

다이아몬드용 자동연마기의 성능평가

오재국*, 김우순+, 김동현**

Performance Evaluation of Automatic Polishing Machine for Diamond

Jae-Guk Oh*, Woo-Soon Kim⁺, Dong-Hyun Kim⁺⁺

Abstract

The present study deals design and manufacture of automatic polishing machine that can cut diamond to have 58 facets in a brilliant cutting which has been hardly achieved by a conventional manually operating polishing machine. Upon the 3-dimensional Sarin M/C test and analysis on the diamond processed by the automatic polishing machine developed in this study its proportion and finishing turned out to be better than the diamond processed by the conventional method, by being rated as "very good".

Key Words : diamond(다이아몬드), sarin M/C(사린 머신), proportion(비율), facet(면), brilliant cut(브릴리언트 컷)

1. 서론

보석관련 산업은 원자재를 고도의 가공기술과 디자인을 이용하여 부가가치를 창출하는 21세기 탈 에너지 및 무공해 산업으로서, 연간 교역량이 1천 억 달러로 추정될 만큼 방대한 시장 규모를 갖고 있다. 보석 가공 산업은 도시형 산업이며 노동집약적 산업으로서 중국 및 인도와 같은 노동력이 풍부한 나라에서 경쟁력을 키워나가고 있으며, 세계 다이아몬드의 약60% 이상을 공급하고 있는 드비어스사가⁽¹⁾ 시장 개방과 더불어 다이아몬드 마케팅에 적극적인 상황이다. 우리나라의 경우에는 높은 임금 수준과 3D 업종 기피현상으로 경쟁력 있는 보석 가공 산업을 유지 하기 힘든 상황에 처해 있으므로 수공업 위주의 생산 시스템에서의 탈피가 절대적으로 필요하다.

또한, 낙후된 보석 가공 산업은 선진화하지 못하고 거의 모든 가공 공정이 수작업 형태여서 정량화된 데이터와 표준화된 제품 가공은 이루어지지 못하는 실정이다. 그러므로 수작업 산업의 형태로는 경쟁력 약화는 물론 보석 산업의 위축을 초래할 수 밖에 없는 상황에서 자동화 가공시스템으로의 전환은 필수불가결하다. 따라서 자동화 기계를 이용한 대량 생산기술 과 관련시스템을 개발하고 보석가공 기술을 개발하며 고품질의 제품을 생산하여 경쟁력을 확보하여야 한다.

다이아몬드는 보석 중에서 가장 단단하지만 그 성분은 극히 단순한 탄소 결정체이다. 이는 수 백만년전 킴벌라이트 파이프라 불리는 기동모양의 화성암체를 만드는 마그마가 상승하는 과정에서 섞여 나와, 침식 과정과 풍화작용을 거치며 서서히

* 오재국, 원광대학교 기계자동차공학과 (knamba@wonkwang.ac.kr)

주소: 570-749 익산시 신용동344-2

+ 원광대 기계자동차공학부

++ 원광대 기계자동차공학부

노출되어 둥근 형태나 내포물(內包物)을 함유한 상태로 발견되었다.⁽¹⁾

이러한 원석을 표준화하여 균일한 형태로 가공하기란 매우 어려운 공정이지만, 최근에는 가공 형태에서 가장 많이 채택하고 있는 다각원형절단인 경우 조건에 맞는 형태로 가공하려는 기술이 많이 발전되었다. 원석을 가공할 경우 주로 연마작업을 하게 되는데 판매 가능한 나석으로 가공하기까지는 많은 손실이 발생하므로 손실을 최소화하면서 컷이 우수한 나석을 얻는 것이 필요하다.

W·R·Eulitz는 다이아몬드 절단(Sowing), 벽개(cleaving), 원형화(bruting), 광택(polishing)등 관련된 기술과 이상적인 연마에⁽²⁾ 관한 연구에서 연마 가공석의 물리적인 원리를 이용하여 광학적으로 접근하고자 하였다. 실제로 이스라엘 벨기에와 같은 몇몇 보석 선진국의 경우에는 원석의 외형에 따른 가공 방법에 관한 연구를 통하여 손실을 최소화하고 있으며, 광학적 원리를 적용하여 우수한 컷을 하고 있다.

천연의 다이아몬드 원석을 균일한 규격 유지와 경제적 가치가 우수한 나석으로 가공하기 위해서는 다이아몬드 원석의 외형에 따른 가공방법을 분석하고 그 가공방법을 수행할 수 있는 보석가공기계의 개발 및 가공기술 개발이 중요하다.

