

유리의 미세구멍 가공시 출구 크랙 발생 방지

박병진*, 최영준(서울대 대학원 기계항공공학부), 주종남(서울대 기계항공공학부)

Prevention of Exit Crack in Micro-drilling of Soda-lime Glass

B.J. Park, Y.J. Choi (Graduate School, SNU), C.N. Chu (School of Mech. and Aero. Eng., SNU)

ABSTRACT

In micro-drilling of brittle materials including glass, cracks occur at the exit surface. In drilling glass, the main type of crack is cone crack. Cone crack is generated by thrust force acting at the bottom surface of the workpiece. Cone crack size could be reduced by changing cutting conditions, but cone crack still existed. Two methods were proposed to prevent crack formation and perfect hole shapes were obtained. One method is attaching two glass plates with water and the other method is constraining two glass plates. The proposed methods eliminated tensile stress acting on the exit surface of glass and prevented crack propagation.

Key Words : Cone Crack (원추형 크랙), Micro-drilling (미세구멍가공), Soda-lime Glass (소다석회유리)

1. 서론

최근 소형 정밀 부품에 대한 가공이 늘어나면서 미세구멍 가공 기술의 중요성이 부각되고 있다. 특히 미세구멍 가공은 시계 부품, 각종 미세 노즐 및 오리피스, 광섬유 키넥터, 프린트 기판, 우주 항공용 부품 등에 수요가 급증하고 있다. 이러한 미세구멍 가공은 구멍 지름의 미세화, 가공 구멍의 고밀도화와 함께 가공 깊이 증가와 대량 가공에 따른 생산성을 요구한다. 미세 구멍을 가공하는 방법은 방전 가공, 레이저 가공, 초음파 가공, 미세 드릴을 이용한 가공 등이 있다. 이 중 미세 드릴(micro drill)을 이용한 구멍 가공법은 피삭재의 종류에 구애 받지 않고 가공이 가능하고 전원도, 직진도, 표면 조도가 우수한 구멍을 얻을 수 있으며 가공 시간이 짜르다는 장점을 가지고 있다.

그런데 미세 드릴링 가공법은 다른 미세구멍 가공법과는 다르게 절삭을 통하여 가공이 이루어진다. 따라서 공구와 피삭재가 접촉하여 재료에 하중이 작용되므로 드릴의 입구나 출구 부위의 표면에 벼(bur)나 크랙(crack)을 남기게 된다.

이 중에서 크랙은 주로 유리와 같은 취성 재료의 가공에서 나타나는 현상이다. 이러한 재료는 기계적 가공 시 보통 취성 파괴에 의하여 재료의 재

거가 이루어지므로 이로 인해 기공 표면에 크랙이 발생된다. 따라서 정밀한 형상을 요하는 미세 구멍의 가공 시에는 크랙을 사전에 방지하는 것이 중요하다.

크랙에 관한 연구는 주로 취성 재료에 대한 다양한 압착의 압입 실험^[1-3]이나 금속 재료 구의 충돌 실험^[4-6]에 의한 것으로서 드릴링 시의 크랙 발생과는 다른 현상이다. 따라서 크랙의 발생 현상을 드릴 절삭 과정에 맞추어 살펴볼 필요가 있다^[7].

본 연구에서는 유리의 미세 드릴 가공 시 발생되는 크랙의 종류와 발생 과정을 실험을 통하여 알아보고, 드릴 추력에 대한 크랙의 크기와의 상관관계를 검토하였다. 그리고 크랙의 형성을 방지하기 위한 방법을 제안하고, 크랙을 효과적으로 방지할 수 있음을 보였다.

2. 미세구멍 가공시 크랙 발생 현상

2.1 미세구멍 가공시의 크랙 발생

드릴링은 압착 압입이나 충돌 실험과는 다른 과정이므로 드릴 가공시 나타나는 크랙 발생 형태도 다르게 나타난다. Fig. 1은 드릴 가공 후 나타나는 입구부와 출구부의 표면 형상이다. 드릴의 입구에서는 그림과 같이 크랙이 거의 나타나지 않는다.

