

# 반도체 공정에서 발생하는 혼합분진의 폭발 위험성평가

## Risk Assessment of Explosion of Mixed Dust Generated in Semiconductor Manufacturing

박 창 섭\* · 김 찬 오\*  
(Chang-Sup Park · Chan-O Kim)

**Abstract** - The use of metals such as aluminum and titanium and the related industrial facilities have been continuously increasing to meet the requirements of the improvement of high-tech products due to the development of industry, and explosion of metal dust. Semiconductor process Metal dust is essential, but research is insufficient. The purpose of this study is to identify risk by analyzing the quantitative risk such as maximum explosion pressure and minimum explosion concentration applied international test standard in order to select the semiconductor process facilities handling dust and to predict possible risk of accidents.

**Key Words** : Combustible dust, Semiconductor manufacturing, Dust collector, Minimum explosion concentration, Maximum explosion pressure, Maximum explosion pressure rate

### 1. 서 론

반도체 제조공정에서는 분진형태의 원료나 중간물질을 많이 사용하며, 가공 과정에서도 분진 폐기물이 발생하고 이로 인해 분진폭발의 위험성이 높아져 제조공정에 대한 폭발방지 대책 수립이 요구되어지고 있다. "국내·외 금속분진의 화재폭발 사고사례"에서 볼 때 분진 폭발 사고는 집진설비와 이송배관에서 대부분 발생되며, 분진이 이송되는 배관은 원료의 투입구에서부터 배 출구 및 집진기까지의 경로가 연속적으로 연결되어 있는 경우가 많아 이송 공정 일부에서 발생된 분진폭발이 공정 전체로 확대되어 피해가 커질 가능성이 있다[1].

그러나 분진에 대한 한국 내의 안전 관련법규에서는 몇 가지 금속 분진에 대해서만 제한적으로 규제하고 있고, 구체적인 분진 폭발 방지 대책에 관한 자료나 지침 등은 마련되어 있지 않고 있다. 또한 금속 분진량이 증가되는 반도체 제조공정의 분진폭발에 대한 적절한 안전조치나 방지 대책을 마련하는 것도 쉽지 않다[2].

분진폭발의 위험특성은 분진의 착화 전·후로 분류하고, 착화 전의 위험특성으로는 자연발화온도, 최소착화에너지 등의 폭발특성치가 있으며, 분진 착화 후의 폭발특성은 분진 자체가 가지고 있는 폭발압력, 폭발한계 등의 물리적 위험성으로 평가하게 된다. 일반적으로 분진폭발의 위험특성은 실험적인 조사결과에 의한다[3]. 그러나 이와 같은 위험성자료만으로 분진폭발의 재해, 즉 폭

발특성을 설명하거나 예측하는 데에는 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 반도체 공정에서 발생하는 분진의 종류와 함유정도를 조사하고, 분진의 착화위험성에 대한 정량화를 통하여 반도체 공정의 금속분진에 대한 폭발 위험성을 평가하고, 실험을 통하여 가연성 금속 분진의 추가 혼합에 따른 폭발 위험성의 증가여부를 확인하기 위하여 실시하였다.

### 2. 반도체 공정 설비의 분진 위험성

#### 2.1 반도체 공정에서 발생하는 분진

반도체 공정은 웨이퍼에 각종 가스나 케미컬로 식각, 증착 및 패터닝하여 제작한 후 칩단위로 패키징하게 된다. 재료로 사용되는 웨이퍼의 구성성분은 대부분 규소성분을 포함하고 있다[4].

이에 실제 반도체 공정에서 발생하는 Clean Vacuum 공정의 8개소에서 포집되는 분체에 대한 성분을 분석한 결과는 [Table 1]과 같으며, 구성 성분 중 Si(61%)와 Fe(26~42%)가 가장 많이 함유되어 있었으며, Cr, Zn, Ni, Mn 등의 순으로 함유되어져 있는 것을 알 수 있었다.

"가연성 분진"은 종래에는 입경이 420  $\mu\text{m}$  이하를 가연성분진으로 규정하고 있지만, 420  $\mu\text{m}$ 보다 작은 분진이더라도 서로 흡착하면 입경이 420  $\mu\text{m}$ 보다 더 커지는 문제점이 발생하여 현재 국제안전규격에서는 가연성 분진을 "공기 중에 부유되어 점화원에 의해 발화 또는 폭발하는 미세 입자"로 정의하고 있다[5],[6],[7].

