

단결정 다이아몬드의 연마특성(1)

— 각 결정면의 연마 이방성 —

장 광 균\*, 上神謙次郎\*\*, 玉村謙太郎\*\*

The lapping characteristics of single crystal diamond(1st Report)

— lapping anisotropy of the crystal planes —

Kwang-Kyun Jang\*, Kenjiro Uegami\*\*, Kentaro Tamamura\*\*

ABSTRACT

The lapping characteristics of single crystal diamond are studied by considering the crystallographic anisotropy. It is introduced for lapping method to identify crystallographic orientation by the X-ray diffraction and to measure lapping force ratio, lapping temperature and lapping wear. Diamond bonded wheels are used for lapping under dry condition. On the lapping {110} and {100} planes, it shows remarkable crystallographic anisotropy. The lapping force ratio, temperature and wear become greater with sliding direction along the <100> than along <110>. The results also show that the wear of diamond is influenced by mechanical work(tangential lapping force × lapping distance) as well by lapping speed.

**Key Words** : Single Crystal Diamond (단결정 다이아몬드), Crystal Planes (결정면), Crystallographic anisotropy (결정이방성), X ray diffraction (X레이 회절), Lapping force ratio (연마력비), Lapping Temperature (연마온도), Lapping wear (연마량), Mechanical Work (마찰일량), Lapping Speed (연마속도).

1. 서 론

단결정 다이아몬드(이하, 다이아몬드)는 탄소원자로 구성된 전형적인 공유결합 결정으로 탁월한 성질을 갖고 있다. 다이아몬드는 모든 물질 중에서 최고의 경도를 갖고 있음은 물론 화학적 안정성과 내마모성이 크고, 열전도율이 높으며 전기적 절연 물질이라는 점 등 공업적으로도 극히 우수한 성질을 겸비하고 있다.

다이아몬드를 공구로 사용할 경우에는 이와 같은 탁월한 특성으로 인하여 다른 공구재에 비하여 형상의 변화가 매우 적고 가공 정도(精度)가 장시간 유지되는 장점이 있다. 특히 생산능률이 높고 고정도의 가공면을 얻을 수 있는 초정밀 절삭가공에서는 형상정도가 높고 안정된 절삭 성능을 유지할 수 있는 다이아몬드 절삭공구가 필수불가결하다<sup>1-3)</sup>.

다이아몬드 공구는 경면 절삭을 실현할 수 있는 유일

\* 三星電機(株) 종합연구소 4연구실 (정희원)

\*\* 大阪市立大學 工學部

한 실용적인 공구나 공구의 제작, 사용에 관해선 아직 많은 문제점을 남겨놓고 있다. 즉 다이아몬드 공구에는 공구마모나 절삭성능에 불안정성이 남아있는 상태이며 이 때문에 생산성이 저하되고 공구의 계획적인 관리에도 지장을 초래하고 있어 신뢰성이 높은 다이아몬드 공구가 절실하게 요구되고 있다<sup>4)5)</sup>.

이와같이 다이아몬드 공구의 성능에 불안정성이 나타나는 원인은 여러가지가 있겠으나<sup>6)</sup> 다이아몬드 결정의 결정방위의 영향 또한 클 것으로 예상된다.

다이아몬드는 각 결정면에 따라 또는 같은 결정면이라 할지라도 연마, 마찰방향에 따라 그 특성이 현저하게 달라진다. 따라서 다이아몬드 공구를 연마 제작할 때 결정방향을 어떻게 선정하느냐에 따라 공구의 가공정도(精度)가 다르고 이에 따라 공구 성능도 영향을 받게 될 것이며 또한 공구의 마모도 결정방향에 따라 현저하게 달라질 것으로 예상된다.

