

Process Plant의 Optimum Engineering Design에 대한 이해와 Commercial Operation 중의 안전사고 유형

- Oil Refinery와 Petrochemical Plant를 중심으로 -



유 영 규
(화학공장설계 기술사)

1. 머리말

Process Plant의 Commercial Operation 중 화재 혹은 폭발 등의 원인으로 인한 인명 및 재산상의 손실을 유발하는 안전사고 정도를 사전에 예측하고 진단하기 위한 접근 방법의 하나로서, Process Plant의 Design 과정을 이해하고, Commercial Operation 중 발생할 수 있는 안전사고의 유형을 고찰함으로써, 안전사고의 발생을 억제하고 예방하며, 이미 발생한 안전사고의 원인을 분석하고 규명하는데 참고가 되고자 함에 본고의 목적을 두었다.

2. Process Plant의 Optimum Design Engineering에 대한 이해

가. Total Fixed Capital Investment Cost 중 Process Plant의 Koreanization ratio(國產化率)

일반적으로 Process Plant 건설의 목적은 경제적 대량생산에 의한 이윤추구의 극대화에 주요 비중을 둔다. 따라서, “최소의 투자비로 최대의 이익을 얻는다”는 경제의 일반원칙 적용에 예외일 수가 없다.

다음의 (Table 1)에서 보는 바와같이, 1991년

(Table 1) Cost Break-down of the Total Fixed Capital Investment Cost for a Petrochemical Plant in Korea (1991)

	Total Fixed Capital Investment Cost (%)	Koreanization Portion (%)
1. Engineering	12.3%	6.9%
1) Licensing including Basic Design	(5.2%)	(0%)
2) Detailed Design including Procurement Service & Construction Supervision	(6.9%)	(6.9%)
3) Licensor's Supervision	(0.2%)	(0%)
2. Procurement	58.2%	45.4%
3. Construction	25.6%	25.6%
4. Misc.	3.9%	3.9%
Total	100.0%	81.8%

(Source : 유영규, “플랜트 수출 견적방법”, “세일즈 엔지니어 연수”, p431, 한국기계공업진흥회, 한국(1997))

현재 우리나라의 Process Plant를 위한 Total Fixed Capital Investment Cost 중의 81.8% 정도가 우리나라 “원화”(Korean Won)로 구매 가능한 품목이고, 6.4% 정도를 차지하는 Licensing과 Basic Engineering은 미국, 영국, 독일, 일본, 프랑스 등과 같은 선진국 Engineering 회사의 도움없이 불가능한 실정이다.

Optimum Plant Design은 Basic Design 과정 중에서 이루어지며, Basic Design 중에 Process Plant의 Safety에 영향을 주는 주요 설계가 이루어진다. 그러나 Basic Design의 대부분이 우리나라 밖의 선진국에서 이루어지는 현실에서는 우리나라의 Engineer들이 참여하여 안전사고를 예방할 수 있는 기회가 거의 주어지지 않는 것이 안타까울 뿐이다.

Process Plant의 안전사고 확률을 예측하고 (“예측”이란 기술분야에서 가장 중요한 목적이다), 이미 발생한 안전사고를 분석하기 위해서는 Basic Design이 어떠한 Optimum Design Philosophy 하에서 이루어지는지 이해하는 것이 중요하다.

나. Optimum Plant Design

Basic Design 전에 Process Engineer는 많은 가능성 있는 Processes 중에서 어떠한 Process를 선택할 것인지를 결정한다. 이를 위해서는 우선 다음과 같은 두가지의 중요한 요소를 고려하여 결정한다.

- Optimum Economic Design
- Optimum Operation Design

(1) 최적경제설계

(Optimum Economic Design)

동일 Raw material의 동일량을 사용하며, 동일 Product의 동일량을 생산할 수 있다면, Process Engineer는 당연히 최소의 Total Investment Cost를 요하는 Process를 선택한다. 이것이 Optimum Economic Design의 기본 Philosophy이다.

다음과 같은 Process design의 예를 들어 최적경제설계를 설명하고자 한다.

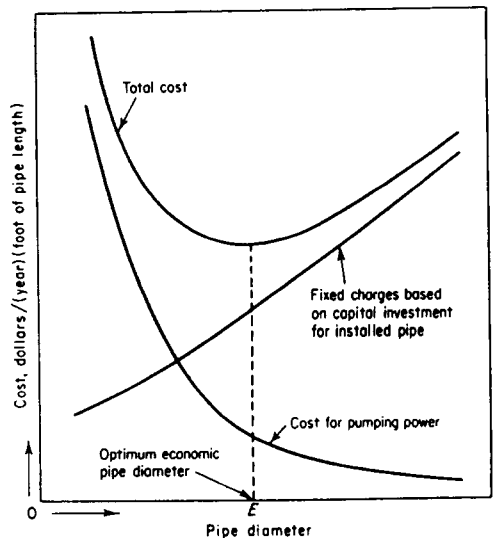
예 1, Pipe diameter의 최적경제설계 :

Pipeline의 Total commercial operation cost는 다음과 같은 두가지 Cost 변수의 합으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{(가) Fixed charge based on capital investment for installed pipeline} \\ & \text{+ (나) Cost for pumping power} \\ \hline & \text{Total cost} \end{aligned}$$

상기의 Fig. 1에서 보는 바와 같이 상기 Pipeline의 설치비와 Pumping을 하기 위한 동력비(전기 혹은 steam 등)의 총합이 최소인 경우가 Pipeline의 Optimum Economic Design 상의 최적경제 파이프 직경(Optimum Economic Pipe-line Diameter)이 된다.

