

유기 과산화물에 의한 메탄올 폭발 사례 연구 – A case study of methanol explosion by metal hydroperoxid –

원 유 준 *

Won You Jon

강 경식 **

Kang Kyong Sik

Abstract

In the June, 1991, there was the explosion in which methanol rectified column as a part of the new surface active agent's manufacturing processes. The type of explosion was estimated as the "detonation". The methanol rectified column was ruined, and broken pieces of the column were scattered within 900m. Also, there were victims such as the two deads and thirteen wounded persons. The cause of the explosion was heat explosion by being concentrated locally from 0.1% to several tens% of supply fluid at Metal Hydroperoxide, which was produced by methanol and hydrogen peroxide used as the bleach of surface active agent, during the operation stoppage process of methanol rectified column.

Keywords : Hydroperoxide, detonation, methanol explosion

1. 서 론

폭발은 “급격한 압력의 발생 결과로 가스가 폭음을 수반하여 격렬하게 팽창하는 현상”을 말한다. 그러나 “폭발”이라는 말은 넓은 의미에서 “연소”의 범주에 포함되는 경우도 있다.

폭발한계 또는 폭발범위는 연소한계 또는 연소범위와 같은 의미이며 엔진내의 가솔린의 폭발도 연소의 일종이다. 폭발 중에서도 특히 격렬한 것을 폭광(detonation)이라 한다.

* 한국컨테이너풀(주), 명지대학교 산업공학과 박사과정

** 명지대학교 산업공학과 교수

2005년 11월 접수; 2005년 12월 수정본 접수; 2005년 12월 게재 확정

폭굉은 매질 중 초음속으로 진행하는 화학반응으로 선단에 충격파를 형성한다. 충격파라는 것은 초음속으로 진행하는 파동이며, 충격파를 받는 매질은 같은 압력의 단열압축보다 높은 온도 상승을 일으킨다. 매질이 폭발성이면, 그 온도상승에 의하여 반응이 계속 일어나 폭굉파를 일정속도로 유지한다.

1991년 6월 26일(수) 10시 15분경, 라이온(주) 千葉(치바) 공장의 신규 계면 활성제 「알파슬픈지방산에스텔염(이하 α -SF로 축약)」 제조공장의 메탄을 정류탑에 있어서 폭발사고가 발생했다. 폭발의 형태는 폭발파편의 형상, 추정폭발 압력, 정류탑이 국부적으로 파괴된 것으로 보아 「폭굉」 이였다라고 판단되어 진다.

이 폭발사고는 미량인 유기과산화물과 조작 조건이 관여한 특수한 화학폭발로서 원인조사로는 많은 시간과 노력이 소비되었다. 그 결과, 메탄을 정류탑의 운전 정지 과정에서 메틸 알코올 하이드로퍼옥시드(이하 과메탄올로 축약) 액상 농축물이 정류탑 내에 형성되어 열 폭발 했다라고 추정 되어진다. 본 논문은 그 사고의 사고 발생 경위와 추정 원인에 대해서 연구해 보았다.

2. 폭발사고의 계황

2.1 사고 발생 상황

1996년 6월 26일(수) 10시 15분경 라이온(주) 千葉(치바) 공장 α -SF 제조공장에서 폭발사고가 발생하였다. 기온은 28°C, 습도 71%, 풍향은 북북동, 풍속은 2m/s로 날씨는 맑은 날씨였다.

메탄을 정류탑(정류단수 65단)의 운전 정지 과정에서 정류탑의 상부(5단 째부터 26단 째까지의 약 7m)에서 폭발사고가 발생했다. 정류탑 꼭대기부터 4단 째까지의 부분은 지상에 낙하하고 5단부터 26단까지가 폭발에 의해 파괴되어져 탑벽 파편은 최대 1.3km 대략 반경 900m의 범위로 비산했다.[1],[2]

11단부터 17단까지는 크게 파괴되고 27단부터 하부는 남아 있었다. 메탄을 정류탑의 주위 약 50m 범위 안에 있는 창들은 거의 전파되었다.

2.2 폭발 위력

① TK 충격 폭발 공학연구소장, 방위대학교 명예교수 竹田仁一씨의 폭발발생 압력의 추정 의뢰 결과 폭발 중앙부는 160kgf/cm^2 이상, 폭발하부는 110kgf/cm^2 이상이였으며, TNT 환산당량은 주위의 창문의 파괴상황에 의해 10~50kg 이라고 추정되었다.