다이아몬드의 내마모성에 현저한 이방성이 있다는 것은 오래 전부터 알려져 왔으며 정량적인 측정을 시도한 것은 1920년 Tolkowsky가 처음이다<sup>7)</sup>. 그 후 많은 연구 보고<sup>7-12)</sup>가 이루어졌으며 다이아몬드 필이나 각종 금속에 대한 내마모성의 이방성은 상당히 밝혀졌다고 할 수 있다. 특히 Wilks 등에 의한 다방면에 걸친 연구는 이 부분에 많은 기여를 했다고 할 수 있다. 그러나 이들 연구는 주로 마모량만을 대상으로 하고 있으며 마모에 이르는 도중의 마찰경과의 영향에 관해서는 검토된 것이 없다. 따라서 다이아몬드의 연마기구에 대해서도 역학적 작용으로 발생하는 다이아몬드의 벽개에 의한 기계적 미소 취성파괴기구<sup>8)11)</sup> 또는 연마시 마찰 접촉점에서 발생하는 고온으로 인한 다이아몬드의 산화나 흑연화 등에 의한 열화학적 마모기구<sup>9)</sup> 등에 관한 정성적인 해석이 보고되어 있으나 이와 같은 연마기구에 대한 정량적인 평가 등에 관해서는 아직 밝혀지지 않은 부분이 많다.

다이아몬드의 결정방위에 따른 연마특성을 계통성있게 정량적으로 밝힐 수 있다면 합리적인 연마법을 확립할 수 있으며 다이아몬드 연마기구의 본질을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 나아가서 다이아몬드 공구의 제작에 관한 지침을 얻을 수 있으리라고 본다.

本報에서는 먼저 다이아몬드를 연마할 때의 연마력(수직력, 접선력), 연마온도 및 연마량을 함께 측정할 수 있는 실험방법을 이용하여 다이아몬드의 대표적인 결정면인 {100} 면과 {110} 면의 연마특성에 관하여 논한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

다이아몬드의 연마해야 할 결정방위를 정확하게 설정한 상태에서 연마원판에의 연마수직력을 조절할 수 있고 연마접선력, 연마온도, 연마량을 함께 측정할 수 있는 실험 방법을 고안하였다.

Fig. 1에 실험 장치의 외관을 나타내었다. 연마원판의 회전 베어링은 조정밀 원통형 공기정압 베어링을 채용하였으며 연마장치는 슬라이드 테이블 위에 수직으로 설치하였다.

연마장치에는 연마력을 측정하기 위해 스트레인 게이지를 이용한 동력계와 동(動) 특성을 조사하기 위한 가속도 변환기 및 다이아몬드 고정용 고니오메타(Goniometer)가 장착되어 있다.

동력계의 고유 진동수는 3000Hz이고 본 실험의 연마 조건 범위내에서 연마장치의 진동수는 120~300Hz이었으므로 공진 등에 의한 실험 정도에의 영향은 거의 없는 것으로 생각된다.

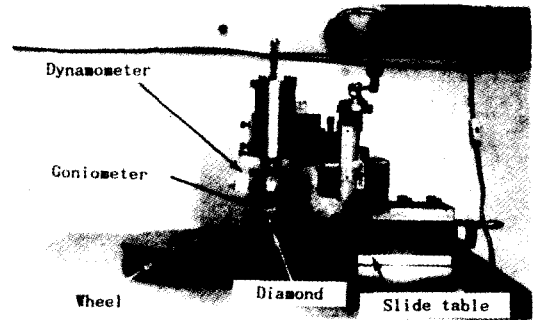


Fig. 1 A photograph showing overall set up for lapping experiment

다이아몬드 고정용 고니오메타를 Fig. 2에 나타내었다. 고니오메타의 본래 기능은 결정방위를 X선 회절법 등으로 구할 때 쓰이는 것이다. 본 실험에서는 다이아몬드를 고정하여 연마해야 할 결정면과 연마방향을 설정하고 다이아몬드를 고니오메타에 고정시킨채로 연마실험을 할 수 있도록 Fig. 2와 같이 개조하였다.

다이아몬드에는 연마온도를 측정하기 위해 지그를 사용하여 열전대(線徑, 0.1mm)를 접촉시켰으며 이 전체를 내열접착제(주성분,  $Al_2O_3$ )로 일체화하여 고니오메타에 고정시켰다. 연마해야 할 결정방위의 설정에는 X선 회절법(Laue의 배면 반사법)<sup>17)</sup>을 이용하였다.