Fig. 1



(Source : Max S. Peters and Klaus D. Timmerhaus, PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS, 4th Edition, McGraw-Hill, USA (1991))

예 2, Insulation thickness의 최적경제설계 :

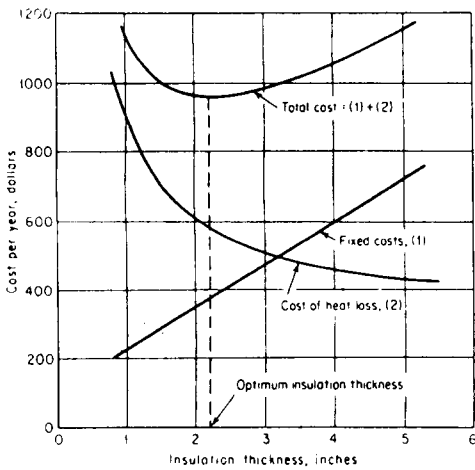
Energy conservation을 위해서 Steam이나 기

타 Hot medium pipeline을 보온한다.

Insulation thickness가 증가할 수록 Heat loss는 감소하는 반면, Fixed capital investment cost는 증가한다.

따라서 하기 Fig. 2에서 보는 바와같이, Optimum economic design 측면에서 보는 최적경제 Insulation thickness는 Total cost가 최소인 Thickness이다.

Fig. 2



(Source : Max S. Peters and Klaus D. Timmerhaus, PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS, 4th Edition, McGraw-Hill, USA (1991))

예 1과 예 2에서 볼 수 있는 바와같이 계산상의 Pipe diameter나 Insulation thickness를 대량생산하는 기성제품 중에서 현실적으로 찾을 수 없는 경우가 많다. 실질적으로는 계산에 의한 Optimum value에서 높은 방향으로 가장 가까운 Value를 갖는 기성제품을 선택하게 된다.

Basic design stage에서 고려해야 할 수많은 종류의 Optimum economic design을 만족시켜야 하지만, 궁극적으로 지향하는 것은 단위시간 동안 단위기기에서 얻을 수 있는 최대이익(Maximum profit per unit of time) 혹은 단위기기의 단위시

간 동안의 최소생산비용(Minimum total cost production)을 가져올 수 있는 Process를 선택해야만 한다는 것이다.

(2) 최적운전설계(Optimum Operation Design)

Process Plant에 있어서는 Temperature, Pressure, Contact time, Flow rate 등의 변수에 따라 Raw material consumption과 Final product의 Quantity와 Quality가 결정된다.

따라서 Process plant는 Optimum Economic Design을 위한 과정으로서 아래의 예 3과 같이 최적의 운전설계를 고려하여 Process basic design을 행한다.

예 3, 광산 Plant에서의 최적운전 Sulfur Burning Temperature의 결정 :

유황(Sulfur)을 연소시켜 광산을 생산하는 광산 Plant에서의 최적의 운전설계를 위한 연소온도(Burning temperature)는 다음과 같이 결정한다.

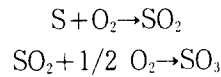
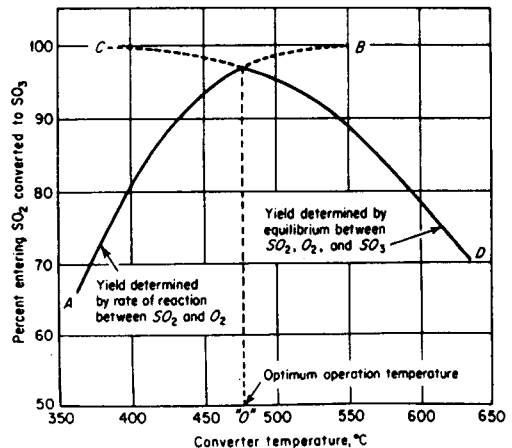


Fig. 3



(Source : Max S. Peters and Klaus D. Timmerhaus, PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS, 4th Edition, McGraw-Hill, USA (1991))

Sulfur의 Burning temperature를 높일수록 SO₂의 수율은 높아져 바람직하지만, O₂, SO₂, SO₃ 혼합 Gas의 화학적 평형상태를 고려한다면, Burning temperature가 높을수록 기업이 기대하는 최종 Product인 SO₃의 수율은 감소하는 불이익이 초래된다.