#### 2.2 반도체 공정의 고위험 설비 및 위험성

반도체 공정 설비에서 분진을 포집하는 공정으로는 CV (Clean

† Corresponding Author : Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea.  
E-mail : kimco@seoultech.ac.kr

\* Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea.

Received : November 28, 2017; Accepted : February 7, 2018

**표 1** Clean vacuum 집진시설 분진성분 분석결과(mg/kg, ppm)

**Table 1** Result of dust component analysis of dustcollector (mg/kg, ppm)

	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Cd
A	529	205	26,730	1,376	481	15
B	452	60	4,660	1,285	455	8
C	1,744	267	19,440	3,364	380	33
D	812	223	19,400	1,313	393	5
E	2,270	541	46,790	2,695	168	16
F	1,341	321	20,170	2,759	3	2
G	2,027	336	16,370	3,614	7	2
H	574	200	34,130	1,442	35	5

	Ba	Pb	Zn	Se	Sn	Si
A	34	0	494	116	24	28,820
B	39	0	423	430	31	25,020
C	196	0	1,659	2,447	0	14,850
D	29	0	708	203	42	28,270
E	62	0	2,219	436	26	26,710
F	33	0	1,263	0	25	39,240
G	24	0	1,962	0	25	38,330
H	39	0	553	36	18	41,700



반도체 제조시설



유틸리티 시설



집진시설



대기방지시설



부대시설

**그림 1** Clean Vacuum 공정 구성도

**Fig. 1** Clean Vacuum process flow

Vacuum)설비가 대표적이며, 설비는 [Fig. 1]와 같이 Suction Hole, Suction Duct 및 다수의 연결 덕트, 집진기(Cyclone, Bag Filter), Blower 등으로 구성되어 있다.

1차 집진은 집진기(Cyclone)에서 이루어지며 미세한 분진은 Bag filter가 내장된 2차 집진기에서 미세분진을 포집하고 있다. 폐기분진은 각 공정에서 배관을 통하여 이송되며 원활한 이송을 위해 밀폐 조건으로 운전되고 있는데 대부분의 폐기 분진은 비폭발성인 것으로 시험결과 나타났다. 그러나 반도체 생산공정에서

사용되는 금속분진과 그 중 기능성재료로 사용되는 티탄 분진과 같은 가연성 금속 분진이 포함되는 경우에는 혼합분진의 비율에 따라 분진폭발 위험성이 나타날 수 있다[9].

또한 Clean Vacuum 설비에서 사용되는 집진기인 Cyclone, Bag filter는 국내 사업장에서 가장 흔하게 사용되는 집진기 종류이며, 집진시설의 분진폭발사고를 보면 대부분 Bag Filter식의 집진기에서 발생하고 있다[10],[11],[12].

집진시설의 특징을 미루어 보아 높은 분진 농도, 분진의 비산과 부유성, 정전기 다량 발생, 스파크의 유입이 쉬운 구조 등이 폭발의 발생 원인이 될 수 있다[13].

### 3. 연구방법

#### 3.1 적용 대상

본 연구에서는 반도체 제조사업장인 국내 특정사업장을 대상으로 실시하였으며, 현재 사용하고 있는 가연성 분진 의 고위험 설비인 Clean Vacuum 공정의 8개소를 선정하여 집진된 시료성분을 대상으로 위험성을 확인하였다.

또한, 현재 집진되고 있지 않지만 반도체 제조공정 내 박막 증착 공정(CVD)에서 생성되는 분체에는 티탄 및 알루미늄 등 각종 금속 분진이 함유되어 있다.

특히, 화재위험이 확인된 티탄 분진을 비폭발성 분진과 함께 집진할 경우 폭발 위험성이 없는지를 확인하기 위하여 표면 반응 즉, 표면에서 열분해 및 증발을 일으키지 않고 고온을 유지하면서 산소와 반응하여 연소하는 현상을 지닌 티탄을 선정하여 폭발성 유무 시험을 진행하였다.

또한, 티탄은 최소착화에너지(Minimum Ignition Energy)가 타 금속분진 보다 민감도가 높은 물질로 “티탄 및 비폭발성 혼합분진”의 화재폭발 위험성을 시험적으로 측정하였다[18].

