

# 집진기 미세먼지의 복합제진효율 평가방법

강일서<sup>1</sup>, 이영수<sup>2</sup>, 김동현<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>금성백조건설 안전관리, <sup>2</sup>호서대학교 안전환경기술융합 대학원 학생, <sup>3</sup>호서대학교 안전보건학과 교수

## How to Evaluate the Combined Dust Removal Efficiency of Fine Dust in the Dust Collector

Hong-Nam Jean<sup>1</sup>, Kil-Seo Hong<sup>2</sup>, Dong-Hyun Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Safety Management Kumsung Beakjoe Construction CORP., Hoseo University

<sup>2</sup>Student, Division of Safety and Environment technology Convergence, Hoseo University

<sup>3</sup>Professor, Division of Safety and Health, Hoseo University

요 약 본 연구에서는 공장 및 대형 시설에서 사용되고 있는 전기집진장치에 대하여 미세분진이 효율적으로 얼마나 제거 될 수 있는지에 대한 내용이다. 미세분진 제거 효율을 평가한 결과는 다음과 같다. 10,000 V 에서는 Efficiency method I 은 68.1 % 를 보였고, Efficiency method II 는 58.6 %로 Efficiency method I 의 효율 보다 낮은 효율을 보였다. 5,000 V 에서는 Efficiency method I 은 57.6 %를 보였고, Efficiency method II 는 51.6 %로 Efficiency method I 보다 낮은 효율을 보였다. 2,500 V 에서는 Efficiency method I 은 50.3 %를 보였고, Efficiency method II 는 24.4 %로 Efficiency method I 보다 낮은 효율을 보였다. Efficiency method I 의 경우 전 분진농도와 필터 통과 후 분진농도를 활용하여 계산한 효율이다. Efficiency method II 는 필터 후의 공기와 오염된 공기가 혼합되는 환경에서 조금 더 정확한 효율을 측정하기 위해 Efficiency method II 를 계산하였다. Efficiency method II 는 Efficiency method I 보다 낮은 효율을 나타내었다. 전기집진장치 실험 결과 10,000 V에서 집진 성능이 가장 높게 나타났으며, 그 다음 5,000 V, 2,500 V의 순을 보였다.

주제어 : 전기집진장치, 미세분진, 복합 효율 평가, 제진효율, 집진성능

Abstract It is about how much fine dust can be efficiently removed with respect to the electric dust collector used in factories and large facilities. The results of evaluating the fine dust removal efficiency are as follows. At 10,000 V, Efficiency method I showed 68.1 %, and Efficiency method II was 58.6 %, which was lower than that of Efficiency method I. At 5,000 V, Efficiency method I showed 57.6%, and Efficiency method II showed 51.6%, which was lower than Efficiency method I. At 2,500 V, Efficiency method I showed 50.3%, and Efficiency method II showed 24.4%, which was lower than Efficiency method I. In case of Efficiency method I, it is the efficiency calculated by using the dust concentration before and after passing through the filter. Efficiency method II calculated Efficiency method II to measure the efficiency a little more accurately in the environment where the air after the filter and the polluted air are mixed. Efficiency method II showed lower efficiency than Efficiency method I. As a result of the electrostatic precipitator test, the dust collecting performance was highest at 10,000 V, followed by 5,000 V and 2,500 V in that order.

Key Words : Electrostatic precipitator, Fine dust, Composite efficiency assessment, Dust removal efficiency, Dust collection performance

\*This research was carried out with the support of the Ministry of Environment's "Chemical Material Safety Management Professional Training Project", and I am deeply grateful for this.

\*Corresponding Author : Dong-Hyun Kim(thomasdh@naver.com)

Received December 25, 2021

Revised February 11, 2022

Accepted February 20, 2022

Published February 28, 2022

## 1. 서론

최근 대기오염에서 미세분진인 PM<sub>2.5</sub>를 2013년 발암성 Group 1으로 물질분류에 지정하여 미세분진에 대한 경각심을 증가시키고 있으며, 디젤 분진이 마우스에 미치는 영향 등에 관한 연구[1]를 진행하는 등 미세분진의 원인으로 경유 엔진의 배기 가스 물질도 Group 1에 포함되고 있다[2].

