

진동에 의한 평판 유리의 절단 거동

최성대[#], 정선환*, 김기만*, 전재목**, 노영진**

Shearing Behavior of Flat Panel Glass by Oscillating Diamond

Seong-Dae Choi[#], Seon-Hwan Cheong*, Gi-Man Kim*, Jae-Mock Jeon**, Young-Jin Rho**

ABSTRACT

The localization of manufacturing technique development is actualizing for low cost with supplies of display devices. We need more high cutting technique because consumers want flat glasses of various sizes.

Recently, most general two methods are normal wheel cutting and laser cutting, but both of them have some faults. First, the wheel cutting has cracks and sharp edges of sections. Second, it is easy for laser cutting to cut curved lines. however, it has thermal damage and low traverse speed. I suggest a new cutting method by high-wave frequency vibration wheel cutting(HFVC), which is good for quality improvement. Vertical cracks and crack depth is observed, after HFVC. When the average of the crack depth is 30 μ m and the average of the wallner liner depth is 200 μ m, it has the most high quality of the sections in this experiment. As a result, when we consider between the normal wheel cutting method and the HFVC method, the latter has low cracks and good quality.

Key Words : High-wave Frequency Vibration Wheel Cutting(고주파수 진동 휠 절단), Flat Glass(평판 유리), PZT Ceramic(압전 세라믹), Wallner Line(에너지 탄성파), Fractography(파면 해석)

1. 서 론

정보화 사회는 하루가 다르게 발전해 가면서 인간이 접할 수 있는 정보의 양이 방대해 지고 있다. 이러한 정보를 얻을 수 있는 중요한 매체가 컴퓨터, PDP, TV등이며 최근 이런 기기에 사용되는 영상 정보 Display의 원리는 서로 다르지만 핵심 부품은 공통적으로 전면과 후면으로 구성된 2개의 투명 유리

내부에 존재하며 이러한 전·후면 유리를 수요자의 요구에 따라 화면 크기대로 절단해야 하는 기술개발이 필요하다. 유리는 고강도, 고경도, 뛰어난 내식성 등 많은 장점이 있지만 취성이 강하여 가공하기 어렵다.

유리의 절단 방법으로는 다이아몬드를 이용한 기계적인 절단 방법과 레이저를 이용한 절단 방법을 들 수 있다. 레이저 절단 방법은 곡선에 따라 절단이 용이 하지만 왜곡 현상, 열 손상, thermal crack이 발생하고 저속의 이송 속도와 절단 장치가 고가인 단점을 들 수 있다. 그리고 기존 평면 유리 절단 방식인 다이아몬드를 이용한 기계적인 절단 방법은 crack 발생과 추가공정이 필요하고 절단면 모서리 edge가 날카로운 것 등 많은 문제점을 들 수 있다.

교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부
E-mail : sdchoil@kumoh.ac.kr

* 금오공과대학교 기계공학부

** 금오공과대학교 대학원 생산기계공학과

따라서 유리 절단 방법의 확립과 절단 품질을 향상시키기 위해서는 새로운 가공 방법이 요구 된다. 난삭재인 유리를 가공하기 위하여 공구에 초음파 진동을 주어 가공 하는 방법이 제안되고 있다. Weber는 유리 세라믹을 공구 홀더에 횡 진동을 가진 시켜 가공면의 취성 파괴에 의해 공구 수명을 20배 까지 증가시킬 수 있다고 보고 하였다^[1]. Shamoto는 경취 재료인 소다 석회의 유리 홈 가공 시 임계절삭의 깊이가 종래의 절삭 깊이에 비해 7배 깊어진다고 발표 한 바 있다^[2]. 이러한 연구 들을 종합 해보면 초음파 진동을 유리 표면에 가진 하면 공작물과 공구의 수명을 개선시키므로 취성 재료의 절단에도 효과적임을 알 수 있다.

본 연구 에서는 기계적인 유리 절단 방법인 다이아몬드 휠에 의한 scribe를 하면서 고주파 가진 장치를 절단 head에 설계 적용하여 wheel에 진동을 주어 절단한 평판 유리의 절단면 품질을 확인 하였고 유리 절단압력과 주파수인자의 변화에 따른 가공 면을 파면 해석하였다.