본 연구에서는 보석용 다이아몬드로 가장 많이 산출되는 팔면체 형태의 원석을 이용하여 형태에 따른 최소 손실량을 산출하고 이상적인 가공방법과 가공 공정을 분석하였다. 다이아몬드 연마시 실제로 필요한 기능을 수행할 수 있도록 기계요소를 설계하였고 설계된 부품을 가공조립하여 자동보석가공기계(Automatic Polishing machine)를 제작하였으며 이를 평가하였다.

2. 다이아몬드의 특성

2.1 다이아몬드에서의 전반사

다이아몬드에서 입계각 범위 안으로 나가는 빛은 밖으로 굴절해 나간다. 그러나 입계각 범위 밖으로 입사되는 광선은 밖으로 굴절하지 않고 내부로 전부 반사해 버린다. 이를 전반사라 하며 Fig. 2.1에 나타내었다.

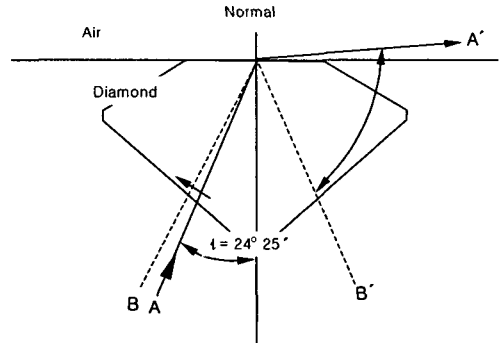


Fig. 2.1 Total reflection of the light in diamond

입계각 이상으로 나가는 빛은 전반사하기 때문에 우리 눈에는 처음 들어오는 빛과 같은 밝기의 빛이 반사되어 되돌아온다. 전반사는 굴절률이 클수록 입계각이 작아지고 전반영역이 확대되어 광채가 아름답게 보이는 원리를 이용 보석을 연마할 때 휘광을 높여 보석의 아름다움을 높이는 데 사용된다.

다이아몬드의 표면에 빛이 닿으면 반사와 굴절이 되는데 입사각이 작으면 작을수록 반사되는 광선의 비율은 적어지고 내부로 굴절되어 입사하는 빛의 비율은 커진다. 한편, 입사각이 크면 클수록 반사되는 광선의 비율은 높아지고 굴절되어 내부로 입사되는 빛의 비율은 적어지며 아울러 굴절각은 커지게 된다. 다이아몬드 내부에서의 빛의 활동은 빛이 밖으로 새어나가지 않고 다시 되돌아서 나올 때에 다이아몬드의 아름다운 요인들인 휘광과 분산이 최대로 얻어진다.

Fig. 2.2는 이상적인 퍼빌리언 각도일 때의 반사 현상을 나타낸 것이다.

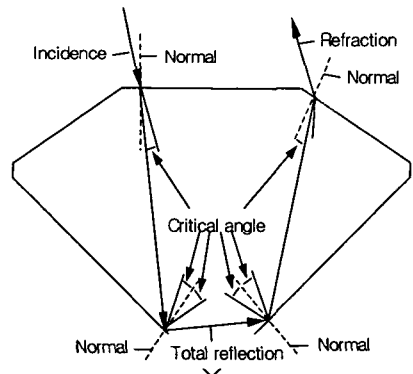


Fig. 2.2 Ideal light path in diamond

각도가 이상적인 비율에 비해 현저히 차이가 나면 빛이 우리 눈으로 되돌아오지 못하고 퍼빌리언 쪽으로 새어버린다. 퍼빌리언 각도가 작을 경우에 내부로 들어온 빛은 첫 번째 퍼빌리언 면에서 임계각 범위 안으로 들어가게 되므로 빛이 밖으로 새어나가 다이아몬드가 유리처럼 흐릿하게 보인다. 퍼빌리언 각도가 클 경우에도 매질로 들어온 빛은 비계획적인 유출로 인해서 다이아몬드 중앙부가 색이 들어 있는 것처럼 검게 보인다.

