

## Current status of gem-quality laboratory-grown diamond

Hyun-min Choi, Young-chool Kim and Jeong-won Seok<sup>\*,†</sup>

Hanmi Gemological Institute & Laboratory (HGI, GIG), Seoul 03139, Korea

<sup>\*</sup>Department of Electrical and Electronic Materials Engineering, Dongshin University, Naju 58245, Korea

(Received July 29, 2022)

(Revised August 3, 2022)

(Accepted August 8, 2022)

**Abstract** In the past few decade years, laboratory-grown diamonds, also known as synthetic diamonds usually, have become more and more prosperous in the global diamond market. There are two main crystal growth processes of the gem-quality laboratory-grown diamond, the high pressure and high temperature (HPHT) and chemical vapor deposition (CVD). Synthetic gem diamonds grown by the HPHT press have been commercially available since the mid-1990s. Today, significant amounts of gem-quality colorless HPHT laboratory-grown diamonds have been producing for the jewelry industry. In the last several years, the CVD laboratory-grown diamonds have been gaining popularity in the market. In 2021, the CVD production rose and there are expectations that the trend would move upward continuously. This article presents information about the current status of laboratory-grown diamonds, lower cost compared to natural diamonds, market share, color distribution, spectroscopic properties of laboratory-grown diamonds, and so on.

**Key words** Gem-quality, Laboratory-grown diamond, HPHT, CVD, Production

## 보석용 합성 다이아몬드의 현황

최현민, 김영출, 석정원<sup>\*,†</sup>

(주)한미보석감정원, 서울, 03139

<sup>\*</sup>동신대학교 전기전자재료공학과, 나주, 58245

(2022년 7월 29일 접수)

(2022년 8월 3일 심사완료)

(2022년 8월 8일 게재확정)

**요약** 지난 수 십 년간 합성 다이아몬드는 글로벌 다이아몬드 시장에서 점점 더 번창해 왔다. 보석용 합성 다이아몬드를 성장시키는 방법에는 HPHT와 CVD의 두 가지 방법이 있다. HPHT 프레스를 이용하여 성장시킨 보석용 합성 다이아몬드는 1990년대 중반부터 상업적인 생산이 가능해졌고, 현재는 상당한 양의 보석용 무색 HPHT 합성 다이아몬드가 보석산업을 위해 생산되고 있다. 몇 년 전부터는 CVD 합성 다이아몬드가 시장에서 반향을 일으키고 있다. 2021년에는 CVD 합성 다이아몬드의 생산량이 급증했으며 이러한 추세는 계속될 것으로 여겨진다. 본 연구에서는 합성 다이아몬드의 현재 상황을 비롯하여 천연 다이아몬드에 비해 낮은 유통가격, 시장 점유율, 컬러 분포, 분광학적 특성 등에 대한 정보를 보여준다.

### 1. 서론

보석용 합성 다이아몬드에 대한 이슈는 이미 오래 전부터 있어왔으나 2014년 중국에서 제조되기 시작한 멜리(melee, 2부 이하의 나석 다이아몬드)사이즈 무색 HPHT 합성 다이아몬드가 2016년 국내-외에서 대량으로 유통되기 시작하면서 천연 다이아몬드와 합성 다이아몬드 감별에 대한 이슈로 본격화 되었다. 보석용 합성 다이아몬드의 유통

통량이 늘어나면서 천연 다이아몬드에 섞여 유통되는 경우가 잦아졌기 때문이다. 본 감정원(Hanmi Lab.)을 비롯한 국내-외의 관련 연구기관에서는 다이아몬드 시장이 큰 혼란에 맞닥뜨리는 것을 피하기 위해 합성 다이아몬드의 특징에 대해 연구하여 발표하기 시작했다[1-3]. 더불어 2018년 9월에는 드비어스(De Beers)가 연구실에서 제조한 CVD 합성 다이아몬드를 ‘라이트박스(Lightbox)’라는 브랜드로 판매를 개시하여 세계 다이아몬드 및 보석산업 종사자들에게 적지 않은 충격을 주었다. 라이트박스 합성 다이아몬드는 드비어스 소유인 런던의 E6(element six)에서 제조되어 온라인과 미주 소매점에서 판매되고 있다[4,5].

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: jwseok@dsu.ac.kr

근래에 MVI 마케팅이 실시한 설문 조사에 따르면 합성 다이아몬드에 대한 MZ세대의 관심이 증가하고 있다. 비교적 낮은 가격에 큰 사이즈의 다이아몬드를 구매할 수 있다는 점이 패션주얼리와 일부 예물주얼리에서 어필되고 있기 때문이다. 천연 다이아몬드 대신 합성 다이아몬드를 선택하는 이유로 원하는 사이즈와 품질의 다이아몬드의 가격을 감당할 수 없음을 첫 번째로 꼽았다[6].

최근 천연 펠리 다이아몬드 가격이 크게 올라 합성 펠리 다이아몬드가 대체재로 부상하고 있다. 러시아-우크라이나 전쟁으로 인한 미국을 비롯한 서방 세계의 경제 제재로 인해 러시아산 다이아몬드가 원활히 공급되지 못하기 때문이다. 러시아 국영기업인 알로시는 전 세계 다이아몬드 원석 생산량의 35% 가량을 생산하고 있으며 특히 전 세계에 2부 이하 사이즈 다이아몬드 공급의 상당한 부분을 담당하고 있다. 이러한 영향으로 드비어스는 2022년 6월 사이트에서 작은 크기의 천연 다이아몬드 원석 가격을 인상했다[7].

