

절단 유리판의 표면결함에 관한 실험적 연구

김 청 균*

홍익대학교 트리보메카·에너지기술 연구센터

Experimental Study on the Surface Defects of Scribed Glass Sheets

Chung Kyun Kim*

Research Center of Tribology, Mechatronics and Energy Technology, Hongik University
(Received September 19, 2008; Revised October 20, 2008; Accepted October 27, 2008)

Abstract – This paper presents the surface defect analysis based on the experimental investigation of scribed glasses. The scribing process by a diamond wheel cutter is widely used as a reliable and inexpensive method for sizing of glass sheets. The wheel cutter generates a small median crack on the glass surface, which is then propagated through the glass thickness for complete separation. The surface contour patterns in which are formed during a scribing process are strongly related to wheel cutter parameters such as wheel tip surface finish, tip angle and wheel diameter, and cutting process parameters such as scribing pressure, speed and tooling technique. The scribed surface of a glass sheet provides normal Wallner lines, which represent regular median cracks and crack propagation in glass thickness, and abnormal surface roughness patterns. In this experimental study, normal and abnormal surface topographic patterns are classified based on the surface defect profiles of scribed glass sheets. A normal surface of a scribed glass sheet shows regular Wallner lines with deep median cracks. But some specimens of scribed glass sheets show that abnormal surface profiles of glass sheets in two pieces are represented by a chipping, irregular surface cracks in depth, edge cracks, and combined crack defects. These surface crack patterns are strongly related to easy breakage of the scribed glass imposed by external forces. Thus the scribed glass with abnormal crack patterns should be removed during a quality control process based on the surface defect classification method as demonstrated in this study.

Key words – glass(유리), surface defect(표면결함), breakage(파단), wheel cutter(휠 커터), median crack(메디안 크랙), lateral crack(래터럴 크랙)

1. 서 론

널리 사용되고 있는 유리(glass)는 규사, 탄산석회 등의 원료를 용융한 다음 대기중에서 서서히 냉각하면 높은 경도의 투명한 소재가 제조된다. 유리는 아주 오래 전부터 주방용품, 장식제품, 특히 거울이나 건물의 유리창으로 사용되면서 우리의 일상생활에 필요한 용품으로 자리를 잡았다.

우리나라에서 유리제품은 음료수, 주류 등과 같은 음용수를 비롯한 의료/화장용품, 주방용품 등의 수요증가

로 1980년대 중반까지는 지속적인 성장세를 유지하였으나, 최근에는 가볍고 값이 싼 투명 플라스틱 제품으로 대체하면서 생산량이 감소하는 추세에 있다. 그러나 IT산업의 핵심부품인 LCD 패널시장이 폭발적으로 팽창하였고, 자동차를 비롯한 친환경 초대형 건물, 태양광 산업 등의 등장은 고강도의 기능성 유리에 대한 수요가 증가하는 추세이다.

공장에서 유리를 일정한 규격의 큰 패널로 제조한 다음 필요한 크기로 절단하기 위해서는 다이아몬드 촉침(stylus) 또는 휠 커터(wheel cutter)를 사용하여 유리평판에 직선자국(line marking)으로 스크래칭 가공을 한 후에 양손으로 평판을 잡고 굽힘 모멘트(bending mo-

*주저자·책임저자 : chungkyunkim@empal.com

ment)를 가하여 절단작업을 완성한다. 유리평판을 두 조각으로 절단하는 과정에 발생하는 원하지 않는 표면의 결함을 줄여야 유리를 사용하여 제품을 제조하는 공정에 작은 외력을 가한다 해도 예상치 못한 유리의 파괴현상을 방지할 수 있다.