이는 향후 Clean Vacuum 설비를 이용하여 가연성을 가진 다량의 금속 분진이 혼합될 경우의 위험성에 대하여 조사하였다 [14],[15],[16],[17].

#### 3.2 입도분석 시험 및 방법

입도시험은 국제시험규격에 따라 이루어지며 본 연구에서는 레이저 입도분석 시험장치(Laser Diffraction Particle Size Analyzer, Beckman Coulter LS 13320)를 사용하여 분진의 평균 입경과 입도분포를 측정하였다.

입도분포의 시험방법은 시료의 굴절률을 알고 있는 분산용 액체(에탄올)에 분산시키고 필요에 따라 초음파 파쇄기를 사용하였으며, 시험 제어 프로그램을 사용하여 실행 순서를 선택하여 세척, Bubble 제거, Blank 측정 등의 과정을 거친 후, 시료를 투입하여 입도를 측정하였다. 이 때 투입되는 시료의 농도는 분무형태로 8~12%로 총 3회 측정하여 재현성이 최대허용편차에 들어오는 결과값에 대하여 통계적 처리 절차를 거쳐 최종 입도값으로 결정하였다.

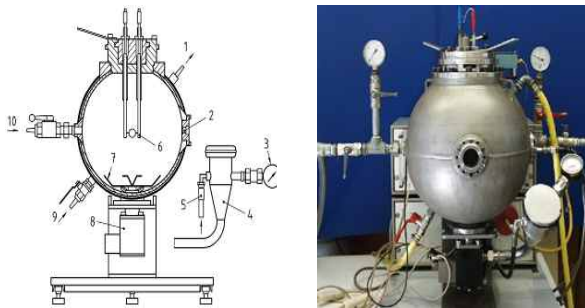
### 3.3 분진 폭발 시험 장치 및 방법

본 연구에서는 분진의 폭발압력 특성 값을 측정하기 위하여 ASTM 표준시험규격에 적합한 Siwek 20 L Chamber (Kühner AG社, 스위스)를 사용하여 국제시험규격(EN 14034-1:2006 및 EN 14034-2:2006)에 따라 실시하였다.

장치에 대한 개략도 및 분진폭발시험장치의 모습을 [Fig. 2]에 나타내었다. 일정 농도의 분진을 6 L의 분진 저장 컨테이너에 넣고 20 bar의 공기를 유입시켜 분진 컨테이너의 밸브를 순간적으로 열어 분진-공기 혼합물을 구형 용기 내에 부유, 분산시켰다.

착화 지연시간(60 ms) 경과 후에 10 kJ의 착화에너지를 갖는 화학점화기로 두 전극 사이로 전압을 인가하여 착화시켜 분진-공기 혼합물의 폭발에 따른 압력 파형을 관찰하고 폭발하한농도, 폭발압력, 최대압력상승속도를 측정하였다. 이러한 폭발특성 평가는 상온, 상압의 동일 농도조건에서 시험을 3회 실시하여 평균값을 사용하였다.

최대폭발압력(Pmax)은 EN 14034-1(2011), 최대폭발압력상승속도[(dt/dp)m]는 EN 14034-2(2011) 및 ASTM E1226(2005), 폭발압력지수(Kst)는 EN 14034-2(2011), 폭발하한농도(MEC ; Minimum Explosion Concentration)는 EN 14034-3(2011)에 의거하여 실험하였다.



1. water outlet	6. ignition source
2. pressure sensors	7. rebound nozzle
3. manometer	8. fast acting valve
4. dust container	9. water inlet
5. air inlet	10. outlet (air, reaction products)

그림 2 20 L 구형 분진폭발시험장치  
Fig. 2 Spherical dust explosion test equipment

## 4. 연구결과

### 4.1 입도 분석 및 폭발 시험

집진기 공정 8개소에서 채취한 시료 [Fig. 3]의 폭발성 유무를 조사하기 위하여 20 L 구형 분진폭발시험장치를 사용하여 250~1500 [g/m<sup>3</sup>]의 분진농도 범위에서 폭발특성시험을 실시하

였다.