중국은 여전히 보석용 HPHT 합성 다이아몬드 생산의 세계 1위의 자리를 굳건히 지키고 있으며, 최근에는 인도가 CVD 합성 다이아몬드 주요 생산센터로 부상하고 있다. 합성 다이아몬드 생산량은 급증하고 있으며 생산 기술 또한 계속해서 발전하고 있다. 여기에 합성 다이아몬드 제조업체에 대한 투자 소식도 지속적으로 들려온다[8]. 본 연구에서는 최근 눈부시게 발전한 보석용 합성 다이아몬드의 성장기술, 생산현황, 점유율, 유통가격, 컬러 분포, 분광학적 특징 등에 대해 집중 조명하고 보석용 합성 다이아몬드의 현재 상황에 대해 면밀히 살펴보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1. 보석용 합성 다이아몬드 성장기술

천연 다이아몬드와 합성 다이아몬드는 모두 탄소 원자

로 이루어져있다. 결정구조도 등축정계로 같고 굴절률, 분산, 경도, 비중 등 물리적, 화학적, 광학적 특성이 모두 같다. 그래서 천연 다이아몬드와 합성 다이아몬드는 같은 다이아몬드 물질이다. 그런데, 다른 점이 하나 있다. 천연과 합성 다이아몬드의 성장 방법이다. 천연 다이아몬드는 지구 표면 약 150 km 아래에서 성장하지만 합성 다이아몬드는 실험실에서 성장된다. 천연 다이아몬드는 수 억년의 오랜 기간 동안 고온과 고압에 의해 형성되지만 합성 다이아몬드는 수일, 수주, 수개월 상대적으로 짧은 기간 동안 고온과 고압에 의해 성장된다. 천연 다이아몬드는 질소 성분이 비교적 풍부하게 내포된 반면에 무색의 합성 다이아몬드는 질소 성분을 거의 포함하지 않고 있다. 이를 한 문장으로 요약하면 다음과 같다. 천연 다이아몬드와 합성 다이아몬드는 물리적, 화학적, 광학적 특성은 같으나 결정 성장방법은 다르다.

보석용 합성 다이아몬드를 성장하는 방법은 크게 두 가지 방법이 있다. HPHT(high pressure and high temperature) 방법과 CVD(chemical vapor deposition) 방법이다. HPHT 방법은 1500°C의 온도와 5 GPa의 압력을 요한다. 이러한 온도와 압력을 가능하게 하는 것은 금속 촉매제이다. 금속 촉매제로는 주로 Ni, Fe, Co, Ti 등이 사용되며, 이들은 보다 낮은 온도와 압력에서 다이아몬드를 성장하게 하는 역할을 한다. 촉매제가 없다면 다이아몬드 성장을 위해 3000°C의 온도와 15 GPa의 압력이 필요하다. HPHT 프레스 안쪽에 장착되는 셀 내부에 원료, 촉매제, 종자가 채워지고, 셀 내부의 다이아몬드 종자가 위치하는 아랫부분의 온도는 탄소 원료가 위치하는 윗부분보다 상대적으로 낮고 윗부분은 상대적으로 높기에 온도구배가 발생되며, 이로 인해 결정이 성장하게 된다.

HPHT 방법에 주로 사용되는 프레스는 Belt press, BARS press, Cubic press이다(Fig. 1). Belt press를 이용하여 1954년 미국 GE에서 처음으로 합성 다이아몬드 제조에 성공한 이후 대부분은 공업용으로 제조되었으며, 1990년

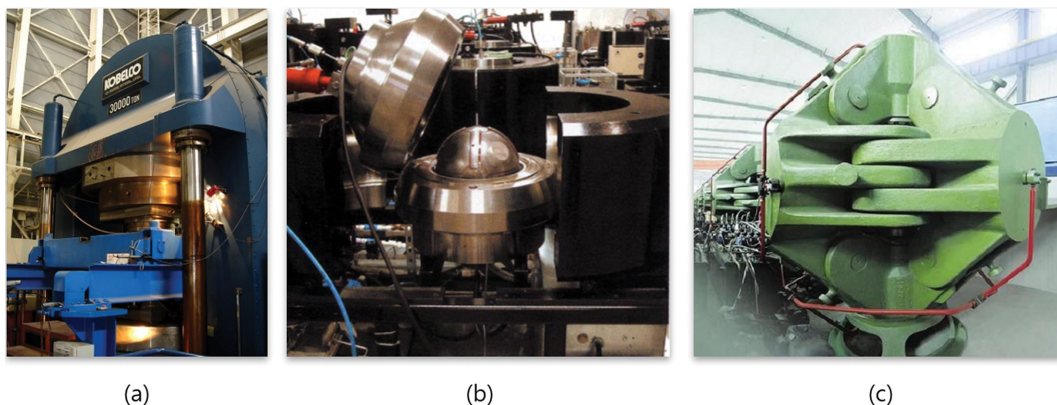


Fig. 1. "Press" apparatus are used to grow HPHT synthetic diamond crystals. (a) Belt press; (b) BARS press; (c) Cubic press.

대에 이르러 보석용으로 사용할 수 있는 품질이 만들어지기 시작했다. BARS press는 압력을 조절하는 장치가 팔면체 형상을 하고 있으며 1990년대에 주로 러시아에서 사용됐다. 2000년대초 미국의 Gemesis에서도 이를 이용하여 HPHT 합성 다이아몬드를 생산하기 시작했다. Cubic press는 입방체 형상으로 압력을 조절하며 중국과 러시아에서 주로 사용된다. 2014년 중국에서 Cubic press를 이용하여 보석용 무색 멜리 다이아몬드가 대량으로 만들어지기 시작했다. Cubic press는 1회 공정에 멜리사이즈 다이아몬드 300~400개 정도 제조가 가능하다.

CVD 방법은 700~1300°C의 1기압보다 훨씬 낮은 압력에서 다이아몬드를 성장시킨다. CVD 챔버 내에 메탄 가스와 수소 가스를 넣어주고 microwave를 흘려주어 고온 플라즈마가 생성되면, 수소와 메탄 가스 분자들이 확산 및 대류 등에 의해 분리되고 분리된 탄소원자가 종자 위에 층을 이루며 성장하게 된다. CVD 방법으로 제조된 보석용 합성 다이아몬드는 2003년 이후로 눈부신 기술 성장을 보여 주었다. 2000년대 초반 나석 기준으로 0.1~0.3캐럿 정도의 크기였으나 2013년에 이르러 1~2캐럿의 합성 다이아몬드가 등장했다.