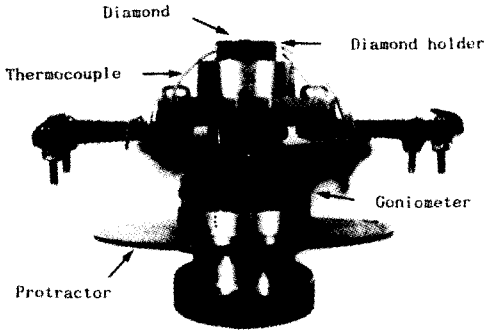


Fig.2 Reconstructed goniometer for lapping experiment

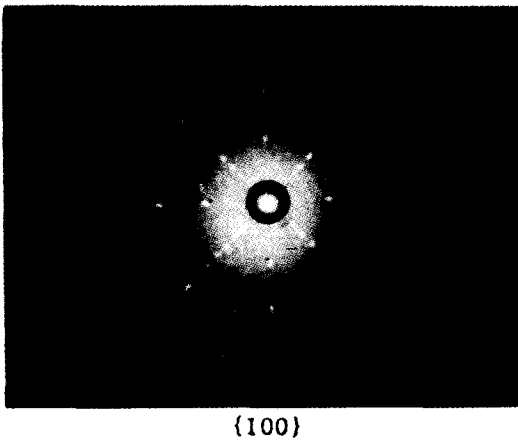


Fig.3 Back-reflection Laue pattern of single crystal diamond

Fig. 3은 다이아몬드의 라우에(Laue) 사진의 예로서 {100} 면을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 라우에반점은 90°를 주기로 나타나는 대칭성을 보이고 있으며 이것은 다이아몬드 결정구조에서의 원자 배열의 대칭성과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 방법에 의한 결정면의 설정 정도는 0.2° 이내이며 연마방향의 설정 정도는 ±1°이다.

다이아몬드 연마량의 측정은 최소눈금이 0.1μm인 전기 마이크로메타를 이용하였다. 다이아몬드를 고티오메타에 고정시킨채로 고티오메타를 포함한 전체 높이를 연마전후에 측정하여 그 차이를 연마량으로 하였다.

일반적으로 다이아몬드의 연마법에는 다이아몬드 분말을 금속으로 소결한 다이아몬드 휠을 이용한 건식 연마법이나 주철원판에 오리브유 등의 식물유로 갠 다이아몬드 분말을 칠한 상태에서의 연마법 등이 이용되고 있다.

그러나 주철 원판을 사용할 경우에는 다이아몬드 분말의 정량 제어가 곤란하며 또한 연마조건에 따라 연마트랙에서의 다이아몬드 분말의 기능 등이 달라질 것이 예상되므로 다이아몬드의 연마특성을 밝히기에 어려움이 있다. 따라서 본 실험에서는 주로 다이아몬드 분말 입자를 메탈로 본딩한 다이아몬드 휠(SD800P125M1.5 및 SD2000P125M1.5)를 사용하였다.

연마용 試料다이아몬드는 모두 Ia형 천연 다이아몬드로 12면체(ND)와 8면체(NO) 결정형인 것을 사용하였다. 다이아몬드는 정방형의 각주(角柱)로 성형(1.35×1.35×3.5, mm)하여 실험대상의 결정면이 실험중 항상 일정한 연마면적을 갖도록 하였다.

### 3. 실험 결과

Fig. 4는 다이아몬드의 {110} 면과 {100} 면의 각각에 관하여 연마방향을 변화시켜 조사한 연마특성을 나타낸 것이다. 다이아몬드의 {110} 면과 {100} 면에는 결정방향에 주기성이 있다. 즉 {110} 면에서는 90° 간격으로, 또한 {100} 면에서는 45° 간격으로 <100>방향과 <110>방향 존재한다. 따라서 Fig. 4에서는 이와같은 결정의 대칭성을 고려하여 각 결정면의 <100>방향에서 <110>방향 사이의 한구간에 관해서만 연마특성을 조사하였다.

