

보석용 다이아몬드의 연마가공

김우순*, 김동현†

(논문접수일 2005. 12. 2, 심사완료일 2006. 1. 31)

A Study on the Polishing Machining of Diamond for Jewelry

Woo-Soon Kim*, Dong-Hyun Kim†

Abstract

The present study deals with polishing machining of diamond for jewelry using developed 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 machined diamond by the developed automatic polishing machine its proportion and finishing turned out to be better than the machined diamond by the conventional manually operating polishing machine.

Key Words : Diamond(다이아몬드), Sarin M/C(사린 머신), Proportion(비율), Brilliant cut(브릴리언트 컷)

1. 서론

보석관련 산업은 원자재를 고도의 가공기술과 디자인을 이용하여 부가가치를 창출하는 21세기 탈 에너지 및 무공해 산업으로서, 연간 교역량이 1천억 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 보석가공 산업을 유지하기 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 수작업의 형태로는 경쟁력 약화는 물론 보석 산업의 위축을 초래할 수 밖에 없는 상황에서 자동화 가공시스템으로의 전환은 필수불가결하다. 따라서 자동화 기계를 이용한 대량 생산 기술 과 관련시스템을 개발하고 보석가공 기술을 개발하며 고품질의 제품을 생산하여 경쟁력을 확보하여야 한다.

* 원광대학교 기계자동차공학부 (knamba@wonkwang.ac.kr)

주소: 570-749 익산시 신용동 344-2

† 원광대 기계자동차공학부

다이아몬드는 보석 중에서 가장 단단하지만 그 성분은 극히 단순한 탄소 결정체로 둥근 형태나 내포물을 함유한 상태로 발견되었다⁽¹⁾.

이러한 원석을 표준화하여 균일한 형태로 가공하기란 매우 어려운 공정이지만, 최근에는 가공형태에서 가장 많이 채택하고 있는 다각원형절단인 경우 조건에 맞는 형태로 가공하려는 기술이 많이 발전 되었다. 원석을 가공할 경우 주로 연마작업을 하게 되는데 판매 가능한 나석으로 가공하기까지는 많은 손실이 발생하므로 손실을 최소화하면서 연마하여 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 가공식의 물리적인 원리를 이용하여 광학적으로 접근하고자 하였다. 실제로 이스라엘 벨기에와 같은 몇몇 보석 선진국의 경우에는 천연의 다이아몬드 원석을 균일한 규격 유지와 경제적 가치가 우수한 나석으로 가공하기 위해 원석의 외형에 따른 가공 방법에 관한 연구를 통하여 손실을 최소화하고 있으며, 우수한 연마가공을 하고 있다.

본 연구에서는 보석용 다이아몬드로 가장 많이 산출되는 팔면체 형태의 원석을 자체 개발한 보석용 연마기계를 이용하여 연마 가공하였고 가공에 따른 손실량과 프로포션을 분석하였다.

2. 보석용 다이아몬드의 가공형상

다이아몬드에서 최대한 아름다움을 끌어내기 위하여 1919년 Marcel Tolkowsky에 의해 발명된 라운드 브릴리언트 형태는 최대의 휘광, 분산, 섬광을 얻을 수 있다⁽³⁾. 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. 1은 라운드 브릴리언트 형태와 각 부 명칭을 나타내고 있다. 크라운 면(Crown facet) 33면과 퍼빌리언 면(Pavilion facet) 25면으로 총 58면으로 구성되어진다⁽⁴⁾.

다이아몬드 광채를 아름답게 내기 위해서는 빛이 분산되지 않고 내부의 퍼빌리언 면에서 반사되어 다시 위쪽 크라운

면으로 분산화 되어야 하는데 연마가공이 정밀하지 못하면 빛이 굴절되어 들어가 한곳으로 모여 다시 반사되지 않고 밖으로 빠져나가 버린다. 라운드 브릴리언트 형태에서 프로포션(Proportion)이 매우 중요하다.