## 2.2. 가장 큰 보석용 합성 다이아몬드

현재까지 보석용으로 연마된 가장 큰 합성 다이아몬드는 CVD 방법으로 성장된 다이아몬드이다(Fig. 2). 2022년 1월에 중국의 Zhengshi Technology에서 CVD 방법으로 합성된 G-VVS<sub>1</sub> 등급의 16.41캐럿의 다이아몬드가 GIA에 의뢰되어 가장 큰 다이아몬드로 등극되었으나[9], 동년 5월에 인도의 Greenlab에서 CVD 방법으로 22.72캐럿의 다이아몬드가 제조되어 새로운 기록을 경신했다. 그러나, 한 달이 채 지나지 않은 2022년 6월에 인도의 Ethereal Green Diamond에서 H-VS<sub>2</sub> 등급의 30.18캐럿의 다이아몬드가 제조되어 현재까지 연마된 합성 다이아

몬드 중 가장 큰 다이아몬드로 남아있다[10].

HPHT 방법으로 성장된 무색의 연마된 다이아몬드 중 가장 큰 것은 2018년에 러시아의 New Diamond Technology에서 제조된 H-I<sub>1</sub> 등급의 15.32캐럿의 다이아몬드이다.

## 2.3. 보석용 합성 다이아몬드의 생산 현황

HPHT와 CVD 보석용 합성 다이아몬드는 2010년 이후 괄목할만한 성장을 이루었다. HPHT 방식으로 2014년부터 무색 멜리 합성 다이아몬드의 본격적인 생산이 중국에서부터 시작되었고, CVD 방식은 2017년 이후로 미국, 유럽, 싱가포르, 인도를 중심으로 고품질의 보석용 합성 다이아몬드가 시장에 다수 나타나기 시작했다. 보석용 HPHT 합성 다이아몬드는 주로 중국과 러시아에서 생산되고 있으며 HPHT 방식의 최대 생산국은 중국이다. Figure 3과 Table 1에서 볼 수 있듯이 HPHT 합성 다이아몬드 메이저 제조 업체는 대부분 중국에 있으며 그 중 90% 이상이 허난성(河南省)에 집중되어 있다. AWDC(세계다이아몬드센터)와 Bain & Company가 발표한 글로벌 다이아몬드 산업 2020~2021에 따르면, 2019년과 2020년의 합성 다이아몬드의 생산량은 두 자릿수 성장하였고, 2020년 총 생산량은 600~700만 캐럿 정도이며 이 중 약 50~60%는 HPHT 방법을 이용한 중국에서 제조되었다[11]. 중국에서 보석용 다이아몬드를 제조할 수 있는 Cubic press는 2014년 이후 꾸준히 증가해 왔다. Table 1에 제시된 중국 내 보석용 Cubic press는 3500여대가 넘는다[12]. 이전 연구에서 중국의 보석용 Cubic press가 2017년에 1000여대 정도였고 전체 프레스의 10% 비율이었던 것을 감안한다면[3], 향후에도 보석용 다이아몬드를 생산하는 프레스의 비율이 전체 프레스에 비해 더 늘어날 것으로 예측해 볼 수 있다.

보석용 CVD 합성 다이아몬드 생산의 중심에는 미국과 인도가 있다. 미국의 대표적인 보석용 CVD 제조회사는



Fig. 2. New record size for CVD laboratory-grown diamond has been achieved by Ethereal Green Diamond Co. Ltd. Records for crystal size and quality are frequently broken. (a) 16.41ct, by Zhengshi Technology, China; (b) 22.72ct, by Greenlab, India; (c) 30.18ct, by Ethereal Green Diamond, India.

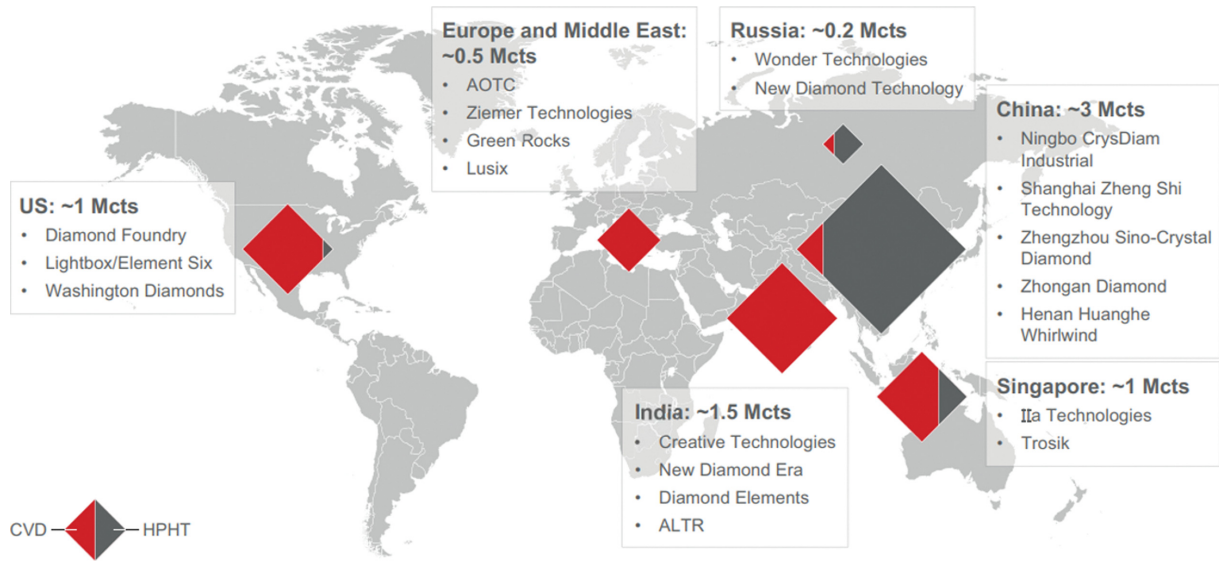


Fig. 3. Total gem-quality laboratory-grown diamond rough production, 2020E: around 6 to 7 million carats [by Bain & Company, 2021].