결과적으로, SO₃의 수율을 Maximizing할 수 있는 Burning temperature로 결정하게 된다.

(3) Safety와 최적경제 및 운전설계

상기 예에서 보는 바와같이 Optimum economic design과 Optimum operation design에서 주요 고려의 대상이 되는 것은 항상 Economy가 된다.

Safety와 Environmental protection 등은 가장 기본적인 Requirement이기 때문에 Basic design과정에서 이미 충분히 고려된 상황하에서 Engineering design이 이루어진다.

그러나, 간혹 기업과, 이를 경영하는 인간의 세속성이 가장 중요하고 귀중한 인간의 Safety를 간과시키는 일이 있을 수 있다.

특히, 후진국이나 개발도상국의 기업들은 경제적인 부족함은 물론, 기술도 취약한 상황하에서 선진국의 동업사들과 국제경쟁을 하여야 하기 때문에, 위와같은 위험성이 더욱 증가할 수 있다는 사실에 주목해야 한다.

3. Process Plant의 Commercial Operation 중에 발생할 수 있는 안전사고 유형

가. Engineering Design과 안전사고

Process Plant의 Commercial operation 중에 발생하는 안전사고는 Operator의 Mis-operation에 의한 것만이 아니다. 일반적으로 Safety 사고는 하기와 같은 Project 전 과정중 매 Stage를 책임지고 있는 관련 Engineer의 실수나 태만 혹은 기술부족, Optimum economic design과 Optimum operation design 등에 대한 이해부족 등

의 이유가 복합적으로 작용하여 원인을 제공한다.

- (1) Conceptual design
- (2) Basic design
- (3) Detailed design
- (4) Procurement/Manufacturing
- (5) Construction
- (6) Commercial operation

안전사고를 분석해 보면 그 원인은 Conceptual design이나 Basic design 단계에서 이미 그 원인을 잉태한 경우가 많다.

그러나, 최종적으로 안전사고를 당면하여 피해를 보는 당사자는 당해기업과 현장에서 Commercial operation을 하고 있는 Operators이기 때문에, 안전사고를 줄여나가기 위해서는 현장의 안전사고의 원인을 각 단계의 Design stage에 관여하는 Engineers와 Equipment and material의 Vendors, 그리고 건설을 담당하는 Constructors 등이 한데 모여 종합적으로 원인을 분석하고 규명할 수 있도록 Operators가 안전사고에 관한 Information을 정직하고 신속하게 이들에게 Feedback하고, 이들은 개선한 안전사고 방지안을 다시 Operators에게 알려주는 지속적인 Channel이 제도적으로 구축되어야만 한다. 이와같이 행할 때만이 Basic design에 대한 능력제고는 물론, 안전사고를 근본적으로 예방할 수 있을 것이다.

우리나라도 언젠가는 이와같은 때가 오리라 기대한다.

나. Commercial Operation시 안전사고의 빈발 시점

Oil refinery 및 Petrochemical plant로 대표되는 Process plant의 안전사고는 Start-ups와 shut-downs 시점에서 빈번히 발생한다.

Startup과 Shutdown시에는 Operator의 심리적 불안감 이외에도, Process의 Feed rate가 순간순간 변화하기 때문에, Operator와 Process 모두가 몹시 불안정한 상태이다.

특히, Emergency Shutdown은 불시에 일어나는 Process의 변화이기 때문에, Operator의 당혹감과 미숙련이 안전사고를 유발시킬 수 있다.

그러므로, Shutdown에 대비하여 평소의 끊임 없는 Operator에 대한 교육과 훈련만이 안전사고를 예방할 수 있는 최선책임을 기업의 경영층과 Operator 모두가 깊이 인식해야 한다.

(1) Start-ups and Shutdowns시의 안전사고 유형

Process plant를 Operation한다는 것은 결국 각 Unit의 Pressure, Temperature, Level 혹은 Flow rate를 Design에 맞추어 적절히 조절한다는 뜻이다. 만일 이중의 하나를 적절치 못하게 Operation한다면 결국 잔여 변수에 큰 영향을 미치게 되어, 안전사고를 유발시킨다.

(가) Process plant의 Start-up과 Shutdown시, 첫째로 빈번히 일어나는 안전사고 중의 하나는 Water가 Steam으로 Flashing되어 System의 압력을 급격하게 증가시켜 폭발로 이어지는 것이다.

(나) 둘째는 밀폐된 Vessel내의 Combustible medium과 Air가 Mixing되어 연소 폭발하는 경우이다. 따라서, Process의 Commissioning service시 가장 조심해야 할 것은 Service 전에 반드시 System 내를 Air-free 상태로 만들어야 한다는 것이다.

이를 위해서는 사전에 Steam이나, Nitrogen과 같은 Inert Gas로 System을 Purge-out하거나, Water로 Filling out하여 Vessel이나, Pipeline 중에 남아 있는 잔여 산소를 System 밖으로 내보내는 것이다.

