chipping이 일어났다. 한편, 마찰계수는 SCCC들이 생성되기 전까지는 약 0.1이었으나, SCCC들이 생성된 후에는 0.2이상으로 증가하였으며 unsteady하였다.

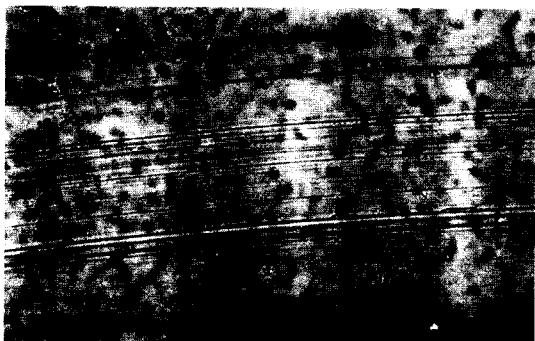
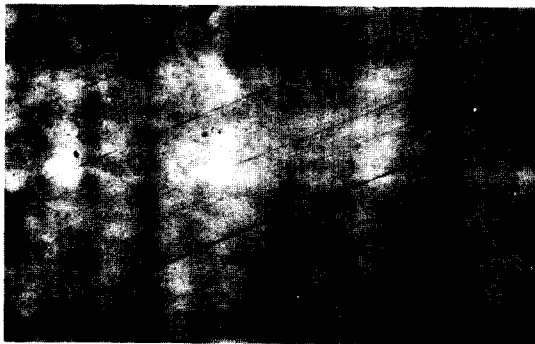


Fig.2. Micrographs of the worn surfaces of glass specimens after sliding for (a) 3 min, (b) 600 min and (c) 800 min, at 67 N.

위 결과는 damage가 어느 미끄럼시간 후 갑자기 증가하는 것을 보여주는 것이다. 갑작스런 damage의 증가는 chipping의 형태로 나타나며 (Fig. 2-(c)), 이 chipping은 SCCC들로부터 시작된다. 따라서, 유리에서의 마모천이 기구를 이해하기 위해서는, 갑자기 일어나는 SCCC생성의 기구를 이해하는 것이 중요하다.

SCCC들이 갑자기 생성되는 이유로 두 가지의 가능성을 들 수 있다. 첫째로, 다결정 알루미늄[1-3], 단결정 오염재료[4, 5]에서와 같이 미끄럼시험동안에 쌓이는 잔류응력이 중요한 역할을 할 수 있다. 표면돌기(asperity) 사이의 실제접촉응력은 매우 크기 때문에 어느 정도의 소성변형(유리의 경우 점성유동)은 일어나며 따라서 잔류응력이 생성된다. 이 잔류응력의 분포는 표면돌기 사이에서의 접촉상태에 따라 매우 복잡하지만, 국부적으로 인장 또는 압축이 될 것이다. 미끄럼시험이 계속 진행되는 동안 인장잔류응력이 어느 이상으로 커지면 SCCC들이 갑자기 생성될 수 있다.

그러나, Shaw와 Brookes[5]에 따르면, 마모표면에서 측정된 미세경도의 값이 미끄럼시간에 따라 변하지 않는다. 이는 미끄럼시험 동안에 쌓이는 잔류응력이 그리 크지 않음을 의미한다. 본연구에서는 이를 Vickers압자압입으로 확인하였다. Marshall과 Lawn[8]에 따르면, Vickers압자로 압입할 때, 압입자극의 모서리로부터 생성되는 균열의 길이는 잔류응력의 크기에 따라 달라진다. 따라서, 미끄럼시험하는 동안에 SCCC가 생성될 정도로 잔류응력이 많이 쌓인다면, 마모표면에서 측정된 균열의 길이는 마모표면이 아닌 부위에서 측정된 값과 상당히 다를 것이다. 그러나, Fig. 3에서 보는 바와 같이 마모된 표면과 마모가 안된 표면에서의 균열 길이는 거의 같았다. 이는 마모시험 동안에 쌓이는 잔류응력의 크기가 무시될 수 있을 정도로 작음을 의미하는 것이다.



Fig.3. Micrographs showing Vickers indentation damage at 10 N in (a) the unworn and (b) the worn area of the same specimen as shown in Fig. 2-(b). Note that the length of the cracks in (a) and (b) is approximately same.

SCCC들이 갑자기 생성되는 두번째 가능성으로, 미끄럼시험 동안에 생성되는 groove의 영향을 들 수 있다. 유리에서의 균열은 표면에 존재하는 흠(flaw)으로부터 생성된다는 것은 잘 알려져 있다. Lawn의 이론적인 분석에 의하면[9], SCCC가 형성되기 위해서는 표면흠의 크기가 어떤 임계값보다 커야 한다. 한편, Fig. 2-(a)와 (b)에서 보듯이 미끄럼시험 동안에 생성되는 groove들이 가장 심한 표면흠이다. 더구나 이 groove들은 미끄럼시간이 길어짐에 따라 점점 깊어진다. 따라서, 어떤 임계 미끄럼시간에서 groove가 임계깊이를 갖게 되면 SCCC가 갑자기 생성될 수 있다. 본 연구에서는 유리 표면에 인위적으로 groove를 미리 형성시켜 준 다음, 이를 미끄럼시험함으로써 이 두번째 가능성을 확인하였다. 320번 SiC 연마지를 15KPa의 압력으로 0.6m를 미끄럼하여 인위적인 groove를 형성시켰다. 연마지로 인위적인 groove를 형성시켜 주는 동안에 생성될 수 있는 잔류응력을 제거하기 위하여 500°C에서 2시간 동안 열처리한 후 미끄럼시험을 하였다. Fig. 4는 320번 연마지로 인위적인 groove를 만들어 준 시편을 33N으로 0.5

