| 융합카페 |

Vacuum Safety

주장헌

거의 모든 산업 분야에서 사용되는 진공 기술은 없어서는 안 될 중요한 기술이지만 그 존재를 인식하고 사용하는 사람들은 거의 없다. 이러한 무관심은 대학/대학교 그리고 연구소에서 진행되는 교육 과정에도 그대로 반영된다. 즉, 대학/대학교의 정규 교육 과목에는 진공기술 자체나 관련된 기술을 교육하는 학과나 과목이 없다는 것에서도 알 수 있다.

진공기술과 진공 관련 기술에 대한 무관심이 이러할진데 여기에 잠재되어 있는 위험 요소들도 인지하지 못하고 있는 것은 당연할지도 모른다. 이러한 위험 요소들은 우리가 진공 기술을 이용할 때 항상 수반되는 것들이지만 그 위험 정도를 심각하게 느끼는 사람들은 그리 많지 않은 것도 사실이다. 이러한 위험 요소들은 이미 잘 알려져 있는 것들도 있고 그렇지 못 한 것들도 있다. 여기서는 진공 기술을 사용할 때 고려해야 하거나 진공 장비 주변에 상존하고 있는 위험 요소들을 기술하고 어떻게 대처할 것인가에 대해서 설명해 보도록 하자.

이제부터 각각의 안전성 문제를 자세히 설명해 보도록 하자. 진공 장비 주변에 상존하고 있는 위험 요소들은 다음과 같은 것들이 있다.

- 진공 위험성(Vacuum hazard)
- 과압 위험성(Over-pressure hazard)
- 전기 충격 위험성(Electrical shock hazard)
- 냉각수/냉각제 위험성(Cooling water/coolant hazard)
- 화학물질 위험성(Chemical hazard)
- 공정이 진공 펌프에 미치는 영향 및 그 위험성
- 기계적 위험성(Mechanical hazard)

여기서는 진공 펌프와 진공 시스템의 사양 선정, 설계, 가동과 유지 보수와 관련되어 발생할 수 있는 안전 사항들에 대해 설명하고 각 위험성들이 실제로 일어날 가능성을 최소화하는 방법들에 대해 설명하고자 한다. 안전 장치가 설치되어 있거나 안전과 관련하여 BKM(Best Known Method)이 있더라도 진공 배기 시스템에서 폭발이나 화재가 종종 발생하기도 한다. 그 이유는 잘못된 방법이나 절차에 따라 진공 배기 시스템을 사용하기 때문인데 이때 발생하는 사고들은 때로는 매우 심각하여 최근 반도체 생산 라인, LCD 생산 라인 등에 발생한 것과 같이 부상과 사망 등의 인명 피해를 수반하기도 한다.

1. 진공 위험성

2014년과 올해 국내 굴지의 대기업들에서 발생한 인사 사고의 내용을 보면 안전에 관련된 사항들이 충분히 준수되지 않았다는 것을 알 수 있으며, 특히 진공 관련하여 발생한 인사 사고들은 작업자의 사망을 초래할 정도로 매우 심각한 상황이다. 미국진공학회(American Vacuum Society)의 정의에 의하면 진공은 대기압보다 낮은 압력 상태의 기체들로 구성된 상태/공간을 의미하는데 이는 진공 상태가 일상적으로 사람이 생활하는 공간/조건/환경과는 다르다는 것을 의미한다. 일상적인 생활 환경이 아니라는 것은 사람에 미치는 영향이 일상적인 생활 환경과는 다르다는 것을 의미하며 진공 환경/공간은 대기압과는 다른 기체 상태를 의미한다. 우리가 높은 산에 오르면 정상적인 호흡이 어려워지는 것처럼 진공 환경에서는 사람이 견디기 어려운 상황이 된다는 것

〈저자 약력〉

주장헌 박사는 1996년 연세대학교 물리학과 박사학위를 받고 에드워드 코리아주식회사에 입사하여 현재까지 근무하고 있으며, 2005년 제 1회 반도체 기술 대상 산업자원부 장관상을 수상하였으며 저서로 〈진공기술 실무〉와 〈진공 이해하기〉가 있다. (jh.joo@edwardsvacuum.com)

을 의미한다. 즉 진공 상태에서 질식사할 수 있는 위험성이 상존하기 때문에 적절한 대책을 강구해 두어야 한다.

2. 과압 위험성(over-pressure hazard)

진공 chamber를 포함한 전체 진공 시스템에서 물리적인 과압 상태를 유발할 수 있는 경우는 (1) 시스템 내부로 고압 가스를 주입하는 경우, (2) 휘발성 물질의 온도가 급격하게 상승하는 경우, (3) 고체 증착물(또는 공정 부산물)이 상변이(phase change)를 하는 경우, (4) 진공 펌프 내부에서의 압축 등이다.

정상적인 사용 조건에서는 진공 시스템과 진공 펌프를 연결하는 배관이 대기압 이상의 압력 상태가 되는 경우는 없지만, 비정상적이거나 잘못된 사용 조건하에서 이 부분이 대기압보다 높은 압력 상태가 될 수 있다. 한 가지 예를 들면 진공 펌프가 가동 중이지 않은 상태에서 진공 chamber나 진공 배기 시스템에 압축된 가스(예를 들면 퍼지 가스)를 도입하는 경우, 이 배관이 내부 압력에 견딜 수 있도록 설계되어 있지 않는 경우 파손되거나 공정 가스가 누출될 수 있다. 따라서 pressure regulator와 차단 밸브를 통해 가스를 공급하도록 설계하여야 한다. 또 다른 경우는 진공 펌프 흡입구 쪽이 닫혀 있거나 막힌 경우, 거의 막힌 경우 상태에서 진공 펌프의 회전 방향이 잘못되면 내부에 높은 압력이 발생하게 되어 진공 펌프 파손, 배관 또는 배관에 장착된 부품들이 파손될 수 있다. 만일 주파수 변환기(frequency inverter)를 사용하는 경우 최대 설계 회전수를 초과하여 회전하도록 주파수를 변경하여 설정하면 안된다.