시험결과 모든 시료는 폭발성이 없는 것으로 나타났으며, 폭발성이 나타나지 않는 원인으로는 성분분석 결과에서 알 수 있듯이 가장 많은 성분비율을 차지하고 있는 Si, Fe가 연마 과정에서 발생된 연마제 성분과 금속 및 무기물 등이 혼합되어 있는 것으로 볼 때, 연소성이 있는 Si, Fe 입자의 표면에 산화피막이 형성되어 폭발성이 없어진 것으로 추정된다.



채취 혼합물                      Ti 분진

그림 3 폭발성 시험에 사용된 채취 혼합물 시료  
Fig. 3 The collection mixture samples used in the explosive test

### 4.2 CV공정의 분진폭발 조건 분석

현재 사용하고 있는 CV공정 8개소에서 채취된 분진은 폭발성이 없는 것으로 나타났다. 하지만, 다량의 가연성 분진을 CV공정을 이용하여 취급할 경우의 위험성을 분석하기 위하여 이중 하나의 라인의 분진을 선정하였고, 보수적인 값을 얻기 위하여 폭발성이 높은 티탄(Ti) 분진(320 Mesh)을 혼합하여 폭발성을 나타내는 최소 Ti 분진의 농도를 산정하였다.

가스 증착 공정(CVD)에서 발생하고 있는 티탄은 최소 점화에너지가 낮은 것으로 알려진 금속분진으로 단순히 혼합되면 위험하다고 판단되어 전용 청소기를 통해 집진하고 있어 설비 유지보수 과정에서 위험성이 존재하고 있고 준비과정에서 발생하는 소모시간도 많아 CV 공정에 혼합배출 하려고 하다보니 다른 혼합 금속분진과의 화재폭발 위험성을 평가하고자 하였다.

혼합 분진에서 폭발성이 나타나는 최소 Ti분진의 농도를 조사한 결과, [Table 2]와 같이 Ti(20%) 및 샘플 분진(80%)의 값이 얻어졌다.

표 2 8개소 시료의 폭발성분석 결과  
Table 2 Explosive analysis results of 8 sites

시료 혼합비율		폭발압력 [bar]
Ti (320 mesh), %	샘플 분진, %	
70	30	6.0
40	60	4.4
20	80	1.2
15	75	0
10	90	0

혼합 분진의 입도분석 결과를 [Fig. 4]와 같이 평균입경은 57.41  $\mu\text{m}$  (Median diameter)가 얻어졌다.

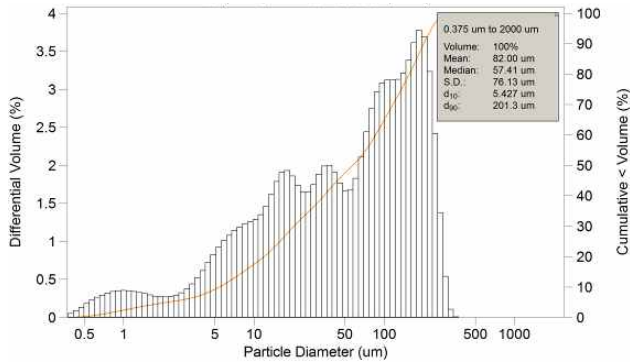


그림 4 티탄 혼합물 분진(티탄 20 % + A라인 분진 80 %)의 입도 분포

Fig. 4 Particle size distribution of titanium mixture dust (20% of titanium + 80% of A-line dust)

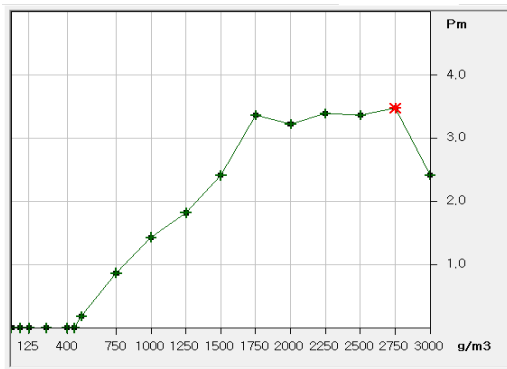


그림 5 티탄 혼합물 분진의 농도에 따른 폭발압력  
Fig. 5 Titanium mixture Explosion pressure by dust concentration