Table 1  
HPHT laboratory-grown diamond manufacturers and production in the world (September 2021)

| Country/Manufacturer | Total no. of press | No. of press for gem diamond | Recent monthly production in ct. |
|----------------------|--------------------|------------------------------|----------------------------------|
| China                | Zhong Nam          | 4500                         | 900                              |
|                      | Huang He whirlwind | 4000                         | 1200                             |
|                      | Hua Jing           | 2000                         | 800                              |
|                      | Li Liang           | 600                          | 200                              |
|                      | Jin Zheng          | 80                           | 80                               |
|                      | Xin Rul            | 50                           | 50                               |
|                      | Hao Shi            | 30                           | 30                               |
|                      | Tang He            | 150                          | 150                              |
|                      | Tian Long          | 50                           | 50                               |
|                      | Ping Mei Shen Ma   | 50                           | 50                               |
| Russia NDT           | 34                 | 34                           | 3,000                            |
| Ukraine NDT          | 10                 | 10                           | 800                              |
| Swissland Ziemer     | 10                 | 10                           | 800                              |
| Russia Troisk        | 18                 | 18                           | 1,500                            |

[by Andy H. Shen, GIT 2021/2022]

Element 6, Diamond Foundry, Washington Diamonds 이며 점차 점유율을 늘려가고 있다. 그 중 Diamond Foundry는 워싱턴 주에 위치한 제조 공장의 생산량을 연간 500만 캐럿으로 끌어 올릴 계획을 갖고 있다[13]. 전 세계 90% 가량의 연마산업 시장 점유율을 차지하고 있는 인도 역시 CVD 합성 다이아몬드 주요 생산센터로 부상하고 있다. 세계 최대의 다이아몬드 연마센터인 수랏을 비롯하여, 자이푸르와 뭘바이(구 뭉베이) 등에는 2014년경부터 CVD 다이아몬드 제조업체가 증가하기 시작했다. 이들 업체는 시행착오를 겪다가 2017년에 1개

릿대의 연마된 다이아몬드 합성에 성공했고 2020년에 이르러는 2캐럿 이상의 연마된 합성 다이아몬드를 CVD 방법으로 생산할 수 있는 기술력을 갖추게 되었다. Table 2에 따르면 2021년 9월 기준으로 인도에 약 3200여대의 CVD 리액터가 있는 것으로 파악되며[12], 2022년 현재는 비공식적으로 약 5000여대의 리액터가 인도에 있는 것으로 추정된다. CVD 리액터 1기의 월평균 생산량은 약 125캐럿이며, 이는 17만5천달러 정도의 가치이다. 현재 인도는 글로벌 합성 다이아몬드 생산의 20% 정도를 담당하고 있다[14].

Table 2  
CVD laboratory-grown diamond manufacturers in the world  
(September 2021)

| Country     | Manufacturer        | No. of machine |
|-------------|---------------------|----------------|
| Singapore   | Ila Technologies    | 248            |
|             | X Diamond           | 100            |
| USA         | Element 6           | 50             |
|             | Diamond Foundry     | 100            |
|             | Washington Diamonds | 300            |
|             | Prism               | 50             |
|             | Chatham Created     | 50             |
| Switzerland | Ziemer              | 100            |
| Russia      | Troisk              | 100            |
| Israel      | Green Rocks         | 100            |
|             | Lusix/Landa Labs    | 150            |
| India       | New Diamond Era     | 1500           |
|             | Karp                | 500            |
|             | Creative            | 220            |
|             | Diamond Planet      | 500            |
|             | DM Gems             | 500            |
| China       | Zheng Shi           | 100            |
|             | Chao Ran            | 60             |
|             | Shan Mo             | 50             |
|             | Jing Zuan           | 550            |
| Japan       | EDP                 | 100            |
| Turkey      | Appsilon            | 10             |

[by Andy H. Shen, GIT 2021/2022]

#### 2.4. 보석용 합성 다이아몬드의 점유율

합성 다이아몬드 주얼리의 생산 및 판매량이 증가함에 따라 시장 점유율이 서서히 상승하고 있다. 2020년 기준 합성 다이아몬드의 최대 소비시장은 미국이고 중국과 인도가 그 뒤를 잇고 있다[11]. Figure 4는 합성 다이아몬드와 전체 다이아몬드 매출의 비율이다. 2018

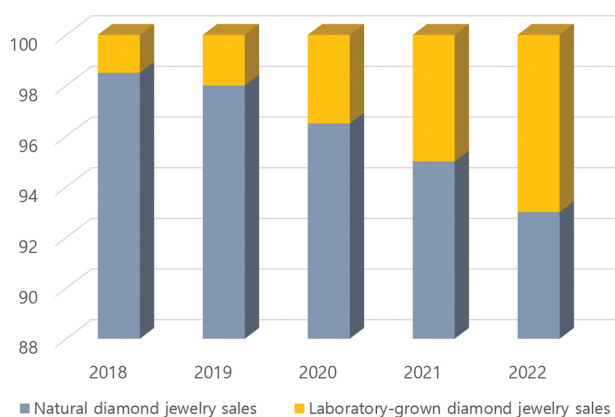


Fig. 4. Share of the total diamond jewelry market. The market share of laboratory-grown diamonds continues to grow.

년에 합성 다이아몬드가 미국의 주얼리 전문 소매상의 전체 다이아몬드 매출에서 차지한 비율은 1.5% 미만이었으나 2019년에는 2%를 넘어섰다. 이는 2018년 9월에 드비어스의 합성 다이아몬드 브랜드인 라이트박스의 개시 등 합성 다이아몬드 제조 및 판매 업체가 증가했기 때문이며, 그 후 제조사의 지속적인 증가에 따라 2020년에는 시장 점유율이 약 3.5%로 상승했다. 2021년의 합성 다이아몬드 매출의 점유율은 5% 정도이며 이때의 미국 시장의 매출은 39억달러였다[15]. 제조사들이 공급을 늘리고 메이저 소매업체들이 지속적으로 상품을 확대하고 있기에 2022년에는 7%의 점유율을 달성할 가능성이 높다.

