

A study on products utilizing UV-C LED driven photocatalytic purification and disinfection technology

Chang Hae Park[†]

Department of Convergence Design International Graduate School, Hanseo University, Seosan 31962, Korea

(Received February 6, 2026)

(Revised February 24, 2026)

(Accepted February 26, 2026)

Abstract As air and water quality continue to deteriorate, the market is increasingly saturated with products whose effectiveness has not been clearly verified. In response, this project aims to develop a future-oriented, compact, and modular product with enhanced performance and clearly demonstrated effectiveness. To realize this objective, the project will place emphasis on the development of UV-C LED device and process element technologies, together with high-efficiency and miniaturization technologies based on photocatalytic applications. Through this research, we present 'Air purification and disinfection product' study involving the development of a UV-C LED device with a 300 nm emission wavelength and the achievement of a 70 % acetaldehyde removal rate.

Key words UV-C, Photocatalyst, Sterilization, Purification, Environmental technology

UV-C LED를 활용한 광촉매 정화살균기술 적용 제품 연구

박창해[†]

한서대학교 국제디자인융합대학원 디자인공학융합학과, 서산, 31962

(2026년 2월 6일 접수)

(2026년 2월 24일 심사완료)

(2026년 2월 26일 게재확정)

요약 점차 대기 및 수질 등 환경이 악화되고 있는 상황에서, 효과가 명확히 검증되지 않은 제품들이 범람하고 있는 것이 현실이다. 이에 본 과제는 성능이 강화되고 효과가 명확한 미래지향적 콤팩트 모듈형 제품을 개발하는 방향으로 접근하고자 한다. 이를 실현하기 위한 핵심 기술로서 UV-C LED 소자 및 공정 요소 기술 개발과 광촉매 기술을 활용한 고효율·컴팩트화 기술개발을 중점적으로 추진하였다. 이를 통해 UVC led 광파장이 300 nm인 소자를 개발하고 아세트알데이드 제거율을 70 % 달성한 공기정화살균 제품 연구를 제시하였다.

1. 서론

미래 사용자 라이프스타일 및 환경의 사회적 이슈 분위기에 편성해, UV-C LED 기술과 광촉매 기술과 미래 환경에 대한 제품선행디자인 개발이 필요해 지고 있다 [1,2]. 살균·소독 기능을 갖춘 UV-LED를 활용하여 살균기, 에어컨, 냉장고, 청소기, 칫솔 보관함, 정수기, 공기청정기, 비데, 신발장, 자동차 등에 적용하여 가정 내의 건강을 유지할 수 있으며, 다양한 장점을 가진 UV LED 광원은 다양한 응용 분야에서 발전 가능성을 더욱 높여

줄 것으로 기대되며, 특히 살균/정화를 위한 UV-C 영역 제품의 수요가 증가할 것으로 기대되고 있다[3-5].

LED는 Table 1과 같이 재료 및 구성 물질에 따라 가시광선(Visible)뿐만 아니라 적외선(IR), 자외선(UV) 영역에 이르는 폭넓은 파장의 빛을 낸다. 가시광선 LED (Visible-LED)는 휴대폰, 자동차, 신호등, 표시소자, 조명에 활용되고, 적외선 LED(IR-LED)는 광통신, 리모콘, 계측기기 등에 활용되고, 자외선 LED(UV-LED)는 의료, 바이오, 환경, 국방 산업 등에 적용 되고 있다. 특히, 자외선 LED는 100 nm에서 400 nm 파장을 방출하여 소형화, 우수한 성능 및 저비용과 같은 특징을 가지고 있고, 자외선 LED는 파장에 따라 UV-A(400~315 nm), UV-B(315~280 nm), UV-C(280~100 nm)로 구분되며,

[†]Corresponding author
E-mail: chpark@hanseo.ac.kr

Table 1
A comparative study on the characteristics of UV LED light sources and mercury UV lamps

Category	UV LED (UVA)	UV LED (UVB/UVC)	Mercury UV Lamp
Emission Characteristics	Directional emission (facilitates compact, large-area integration)		Omnidirectional emission
Wavelength Control	Adjustable via semiconductor composition control		Limited by discharge gas and electronic transition levels
Wavelength Characteristics	Long wavelength (low energy)		Short wavelength (high energy)
Heat Generation	Low (allows operation without cooling system)		High (requires cooling system)
Environmental Impact	No hazardous substances		Uses toxic mercury gas
Durability	High (solid-state device)		Low (glass-based structure)
Lifetime	~20,000 hours or more		~9,000 hours
Response Speed	Instant on/off possible		Requires warm-up time
Design Flexibility	Enables miniaturization and diverse designs		Limited in size and shape
Power Consumption	4~20 W	5~35 W	5~60 W
Sterilization Efficiency	High	Very high	High
Optical Efficiency	~25 %	~5%	15~45 %
Cost (USD)	\$5~150	\$500~3,000	\$2~500