분 동안 미끄럼시험하였을 때의 미세구조사진이다. 인위적인 groove를 만들어 주지 않은 시편에서는 67N으로 600분 동안 시험하여도 SCCC가 생성되지 않았으나(Fig. 2-(b)), 인위적인 groove를 형성시켜준 시편에서는 훨씬 낮은 하중인 33N에서 단지 0.5분만 시험하여도 Fig. 4에서 보는 바와 같이 SCCC가 생성되었고 심한 chipping이 일어났다. 이 결과는 groove가 SCCC형성에 결정적인 역할을 하는 것을 보여 주는 증거이다.

마모된 시편의 표면을 자세히 관찰하면, SCCC 생성 기구를 좀 더 분명히 알 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4와 같

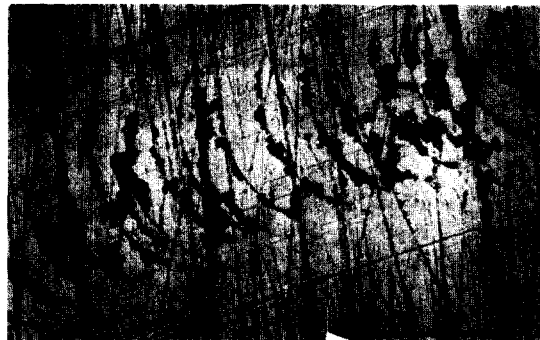


Fig.4. Micrograph of the worn surface of the prescratched specimen after sliding for 0.5 min at 33 N.

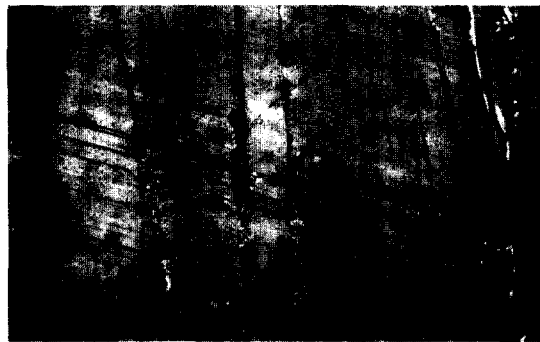


Fig.5. A higher magnification micrograph of the worn surface of the same specimen as shown in Fig. 4. Note the initiation of the SCCCs at the grooves.

은 시편의 미세조직을 고배율로 보여 주는 것으로, SCCC가 groove로부터 생성됨을 보여 주고 있다.

4. 결론

본 연구는 유리에서 마모천이를 일으키는 SCCC가 groove의 영향으로 생성됨을 보여 주었다. 미끄럼시험 동안에 groove가 생성되어 깊어지며, 어느 임계시간에

서 임계깊이에 이르면 SCC가 갑자기 생성되며 이로부터 chipping이 일어나 마모속도가 크게 증가한다. 이 마모전이 기구는 다결정 알루미늄[1-3], 단결정 요업재료에서 [4, 5] 전위축적에 의한 잔류응력이 균열을 생성하여 마모전이를 일으키는 것과는 다르다.

References

1. S.J. Cho, B.J. Hockey, B.R. Lawn and S.J. Benison, "Grain-size and R-curve effects in the abrasive wear of alumina," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 72, p. 1249 (1989).
2. S.J. Cho, H. Moon, B. J. Hockey and S.M. Hsu, "Wear transition mechanism during sliding in alumina," J. Am. Ceram. Soc., submitted for publication.
- 3 조성재, 김종집, 한준희, 문한규, "Al₂O₃에서 미끄럼시의 마모기구 및 마모전이기구, 요업학회지, Vol. 26, p. 51 (1989)
4. C.A. Brookes, M.P. Shaw and P.E. Tanner, "Non-metallic crystals undergoing cumulative work hardening and wear due to softer lubricated metal sliding surfaces," Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 409, p. 141 (1987).
5. M.P. Shaw and C.A. Brookes, "Cumulative deformation and fracture of sliding surfaces," Wear, 126, 149 (1988).
6. S.J. Cho, J.J. Kim, S.K. Park and H. Moon, "A wear transition mechanism during sliding in glass," Wear, in press.
7. S.J. Cho, S.B. Jeon, J.J. Kim and H. Moon, "Enhancement of sliding wear resistance of glass by ion-exchange," J. Mat. Sci. Letters, submitted for publication.
8. D.B. Marshall and B.R. Lawn, "Strength degradation of thermally tempered glass plate," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 61, p. 21 (1978).
9. B.R. Lawn, "Partial cone crack formation in a brittle material loaded with a sliding spherical indenter," Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 299, p. 307 (1967).