일반적으로 Steam이 Nitrogen gas 보다 값이 싸고 경제적이다. Water로 Filling-out하여 Air-free 상태로 만들 경우, System을 구성하고 있는 Vessel의 Lug, Leg 혹은 Skirt 등이나, Pipeline의 Shoe 등과 같은 Support류와 Foundation 등이 충분한 Weight Load를 견딜 수 있도

록 설계 및 시공되어져 있는지를 반드시 사전에 확인후, Water filling 여부를 결정해야 한다.

그러나 만일 Air-free 상태로 만들 대상의 System이 Refrigerating System으로서 System 내에 Moisture가 남아 있을 경우 Freezing으로 System의 Plugging을 야기시킬 위험이 있다면, Water filling-out이나, Steam purging-out에 의한 작업은 금해야 한다. 이와같이 작업을 행하였을 경우, System 내에 남아있는 Moisture를 Dry-out하기 위하여 값비싼 Nitrogen Gas로서 System을 Purge-out 해야만 하는 이중의 비용과 수고를 요하기 때문이다.

(다) 또한, System을 Steam으로 Purge-out시킬 경우에는, Thermal insulation을 250~300°F(121~149°C) 이상 견딜 수 있게 설계 및 시공되어져 있는지를 확인후 행하여야 한다.

또한, Steam으로 Purge-out할 경우에는 3.5 kg/cm² 이상의 압력을 가진 고압의 Steam을 사용해서는 안된다. 고압의 Steam을 사용할 경우에는 Desuper heater를 사용하여 압력과 온도를 충분히 낮춘 후 사용해야 한다.

또한, System 내부의 Insulation material이나, Refractory 등이 Steam Condensate에 Damage가 되지 않을 경우에만 사용해야 한다. 만일, Reactor 내부의 Catalyst나 Pellet가 Acid-base이거나 수용성인 Alkali 물질인 KOH 등이 Packing되어 있을 때에는 Moisture에 의해서 쉽게 용해 혹은 분해될 수 있으므로 Steam purge-out을 해서는 안된다.

이와 같은 경우에는 Steam purge-out 대신 Nitrogen gas와 같은 다른 Inert gas를 사용해야만 한다.

System을 Air-free 상태로 만들기 위한 Purge-out 전 특히 조심해야 할 것은 System 내에 사람이 없음을 수차 확인후 행하는 것이다. 귀중한 인명의 질식사 사고를 방지하기 위함이다.

(라) 기 사용중이던 Pipe-line을 Purge-out 할

경우에는 일반적으로 다음과 같은 기본 Rule에 따라야 한다.

- ① Purge-out할 System의 Volume을 계산 후,
- ② 계산된 총 Volume의 4배를 곱한 후,
- ③ 10시간 연속 Purge-out하는 것을 원칙으로 한다.

특히, Purge-out시 조심해야 할 것은, Purge-out이 되지 않는 Dead-space가 생기지 않도록 조심해야 한다.

(마) 일반적으로 Vessel이나 System의 Top point에 vent를 추가로 설치해야 하는 비용절감을 위하여, 설계시 Normal process outlet nozzle을 가능하면 높게 설치하여 이를 대신하도록 한다.

그러나, 이들 Top vent는 Operator의 접근이 어렵거나 힘들기 때문에, Start-up이나 Shutdown시 Open한 Vent valve를 Close하는 것을 잊는 일이 자주 있다. 통상적으로 Vent valve는 3/4" Valve를 사용하나, 만일 이를 Close하지 않고 Open한 상태로 Operation을 한다면 대기중으로 Leakage되어 나가는 양은 Distillation column의 경우 Overhead의 약 10% 정도에 이르는 방대한 양임을 간과해서는 안된다.

(바) 또한, Start-up이나 Shutdown시만 사용하는 Purge-out line은 Process system에 Permanently하게 Connection시키지 않도록 주의한다.

특히, High-pressure Vessel에 Connection되지 않도록 주의한다.

Purge-out line은 사용 후, System에서 Disconnection 해놓거나, Blinding을 반드시 해 놓도록 하여 불의의 사고에 대비하여야 한다.

(사) Design Engineer와 Operator가 간과해서 안되는 것 중의 하나는, 모든 Valve는 반드시 Leakage가 있다는 가정하에서 Engineering과 Operation에 임하여야 한다는 것이다.

Valve가 Close 되었거나, Flow가 없을 것이라

는 생각은 아주 위험하다. Valve의 Upstream과 Downstream간의 압력 차이에 따라 혹은 Valve의 기계적 가공 정밀도에 따라 정도의 차이는 있을 수 있으나, Close 상태에서도 모든 Valve는 Leakage가 있다는 사실에는 예외가 없음을 명심해야 한다.

다. Commercial Operation시 발생할 수 있는 안전사고 유형

Process plant의 Startup과 Shutdown을 포함한 Commercial operation중, 발생하는 안전사고는 대부분이 아래와 같은 원인으로 발생한다.

