

시멘트 포장공정에서 환기시스템에 따른 발생분진의 제어

이승철^{1*}, 김수창², 노광철³, 박명호⁴

¹강원대학교 소방방재학부, ²(주)라파즈한라시멘트 안전보건팀

³연세대학교 기계공학부, ⁴강원대학교 기계자동차공학부

Control of Suspended Dust in Various Ventilation Systems of Cement Packaging Process

Seung-Chul Lee^{1*}, Soo-Chang Kim², Kwang-Chul Noh³ and Myoung-Ho Park⁴

¹School of Fire & Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University

²Health & Safety Team, Lafarge Halla Cement Corp.

³School of Mechanical Engineering, Yonsei University

⁴School of Mechanical & Vehicle Engineering, Kangwon National University

요 약 시멘트 포장공정에서 발생하는 비산분진을 효율적으로 제거하기 위해 3가지 환기방식(국소배기시스템, 정전식스크러버시스템, 국소급기시스템)을 도입하고 풍량을 변화시키며 총 9가지의 조건에서 실험을 수행하였다. 분진의 농도는 시멘트분진 입자분포 특성을 고려하여 PM2.5, PM10, TSP로 구분하여 측정하였다. 3가지 환기방식에 대한 집진효율을 분석한 결과, 기존의 국소배기시스템과 정전식스크러버시스템이 같이 사용되는 경우 가장 효율적인 것으로 나타났다. 또한 정전식스크러버시스템의 풍량 증가에 따른 입자의 질량농도감소율이 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었고 이로부터 정전식스크러버시스템을 2,700m³/h 풍량으로 운전하는 것이 에너지절약 관점에서 효율적인 것이라고 판단되었다. 각 환기방식별 환기성능을 국소배기시스템의 풍량으로 환산한 결과, 대체시스템(정전식스크러버시스템, 국소급기시스템)분진제거성능이 우수한 것으로 나타났고 정전식스크러버시스템이 국소급기시스템보다 상당히 효율적인 것으로 나타났다. 따라서 기존의 국소배기시스템과 정전식스크러버시스템을 동시에 가동한다면 국소배기시스템의 풍량만을 증가시키는 경우에 비해 반송동력을 줄일 수 있어 분진제거와 에너지절감측면에서 훨씬 효율적이라는 것을 알 수 있었다.

Abstract We performed the experimental study on the control of suspended dust in a cement packaging process for various ventilation systems. To effectively remove the dust generated in the cement packaging process, three different kinds of ventilation system, such as local exhaust ventilation, electrostatic scrubber, and local air supply system, were adopted. Dust concentrations in the packaging process were measured with the variation of the airflow rate of the ventilation systems and then their ventilation performance were evaluated. From the results, we knew that the ventilation performance was the best when the local exhaust ventilation and the electrostatic scrubber were simultaneously operated in the packaging process. In the electrostatic scrubber system, the effect of the airflow rate on the indoor dust removal efficiency was negligible so that the system must be operated at 2,700m³/h for saving power consumption.

Key Words : Dust, Cement Packaging Process, Electrostatic Scrubber System, Ventilation system, TSP

*교신저자: 이승철(sclee@kangwon.ac.kr)

접수일 08년 09월 16일

수정일 (1차 09년 01월 04일, 2차 09년 03월 30일)

게재확정일 09년 03월 23일

1. 서론

시멘트 산업은 특성상 인위적으로 분진을 발생시키는 대표적인 사업 중의 하나이다. 시멘트의 제조공정은 석회석을 주성분으로 하는 원료를 소성하여 분쇄하는 것이 주요공정이기 때문에 대량의 에너지가 필요하고 공정 중에 분진, 소음 등이 배출된다. 이것은 1차적으로 공장 내 작업을 하는 작업자에게 영향을 미치고 2차적으로 주변의 환경에 영향을 미치고 있기에 공정 중에 발생하는 분진 및 소음을 저감시켜 환경조화형 산업으로 변환하기 위하여 지속적으로 노력을 하고 있다.[1] 하지만 이러한 노력에도 불구하고 현재 시멘트 산업은 대량의 석회석원료를 지속적으로 공급하여 대량의 시멘트를 생산하는 체제이므로 공정상에서 발생하는 분진은 효율적으로 제어되지 못하고 공장내부 및 외부로 비산이 되고 있는 실정이다. 이러한 분진에 지속적으로 노출되었을 경우 호흡기 질환, 피부장애 및 알레르기, 눈 장애 등의 피해가 발생될 수 있다고 알려져 있다.[2]