그러나 출구 표면에서는 절삭 조건에 따라 다양한 크기의 크랙이 발생한다. 출구 구멍 주위에는 칩핑(chipping)과 함께 주로 콘 크랙이 나타난다

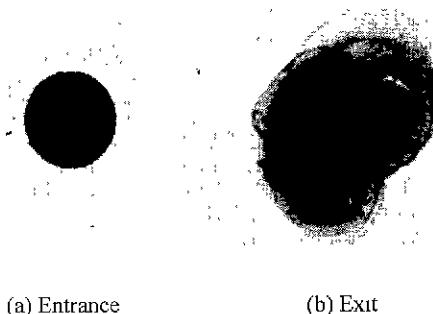


Fig. 1 Shapes of drilled hole ($\phi 100 \mu\text{m}$)

드릴링 시에는 절삭과 동시에 드릴이 진입하면서 하중을 가해주는 상태가 되는데, 크랙은 드릴이 구멍을 팬통하기 직전 발생된다. 크랙이 발생되는 위치는 유리판의 아래쪽 면으로부터 약 $20 \mu\text{m}$ 이내이다. 이 때는 하중이 크지 않아도 드릴 아래의 얇은 부분에 하중이 집중적으로 작용하고 그 부분을 밑에서 받쳐주지 못하므로, 재료의 변형이 커지고 유리 내부에 작용하는 인장력이 커진다. 이에 의하여 드릴링 중에 발생된 미세한 크랙이 성장하고, 이 크랙이 재료의 표면으로 이어져서 재료가 털락된다. 드릴링 도중 크랙이 여러 부분에서 나타나므로 Fig. 1(b)와 같이 여러 개의 콘 형상이 나타날 수 있다. 콘 크랙 이외에 방사상 크랙(radial crack)이나 미디언 크랙(median crack) 등이 발생할 수 있는데, 이들은 콘 크랙의 하부에 나타나므로 이들이 발생되더라도 콘 크랙에 의하여 떨어져 나가므로 재료에 미치는 영향은 없다.

2.2 크랙 발생을 막기 위한 방법

취성 재료를 가공할 때는 미세한 균열을 방지하기 위해 날 끝이 아주 예리한 공구를 사용하거나 적절한 절삭 조건을 선택하여 재료에 소성 유동이 나타나게 함으로써 원하는 가공면을 얻는다.

그러나 미세 드릴링시 구멍의 출구면에서 콘 크랙이 발생되는 것은 직접적인 절삭의 영향이라고 하기 보다는 드릴 추력(thrust force)에 의한 재료의 변형에 따른 것으로 크랙을 방지하기 위해서는 다른 방법이 필요하다.

따라서 절삭 조건을 바꾸어 드릴 추력을 감소시키거나 시험편 아래를 백업(backup) 판으로 지지하여, 재료에 작용하는 인장을 감소시켜 크랙을 방지할 수 있다

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험 장치 구성

실험에 사용된 실험 장치의 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 미세 드릴링 장비는 기계 자체의 정밀도가 제공하는 구멍의 정밀도에 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 이송장치가 필요하고 고속 회전을 위한 주축을 필요로 한다. 실험에 사용된 기계의 사양은 Table 1과 같다. 절삭력 측정 장비로는 미세 드릴링 시에 작용하는 절삭력이 크지 않으므로 정밀한 센서가 요구된다. 구멍 가공시 나타나는 추력을 측정하기 위해 Kistler 사의 압전 소자형 로드 와셔(load washer, type 9117A)를 이용하였다. 이 센서를 Fig. 3(a)와 같이 장착하여 가공시 나타나는 추력을 직접 받을 수 있도록 하였고, 이 신호를 전하 증폭기(charge amplifier)로 증폭한 후 컴퓨터에서 신호를 기록하였다.

유리는 재료의 취성으로 인해 공작물을 고정 장치에 장착할 때 깨지기 쉽다. 따라서 유리와 접촉하는 면이 유리의 표면과 수평을 이루고 고른 압력을 주도록 Fig. 3(b)와 같이 설계하여 시편을 고정시킬 때 유리가 깨지지 않게 하였다.

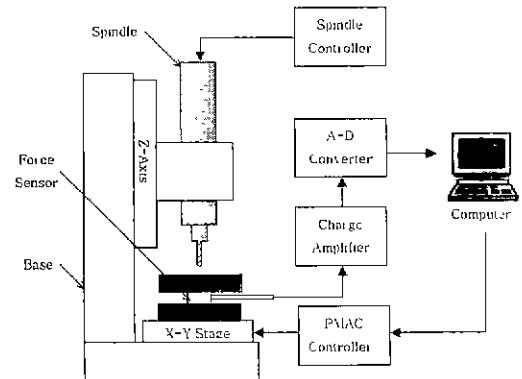


Fig. 2 Experimental setup of micro drilling system

Table 1 Specifications of machine

Drilling ability	Max. $\phi 3.0$ (mm)
Spindle speed	15000 ~ 60000 (rpm)
Feed rate	Max. 12 (mm/s)
Total travel	150 (mm)
Positional accuracy	3 (μm)

