

분진사고의 원인 및 대응방안과 안전장치의 필요성

오 선 일* · 주 용 마** · 김 부 열*** · 강 경 식*

*명지대학교 산업경영공학과 · **WB산업 · ***운해이엔씨(주)

The cause and prevention for dust accident and necessity of safety device

Sun-Il Oh* · Yong-Ma Joo** · Bu-Yeol Kim*** · Kyung-Sik Kang*

*Department of Industrial & management Engineering, Myoung-Ji University

Industry of WB · *Coperation of UnhaeENC

Abstract

In the industrial site of 21st century, there are many and various powders of material, product and fuel of coal, chemical, detergent, paint, feed and more. Therefore, there always is a possible danger of dust explosion in each and every procedure and actually, there are increasing frequency of dust explosion as the use of dust and its amount increases in processes. Therefore, if we leave the current status like now, the unexpected massive dust explosion and its risk cannot be effectively prevented so there has to be effective application of understanding and development of explosion-prevention technology about dust explosion. Therefore, this research set the limit of research to systematically arrange the research results about dust explosion phenomenon and its prevention up to date and has its purpose to theoretically establish the prevention technology about dust explosion based on these theories.

Keywords : dust explosion

1. 문제제기 및 연구목적

산업발달과 기술의 진보에 따라 분체를 취급하는 공정이 증가하고 있다. 시멘트 공업, 플라스틱 공업, 유기합성 공업, 분말금속 공업, 식료품 공업, 사료 공업, 제약 산업 등에서 원료 제품으로 분체를 많이 취급하고 있다. 1980년 2차 오일쇼크 이후 유가의 상승에 따라 석탄 분말을 사용하는 에너지 산업, 신소재로서의 기능성 물질과 전자재료의 개발이 활발하게 진행되어 이 분야에서 분체를 취급하는 공정도 증가하고 있는 실정이다. 이와 같이 분체 취급분야의 확대, 취급 량의 증

대, 공정의 연속화, 생산속도의 가속화의 경향은 분진 폭발의 잠재위험성을 증가시키며 해마다 분진폭발사고는 증가하고 있는 실정이다.

분진폭발을 일으키는 분진은 금속분진을 포함하여 석탄, 고무, 플라스틱, 천연수지, 유·무기화학제품, 의약품, 곡물, 농산물, 목재, 섬유질 등이 있다. 이렇게 많은 분진들 중 가연성 분진을 취급하는 장소에 착화원이 존재하게 되면 화재 폭발을 일으킬 가능성이 있지만, 분진의 화재 폭발의 발생빈도가 가스폭발 사고보다 작아서 위험성에 대한 인식이 부족하고 소홀히 취급되는 경향이 있다.

† 본 논문은 명지대학교 안전경영연구소 협력에 의해 이루어진 논문임.

† 이 논문은 명지대학교 중소기업산학협력센터 지원으로 수행되었음.

† 교신저자: 오선일, 경기도 용인시 처인구 남동 산 38-2 명지대학교 산업경영공학과

M · P: 010-3815-2156, E-mail: sqc1004@hanmail.net

2011년 4월 20일 접수; 2011년 5월 10일 수정본 접수; 2011년 6월 7일 게재확정

본 연구에서는 분진폭발에 대해 면밀히 분석하여 분진의 화재, 폭발에 대한 대응방안과 그에 따른 안전장치의 필요성을 분석하고자 한다. 이러한 연구는 분진을 사용하고 있는 모든 산업분야에 제공함으로써 재해예방에 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 분진의 정의

지름이 1,000 μ m 보다 작은 입자는 물질의 종류에 관계없이 분체라고 부른다. 그 중 75 μ m이하의 고체입자로서 공기 중에 떠 있는 분체를 분진이라 부른다. 이들은 항상 우리의 생활주변이나 생산공정 중에 존재하고 있으며 대단히 입자가 작아서 대략 직경이 10-5cm 이하로 되면 aerosol로 공기 중에 분산하여 현탁상태가 된다.

이들은 액체의 미립자 즉 mist의 상태와 거의 동일하며 침하(沈下)가 발생하지 않는다. 이와 같이 되면 가연성가스와 마찬가지로 위험성이 있다고 생각하여도 좋지만 실제로 우리가 폭발위험이 있다고 다루는 분진은 약 10-3cm 정도 이하의 입자크기로 영구적으로 부유(浮遊)상태로 있는 것은 아니다.

