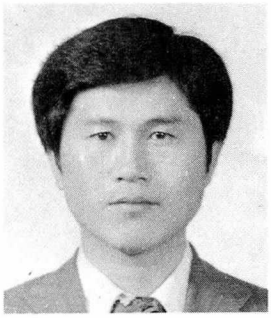
석유화학공장의 화재특성



하 정 호
〈한국산업안전공단 · 기술사〉

1. 머리말

우리의 주요 에너지 이용 물질이 고체에서 액체나 기체물질로 변천되면서 그 운반이나 저장 취급 방법이 너무나도 쉬워지고 간편해짐에 따라 이들 에너지 취급공장이 점점 자동화, 무인화되게 되었다. 이들 에너지 관련공장이라 하면 두말할 것 없이 석유화학공장을 말하게 되나 이 에너지는 합성화학의 기술이 발달되면서 부터 에너지 가공형태라기 보다는 온갖 생활용품을 비롯한 각종 자재를 제조하는 종합 합성공장의 형태로 발전하게 되었다.

이들 석유화학 공장은 공장 프로세스 특성이 대부분 무인의 자동화이며 위험물의 저장 · 취급량이 대용량이며 그 잠재에너지가 매우 크고 일단 화재가 발생되면 급격히 확대되는 특성을 갖고 있기 때문에 화재 발생을 사전에 완벽히 예방하여야 하며 혹시 화재가 발생하더라도 아주 신속히 진압하지 않으면 안되는 특성이 있다.

일반적으로 석유화학공장이 설립된지 10년 이상 경과되어 20년 정도 되면 석유류중의 황(sulfur) 성분 등으로 발견하기 어려운 부식이 일어나거나 아주 사소한 결함으로도 대규모의 재해가 발생하는 사례가 선진외국에서도 허다하게 있어 왔다.

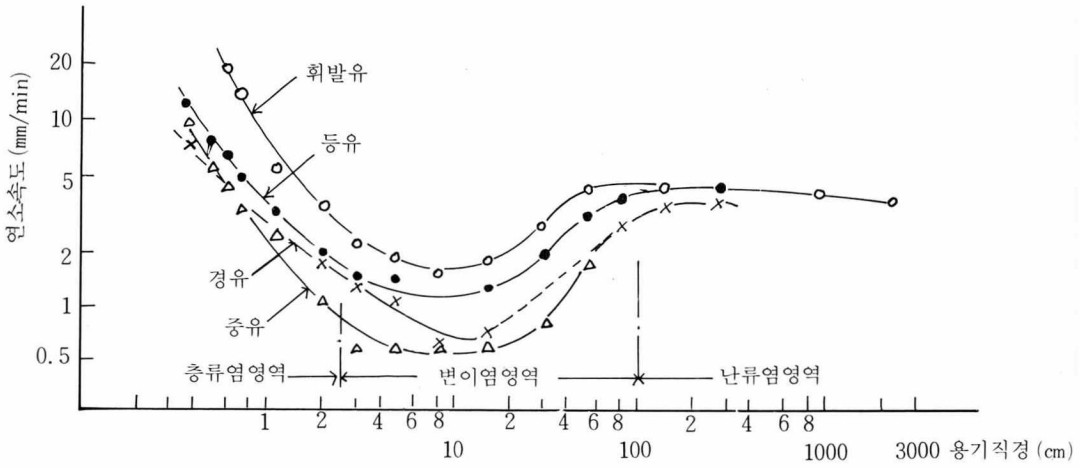
이웃나라 일본의 경우를 보면 1950년대 후반부터 공업의 가속화에 따라 많은 석유화학단지가 건설되었으나 약 20년이 경과된 1974년 후반부터 1975년 봄에 이르기 까지 미쯔비시석유(주)나 다이쿄석유(주) 등에서 대형재해가 잇달아 발생되어 석유화학콤비나트 재해방지법을 서둘러 제정하는 등 종합대책을 시급히 수립하여 안전에 만전을 기한 사례를 우리는 간과해서는 아니 될 것이다.

석유화학공장의 재해정도는 석유류 등 위험물의 수량, 설비의 종류와 규모, 결함의 종류 등에 따라 큰 차이가 있음으로 각각의 경우에 대비한 예상최대피해를 계상하여 대책을 사전에 수립해둘 필요가 있다.