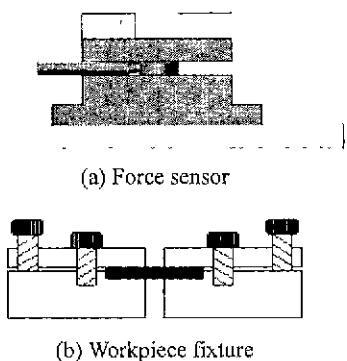


Fig. 3 Thrust force measuring system

3.2 실험 방법

미세구멍 가공시 나타나는 크랙 발생 경향을 살펴 보기 위한 절삭 조건은 Table 2 와 같다. 절삭 조건을 다양하게 변화시키면서 가공시 나타나는 추력을 측정하여 기록하고 발생된 크랙을 비전(vision) 시스템과 SEM 사진으로 관찰하였다. 크랙은 매우 예측하기 어려운 현상이고, 같은 절삭 조건에서도 그 모양이 매우 다르게 나타난다. 따라서 구멍 중심에서 크랙의 끝 부분까지의 평균거리를 계산하여 크랙의 크기를 비교하였다.

Table 2 Cutting conditions for experiments

Drill diameter	100 (μm)
Spindle speed	20000 ~ 50000 (rpm)
Feed rate	0.1 ~ 2.0 ($\mu\text{m}/\text{rev}$)
Cutting fluid	no

그리고 반복 실험으로 오차의 영향을 줄이고, 드릴이 최대 수명을 가지는 절삭 조건을 찾아내었다. 실험에 사용된 시편은 소다석회유리이며 그 기계적 특성은 Table 3 과 같다.

Table 3 Mechanical properties of workpiece

Material	Soda-lime glass
Size	20×20×0.13 (mm)
Density	2490 (kg/m^3)
Young's modulus	69 (GPa)
Poisson's ratio	0.22

4. 실험 결과

4.1 드릴 추력과 크랙 크기와의 관계

크랙은 가공시 드릴 추력에 의해 재료가 인장을

받아서 발생되므로 드릴 추력이 커지면 크랙의 크기도 증가한다. 드릴 가공시 절삭 조건에 따라 추력이 다르게 나타나므로 다양한 절삭 조건에서 드릴 추력과 크랙의 크기를 비교하였다. Fig 4 는 주축 회전수와 이송량을 변화시켜 실험한 후, 발생한 콘크랙의 구멍 중심에서부터의 평균 반지름을 나타낸 것이다. 드릴 반경이 50 μm 이므로 발생한 콘크랙의 크기는 보통 드릴 반경의 30% 이상에서 600% 이하이다. 전체적인 경향을 보면 드릴 추력이 작을수록 크랙의 크기는 감소함을 확인할 수 있다. Fig 5 은 회전수 30000 rpm 에 대해 이송량이 각각 0.1 mm/rev , 1.0 mm/rev 의 절삭 조건에서 나타난 드릴 추력과 출구 구멍 형상이다. 드릴 추력이 작을 때 크랙의 크기도 작아짐을 알 수 있다.

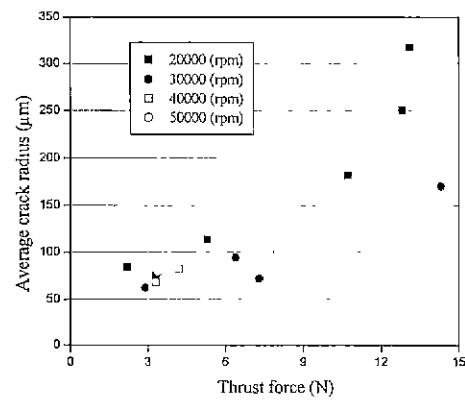
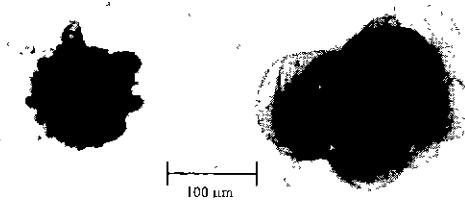


Fig. 4 Relation between thrust force and crack size



(a) Thrust force = 2.8 N (b) Thrust force = 11.5 N

Fig. 5 Shape of exit surface at different thrust force

Figure 5(a)에서 가공된 구멍의 가장자리 부분에 칩평과 함께 비교적 작은 크기의 콘크랙이 발생함을 볼 수 있다. 절삭 조건을 변화시켜서 크랙의 크기를 일정 수준까지 감소시킬 수 있지만, 크랙의 생성을 완전히 방지할 수는 없다. 그리고 추력을 감소시키기 위해 이송량을 줄여야 하는데 이에 따라 가공 시간 증가에 따른 드릴 수명이 문제가 되므로 대량 가공 시에 적합하지 못하다.

따라서 추력에 의하여 나타나는 크랙의 발생을 절삭 조건의 변화만으로는 막을 수 없으므로, 크랙을 완전히 방지하기 위해서 다른 방법이 필요하다.