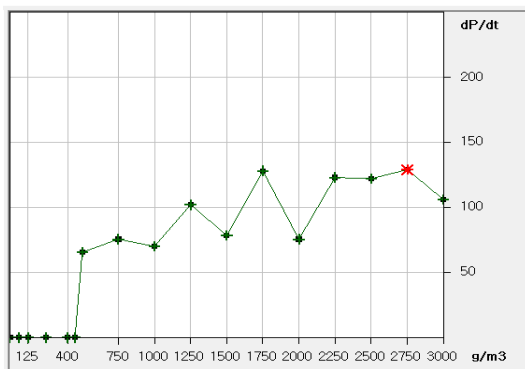


그림 6 티탄혼합물 분진의 농도에 따른 폭발압력상승속도  
Fig. 6 Titanium mixture Explosion pressure rate by dust concentration

Ti분진이 약 30  $\mu\text{m}$ 이며 A라인 분진의 평균입경이 62.72  $\mu\text{m}$ 인 것을 고려하면 티탄 혼합물 분진의 평균입경 값은 타당한 것으로 판단된다. 또한, [Fig. 5]와 같이 농도가 2750  $[\text{g}/\text{m}^3]$ 에서 폭발압력이 가장 큰 3.5 bar가 평가되었으며, [Fig. 6]과 같이 최대폭발압력상승속도 $[(\text{dP}/\text{dt})_{\text{m}}]$ 는 129 bar/s로 측정되었으며, 분진폭발지수( $K_{\text{st}}$ )은 폭발등급은 1등급( $\text{St}-1$ )으로 나타났다.

분진폭발지수 등급은 NFPA(National Fire Protection Association) 기준으로 제시하며, 세부 내용은 [Table 3]과 같다.

표 3 분진폭발지수의 분류

Table 3 Classification of dust explosion index

Hazard Classes of Dust Deflagrations		
Dust Explosion Class	Kst (m·bar/s)	Explosion Characteristics
St-1	1~200	Weak or Medium-Scale Explosion
St-2	201~300	Large-Scale Explosion
St-3	>300	Extremely Large Scale Explosion

[Table 4] 분석결과와 같이 폭발하한농도는 분진 분산 후 0.06s의 지연시간을 두고 5 kJ의 화약 점화에너지를 사용한 결과 폭발하한농도는 500  $[\text{g}/\text{m}^3]$ 이 얻어졌다.

표 4 티탄 혼합물 분진(티탄 20 % + A라인 분진 80 %)의 폭발특성

Table 4 Explosive properties of titanium mixture dust(20 % of titanium + 80 % of A-line dust)

구분	특성값
최대폭발압력 ( $P_{\text{max}}$ )	3.5 [bar]
최대폭발압력상승속도 $[(\text{dP}/\text{dt})_{\text{m}}]$	129 [bar/s]
분진폭발지수 ( $K_{\text{st}}$ )	35 [m·bar/s]
폭발하한농도(MEC)	500 $[\text{g}/\text{m}^3]$

### 5. 고찰 및 결론

국내·외적으로 분진폭발의 발생 빈도는 산업 시설의 증가에 따라 계속적으로 증가하고 있으며, 금속의 분진폭발은 다른 분진에 비해 발열량이 높아 대형 사고로 이어지는 경향을 보이고 있다.

반도체 공정에서는 금속분진이 필연적으로 발생되고 금속분진은 화재폭발을 일으킬 수 있는 요소로 작용할 수 있으므로 폐기 금속분진의 취급 시에 발생할 수 있는 폭발사고 위험성을 예측하기 위하여 분진이 가지고 있는 물리적 폭발위험성을 국제시험규격을 적용하여 평가하였다.

현재 반도체 공정의 고위험 설비인 CV 공정의 8개소에서 채취한 가연성 금속분진에 대한 화재폭발 위험성을 분석한 결과, 분진폭발 위험성이 없는 것으로 확인되었다. 그러나 가연성이 있

는 금속재료의 사용을 추가할 경우 CV 공정의 안전성을 재검토하여야 할 필요가 있다. 따라서 다량의 가연성 금속 분진을 비폭발성 분진과 함께 집진할 경우에 폭발 위험성이 없는지를 알아보기 위하여 “티탄 및 A라인 혼합분진”의 화재폭발 위험성을 실험적으로 측정하였으며, 시험결과 분진폭발은 최소농도 “Ti 20 % + A라인분진 80 %”에서 발생하였다. Ti를 인위적으로 혼합하여 실험한 이유는 Ti가 알루미늄과 유사수준으로 최소점화 에너지가 높아 최악의 폭발 시나리오로 선정하게 되었다.