소위 용적 이송식 진공 펌프(positive displacement vacuum pump)라고 불리는 기계식 진공 펌프들은 진공 용기 내부를 낮은 압력 상태, 즉 진공 상태를 만들기 위해 진공 펌프 내부에서 배기되는 기체나 증기를 압축하게 된다. 이때 해당 진공 펌프의 배기구는 흡입구에 비해 기체나 증기가 압축되어 있기 때문에 상대적으로 압력이 높은 상태를 유지한다. 그러나, 진공 펌프의 특성상 대기압 상태인 배기구 외부로 압축된 기체나 증기를 배출하기 때문에 실제 압축된 기체나 증기 압력은 대기압 이상(0.35 bar gauge, 1.35×10^5 Pa)이기는 하지만 과도하게 높은 압력 상태는 아니다. 그러나 배기구가 여러 가지 이유로 막힘 상태이거나 압축된 기체나 증기가 배기되기 힘들 정도로 복잡한 구조(직경이 작은 배관, 길이가 과도한 배관, 굽힘이 많은 배관 등)를 가지게 되면 대기압 이상의 과도한 압력(7 기압, 8×10^5 Pa)까지 압축되어 과압 위험성을 초래할 수 있다. 이런 경우를 대비하여 진공 펌프에 사용되는 전기 모터의 최대 출력보다 낮은 출력까지만 사용되고 과도한 압축으로 인한 전기 모터의 손상을 막기 위한 안전 장치가 장착되게 된다. 화학 공정에 사용되는 진공 펌프 배기구에 연결되는 배관에는 flame arrestor를 장착하기도 한다.

[Fig. 1] 내부 고압으로 인한 터보분자펌프 하우징 손상

그러나 이런 안전 장치가 장착되어 있지 않거나 사용자가 장착되어 있는 안전 장치를 제거하고 사용하는 경우는 기계식 진공 펌프 배기구가 대기압 이상으로 과도하게 압축되어 과압 위험성을 초래할 수 있다. 따라서 기계식 진공 펌프 사용자는 진공 펌프 배기구 후단의 배관 설계에도 신경을 써야 하며 사용 중 진공 펌프의 배기구 막힘 현상이 일어나지 않도록 지속적으로 신경을 써야 한다. 진공 펌프 배기구는 1 bar gauge(= 2 bar absolute, 2×10^5 Pa)를 넘지 않도록 배기라인을 설계하여야 한다. 각 공정과 진공 시스템 구성에 따라 그에 적합한 배기라인 과압 방지 설계를 하여야 하며 필요한 조치나 장치들을 사용자들이 충분히 설치해야 한다.

고진공 펌프 중 하나인 크라이오 펌프는 기체나 증기의 온도를 매우 낮은 온도로 떨어뜨려 기체나 증기의 열운동에너지를 제거하는 방식으로 진공을 형성/유지하게 된다. 아래 식은 기체 분자 한 개가 갖는 평균 열운동에너지는 절대온도 T와 함께 다음과 같은 관계식을 주어짐으로 보여 주고 있다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT, PV = NKT$$

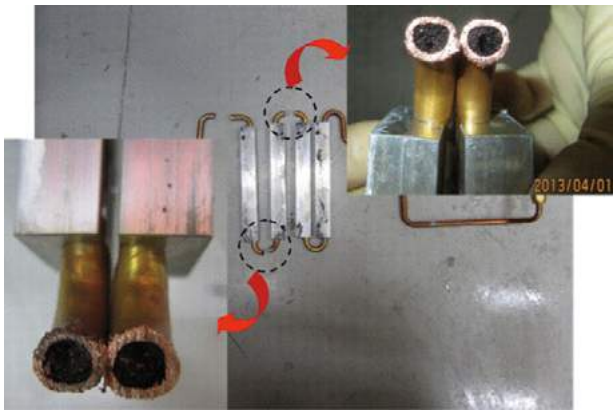
한편 이상기체상태 방정식에서 압력(진공도)은 절대온도에 비례함으로 만일 온도가 낮아지면 압력이 낮아지는, 즉 진공이 형성된다는 것을 의미한다. 그러나, 크라이오 펌프는 포획식(entrapment type) 진공 펌프이기 때문에 기체나 증기를 포획할 수 있는 공간이 기체나 증기로 가득 차면 더 이상 진공 배기를 할 수 없다. 따라서 크라이오 펌프는 주기적으로 내부에 포획되어 있는 기체나 증기를 주기적으로 외부로 배출해야 하는데 이것을 크라이오 펌프 재생(regeneration)이라고 한다. 크라이오 펌프 재생 작업은 포획되어 있는 기체나 증기에 다시 에너지를 공급하여 진행되기 때문에 재생 과정 중 크라이오 펌프 내부 압력은 대기압 이상의 높은 압력 상태가 될 수 있어 압력 완화 밸브(pressure relief valve)를 통해 높은 압력 상태의 기체나 증기를 외부로 방출하게 된다. 그러나 이 압력 완화 밸브가 제대로 작동하지 않거나 외력에 의해 막혀 있는 경우 재생 과정 중 크라이오 펌프 내부 압력은 계속적으로 증가되어 폭발할 수가 있다.

3. 전기 충격 위험성

환경에 미치는 영향과 에너지 절감 차원에서 진공 펌프에 사용되는 전원을 고압 전원(380 V, 440 V 등)으로 교체하여 사용하는 경우가 있다. 이 경우 고압 전원으로 인한 감전 사고의 위험성이 있기 때문에 반드시 전원의 연결과 분리는 전문가나 경험이 있는 인력을 통해 진행하여야 하며 해당 작업 진행 전 필요한 안전 조치를 취함과 동시에 재차 확인할 필요가 있으며 전원 인가 스위치에는 작업 중임을 알리는 알림판을 반드시 장착하여야 한다.

4. 냉각수/냉각제 위험성

진공 펌프들 중에 냉각수나 냉매를 필요로 하는 것들이 있는데 그 이유는 진공 펌프는 공정 chamber 내부를 진공 상태로 만들기 위해 기체나 증기를 압축해야 하기 때문이다. 이 압축 과정에서 발생한 압축열(compression heat)을 적절하게 제거하지 않으면 누적된 열로 인하여 금속 재질이 열팽창하고 밀봉(sealing) 기능을 하는 O-ring등이 열손상을 받을 수 있다. 금속



[Fig. 2] 냉각수 내 불순물로 인한 냉각수 공급 배관 막힘 현상

재질의 열팽창은 금속과 금속간의 접촉인 metal seizure를 유발할 수 있으며 O-ring의 손상은 공정에 사용되는 공정 물질들의 대기로의 누출(leakage)을 유발할 수 있어 매우 위험한 상황을 초래할 수 있다.