또 분진은 그 생성과정에서 균일한 입자인 것은 거의 없고 aerosol과 같은 작은 것에서부터 꽤 굵은 것이 혼합하여 있는 것으로 알려져 있다.

2.2 분진의 종류

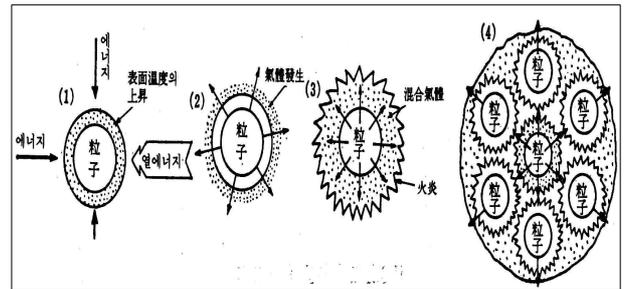
분진은 폭발하는 성질에 따라 폭연성분진과 가연성분진으로 크게 구분한다. 폭연성분진은 공기 중에 산소가 적은 분위기 중 또는 이산화탄소 중에서도 착화하고 부유상태에서도 격렬한 폭발을 일으키는 마그네슘, 알루미늄, 알루미늄브론즈 등의 금속성분진이 여기에 속한다.

가연성분진은 공기 중의 산소와 발열반응을 일으켜 폭발하는 분진으로 소맥분, 전분 등과 같은 곡물분진, 합성수지류, 화학약품 등 비전도성인 것과 카본블랙, 코크스, 철, 동 등 전도성을 갖는 분진으로 구분된다.

2.3 분진폭발의 메카니즘

분체저장탱크내부, 분쇄공정, 집진장치 등의 내부에 부유상태의 분체에 열에너지가 주어지면 입자표면의 온도가 상승되고 가연성고체의 착화과정과 같이 분체(분진) 입자 표면의 분자가 열분해 혹은 건류과정을 일

으켜 기체로 되어 입자의 주위로 방출되고 이 가연성 가스가 입자주위의 증기와 혼합하여 가연성혼합공기로 형성하고 가연성혼합공기는 가해진 점화에너지에 의해 발화되어 화염을 생성하고 화염에 의해 생성된 열은 주위의 다른 분체(분진)입자들과 열분해된 잔류물질 등을 연소, 이러한 착화과정이 순간적으로 주위로 전파됨으로써 급격한 압력을 상승시킨다.

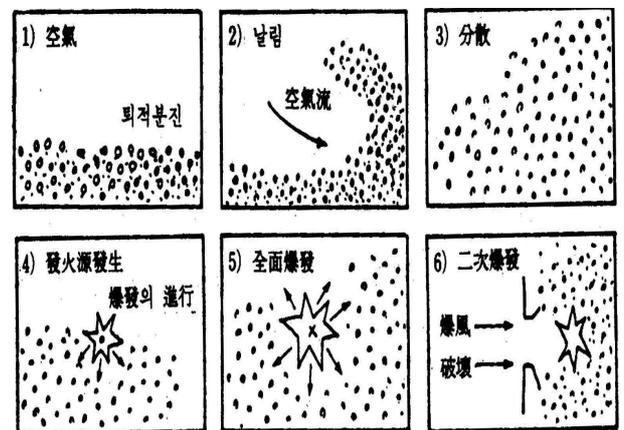


[그림 1] 분진폭발 과정

2.4 분진폭발의 특징

분진은 공기중에 부유하는 경우와 구조물 등에 퇴진하는 경우가 있으며, 이들이 폭발을 일으키기 위해서는 어느 정도 크기의 미립자로서 공기중에서 부유하여 분진운(dust cloud)을 형성하여야 한다. 그러므로 분진폭발은 공간폭발의 일종이며, 가스 및 증기폭발에서는 가연성 물질이 가스 또는 증기인데 반해 분진폭발에서는 고체입자라고 할 수 있으며, 분진폭발 발생의 조건은 다음과 같다.