2.3 피해상황

① 안전피해 : 사망자 2명, 부상자 13명(重상자 1명, 中상자 1명, 경상자 11명).

② 물적피해 : 사고발생시설 - 메탄올 정류탑 파괴.

사고발생 사업소 내 - 폭발에 수반한 비산물, 폭광에 의해 319개가 파손.

부근 사업소 - 폭발에 수반한 비산물에 의해 근처 17개 회사에 피해 발생.

일반민가 - 특별한 피해보고는 없음.

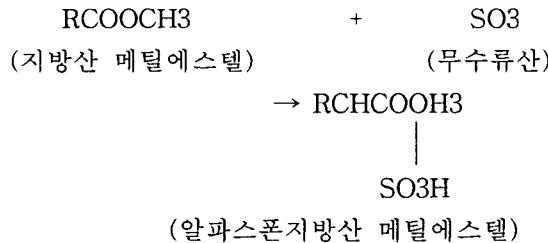
3. 공정 설비의 개요

3.1 α -SF 제조 공정의 개요

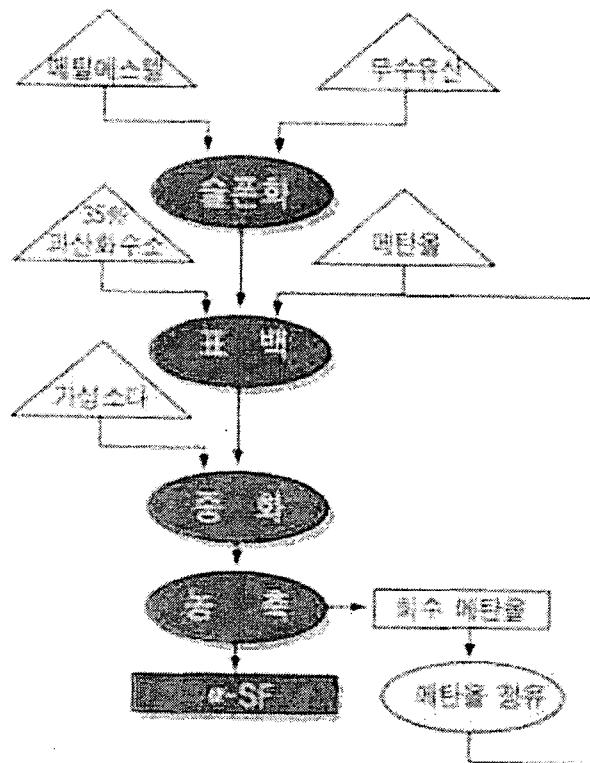
지방산 메칠 에스텔로부터 α -SF을 제조하는 공정은 <그림 1>에 나타낸 것과 같이 슬폰화 반응, 표백, 중화, 농축, α -SF로부터 메탄올 정류공정에서 생성된다. 이 공정들은 컴퓨터 제어 아래에서 연속운전 된다.

3.1.1 슬폰화

원료유(지방산 메칠 에스테르)와 무수유산(SO₃)을 일정 몰비로서 반응시켜 「알파슬폰지방산 메칠 에스텔(이하 슬폰산으로 축약)」을 제조한다.



이 슬폰화 방응은 등몰 반응이지만 에스텔 1mol에 SO₃ 2mol이 추가된 중간체를 경유해서 진행하기 위해 에스텔 1mol에 대해 약 1.2배 mol의 SO₃을 첨가하여 반응시켜 목표의 반응률을 확보하고 있다.

<그림 1> α -SF 제조공정 Process Flow

3.1.2 표백

슬픈산은 원래의 상태에서는 검은 색조를 띠기 때문에 세제원료로서는 사용할 수 없다. 그 탈색을 위해 35%의 과산화수소물을 2.5%(수분 % 대 슬픈산)와 메탄올 25%(대 슬픈산)을 동시에 첨가하여 표백한다.

3.1.3 증화

표백 슬픈산은 수산화나트륨 수용액에서 증화되어지고 α -SF 증화 슬러리가 된다.

3.1.4 농축

증화 슬러리에는 표백공정에서 첨가한 메탄올 혹은 물이 포함되어져 있다. 증화 슬러리는 가압 하에서 비점이상으로 가열되어진 뒤, 상압공간에 플래시 증발되어지는 것에 의해 α -SF 농축액과 메탄올 혹은 물의 증기로 분리되어진다. 증기는 응축되어져 메탄올 약 40%의 메탄올 수용액(이하 회수 메탄올로 축약)이 된다.