안전사고를 유발시키는 원인에 유의하여 Operation에 임함으로써, 사고 원인을 사전에 예방한다면 인적 및 물적 Loss를 현격하게 줄여 당해 기업의 수익성을 크게 제고시킬 수 있을 것이다.

또한, 기발생한 안전사고의 원인을 분석하고, 예상되는 안전사고의 유발 원인을 이해함으로써, 예방책을 입안하는데 다음과 같은 사항이 참고가 될 수 있을 것이다.

- ① Sudden changes in feed components or rate
- ② Loss of electric power
- ③ Loss of other utilities such as steam, cooling water, instrument air, or boiler feedwater.
- ④ Liquid level control malfunction

(1) Water의 Process내 유입으로 인한 안전사고 위험성(Hazards of Water)

전술한 바와 같이, Water가 실수로 Hot oil system에 도입되는 경우에 심각한 안전사고를 유발하는 경우가 많다.

폭발과 화재로 이어지는 이와같은 사고는 많은 인명과 재산상의 피해를 준다.

(가) 일반적으로 1 Gallon의 Water와 Hydrocarbon이 동일온도에서 Boiling할 경우, Water는 증기상태에서 Hydrocarbon에 비하여 10배의

부피를 차지한다. 따라서 Hot oil에 Water가 접촉할 경우 Water의 Flashing으로 순간적인 고압이 발생하게 되어 폭발사고를 야기시킬 수 있다.

예를 들어, Hydrocarbon Distillation Column의 Overhead Temperature가 200°F(93°C) 전후에서는 Water가 Feeding 되어도 별 문제가 발생하지 않는다. 그러나 Overhead temperature가 500~1,000°F(260~538°C) 경우일 때에는 Flashing Water의 Overwhelming force가 큰 사고를 유발할 수 있다.

이와같은 안전사고의 경우에는 Steam의 Overwhelming force가 Distillation column의 Tray와 같은 Internals의 위치를 변경시키거나, 형태에 변형을 주어 Internals에 심한 Mechanical Damage를 주게 된다. 더하여 Internal reflux에 영향을 주어 Downstream의 Operation에 예상 못한 이상현상을 가져올 수 있다.

예를 들어, Oil Refinery의 Crude Atmospheric Distillation Tower의 Start-up시, Bottom Temperature를 700°F(371°C)까지 올린후, Water로 Contamination된 Bottom pump 주변의 lines을 Drain 해줌이 없이 Running 시킨다면 위와 같은 사고를 유발할 확률은 상당히 높다.

(나) Basic Engineering Design 단계에서 Process design engineer는 위와 같은 경우를 고려하여 사전에 충분한 Water drain을 할 수 있도록 Lower point에 Drain valve를 설치해 놓아야 한다.

또한, Water가 Column 내부로 유입되었을 경우에 대비하여 Internal Tray상에 적절한 Drain holes을 마련해 주어야 한다.

(2) Start-up 전 Circulation에 의한 System 내의 잔류 Water의 제거(Dehydration by Circulation)

Start-up 전 모든 관련 Lines에서 Water를 완전히 제거하여 Water-free상태로 한다는 것은 현장에서의 Operation상 실질적으로 쉬운 일이

아니다.

(가) 예를 들어 Oil Refinery의 경우, Crude oil distillation column을 Inert gas purge out 후 압력을 100 psig로 올리고, 모든 High point와 Low point에서 Water를 완전히 Drain 시켰다고 하더라도 그 Column은 아직도 Water를 포함하고 있을 가능성이 크다.

따라서, Water-free 상태로 만드는 가장 확실한 방법은 Cold Oil을 Circulation 하면서 Low point에 모인 Water를 반복해서 Drain시키는 방법이다.

(나) 일반적으로, Water-free distillation column 상태를 만들기 위하여, Startup line을 설치하며, 이는 정상적인 Distillate rate의 약 20% 정도의 Flow rate를 만족시킬 수 있도록 Pipe sizing을 한다.

효과적인 Water drain을 위해서는 Basic engineering design과정에서 Low point를 가능하면 충분히 설치하는 것이 바람직하다.

(3) Feed rate의 급격한 Change로 인한 안전사고의 위험성(Fluctuating Feed)

Process Design Engineer는 끊임없이 Process의 안전사고 방지를 Basic Engineering Design과 Detailed Engineering Design 과정을 통하여 노력은 하고 있으나, 주위의 경제적인 이유, 기술상의 문제, 그리고 미래예측에 대한 인간의 한계 등의 이유 때문에 완벽을 기대하기란 불가능하다. 선진국과 비교하여 우리나라의 주변조건이 나을 것이 없는 상황에서는 그 한계가 더욱 심각하다 할 수 있다.

(가) Commercial Operation 중 Feed rate가 순간적으로 현격하게 감소하거나 증가하는 현상이 발생할 경우에, Equipment의 안전에 미치는 영향을 예측하여 Design에 임하기는 하지만, 그 경우가 예측의 한계를 넘을 경우 안전사고를 유발할 가능성은 매우 크다.