유리는 경도가 대단히 높은 취성소재[1]이기 때문에 두 조각으로 절단하는 메커니즘을 파괴분석법[2-4]에 의해 규명하는 연구를 많이 진행하였다. 또한 유리제품은 절단가공을 한 후에 파단면 조사를 통해 가공표면의 결합분석[5] 관점에서 품질향상 연구가 시도되기도 하였다. 유리의 절단가공 표면에는 어떠한 비정상적인 가공결함도 허용하지 않는다. 그러나 유리를 실제로 절단가공하면 파단면은 동일한 표면가공 패턴을 나타내지 않기 때문에 연구의 어려움이 제기되었다. 유리는 세라믹처럼 경도가 대단히 높고 변형률은 작기 때문에 유리의 파단면은 균일한 메디안 크랙에 의해 유리평면이 절단되어야 정상적인 유리절단 제품을 생산할 수 있다.

따라서 본 실험적 연구에서는 유리의 절단가공 파단면에 대한 양부를 결정하는 기본 데이터로 유리의 절단가공 파단형상을 표면결합 특성으로 분류하고, 이들의 파단결합 특성을 파단공정 및 절단조건과 연계하여 고찰하고자 한다.

2. 유리판재의 절단공정

유리평판을 절단하기 위해서는 Fig. 1에서 보여준 것과 같은 절단커터가 필요한데, 유리소재의 크기와 절단면의 정도에 따라 다이아몬드를 사용한 포인트 커터와 휠 커터, 레이저 커터 등이 개발되었다.

여기서 다이아몬드로 제작된 포인트 커터는 유리표면에 스크래치 절삭가공을 하여 간편하게 절단하는 방식이고, 휠 커터는 유리표면에 수직방향의 힘을 가한 상태에서 회전하는 휠을 이송하게 되면 유리의 깊이 방향으로 메디안 크랙을 형성시켜 절단한다. 반면에 레이저 빔을 이용한 유리절단은 유리표면에 고열을 가하면서 냉각하여 절단하는 비파괴 가공방식으로 고가이다.

디스플레이 유리패널을 절단하기 위해서는 보통 다이아몬드 휠 커터로 유리표면에서 깊이방향으로 2~5 μm 정도 침투하도록 가공한다. 3 mm 직경의 휠 커터는 보통 120°의 경사면을 갖는 썸기형상으로 제조되었기 때문에 휠 선단부의 경사면에서는 측면으로 가해

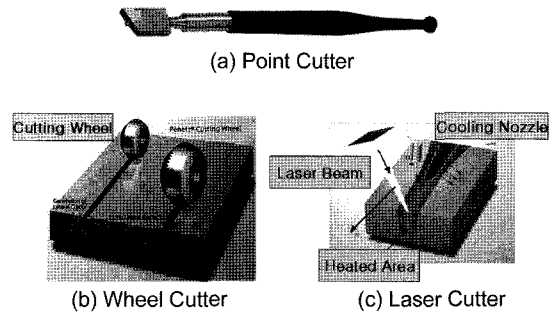


Fig. 1. Scribing cutters for glass sheets.

지는 압축력에 의해 유리는 수직방향으로 50~120 μm의 메디안 크랙(median crack)이 형성되면서 유리는 정상적으로 절단된다. 반면에 휠 선단부의 경사면과 접촉하는 압착지역에 형성된 접촉응력(contact stress)에 의해 3~7 μm 깊이의 취성파손(brittle failure)과 미세 크랙(microcrack) 구역이 발생하면서 칩핑파손(chipping fracture) 및 횡방향의 래터럴 크랙(lateral crack)을 일으켜 비정상적인 파단을 일으킨다.

유리를 필요한 크기로 절단하는 가공공정에서 휠 선단부의 경사면 각도, 휠의 직경, 휠 경사면의 가공 정밀도, 휠에 의해 유리표면에 가해지는 접촉압력과 이동속도는 메디안 크랙형성의 중요한 설계요소이다. 절단가공 작업의 최적화는 유리 절단면의 품질을 결정하는 핵심요소이지만, 유리의 성분과 결함을 갖는 개별 소재의 특성은 절단공정의 품질기준에 더 큰 영향을 미치기 때문에 동일한 작업공정에 의거 유리를 절단한다 해도 균질한 절단제품을 얻기는 어려운 것으로 알려져 있다.