최근 실내 공기질 개선을 위한 CNN 기반 공조 덕트 청소 로봇의 에 대한 연구[3], 공기 순습도가 공조용 가습소자의 가습성능에 미치는 영향[4], 이끼를 활용한 공기정화 검증 시스템 제작[5] 등이 있다. 또한 환경에서 저감 방안에 대한 기술로 Biomass Gasification 공정에 발생하는 Tar 제거연구[6], 전기 방식에 따른 나노 복합소재의 제조, 유기화합물의 흡착 효과[7], 건설현장 미세먼지 억제제를 위한 드론의 물 입자 분사 시스템 개발[8] 등이 있었으며, 폐기가스 조성과 적외선 센서 신호영향 연구[9], 아파트 지역 주차장 미세분진 분포에 관한 연구[10], 미세분진 포집에 관련한 연구[11], 금속섬유 필터층에 의한 미세분진 집진 연구[12], Poc부착 싸이클론의 미세분진 제어 연구[13], 황산암모늄을 이용한 전기집진기(ESP)에서의 미세분진 제거[14] 등은 연속적인 분진등 대기 오염물질의 모니터링과 제어 수단으로 활용 가능한 기술개발로 이어지고 있다.

본 연구에서는 기존의 클린룸과 기기, 시설 등에서 에어로졸 제거 고기능성 필터, 사무실, 빌딩, 공장등에서 부유 분진 제거용 필터, 저성능 필터에 대하여 규정(SPS-KACA004-134) [15]에 따른 필터의 분진제거 능력만을 평가하고 있다. 그러나 이러한 방법은 실시간 제거되는 분진량에 대한 평가는 다룰 수 없는 한계점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 실제 상황에서 미세분진을 공기 중에서 효율적으로 얼마나 제거할 수 있는지에 대한 평가방법을 알아보고자 효율 평가를 하였다. 본 연구에서는 공장 및 대형 시설에서 사용되고 있는 전기집진장치에 대하여 미세분진이 효율적으로 얼마나 제거 될 수 있는지에 대한 내용으로 복합제거효율을 평가하고자 일정 공간에서 실제 상황과 같은 조건으로 효율 평가 시에 평가 방법에 따른 차이를 연구하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험기간

본 연구는 2016년 1월 20일부터 2016년 10월 23일까지 호서대학교 벤처산업기업관 209호 안전환경기술실 협실에서 실시하였다.

### 2.2 실험방법

본 연구에서는 필터에 대하여 규정(SPS-KACA004-134) [15]에 따른 필터의 분진제거 능력 평가와는 다르게 챔버(체적 2.25m<sup>3</sup> : 1,500mm×1,500mm×1,000mm)를 제작하여 실시하였다.

본 연구에서 사용할 시험용 분진(dust)은Arizona test dust로 입자크기 0~5 μg 이다. Table 1은 입자의 분포를 나타낸다. Beckman coulter 사에서 분석한 Volume statistics에 대한 내용을 확인할 수 있다.

미국의 powder technology inc(PTI)사에서 제작한 Arizona test dust는 시험용 분체로 전자부품 분진시험, 공기청정기 효율 시 및 필터 효율 시험 등에 널리 사용되고 있다. 구성성분 및 함유량은 표 1과 같다.

Table 1. Ingredients of Arizona Test Dust

Name(Chemical Formula)	No. of CAS	% (by Weight)
Silica (SiO <sub>2</sub> )	14808-60-7	68~76
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1344-28-1	10~15
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1309-37-1	2~5
Sodium hydroxide (Na <sub>2</sub> O)	1313-59-3	2~4
Calcium oxide (CaO)	1305-78-8	2~5
Magnesium oxide (MgO)	1309-48-4	1~2
Titanium oxide (TiO <sub>2</sub> )	13463-67-7	0.5~1.0
Calcium oxide (K <sub>2</sub> O)	12136-45-7	2~5

시험용 분진(arizona test dust)은 Hazards Identification에서 발암성 구분 1A이다. 따라서 본 연구를 진행 시에는 연구자들의 안전한 시험 진행을 위하여 Arizona test dust를 취급 시에는 항상 특급 방진마스크를 착용하고 실험하였다.