#### 2.5. 보석용 합성 다이아몬드 유통가격

AWDC(엔트워프 세계다이아몬드센터)와 Bain & Company가 발표한 글로벌 다이아몬드 산업 2020~2021에 의하면, 합성 다이아몬드 시장에서 중국과 인도를 비롯한 각국 제조기업의 생산 능력이 증가하고 기술이 발전함으로 인해 합성 다이아몬드의 단가는 꾸준히 하락하고 있다[11].

Figure 5는 1캐럿 VS등급을 기준으로 도매와 소매가를 나타낸 것이다. 2017년의 도매가는 55%, 소매가는 65%대이나 2018년 소매가는 50%대로 상대적으로 소폭 하락한 반면 도매가는 20%대로 급락한 후 2020년까지 유지함을 볼 수 있다. 소매가는 2019년에 대비 2020년 35%대로 다시 하락 함으로써 점진적인 하락세에 있다. 생산 능력 증가와 기술의 발전은 가격경쟁을 불러오고 가격경쟁으로 인한 유통가격의 하락은 보석 제조업체의 마진 축소를 야기시키는 형세이다. 2018년에 20%대로 도매가가 급락한 것은 동년 9월 드비어스 라이트박스 합성 다이아몬드의 판매 개시 영향이 크다. 라이트 박스는 합성 다이아몬드 1캐럿당 가격을 \$800, 0.5캐럿을 \$400라는 파격적인 금액을 제시했고 그 가격을 현재까지 유지해 오고 있으며, 최근에는 고품질에 한하여 1캐럿당 \$1,500의 가격을 출시했다[4,5,16]. 또한 팬시 컬러는 천연 다이아몬드와 가격 차이가 최대 10배에 이르는데, 천연 팬시 컬러 다이아몬드의 희소성과 비교하자면 합성 팬시 컬러 다이아몬드는 기술적인 접근성이 상대적으로 수월하기에 매우 저렴한 가격으로 유통될 수 있다. 한편, 유통가격의 인하는 가격에 민감한 소비자 그룹에 어필할 수 있으며, 따라서 합성 다이아몬드에 대한 관심을 상승시킬 수 있다. 비교적 낮은 가격으로 큰 사이즈의 스톤을 구매할 수 있는 점은 패션주얼리와 예물 주얼리 모두에 영향을 끼칠 수 있으며, 특히 온라인 채널 및 전자 상거래에 익숙한 MZ세대의 관심이 보다 높아질 수 있을 것이다.

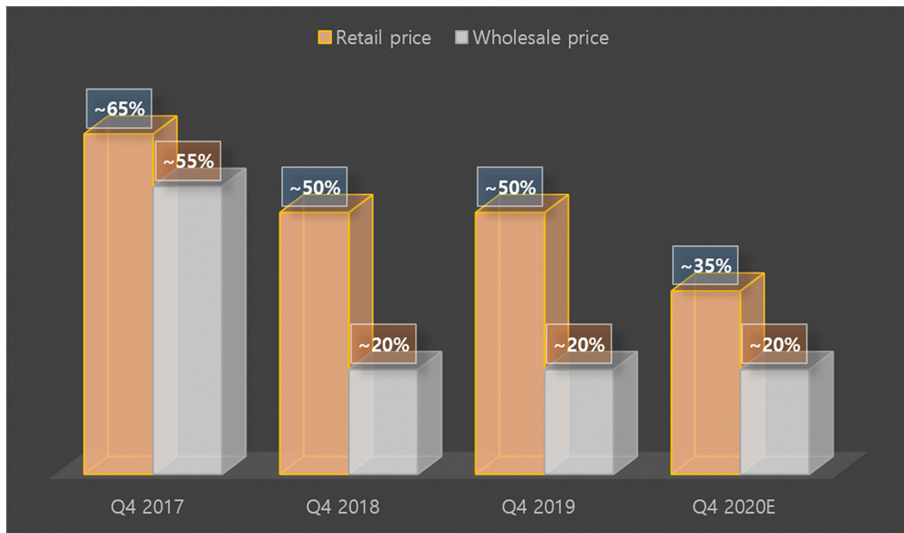


Fig. 5. Price of polished laboratory-grown diamond as a percentage of polished natural diamond (1 carat, G-VS polished) [by Bain & Company, 2021].

2.6. 합성 다이아몬드의 컬러 분포

무색에 가까운 합성 다이아몬드는 1990년대에도 제조되었으나 주로 연구용 목적이었고 상업적으로 제조, 유통되기 시작한 때는 2010년에 이르러서이다. Figure 6은 본 감정원에 의뢰된 HPHT 방법에 의해 성장된 합성 다이아몬드의 컬러 분포를 연도별로 나타낸 것이다. 2010년에는 orange-yellow, blue, yellow, pink 컬러가 주된 색이었으나 2021년으로 갈수록 orange-yellow, yellow의 비중이 줄어들고 colorless, near colorless의 비중이 현격히 증가함을 볼 수 있다. 2018년을 전후하여 colorless의 비중이 급격히 증가했는데 여기에는 두 가지 이유를 들 수 있다. 첫째, 색을 향상시킬 수 있는 처리 기술의 발전이다. 결정 성장 후, 처리 기술을 이용하여 near colorless(G~J)를 colorless(D~F)로 탈색할 수 있다. 즉, 결정 성장 후 잔류하는 light brown 컬러를 후처리 기

술인 HPHT 처리를 거쳐 제거한 경우이다. 둘째로 결정 성장 기술의 발전이다. 결정성장 기술의 발전은 결정 내의 결함을 현격하게 낮추었을 뿐 아니라 결정 성장 중 결정에 존재하는 light brown 컬러의 잔류를 현격하게 낮춰주었다.