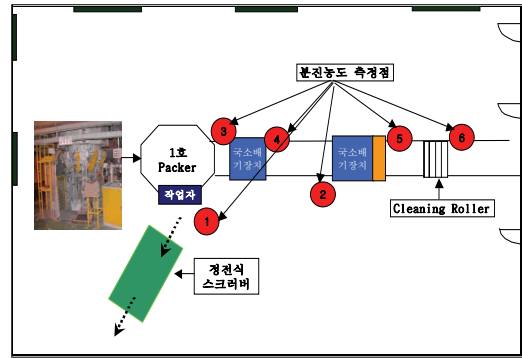
시멘트 분진과 관련하여 국내에 연구 활동을 살펴보면, 시멘트공장 굴뚝에서 발생하는 분진으로 인해 각종 산업폐기물과 부산물의 사용량 증가로 집진효율성이 낮아지고 있으므로 이를 개선하기 위하여 온습도조절 장치, Precollector의 설치, 저장고 옥내 설치, 수송시스템의 밀폐, 고효율성의 집진설비 및 분진저감 시스템개발이 적용해야 한다는 결과를 도출하였다.[3] 강복규[1]는 시멘트 공장 주변지역 부유분진 농도 분포에 관한 연구에서 부유분진의 농도는 단양지역의 경우 겨울이 가장 높았고, 가을, 봄, 여름 순으로 추세를 보였으며, 동해지역은 봄, 여름, 겨울, 가을 순으로 높다는 결론을 도출하였다. 전승근[4]은 백필터를 이용한 석회석분진의 집진효율에 관한 연구에서 새 집진설비를 갖추었을 때 백필터의 운전시간이 지날수록 집진수율이 계속 증가하는 경향이 있으며, 장치를 장시간 운전하면 집진수율은 일정한 값, 예를 들면 99%에 접근한다는 결론을 도출했다. 박선근[5]은 사업장내 국소배기설비의 점검과 개선방안에 관한 연구에서 제조업체의 국소배기장치에 대한 실태를 점검하고 그 성능을 평가함으로써 국소배기장치의 취약점에 대해 논의하고 개선방안을 제시하였다. 김태형[6]은 사업장 국소배기장치 관리 및 성능향상을 위한 제도개선연구에서 국소배기장치의 사업장내에서 운용실태 조사 및 평가를 통하여 환기장치의 효율적인 관리 및 성능향상을 위한 방안을 제시하고 있다.

본 연구에서는 시멘트 포장공정에서 발생하는 비산분진을 제어하기 위하여 국소배기시스템, 정전식스크리버 시스템, 국소급기시스템을 설치하고 비산분진의 농도변

화를 관찰하였다. 이를 이용하여 각 시스템의 환기성능을 분석하였고 비산분진을 효율적으로 제어할 수 있는 방안을 도출하였다.

2. 시멘트 포장 공정

시멘트 공장은 대부분의 제조공정에서 작업자가 직접 공정에 투입되어 운전을 하는 것이 아니고 중앙통제실에서 자동으로 설비를 조정하기 때문에 작업자가 작업공정 상에서 직접 분진에 노출되지는 않는다. 그러나 유일하게 작업자가 공정에 투입되어 분진에 집적적인 노출이 이루어지는 공정은 포장공정이다.



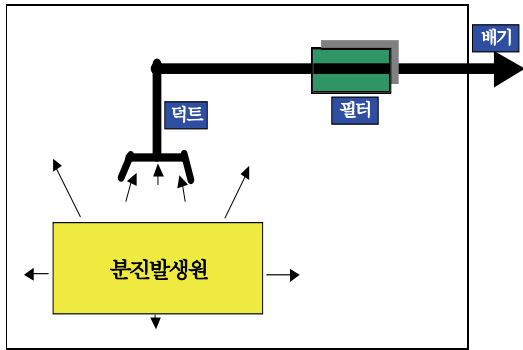
[그림 1] 시멘트 포장공정

그림 1은 연구대상인 시멘트 포장공정의 설비 배치를 보여준다. Packer에서 시멘트의 포장이 이루어지고 포장된 시멘트는 콘베이어벨트를 따라 운송하는 차량으로 이동하게 된다. 2개의 국소배기장치는 내부에서 비산된 시멘트 분진을 백필터 후드(bag filter hood)를 통해 외부로 유출시킨다. 그림에서 ①~⑥은 작업장 내 비산분진의 농도가 집중되는 위치이고 ①은 작업자의 위치이다.