2.2 다이아몬드의 가공형태

다이아몬드에서 최대한 아름다움을 끌어내기 위하여 1919년 Marcel Tolksowsky에 의해 발명된 라운드 브릴리언트 컷은 최대의 휘광, 분산, 섬광을 얻을 수 있다.⁽³⁾

Fig. 2.3은 라운드 브릴리언트 형태와 각 부 명칭을 나타내고 있다. Fig. 2.3에서 Crown부 33면과 Pavilion부 25면으로 총 58면으로 구성되어진다.⁽⁴⁾

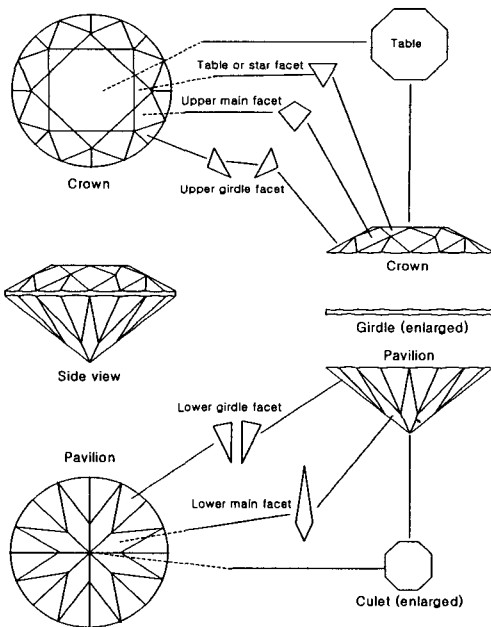


Fig. 2.3 Diagram of round brilliant cut

다이아몬드 광채를 아름답게 내기 위해서는 빛이 분산되지 않고 내부의 퍼빌리언 면에서 반사되어 다시 위쪽 크라운 면으로 분산화 되어야 하는데 컷

(cut)을 잘못하면 빛이 굴절되어 들어가 한곳으로 모여 다시 반사되지 않고 밖으로 빠져나가 버린다. 브릴리언트 컷에서 프로포션(Proportion)을 생각할 수 있는데 이것은 연마된 상태를 따지는 연마비율로서 이상적인 컷을 하였을 경우에는 휘광이 좋아져 다이아몬드 등급에 좋은 영향을 미친다.

미국 보석학회(G.I.A)에서는 중량과 색상 투명도가 동일한 경우 연마된 상태를 따지는 연마 비율(Proportion)을 테이블직경이 53-57.5%의 범위를 이상적인 연마가공으로 정의하고 있으며, 관부 각은 34-35% 관부 높이는 15-16.5% 거들 두께는 얇음-중간-약간 두꺼움 나타내고, 퍼빌리언 각은 41%로 43-43.5%의 깊이를 지닌다. 이상적인 연마가공에서의 Culet은 58.5-63%로 전체 깊이에서 아주 작다.

Fig. 2.4는 다이아몬드에서 최선의 아름다움을 도출해 내기 위한 라운드브릴리언트 컷의 이상적인 비율을 나타낸 것이다.

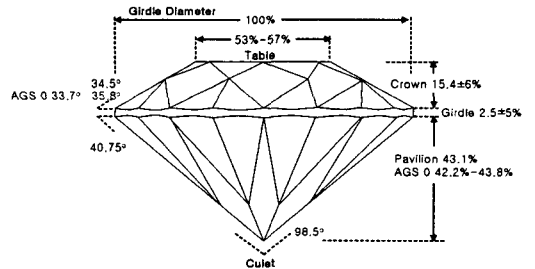


Fig. 2.4 Ideal cut of the brilliant facets

3. 다이아몬드의 가공 및 고찰

보석의 품질을 좌우하는 공정은 연마(Polishing) 공정이며 미치는 영향이 크기 때문에, 자동연마기를 개발하여 성능을 평가하고자 하였다.

Fig. 3.1은 다이아몬드 자동연마기의 헤드부분 3D 모델링 형상을 나타낸 것으로서 다이아몬드 자동연마기의 헤드부분은 1축(M1) Wave 교류전동기, 3축(M2, M3, M4) stepping Motor, 1축(M5) Disk rotating inverter motor, touch sensing & polishing degree를 측정할 수 있는 Probe, 그리고 Index tilting을 할 수 있는 Micro-meter로 구성되어 있다.

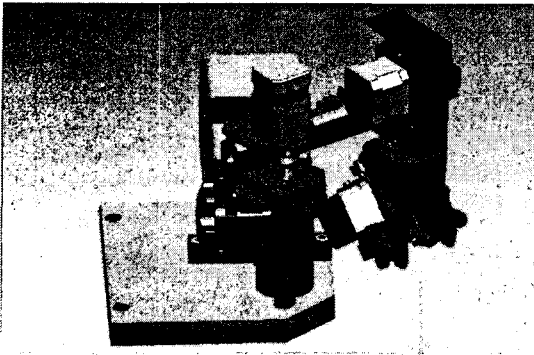


Fig. 3.1 Modeling of diamond polishing machine

Fig. 3.2는 보석 Polishing의 제어 Sequence block diagram을 나타낸다.