Figure 7은 본 감정원에 의뢰된 CVD 방법에 의해 성장된 합성 다이아몬드의 컬러 분포를 연도별로 나타낸 것이다. 2010년에는 pink 컬러가 주된 색이었으나 2015년을 전후하여 near colorless의 비중이 증가하기 시작하였으며, 2021년에는 colorless의 비중이 증가했다. Near colorless의 비중이 증가하기 시작했던 2015년은 상업적으로 무색 CVD 합성 다이아몬드의 공급이 본격화 된 시기이며, 2018년 하반기에는 라이트박스의 영향으로 CVD 합성 다이아몬드의 공급이 더욱 활발해졌을 것으로 여겨진다. 2021년에는 인도에서 생산된 무색의 CVD 합성 다이아몬드가 상당량 유통된 것으로 보인다.

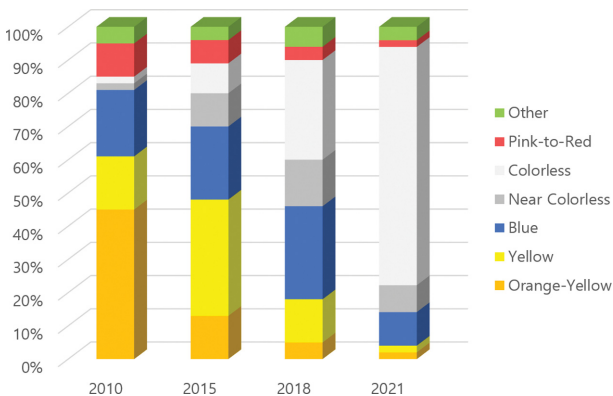


Fig. 6. Color distribution of HPHT-grown diamonds analyzed by Hanmi Lab (Y axis is % of HPHT-grown diamonds and X axis is year).

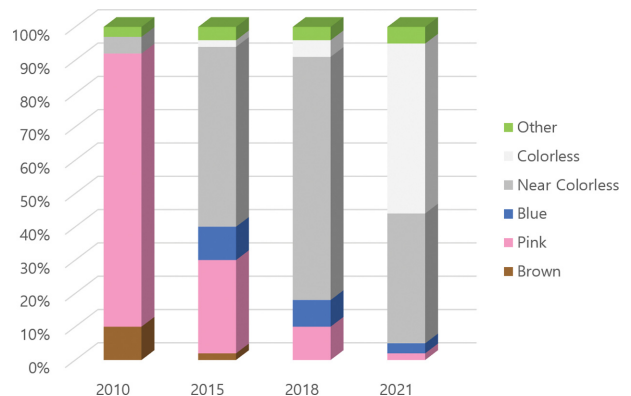


Fig. 7. Color distribution of CVD-grown diamonds analyzed by Hanmi Lab (Y axis is % of CVD-grown diamonds and X axis is year).

## 2.7. 합성 다이아몬드의 분광학적 특징

천연 다이아몬드의 대부분은 질소 결함이 존재하는 type Ia에 속하지만 약 2% 정도의 다이아몬드는 질소 결함이 거의 존재하지 않는 type II로 분류된다. 반면에 보석용 합성 다이아몬드는 대부분 type II에 속한다[2-5,17]. 중적외선 영역의 흡수 스펙트럼을 관찰하면 다이아몬드 내의 질소(N), 수소(H), 붕소(B) 등의 결함 존재 여부를 알 수 있다. HPHT 합성 다이아몬드는 대부분 붕소를 함유하고 있으며 적외선 분광기에서 쉽게 확인이 가능하다[17]. 그러나 CVD 합성 다이아몬드는 붕소를 함유하지 않으며 수소와 관련된 결함 및 실리콘(Si)과 관련된 결함 등을 확인할 필요가 있다. Figure 8은 본 감정원의 IR 분광기로  $4\text{ cm}^{-1}$  resolution으로 측정된 천연 다이아몬드와 CVD 합성 다이아몬드의 중적외선 영역의 결과이다. 천연 다이아몬드에서는 수소와 관련된 결함이  $3107\text{ cm}^{-1}$ (N3VH)에서 발견되며 CVD 합성 다이아몬드에서는  $3123\text{ cm}^{-1}$ (NVH<sup>0</sup>),  $3323\text{ cm}^{-1}$ 에서 발견된다. 특히  $3123\text{ cm}^{-1}$ 의 결함 특징은 결정 성장 후 가열 처리와 관련된 중요한 정보를 제공하는데, 이 결함은 CVD 방법으로 성장된 다이아몬드 중 질소 불순물을 함유하는 경우에 발견된다.  $3123\text{ cm}^{-1}$ 의 결함은 낮은 온도에서는 안정하지만  $1200^{\circ}\text{C}$ 부터 감소하기 시작하여  $1700^{\circ}\text{C}$ 에 이르면 소실된다고 알려져 있다[18].  $3107\text{ cm}^{-1}$ 은 type Ia 천연 다이아몬드에서 자주 관찰되며 type II 천연 다이아몬드에서도 종종 발견되는 천연 다이아몬드 내의 수소와 관련된 대표적인 결함이다[19]. 그럼에도  $3107\text{ cm}^{-1}$ 가 존재한다고 천연 다이아몬드로 단정할 수는 없다. CVD-grown 다이아몬드를 결정 성장 후  $1700^{\circ}\text{C}$  이상에서 가열했을 때  $3107\text{ cm}^{-1}$ 의 결함이 생성됐다는 보고도

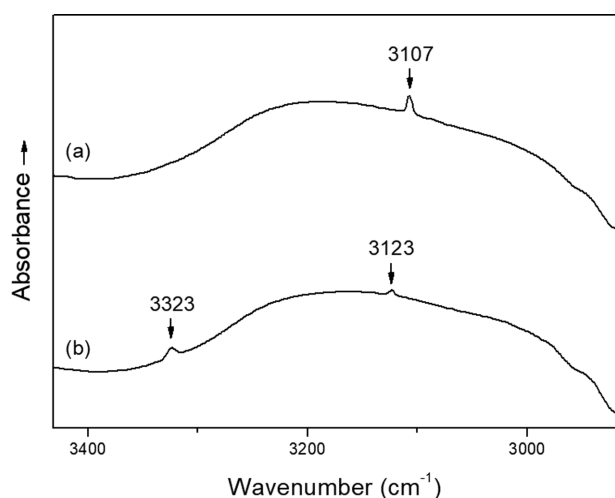


Fig. 8. Absorption spectra of natural and CVD-grown diamond in the middle infrared region. (a) Natural diamond; (b) CVD Laboratory-grown diamond [by Hanmi Lab.].