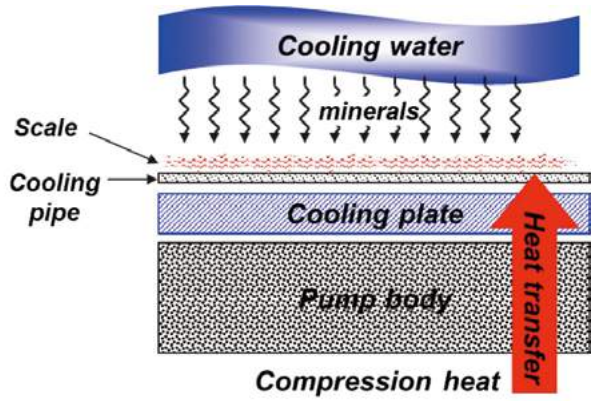
따라서 적정한 순도(purity)와 적정한 유량의 질소가스를 진공 펌프에 공급하여 발생하는 압축열을 지속적으로 제거해 주어야 한다. 그러나, 진공 펌프의 압축열을 제거하기 위해 사용되는 냉각수의 품질이 좋지 않은 경우, 즉 불순물이 많이 포함되어 있는 경우 칼슘(Ca)는 $Ca(OH)_2$ 또는 $CaCO_3$ 형태로 물에 녹아 있지만 온도가 높아지면 아래 반응식과 같이 Calcium oxide, Calcium carbonate를 형성하게 된다.

$$CaO_{(S)}+H_2O \leftrightarrow Ca(OH)_2\,,\; CaCO_{3(S)} \leftrightarrow CaO_{(S)}+CO_{2(g)}$$

즉, 냉각수에 용해되어 있는 $Ca(OH)_2$가 진공 펌프의 냉각이 필요한 부위(cooling jacket, cooling plate, cooling line 등)에서 열에 의해 $CaO_{(s)}$ 형태로 고체 물질을 형성하게 되고 이로 인하여 냉각수의 흐름이 제약을 받게 되어 충분한 냉각이 이루어지지 않게 되어 과열 상태가 되게 되는 것이다. 그림 3은 기계식 진공 펌프의 냉각 부위에서 냉각수와 진공 펌프 몸체 사이의 열전달과 이로 인하여 뜨거운 면에 형성되는 scale에 대한 모식도이다. 이것은 일반 가정용 보일러 배관에 scale이 형성되는 것과 동일한 mechanism이다.

5. 화학물질 위험성

공정을 위해 부식성 물질(예를 들면 F, Cl, Br을 포



[Fig.3] 냉각부위에서의 scale 형성 모식도

함한 가스들)을 사용하거나 공정 반응으로 인하여 생기는 공정 부산물에 부식성 물질이 있는 경우 이로 인한 진공 배기 시스템의 부식 문제를 반드시 고려해야 한다. 그림 4는 진공 배관이 부식성 물질로 인하여 부식되어 배관 연결 부위가 파손된 상태를 보여 주는데 특히 배관 제작을 위해 용접을 한 부위가 부식에 매우 취약함을 알 수 있다. 아무리 부식에 대한 내성을 갖는 stainless steel 배관이라고 할지라도 용접 부위에서는 용접열로 인하여 Chromium carbide(Cr_3C_2, Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$ 등)이 생기며 이 Chromium carbide들은 매우 단단하고 내부식성이 강하지만 이렇게 생성된 Chromium carbide grain 주변에는 크롬(Cr)이 부족한 영역이 생기는데 이 부분이 부식성 물질에 매우 취약한 곳이 되어 결국 부식을 유발하는 것이다.

안전을 위해서 정상적으로 사용하는 경우, 잘못 사용하는 경우 그리고 고장 난 상태 등 모든 경우에 일어날 수 있는 모든 화학 반응을 반드시 검토하여야 한다. 특히 가스(gas)나 증기(vapor)가 사용되거나 발생하는 경우 폭발(explosion)과 폭연(deflagration)이 일어날 수 있기 때문에 모든 예상되는 반응들을 사전에 검토하여야 한다. 경험에 의하면 폭발은 대부분 시스템 설계자가 처음에 고려하지 못 하였거나 진공 배기 시스템의 고장 발생 가능성을 고려하지 못 한 경우에 주로 발생한다.

[Fig.4] Stainless steel 배관 용접 부위의 부식

이러한 위험 요소들을 이해하기 위해 SEMI Standard에 정의되어 있는 몇 가지 용어들을 살펴 보면 다음과 같다.

- 발화성 가스(Flammable gas) : 20℃, 1기압(101.3 kPa = 14.7 psia) 상태에서 공기 중에서 점화될 수 있는 혼합물을 형성하는 기체.
- 산화제 가스(Oxidizer gas) : 연소될 수 있는 물질과 접촉하여 연소율을 높이거나 연소를 돕는 가스
- 자연 발화성 가스(Pyrophoric gas) : 1 기압(101.3 kPa = 14.7 psia) 상태에서 54℃나 그 보다 낮은 온도에서 공기와 접촉하자마자 점화되는 가스

화학 반응은 동종 반응(homogeneous reaction)과 이종 반응(heterogeneous reaction)으로 구분할 수 있는데 동종 반응은 두 가지 도는 그 이상의 가스 분자들간의 기체상(gas phase)에 의해 일어난다. 예를 들면 SiH_4와 O_2간의 반응은 항상 언제나 동종 반응이다. 따라서 만일 공정 진행 중에 이러한 반응이 일어난다면, 공정 압력과 반응제(reactants) 농도를 주의깊게 조절하여 과도한 반응(excessive reaction rate)이 일어나지 않도록 해야 한다.

반면 이종 반응은 고체 표면이 필요한데 어떤 가스 분자들은 표면에 흡착되었을 때 그 표면하고만 반응하지 낮은 압력에서 기체 상(gas phase)에서 반응하지 않는다. 이런 반응은 공정 chamber내에서 일어나는 반응들의 효과를 최소화하기 때문에 어떤 공정들에 대해서는 매우 이상적이어서 오염 입자 발생을 줄이고 오염 가능성을 감소시켜 준다. 대부분의 이종 반응들은 높은 압력(여전히 대기압보다 낮지만)에서 동종 반응이 된다. 이것은 공정 chamber 내부에서 가스들이 반응하는 메커니즘이 진공 펌프에 의해 가스들이 압축되었을 때 반응하는 메커니즘과 다르다는 것을 의미한다.