3. 환기시스템

3.1 국소배기시스템

국소배기시스템은 그림 2에서 보는 바와 같이 분진발생원에 분진을 포집하는 Hood를 설치하여 포장작업시에 발생된 분진을 포집하여 덕트를 따라 이동시키고 이를 백필터를 통해 여과하여 정화된 공기는 외부로배기되는 시스템이다. 그림 3은 현재 시멘트 포장공정에서 사용하고 있는 국소배기시스템과 후드의 실제 사진이다.

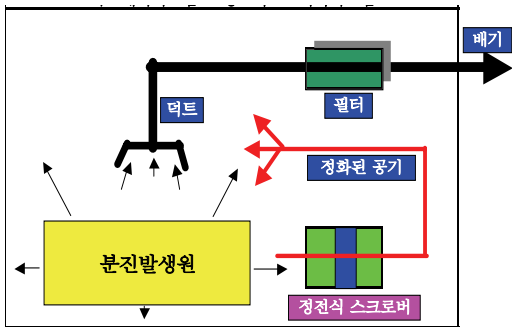


[그림 2] 국소배기시스템 개념도



[그림 3] 시멘트 포장공정의 국소배기시스템

3.2 정전식 스크러버시스템



[그림 4] 정전식 스크러버시스템 개념도

그림 4에 나타난 정전식 스크러버시스템은 국소배기 시스템을 정상 가동한 상태에서 추가로 설치하여 국소배기장치가 포집하지 못한 비산분진을 포집하여 자체의 집진 및 세정 과정을 거쳐 작업장 내에 정화된 공기를 공급

시키는 장비이다. 본 연구에서는 작업자가 작업시 분진에 가장노출이 많이 되는 작업위치를 기준으로 설치하여 환기성능 평가하였다.

정전식 스크러버시스템은 그림 5에서 보는 바와 같이 크게 4가지 부분으로 구분해 볼 수 있다. 먼저 프리필터로 설치된 전기집진기에서는 분진을 수반하는 유해가스 혹은 고습가스 등을 1차로 제거한다. 그리고 정전 스크러버에서는 오염물질을 공급된 정전액체로 세정하고 청정한 공기를 배출한다.

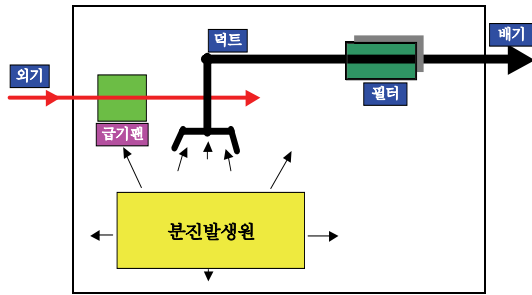


[그림 5] 정전식 스크러버시스템

수조는 세정수, 즉 정전액 체를 집수하고 재순환시키는 역할을 하고 제트팬은 시스템에서 오염된 공기의 유입과 청정한 공기를 유출시키는 역할을 한다. 정전식 스크러버시스템은 관성력, 정전기력, 확산력, 열영동력, 응집력, 중력 등의 원리를 이용하여 분진과 가스를 동시에 제거 할 수 있으며, 3 μ m 이상의 초대 분진에 대해서는 주수량 및 공기속도의 조절을 통하여 80% 이상의 높은 집진효율을 나타낼 수 있고 암모니아는 90% 이상의 제거효율을 갖는다.

3.3 국소급기시스템

그림 6에는 국소급기시스템의 개념도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 국소배기시스템을 정상가동한 상태에서 급기장치를 설치하여 외부의 신선한 공기를 작업장 내부로 공급하는 시스템이다. 본 연구에서는 국소급기시스템으로서 정전식 스크러버시스템의 제트팬을 이용하였다. 정전식 스크러버의 유입구에 외기와 연결되는 플렉서블 덕트를 연결하고 유출구를 향하게 하여 신선한 공기가 작업자의 작업위치로 공급되도록 하였다.