3.1.5 메탄올 정류

회수 메탄올은 정류탑에 공급되어지고 정제한 메탄올(이하 정제 메탄올로 축약)과 물로 분리되어지고 정제 메탄올은 표백공정으로 돌아가 재사용 되어진다.

3.2 메탄올 정류탑

메탄올 정류탑(사고발생설비)의 개요를 나타낸 것이 <그림 2>이다.

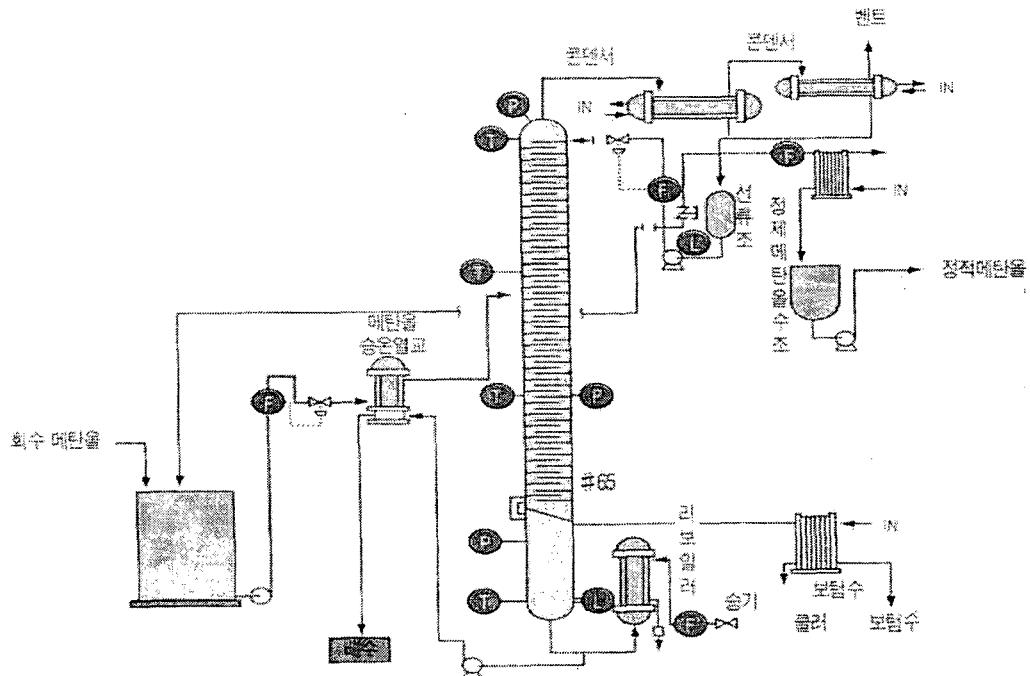
회수 메탄올은 정류탑의 26단에 공급되어져 있다. 메탄올 증기는 열교환기에서 응축 후에 환류조를 거쳐 일부가 제조 메탄올로서 배출 되고 잔량은 정류탑내로 환류 되어진다.

정산운전 때의 환류비는 5이다.

통에 있는 물의 배출은 하부로부터 배출시킨다.

정류탑형식 : 밸브트레이형 정류탑(재질 : SUS 304)

탑지름 / 탑길이 / 선반단수 : 0.9m / 25.8m / 65단



<그림 2> 메탄올 정류탑 설비 개요

3.3 사고발생설비의 운전상황

α -SF 제조설비는 1991년 1월에 완성하여 시운전 후 동년 2월부터 정상운전을 행하고 있다. 사고 발생전의 운전 상황은 아래와 같다.