이것은 연마된 상태를 따지는 연마비율로서 이상적인 연마가공을 하였을 경우에는 휘광이 좋아져 다이아몬드 품질 등급에 좋은 영향을 미친다.

Fig. 2는 다이아몬드에서 최상의 아름다움을 나타내기 위한 라운드 브릴리언트 컷의 이상적인 비율을 나타낸 것으로 국제적 기준으로 사용된다.

미국 보석학회(G.I.A)에서는 중량과 색상, 투명도가 동일

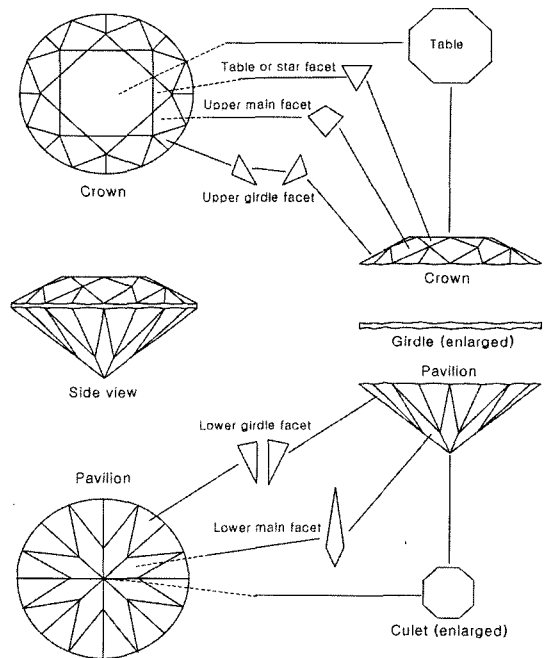


Fig. 1 Diagram of round brilliant cut

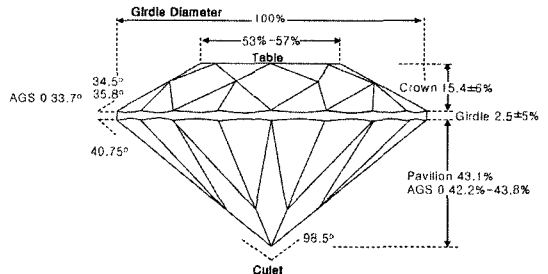


Fig. 2 Ideal cut of the brilliant facets

한 경우 연마된 상태를 따지는 연마 비율(Proportion)을 테이블직경이 53-57.5%의 범위를 이상적인 연마가공으로 정의하고 있으며, 크라운 각은 34-36°이내 크라운 높이는 약 15-16.5% 거들 두께는 얇음-중간-약간 두꺼움 나타내고, 퍼빌리언 각은 41°정도이고 약 43-44%의 깊이를 지닌다. 이상적인 연마가공에서의 큐렛(Culet)은 58.5-63%로 전체 깊이에서 아주 작다.

3. 개발한 보석용 연마기계 시스템

Table 1은 개발한 보석용 연마기계의 사양을 나타낸다. 제시된 사양중에 각도가 중요시 되는 것은 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 보이는 등 각도에 관련한 제반 문제점을 고려한 것이다.

Fig. 3과 Fig. 4는 개발된 다이아몬드 자동연마기계의 형상을 나타낸 것으로서 $\theta 1$ -축 구동부, $\theta 2$ -축 구동부, Z-축 구동부, 슬라이딩 가이드, 각 축 하우징등으로 구성 되었다.

Fig. 5은 다이아몬드 자동연마기계의 제어 순서도를 나타

Table 1 Specific of developed polishing machine

item	sepc.
main power	220V, 60Hz
machine size (mm)	2,000×1470×770
Y-axis max. twist angle (°)	360
Y-axis min. twist angle (°)	0.18
Y-axis up-down distance (mm)	50
X-axis max. driving angle (°)	30
X-axis feed width (mm)	1,500
θ -axis max. twist angle (°)	360
θ -axis min. twist angle (°)	0.05
scafe revolution speed (rpm)	2,000-4,000
motion controller	4-axis control

내고 Table 2와 3은 크라운과 퍼빌리언의 회전 각도를 나타낸 것이다.