석유류 화학공장의 화재특성상 기술적으로 검토해야 할 사항을 위험물의 누출과 확산, 위험물의 액면연소속도, 화염의 형상과 길이, 화염으로부터의 복사열, 열적인 안전거리, BLEVE와 Fire Ball(화구), 폭발풍압 등을 면밀히 연구하여 각각 대책을 수립하여야 할 것이다.

2. 가연성 액체나 가스의 누출과 확산

화학공장에서 대부분의 화재폭발은 가연성 액체나 가스가 누출하여 일어나는 것들이며 이들의 누출



〈그림 1〉 액체 위험물의 액면 연소속도

은 설계, 재질, 공사 내용에 따라 또는 보수 내용과 그 상황에 따라 달라지며 많은 부분은 사람의 실수에 의해서도 자주 일어나고 있다.

화학공장에서 누출된 위험물은 액상이면 대부분 방유제 내에 고이게 되지만 가스의 경우는 공기중으로 확산하여 가연성 가스층을 형성하게 된다. 가연성 가스의 확산은 누출이 오래 계속되고 그 속도가 일정하게 되면 정상상태로 됨으로 이러한 누출농도를 많은 사람들이 실험 연구 결과 공식으로서 제시하고 있다.

역시 그 누출농도는 가스방출속도에 비례하나 주위의 풍속에 반비례 하는 것으로 알려지고 있다.

한편 가연성 액체가 누출되어 방유제에 머무르지 않고 외부로 유출하면 액체위험물의 유면은 확대되고 그에 비례하여 화재의 위험성이 높아지게 되며 이 누출된 액체위험물이 하수구 등에 유입되게 되면 아주 멀리까지 흘러내려 이 기름이 만일 발화하게 되면 일시에 넓은 지역에 걸쳐 화재가 발생되므로 진화할 수 있는 방법도 어려울 뿐 아니라 큰 피해를 낸 경우도 많은 것으로 알려지고 있다.

3. 탱크내 액체위험물의 연소속도

탱크내에 있는 액체위험물이 위에서부터 타내려가는 연소강하속도는 그 액체위험물의 증발속도로서 표현될 수 있다. 각종 연료의 연소속도를 직경 0.39㎝에서 22.9ｍ까지 여러 종류의 원통용기에서 연소강하속도를 실측한 결과 나타난 내용은 아래 〈그림1〉과 같다.

이 실험 연구 결과에 의해서 액면연소의 형태는 연소용기의 직경에 의해서 세가지로 구분되는데 화염이 층류로되는 것은 직경이 약 20㎜ 이하의 경우이며 화염이 난류로 되는 경우는 직경이 약 100㎝ 이상이며 이 때는 난류화염영역과 그 중간의 변이영역으로 구분되어 있다.

층류화염영역의 액면연소에 있어서 연소속도는 용기벽의 두께, 재질, 액면의 높이 등의 영향을 받는다. 용기벽의 두께나 열전도율이 증가하게 되면 연소속도는 감소하고 액면이 낮아지면 연소속도 또한 일반적으로 감소하는 경향이다.

일반적으로 큰 용기에 있어서의 주요위험물에 대한 연소속도는 다음 〈표1〉과 같다.