- (1) 공기(지연성 가스) 중 부유, 분산하여 있을 것
- (2) 부유분진농도가 폭발하한계 이상의 농도일 것
- (3) 충분한 energy와 energy밀도를 가진 착화원이 존재할 것



[그림 2] 분진폭발의 발생순서

가연성가스는 분자상태에서 공기와 혼합하여 폭발성 혼합가스를 형성하나 분진폭발을 일으키는 분진은 부유·분산하기 위해서 그 입자크기에 제한이 있다. 분진폭발을 일으킬 것인가의 여부는 구체적으로 분진이 형성되는 혼합계의 형상과 크기, 착화원 및 분진·공기 혼합계의 성상에 의존하므로 간단히 규정하기는 어려우나 일반적으로 약 $500\mu\text{m}$ 이하의 입자경을 가지는 가연성 분진이 폭발을 일으킬 위험성이 있다고 알려져 있다.

분진이 공기중에 부유·분산하여 폭발성의 분진공기 혼합계를 형성하지 않고 구축물 등에 퇴적되어 있는 경우에도 다른 외부 조건의 영향으로 분진운을 형성하여 폭발을 일으키는 2차 폭발이 발생할 수 있으므로 분진이 퇴적되어 있는 것만으로도 폭발발생 조건의 한 가지를 만족하게 되는 경우도 있다.

분진폭발은 분진·공기혼합계 증을 연소대가 전파하게 되며 일반적으로 분진의 연소형태에는 기상연소와 이상(異相)표면연소가 있다.

기상연소는 입자표면에 열에너지를 가하면 표면온도가 상승하여 휘발 또는 증발에 의한 가연성가스 또는 증기를 방출하는 가스화가 진행되고 이것이 공기중에 확산 또는 사전혼합 되어 연소하는 경우를 말하며, 이상표면연소는 고체 표면에서의 산화반응인 연소현상으로 고체와 기체의 반응에 해당한다. 일반적으로 휘발성이 많은 분체에서는 기상연소가 일어나고 휘발분이 거의 없고 입자경이 작은 경우는 표면연소가 발생한다. 일반적인 가연성 유기물(고분자물질 또는 곡물 분체 등)은 가열에 의해 열분해가 발생하여 이 가연성의 열분해가스 또는 증기가 기상연소를 일으킨다. 한편 금속분진의 경우 Al, Mg의 경금속 분진은 용융, 증발하여 기상연소를 하지만 Fe, Ti, Si 등의 금속분진은 폭발화염 중에서 표면연소를 한다.

또한 분진폭발은 급격한 압력상승이나 통제불가능한 팽창효과를 초래하는 분진운의 연소로 볼 수 있으며, 이 팽창효과는 연소 시에 발생하는 열 때문에 발생한다. 분진폭발은 먼저 폭발압력이 나타나고 $1/10\sim 2/10$ 초 늦게 화염이 오며, 분진운을 통과하는 화염의 전파속도는 화재시의 화염속도에 비교하여 빠르고 폭연의 상태에서는 대체적으로 $1\sim 10\text{m/s}$ 정도이며, 만약 이런 폭연이 폭풍으로 전이하면 충격파를 동반하면서 음속 이상인 1000m/s 의 속도를 나타내게 된다. 폭풍은 폭연보다 대단히 위험하여 발생시의 피해규모도 엄청나게 크게 된다.

분진폭발은 가스폭발과는 달리 폭발의 최초단계에서 분위기를 통과하여 이동하는 압력파가 퇴적하고 있는 분진을 부유시키는 원인으로 되는 특성을 가지고 있다. 이때 교란과 진동으로 인하여 분진운이 형성되고 그것이 이미 발생한 폭발화염에 의해 다시 발화하여 폭발을 일으키는

2차 폭발이 발생하게 된다, 이 2차폭발의 파괴적 효과는 1차폭발의 경우보다 훨씬 큰 경우가 많으며, 이는 보다 많은 양의 분진이 2차폭발에 휩싸여 들어가므로 방출되는 에너지의 총량이 크기 때문이다.

분진폭발은 연소시간이 길고 분완전연소를 일으키는 특징을 가지고 있으며 가연성 유기분진과 가스폭발의 차이점을 살펴보면 유기분진의 하한계는 열분해 가스량에 상당한다고 할 수 있으며, 분진이 연소하기 위하여는 먼저 열분해하여 발생한 분해가스(휘발분을 포함)가 주위의 공기와 혼합하여 폭발하한계를 형성하여 연소를 시작한다. 분진농도가 상당히 높은 농도에서는 화염면에 다량의 미반응 분진입자가 침강하든지 진입하게 되고 하염은 냉각되어 소염을 일으키는 것으로 되어 상한계가 존재하게 되는 것이다. 따라서 이것이 가스폭발의 상한계와 다른 의미를 갖는다고 할 수 있다.