있기 때문이다[20]. 반면에 HPHT 합성 다이아몬드에서는 수소와 관련된 결함은 발견되지 않는다.

Figure 9와 Fig. 10은 천연 다이아몬드와 CVD 합성 다이아몬드를 본 감정원의  $514.5\text{ nm}$  Ar-ion 레이저를 이용하여 액체 헬륨 온도(8 K)에서 측정한 PL(photoluminescence) 결과이다. Figure 9에서 볼 수 있듯이 천연 다이아몬드에서는 실리콘(Si)과 관련된 결함이 발견되지 않지만(Fig. 9b) CVD 합성 다이아몬드에서는  $736.6\text{ nm}$ 와  $736.7\text{ nm}$ 에서 실리콘과 관련된 결함이 발견된다(Fig. 9a). 실리콘 결함은 천연 다이아몬드에서 발견되기도 하지만 극히 드물며, CVD 합성 다이아몬드는 일부 시편을 제외하고는 거의 대부분 검출된다. 다만 제조회사에 따라서 결함 강도의 차이는 존재한다. CVD 합성 다이아몬드 내에 실리콘과 관련된 결함이 존재하는 것은 여러 원인이 있지만 그 중에서도 CVD 리액터의 내부를 확인할 수 있는 윈도우의 영향이 크다. 이 윈도우는 대부분 실리카(silica)이며 따라서 결정성장 과정 중에 윈도우의 실리카 일부가 식각되면서 CVD 결정 내에 미세하게 포함되는 경우이다.

CVD 합성 다이아몬드는 PL 스펙트럼에서 CVD 방법으로 성장된 다이아몬드에서만 나타나는 특징을 관찰할 수 있다. Figure 10은 CVD 합성 다이아몬드를 측정된 PL 결과이며  $596\text{ nm}$ 와  $597\text{ nm}$ 에서 더블피크가 존재한다.  $596\text{ nm}$ 와  $597\text{ nm}$ 의 더블피크는 CVD 방법으로 성장된 합성 다이아몬드에서만 볼 수 있으며, 천연 다이아몬드와 HPHT 방법으로 성장된 합성 다이아몬드에서는 존재하지 않는다. 때문에 이 더블피크의 존재는 CVD 합성 다이아몬드임을 알 수 있는 강력한 증거이다. 더불어  $596\text{ nm}$ 와  $597\text{ nm}$ 의 더블피크는 고온고압 또는 열처리를 거치면서 사라지기 때문에  $596\text{ nm}$ 와  $597\text{ nm}$ 의 더

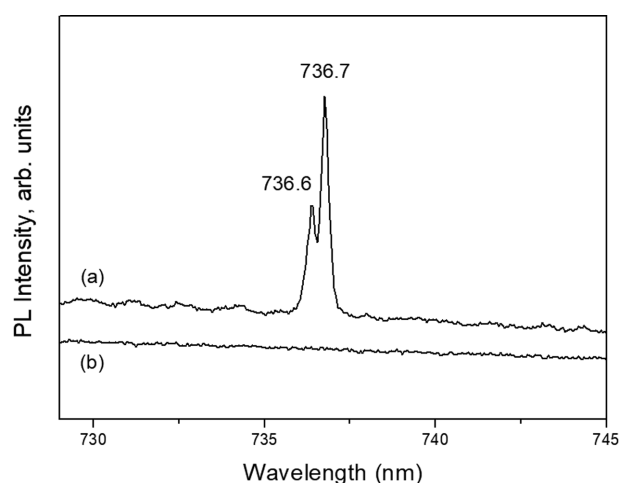


Fig. 9. The photoluminescence spectra of CVD-grown diamond at liquid helium temperature shows SiV- center at  $736.6$  and  $736.7\text{ nm}$ . (a) CVD Laboratory-grown diamond; (b) Natural diamond (type Ia) [by Hanmi Lab.].

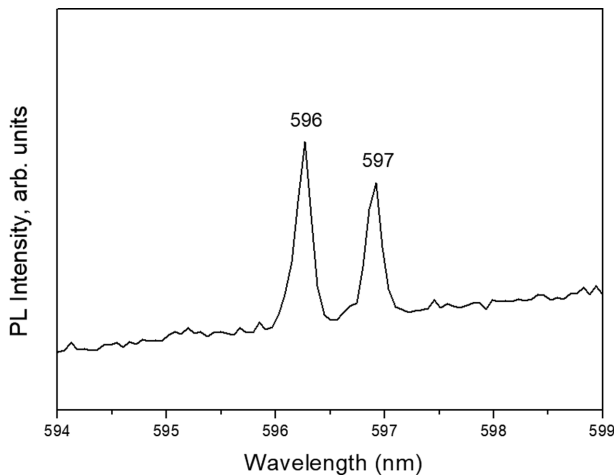


Fig. 10. The emission at 596 and 597 nm doublet is a strong indicator of CVD growth and would be annealed out at very high temperature [by Hanmi Lab.].

블피크의 존재 여부에 따라 결정성장 후 가열처리가 행해졌는지를 유추할 수 있다. 이처럼 분광분석을 통한 다이아몬드 내 원자 레벨 단위 결함들의 해석은 천연 다이아몬드와 합성 다이아몬드의 감별 및 처리 유무를 유추하는데 중요한 정보를 제공한다. 결정성장 기술은 계속해서 향상되어 왔기에 향후의 보석용 합성 다이아몬드 결정 내 존재하는 원자 레벨 단위 결함들의 특징을 꾸준히 보완하는 연구도 반드시 필요하다.