2. 유리 절단 원리

2.1 절단 원리

통상적으로 유리의 절단 원리는 Fig. 1에서 나타내는 것과 같이 두 단계로 행하여진다. 첫째는 유리 표면에 일련의 연속적인 scribe를 하면 표면 하부 층에는 미세한 균열 고리가 생성된다. 둘째는 절단, 즉 scribe된 홈에 인장 응력을 가하여 새로운 절단면을 형성 하여 유리가 절단된다.

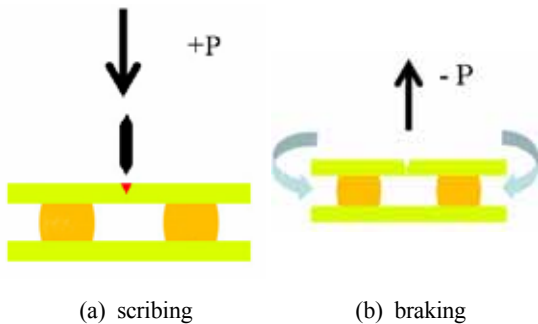


Fig. 1 Mechanism of glass cutting

평판 유리에 일련의 연속적인 scribe 균열을 낸 후 이 균열의 수직방향으로 유리를 절단하여 절단면을 파면 검사하면 유리 표면의 응력 시스템을 확인 할 수 있다. 압축력을 가하여 wheel로 유리를 scribe 하면 유리표면에 인장응력 σ_t 가 형성되어 움푹 파인 파열 부위가 형성된다. 이 파열 부위는 Fig. 2와 같이 수직 균열로 형성되고 이 균열은 유리 절단의 척도가 된다. 수직 균열의 형성되는 원인은 vickers 경도 시험기에서 다이아몬드 압자로 유리 표면을 눌렀을 때 깊이가 a인 수직 균열이 생성되는 것과 동일하다.



Fig. 2 Principle of vertical crack

고주파수 진동을 종방향으로 인가하면서 scribe를 하면 wheel의 인가 압력에 따라 절단면의 형상이 매우 다르게 나타난다. 본 연구에서는 wheel의 압력을 일정 하게 유지하기 위하여 공기압을 이용한 정압 제어 시스템을 사용하였다.

3. 실험방법

3.1 고주파수 진동 절단 공구 제작

Fig. 3은 본 연구에서 자체 설계 제작한 고주파수 진동 절단 장치 개념도이며 크게 고주파 가진 장치부(piezoelectric actuator)와 직선 운동용 y축 이송부, 고주파수 발생 제어부로 구성 되어 있다.

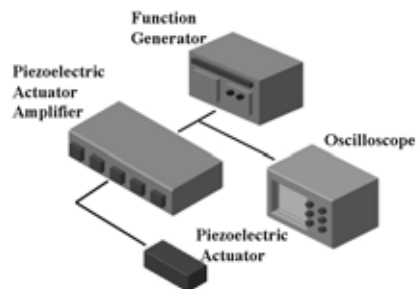


Fig. 3 Schematic diagram of cutting tool

고주파수 진동을 발생시키는 과정은 함수 발생기를 이용하여 sine wave를 발생시켜 이를 높은 전압으로 신호로 바꾸는 증폭기로 보낸다. 여기서 원래의 신호를 20배 증폭하여 압전 소자로 보내진다. Fig. 4에는 고주파수 진동 평판 유리 절단 장치의 실제 사진을 나타내었다. x축 행정은 800mm이다.

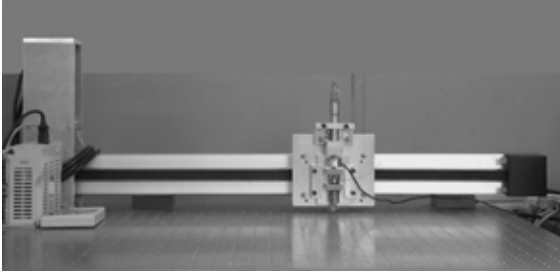


Fig. 4 Photograph of glass cutting system

3.2 시험편의 제원

평판 유리는 두께가 3mm이며 Float 공법에 의해 생산된다. Table 1에서는 Soda lime silica 판유리의 조성 및 특성을 나타낸다.