다이아몬드 Polishing에 필요한 중요 각도 축은 $\theta 1$ -축, $\theta 2$ -축, Z-축이 있으며, 각도 제어는 4-축 Stepping Pulse type controller를 사용하여 제어하고, 각 축에 해당하는 스텝핑 모터(Stepping motor)에 펄스(Pulse)를 입력하는 제어 방식을 사용하였다. 스텝핑 모터(Stepping motor control)는 펄

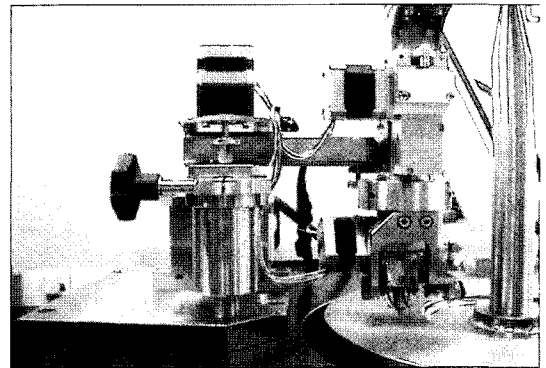
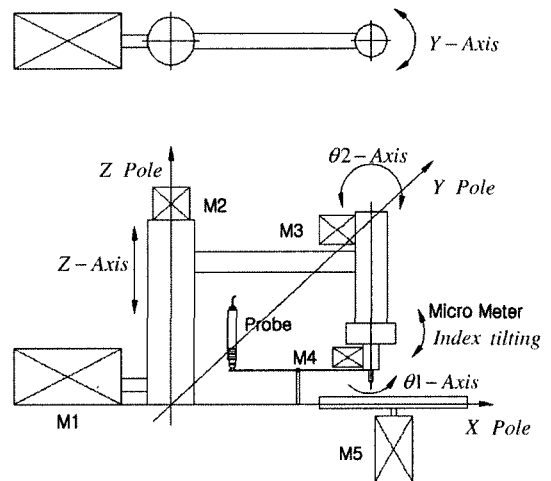


Fig. 3 Developed automatic polishing machine



- M1 : Y-axis wave motor (active angle : 30°)
- M2 : Z-axis position motor
- M3 : $\theta 2$ -axis rotary motor
- M4 : $\theta 1$ -axis rotary motor
- M5 : C-axis polishing disk motor
- Micro Meter : Pavilion tilting position
- Probe : Jewelry touch sensing & polishing degree

Fig. 4 Schematic of diamond polishing machine

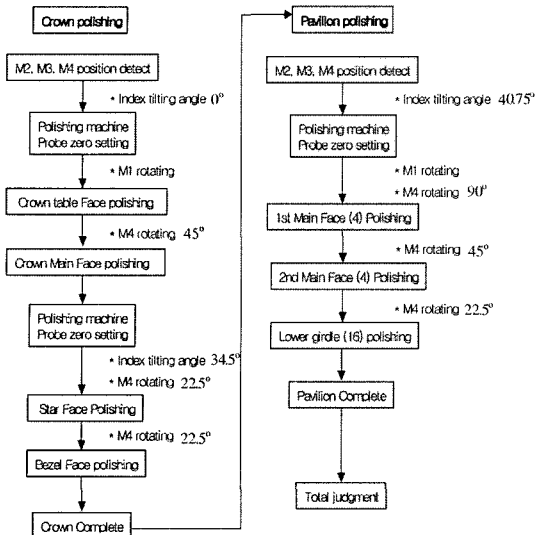


Fig. 5 Control sequence angle and motion of polishing

Table 2 Rotating angle of crown

part head	Crown			
Title	Table	Bezel	Star	Upper Girdle
Index	53-57.5(%)	22.5°	45°	*
Number	1	8	8	16