[그림 6] 국소급기시스템 개념도

4. 실험 및 방법

4.1 실험 장비

시멘트 포장공정에서 비산분진의 제거성과 환기방식에 따른 환기성을 평가하기 위하여 부유분진의 농도를 측정하였고 이때 Aerosol Mass Monitor(GT-331 : SIBATA)를 이용하였다. 일반적인 시멘트 입자의 분포는 0.3 μm ~63 μm 사이에 집중되어있고 대부분 3 μm 이상의 조대 입자(coarse particle)로 알려져 있으므로 본 연구에서는 TSP (Total Suspended Particle), PM10, PM2.5만을 대상으로 농도측정을 각각 수행하였다.

4.2 실험 종류 및 방법

시멘트 포장공정에서 각 환기방식별 분진의 환기특성을 살펴보기 위한 실험은 표 1과 같이 3가지 환기방식과 풍량에 따른 총 9가지 조건에서 수행하였다. Case 1~Case 3은 현재 포장공정에 설치된 국소배기장치(집진기)의 풍량만을 변화하여 분진농도를 측정하는 실험이고, Case 4~Case 6은 국소배기장치의 풍량을 19,200 m³/h로

고정한 상태에서 정전식 스크러버시스템의 풍량을 변화시켜 분진농도를 측정을 하는 실험이다.

또한 Case 7~Case 9는 국소배기장치의 풍량을 19,200 m³/h로 고정한 상태에서 국소급기장치를 이용하여 외부의 신선공기의 공급량을 변화시키며 분진농도를 측정하는 실험이다.

실험순서는 다음과 같다. 1) 표 1에 나타난 각 Case별 실험조건을 충족한 상태에서 작업장 내부 유동이 정상상태가 될 때까지 약 30분간 지속시킨다. 2) 그림 1에 표시된 6지점의 위치에서 PM2.5, PM10 및 TSP의 농도를 각각 측정한다. 3) 실험의 재현성을 위해 상기 1), 2)를 3회 반복한다. 4) 표 1에 나타난 실험종류별 실험조건(환기방식, 유량조절)으로 전환시킨 후 상기 실험순서 1)~4)를 반복한다.

4.3 환기성능 평가

시멘트 포장공정 내에서 분진농도는 분진의 질량보존 방정식에 의해 식(1)과 같이 결정된다.[7]

$$C_{in} = \frac{\dot{S}}{\dot{Q}_{ex} + \beta + \dot{Q}} \quad (1)$$

여기서, C_{in} 은 공정내 분진농도[mg/m³], \dot{S} 는 시멘트 분진 발생량[mg/h], \dot{Q}_{ex} 는 배기풍량[m³/h], β 는 분진 침착량, \dot{Q} 는 배기대체풍량[m³/h]이다. 배기대체풍량은 정전식 스크러버시스템과 국소급기시스템을 가동시켰을 때, 국소배기풍량만 가동했을 때와 동일한 분진제거성에 상당하는 풍량을 의미한다. 본 연구 대상인 시멘트 포장공정에서는 분진발생량이 침착량에 비해 상당히 크고 그 값은 약 1.53 $\times 10^3$ mg/h인 것으로 측정되었다.

[표 1] 실험 종류

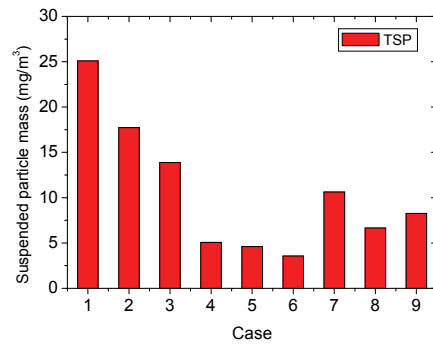
구분	환기방식	실험조건	비고
Case 1	국소배기시스템	9,600 m ³ /h	현재 운전조건
Case 2		14,400 m ³ /h	
Case 3		19,200 m ³ /h	
Case 4	국소배기(19,200 m ³ /h) + 정전식 스크러버시스템	2,700 m ³ /h	
Case 5		5,400 m ³ /h	
Case 6		10,800 m ³ /h	
Case 7	국소배기(19,200 m ³ /h) + 국소급기시스템	2,700 m ³ /h	
Case 8		5,400 m ³ /h	
Case 9		10,800 m ³ /h	