예를 들어, Operation 도중 Firing heater에

Feeding하는 Charging pump가 정지했을 때 Heater tube에 심한 Mechanical damage를 입을 수 있다. Feed가 끊어졌을 때 동시에 Burners에 공급되는 Fuel의 공급을 차단할 수는 있지만, Heater의 Refractory가 함유하고 있는 열까지 순간적으로 차단할 수는 없다. 따라서 Heater가 보유하고 있는 열은 Tube를 Overheating시켜 Tube Sagging현상을 일으킬 수 있다.

이와같은 안전사고를 방지하기 위하여 Feeding이 정지되는 즉시, Tube 내로 Steam을 충분히 흘려, Tube로부터 신속하게 Heat removal을 할 수 있도록 Process control system을 구성해야만 한다.

(나) 발열반응(Exthothermic) Process의 경우에는 불가피하게 안전 문제가 따르게 마련이다. Control할 수 없는 Runaway reaction rate은 High temperature에서 더욱 증가하며, Reaction rate의 증가는 고발열을 유발하게 되어 Process을 폭발의 위험까지 몰아갈 수 있다.

정유 및 석유화학 Plant에서 Reactor의 Runaway reaction위험은 상존하는 것으로서 Cool feed rate가 낮아지면 순간적으로 Reaction temperature가 상승하게 되며, 이는 Reaction rate를 가속화시켜 발열반응을 촉발시키므로서 안전사고를 유발시킬 수 있다. 이와 같은 안전사고를 방지하기 위한 방안은 다음과 같다.

첫째로, Reactor 내에 체류하는 반응물질의 양을 가능한 한 최소화 할 수 있도록 Reactor를 Design한다.

둘째로, 비상시 Reaction rate 급속히 줄일 수 있는 Process control system을 강구한다.

예를들어, Ethylene process의 Acetylene converter의 경우, Hydrogen partial pressure가 Reaction rate에 큰 영향을 미치므로 Hydrogen의 Emergency vent를 통해서 Reaction rate를 급히 줄일 수 있는 Process control system을 갖추도록 한다.

(4) Feed에 함유되어 유입되는 Water로 인한 안전사고의 위험성(Water in Feed)

전술한 바와같이, Water가 Hot oil distillation column에 유입되는 경의 Steam으로 Flash 되면서 System 내에서 폭발적인 힘을 갖게 되어 안전사고를 유발할 수 있다.

(가) 이와같은 문제를 해결하는 방법중에 하나는 Conductivity cell을 활용하는 것이다. Conductivity cell은 Water와 Oil의 Electric Conductivity의 차이를 이용하여 Water와 Oil을 구별할 수 있다.

돌연한 Conductivity의 증가는 Feed 중의 Water의 존재를 알리는 표시이므로, 즉시 Feed pump의 Trip으로 이어지는 Control system을 구성하여 안전사고를 예방할 수 있다.

(나) 일반적으로 Heater의 Feed가 포함되어 있을 경우, Heater tube 내에서 Water가 Steam으로 Flash되어 Tube내 압력이 급속히 증가한다 하더라도 Heater tube 자체에 Mechanical damage를 주는 경우는 별로 없다.

문제는 Heater의 Upstream에 위치한 Feed pump의 Down stream pressure가 급격히 증가하여 Feeding이 되지 않거나 혹은 그 Feeding rate가 급속히 떨어지는 현상으로 나타난다. 이와 같은 현상이 전술한 바와같이 Heater tube에 Sagging현상을 일으켜 안전사고를 유발시킬 수 있다.

(5) 전기 정전으로 인한 안전사고의 위험성 (Electric Power Failure)

모든 Utility 중에서 전기는 가장 신뢰성있는 Power source이지만, Commercial operation중 자주 Power failure를 만나게 된다.

Basic engineering design시 기본적으로 고려해야 할 사항은 Emergency power failure시 어떻게 Process를 안전하게 Shutdown 시킬 것인지를 설계에 반영시키는 것이다.

안전사고를 예방하기 위한 최소 고려사항은 다

음과 같다.

(가) Process operation상 Critical한 Pump의 Stand-by pump는 반드시 동력원을 전기가 아닌, Steam turbine으로 하여 Emergency power failure에 대비토록 설계한다.

(나) Emergency generator는 Steam turbine 혹은 Fuel internal combustion engine으로 구동되는 System으로 선정하여 Emergency lighting과 Control system의 비상 가동에 대비시켜야 한다.

(다) Steam과 Power failure가 동시에 함께 발생시, Process상에 상온에서 Soildifying되어 Process system이나 Pipeline을 Plugging 시킬 수 있는 Heavy oil이나 Fluid가 있을 경우에는, Diesel-driven flushing oil pump이거나 혹은 이와 상용하는 기능을 행할 수 있는 Emergency circulation pump의 설치를 설계에 반영시킨다.