Table 3 Rotating angle of pavilion

part head	Pavilion		
Title	Lower Girdle	Pavilion Main	Culet
Index	22.5°	22.5°	*
Number	16	8	1

스(pulse) 제어 방식으로 행하여지며, Pulse duty 50%에서 최대 10kHz까지 응답가능하며, 펄스(Pulse) 입력은 연마 가공의 정밀한 각도 제어를 위하여 half step control 방식을 사용하였고 틸팅 각도 22.5°, 45°, 90°의 각도로 제어하였다. half step control은 400step/360°으로 0.9°/step으로 제어 가능하다. 그 외, 모터 구동의 입력전원은 DC24, 모터 토크 016~0.32(N·m)의 성능을 가지고 있는 컨트롤러로 구성 되어져 있다.

자동 연마기계는 기존의 수동 연마기와 같은 작업형태를 가지면서 운용 소프트웨어에 의해서 공구에 장착된 PCI 1240(4-Axis) 제어용 스테핑 모터제어 펄스 한개 당(최소 각 0.9°) 단위로 제어하고 이 모든 구성 품들은 산업용 컴퓨터의 제어 알고리즘에 의해 제어된다.

4. 다이아몬드 원석 가공 및 고찰

다이아몬드 원석 가공은 자동연마기계를 이용하여 스케이프(scafe plate)의 회전속도 3,000rpm와 각 면(facet)의 각도로 연마가공한 후 손실량과 연마비율을 평가하여 예측치와 비교·분석하였다.

보석의 품질을 좌우하는 공정은 연마공정이며 다이아몬드 원석을 라운드 브릴리언트 형태로 가공할 때 연마가공으로 인한 다이아몬드의 손실은 매우 크다. 따라서 천연 다이아몬드 원석을 미리 분석하여 원석 그 자체의 중량을 최대한 유지하면서 프로포션이 우수하도록 연마가공하는 것이 훨씬 더 많은 가치를 가지며 경제적으로도 바람직하다.

Fig. 6은 원석상태의 다이아몬드를 최적의 크기와 중량을 찾기 위해 이스라엘제 3차원 샤린 머신(Sarin machine)을 이용하여 미리 예측한 결과이다.

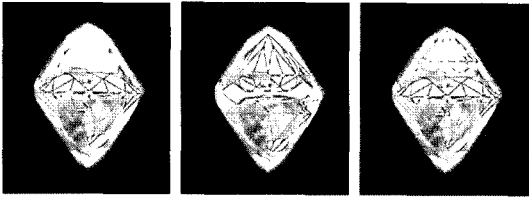
이것은 한 개의 원석으로 연마가공 가능한 다양한 형태 (a), (b), (c)을 보여준다. 다이아몬드 원석을 몇 개의 다이아몬드로 가공함에 따라 최대중량은 변화하고 더불어 손실량도 크게 차이가 발생하므로 매우 중요하다. 다이아몬드는 중량에 의한 가격 결정이 중요하기 때문에 중량 손실률을 최소화하는 것이 필요하다.

한편, 대부분의 다이아몬드 원석의 형태는 균형 있는 것부터 불균형적인 형태까지 다양하고 결정을 살펴보면 그 형태가 불규칙하다. 실제적으로 킴벌라이트 모암 중에서 결정이 성장하는 동안 여러 가지 요인 때문에 찌그러지거나 변형된다. 대부분 8면체의 외형을 갖지만 모서리부분은 보통 굽었거나 파손되어 거칠다.

본 가공실험에 사용된 다이아몬드는 약간의 크랙과 내포물을 함유하고 있어 그 부분을 고려하여 (a)타입으로 연마가공하였으며 중량 손실율을 최소화하고자 하였다.