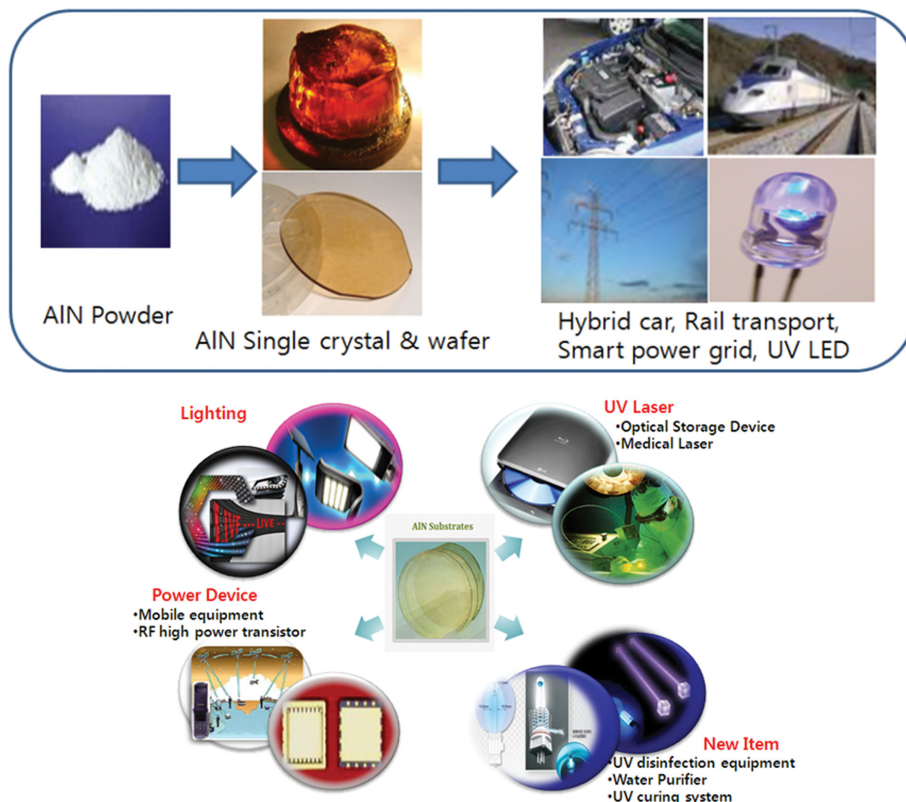


Fig. 1. Synthesis and applications of AlN single crystals.

각각의 범주에 따라 응용분야가 다르다[6,7].
특히 Fig. 1과 같이 살균·소독 기능을 갖춘 UV-LED를 활용하여 살균기, 에어컨, 냉장고, 청소기, 칫솔 보관함, 정수기, 공기청정기, 비데, 신발장, 자동차 등에 적용하여 가정 내의 건강을 유지할 수 있으며, 다양한 장점을 가진

UV LED 광원은 다양한 응용 분야에서 발전 가능성을 더욱 높여줄 것으로 기대되며, 특히 살균/정화를 위한 UVC 영역 제품의 수요가 증가할 것으로 기대된다[8,9].
이번 연구에서는 광전소자 및 전력소자용 소재인 AlN 단결정을 개발하고, AlN 기반 UV-C LED의 기관/기반

재료로 활용하려고 한다.

이러한 UV광을 효율적으로 발광하는 초소형 UV-C LED를 개발, 제작하고 여기서 발생하는 UV-C 영역의 파장광을 이용하여 극대화된 에너지 광소스를 사용하며, TiO₂ 등과 같은 광촉매 코팅 기술을 이용한 필터를 개발 적용시켜 기존의 공기정화기의 효율을 최대로 올리면서 극도로 소형화 하거나 이를 사용자 편의성이 적용된 형태의 모듈을 개발함으로써 미래환경 수질오염을 방지하는 살균기능을 가진 공기정화살균 제품을 제안한다[10,11].

2. 실험 방법

최우선적으로, AlN 기판 제작용 성장 요소 및 조건 확립 시험 및 1~2인치 성장 시험을 위해 부자재 처리로와 성장로를 개발하였다. AlN 단결정 제작에 필수 장비인 성장로의 경우 매우 고온형의 분위기로 사용하고, 물리적 성장 조건인 높은 온도 구배를 필요로 하므로 전기로 가동되는 유도가열로를 주로 사용하게 되며 이를 위해 성장로의 설계 또한 매우 중요하다.

1~2"급 AlN 단결정 성장 시험을 위한 조건실험으로 기존 자료를 바탕으로 실험의 방향에 따라 기본적인 조건인 온도, 압력, 코일 이송 속도, 도가니 구조, 도가니의 간격 변화, 내부의 증발기체 분압 등을 변화 시켜가면서 진행됨, 주로 온도 변화, 핫존 위치 변화, 분위기 압력, 도가니의 구조 변화에 중점을 두고 진행하였다[12].