본 연구에서 사용하는 전기집진장치는 건식 관형 전기집진장치를 사용하여, 음 코로나를 이용한 집진장치이다. 내부에 3개의 방전극과 집진판으로 구성되어 있는 관형 전기집진장치 Fig. 1과 같다.

표면을 뾰족한 형태로 제작하여 쉽게 코로나 방전이 발생할 수 있도록 설계한 전기집진장치로 방전극의 재질은 스테인레스를 사용하였다. 전기집진장치에 전압은 별도의 전원장치를 활용하면 flyback transformer(FBT)를 사용하였다. 안전을 위해 접지단자를 만들어 연결하였으며, 작업자의 안전을 위하여 전기집진장치 연구 종료 시 외부 단자와 접지 단자를 5초 이상 연결 방전하는 작업을 진행하였다.

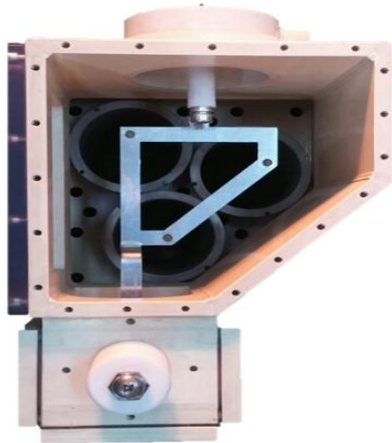


Fig. 1. The view of electrostatic precipitator.

Chamber 내부에서 부유 하고 있는 초미세분진을 측정하기 위하여, 측정장비는 pDR-1500을 사용하였다. 측정되고 있는 값을 실시간으로 확인하기 위하여 Wolf sensor software를 사용하여 하였다.

이미 산업현장에서 사용하고 있는 전기집진장치를 실험 공간과 같은 거주 및 근무하는 환경에 적용 가능하지 알아보기 위하여 전기집진장치를 소형화 하였다.

Voltage에 따른 미세분진 제거 실험을 진행하기위해 전기집진장치의 전압(Voltage)를 10,000 V, 5,000 V 및 2,500 V로 나누어서 실험하였다. 또한, 오존의 농도를 측정하기 위하여 전기집진장치 가동 시 발생하는 10,000 V, 5,000 V 및 2,500 V를 측정하였다.

Table 2는 전기집진장치 Chamber 내부 환경 조건이다.

Table 2. Conditions of inside chamber

Description optional	Conditions
Temperature	15 °C
Relative humidity	44~45 %RH
Barometric	757~758 mmHg

### 2.3 분석방법

본 연구에서 효율 분석방법은 두 가지 방법을 사용한다. 첫 번째 방법인 Efficiency I 과 Efficiency II이다. 구하는 공식은 다음과 같다.

$$Efficiency I = \frac{Before\ concentration - After\ concentration}{Before\ concentration}$$

고농도 실험의 경우 적정 농도까지 농도가 감소되는 과정이 생략되어있기 때문에 Efficiency method I의 전농도(before concentration)은 환기 전 평균 농도(average concentration)로 설정하였다. 또한 미세분진 비산과 필터식 공기청정장치를 동시에 작동함으로 후 농도(after concentration)는 환기 전 1,200초 동안의 농도의 평균값이다.

$$Efficiency II = average [ average \sum_{t=1}^{200} (\frac{C_t - M_t}{C_t}) + \dots + average \sum_{t=2401}^{2600} (\frac{C_t - M_t}{C_t}) ]$$

C : Control, M : Measurement

Efficiency method II는 실험 전에 진행한 대조시험(Control) 값과 측정값을 이용하여 200초 간격으로 효율을 계산하였다.

Efficiency method I의 경우 전농도(before concentration)과 후농도(after concentration)을 활용하여 계산한 효율이다. 그러나, 실제 상황에선 필터된 깨끗한 공기와 오염된 공기(필터된 공기와 필터되지 않은 공기의 혼합기체)가 혼합되는 환경에서 미세먼지 제거 효율을 측정하기 위해 Efficiency method II를 계산하였다. Efficiency method II는 실험 전에 진행한 대조군(Control) 값과 시험 측정값을 이용하여 200초 간격으로 구분하여 복합제진효율을 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 시험용 분진(arizona test dust) 제거 효율

Table 3은 저농도 환경에서의 전기집진장치 실험 결과를 수치화한 것이다. 전 농도(Before concentration)은 시험용 분진(arizona test dust)의 비산 후 780초 때의 농도(concentration) 값이다. 후 농도(after concentration)은 시험용 분진(arizona test dust)이 제거된 이후부터 환기 직전의 농도 평균값이다.