### 3. 결 론

코로나 팬데믹과 러시아와 우크라이나 전쟁의 영향, 인도 현지의 다이아몬드 연마 인건비의 상승 등으로 천연 다이아몬드 가격이 상승하고 있다. 반대급부로 합성 다이아몬드가 대체제로 각광 받고 있고 합성 다이아몬드를 활용한 주얼리 생산 및 판매량이 증가하고 있다. 과거 수년 동안 보석 감정의 초점이 명시되지 않은 합성 다이아몬드로부터 천연 다이아몬드를 구별해 내는데 있었다면 현재는 일부분 반대 방향의 경우도 발견된다. 합성 다이아몬드 주얼리에 천연 다이아몬드가 섞여 있는 경우가 발생하고 있다. 이는 천연 다이아몬드와 합성 다이아몬드를 모두 생산하고 연마하는 업체가 증가하고 있기 때문이며, 이러한 현상은 앞으로도 계속될 것으로 보인다. 과거의 경우 HPHT 합성 다이아몬드가 주를 이뤘다면 2020년대에 들어와 CVD 합성 다이아몬드 성장기술의 놀라운 약진으로 다이아몬드 시장의 점유율을 늘리고 있다. 반면 생산능력 증가와 기술의 발전은 가격경쟁을 불러왔고 가격경쟁으로 인한 유통가격의 하락은 제조업체의 마진 축소를 야기시키고 있다. 그럼에도 유통가격의 인하는 소비자에게 합성 다이아몬드의 관심을 상승

시키는 기폭제가 될 것이고 그 중심에는 MZ세대가 있을 것이다.

### References

- [1] T. Poon, C. Lo and B. Law, "Mixing of natural diamonds with HPHT synthetic melee", *Gems & Gemology* 52 (2016) 416.
- [2] H.M. Choi, "Hot issue: Synthetic diamond", *Jewelry & Watch Magazine* 267 (2017) 57.
- [3] H.M. Choi, Y.C. Kim and J.W. Seok, "Recent trends of gem-quality colorless synthetic diamonds", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 27 (2017) 149.
- [4] S. Eaton-Magana, "Gemological analysis of Lightbox CVD-grown 'white' diamonds", *Gems & Gemology* 54 (2018) 437.
- [5] H.M. Choi, Y.C. kim, M.K. Lee and J.W. Seok, "Spectroscopic analysis of near colorless/pink/blue synthetic diamonds from Lightbox", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 30 (2020) 21.
- [6] Rapaport News, Size the key factor for lab-grown buyers: Survey (2022) <https://www.diamonds.net/News/NewsItem.aspx?ArticleID=68508&ArticleTitle=Size%2bthe%2bKey%2bFactor%2bfor%2bLab-Grown%2bBuyers%253a%2bSurvey>.
- [7] J. Freedman, De Beers lifts prices of smaller diamonds, *Internet News* (2022) <https://www.diamonds.net/News/NewsItem.aspx?ArticleID=68771&ArticleTitle=De%2bBeers%2bLifts%2bPrices%2bof%2bSmaller%2bDiamonds>.
- [8] J. Freedman, LVMH invests in Lab-grown producer Luxix, *Internet News* (2022) <https://www.diamonds.net/News/NewsItem.aspx?ArticleID=68775&ArticleTitle=LVMH%2bInvests%2bin%2bLab-Grown%2bProducer%2bLuxix>.
- [9] W. Wang, S. Persaud and E. Myagkaya, "New record size for CVD laboratory-grown diamond", *Gems & Gemology*, 58 (2022) 54.
- [10] Rapaport News, IGI grades 'world's largest' lab-grown diamond (2022) <https://www.diamonds.net/News/NewsItem.aspx?ArticleID=68776&ArticleTitle=IGI%2bGrades%2b%25e2%2580%2598World%25e2%2580%2599s%2bLargest%25e2%2580%2599%2bLab-Grown%2bDiamond>.
- [11] O. Linde, S. Kravchenko, A. Epstein and K. Rentmeesters, *The global diamond industry 2020-21*, Bain & Company report (2021).
- [12] A.H. Shen and J.C.C. Yuan, "Advancement of Lab-grown diamond production (in China) and its future", *The 7<sup>th</sup> International Gem & Jewelry Conference (GIT2021/2022)* (2022).
- [13] J. Freedman, Diamond Foundry value hits \$1.8b after fundraising, *Internet News* (2022) <https://www.diamonds.net/News/NewsItem.aspx?ArticleID=66326&ArticleTitle=Diamond%2bFoundry%2bValue%2bHits%2b%25241.8B%2bAfter%2bFundraising>.
- [14] A. Prabhakar, India: An emerging source for lab-grown diamonds, jewelry, *National Jeweler Internet News* (2022) <https://www.nationaljeweler.com/articles/10703-india-an-emerging-source-for-lab-grown-diamonds-jewelry>.

- [15] B. Branstrator, Measuring the lab-grown diamond market: size, growth, and future opportunities, National Jeweler Internet News (2022) <https://www.nationaljeweler.com/articles/10624-measuring-the-lab-grown-diamond-market-size-growth-and-future-opportunities>.
- [16] B. Bates, Lightbox to offer bigger, better diamonds, JCK Online News (2022) <https://www.jckonline.com/editorial-article/lightbox-bigger-better-diamonds/>.
- [17] H.M. Choi and Y.C. Kim, "Characteristics of gem-quality synthetic diamond from New Diamond Technology in Russia", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 25 (2015) 188.
- [18] W. Wang, U.F.S. D'Haenens-Johansson, P. Johnson, K.S. Moe, E. Emerson, M.E. Newton and T.M. Moses, "CVD synthetic diamonds from Gemesis Corp.", Gems & Gemology 48 (2012) 80.
- [19] F.D. Weerdts and I.N. Kupriyanov, "Report of the influence of HPHT annealing on the 3107 cm hydrogen related absorption peak in natural type Ia diamonds", Diamond and Related Materials 11 (2002) 714.
- [20] K.S. Moe, U.F.S. D'Haenens-Johansson and W. Wang, "LPHT-annealed pink CVD synthetic diamonds", Gems & Gemology 51 (2015) 182.