Figure 2와 같이 이러한 조건 실험을 통해 예비 실험과 본 성장 과정을 수행하였다. 예비 실험은 본 성장에 앞서 수행되는 사전 실험으로, 단결정 성장을 위한 도가니 세트 준비 과정에서 발생하는 다양한 변수를 사전에 평가하는 것을 목적으로 한다. 도가니 및 매개체 간의 전기전도도와 열전도도의 차이, 구성물 간의 상관관계, 내부 원료의 양과 공간 배치, 사용된 펠트의 단열 성능 차이 등으로 인해 단일 조건으로는 안정적인 성장이 어렵다. 이에 따라 이러한 가변적인 요소들을 통합하여

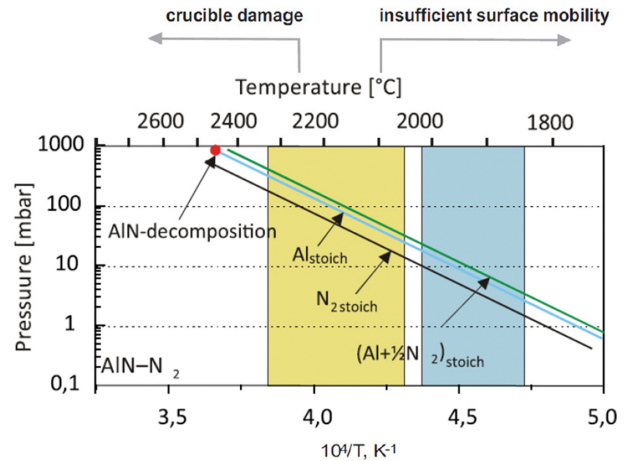


Fig. 3. Reaction and partial pressure conditions of AlN depending on temperature and pressure.

1~2개의 대표 변수로 단순화하고, 본 성장과 동일한 구성의 도가니 세트를 사용하여 단기간 성장 공정을 사전에 수행하였다. 이 예비 실험은 시드가 성장할 영역의 온도 구배와 설정 온도 및 성장 조건의 적절성을 미리 평가하기 위해 매 성장 이전에 반복적으로 진행되었다.

이를 통해 Fig. 3과 같이 본 성장 과정에서 발생할 수 있는 불규칙성을 최소화하고 성장 공정의 반복성과 재현성을 확보하였으며, 전반적으로 매우 효율적인 결과를 확인하였다. 조건 실험을 통해 확립된 성장 조건을 이용하여 예비 실험으로 변동 요소들을 대부분 제거하고 이를 고정요소로 보정하여 예비 실험에서의 동일한 자재와 구성을 통해 성장시킬 종자 결정을 내부에 부착시키고 24시간 단위(24, 48, 72, 96, 120, 168시간)의 일정 시간으로 성장을 진행함, 조건 실험에서 구조가 많이 변동된 경우 짧은 시간으로, 그 외 유사한 조건이나, 짧은 시간으로 성장이 성공한 경우 긴 시간으로 성장 진행하여 Table 2와 Fig. 4와 같은 결과를 평가하였다.

이 과정을 통해 개발된 AlN을 기반으로, Fig. 5와 같이 측각(Orientation) → 절단(Slicing) → 원형가공(Round cutting) → 들레가공(Edge gridding) → 그라인딩(Grinding)



Fig. 2. Auxiliary material processing and growth furnaces for single crystal growth.

Table 2
Growth process parameters for AlN crystal growth

Category	Conditions
Growth Material	AlN powder (Tokuyama, H-Grade, $D_{50} \approx 1 \mu\text{m}$), self-processed powder ($D_{50} \approx 100 \mu\text{m}$, 4~6 N)
Growth Method	Induction heating (custom-built, 30 kW)
Growth Temperature	1,900~2,200°C
Growth Chamber Pressure	0.5~760 Torr
Ambient Gas	N_2 (supply rate: 10~1,000 sccm)
Crystal Growth Rate	0~4.0 mm/day

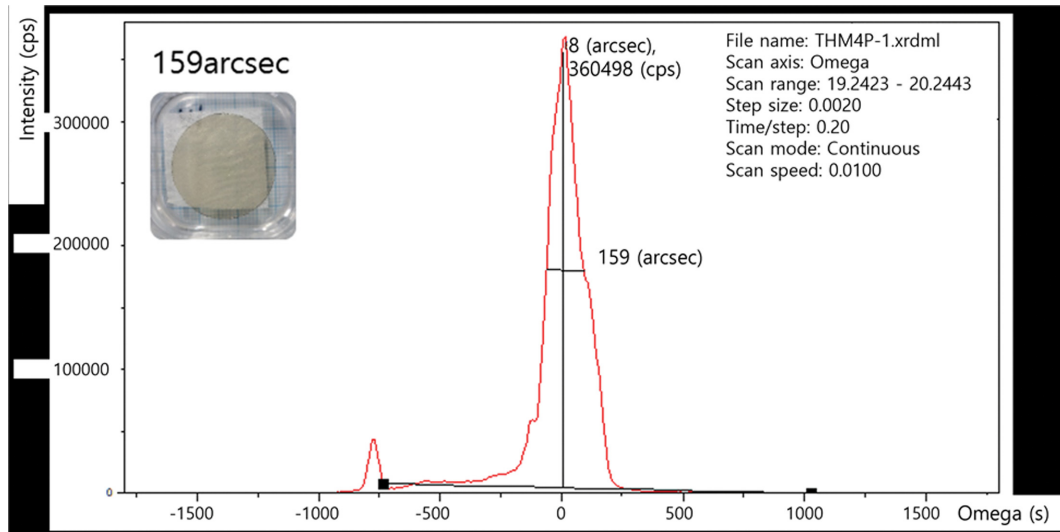


Fig. 4. Fabricated AlN single crystal and its full width at half maximum (FWHM) value (159 arcsec).