5. 결과 및 고찰

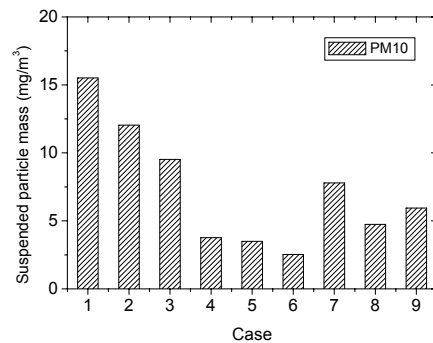
5.1 비산분진 농도

그림 7은 표 1에 제시된 실험 종류에 따라 시멘트 포장공정 내에서 측정된 TSP, PM10, PM2.5 농도를 보여준다. 이는 6개의 측정점에서 계속된 입자 질량농도의 평균값이다. 모든 입자농도분포에 있어서 국소배기시스템만을 가동했을 때보다 국소배기시스템과 정전식스크러버시스템 또는 국소급기시스템을 동시에 가동하였을 때, 공장 내 입자농도분포는 현저히 감소하는 것으로 나타났다. TSP의 경우, 국소배기시스템만을 가동한 Case 1보다 정전식스크러버시스템을 동시에 가동한 Case 4~6에서 80~86%의 입자질량농도 감소율을 나타냈고 급소급기시스템을 동시에 가동한 Case 7~9에서는 56~73%의 감소율을 나타냈다. PM10의 경우, 국소배기시스템만을 가동한 Case 1보다 정전식스크러버시스템을 동시에 가동한 Case 4~6에서 76~84%의 입자질량농도 감소율을 나타냈고 급소급기시스템을 동시에 가동한 Case 7~9에서는 50~70%의 감소율을 나타냈다. 입자농도감소율이 TSP에 비해서는 3~6% 정도 낮은 것으로 나타났고 이는 입자의 크기가 작아짐에 따라 정전식스크러버시스템과 국소급기시스템의 압자제거 효과가 조금씩 감소함을 의미한다. PM2.5의 경우, 국소배기시스템만을 가동한 Case 1보다 정전식스크러버시스템을 동시에 가동한 Case 4~6에서 47~55%의 입자질량농도 감소율을 나타냈고 급소급기시스템을 동시에 가동한 Case 7~9에서는 12~48%의 감소율을 나타냈다. 이때 입자농도감소율은 TSP와 PM10에 비해서 급격히 떨어지는 것으로 나타났다.

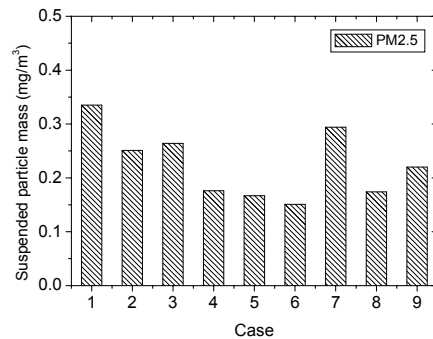
이상의 결과로부터 시멘트공장 내부에서 정전식스크러버시스템을 사용하는 것이 국소급기시스템으로 외부의 신성공기를 급기시키는 것보다 더 효율적이라는 것을 알 수 있었다. 또한 정전식스크러버시스템의 풍량 증가에 따른 입자의 질량농도감소율이 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었고 이로부터 정전식스크러버시스템을 Case 4와 같은 풍량(2,700m³/h)으로 운전하는 것이 에너지절약 관점에서 효율적일 것이라고 판단되었다. 그림 7에서 국소급기시스템의 풍량 증가에 따른 입자 질량농도감소 경향은 일관성이 없는 것을 볼 수 있는데 이는 급기되는 풍량에 의해 공장 내에 있는 부유분진의 침착을 방해하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) TSP



(b) PM10



(c) PM2.5

[그림 7] 시멘트 포장공정 내 평균 부유분진 농도

5.2 환기방식별 대체풍량

표 2는 환기방식별 Case 4~9에 대한 대체풍량을 보여준다. 이는 시멘트 포장공정에서 부유분진의 농도를 최소화하기 위하여 Case 3으로 가동되는 경우를 기준으로 하여 식(1)에 의해 계산된 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 정전식스크러버시스템과 국소급기시스템을 사용하는 경우의 대체풍량이 각 시스템의 풍량보다 크게 나타났다. 이는 대체시스템의 분진제거성능이 국소배기시스템보다 크다는 것을 의미한다. 또한 정전식스크러버시스템을 사

용한 경우의 대체풍량이 국소급기시스템의 급기풍량보다 상당히 큰 것으로 나타나서 정전식스크러버시스템이 보다 효율적인 것으로 판단되었다. 따라서 기존의 국소배기시스템과 정전식스크러버시스템을 동시에 가동한다면 국소배기시스템의 풍량만을 증가시키는 경우에 비해 반송동력을 줄일 수 있어 에너지절감측면에서 훨씬 효율적이라는 것을 알 수 있었다.