연마조건은 연마수직압력 P=5MPa, 연마속도 S=20m/s, 연마거리 D=5km이다. Fig. 4에서와 같이 {110} 면과 {100} 면의 각 결정면에서 연마력비(접선력/수직력), 연마온도 및 연마량의 최대치는 <100>방향에, 이들의 최소치는 <110>방향에서 나타나는 현저한 이방성을 보이고 있다. 즉 연마력비의 高低방향과 연마온도의 高低방향이 좋은 대응을 보이고 있으며, 연마력비가 높고 연마온도가 높은 결정방향에서 연마량이 많다. 또한 이 두 결정면 중에서 {110} 면의 <100>방향에서 연마량이 가장 많으며, 이 결정방향이 가장 연마하기가 쉬움을 알 수 있다.

이와같은 연마량의 이방성은 종래의 연구보고<sup>11)</sup>와 일치하고 있으나 본 실험에서 측정된 연마력비 및 연마온도에 관한 연구보고는 없으며 따라서 연마력비 및 연마온도를 연마량과 대응시켜 다이아몬드의 연마특성을 논한 연구는 없다. 여기서 다이아몬드의 연마특성을 마찰특성과 비교하기 위해 연마력비를 일종의 마찰계수로 생각하고 Pin-disk법으로 다이아몬드 슬라이더로 측정된 다이아몬드 연마면의 마찰 이방성<sup>13-15)</sup>과 비교하여 보

면, {100}면에서 이들의 값은 <100>방향에서 높고 <110>방향에서 낮게 나타나는 이방성이 같음을 알 수 있다. 이러한 현상으로부터 다이아몬드 휠에 의한 연마와 Pin-disk법에 의한 마찰에서의 마찰기구<sup>13)</sup>는 본질적으로 유사함을 알 수 있다.

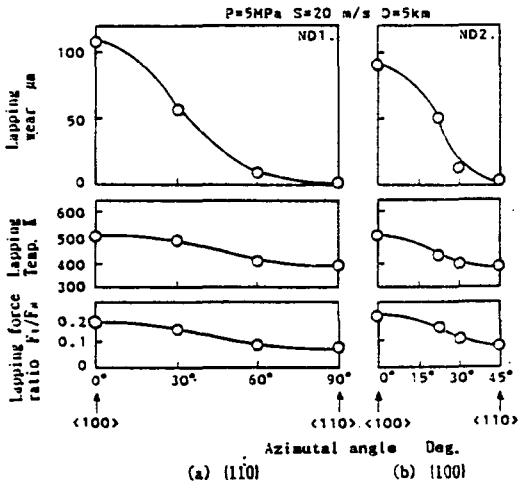


Fig. 4 Lapping characteristics of crystal planes as a function of crystallographic orientation in lapping diamond with diamond bonded wheel(#800)

Fig. 5는 {110}면에 관해서 연마량의 최대, 최소치를 나타내는 <100>방향과 <110>방향에 대하여 좀더 상세하게 연마특성을 조사한 것이다. 연마조건은 연마수직압력  $P=5\sim 7.5\text{MPa}$ , 연마속도  $S=20\sim 30\text{m/s}$ 이다. 어떠한 연마조건에 있어서도 <110>방향보다 <100>방향에서의 연마력비 및 연마온도가 높으며 연마량이 많다. 특히 연마량의 이방성은 매우 현저하여 연마거리 5km까지의 두 연마방향에서의 연마량의 비(比)는 {110}면에서 약 72 : 1, 그리고 {100}면에서 약 75 : 1을 보이고 있다.

<100>방향의 연마에서는 연마력비가 높으므로 마찰일량(연마접선력×연마거리) 및 연마발열량이 많고 따라서 역학적 작용에 의한 기계적 미소파괴 및 열의 작용에 의한 마모가 진행할 수 있으나 <110>방향의 연마에서는 마찰일량이 적으므로 역학적 작용에 의한 기계적 미소파괴도 진행하기 어렵고 또 연마발열량도 적어 열의 작용에 의한 마모도 거의 일어나지 않는 것으로 생각된다.