또한 분진폭발의 중요한 인자는 분진의 입자경으로 물질을 미세화 하면 할수록 입자표면적이 증대한다. 미세화의 과정은 새로운 표면상태를 형성하고 입자경이 작을수록 분산하기 쉽게 되며, 표면적의 증가는 열전달을 용이하게 하여 산화반응이나 열분해 반응을 촉진하므로 입자경이 커서 폭발을 일으킬지 않던 분진도 미분화하면 격렬한 연소반응을 일으키는 경우가 많다.

3. 대응방안 및 안전장치의 필요성

3.1 폭발방지의 기본 개념

폭발이 발생하기 위해서는 가연성 물질과 산화제가 혼합된 상태로 있어야 하고 충분한 점화에너지가 존재해야 한다. 이 중에 가연물이 산화제와 혼합하여 폭발범위 내에 있는 조건을 물질조건이라 하며, 점화에너지 또는 발화온도를 에너지 조건이라 한다.

폭발방지는 폭발사고의 발생을 미리 방지하는 사전대책으로 물질조건과 에너지조건을 제어함으로써 점화를 방지할 수 있다.

분진의 경우 폭발 방지대책으로는

- (1) 분진의 퇴적 및 분진운의 생성 방지
- (2) 점화원의 제거
- (3) 불활성 물질의 첨가 등의 방법을 들 수 있다.

이들 중에서 분진을 취급하는 공정에서 분진운의 생성을 방지하기는 거의 불가능하며, 불활성 물질의 첨가에 있어서도 불활성 가스나 분진의 첨가는 조업 중의 작업자나 제품의 품질 때문에 불가능한 경우가 많으므로 점화원을 제거하거나 제어하는 쪽이 가장 유리한 방법이 된다.

3.2 분진운의 형성 억제

분체를 취급하는 공정에서는 어느 정도의 분진의 분산을 피하기는 어려우나 어떤 경우라도 분진의 분산을 예상하지 않으면 안되므로, 공장을 설계하고 배치를 결정할 때 불필요한 분진운 형성의 가능성을 적극적으로 억제할 수 있도록 하지 않으면 안 된다.

부유분진이 형성되는 장소에서는 될 수 있는 한 빨리 분진을 제거하도록 공정을 설계하여야 하며, 부유분진이 공정내에서 침강하여 퇴적하는 장소에서는 정기적으로 퇴적분진을 제거하지 않으면 안 된다.

일반적으로 가연성 분체를 취급하는 공정에서는 폭발범위내의 부유분진이 형성될 위험성이 상존하나, 부유분진의 평균농도가 어떠한 경우에도 폭발한계의 1/2 이상을 초과하지 않도록 하는 것이 바람직하다.

3.3 점화원의 제거

분진폭발을 일으킬 수 있는 위험요소 중 점화원의 제거가 분진폭발을 방지할 수 있는 가장 좋은 방법이다. 점화원은 대부분 특별한 공정과 관련되어 있으므로 점화원이 될 수 있는 공정에 대하여 안전수단을 강구함으로써 분진폭발을 일으킬 수 있는 잠재적인 위험성을 제거할 수 있다.

분진폭발의 점화원이 될 수 있는 것들로는 불꽃(나화), 고온표면, 용접이나 절단작업시 발생하는 불뚱, 마찰 및 충격, 전기 스파크, 정전기 불꽃, 자연발화 등이 있다.

불꽃 점화원은 다른 점화원에 비해 가장 위험하기 때문에 공정에서 불꽃과 관련된 것은 피하도록 하며, 저압의 스팀이나 열교환기를 이용하고, 작업장 내에서의 흡연이나 성냥 라이터 등을 휴대하지 않도록 해야 한다.

공장 내에서 고온부가 많으면 고온부에 퇴적된 분진은 열에 의해 휘발분의 방출과 함께 점화되어 초기에는 적은 불씨이지만 점점 확대되어 분진폭발로 발전하게 되며, 고온 건조기나 과열된 베어링 부분들을 특히 주의해야 하며, 주변에 분진이 퇴적되지 않도록 해야 한다.