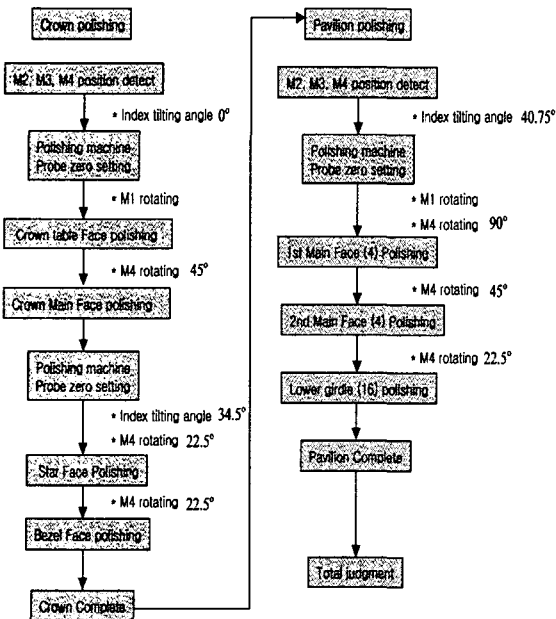


Fig. 3.2 Control sequence angle and motion of polishing

다이아몬드 원석을 라운드 브릴리언트 컷이라는 주어진 이상적인 컷트 비율로 맞추어 가공하기까지는 많은 손실이 따른다. 이에 천연의 다이아몬드 원석을 연구한 후, 경제적으로 원석의 외형이 그 자체로서 다듬어진 라운드 브릴리언트 컷보다 훨씬 더 많은 가치를 지닐 수 있다면 원석의 외형에 알맞은

형태로 연마가 이루어져야 한다. 따라서 본 자동화 장비로 가공하기 위해 원석분석부터 가공된 다이아몬드를 3차원 측정 감정 장비인 다이아몬드 샤린머신으로 분석을 하였다.

Fig. 3.3은 원석상태의 다이아몬드를 최적의 크기와 중량을 찾기 위해 미리 시뮬레이션한 것으로서 각각의 경우에 따른 형태를 보여준다. 다이아몬드 원석을 몇 개의 다이아몬드로 가공할 것인가와 최대 중량을 찾기 위한 방법을 고려하여 가공을 진행함으로써 작업자가 원하는 형상을 얻을 수 있다.

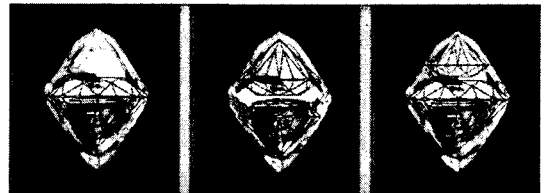


Fig. 3.3 Profiles on rough diamond by Sarin machine

대부분의 다이아몬드 원석의 형태는 균형 있는 것부터 불균형적인 형태까지 다양하고 결정을 살펴보면 그 형태가 불규칙하다.

기본 형태는 이론적인 형의 결정이며 실제로는 킴벌라이트 모암 중에서 결정이 성장하는 동안 여러 가지 요인 때문에 찌그러지거나 변형된다. 일반적으로 8면체의 외관을 갖지만 작은 보통 굽었거나 패여져 거칠다.

본 가공실험에 사용된 다이아몬드는 대체적으로 가격이 저가로 구입할 수 있는 코냐크 다이아의 원석으로 가공 실험을 하였으며, 원석분석 결과 약간의 크랙과 내포물이 들어있는 부분을 레이저로 커팅한 후 3차원Sarin M/C으로 최적의 중량을 예측할 수 있었으며, 연마가공 데이터로 참고 하였다.

Fig.3.4는 원석을 레이저 절단 후 분석한 결과 가공되지 않은 원석의 길이, 폭, 높이, 중량을 나타낸 것이다.