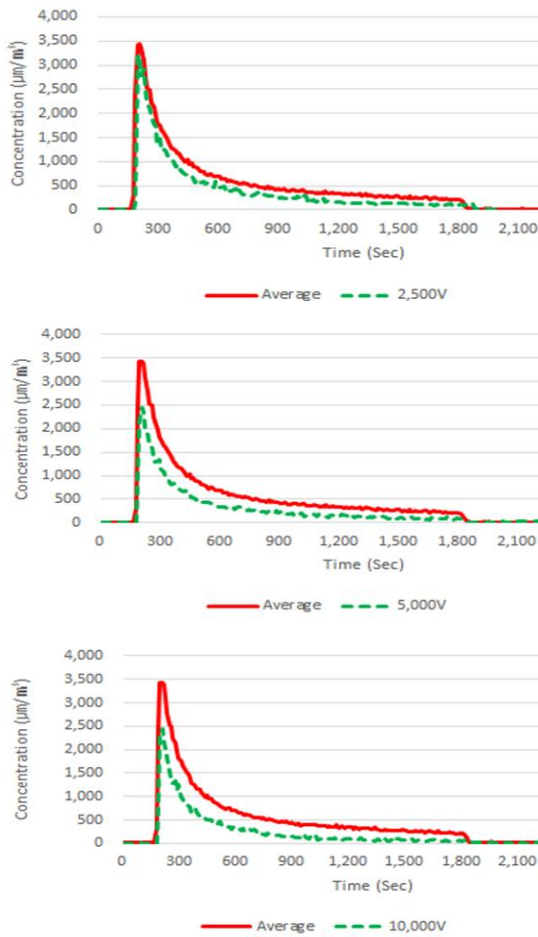


Fig. 2. Test dust removal graph of electrostatic precipitator

Table 3. The Result of dust removal test of electrostatic precipitator

	Before concentration <sup>a</sup> (unit : µm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	After concentration <sup>b</sup> (unit : µm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Efficiency I <sup>c</sup> (unit : %)	Efficiency II <sup>d</sup> (unit : %)
10,000V	342.3	109.2	68.1	58.6
5,000V	460.9	195.4	57.6	51.6
2,500V	329.3	163.6	50.3	24.4
Average	377.5	156.1	58.7	44.8

- a) Concentration after 780 seconds
- b) Average concentrations between 781 and 1,980 seconds
- c)  $(a-b)/a \times 100$

d)  $Efficiency II = average [ average (\sum_{i=1}^{30} \frac{C_i - M}{C_i}) + \dots + average (\sum_{i=201}^{300} \frac{C_i - M}{C_i}) ]$

C : Control  
M : Measurement

Efficiency method I의 경우 전 동도(before concentration)와 후 농도(after concentration)을 활용하여 계산한 효율이다. 하지만, 필터된 깨끗한 공기와 오염된 공기가 혼합되는 환경에서 조금 더 현재의 명확한 농도를 이용한 효율을 측정하기 위해 Efficiency method II를 계산하였다. Efficiency method II는 실험 전에 진행한 대조군(control) 값과 시험측정값을 이용하여 200초 간격으로 효율을 계산하였다.

10,000 V에서는 Efficiency method I은 68.1 %를 보였고, Efficiency method II는 58.6 %로 Efficiency method I의 효율 보다 낮은 효율을 보였다. 5,000 V에서는 Efficiency method I은 57.6 %를 보였고, Efficiency method II는 51.6 %로 Efficiency method I보다 낮은 효율을 보였다. 2,500 V에서는 Efficiency method I은 50.3 %를 보였고, Efficiency method II는 24.4 %로 Efficiency I보다 낮은 효율을 보였다.

전기집진장치 실험 결과 10,000 V에서 집진 성능이 가장 높게 나타났으며, 그 다음 5,000 V, 2,500 V의 순을 보였다.