Fig. 2는 휠 커터 선단부의 경사면이 유리표면에 대해 접촉하는 각도가 불균일한 경우에 대한 절단공정을 기구적으로 표현한 것으로 메디안 크랙, 래터럴 크랙, 압착응력 구역 등을 표시하고 있다. 유리판을 휠 커터로 가공한 다음 Fig. 3에서 보여준 것처럼 굽힘 모멘트를 가공라인의 양쪽에서 동시에 가하면 유리판은 정

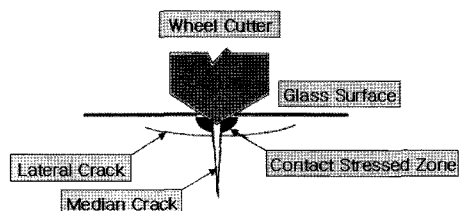


Fig. 2. Schematic diagram of a wheel cutting process.

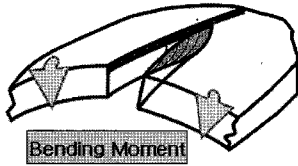


Fig. 3. Schematic illustration of a breakage of a scribed glass.

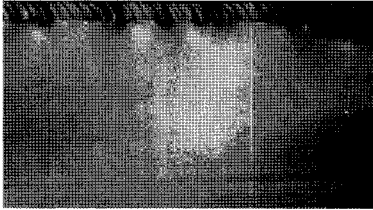


Fig. 4. A good median crack is formed in depth with smooth Wallner lines.

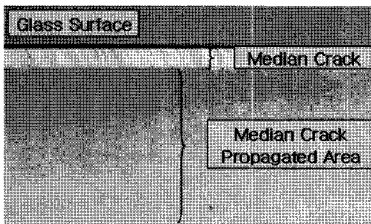


Fig. 5. Typical fracture surface by good cutting. Median crack depth with regular scallops is stable, and the median crack propagated portion is smooth.

상적으로 절단되어 Fig. 4에서 보여준 것과 같은 정상적인 파단면을 형성한다.

Fig. 4는 유리판을 절단한 파단면을 보여준 것으로 균일한 메디안 크랙, 즉 월너라인(Wallner line)의 형성은 가공표면을 우수하게 절단하였다는 것을 의미한다. 이때에 사용한 다이아몬드 휠 커터의 직경은 3mm이고, 휠 선단부의 경사면 각도는 120°인 절삭공구이다. Fig. 4에서 보여준 절단가공 유리판은 이상적인 파단면 형상을 보여준 경우로 외부의 충격하중에 대해 높은 안전성을 나타낸다.

Fig. 5는 유리판을 휠 커터로 가공한 파단면을 설명한 것으로, 휠 커터에 의한 스크래치 가공에 의해 형성된 메디안 크랙과 유리판에 굽힘 모멘트를 가하였을 때 메디안 크랙이 유리의 내부로 전진되면서 두 조각으로 절단되는 파단 메커니즘을 묘사하고 있다.

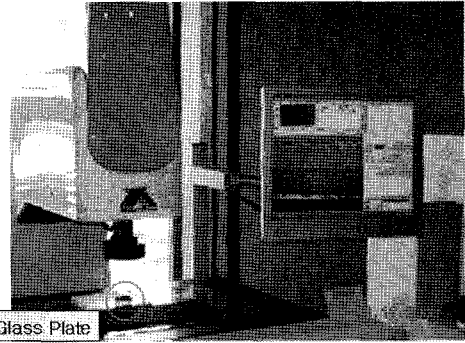


Fig. 6. Typical laser microscope.

3. 시험편 및 측정장비

3-1. 시험편

본 실험에서 사용한 유리는 휠 커터로 유리표면을 일정한 깊이로 절단마킹을 한 다음에 유리시편의 양쪽을 잡고 굽힘 모멘트를 가하여 파단한 것으로 절단면에서 다양한 형상의 표면결함을 관찰할 수 있을 것이다. 따라서 본 실험에서는 유리 절단면의 가공형상 패턴, 즉 잠재적 내부결함으로 연결되는 절단 파단면을 표면형상 측정기로 촬영하여 정상적인 가공표면 형상 패턴 대비 달라진 비정상적인 가공표면 결함특성에 대해 고찰하고자 한다.