그러나 이와 같은 연마방향에 따른 연마량의 현저한 이방성이 다이아몬드가 갖고 있는 고유의 내마모 이방성이라고는 생각하기 어려우며, 이는 메탈본드 다이아몬드

휠을 사용한 연마에서 나타나는 현상일 것으로 생각된다. 즉 다이아몬드의 연마방향에 따라서 다이아몬드 휠의 눈무덤(Glazing)의 진행 상태가 다르기 때문에 연마량의 이방성이 더욱 크게 나타난다는 점이다. 試料다이아몬드의 {110}면에서 <100>방향은 내마모성이 적으므로 연마시에 휠의 눈무덤이 천천히 진행되어 휠의 연마능력이 지속됨으로써 계속적으로 연마가 진행되나, <110>방향은 내마모성이 크므로 연마시에 마찰 접촉점에서 다이아몬드와 충돌한 휠의 다이아몬드 입자날이 연마 초기에 거의 파괴되어 눈무덤이 빠르게 진행됨으로써 휠의 연마능력이 급격하게 떨어지고 따라서 연마가 진행되지 못하여 결과적으로 試料다이아몬드의 연마량의 이방성은 다이아몬드 고유의 내마모 이방성보다도 크게 나타나는 것으로 생각된다.

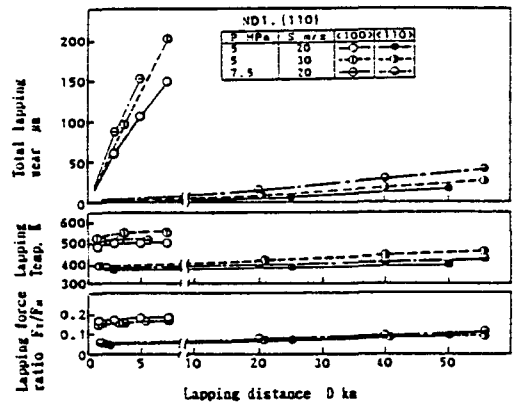


Fig. 5 Lapping characteristics of a {110} plane as a function of lapping distance in lapping diamond with diamond bonded wheel(#800)

Fig. 6은 다이아몬드 휠의 입도차(粒度差)에 의한 다이아몬드의 연마특성을 비교한 것이다. 다이아몬드 휠의 다른 구성요소는 같고 입도만이 다른 두 종류의 휠(#800, #2000)을 사용하여 같은 연마조건으로 실험한 결과이다.

<100>방향의 연마에서는 입도번호가 작은 휠(#800)의 경우보다 입도번호가 큰 휠(#2000)에서의 연마력비가 높고, 연마량도 많다.

두 휠의 집중도가 같으므로 입도번호가 큰 휠에서 평균 입자간 간격이 작다. 따라서 입도번호가 클수록 연마면과 접촉하는 다이아몬드 입자의 수, 즉 연마작용에 기여하는 입자의 수가 많아 試料다이아몬드의

미소 취성파괴를 일으키기에 보다 유효하게 작용하는 것으로 생각된다. 즉 입도번호가 큰 휠일수록 단위 시간당 다이아몬드 연마에 작용하는 입자가 많으므로 試料다이아몬드에 크랙결함을 보다 많이 발생시키고 이에 따라 연마가 촉진되는 것으로 생각된다.

한편 내마모성이 큰 <110>방향의 연마에서는 입도번호가 큰 휠의 연마력비가 크나 연마량은 작게 나타나고 있다. 이것은 입도번호가 클 휠일수록 연마에 작용하는 입자의 수는 많으나 상대적으로 입자의 돌출량이 적고 또한 試料다이아몬드의 <110>방향의 내마모성이 커서 휠의 눈무덤이 빠르게 진행되므로 결국 다이아몬드 연마면은 선단이 둔화된 휠의 입자 및 결합체와 마찰하는 현상이 일어나 마찰저항은 증가하고 연마는 진행되지 않는 것으로 생각된다.