공장의 전기스위치나 전동기 등에서 발생하는 스파크는 매우 위험한 점화원이 되므로 분진의 침입을 막는 방진구조나 양압(positive pressure)시설 등을 통하여 전기 스파크와 분진을 격리시켜야 한다.

3.4 안전장치 필요성

일반적으로 분진 폭발성 혼합기체는 가연성 분진을 취급할 때 생성되는 경우가 많고, 대부분의 경우 이의

생성을 방지하는 것은 매우 어려워 취급설비 내부에 퇴적되는 것이 일반적이다. 퇴적된 분진의 내부 또는 외부에서 보통 100mj 정도의 에너지가 인가되면 최소 점화에너지 공급량을 충족시켜 분진 폭발이 발생하는데, 밀폐용기 또는 밀폐된 설비 내에서 급격한 압력상승을 초래하여 용기 등의 설비를 파괴시키고, 폭발 시 분진의 건류 또는 일산화탄소(CO)등 유독가스를 발생시켜 2차 재해를 발생시킬 수 있다.

가연성 가스 취급설비에는 압력 방출설비가 있으나 분진 취급설비에는 압력 방출설비 등은 사용할 수 없고 폭발의 억제나 소화설비가 없어 분진 폭발 시 피해를 감소시킬 수 없는 문제가 있다.

이렇듯 분진 취급설비에 압력 방출설비가 없으므로 기술개발의 과정을 거쳐 이를 토대로 경제적 이익을 창출하고 사고와 재해를 줄이는 것이 필요하다.

이러한 내용을 바탕으로 분진 취급설비를 다루는 산업체에서는 압력 방출설비가 있게 됨으로서 얻게 되는 효과가 증대될 것으로 보이며 아직까지 이러한 압력 방출설비 기술을 가지고 있는 업체가 없는 것으로 파악되어 이를 통해 분진 압력 방출설비의 기술적 혁신을 이끌어 낼 수 있을 것으로 보인다.

3.5 안전장치

분진폭발이 발생되었을 때 폭발압력을 적당한 장치나 방법을 통해서 외부로 방출시킴으로써 내부의 압력을 완화시켜 재해의 확대를 방지, 감소시키는 방법이다. 방출시키는 방법은 rupture disk, bursting diaphragm, 폭발 방산문 등을 이용하여 배출시키며, 배출구의 크기를 결정하는 방법은 vent ratio법, cubic root법, theoretical법 등이 있다.

다음의 [그림 3]은 명지대학교 중소기업산학협력센터 지원 사업을 통하여 개발된 분진폭발안전장치의 시제품이다.



[그림 3] 분진폭발안전장치

공정은 가능한 단위별로 분리하여 설치하며, 습식(wet type)공정을 사용하고 scrubber를 설치하여 분진의 퇴적을 막는다. 또한 분진 취급 장치류는 밀폐하여 외부로 분진이 누출되지 않도록 한다.

대기 중으로 방출(atmospheric release)하는 경우는 집진기를 사용하고, 공기수송방식의 경우 공기의 흡입은 안전한 장소로부터 역화(逆火)하여도 피해가 없는 안전한 곳으로 해야 한다.

가연성 분진을 취급하는 공장도 가연성 가스나 액체류를 사용하는 공장도 마찬가지로 가능한 건물을 개방식으로 하고, 위험성이 적은 건물과 격리시키도록 하는 것이 좋다.

또한 작업장 안의 청소와 정비를 철저히 하고, 건물의 위치와 구조도 분진이 잘 쌓이지 않는 구조로 하고, 건물의 내용적은 소형으로 하여 옥외구조로 만들거나 가벼운 지붕으로 덮고, 문짝은 밖으로 열릴 수 있는 구조 등으로 한다.