Table 1 Specification of flat glass

Workpiece	Glass soda-lime for PDP	
Composition	SiO ₂	71.0
	R ₂ O	14.0
	RO	13.0
	Al ₂ O ₃	1.5
Quality	Strain point(°C)	511
	Annealing point(°C)	554
	Softening point(°C)	735
	Thermal expansion coefficients($\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)	87
Manufacturing tech	Float process	
R ₂ O: Na ₂ +K ₂ O, RO: MgO+CaO+SrO+BaO		

3.3 실험 조건

Wheel에 고주파수 진동을 인가하여 평판 유리의 절단면을 비교 분석하였고 사용한 wheel의 제원과 PZT세라믹의 인가 조건은 Table 2와 같으며 가공면의 측정은 cam scope를 통하여 수행하였다.

y축의 이송은 직선 이송 시스템과 AC 서보 모터를 사용하였으며 x축은 마이크로미터에 의해 50mm의 행정 안에서 이송되며 wheel에 인가되는 압력을 일정하게 유지하기 위하여 정압 시스템을 적용하였다. 평판 유리에 전달되는 wheel의 인가 압력을 측정하기 위하여 최대 용량이 100kgf인 load cell을 사용하여 측정 하였다. 실험 조건에서 사용된 wheel의 재질은 소결 다이아몬드이며 wheel의 경사각은 150°이고 외경은 3.0 mm이다. Wheel에 고주파 진동을 인가함에 따라 발생하는 균열 홈의 형성 깊이와 파괴선 단면 깊이를 관찰하였다.

Table 2 Experimental condition

Tool	Material	Diamond
	Angle	150°
	Diameter	3mm
Cutting speed	200 mm/sec	
Frequency	1.5, 2.5, 3.5(kHz)	
Input voltage	15, 25, 35(V)	
Load	1.5, 2.5, 3.5(kg)	

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 압전 세라믹 특성

고주파수 진동 발생특성을 확인하기 위하여 PZT 세라믹의 입력 전압에 따른 발생 변위를 확인하였다. Fig. 5는 PZT세라믹에 +100V를 입력한 경우에 발생하는 정적 변위가 최대 13 μm 임을 나타낸다. 하지만 PZT세라믹의 인가전압을 제거해도 발생 변위가 처음 상태로 복원되지 않는 히스테리시스 발생하고 잔류 변위는 3 μm 임을 알 수 있다.

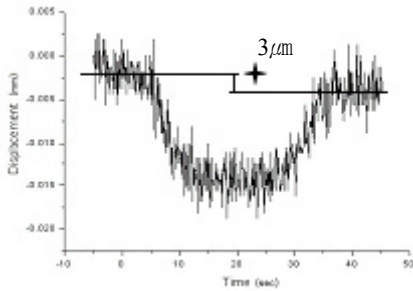
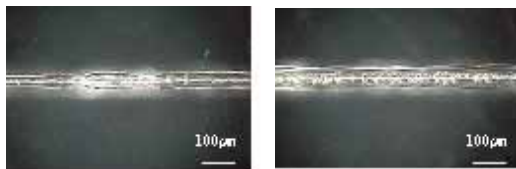


Fig. 5 Hysteresis loss of PZT actuator

4.2 진동 주파수 변화에 따른 파면

Fig. 6은 일반적으로 널리 사용하는 다이아몬드 wheel에 고주파수 진동을 인가하지 않는 경우와 3.5 kHz의 고주파수 진동을 인가한 경우의 scribe line을 관찰한 사진이다. 평판 유리를 scribe하면 일련의 연속적인 균열 홈이 발생하고 wheel 압력에 의한 다수의 미세한 파괴와 파열로 이루어진 움푹 파인 파열 골이 형성된다. Fig. 6(a)에서는 파열 골이 균일하지 못하고 scribe line의 폭도 일정하지 못하다. Fig. 6(b)은 wheel에 고주파수 진동을 인가한 경우의 scribe line을 나타내며 파열의 골이 균일하고 scribe line의 폭도 일정하다. 연속적인 균열의 형성 원리는 강구로 하중을 가하며 유리 표면을 밀면 연속적인 균열 영역이 형성되는 것과 같다.