따라서 혼합분진에서 20 % 이상의 가연성 금속분진이 포함될 경우 화재폭발의 위험성이 있는 것으로 확인되었으므로 본 연구 대상인 CV공정 8개소의 비폭발성 금속분진을 가연성 금속분진과 함께 집진 처리할 경우에 화재폭발 위험성이 있으므로 예방대책 수립이 요구된다.

본 연구를 통하여 반도체 공정에서 발생하는 분진의 성분 및 이로 인한 가연성 금속과의 영향에 따른 위험성을 분석할 수 있었으며, 향후 동종업종을 포함한 전자산업 분야에서의 화재폭발 위험성평가 및 개선방안을 합리적으로 제시하고, 안전수준의 향상을 위한 기초데이터로 활용되는데 기여할 수 있을 것으로 본다.

References

[1] Van der, P. and Wel, “Ignition and Propagation of Dust Explosions”, Delft Univ. Press, pp. 152-157, 1993.  
 [2] Seop Woo Han, “Research Trend of Dust Explosion Hazard in Industrial Sites”, Korea Occupational Safety & Health Agency, vol. 12, pp. 20-25, August 2008.  
 [3] Eckhoff, R.K., “Dust explosions in the Process Industries-3rd ed.”, Gulf Professional Publishing, pp. 199-250, 2003.  
 [4] Seung Hyun Kim, Jeong Ah Shin, Hae Dong Park, “Exposure Possibility to By-products during the Processes of Semiconductor Manufacture”, Korean Industrial Hygiene Association, vol. 22, no. 1, pp. 52-59, April 2012.  
 [5] NFPA 652, “Standard on the Fundamentals of Combustible Dust”, pp. 6-9, 2016 edition.  
 [6] NFPA 654 “Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids”, 2013 edition.  
 [7] OSHA 3371-08-2009, “Hazard Communication Guidance for Combustible Dusts”, 2009.  
 [8] Woo Jin Jeong, Nagaihirosi, “Explosion Characteristics of Magnesium Dust According to Particle Size”, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 13, no. 2, pp. 203-208, 2013.  
 [9] Database for Major industrial accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency, 1988~2015.  
 [10] Fire and explosion accident data, JNIOOSH 2014.

[11] US. Chemical Safety Board report (CSB) 2014.  
 [12] Jung Gyun Kuk, Eun Cheol Oh, Yeong Geun Baek, Study on the ignition of the painting booth”, Congress of the Korean Institute of Fire Investigation, vol. 20, pp. 147-171, April 2010.  
 [13] KOSHA CODE D-34-1999 “Technical Guidelines for the Prevention of Dust Explosion”, Korea Occupational Safety & Health Agency, 1999.  
 [14] KOSHA CODE D-40-2000 “Dust Collection Equipment Dust Explosion Prevention Technical Guidelines”, Korea Occupational Safety & Health Agency, 2000.  
 [15] KOSHA Guide P-41-2012 “Technical Guidelines on Width Federal Outlet Installation Methods to Prevent Dust Explosion”, Korea Occupational Safety and Health Agency, 2012.  
 [16] KOSHA Guide P-128-2012, Korea Occupational Safety & Health Agency, 2012.  
 [17] Nakbae Kim, “Characterization of Semiconductor Using Neutron Activation Analysis-II - Manufacturing Process and Surface Depth Profile analysis -”, Analytical Science and Technology, vol. 11, no. 6, pp. 1065-1074, 1998  
 [18] ISO-13320 “Particle Size Analysis-Laser Diffraction Methods, Part 1 : General Principle, 2009

저 자 소 개



박 창 섭 (Chang-Sup Park)

1971년 1월 15일생. 1995년 서울과학기술대학교 졸업. 1997년 서울과학기술대학교 대학원 안전공학과 졸업(석사). 2014~서울과학기술대학교 대학원 안전공학과(박사과정). 1994년~삼성전자 환경안전그룹 그룹장



김 찬 오 (Chan-O Kim)

1953년 7월 30일생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1981년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년~서울과학기술대학교 안전공학과 교수