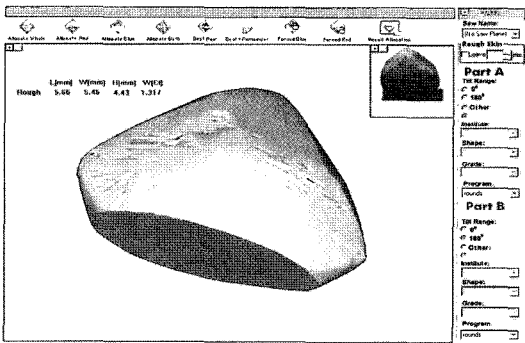
Fig. 7는 크랙과 내포물이 집중된 부분을 1064nm파장과 24W의 파워를 갖는 Nd-YAG레이저로 절단한 후 3차원 샤린 머신(Sarin M/C)을 이용하여 재분석한 결과이다.

다이아몬드의 외형에 따라 디자인을 구상하고 1개의 나석을 얻는 것을 기준으로 손실률을 분석한 결과(a), 레이저에 의해 절단된 원석에 대한 중량은 1.317캐럿(1.317 ct)으로

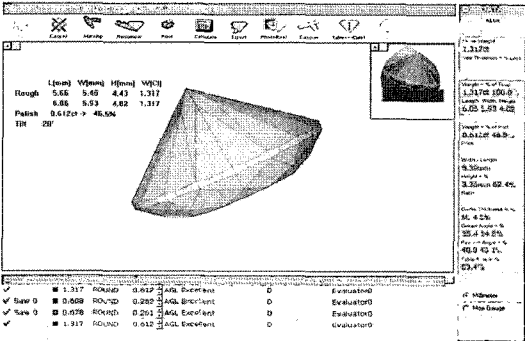


(a) one stone (b) two stone I (c) two stone II

Fig. 6 Profiles on rough diamond by Sarin machine



(a) Cut rough diamond by laser machining



(b) Predicted diamond

Fig. 7 Analysis data of diamond with round brilliant type

예측되었다. 또한, 레이저에 의해 절단된 원석에 대한 외형 측정값은 길이 5.66mm, 폭 5.46mm, 높이 4.43mm를 나타내었다. (b)결과는 연마가공후 다이아몬드의 중량을 예측한 것으로서 0.612캐럿(0.612ct, 46.5%)이었고, 손실률이 약 53.5% 정도이다.

Fig. 8와 Fig. 9는 개발한 연마기계로 다이아몬드를 연마가공 후 사린머신으로 측정한 중량과 프로포션(Proportion)을 나타낸 것이다.

다이아몬드 원석을 라운드 브릴리언트컷 형태로 가공하

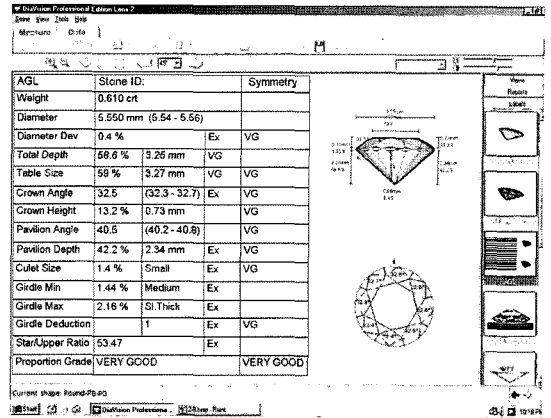


Fig. 8 Carat and proportion after polishing machining

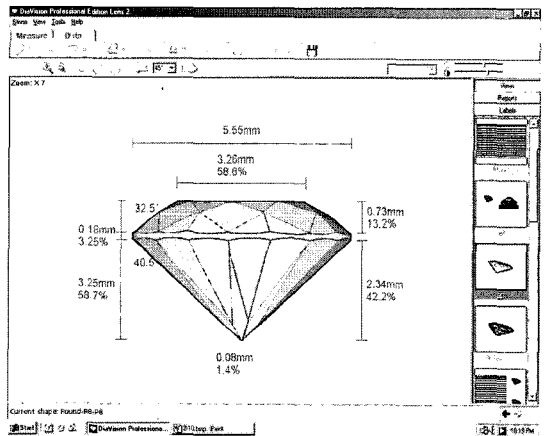


Fig. 9 Proportion of polished diamond

였을 경우를 미리 예측한 결과 연마가공후의 중량은 0.612ct으로 예측되었으나, 실제 연마 가공 후 중량 값은 0.610ct으로 거의 일치하였다.