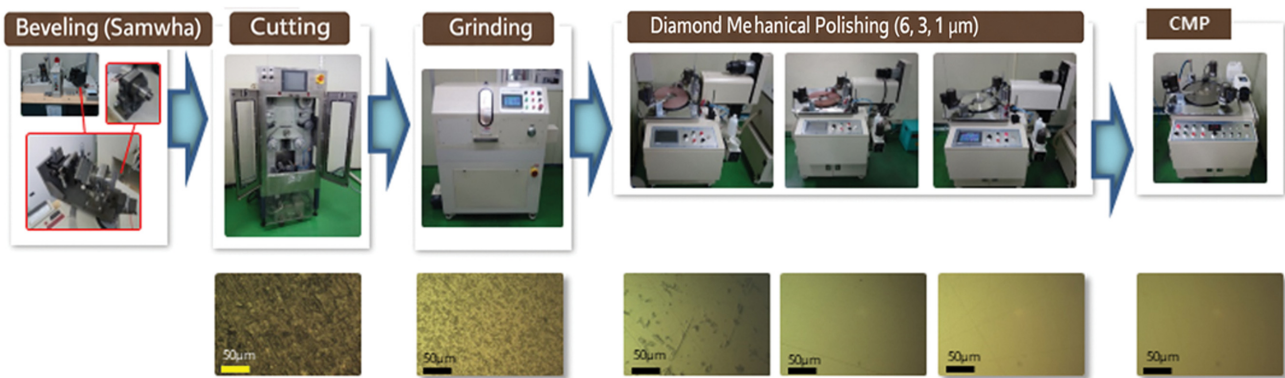


Fig. 5. Processing processes and facilities for grown single crystals.

→ 연마(DMP, diamond mechanical polishing) → 화학 연마(CMP, chemical mechanical polishing) 연마과정을 거쳐 UV LED를 만들었다.

3. 결과 및 고찰

AlN 기반 AlGaN UV-C LED를 Fig. 6과 같이 소자를 제작하여 기본적인 전기적/광학적 특성을 평가하였다. Probe station을 사용하여 상온에서 -15 V부터 10 V까지

전압을 걸어 측정한 UVC LED의 I-V 특성을 Fig. 7(좌)에서 볼 수 있음, 상용화된 UV-C LED와 비교하여 20 mA에서 forward voltage와 leakage current는 9.46 V, 108 A로 높았다.

제작된 UV-C LED의 광학적 특성은 Fig. 7(우)의 EL 측정 시스템으로 평가함. 발광파장의 peak wavelength 값은 평균 273 nm로 측정되었다.

다음으로 TiO_2 를 이용한 유해물질의 광분해 반응활성 연구를 통해 UV-C와 반응하여 공기를 살균할 수 있는 광촉매 개발을 진행하였다. 현재 TiO_2 는 주된 광촉매 물

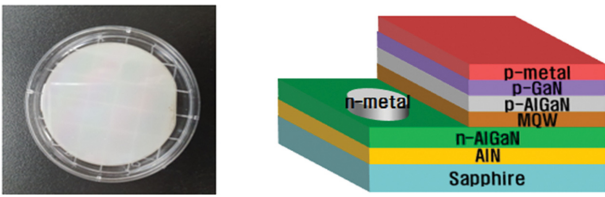


Fig. 6. (Left) 2-inch UV-C LED wafer and (right) schematic illustration of the fabricated UV-C LED.

질로 널리 알려져 있고 다양한 분야에서 광촉매 반응이 적용되고 있으며, 광촉매 반응에서 반응을 일으키는 매개체인 UV 광원은 오염물질의 직접적인 photolysis 반응이 일어날 수 있다. 대부분의 유기물질들은 250 nm 이하의 파장을 강하게 흡수하는 것으로 알려져 있다. 이러한 반응에 의해 광화학 스모그 등 대기환경의 화학적

반응에 에너지원으로 작용하며 유기물질들을 변화시킨다. 본 과제의 광촉매 적용을 확대하기 위하여 다음으로 UV 광원을 UVC LED chip에 적용시켜 제조한 광촉매 반응기에서 pyrex tube, honeycomb 촉매 연구를 수행하였다.

광촉매 필터는 고에너지의 UV 파장에 반응하여 공기 중의 유해성 성분과 반응하여 분해함으로써 정화를 하는 기능이 있으며, UV-C의 광을 통해서 세균 또는 바이러스의 세포를 괴멸시켜 살균의 효과가 있다. 광촉매에 의한 공기살균 효과를 증대시키기 위해 설계구조를 Table 3과 같이 개선하였다.

Figure 8은 개발된 UV-C LED를 활용하여 적용될 수 있는 기능을 중심으로 산업 분야를 보여주고 있으며, 이를 중심으로 광촉매 기술과 UV-C LED를 적용한 공기살균 분야 적용으로 방향을 확정하였다.