발화성 물질들은 공기, 산소 또는 산화제등과 합쳐져 폭발 하한값(LFL, Lower Flammability Limit)과 폭발 상한값(UFL, Upper Flammability Limit) 사이의 농도인 경우 폭발 가능성이 있는 분위기를 만들게 된다. 폭발 가능한 상태가 되기 위해서는 산소의 농도가 최소 산소 농도(MOC, Minimum Oxygen Concentration) 또는 LOC(Lowest Oxygen Concentration) 이상이 되어야 하며 대부분의 발화성 가스들의 MOC는 5% 또는 그

이상이다. 따라서 혼합 가스가 발화 가능한 조건이 되지 않도록 다음과 같은 대책을 강구하여야 한다.

- 질소(N_2) 가스 등의 불활성 가스를 이용하여 최저 발화 한계(LFL) 또는 최저 폭발 한계(LEL) 미만으로 발화성 가스 농도를 유지하는 방법. 발화성 가스의 온도는 LEL의 25% 이하로 유지하여야 한다.
- 최대 산소 농도(MOC) 미만으로 산소 농도를 유지하는 방법. 진공 배기 시스템 전체에 걸쳐 산소의 농도를 계속적으로 관찰하여 혼합 가스의 MOC 아래로 유지하여야 한다. 진공 배기 시스템으로 공기나 산소가 유입되지 않게 하거나 질소(N_2) 등의 불활성 가스를 이용하여 희석하여야 한다.
- 폭발 상한값 이상으로 발화성 가스 농도를 유지하는 방법. 예상하지 못 한 상황으로 인하여 폭발 상한값 아래로 발화성 가스 농도가 떨어지지 않도록 대처 방안이 강구되어 있어야 한다.

6. 공정이 진공 펌프에 미치는 영향 및 그 위험성

비정상적인 반응들은 화학물질들이 시스템 설계자가 고려하지 못 한 가스들이나 물질들과 접촉하였을 때 일어난다. 예를 들면 대기가 진공 시스템 내부로 새어 들어오거나 반대로 독성, 발화성 또는 폭발성 가스들이 대기 중으로 새어 나갔을 때 일어난다. 이러한 누설(leakage)가 발생하지 않도록 하기 위해서는 진공 시스템의 leak tightness가 1×10^{-3} mbar · l/s(=1×10^{-1} Pa · l/s)나 이보다 낮은 값을 유지하여야 하며 고진공(high vacuum)에서는 1×10^{-5} mbar · l/s(=1×10^{-3} Pa · l/s)나 이보다 낮은 값을 유지하여야 한다. 이 값들은 sccm으로 환산하면 0.06 sccm과 0.0006 sccm에 해당한다.

[Fig. 5] 공정으로 인해 진공 펌프 내부에서 형성되는 공정 부산물과 폭발

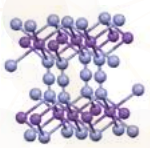
그림 5의 왼쪽은 $SiCl_4$와 NH_3를 이용하여 Si_3N_4를 증착하는 원자층 증착(ALD) 공정에 사용된 오일 회전 베인 진공 펌프의 분해 사진으로 사진에서 알 수 있듯이 대량의 흰색 공정 부산물(NH_4Cl)이 진공 펌프 내부에 생긴 것을 보여 주고 있다. 이때 생성되는 NH_4Cl은 휘발성 물질로서 진공 chamber 내부의 진공을 형성하고 공정 압력(진공도)을 유지하기 위해 진공 펌프 내부에서 일어나는 압축 과정으로 인하여 증기 상태에서 고체 상태로 상변이가 일어나서 생기는 문제이다. 따라서 진공 펌프 내부에서 증기에서 고체로의 상변이가 일어나지 않도록 적절한 대책(온도와 부분압 조절)을 취하지 않으면 진공 펌프 내부에 고체 물질로 가득 차게 되고 진공 펌프가 고장나거나 배기 경로의 막힘으로 인하여 과압 상태가 발생할 수 있다.

$$SiCl_4 + NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + NH_4Cl$$

그림 5의 오른 쪽 그림은 $Ru(OD)_2$와 O_2를 이용하여 ruthenium oxide를 증착하는 금속유기물 화학증착(MOCVD) 공정에서 금속 유기물인 $Ru(OD)_2$와 O_2 그리고 강산화제인 NF_3간의 반응으로 인해 오일 회전식 베인 진공 펌프 내부에서 폭발이 일어나 진공 펌프가 파손된 것을 보여 주고 있다. 이런 폭발 사고를 막기 위해서는 반드시 공정에 대한 안정성 검토를 먼저 해야 하며 진공 배기 시스템 전체에 걸쳐 필요한 안전 조치들을 취하여야 한다.

일상적인 유지 보수 작업(PM) 후에는 공정 chamber를 세정하는데 사용된 수증기나 세정 용액(cleaning solution)이 진공 chamber에 남아있을 수 있다. 또한 수증기는 배기 덕트(exhaust duct)와 배기 가스 처리 장치(scrubber)에서 진공 시스템으로 유입될 수도 있다. 진공 chamber 에서 공정 증착물들(process deposits)을 세정하는데 사용되는 세정 물질들은 진공 배기 시스템에 사용되는 모든 공정 물질들과 섞여도 안전과 관련된 문제가 발생하지 않는 것이어야 한다.

폭발의 위험을 유발하는 원인들은 다음과 같이 구분된다.



- 산화제(oxidants)
- 발화성 물질들(flammable)
- 자연 발화성 물질들(pyrophoric)
- 아지드화 나트륨(sodium axide), NaN_3
  - 자동차 airbag에 사용되는 무색 염(salt)

해당 물질을 제조/판매/공급하는 회사들이 발행하는 MSDS(Material Safety Data Sheets)을 반드시 검토하여 적절한 안전 조치들을 취하여야 한다.

산소(O_2), 오존(O_3), 불소(F_2), 삼불화질소(NF_3) 그리고 육불화텅스텐(WF_6) 등의 산화제들(oxidants)은 많은 물질들과 빠르게 반응하고 이 반응에서 많은 열(heat)을 발생시키며 기체 체적을 팽창시킨다. 이로 인하여 진공 펌프나 진공 배기 시스템에서 화재와 과압(over-pressure)를 유발한다. 만일 산소(O_2)의 농도가 불활성 가스 속에서 25% 이상이 될 것으로 예상되면 PFPE 오일을 반드시 사용하여야 하며, 오일 회전 베인 진공 펌프에 미네랄 오일을 사용하는 경우 반드시 불활성 가스를 이용하여 그 농도를 희석하여 폭발 가능성을 줄여야 한다.