[표 2] 환기방식별 대체풍량

Case	정전식 또는 국소급기시스템 풍량 [m ³ /h]	대체풍량 [m ³ /h]
4	2,700	31,028
5	5,400	35,909
6	10,800	55,549
7	2,700	4,703
8	5,400	19,012
9	10,800	11,561

6. 결론

시멘트 포장공정에서 발생하는 비산분진을 제어하기 위하여 국소배기시스템, 정전식스크러버시스템, 국소급기시스템을 설치하고 비산분진의 농도변화를 관찰한 결과, 기존의 국소배기시스템과 정전식스크러버시스템이 같이 사용되는 경우 가장 효율적인 것으로 나타났다. 정전식스크러버시스템을 사용하는 것이 국소급기시스템으로 외부의 신선공기를 급기시키는 것보다 더 효율적이라는 것을 알 수 있었다. 또한 정전식스크러버시스템의 풍량 증가에 따른 입자의 질량농도감소율이 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었고 이로부터 정전식스크러버시스템을 2,700m³/h 풍량으로 운전하는 것이 에너지절약 관점에서 효율적인 것이라고 판단되었다. 각 환기방식별 환기성능을 국소배기시스템의 풍량으로 환산한 결과, 대체시스템(정전식스크러버시스템, 국소급기시스템)분진제거 성능이 우수한 것으로 나타났고 정전식스크러버시스템이 국소급기시스템보다 상당히 효율적인 것으로 나타났다. 따라서 기존의 국소배기시스템과 정전식스크러버시스템을 동시에 가동한다면 국소배기시스템의 풍량만을 증가시키는 경우에 비해 반송동력을 줄일 수 있어 분진제거와 에너지절감측면에서 훨씬 효율적이라는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 강복규, “시멘트 공장 주변지역의 부유분진 농도 분포에 관한 조사 연구”, 석사학위논문, 연세대학교 산업대학원, 1992.
- [2] 박춘근, “시멘트 제조시 발생하는 소음, 분진 및 CO₂ 저감대책”, 월간 세라믹스, p. 76~77, 6월, 2001.
- [3] 박춘근, “시멘트 제조시 발생하는 소음, 분진 및 CO₂ 저감대책”, 생산기술연구원, 학술연구논문, 2001.
- [4] 전승근, “백필터를 이용한(석회석 분진)의 집진효율에 관한 연구”, 석사학위논문, 영남대학교 환경대학원, 1993.
- [5] 박선근, “사업장내 국소배기설비의 점검과 개선방안에 관한 연구”, 석사학위논문, 인천대학교 대학원, 2005.
- [6] 김태형, 하현철, “사업장 국소배기장치 관리 및 성능 향상을 위한 제도개선 연구”, 한국산업안전공단, 산업보건위생연구실, 보건분야-연구자료, 연구원 2005-98-572호, 2005.

이 승 철(Seung-Chul Lee)

[정회원]



- 1993년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 10월 ~ 현재 : 강원대학교 소방방재학부 조교수

<관심분야>

방재설비, 터널(지하공간) 및 대공간 환기 및 화재

김 수 창(Soo-Chang Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 강원대학교 산업공학과 (학사)
- 2008년 2월 : 강원대학교 방재기술전문대학원 방재설비(석사)
- 1990년 12월 ~ 현재 : 라파르한 라시멘트 안전보건팀 부장

<관심분야>

산업안전 및 방재기술

노 광 철(Kwang Chul Noh)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울시립대 대학원 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 서울시립대 대학원 기계정보공학과 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2007년 8월 : 서울시립대 산업기술연구소 선임 연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 연세대학교 기계공학부 연구교수

<관심분야>

클린룸오염제어, 실내환경제어

박 명 호(Myung-Ho Park)

[정회원]



- 1987년 2월 : 강원대 기계공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 강원대 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 3월 : 九州工業大 기계공학과(공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 강원대 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>

내연기관, 연소공학