연마가공한 후에 측정된 연마비율에 대한 결과값은 앞에서 언급한 이상적인 프로포션과 약간의 차이를 보였지만, 모든 측정범위에서 근사한 값을 보였다. 크라운 각도가 이상적인 각도보다 현저히 작으면 빛의 분산이 감소되고 세팅시 다이아몬드가 깨어질 위험이 있지만 여기에서 크라운 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 아

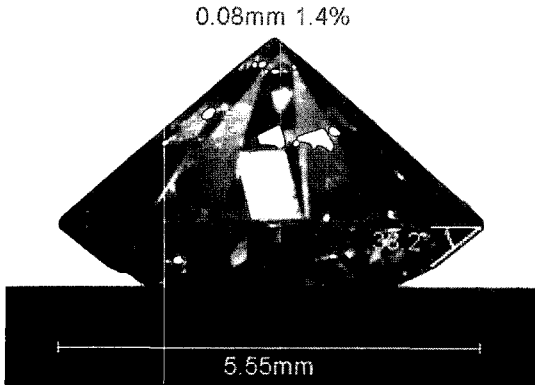


Fig. 10 Real photograph of machined diamond

주 중요하게 다루어야 할 부분이다. 개발된 연마기계로 가공한 퍼빌리언의 연마 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. 또한, 거들의 두께를 이상적인 비율보다 늘리면 중량 보존율을 높일 수 있으나 빛의 손실은 감수해야 하는데 가공한 거들 두께는 1.44~2.16%로 가공 되었고, 큐렛(culet)은 0.08mm 1.4%로 이상적으로 가공되었음을 보여 주었다.

Fig. 10는 개발된 다이아몬드 연마기계로 실험 연마 후 가공 완성된 다이아몬드의 모습이다.

5. 결론

본 연구에서는 개발된 다이아몬드 연마기계를 이용한 가공을 위하여 원석의 형태를 분석하여 중량과 프로포션을 예측하고 연마가공한 결과, 이상적인 연마비율과 원석 형태에 따른 최적중량에 근접한 값을 얻었다.

첫째, 크라운(crown)의 각도와 높이가 32.5°와 13.2%였고, 퍼빌리언(pavilion)의 각도와 높이는 40.5°와 42.5%이었다.

또한, 거들 두께는 1.44~2.16%로 얇음-중간(Thin-Medium)으로 나타났고, 큐렛(culet)은 0.08mm 1.4%로 이상적으로 가공되었음을 알았다.

둘째, 실제 연마 가공 후 중량 값은 0.610ct으로 예측한 중량값과 거의 일치함을 알았다.

따라서 본 연구에서 개발된 다이아몬드 자동연마가공기계는 보석 산업의 선진화와 기술 향상에 기여 하리라 판단되고 향후 더 개선된 보석연마기계 개발에 일조할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2004년도 원광대학교 교내연구비에 의해 연구 되었음.

참 고 문 헌

- (1) Paul- O'neil GEMSTONES, 1984, Time-Life Books Inc., pp. 141~150.
- (2) Field, J. E., 1979, "The Prooperties of Diamond," Academic Press Inc, pp. 520~525.
- (3) Watermeyer, B., 1991, *Diamond cutting*, Fourth Edition, pp. 179~187.
- (4) Water, S., 1977, *Gemstones of the word*, pp. 64.
- (5) Brookes, C. A., 1992, "The properties of natural and synthetic diamond," Academic press, London, pp. 515~546.
- (6) Kim, W. S., Kim, D. H. and Namba, Y., 2003, "A Study on the Nano Grinding of Sapphire by Ultra-Precision Grinder," *KSMTE*, pp. 40~46.
- (7) Andrew N. S., 2005, "ARM System Developer's Guide," elsevier.