(a) general cutting (b) vibration cutting

Fig. 6 Compare of scribe line

Fig. 7은 일반적인 다이아몬드 wheel로 scribe 한 후 braking된 절단면을 나타낸다. Fig. 6(a)에서 확인한 균일하지 못한 균열 폭에서 절단면을 관찰하면 균열 깊이가 일정하지 못하고 깨짐 현상을 확인 할 수 있다. 또한 균열 홈의 깊이가 최대 43 μm로 깊게 발생한다. 깨짐 현상과 불균일한 균열 홈의 깊이는 절단면 품질을 저하시키는 요인으로 작용한다.

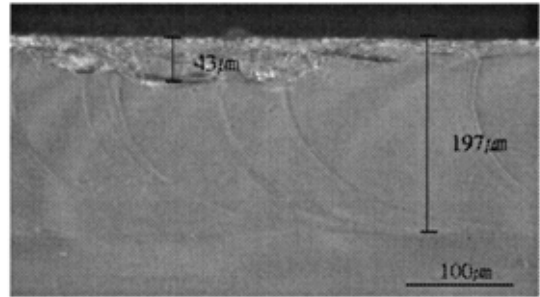


Fig. 7 Photographs on the section of general cutting

Fig. 8은 3.5 kHz의 고주파수 진동을 인가 한 경우의 절단면을 관찰한 파면이며 파괴선 단면까지의 깊이는 202 μm이고 균일한 wallner line이 나타난다. 연속적인 균열 홈이 관찰되고 평균 30 μm의 균일한 깊이이며 wallner line의 간격도 일정하다.

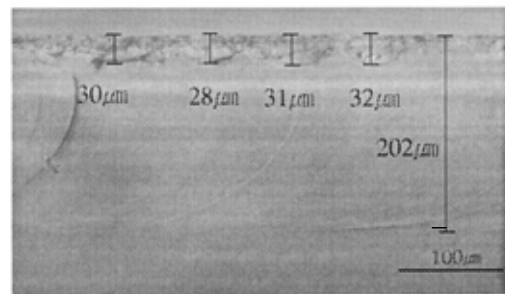


Fig. 8 Photographs on the section of 3.5kHz vibration

Wallner line은 인장 하중이 걸려있는 평판 유리 속에서 신장되어 가는 균열로써 외부 표면층에 존재하는 균열에 축적 되어있는 인장 응력의 에너지를 일종의 탄성과 형태로 바꾸어주며 이 탄성파는 파괴선 단면에 도달하는 순간 사라져버린다. Wallner line을 통하여 파괴 방향과 파괴점의 위치와 내부 균열 위치 정보를 얻을 수 있다.

Fig. 9는 wheel에 1.5kHz 진동을 인가하여 절단한 평판 유리 절단면을 나타낸다. Wheel이 장착된 절단 head와 고유 진동수의 일치로 공진이 발생하여 절단면이 불량하고 파열된 골 영역도 넓고 주변이 파괴되어있다. Fig. 10은 2.5kHz 진동을 인가하여 절단한 평판 유리 절단면을 나타내며 파괴선 단면 깊이는 215 μm 이고 균열 홈 깊이는 평균 30 μm이다.