(6) 냉각수의 공급중단으로 인한 안전사고 위험성(Loss of Cooling Water)

Power failure가 발생했을 경우, Electric-driven cooling-water pump와 Air-cooled fin-fans도 정지하게 된다. 이와 같은 경우에는 Process로부터 Heat removal이 일시에 정지되는데 반하여, Operator가 관련 Valves Close 시켰다 하더라도, 이미 Process 내로 들어와 있는 Heat input은 Firing heater나 Steam reboiler 등으로부터 얼마 동안은 계속되기 때문에 Process 내의 Pressure와 Temperature의 상승을 가져오게 되며, 이는 안전사고로 이어질 수 있다.

(가) 이와같은 경우에 대비하여, Process design시 Power failure가 발생했을 경우 자동적으로 Heat input을 가져올 수 있는 Firing heater의 Fuel valve가 Close될 수 있도록 Control system을 구축해야만 한다.

(나) 좀더 확실하게 안전사고를 예방하기 위해서는 Cooling water pump의 25% 정도를 Steam-driven pump로 설계하는 것이 좋다.]

(다) Fin-fan cooler의 경우에도 Power failure시에는 Louver가 자동으로 Wide open이 되도록 한다.

(7) Instrument Air의 공급중단으로 인한 안전사고 위험성(Instrument Air Failure)

Process plant에서 일반적으로 채용하고 있는 Pneumatic instrument control system은, Instrument air failure시 Process의 Safety 치명적인 Damage를 줄 수 있다.

Design Engineer는 Instrument air failure시 때 Control valve가 어떠한 상태로 Shutdown 되어야만 안전사고를 예방할 수 있는지를 예상하여 아래와 같은 두가지 Type의 Control valve 중 하나를 선택한다.

- Air failure to open/AFO,

- Air failure to close/AFC

(가) 예를들어, 아래와 같이 Process safety 특성에 따라, Control valve를 선정한다.

① Fuel-gas control valve : Instrument air failure 발생시 Control valve가 자동으로 Close 되도록 해야 한다.

② Condenser cooling-water control valve : Instrument air failure시 Control valve가 자동으로 Open되도록 한다.

(나) 경우에 따라서는 Instrument air failure시, Nitrogen을 Instrument air system에 연결하여 Emergency에 대비할 수 있다. 그러나 이와같은 경우에는 Control room의 Pannel상으로도 Nitrogen gas가 도입될 수 있기 때문에 Control room에서 근무하는 Boardmen 등의 질식사고를 피하기 위하여 안전한 Control room의 Vent 시설을 사전에 확실하게 설치하여야 한다.

(8) Column, Drum의 Level Control System의 Malfunction에 의한 안전사고의 위험성(Level Control)

Process operation시 Level을 잘못 Control 하므로서 발생하는 안전사고가 의외로 많다.

(가) 예를 들어 Process상의 Off-gas가 Down stream으로 Feed 되어야 함에도 불구하고 Level indicator가 Malfunction을 일으키거나, Operator의 실수로 Liquid가 Carry-over되어 Down-stream중의 Reactor 등에서 격렬한 발열반응을 유발하여 안전사고를 일으키는 경우이다.

(나) Fuel-gas knock-out drum의 Liquid가 Over-flow하여 Fuel-gas 대신에 Fuel-oil이 Burner-tip까지 옮겨져 심한 화재로 이어지는 안전사고를 유발하는 경우도 있다.

(다) 따라서, 안전사고를 초래할 가능성이 있는 Level control system에서는 독립적으로 작동하는 2개 이상의 Level indicator를 설치하여 항상 위험에 대비하여야 한다.

(9) 열교환기내의 누설로 인한 안전사고의 위험성(Heat Exchanger Leakage)

Process상의 모든 Exchanger는 항상 내부의 Shell and Tube에서 Leaking이 일어나 Flowing medium이 Mixed될 가능성을 가정하고 설계와 Operation에 임하여야 한다.

(가) Shell-and-tube heat exchanger의 Tube는 통상적으로 1/16"의 얇은 Thickness를 가졌기 때문에 Thermal stress나 혹은 Mechanical stress 등에 의하여 항상 Leakage의 위험이 상존한다고 보아야 한다.

(나) 전술한 예와같이 Oil 중으로 Water가 Leakage 되어 들어가 Steam으로 Flash되어 Process에 Pressure를 높여 안전사고를 유발시킬 수 있거나, 발열반응을 유발하므로써 안전사고를 낳을 수 있다.

따라서, 설계시 Leakage에 의한 안전사고에 반드시 대비하여야 한다.

(10) Vessel, Tank 등의 안전사고에 의한 붕괴 위험성(Vessel Collapse)

Process Operation시 가장 조심해야 할 것 중의 하나가 Pressure Vessel, Drum 혹은 Tank의 내부 Positive pressure가 Negative pressure

(Vacuum) 상태로 되어, 결과적으로 Equipment 가 Collapse되는 안전사고이다.