3-2. 측정장비

유리판의 절단표면에 대한 파단면의 형상을 측정하기 위해 사용한 장비는 Fig. 6에서 보여준 것과 같은 레이저 표면형상 측정기이다. 절단표면의 가공정도를 측정하기 위해서는 다양한 측정기를 사용할 수 있지만, 본 실험에서는 가공표면의 결함정보를 제공할 수 있는 2D형상 측정기를 사용하였다. 절단유리의 표면형상 이미지를 결함으로의 연계 가능성을 찾기 위해 분류하고, 절단표면의 결함패턴에 따른 정상 파단가공과 비정상 파단가공 상태를 비교·고찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

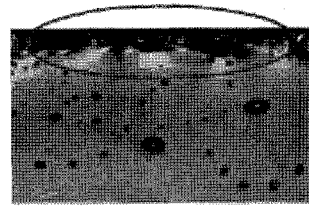
Fig. 1에서 보여준 다이아몬드 휠 커터로 유리판을 절단가공하고, 파단면을 형상측정기로 촬영하면 Fig. 7에서 보여준 것과 같은 정상적인 절단가공 패턴과 Fig. 8의 비정상적인 절단가공 형상을 관찰할 수 있다. 유리시편을 휠 커터로 스크래치 가공한 절단표면의 형상이



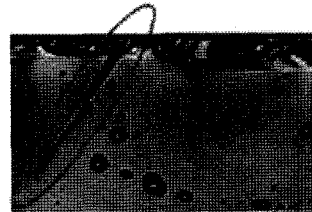
Fig. 7. Normal scribed surface pattern with smooth Wallner lines.

Fig. 7에서 보여준 것처럼 규칙적인 메디안 크랙이 잘 형성된 절단면 형상을 보여주면 유리판은 정상적으로 파단된 것으로 간주한다. Fig. 7에서 관찰한 절단면은 Fig. 4의 월너라인(Wallner line)이 잘 형성되어 있으므로 안정적이다. 이렇게 규칙적인 메디안 크랙 패턴을 갖는 유리제품을 디스플레이 제작에 사용하면 유리의 강도, 즉 내구성 측면에서 문제가 없다는 것이다. Fig. 7에서 보여준 정상적인 절단가공 패턴은 다이아몬드 휠 커터에 의해 유리의 깊이방향으로 5 μm 정도 가공 되고, 휠 선단부의 경사면에 의해 100 μm 정도의 메디안 크랙(median crack)이 균일하게 갈라진 상태에서 Fig. 3의 굽힘 모멘트가 정확하게 작용할 때 얻을 수 있다. Fig. 7과 같은 정상적인 절단가공 패턴을 갖는 유리판을 사용한 완제품은 외부 충격력을 어느 정도 받아도 파손되지 않고 견딜 수 있다. 따라서 유리를 절단가공하면 Fig. 7과 같은 규칙적인 월너라인 패턴의 확보는 가장 이상적인 가공표면이 될 수 있지만, 그 이외의 경우는 불규칙한 파단으로 진행될 수 있기 때문에 절단면을 연삭하여 사용한다면 충격강도 안정성은 어느 정도 높일 수 있다.

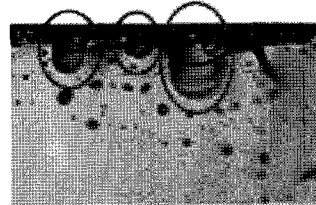
Fig. 8은 휠 커터로 유리판을 가공하였을 때 불량품으로 간주할 수 있는 대표적인 비정상적인 파단면 패턴을 보여준다. Fig. 8(a)는 휠 커터로 유리판에 스크래치 라인마킹을 한 후에 절단한 파단면을 형상측정기로 촬영한 결함패턴으로 유리표면에서 깊이방향으로 들어가면서 가공상태가 균일하지 못하여 절단 가공선이 연속적으로 이어지지 못하고 불연속 및 굴곡 구간이 다수 발생하거나, 절단표면을 따라서 미세크랙(microcrack)이 형성된 결함사례를 보여주고 있다. 이러한 절단 가공면의 표면결함은 주로 다이아몬드 휠 커터를 오래 사용하기 때문에 휠 선단부의 경사면에 발생한 마멸, 휠에 의한 가공깊이와 이송속도, 가압력 등에 의해 영향을 받는 것으로 생각된다. 따라서 휠 선단부의 마멸상태와 작업조건에 대한 엄격한 공정관