4.2 크랙 발생 방지

드릴이 재료를 관통하기 직전 구멍의 출구 부분에 나타나는 변형을 억제하기 위해 시험 유리판 아래에 다른 유리 백업(back-up) 재료를 사용하여 가공하였다 그러나 Fig. 6 과 같이 백업 재료를 사용하지 않은 것과 마찬가지로 큰 크랙이 크게 발생하였다 단순히 백업 재료를 아래에 두었을 때는 드릴이 관통하기 전에 구멍 주위에 있는 부분이 미소하게 들어 올려지는 것을 볼 수 있다 이 때 아래판이 지지 역할을 하지 못하고 재료에 크랙이 나타난다 그래서 두 유리판이 떨어지지 않게 하기 위하여 다음과 같은 방법을 이용하여 가공하였다.

먼저 두 유리판을 물로 접착하는 방법이다. 두 판을 접착하는 방법은 여러 가지가 있으나 두 판을 다시 떼어야 하고, 접착물질이 가공에 영향이 주지 않아야 한다 이런 관점에서 물을 사용하여 접착하는 것이 매우 유용한 방법이다. 두 판에 물을 묻히고 압력을 주면 물이 매우 얇게 퍼지면서 두 판이 강하게 접착되어 판을 잡아주는 역할을 한다 또 다른 방법은 고정부에서 두 유리판을 압박하는 방법이다 유리판 두 장을 겹쳐서 고정 부위를 압박하게 되면 재료의 굽힘(bending)에 의한 빈틈과 인장 응력을 막을 수 있기 때문이다. 유리판을 물로 접착시키는 방법과 마찬가지로 깨끗한 면을 나타낸다 두 유리판을 물로 접착하거나 압박을 주어 가공한 결과는 Fig. 7 과 같다. 크랙이 발생하지 않고 침평도 거의 나타나지 않아서 깨끗한 가공면을 얻을 수 있다

5. 결론

본 연구에서는 유리의 미세구멍 가공시 나타나는 크랙의 발생 경향과 크랙의 방지 방법을 실험을 통해 알아보고 크랙이 없는 구멍 형상을 얻을 수 있었다 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다

- (1) 유리의 미세구멍 가공 시에는 드릴 추력에 의하여 큰 크랙이 발생한다.
- (2) 크랙의 크기는 드릴 추력에 비례하는데 절삭 조건의 변화만으로는 크랙을 방지할 수 없다
- (3) 두 유리판을 접착 시키거나 압박 시킴으로써 크랙의 발생을 방지할 수 있다.
- (4) 위와 같이 제안된 방법을 이용하여 유리와 같은 취성 재료의 완벽한 구멍 형상을 얻는 것이 가능하다.



Fig. 6 Shape of exit surface: no backup or simple backup

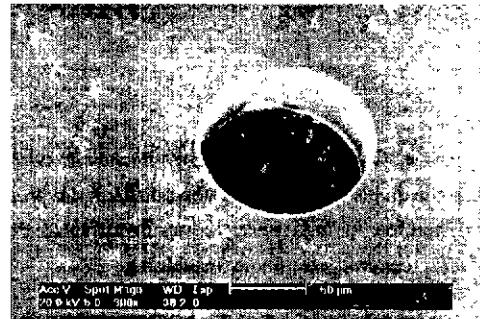


Fig. 7 Shape of exit surface: backup + water adhesion or backup + constraint

참고문헌

1. D.A. Gorham and A.D. Salman, "Indentation Fracture of Glass and Mechanisms of Material Removal," Wear 233-235, pp. 151-156, 1999.
2. K. Kornvopoulos, "Subsurface Crack Mechanism under Indentation Loading," Wear 199, pp 9-23, 1996
3. Vincenzo M. Sglavo and David J. Green, "The Subcritical Indentation Fracture Process in Soda-lime-silica Glass," Engineering Fracture Mechanics, Vol 55, No.1, pp 35-46, 1996
4. 양인영, 김택현, 정낙규 등, "脆性材料의 衝擊破壊에 관한 研究(II)," 대한기계학회논문집, 제 14 권, 제 6 호, pp 1417-1425, 1990.
5. W. Smetana and R. Reicher, "Preventing Failure of Soda Lime Cover Glass by Design Optimization," Engineering Failure Analysis 7, pp 87-99, 2000.
6. M M Chaudhri, C. R. Kurkjian, "Impact of Small Steel Spheres on the Surfaces of Normal and Anomalous Glasses," Journal of the American Ceramic Society, Vol. 69, No. 5, pp. 404-410, 1986
7. K. Ogawa et al., "Investigation on Cutting Mechanism in Small Diameter Drilling for GFRP," Composite Structures, Vol 38, No. 1-4, pp. 343-350, 1997