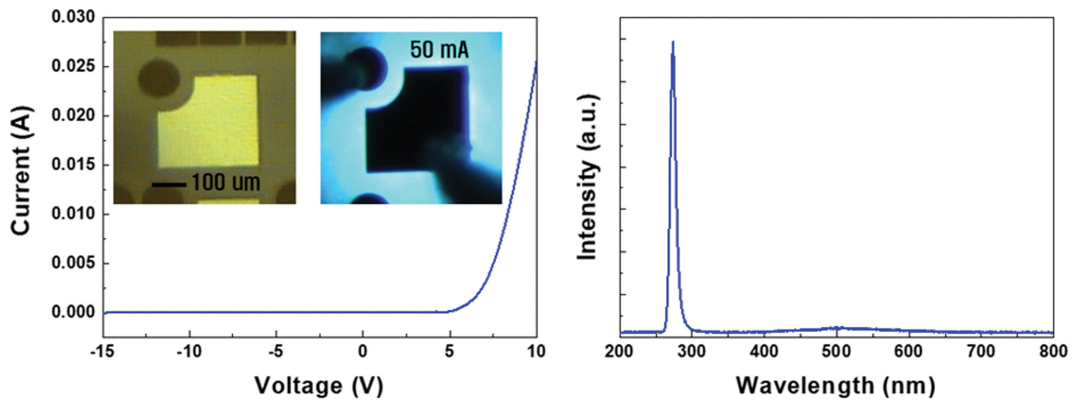


Fig. 7. Results of I-V and EL characteristics of the UV-C LED.

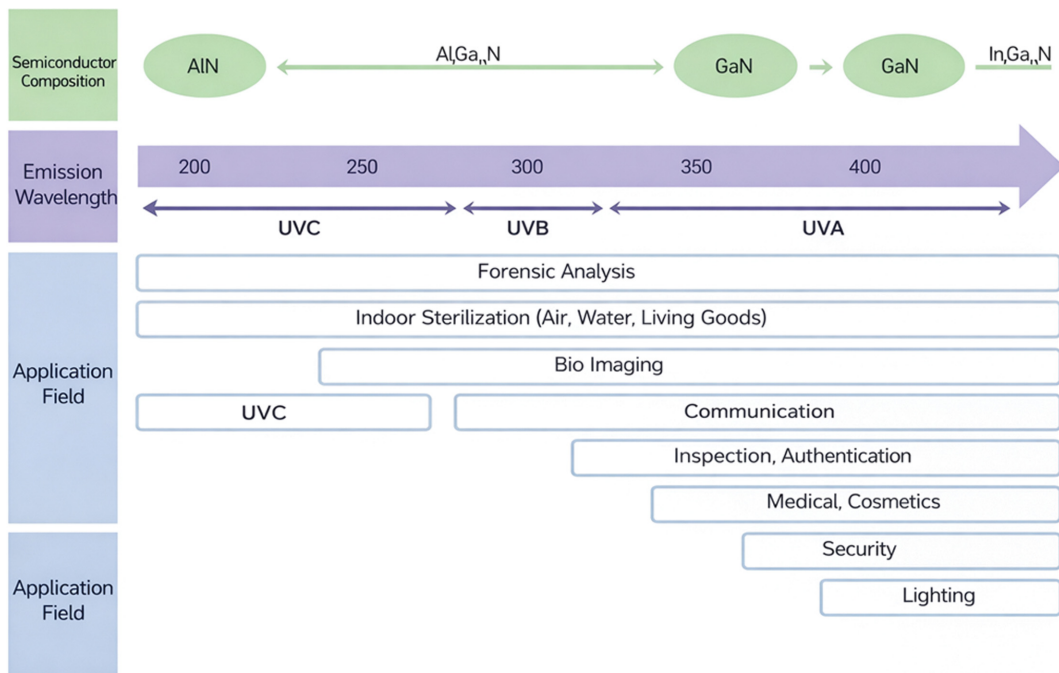
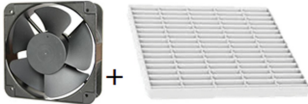
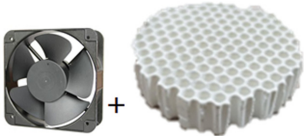

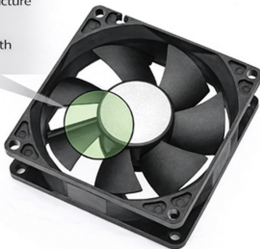

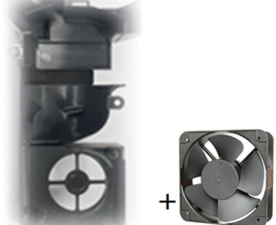


Fig. 8. Application fields of UV LEDs by type.