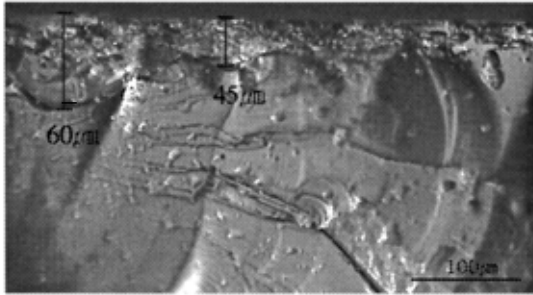


Fig. 9 Photographs on the section of 1.5kHz vibration

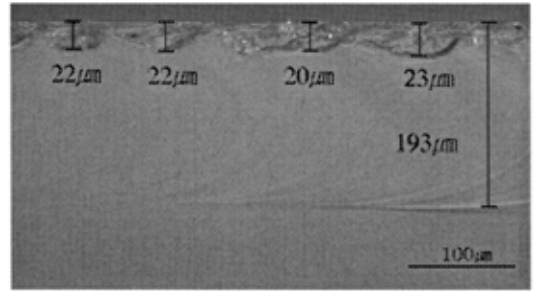


Fig. 11 Photographs on the section of input 15V

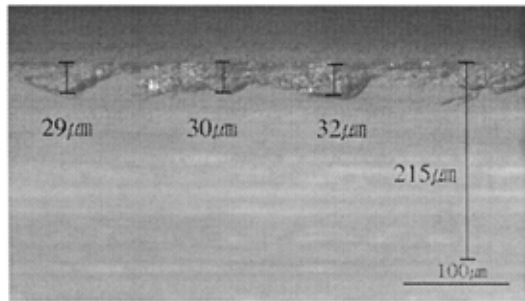


Fig. 10 Photographs on the section of 2.5kHz vibration

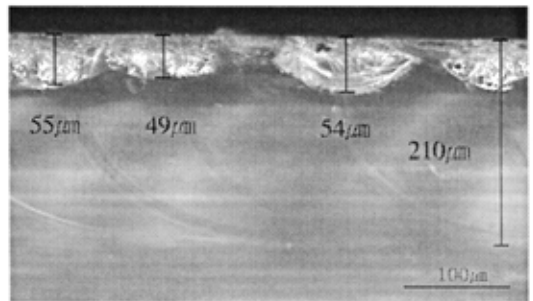


Fig. 12 Photographs on the section of input 35V

Fig. 10과 같이 고주파수 진동을 인가한 경우가 일련의 연속적인 균열 홈의 형상이 나타나고 파괴선 단면까지의 깊이가 깊으며 wallner line의 간격이 일정하다. 따라서 일반적인 wheel에 의한 cutting 방법에 비하여 crack 발생이 적고 절단면 품질이 우수하다. 이는 고주파수 진동을 wheel에 인가하면 취성 파괴의 영향을 줄일 수 있고 평판 유리 표면에서 시작한 수직 균열의 깊이를 고주파수 진동에 의하여 진전 효과가 있음을 알 수 있다.

4.3 압전 세라믹 전압 변화에 따른 파면

평판 유리의 절단면 품질은 평판 유리에 인가된 압력과 밀접한 관계가 있다. PZT actuator에 인가된 전압의 증가에 따라 발생하는 force는 비례적으로 증가하기 때문에 wheel과 평판 유리에 가해지는 pre-load의 증가로 이어진다. Fig. 11은 PZT세라믹 전압을 15V로 인가한 경우의 절단면을 나타낸다. 연속적인 균열 홈이 나타나고 파괴 선단면의 깊이가 202µm이며 균열 홈의 깊이는 평균 25µm이다.

Fig. 12는 PZT세라믹 인가전압을 35V로 한 경우의 절단면을 나타낸다. 인가전압을 15V로 한 경우보다 폭이 넓은 파열 부위가 나타나고 파괴선 단면 깊이는 210µm이며 균열 홈 깊이는 평균 52µm 정도로 과도한 충격 하중에 의한 불량한 scribe 단면형상을 나타낸다. PZT세라믹의 인가전압을 35V이상 증가하면 과도한 force가 발생하여 평판 유리에 응력이 집중되고 균열 홈의 깊이가 깊으며 형상이 거칠기 때문에 평판 유리에 파괴 원인으로 작용한다.

4.4 절단 공구 pre-load 변화에 따른 파면

Wheel에의 인가된 pre-load에 따라 균열 홈의 깊이와 파괴선 단면의 깊이 변화량을 확인하기 위하여 Pre-load 변화에 따른 평판 유리 절단 파면을 확인하였다. Fig. 13에 나타나는 하단 우편으로 진행된 wallner line은 균열면의 해당 지점에서 파괴 방향을 나타낸다. 파괴 진행속도가 완만한 경우 wallner line은 파괴선 단면과 거의 일치함을 알 수 있다.