(가) Hot Steam condensate tank의 Level이 낮아져, Cold water를 급히 Feeding할 경우, Steam이 Condensing 되면서 Pressure가 Negative로 되어 Tank가 Collapse되는 안전사고가 자주 있다.

(나) 또한, Initial start-up시 Precommissioning service 도중, Pressure vessel이나 Column 등을 Water flushing과 Steam purge-out 후, Air가 Column내로 Sucking되는 것을 막기 위해서 Vent valve를 Close할 경우, 내부의 Steam이 Condensing 되면서 Vacuum상태가 되어, Column이나 Vessel 등이 Collapse되는 안전사고에 특히 유의하여야 한다.

4. Process Plant의 Safety Manager 위치

우리나라 울산, 여주 그리고 대산 석유화학단지 에 건설된 단위 Process Plant의 Total Fixed Capital Investment Cost는 평균 US\$ 100 Mil -US\$ 500 Mil이다. 이와같이 방대한 투자규모의 장치산업의 안전을 일차적으로 책임지고 있는 사람은 당해 Plant의 Safety Manager라고 할 수 있다.

이와같이 매우 중요한 Process Plant의 안전을 책임지고 있는 Safety manager와 Safety Department에 대한 우리나라 산업계의 인식은 거론하는 것이 민망할 정도의 낮은 수준이다.

모두 그와 같은 경우는 아니겠지만, 일반적으로 우리나라에서는 Safety Department 근무를 가장 한직으로 인식한다. 주위의 인식이 그러하니 근무하는 당사자들의 사기 또한 극히 저조한 현실이다.

이와같은 현상은 Safety Department가 기업의 경영층에게 “기업의 비용을 쓰는 곳”으로만 비추어졌을 뿐, “기업에게 돈을 벌어드 주는 곳”으로

인식되지 않았기 때문이 아닌가 생각한다.

물론 이와같은 결과의 책임은 기업의 경영층에게만 있는 것은 아니다. 그 일차적인 책임은 오히려 그와같은 인식을 심어준 Safety Department의 책임자들에게 있다고 보아야 한다.

선진국에서는 기업내에서 가장 실력있고 조직상의 Power가 있는 유능한 사람이 Safety Manager로 임명된다고 한다.

Plant에서는 Safety Manager의 의견이 최우선적으로 받아들여지며, Safety Manager직을 거치지 않은 사람은 Plant manager(工場長)나 경영층이 절대 될 수 없다고 한다.

그들의 오랜 Commercial operation 경험으로

그와같은 안전에 대한 인식이 결국 그들 자신들에게 가장 큰 경제적 이익을 가져다 준다는 사실을 자각한 결과일 것이다.

“소 잃고 외양간 고친다”는 우리나라 속담이 있다. “우리 Plant에 설마 안전사고는 발생하지 않겠지” 하는 요행을 바라면서 Operation을 행하는 많은 기업이 있다.

국가의 외환위기로 IMF에 외환용자요청을 하는 경제적으로 어려운 현시점에서, 만일 Process plant에 대형 안전사고라도 난다면, 해당기업은 물론 국가와 국민에게도 큰 불행이다.

우리나라에서는 “안전사고 후, 후회하면서 외양간 고치는 기업이 나타나지 않기를” 기대한다.

‘불조심 길라잡이’ 출간

불조심 길라잡이



©한국화재보험협회

한국화재보험협회는 최근 불에 대한 안전상식을 재미있는 만화로 그려 엮은 어린이용 불조심 교재 「불조심 길라잡이」를 펴냈다.

이 책은 불이 일어나는 갖가지 원인 및 이에 대한 예방대책을 비롯하여 불과 관련된 생활 주변의 각종 기기를 다루는데 주의할 점과 실제 불이 일어났을 때의 대처요령 등 불에 대한 기본상식을 흥미있게 그림으로 형상화하고 있다.

이 책을 통독하고 보면 어른들도 의외로 화재대책에 대하여 모르고 있는 점이 많은 것을 깨닫게 된다는 평이다.

화재안전에 관한 어린이 교재로는 국내 처음인 이 「불조심 길라잡이」는 매 쪽마다 ‘불은 어떻게

일어날까요?’ 등의 질문에 1~3컷의 원색 만화와 간단한 설명을 덧붙여 답하는 형식을 채택, 어린이들이 부담없이 읽을 수 있도록 구성했을 뿐만 아니라 한 번만 읽더라도 불에 대한 상식과 경각심을 동시에 일깨울 수 있도록 쉽고 짜임새 있게 꾸며졌다는 점을 특징으로 들 수 있다.

또한, 이 책에는 화재현장 사진과 불조심 포스터가 수록되어 있으며, 아울러 그림에 색칠을 하면서 불조심에 대한 지혜도 얻을 수 있도록 편성되어 있어 어린이들에게 불조심 생활화와 안전의식의 조기 정착에도 기여할 것으로 평가된다.

전국 유명 서점에서 발매예정임.

※ 문의전화 : (02)780-8156