원석의 대한 가공전의 측정치는 길이(L)=5.66mm, 넓이(W)=5.46mm, 높이(H)=4.43mm를 나타내고 중량(W)=1.317 ct 나타내고 있으며, 연마 후 완성 다이아몬드의 중량은 0.612ct(46.5%) 이 나옴을 예측할 수 있고, 여기서 나석 소모율이 약53.5%의 나석 손실이 나오지만 샤린머신 데이터는 최대한 나석의

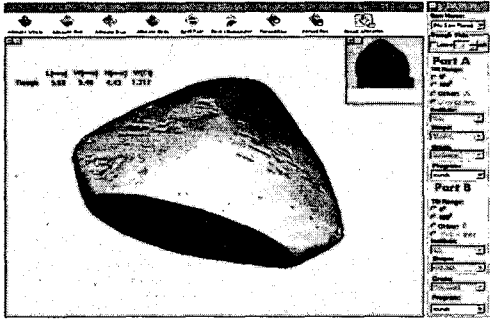


Fig. 3.4 Diamond brilliant cut analyze data by sarin machine

손실을 막을 수 있는 자투리 데이터까지(0.262 ct, 0.261 ct) 연마가공 할 수 있음을 보여주고 있다. 본 연구는 사린머신을 이용하여 다이아몬드의 외형에 따라 디자인을 구상하고 1개의 나석을 얻는 것을 기준으로 손실률과 프로포션(Proportion)을 평가하였다.

Fig.3.5과 Fig.3.6은 제작한 자동연마기로 다이아몬드를 가공한 후 사린머신으로 측정한 프로포션(Proportion)과 데이터를 나타낸 것이다.

다이아몬드 원석을 라운드 브릴리언트컷 형태로 가공하였을 경우를 미리 시뮬레이션한 결과 연마가공후의 중량은 0.612ct으로 예측되었다.

실제 연마 가공 후 중량 값은 0.610ct 으로 거의 비슷한 값을 보였으나, 중량 값이 약간 차이가 나는 것은 가공에 따른 오차 손실을 때문인 것으로 판단되었다. 다이아몬드는 중량에 의한 가격 결정이 중요하기 때문에 추후 본 장비의 성능 향상을 위한 문제점을 검토하여 중량 손실률을 줄일 수 있는 완벽한 장비 개발에 역점을 두고 연구개발을 진행할 것이다.

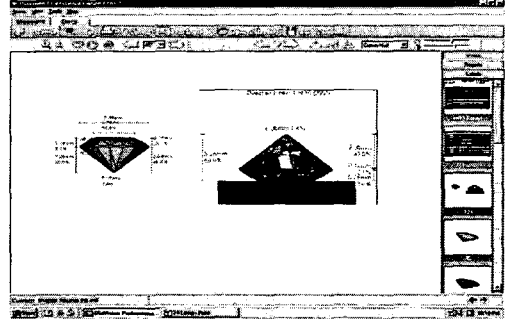


Fig. 3.5 Completion proportion by sarin machine

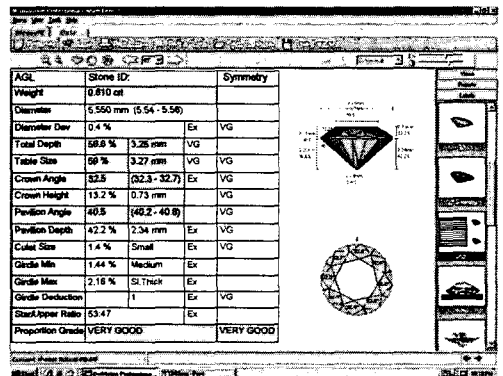


Fig. 3.6 Completion proportion data by sarin machine

다이아몬에서 가장 이상적인 커트(Cut)는 프로포션과 피니시가 완벽하게 가공 연마됨을 말한다. 이번 연구에서 설계 제작된 자동연마 장비로 가공하여 분석한 데이터는, 중량은 비슷하게 연마 되었으나 프로포션은 최상의 아름다움을 도출해 낼수 있는 프로포션과 약간의 차이가 남을 알 수 있는데 이것은 본 장비의 가공정밀도와 제어상의 문제로 앞으로 풀어야 할 과제이다. 추후로 제작되는 장비는 철저히 문제점을 분석하여 완벽한 다이아몬드 자동연마기계가 완성될 수 있도록 성능향상을 위한 시스템 분석을 진행할 것이다. 가장 이상적인 크라운 각도와 높이는 33-34.5° 와 14.4-16.2%이다. 크라운 각도가 이상적인 각도보다 현저히 작으면 빛의 분산이 감소되고 세팅시 다이아몬드가 깨어질 위험이 있기 때문에 이 각도로부터 벗어나는 것은 결코 바람직하지 않다.