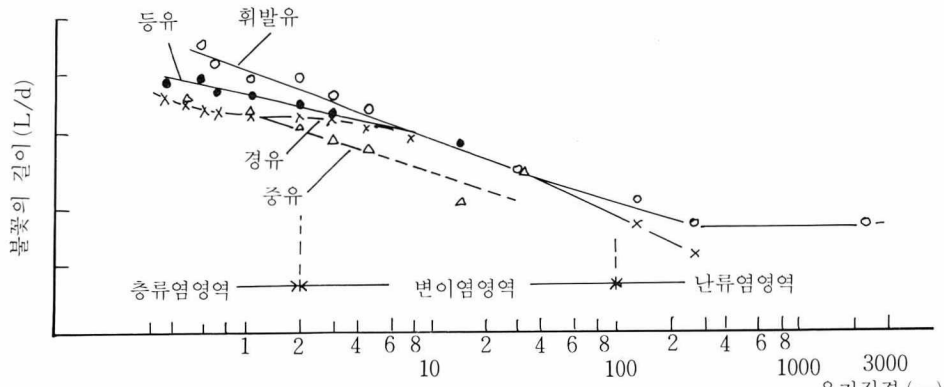
〈표1〉 연료의 연소속도

연 료	연 소 속 도(㎜ / min)
핵 산	7.1
휘발유	4.8
벤 젠	6.0
등 유	2.2
중 유	1.3
메타놀	2.0
L N G	11.4

4. 화염의 형상과 길이

화염의 형상과 길이는 화염에서 그 주변의 방사전열량을 예상하기 위한 중요한 요인이 된다. 화염은 그 부력과 주위에서의 공기도입의 영향을 받아 일반적으로 상하방향으로 진동적인 변형을 한다. 난류염의 경우 그 진동은 무풍시에 잘 관찰할 수 있다. 불꽃의 진동 주기는 용기의 직경과 함께 증가하고 용기 직경이 7.5㎝～2.4ｍ의 범위에서는 용기 직경의 1 / 2승에 비례하는 것으로 확인되어 있다.

화염의 형상은 층류염, 난류염과 함께 원통형에 가까운 경우가 많다. 화염의 길이에 있어서는 화염의 상단을 결정하기가 어렵기 때문에 정



〈그림 2〉 석유의 액면 연소에 있어서 불꽃의 길이

확하게 말할 수는 없으나 화염의 길이 L과 용기 직경 d와의 비 L/d의 실측예를 d에 대하여 그림으로 나타내면 다음 〈그림 2〉와 같다.

이 그림에서 보는 바와 같이 난류영역의 경우 L/d의 수치는 일반적으로 1.5인 것으로 알려지고 있다.

또한 층류염의 길이는 연료의 증발속도에 대체적으로 비례하고 난류염의 길이는 용기의 직경에 비례하는 관계가 된다. 화염의 길이를 용기직경, 이론 공연비, 연소열, 공기과잉률 등의 관계수치로 나타내고 공기과잉률을 4로 하면 불꽃길이의 이론치는 대개 실험치에 일치하는 것으로 알려지고 있다.

5. 화염으로부터의 복사

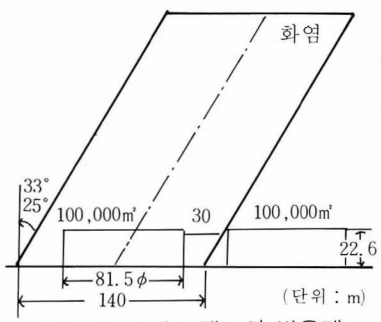
화염을 회색복사체로 생각하면 임의의 위치에 있는 점에서 받는 복사열은 절대온도의 4승에 비례한다. 거대한 탱크가 방유제화재를 일으키고 풍속이 11~12 m / sec일 때의 화염의 형태는 다음 〈그림3〉과 같다.

한편 같은 탱크의 화재에서도 Floating Roof 탱크가 연소할 때는 복사열은 매우 적고 연소하고 있는 테두리의 폭이 탱크직경의 10%일 때는 본래의 3%에 불과하다.

6. 열에 대한 안전거리

강한 복사열을 받으면 인간은 살상되고 유기물질은 발화하게 되며 금속재료의 강도는 저하한다. 인간이 장시간 맨몸으로 견딜 수 있는 복사열은 1,080Kcal/ ㎡ · hr로 이것은 지표에서 받아들이는 태양으로부터의 태양복사열에 상당한다. 머리, 안면을 포함하여 의복 등으로 가리면 4,000Kcal / ㎡ · hr까지 견딜 수 있다. 이 정도가 안전면에서 인간의 한계로 알려지고 있다.