Table 3
Comparison of conventional photocatalytic systems and the direction of proposed improvements

Structure and Characteristics of Existing Products			
	Structure	Characteristics	
Existing Product	Fan + HEPA filter 	<ul style="list-style-type: none"> The low porosity of the HEPA filter significantly degrades airflow efficiency. Filtration performance is restricted to a limited range of target contaminants. 	
Recent Product	Fan + Strainer-Type Photocatalyst 	<ul style="list-style-type: none"> Independent airflow mechanisms further reduce overall system efficiency. Limited UV-C exposure area and internal honeycomb-only interaction result in decreased sterilization efficiency. 	
Design Direction of Photocatalyst Filter Structure			
	Structure	Characteristics	
Direction for Improvement	<p>Fan-Type Photocatalyst</p> <ul style="list-style-type: none"> Cooling fan structure Blower-type structure Turbine-type structure Applicable to various fan configurations 	<p>Blower-Type Structure</p> <ul style="list-style-type: none"> Application of a blower-type structure Photocatalyst directly coated on the fan Integration of a photocatalyst filter with the airflow system  <p>Fan + Strainer-Type Photocatalyst</p> <ul style="list-style-type: none"> Application of cooling fan structure Direct TiO₂ coating on fan Integration of airflow device with photocatalyst filter 	<ul style="list-style-type: none"> The photocatalyst is directly integrated into the fan, resulting in very high additional airflow efficiency. Optimization is required after configuring various fan structures and blade geometries. The structure should be designed to maximize the contact area between the photocatalyst and the purification target. This approach is the most advantageous if sufficient purification efficiency can be achieved.
	<p>High-Porosity Honeycomb-Type Photocatalyst</p>	<p>High Porosity Honeycomb-Type Photocatalyst</p> <ul style="list-style-type: none"> High Porosity Honeycomb Structure Photocatalyst Integration 	<ul style="list-style-type: none"> The contact area between the photocatalyst and the target contaminants is significantly increased. High porosity ensures adequate airflow efficiency. The UV light exposure interface must be carefully designed to maximize interaction efficiency.
	<p>Direct Photocatalyst Coating on the Inner Surface of the Structure</p>		<ul style="list-style-type: none"> The structural component itself functions as the photocatalyst, making the system cost-effective. Structurally, a wide contact area with the purification target must be ensured. Improvements in photocatalyst coating methods are required.

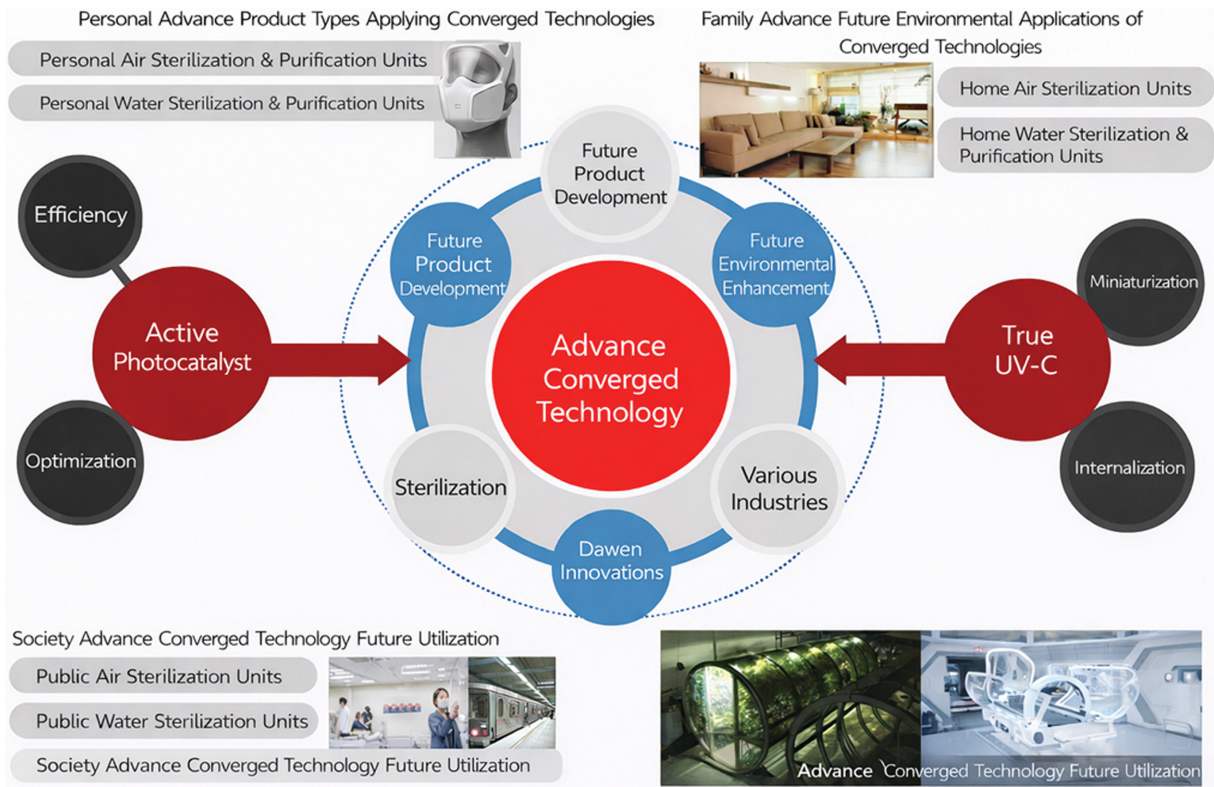


Fig. 9. Design direction.