Fig. 3.7은 개발된 자동연마장비로 가공된 다이아몬드 프로포션을 나타낸 것이다.

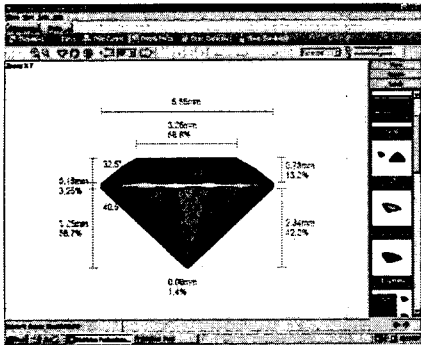


Fig. 3. 7 Completion proportion by sarin machine

여기에서 각도와 높이가 32.5° 와 13.2%로써 이상적인 크라운 각도에 근접함을 알 수 있다. 프로포션에서 가장 중요한 요소는 퍼빌리언(Pavilion)이다. 이상적인 비율에서 조금이라도 벗어나면 휘광이 현저히 감소되기 때문이다. 비율이 커지면 빛이 측면으로 새어나가 버려 테이블의 중앙부가 어둡게 보이므로 아주 중요하게 다루어야 할 부분이다. 개발된 자동연마장비로 가공한 원석 비율은 42.5% 와 40.5° 가 나와 이상적인 비율 43.1~43.3% ,40.5°~41.8° 와는 약간의 차이가 남을 알 수 있었다. 이상적인 거들 두께는 0.7~1.7% 로 Thin-Medium에 해당한다. 거들의 두께를 이상적인 비율보다 늘리면 중량 보존율을 높일 수 있으나 빛의 손실은 감수해야 한다. 개발된 자동연마 장비로 가공한 거들 두께는 1.44~2.16%로 약간 두껍게 가공 되었으나 감정결과는 엑셀런트로 좋은 등급이 나왔으며, 큐렛은 0.08mm 1.4%로 이상적으로 가공되었음을 보여 주었다. 이상으로 전체적인 프로포션 등급(Proportion Grade)은 "VERY GOOD" 이 나왔다.

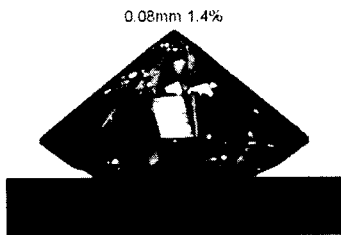


Fig. 3.8 Completion diamond real photograph

Fig. 3.8은 개발된 다이아몬드 자동연마장비로 실험 연마 후 가공 완성된 다이아몬드의 모습이다.

4. 결론

본 연구에서는 다이아몬드 원석을 라운드 브릴리언트 컷 형태로 가공하는데 필요한 방법을 연구하고 이상적인 컷을 수행할 수 있는 자동보석가공기계를 개발하였으며, 다이아몬드 원석을 가공 실험한 후 사린장비(Sarin machine)로 측정 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 개발한 다이아몬드 자동연마장비로 원석을 가공한 후 감정한 결과 최상급 "very good" 제품을 가공할 수 있는 성능을 갖춘 것으로 판단되었다.

2. 본 연구에서 개발된 방법에 의해 다이아몬드의 라운드 브릴리언트 가공의 프로포션과 피니시가 기존의 수작업 형태로 가공된 다이아몬드보다 품질과 생산성이 향상되었으며, 크라운면(Crown)과 퍼빌리언(Pavilion)이 이상적인 비율에 근접함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 한국산업기술재단의 지원에 따른 지역혁신 인력양성사업의 연구결과임.

참고 문헌

1. Paul- O' neil GEMSTONES, 1984, Time-Life Books Inc., pp.141~150 .
2. J. E. Field. 1979, "The Properties of Diamond", Academic Press Inc, pp.520~525.
3. B. Watermeyer, 1991, Diamond cutting , Fourth Edition, pp.179~187.
4. Water Schamann, 1977, Gemstones of the word, pp.64.
5. C. A. Brookes, 1992, "The properties of natural and synthetic diamond", Academic press, London, pp.515~546.
6. W.S. Kim, D.H. Kim, Y.Namba, 2003, "A Study on the Nano Grinding of Sapphire by Ultra-Precision Grinder", KSMTE, pp.40~46.