### 3.2 분진(arizona test dust) 제거 효율 및 오존 발생량

가장 좋은 성능을 보인 10,000 V의 경우 오존의 발생 농도가 다중이용시설 등의 KS인정 기준인 0.05 ppm, 실내 공기 질 관리기준인 0.06 ppm 보다 높게 발생하는 문제가 발생하였다. 그러나, 5,000 V, 2,500 V의 경우에는 오존 발생이 거의 없었다. Table 4은 전기집진장치의 오존 발생량이다(Fig. 3).

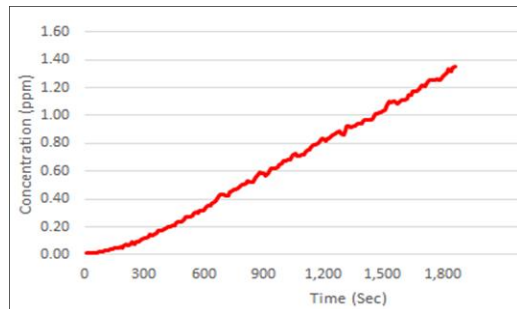


Fig. 3. Graph of ozone concentration (10,000V, 52mA)

Table 4. Amount of ozone generated by electrostatic precipitator

Concentration	Voltage(V)		
	10,000	5,000	2,500
Ozone	1.35	0.01	0.00

위 결과에서 전기집진장치의 제거 효율 평가 수치가 낮은 것은 전기집진장치의 유속이 빠를 경우 집진판에 미세분진이 집진되지 않고 통과하여 할 이러한 가능성을 제어하는 방법으로 전기집진장치의 유속을 낮춰서 진행하는 방법이 있다. 이때에는 순환률이 상대적으로 낮아지고, 집진효율은 증가하는 것을 예상할 수 있다. 또한 빠른 유속은 집진판에 미세분진이 일정 시간 경과 후 떨어져 재 비산하여 효율 평가에서 낮아진 것으로 평가된다.

#### 4. 결론

공장 및 대형 시설에서 사용되고 있는 전기집진장치에 대하여 미세분진이 효율적으로 얼마나 제거 될 수 있는지에 대한 내용이다. 미세분진 제거 효율을 평가한 결과는 다음과 같다.

10,000 V 에서는 Efficiency method I 은 68.1 % 를 보였고, Efficiency method II 는 58.6 % 로 Efficiency method I 의 효율 보다 낮은 효율을 보였다. 5,000 V 에서는 Efficiency method I 은 57.6 % 를 보였고, Efficiency method II 는 51.58 % 로 Efficiency method I 보다 낮은 효율을 보였다. 2,500 V 에서는 Efficiency method I 은 50.3 % 를 보였고, Efficiency method II 는 24.4 % 로 Efficiency method I 보다 낮은 효율을 보였다.

전기집진장치 실험 결과 10,000 V에서 집진 성능이 가장 높게 나타났으며, 그 다음 5,000 V, 2,500 V의 순을 보였다.

가장 성능이 좋은 10,000 V의 경우 오존의 농도가 다중이용시설 등의 실내 공기 질 관리법 기준인 0.06 ppm 및 KS인증 기준인 0.05 ppm 보다 높게 발생하는 문제가 발생하였다. 하지만, 5,000 V, 2,500 V의 경우 오존이 거의 발생하지 않았다.

추후 건강에 영향을 미치는 오존발생량이 발생하지 않으면서 제진효율이 높은 안전한 조건에 대한 추가연구가 필요하다.