- 6월 19일 21시 35분경 : α -SF의 슬픈화 반응장치 가동 개시.
- 6월 20일 2시 46분경 : 메탄올 정류탑에 회수 메탄올의 공급을 개시하다.
- 6월 26일 8시 9분경 : 슬픈화 반응장치의 가동정지(생산 예정 수량이 확보되었기 때문).
- 동일 9시 6분경 : 메탄올 정류탑에의 회수 메탄올의 공급을 정지한다. 동시에 재보일러 스팀량을 내리고 정제 메탄올 배출량을 통상의 350kg/h로부터 150kg/h로 내리고 다음의 조작을 기다린다. 「홀드상태」로 하고 있었다(환류비는 12).
- 동일 9시 55분경 : 정류탑내의 메탄올과 물의 분리를 될 수 있는 한 잘 하기 위해 정죄 메탄올의 배출을 정지하고 응축 메탄올을 전량탑 내에 되돌리는 「전환류 조작」으로 이동.
- 동일 10시 5분경 : 응축 메탄올의 정류탑내로의 환류를 정지하고 재보일러의 스팀량을 증가시키고 정류탑 내의 메탄올을 전량탑 정상으로부터 추출하는 「굽기 조작」으로 이동.
- 동일 10시 15분경 : 폭발 사고 발생(사고 발생 0-2초 전에 온도 및 압력의 이상은 특별히 없었다).

4. 사고원인의 분석

4.1 회수 메탄올 중의 과산화물 분석

오오사카 공장의 회수 메탄올 중의 과산화물 농도는 千葉(치바) 공장보다 1 오더 낮았기 때문에 千葉(치바) 공장에도 석출물이 없었다라고는 단정할 수 없다. 그러나 석출물이 구체적으로 확인할 수 없기 때문에 원인을 액상폭발로 좁혀서 조사하기로 했다.

<표 1> 회수, 환류 및 정제 메탄올 중의 과산화물 분석 결과(ppm)

		KI 적정법	유산세리튬법	KmnO4-KI법
회수메탄올	과산화수소	900	900	*
	유기과산화물	700	600	1600
	토탈양	1600	1500	1600
환류메탄올	과산화수소	2300	2700	*
	유기과산화물	2000	700	6000
	토탈양	4300	3400	6000
정제메탄올	과산화수소	*	*	*
	유기과산화물	*	*	*
	토탈양	*	*	*
하부水	과산화수소	600	400	500
	유기과산화물	*	300	*
	토탈양	600	700	600

유기과산화물 농도는 과산화수소로서 산출

* : 검출한계이하

재해 후 채취한 회수, 환류 및 정제 메탄올 중의 과산화물 분석 결과를 <표 1>에 보인다.

과산화물 분석 값의 토탈양(과산화수소 + 유기과산화물)은 「KI 적정법」, 「유산세리튬법」 및 「KMnO4 KI법」 등의 방법에 대해서도 개략 일치하고 있다.

그러나 과산화수소와 유기과산화물 분석치는 제각기 분석방법에 따라 다르다.

이 원인을 조사한 결과 요소이온 및 세륨이온은 「하이드로파옥시드」와 「과산화수소」에 대한 반응성의 차가 없고 KI적정법 및 유산세리튬법에서는 양자의 분석정량이 어려운 것을 알았다. 효소가 과산화수소와 선택적으로 반응하는 것을 이용한 「효소 KI적정법」에 따라 과산화수소량을 정량한 결과 <표 2>에 나타낸 것과 같이 KI적정법 및 유산세리튬법의 분석치와 크게 다른 것을 알았다.

이것으로 회수 메탄올 중에 「하이드로파옥시드」가 함유 되어져 있을 가능성이 시사되었다.

<표 2> 「효소 KI 적정법」에 의한 과산화수소 분석 결과(ppm)

회수메탄올(컨테나)	150
환류메탄올	100
정제메탄올	*
하부水	250

* : 검출한계이하

<표 3> 회수, 환류, 정제 메탄올 중의 과메탄올 분석 결과(ppm)

	과메탄올 량
회수메탄올(컨테나)	1700
환류메탄올	5200
정제메탄올	0
하부水	0

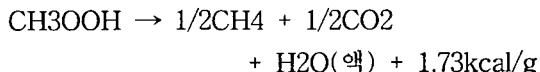
이것을 단서로 회수해서 메탄올 중의 유기 과산화물의 동정에 대조했더니 가스크로매트그래프 및 MR 분석에서 불명정점이 발견 됐다. 가스크로매트그래프의 불명정점의 정밀질량은 GC-MS에 의해 48.020으로 측정되고 과메탄올의 질량 48.021과 거의 일치했다. 또 NMR의 불명시 그날의 화학시프트는 Hell-pointner E들이 대기 오염 물질로서 측정하고 있던 과메탄올의 화학 시프트와 일치하고 있다는 점으로 보아 불명물질은 과메탄올이다라고 결론지었다. <표 3>은 회수, 환류 및 정제메탄올중의 과메탄올을 정량한 결과이다.