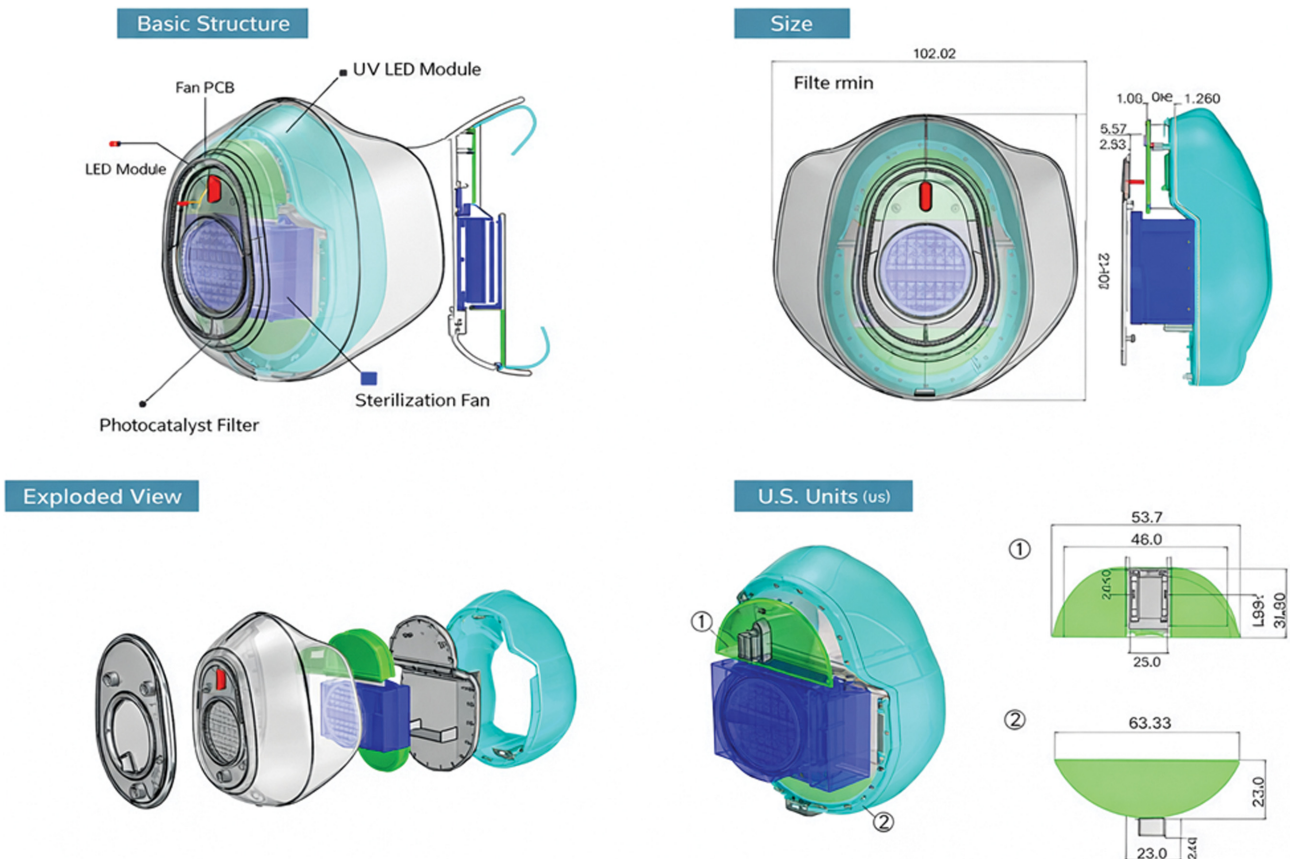


Fig. 10. Structural design of a personal air sterilization mask.

사용자 중심적인 제품개발을 위해 사용자 시나리오 분석을 진행하였다. 이를 통해 공기살균 마스크와 가정용 공기살균제품에서 필요로 하는 디자인적 요소를 도출하여 개발에 적용하였다.

Figure 9와 같이 마지막으로 최종 제품은 개인용 공기살균마스크와 가정용 살균 공기청정기로 개발하였다.

개인용 공기살균마스크는 UV-C LED를 활용하여 허니컴 구조의 광촉매 부품을 활용하여 숨을 쉬는 동시에 원활한 공기순환과 살균이 이루어지도록 Fig. 10과 같이 구조 설계를 하였다.

UV-C LED를 활용한 광촉매 필터 구조설계 방식의 개선점을 적용하여, 고개구율 허니컴형 광촉매 방식을 사용하여 광촉매와 정화 대상과의 접촉면을 넓게하여 정화효과를 유리하도록 하였으며 UV광의 접촉면이 효율적으로 이루어지도록 설계에 적용하였다.

초기 구조설계를 바탕으로 설계 검토와 전문가 협의를 통해 Fig. 11과 같이 최종적인 개인용 공기살균마스크 디자인을 수정하고 개선하여 제시하였다. 개인형 마스크 제품의 사업성, 소비자 사용성의 만족도 극대화를 위해 개선 디자인 진행하였고, 일체형구조로 변경을 진행하였으며, 직선형의 흡기방향으로 변경하여 효율성을 극대화하였다. 또한, 얼굴과 두상을 감싸는 밴드의 두께를 두껍게 수정하고 착용방식의 간편함을 위한 밴드 외형으로 수정하였다.