연마면의 거칠기는 입도번호가 큰 휠에서 양호하였다. 이것은 상술(上述)하였듯이 입도번호가 큰 휠일수록 연마작용에 기여하는 입자의 수가 많고 평균 입자간 간격이 작기 때문에 연마되는 마모분(摩耗粉)의 크기가 작아져 연마면의 표면 거칠기가 양호하게 되는 것으로 이것은 일반 연삭가공에서도 같은 원리가 적용된다.

이상에서 논한 바와 같이 다이아몬드 휠을 이용하여 다이아몬드가 <110>면과 <100>면의 연마특성을 검토한 결과 내마모성이 큰 <110>방향으로의 연마는 실용적이지 못하고, 연마능률을 높이기 위하여는 <100>방향으로 연마해야 함을 알 수 있다.

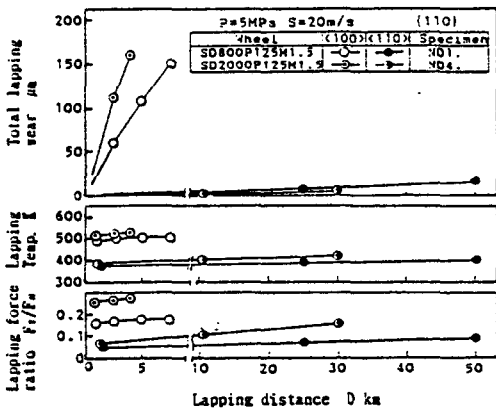


Fig.6 Effect of grain size(#2000, #800) of diamond bonded wheel on the lapping characteristics

Fig.7은 <110>면의 <100>방향에 대하여 연마거리를 1.5km로 일정하게 하고 연마수직압력을 1.5~9MPa, 연마속도를 6~36m/s의 범위내에서 연마조건을 변화시켰을 때의 연마접선력과 연마속도에 대응하는 연마온도와 연마량을 나타낸 것이다. 여기서 연마거리를 1.5km로 짧게 한 것은 연마거리의 증가에 따른 다이아몬드 휠의 눈무덤에 의한 영향을 가능한 작게 하기 위한 것이다.

Fig.7에서 알 수 있듯이 연마량은 연마접선력이 증가할수록 커지고 또한 연마접선력이 일정하더라도 연마속도가 빠를수록 연마량을 증가하고 있다. 즉 연마량은 마찰일량뿐만 아니라 연마속도에도 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 또한 연마조건에 따른 연마온도의 변화와 연마량의 변화를 대조하여 보면 연마온도가 높은 조건에서 연마량이 많음을 알 수 있다.

이와 같이 다이아몬드의 연마량이 연마속도에 의존하는 점과 연마온도가 높은 연마조건에서 연마량도 커지는 현상은 연마에 의한 발열이 다이아몬드의 연마에 기여하고 있음을 시사한다고 볼 수 있는데 이에 관해서는 좀 더 많은 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

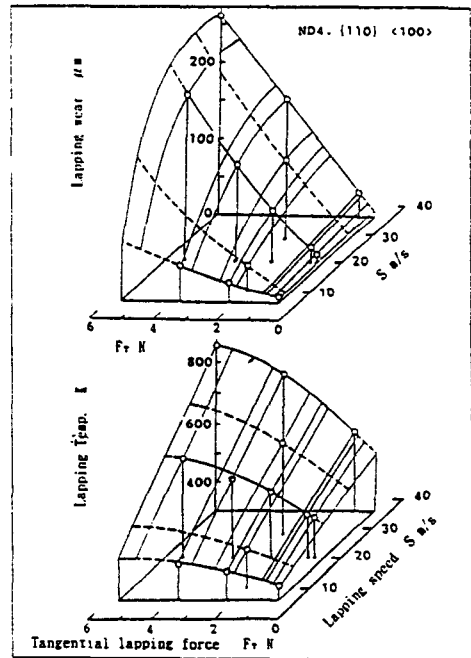


Fig.7 Lapping wear and lapping temperature for various lapping conditions in lapping diamond with diamond bonded wheel(#2000); lapping distance is constant(1.5km).