수소(H_2), 아세틸렌(C_2H_2) 그리고 프로판(C_3H_8)같이 많은 가스들이 공기 중에서 특정한 농도 범위에서 점화원(ignition source)이 있으면 발화성과 폭발성을 갖게 된다. 점화원은 다양한 형태로 생길 수 있는 예를 들면 부분적으로 열이 축적된 곳(localized heat build-up) 등이 점화원이 될 수 있다. 불활성 가스를 이용하여 발화성 기체들과 증기들의 농도를 폭발과/또는 발화 한계 이하로 낮출 수 있다. 또 폭발과/또는 발화 위험성을 줄일 수 있는 또 다른 방법은 점화원을 제거하는 것이다. 그러나 진공 공정 시스템 내에 존재하거나 생길 수 있는 모든 점화원을 제거하는 것은 매우 어렵다. 예를 들면 회전 기계류를 사용하는 경우 정전기 방전(static discharge)이나 마찰 과열 부(friction hot spot)등이 생길 수 있다.

비정상적인 사용 조건에서는 발화 영역에서 벗어나는 것이 불가능할 수도 있기 때문에 파손없이 폭발이 일어나거나 불꽃이 외부로 방출되지 않도록 시스템을 설계하여야 한다. Flame arrestor가 그 대표적인 예이다. 이런 경우를 대비하여 ATEX100 Directive(94/9 EC : The Use of Mechanical Equipment in a Hazardous Environment)를 준수하여야 한다.

SiH_4와 PH_3는 대기압 상태에서 공기에 노출되는 즉시 발화되기 때문에 진공 배기 시스템 속에서 이 가스들이 공기와 접촉할 수 있는 곳에서는 연소(combustion)가 일어난다. 공기가 진공 배기 시스템으로 새어 들어 올 수도 있고, 진공 배기 시스템의 마지막 부위는 항상 대기와 접촉하게 된다. 특히 제한된 공간인 배기 덕트, 먼지 필터(dust filter) 그리고 기계식 진공 펌프의 오일 box나 gear box등에서 연소로 인한 폭발이 일어날 수 있다.

[Fig.6] 배기 덕트 내부에서의 화재 및 폭발 mechanism

그림 6은 SiH_4와 H_2 가스를 사용하는 공정의 진공 배기 덕트에 쌓인 powder 성분 아래 잔류하던 SiH_4 가스가 PM 후 초기 배기 과정에서 진공 chamber로부터 진공 펌프로 유입되어 덕트로 배기될 때 powder 성분이 휘저어지면서 잔류하던 SiH_4 가스가 공기와 접촉하며 화재 및 폭발이 일어나는 mechanism을 설명하고 있다.

자연 발화성 물질뿐만 아니라 산화제가 공정 중에 같이 사용되면 대기압과 공정 압력 양쪽 모두에서 폭발이 일어날 가능성이 엄청나게 높아진다. 여러 진공 배기 시스템이 한 배기 덕트에 연결되어 있는 경우 한 진공 배기 시스템에 산화제가 이 배기 덕트로 배출되는 경우 연소 또는 폭발이 일어날 수 있기 때문에 자연 발화성 가스들을 사용하는 경우 개별 배기 덕트를 설치하여야 한다. PFPE 오일이 자연 발화성 물질의 점화와 폭발을 막을

수는 없지만 미네랄 오일을 사용하는 경우와 비교하여 오일로 인한 화재를 일으키지는 않는다. PFPE 오일은 자연 발화성 가스들을 흡수할 수 있음으로 자연 발화성 가스들을 흡수한 상태에서 PFPE 오일이 공기 중에 노출되면 부분적으로 점화될 수 있다. 따라서 자연 발화성 가스들이 흡수된 PFPE 오일을 공기 중에 노출시키고자 하는 경우 사전에 불활성 가스를 이용하여 흡수된 자연 발화성 가스들을 제거하는 것이 바람직하다.

아지드화 나트륨(Sodium azide, NaN_3)은 자동차 에어백에도 사용되지만 동결 건조 공정에서 사용되기도 한다. NaH_3는 상온/상압에서 hydrogen azide(HN_3) 또는 azoimide로 알려진 무색, 휘발성 그리고 폭발성 액체를 만들게 된다. HN_3 증기는 중금속과 반응하여 불안정한 금속 아지드(metal azide)들을 만들어 내는데 이것들은 즉시 폭발할 수 있다. 이러한 중금속들에는 Ba, Cd, Cs, Ca, Cu, Pb, Li, Mg, K, Rb, Ag, Na, Sr, Sn, Zn, Brass 같은 Cu/Zn 합금 등이 포함된다. 진공 펌프 내의 많은 부품들, 보조장치 그리고 배관 등에 Brass, Cu, Cd, Sn 그리고 Zn 등이 통상 사용된다. 만일 공정 중에 NaH_3를 사용하는 경우 진공 배기 시스템 전체에 걸쳐 이런 중금속들이 사용되지 않도록 해야 한다. 인(P)이 사용되는 공정에서는 진공 배기 시스템과 배기 덕트 등에 고체 인(solid phosphorus)가 응축(condensation)될 수 있다. 공기가 있거나 약간의 기계적 휘저음(agitation), 예를 들면 밸브 구조, 압력차로 인한 급격한 기체 흐름 등으로 인하여 인(P)이 연소하면서 독성 가스를 방출하거나 폭발을 초래할 수도 있다.

그림 7은 PECVD 공정에 사용된 용적 이송식 진공 펌프의 스테인레스 스틸 배관이 공정에 사용된 가스들과 진공 chamber 세정용으로 사용된 가스와의 급격한 반응에 의해 매우 짧은 시간 내에 엄청난 열을 발생시켜 녹아 내린 것을 보여주고 있다. 스테인레스 스틸의 녹는점은 1000 °C 이상의 높은 온도이기 때문에 진공 펌프의 압축열에 의해 그림 7처럼 금속을 녹을 수는 없기 때문에 이는 내부에서의 화학 반응에 의해 발생한 엄청난 열 에너지에 의해 녹아 내린 것이다. 다행히 이 경우는 화재나 폭발까지는 일어나지 않은 경우이다.