4. 결론 및 향후 계획

4.1 결론

일반적으로 제조공업에 있어서 가연성 기체나 인화성 액체류에 의한 폭발재해 건수나 손해정도가 크게 증가하고 있다. 이에 못지 않게 산업의 발달과 함께 새로운 물질의 생산과 취급방법등의 변천으로 분체의 취급과 분체의 공기수송 공정 등이 증가함에 따라 분진 폭발의 잠재위험성도 증가하고 있을 뿐 아니라 사고 시에도 대형의 사고를 유발하게 된다. 따라서 점차 복잡해지는 생산공정 등에서 분진폭발 사고를 방지하기 위해서는 분진폭발의 위험성에 대한 새로운 인식과 폭발방지를 위한 연구 및 위험성 평가방법의 확립이 필요하다. 이러한 이론적 이해를 바탕으로 분진사용공정 등에서는 분진폭발 방지를 위한 대책을 세워 분체의 취급부주의에 따른 분진폭발 사고를 예방할 수 있도록 해야 한다.

4.2 향후 계획

분진 사고를 대비한 안전장치의 필요성이 대두되는 시점에서 명지대학교 중소기업산학협력센터 지원 사업을 통해 제작된 분진폭발안전장치를 한국산업안전보건공단의 신뢰성 및 품질 검사를 통해 안전장치의 우수성을 입증 할 계획에 있다.

분진폭발안전장치의 우수성이 입증 성공시에는 산업

안전보건법 보건기준을 활용하여 특정유해 위험물질 취급사업장의 이동식 국소박이 장치에 폭발안전장치 설치를 의무화 할 수 있도록 하고, 대기오염방지법 및 에너지 이용합리화법을 통해 기존에 없는 분진폭발안전장치의 설치 홍보를 하여 국내·외 사업장에 설비를 할 수 있도록 장려해야 할 것이다.

5. 참고 문헌

- [1] 이창우, 항영민, 김정환, 현성호(1998), “가축사료의 분진폭발 위험성에 관한 연구”, 한국화재소방학회지, 12권, 2호, pp.61~68
- [2] 안형환(2001), “합성화학분진의 폭발특성과 발화온도에 관한 연구”, 충주대학교 논문집, 36권, 1호, pp.655~667
- [3] 한우섭(2010), “마그네슘합금 분진 폭발사고와 안전대책”, 안전보건 연구동향 34권, pp.50~55
- [4] 경태환(2010), “분진폭발의 이해와 방지대책”, 소방안전 제30권 제1호 pp.28~33
- [5] 강석호(1991), “분진폭발의 예방과 방제”, 한국화재소방학회논문지
- [6] 정윤섭(2005), “분진폭발 예방 및 housekeeping의 중요성”, En journal 제10호 pp.24~35
- [7] 김원희, 이승철, 승삼선, 김진남(2008), “시멘트 제조 공정에서 유연탄 분진의 폭발특성”, 한국산학기술학회논문지 제9권 제2호 pp.267~263
- [8] 목연수(2001), “분진폭발의 예방대책”, 산업안전기술지

저 자 소 개

오 선 일



조선대학교 기계공학과를 졸업하고 명지대학교 산업공학과에서 석사 취득하였으며 박사과정에 재학중이다. 관심분야는 생산관리, 품질관리, 서비스 품질경영, 물류이며, 현재는 물류산업의 서비스 품질에 대한 연구를 수행하고 있다.

주소: 경기도 용인시 처인구 남동 산 38-2 명지대학교 산업경영공학과

김 부 열



홍익대학교 기계공학과를 졸업하고 연세대학교 행정대학원 고위정책과정을 수료하였으며 전경련 국제경영원 최고경영자과정을 수료하였다. 현재 운해이엔씨(주) 대표로 재직하고 있다. 주요 관심분야는 산업재해예방컨설팅, 공조시설, 환경오염방지시설 등이다.

주소: 서울 영등포구 여의도동 14-21 LG에클라트빌딩 430호

주 용 마



서강대학교에서 석사. 제조업 분야에서 부품사업 및 완성품 사업에 전념하며 관심분야는 기업의 생산성 향상 및 산업용품의 기술개발 분야이며 현재 WB산업의 대표이사로 재직중이다.

주소: 경기도 용인시 수지구 동천동 동문아파트 303동 2002호

강 경 식



인하대학교 산업공학과에서 학사·석사·박사와 연세대학교·경희대학교에서 경영학 석사·박사 취득. North Dakota State Univ.에서 Post -Doc과 Adjunct Professor 역임. 현재 명지대학교 산업경영공학과 교수로 재직 중. 주요 관심분야는 생산관리, 물류관리, 안전경영 등이다.

주소: 경기도 용인시 처인구 남동 산 38-1 명지대학교 산업경영공학과