#### REFERENCES

- [1] T. Z. Li, S.J. Lee, Y.H. Jang, J. H. Park, S. J. Park, J. H. Lee, N. H. Choe. (2007) The Effects of Diesel Exhaust Particulates and Particulate Matters on the Airway Remodeling in the Asthma-induced Mice, *Journal of Life Science*, Vol. 17, No. 2, 248-2253  
DOI : <http://dx.doi.org/10.5352/JLS.2007.17.2.248>
- [2] S.Y. Gong, H.J. Bae, D.O. Yoon, S.P. Hong, H.Y. Park, (2012), *A Study on the Health Impact and Management Policy of PM<sub>2.5</sub> in Korea I*, (Seoul : Korea Environment Institute 2012) 52-53
- [3] S. Yi, E. S. Noh, S. M. Hong, "Development of a CNN-based Cross Point Detection Algorithm for an Air Duct Cleaning Robot", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 21, no. 8, pp. 1-8, 2020.  
DOI : 10.5762/KAIS.2020.21.8.1
- [4] N. H. Kim, "An Experimental Study on the Effect of Air Temperature and Humidity on Humidification Performance of the Humidifying Element Used for Air Conditioning", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 20, no. 2, pp. 732-740, 2019.  
DOI : 10.5762/KAIS.2019.20.2.732
- [5] D. H. Ahn, "Production of air purification verification system using moss", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 20, no. 6, pp. 587-591, 2019.  
DOI : 10.5762/KAIS.2019.20.6.587
- [6] J. H. Kim, Y. M. Jo, J. S. Kim, S. B. Kim, "Removal of Tar from Biomass Gasification Process", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no. 8, pp. 552-561, 2018.  
DOI : 10.5762/KAIS.2018.19.8.552
- [7] J. C. Ge, G. J. Wang, S. K. Yoon, N. J. Choi, "Fabrication of Electrospun PAN/FA Nanocomposites and Their Adsorption Effects for Reducing Volatile Organic Compounds", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no. 6, pp. 702-708, 2018.  
DOI : 10.5762/KAIS.2018.19.6.702
- [8] Y. M. Choi, Y. B. Ham, J. H. Park, H. U. Kim, "A Study on the Development of water particle Spraying Drone System for Reducing Fine Dust in Concentration Site", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 22, no. 10, pp. 124-131, 2021.
- [9] Y. J. Cho, "A Sensitivity study on the Infra-Red Signature of Naval Ship According to the Composition Ratio of Exhaust Plume", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no. 4, pp. 103-110, 2018.  
DOI : 10.5762/KAIS.2018.19.4.103
- [10] J. S. Lee, A study on the concentration distribution of fine dust in an underground parking lot in an

apartment residential area, *Chungbuk Provincial University Papers*. Vol. 19, pp.13-18, 2016.

- [11] S. H. Lee, A study on the collection of fine dust, *Konkuk University Graduate School*, 2005.
- [12] K. M. Lee, A study on the performance of fine dust collection using a metal fiber filter layer, *Kyunghee University Graduate School*, 2004.
- [13] Y. M. Cho, A Study on the Control of the Outflow of Fine Dust from the Cyclone Attached to POC, Korean Association of Atmospheric Environment, *Journal of the Korean Society for Atmospheric Environment*. Vol. 15, No. 2, pp.201-210, 1999.
- [14] J. M. Seo, Removal of fine dust in the electrostatic precipitator (ESP) following injection of ammonium sulfate, Korean Academy of Arts and Sciences, *Korean Journal of Education*. Vol. 7, No 4, pp.505-509, 1998.
- [15] "Air filter, SPS - KACA004 - 134", Korea Air Cleaning Association, Established on February 24, 2000, Confirmed on January 13, 2015 (standard name change)  
<http://www.kaca.or.kr/standard/download/SPS-KACA004-0134%20%EC%97%90%EC%96%B4%ED%95%84%ED%84%B0.pdf>

김 동 현(Dong-hyun Kim)

[장학원]



- 1990년 2월 : 충남대학교 생물학과 (이학사)
- 1992년 8월 : 충남대학교 보건학과 (보건학석사)
- 2004년 8월 : 호서대학교 첨단산업기술학과 (공학박사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 안전보건학과 교수
- 관심분야 : 환경 분석, 환경위해성평가, 대체시험법
- E-Mail : thomasdh@naver.com

강 일 서(II-Seo Kang)

[장학원]



- 2014년 2월 : 세명대학교 전기공학과(공학사)
- 2017년 2월 : 호서대학교 안전환경기술융합학과(공학석사)
- 2016년 12월 ~ 현재 : 금성백조건설
- 관심분야 : 전기·전자, 전기안전
- E-Mail : ilseo1011@ksbj.co.kr

이 영 수(Young-su Lee)

[장학원]



- 2018년 2월 : 호서대학교 생명공학과(이학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 안전환경기술융합대학원생
- 2017년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 안전성평가센터 연구원
- 관심분야 : 환경위해성평가
- E-Mail : dudtn9602@naver.com