## 4. 결 론

단결정 다이아몬드의 연마해야 할 결정방위를 X선 회절법으로 정확하게 설정한 상태에서 연마력비, 연마온도, 연마량을 함께 측정할 수 있는 실험 방법을 고안하여, 연마용 공구로서 다이아몬드 휠을 이용하여 다이아몬드의 연마특성을 검토한 결과 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

- 1) {110} 면과 {100} 면에서는 각 결정방위에서의 연마력비의 高低방향과 연마온도의 高低방향 및 연마량의 多少방향은 각각 대응하고 있다. 각 결정면에서 <100>방향의 연마력비와 연마온도가 <110>방향에서의 값보다 높으며 또한 연마량도 <100>방향에서 크다.
- 2) {110} 면의 <100>방향의 연마에서 입도번호가 작은 휠보다 입도번호가 큰 휠이 試料다이아몬드의 미소 취성파괴를 일으키기에 보다 유효하게 작용하며 또한 연마면의 거칠기는 입도번호가 큰 휠에서 양호하다.
- 3) {110} 면의 <100>방향의 연마에서, 연마량은 마찰일량뿐만 아니라 연마속도에도 크게 의존한다.

## 참고문헌

1. 吉田, 菅野, 竹内: 超精密金屬鏡の加工技術の研究, 機械學會論文集, C, 51, 471, pp. 3121~3124, (1985).
2. 岩田, 奥田: 다이아몬드 도구による超精密切削加工, New Diamond, 3, 3, pp. 20~25, (1987).
3. N. Ikawa and S. Shimada: Cutting Tool for Ultraprecision Machining, Proc. 3rd International Conference on Production Engineering, Kyoto, pp. 357~364, (1977).
4. 井川, 島田: 다이아몬드切削とその問題點, 機械學會誌, 87, 791, pp. 1124~1130, (1984).
5. 浜田: 超精密加工のための다이아몬드二具, 機

械と工具, 12, pp. 54~62, (1987).

6. J. Wilks: Performance of Diamonds as Cutting Tools for Precisions Machining, Precision Engineering, 2, pp. 57~71, (1980).
7. E. M. Wilks: An Interferometric Investigation of the Abrasion Hardness Properties of Diamond, Phil. Mag., 43, pp. 1140~1145, (1952).
8. R. H. Wentorf: Note on the Scratching of Diamond, J. Appl. Phys., 30, 11, pp. 1765~1768, (1959).
9. M. Seal: The Abrasion of Diamond, Proc. R. Soc., London, Ser A, 248, pp. 379~393, (1958).
10. E. M. Wilks: The Relative Hardness of the Hard Directions in Diamond, Phil. Mag., 61, pp. 701~705, (1961).
11. E. M. Wilks and J. Wilks: The Resistance of Diamond to Abrasion, J. Phys., Ser D: Appl. Phys., 5, pp. 1902~1919, (1972).
12. D. Crompton, W. Hirst and M. G. W. Howse: The Wear of Diamond, Proc. R. Soc., London, Ser A, 333, pp. 435~454, (1973).
13. J. E. Field ed.: The Properties of Diamond, Academic Press, London, pp. 324~350, (1979).
14. Y. Enomoto and D. Tabor: The Frictional Anisotropy of Diamond, Proc. R. Soc., London, Ser A, 373, pp. 405~417, (1981).
15. M. Seal: The Friction of Diamond, Phil. Mag., 43, pp. 587~594, (1981).
16. 田中, 井川: 軟鋼の研削における다이아몬드砥粒損耗の熱的考察, 精密機械, 39, 6, pp. 608~612, (1973).
17. B. D. Cullity: Elements of X-Ray Diffraction, 2nd ed., Addison-Wesley, U. S. A., pp. 149~160, (1978).