한편 유기물은 열을 받게되면 발화하게 되는데 이때 발화라고 하는



〈그림 3〉 10만 ㎥ 탱크의 방유제 화재시의 화염형태와 크기 (풍속11~12m)

것은 건조한 시료가 15분 이내에 발염연소를 시작하는 것을 말하며, 인화라고 하는 것은 화염과 같은 적당한 화원이 동시에 존재할 때의 발화를 말한다. 낡은 합판의 경우 불티가 있으면 2,500Kcal/ ㎡ · hr에서 발화한다고 알려지고 있지만 일반적으로 4,000Kcal/ ㎡ · hr 정도가 타당하다. 동재료에 대해서는 600℃가 강도면에서 한계인 것으로 알려지고 있다. 일반적으로 거대한 탱크의 방유제 화재에 대한 안전거리는 인간에 대해서는 화염의 중심으로부터 최대 500~600 m, 유기물에 대하여는 최대 250~300 m라고 말 할 수 있다.

7. Fire Ball과 현상

어떤 인화성 위험물질이 밀폐용기에 저장되어 있을 때 주위의 화재 등 많은 열원에 의해 가열되어 인화성 물질이 증발, 높은 증기압 상태에서 용기가 파열되는 경우 고압의 가연성 증기가 순식간에 확대되어 발생되는 현상을 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) 현상이라 하며 이 확산된 가연성 증기가 인화되게 되면

거대한 화구(Fire Ball)가 생성되게 된다.

이밖에도 가연성 가스가 용기로부터 분출하고 외기와 혼합하여 폭발성 혼합기를 만들어 착화할 경우에도 거대한 Fire Ball이 생성된다.

화구의 크기는 누출된 가연성 가스의 종류와 양에 의해 정해지며 간단한 계산모델이 보여지고 있다. 이것은 폭발성 혼합기체가 1500℃ 정도로 된다. 예를 들어 5000㎥의 LPG 탱크가 파괴되어 그 내용의 1/10이 단숨에 분출하여 Fire Ball이 형성된다고 하면 직경 363m의 거대한 화구로 된다는 것이 이론적 계산결과이다. 이 화구의 특징은 화염의 온도가 높다는 점으로 보통 탱크화재의 온도가 1000℃임에 비해 1500℃로 1.5배나 높다. 복사는 화염온도의 4승에 비례하기 때문에 그 차는 더욱 크다.

8. 폭발풍압

가연성 가스가 폭발한계 내의 조성을 가지고 화원이 존재하면 폭발이 일어나고 주위에 영향을 미친다. 디토네이숀이 일어날 때에는 그 효과가 특히 심하며 가스나 증기의 폭발압력은 고체폭약의 위력과 폭발에서 방출되는 자유에너지를 비교함으로써 구할 수 있다. 폭발풍압에 대한 대체적인 피해상황은 〈표2〉와 같으며 이것에 의하면 약 500m의 범위까지 빈 유리병이 파손되는 것을 알 수 있다.

〈표2〉 폭발 풍압과 피해

	피 해	폭 발 풍 압(kg/㎠)
창 유 리	깨지는 것이 있음	0.04
	대 개 파 손	0.4
	일 부 파 손	0.25
목 조 건 물	반 파	0.6
	도 괴	1.5
철 골 탑	도 괴	0.6
	파 괴	2.6
LPG 탱 크	일 부 파 괴	0.6
	파 괴	2.6
석 유 탱 크	일 부 파 괴	0.23
	대 파	0.37
인 간	팔다리 부상	0.21
	폐에 부상	0.42
	사 망(50%)	4.2

9. 맺는 말

석유화학공장들은 많은 에너지와 농축되어 있는 위험물들을 취급하는 공장이므로 일단 화재가 발생하면 그 피해는 전공장을 파괴시킴은 물론 때에 따라서는 주위 2km까지 큰 피해를 입히기도 한다.

석유화학공장들은 점점 더 복잡해지고 고온·고압의 공정을 개발하여 실용화하게 되며 공장의 증설이 점차 이루어지고 있어 보유안전거리가 부족하게 될 우려가 높다. 또한 무인화, 자동화가 이루어지면서 일단 재해가 발생되면 사람이 항상 상주하여 초기에 즉시 진압할 기회가 적어지므로 대형재해가 발생할 위험이 높아져 가고 있다.

앞에서 언급한 석유화학공장의 화재시 고려해야 할 특성에 대하여 각 공장별로 사전 안전성을 충분히 검토해 이에 대한 적극적이고도 과감한 대책과 경제적 투자를 하여야 할 것이다.