[Fig. 7] 기계식 진공 펌프의 스테인레스 스틸 배관이 내부 화학 반응에 의해 녹아내린 상태

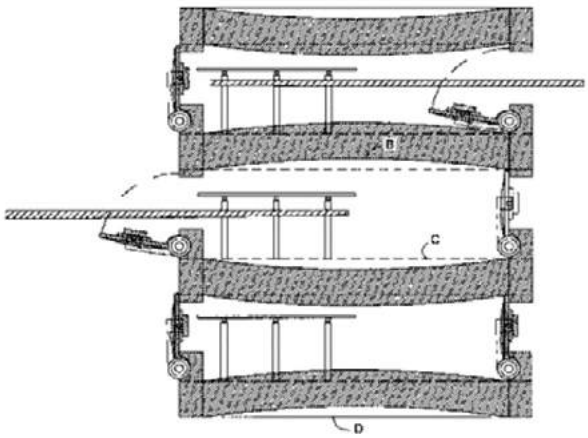
7. 기계적 위험성

진공 상태/조건은 개방된 공간을 진공 상태로 만드는 것은 아니다. 즉, 통상 진공 용기, 진공 chamber 라고 부르는 어떤 특정한 공간을 진공 상태(낮은 압력 상태)로 만든다. 따라서 진공 용기 내부와 진공 용기 외부 사이에는 일정한 압력차(pressure difference)가 발생하는데 대부분 최대 1기압(1 bar)의 압력차가 발생한다. 고압으로 가압된 상태나 관련 장비를 개발/사용하는 사람들에게 1 기압의 압력차는 아무 의미도 없는 값일지 모른다. 그러나, 진공 기술과 진공 기술을 이용하는 장비 측면에서는 큰 의미를 제공하게 되는데 그 이유는 진공도와 같이 병행하여 사용되는 압력의 정의에서 알 수 있다.

$$Pressure(Pa) = \frac{Force(N)}{Area(m^2)}$$

이 식에서 알 수 있듯이 1 Pa은 1 m^2의 면적에 수직 방향으로 1 N의 힘이 가해지는 것을 의미한다. 1 기압은 약 10^5 N/m^2임으로 1 m^2의 면적 위에 수직 방향으로 10^5 N의 힘이 가해진다는 것을 의미한다. 여기서 안전 측면에서 주목해야 할 것은 진공 용기 내부를 진공 상태로 만들게 되면 내부 진공도가 10^{-3} Pa 또는 10^{-7} Pa이 되더라도 그 압력차는 거의 1 기압 밖에 되지 않지만, 만일 진공 용기의 표면적이 커지면 1기압의 압력차에 의해 받는 힘의 크기는 엄청나게 커진다는 것이다. 따라서 동일한 체적을 갖는 진공 용기라고 하더라도 그 모양이 어떤 형상이냐에 따라 해당 용기가 받는 힘의 크기는 완전히 달라진다. 그림 8은 대형 유리 기판에 대해 LCD 공정을 수행하는 장비의 loadlock chamber가 진공 배기로 인해 발생하는 압력차에 의해 변형되는 것을 보여 주고 있다.

이러한 이유 때문에 진공 용기가 받는 힘으로 인한 진공 용기의 변형을 막기 위해 원형, 반원형, 실린더 형 등으로 용기를 만드는 것이다. 그러나, 평판디스플레이 산업(LCD, OLED 등)에서는 기판 자체가 대형 평판이기

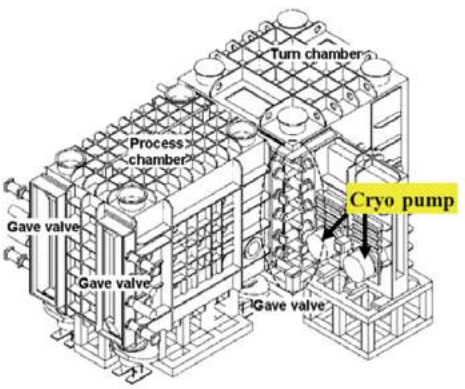


[Fig.8] 진공 배기로 인한 loadlock chamber의 변형(일본 특허 JP2003324282)

때문에 관련된 진공 장비들의 형상이 납작한 육면체의 형태를 가질 수 밖에 없다. 이로 인하여 진공 용기는 그 내부(진공 상태)와 외부 사이(대기압)에 작용하는 단지 1 기압의 압력차로 인하여 심하게 변형될 수 있다. 그림 9는 내부와 외부 압력차에 의해 진공 chamber가 변형되는 것을 막기 위해 보강재를 설치한 예이다.

그림 10의 왼쪽 사진들은 이온 주입 장치의 이온원(ion source)에 사용된 터보 분자 펌프 내부에 고체 물질이 누적되면서 고속 회전하는 회전자(rotor)와 고정자(stator)가 서로 접촉하면서 회전자의 회전 에너지에 의해 완파된 것을 보여 주고 있다. 이 과정에서 파손된 회전자 파편들이 일부 공정 chamber 내부로 날아가 고가의 내부 부품들도 파손시켰다.

그림 10의 오른 쪽 사진은 LCD 건식 식각 장비에 사용된 터보 분자 펌프 배기구 사진들로 상단 사진은 fab 내부에서 분해하였을 때이고 하단 사진은 수리 공장에 반

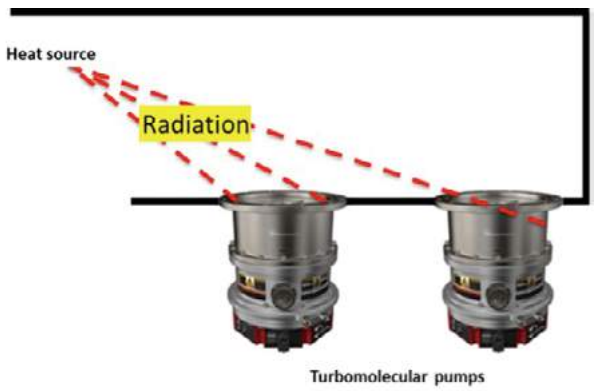


[Fig.9] Chamber 변형을 막기 위한 외부 보강재 설치 상태

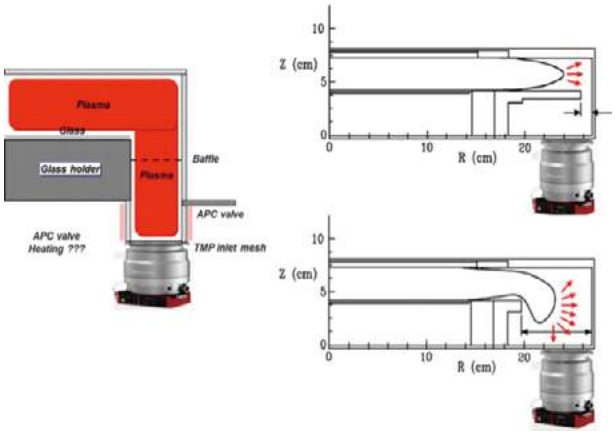
[Fig.10] 이온 주입 장치와 LCD 건식 식각 장비에 사용된 터보 분자 펌프들