가정용 살균 공기청정기는 개인용 설계구조를 확장하여 창문에 최적화된 창로결합형 구조로 Fig. 12와 같이

진행하였다.

UV-C LED를 활용한 광촉매 필터 구조설계 방식의 개선점을 적용하여, 블로우 구조의 팬에 직접 광촉매가 포함되어 추가의 송풍효율이 매우 높도록 하였으며, 광촉매와 정화 대상과의 접촉면이 넓도록 구조 설계를 진행하였다. 그리고 허니컴 구조를 이용하여, UV광의 접촉면이 효율적이 되도록 Fig. 13과 같이 설계하였다.

패밀리 대상 창호형 공기청정기 제품의 사업성, 소비자 사용성의 만족도 극대화를 위한 개선 디자인 진행을 진행하였다. 제품의 조립, 교체 시 용이성을 위한 구조로 개선을 진행하였으며, 내외부의 온도차이로 인해 발생하는 습기, 해충의 유입 등에 대응할 수 있는 배수 및 배선구조 반영하여 최종적인 제품을 제시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는, 점차로 대기 및 수질 등의 환경이 악화되어 가고 있는 실정으로 현재 효과가 확실하지 못한 제품들이 범람하는 현실에서 성능이 강화되어 효과가 확실한 공기살균 제품을 개인용 및 가정용 부문에서 활용할 수 있도록 제시하였다. 이를 위해 UV-C LED 개발을 위한 AIN 단결정 개발 연구, 공기 살균 효과를 이끌어 낼 수 있는 파장 300 nm 이하의 UV-C LED 개발이 같이 동반되었으며, 효율적인 공기살균효과를 유도하고 효과를 극대화 시키기 위한 TiO² 광분해 반응활성 연구



Fig. 13. Final design of a window-integrated home air purification and sterilization system.

를 수반하여 공기살균정화를 위한 기술적 가능성을 확보하였다. 이를 활용하여 개인용 공기살균마스크와 가정용 살균 공기청정기를 제시함으로써, 기술적으로는 공기살균효과 제고와 사회적으로는 건강 문제에서 발생하는 추가의 의료비용을 절감하여 엄청난 경제적 효과를 가질 수 있다고 판단한다.

감사의 글

본 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원(20006767)을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] W.K. Jo, “New generation energy-efficient light source for photocatalysis: LEDs for environmental applications”, *Ind. Eng. Chem. Res.* 53 (2014) 4012.
- [2] G. Matafonova and V. Batoev, “Recent advances in application of UV-LEDs for water treatment”, *Water Res.* 132 (2018) 177.
- [3] S. Rouhani and F. Taghipour, “Modeling of UV-LED photocatalytic reactors for air treatment and design optimization”, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 425 (2022) Article 113689, 1.
- [4] V.K. Sharma and H.V. Demir, “Bright future of deep-ultraviolet photonics: Emerging UVC chip-scale light-source technology platforms, benchmarking, challenges, and outlook for UV disinfection”, *ACS Photonics* 9 (2022) 1513.
- [5] M. Raeiszadeh and B. Adeli, “A critical review on ultraviolet disinfection systems against COVID-19 outbreak: Applicability, validation, and safety considerations”, *ACS Photonics* 7 (2020) 2941.
- [6] T.-C. Hsu, Y.-T. Teng, Y.-W. Yeh, X. Fan, K.-H. Chu, S.-H. Lin, K.-K. Yeh, P.-T. Lee, Y. Lin, Z. Chen, T. Wu and H.-C. Kuo, “Perspectives on UVC LED: Its progress and application”, *Photonics* 8 (2021) Article 196, 1.
- [7] W.-K. Jo and R.J. Tayade, “New generation energy-efficient light source for photocatalysis: LEDs for environmental applications”, *Ind. Eng. Chem. Res.* 53(6) (2014) 2073.
- [8] M. Raeiszadeh and B. Adeli, “A critical review on ultraviolet disinfection systems against COVID-19 outbreak: Applicability, validation, and safety considerations”, *ACS Photonics* 7 (2020) 2941.
- [9] T. Nicolau, M. Sanches, D. Costa and M.R. Teixeira, “A comprehensive analysis of the UVC LEDs’ applications and decontamination capability”, *Appl. Sci.* 12 (2022) Article 3461, 1.
- [10] Z. Han, W. Chang and P. Chiang, “Preparation of TiO₂-coated polyester fiber filter by spray coating for photocatalytic oxidation of formaldehyde”, *Aerosol Air Qual. Res.* 12 (2012) 132.
- [11] N. Yao and colleagues, “Investigation of the performance of TiO₂ photocatalytic coatings for indoor air purification”, *Coatings* 10 (2010) 1.
- [12] T. Nicolau, N. Gomes Filho, J. Padrão and A. Zille, “A comprehensive analysis of the UVC LEDs’ applications and decontamination capability”, *Materials* 15 (2022) Article 2854, 3.