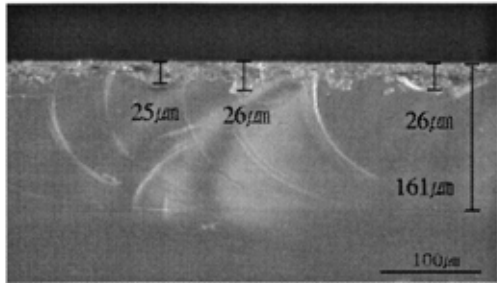


Fig. 13 Photographs on the section of pre-load 1.5kgf

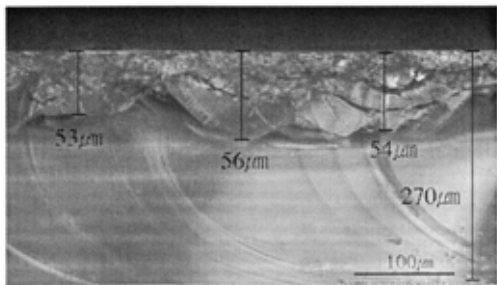


Fig. 14 Photographs on the section of pre-load 3.5kgf

Pre-load가 1.5kgf 경우는 균열 홈의 깊이가 평균 26 μ m이고 파괴선 단면의 깊이는 161 μ m 이다. 파괴선 단면까지는 정렬된 wallner line이 형성되어 있지만 wallner line 부근에서 시작된 깃털 형 파괴 흔적이 나타난다. 깃털 형 파괴는 braking 과정에서 과소한 pre-load로 인하여 나타난다. Fig. 14는 평판 유리에 3.5kgf의 pre-load를 인가한 경우의 절단면을 나타낸다. Pre-load가 과대해서 유리 표면에 이상 응력이 집중되어 수평 crack이 발생한다. 수평 crack으로 인하여 절단면 품질이 불량하고 파괴 형상이 뚜렷이 나타난다. 균열 홈의 깊이는 평균 55 μ m이고 파괴선 단면의 깊이는 270 μ m로써 매우 깊게 나타난다.

5. 결 론

Display 장치로 사용되는 평판 유리를 절단하기 위한 고주파 진동 scribe 공구를 자체 제작하여 인가 진동 주파수와 PZT세라믹의 input 전압, pre-load변화에 따른 평판 유리의 절단면을 관찰하여 다음과 같은 사실을 확인하였다.

1. 일반적인 무진동 scribe 절단방법에 비하여 고주파수 진동을 인가한 경우가 crack의 발생이 적고 scribe line의 폭도 일정하며 균일한 wallner line의 간격을 나타내었다. 균열 홈의 깊이가 평균 30 μ m 이고 wallner line 깊이가 200 μ m 일 때 평판 유리의 절단면 품질이 우수함을 알 수 있다. 평판 유리에 고주파수 진동 scribe를 하면 이상 응력 집중에 의한 취성 파괴 영향을 줄일 수 있고 평판 유리 표면에서 시작된 수직 균열의 깊이를 진전시킨다.
2. PZT세라믹의 인가전압을 35V이상 증가하면 과도한 force가 발생하여 평판 유리에 응력이 집중되고 균열 홈의 깊이가 깊으며 형상이 거칠기 때문에 평판 유리에 파괴 원인으로 작용한다.
3. Pre-load가 과대한 경우는 유리 표면에 이상 응력이 집중되어 수평 crack이 발생한다. 수평 crack으로 인하여 파괴 형상이 나타난다. 따라서 일반 scribe 방법과 비교하면 고주파수 진동 scribe 방법이 절단면 품질을 향상시키고 crack의 발생을 줄일 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과 대학교의 학술 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 관계자 분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Weber, H., Herberger, J. and Pilz, R., "Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool," Annals of CIRP, Vol.33/1, pp.85-87, 1984.
2. Eiji Shamoto, Toshimichi Moriwaki, and Kenji Inoue, "Ultra precision Ductile cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration," Annals of CIRP, Vol.41/1, pp.141-144, 1992.
3. 신용주, 김현영, 장인배, 김병희, 전병희. "초음파에 의한 고 세장비 유리 가공 특성," 한국소성가공학회지, 제11권, 제7호, pp.608-613, 2002.
4. 이정훈, "유리 생산 기술상의 결점," pp.672-698, 청문각, 2001.