입된 후 상태로 동일한 공정임에도 불구하고 공정 부산물의 상태가 다른 것을 볼 수 있다. Fab 현장에서 공정 부산물은 거의 powder 형태로 존재하나 수리 공장으로 운반하는 과정에서 공기 중에 노출되어 공기 중의 수분을 흡수하면서 젤 형태로 변한 것으로 공기 중에 노출되는 것만으로도 예측 불허한 상태 변화를 초래한다는 것을 알 수 있다.

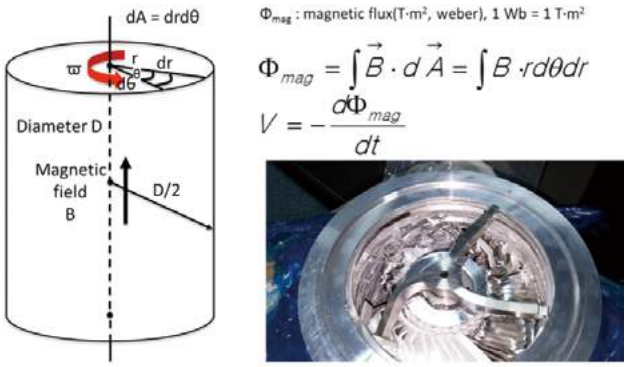
그림 11은 진공 chamber에 설치된 터보 분자 펌프들에 대해 진공 chamber 내부의 열원(heat source)에 의해 터보 분자 펌프가 받은 열부하가 다르다는 것을 설명하고 있다. 터보 분자 펌프가 작동하는 압력(진공도)에서는 열전달(heat transfer)은 전도(conduction), 대류(convection)은 거의 없고 복사(radiation)에 의해서 일어나기 때문에 공정 chamber 내부에 열원이 있는 경우 터보 분자 펌프의 설치 위치를 어떻게 설계하느냐에 따라 터보 분자 펌프 회전자에 누적되는 열(heat)이 달라진다. 이렇게 터보 분자 펌프 회전자에 누적되는 열로 인



[Fig.11] 설치 위치에 따른 터보 분자 펌프에 대한 열부하(thermal load)



[Fig. 12] 진공 chamber 내부의 플라즈마가 터보 분자 펌프 배기 경로를 따라 누설되는 경우



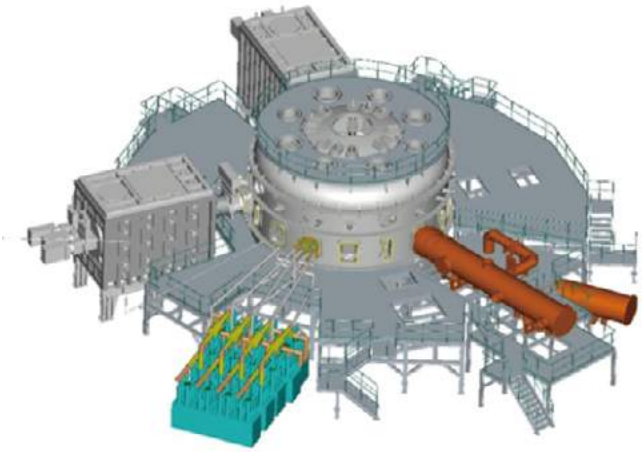
[Fig. 13] 외부 자기장에 의해 회전하는 터보 분자 펌프 생기는 유도 기전력과 그로 인한 회전자 파손

하여 금속 재질인 터보 분자 펌프 회전자가 팽창하면서 고정자와 접촉하면서 그림 10의 왼쪽 사진처럼 파괴적 에너지를 만들어 내게 된다.

그림 12는 진공 chamber 내부에서 발생한 플라즈마가 진공 배기 경로로 누설되어 터보 분자 펌프 회전자가 복사 에너지를 받는 것을 보여 주고 있다. 식각 공정의 진공 chamber 내부에서 기판 위의 플라즈마 밀도를 균일하게 유지하여 식각 균일도(etch uniformity)를 높이고 플라즈마가 기판 위에 집중될 수 있도록 플라즈마의 누설을 막기 위한 baffle을 사용하게 되는데 이때 사용되는 baffle의 구조에 따라 오른 쪽 모식도처럼 플라즈마의 누설이 발생할 수도 있다. 따라서 터보 분자 펌프의 회전자에 대한 기계적 접촉이 없이도 플라즈마로 인한 누적 복사 에너지로 인하여 회전자가 파손될 수 있다. 이런 문제를 최소화하면서 터보 분자 펌프의 진공 배기 성능을 극대화하기 위해 baffle 구조 설계와 설치 위치가 최적화될 수 있도록 진공 chamber 설계 당시부터 고려하여야 한다.

한편 터보 분자 펌프는 주변에 강한 자기장이나 강하게 변하는 전기장이 있는 경우 그 사용이 매우 제약을 받게 되는데 그 이유는 자기장으로 인한 자속(magnetic flux)이 운동하는 금속 도체가 유발시키는 유도 기전력(V)으로 인해 유도 전류가 발생하고 이렇게 유도된 전류가 저항을 갖는 금속 도체를 흐를 때 생기는 열(heat)로 인하여 열팽창하게 되기 때문이다. 이러한 열팽창은 그림 10, 그림 11, 그림 12에서 설명한 것처럼 궁극적으로는 엄청난 파괴 에너지를 만들게 된다.