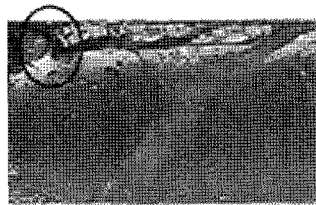
(a) Abnormal surface pattern in depth



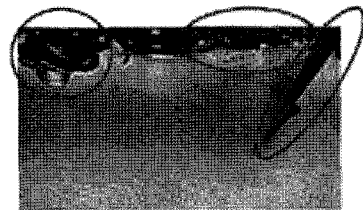
(b) Surface crack pattern



(c) Chipping surface pattern



(d) Edge crack pattern



(e) Combination of various cracks

Fig. 8. Abnormal scribed surface defect patterns.

리가 중요하다.

Fig. 8(b)는 다이아몬드 휠 커터로 가공한 절단표면의 내측으로 크고 작은 크랙이 한 개 이상 형성된 결함사례를 보여주고 있다. 이것은 Fig. 8(a)에서 제시한

불연속 결합보다 더 위험한 절단가공 결합패턴이다. 절단가공 파단면에 형성된 기다란 크랙결합은 휠 커터의 절단가공 과정에서 발생한 래터럴 크랙(lateral crack)에 의한 영향이 크고, 동시에 메디안 크랙의 불안정한 진전에 의해 나타나는 것으로 생각된다. 여기에 추가하여 유리판을 절단하기 위해 가하는 굽힘 모멘트의 크기와 타이밍의 불균형에 의해 Fig. 8(b)와 같은 크랙 결합 발생을 조장하게 된다. 또한 간과할 수 없는 것은 유리를 냉각하는 과정에 형성된 소재내부의 결합에 의한 크랙발생이다.

Fig. 8(c)는 유리판의 절삭가공 깊이방향을 따라서 조개모양으로 떨어져나간 결합, 즉 칩핑(chipping) 결합패턴을 보여주고 있다. 절단가공 진행방향을 따라서 형성된 칩핑파손은 다이아몬드 휠 커터로 유리판에 대해 가압한 상태에서 절삭가공을 하면 쉽게 발생한다. 칩핑은 휠 커터 선단부의 경사면과 접촉하는 유리의 측면압에 형성된 과도한 잔류응력의 발생과 래터럴 미세크랙이 형성되면서 발생될 수 있다. 또한 칩핑파손은 휠의 절단라인을 따라서 낮게 형성된 불연속 절단면과 깊게 형성된 절단면 사이의 파단력 불균형에 의해 형성될 수 있고, 부분적으로는 유리소재의 내부결합과 연계되는 것으로 판단된다.

Fig. 8(d)는 유리판의 끝단에서 길게 형성된 크랙이나 작게 잘려나간 결합패턴을 보여주고 있다. 유리를 절단하기 위해 끝단에 다이아몬드 휠 커터를 접촉시킨 다음 이동하면서 처음으로 절단라인이 형성되기 때문에 초기의 가압력이나 절단깊이 등의 접촉조건이 불안정하여 발생하는 불량구간으로 절단가공을 위한 초기 세팅공정을 정확하게 다루면 해결될 수 있는 결합패턴이다.

Fig. 8(e)는 휠 커터에 의한 절단가공 깊이방향을 따라서 발생한 불연속 결합구간, 크랙, 칩핑 등이 함께 나타난 복합적인 결합패턴을 보여주고 있다. 파단라인을 따라서 형성된 불연속 구간과 칩핑파손은 다이아몬드 휠 커터로 가압하는 절삭가공 과정에서 발생할 가능성이 높고, 크랙패턴은 절단과정에서 형성된 불량한 메디안 크랙과 파단작용력의 불균형으로 발생할 것으로 예상되지만, 동시에 소재의 결합도 연계될 가능성이 많다.