그림 13의 오른 쪽 하단부 사진은 위에서 설명한 이유에 의해 터보 분자 펌프의 회전자가 파손된 상태를 보여주고 있다. 이러한 이유로 터보 분자 펌프가 자기장이 있는 공간에서 사용될 때는 펌프 모델마다 다르지만 회전자의 회전축과 나란한 방향으로는 약 30 gauss, 회전축에 수직한 방향으로는 약 150 gauss 정도 이상이 자기장이 걸리지 않도록 주의해야 한다. 그림 14처럼 핵융합 장치인 TOKAMAK에 대한 진공 배기 시스템에서 진공 배기용 배관은 중심부에 긴 진공 배관을 연결하여 터보 분자 펌프에 작용하는 자기장을 최대한 줄이는 설계를 하는 것이다.



[Fig. 14] 핵융합 장치용 진공 배관 구성

8. 요약

진공 배기 시스템에 위험한 환경을 초래할 수 있는 모든 가능성을 찾아 낼 수는 없지만 누적된 현장 경험과 연구 결과에 맞추어 최대한 필요한 안전 조치들을 취해야 한다. 진공 배기 시스템이나 그 구성품들에 대한 심각한 파손을 유발하는 공통적인 요인들은 발화성 물질의 점화나 진공 배기 시스템의 배기구 막힘에 의해 발생한다. 따라서, 진공 펌프와 진공 시스템의 안전한 가동과 사용을 위해서는 다음과 같은 것들을 반드시 준수하여야 한다.

- 발화성, 폭발성 공정 물질을 사용하는 진공 배기 시스템은 정규 유지 보수 작업(PM) 후 첫 번째 배기 과정은 매우 천천히 진행하여 진공 배기 시스템 내부에 급격한 난류가 형성되지 않도록 해 주어야 한다.
- 진공 배기 시스템 내에서 발화성 물질들의 농도가 발화 영역(flammable zone, potentially explosive atmosphere)에 들어가지 않도록 하여야 한다. 이를 위해서는 불활성 가스를 이용하여 진공 펌프와 진공 배기 시스템의 가동 예상 조건이나 고장 환경하에서 안전한 농도 이하로 희석시켜야 한다.
- 진공 펌프와 진공 배기 시스템에 장착되어 사용되는 밸브 등의 기계적 부품들이나 공정에 사용되는 물질과 공정 부산물들(by-products)로 인하여 배관, 필터 배기구 등이 막히지 않도록 하여야 한다.
- 공정에 사용되는 물질들, 특히 산소(O_2), 오존(O_3) 등의 산화제 농도가 높을 때는 오일 회전 배인 진공 펌프(Oil rotary vane vacuum pump)에 미네랄(mineral) 오일을 사용하지 말아야 하며, PFPE(Perfluoropolyether) 오일을 사용하여야 한다. 시판되는 진공 펌프 오일 중 비발화성(non-flammable)으로 표기된 오일이라고 하더라도 산화제(oxidant)의 농도가 체적비로 30 % 넘는 공정 환경에는 사용하지 말아야 한다.
- 진공 펌프와 진공 배기 시스템에 의해 배기되는 물질들이 물(H_2O)과 격렬하게 반응하는 경우는 물이 아닌 다른 냉각제를 사용하여야 한다.
- 안전하지 않다고 판단되는 상황에서는 해당 전문가의 조언이나 해당 전문가의 직접적인 현장 도움을 통해 문제를 해결하여야 한다.

References

[1] 진공기술실무, 주장헌, 홍릉출판사
[2] 진공이해하기, 주장헌, 홍릉출판사
[3] Best Practice Guidelines for Operating Standard Vacuum Pumps with Flammable Gas Mixtures outside the Flammable Range – the ATEX implication, S. Bruce, BOC Edwards, www.edwardsvacuum.com/support/references/documentation/technicalarticles,aspx
[4] Poly & EPI Reactor Silicon Byproduct Explosion Incidents(Internal Communication), JH Joo, Edwards Korea Ltd.
[5] CVD Exhaust – Safety and Environmental Sanity, M. Hammond., Journal de Physique IV, 1991, 02(C2), pp. C2-449 ~ C2-457(http://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00249845)
[6] Extended LeChatelier's Formula and N2 Dilution Effect on the Flammability Limits, Kondo Sh., K. Takizawa, A. Takhashi, K.Tokuhashin, Fire Safety Journal 41(2006) pp. 406 ~ 417.
[7] Recent Developments and Experiences in Modular Dry Mechanical Vacuum Pumping Systems for Secondary Steel Processing, Simon Bruce and Vic Cheetham, Edwards Ltd. Crawley, UK. The 9th European Electric Steelmaking Conference, 19 ~ 21, May, 2008, Krakow, Poland
[8] Lower and Upper Explosive Limits of Flammable Gases and Vapors(LEL/UEL), Matheson Gas Data Book 7th ed(2011) p. 443, www.Mathesongas.com
[9] Blast Furnace Gas Cleaning System Design, Alex Lajtonyi, Danieli Corus, MILLENNUM STEEL 2011
[10] Explosion protection safety concept for use in mechanical vacuum pump systems in secondary metallurgy steel degassing processes, Uwe Zoellig, Gunnar Groβ and Dirk Schiller, Oerliokn Leybold Vacuum GmbH, MILLENNUM STEEL 2004
[11] Human Errors and Dust Explosion Prevention and Protection, Gang Li and Baozhi Chen, Northeastern University, P.O. Box 265, Shenyang, China, International Journal on Engineering Performance-based Fire Codes, Vol. 8, No. 1, p.1 ~ 5, 2006
[12] Safety Considerations when handling Metal Powders, J.M. Benson, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 7A, p. 563 ~ 575, July 2012
[13] Removal of hydrogen, nitrogen and sulphur from tool steel during vacuum degassing, K. Stenehom, M. Andersson, A. Tilliander and P. G. Jönsson, Ironmaking and Steelmaking, Vo. 40, No. 3, P. 199, 2013
[14] Off-gas preparation for vacuum pumps, W. Burgmann, J. Davene, and J. Laffitte, La Metallurgia Ltaliana, No. 11 ~ 12, pp. 11 ~ 19, 2013
[15] Understanding and Preventing Metal-Dust Hazards, Jayant Khamberkar and Brian H. Pittenger, International Journal of Powder Metallurgy, Vo. 49, Issues 4, pp. 39 ~ 47, 2013
[16] Mitigation of Explosion Risk in Vacuum Degassing Plants, Wilhelm Burgmann and Uwe Zoellig, October 2014
[17] Explosion at Mitsubishi Materials, February, 5th, 2014, Kenji Tsuda(http://semiengineering.com/author/kenji-tsuda/)