상기에서 보여준 다양한 표면결합을 내재하고 있는 유리판을 디지털 디스플레이(TV, 핸드폰, PMP, 전자사전 등) 부품으로 사용한 완제품을 사용자의 부주의로 바닥에 떨어뜨리게 되면 유리판은 쉽게 파손될 것이다.

Fig. 7에서 제시한 정상적인 절단면을 갖는 유리도 외부의 충격력이 크면 파손될 수 있지만, 특히 Fig. 8에서 제시한 표면결합을 내재하고 있는 유리판을 사용한 디스플레이 제품은 외력에 의해 쉽게 파손될 수 있다. 따라서 절단 파단면에 앞에서 언급한 결합을 갖고 있는 유리 가공품을 디스플레이 기기제품에 사용할 경우는 완제품의 내구성을 떨어뜨리기 때문에 결합잠재 유리판은 사용하지 않도록 사전에 제거해야 한다.

결국 디지털 디스플레이의 내구성은 유리판의 절단가공 표면에 대한 철저한 품질관리가 중요하고, 특히 Fig. 8에서 제기한 파단면의 결합 발생요인을 제거하기 위해서는 다이아몬드 휠 커터의 가공조건을 최적화하고, 품질검사를 엄격하게 관리해야 한다. 유리의 절단가공 표면형상을 Fig. 7에서 보여준 것처럼 파단면을 균질하게 가공하여 메디안 크랙형상을 확보하는 것이 중요하다. 만약 절단가공 파단면의 표면형상이 매끄럽고 규칙적이지 못하면, 절단 파단면을 정밀연마로 가공하여 표면정도를 높이는 것도 충격하중에 대해 안전성을 확보하는 또 다른 방법이다.

5. 결 론

본 연구에서는 유리판의 절단가공 파단과정에서 발생하는 절단표면의 정상가공 패턴과 비정상 가공패턴을 분류하고, 이들의 결합특성에 대해 고찰하였다. 유리판을 다이아몬드 휠 커터로 절단하면 정상적인 가공표면은 커터에 의한 메디안 크랙이 깊고 균일한 폭으로 100 μm 정도는 가공해야 하고, 동시에 굽힘 모멘트 파단력을 균일하게 공급해야 안정적으로 확보할 수 있다. 반면에 비정상적인 가공표면은 메디안 크랙이 깊이방향으로 낮게 가공되고, 파단력이 불균일하게 가해질 때 절단가공선의 불균일 구간이 존재하고, 커터 선단부의 경사면에 의한 압착응력 구역에 의해 래터럴 크랙과 칩핑파손 등이 복합적으로 형성된 것이다. 유리판의 절단가공 표면에 비정상적인 가공결합이 존재하면 유리는 외부의 충격하중에 의해 쉽게 파손되는 특성을 갖기 때문에 이러한 결합이 없도록 메디안 크랙을 최대한 발달시킨 절단가공을 진행하는 것이 중요하다. 또한 이미 형성된 결합패턴을 내재한 유리판이 외부 충격력에 의한 파단 위험성을 낮추기 위해서는 가공비가 상승하여도 절단면을 연마가공하는 것이 필요하다.

참고 문헌

1. 김청균, “트라이볼로지”, 복두출판사, 2004.
2. Kishii, T., “Fracture Analysis of the Glass”, *The Glass*, No. 9, pp.17-22, 1988.
3. Okamoto, F. and Shimizu, C., “Evaluation of Glass Surface Defect using the Thermal Down Shock Test”, *Glass Symposium 1989 Proceedings*, pp.12-14, 1989.
4. Ono, T. and Allaire, R.A., “Fracture Analysis, A Basic Tool to Solve Breakage Issues”, Taiwan FPD Expo 2000, June 2000.
5. Ono, T., “Current Situation of LCD Glass Substrate Break Measures, Foundation and Application of Substrate Break Analysis”, *FPD Intelligence*, Vol. 5, No. 5, pp. 23-32, 2000.