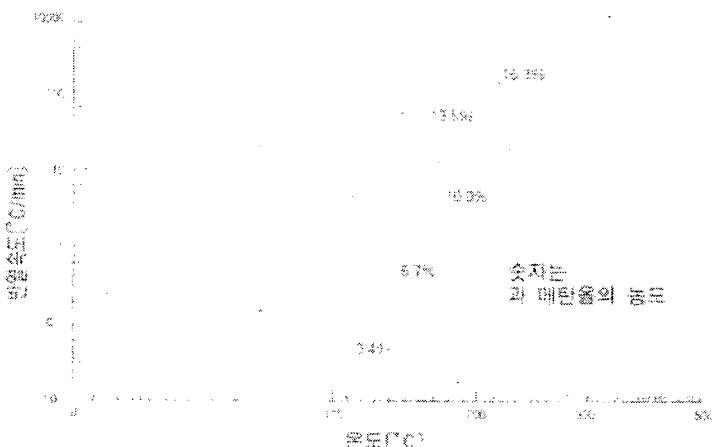
4.2 과메탄올의 위험성 평가

4.2.1 SA-DSC 분석 및 ARC 측정에 의한 위험성 평가

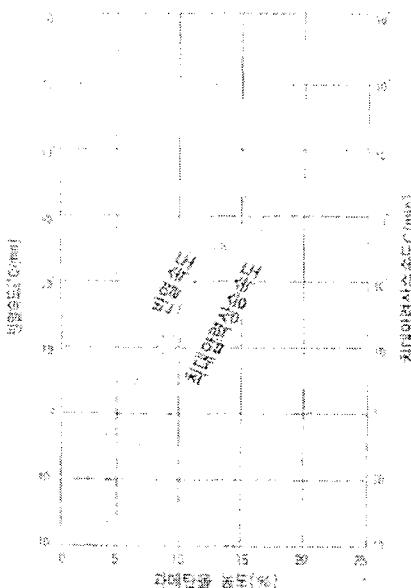
환류메탄올주의 메탄올분을 감압증류법에 의해 약 15% 농도의 과메탄올 농축액을 조제하고 과메탄올의 위험성 평가를 행했다.

- 과메탄올의 분해열은 SC-DSC분석의 결과 약 1.7cal/g으로 측정되고 이론분해열도 개략 일치했다. 분해 생성물로서 C, CH₄ 및 CO₂가 확인되었다.





<그림 3> 과메탄올 용액의 온도와 발열속도와의 관계(ARC)



<그림 4> 과메탄올 용액의 농도와 발열속도, 최대압력 상승속도와의 관계(ARC)

- SC-DSC 분석의 外插분해개시 온도(T_c)은 약 100°C, ARC 측정법에 있어서 분해개시 온도($TARC$)은 약 50°C이었다. 정류탑 내의 과메탄올의 분해개시 온도는 정류탑이 완전한 단열상태에서는 없기 때문에 약 50-100°C의 사이에 있는 것으로 추정되었다.
- ARC 측정의 결과, 과메탄올 용액은 고농도가 되면, 발열반응이 순간적으로 진행하는 것으로 평가된다. <그림 3>에서 과메탄올 농도와 온도/발열속도와의 관계, <그림 4>에서 과메탄올 농도와 발열속도 및 최대 압력 상승속도와의 관계를 나타낸다.

4.3 폭발물질의 형성

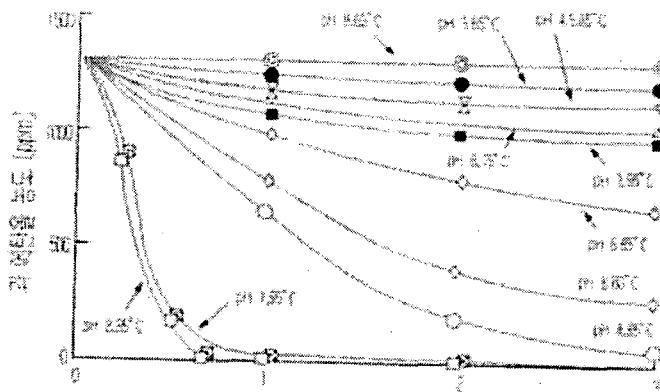
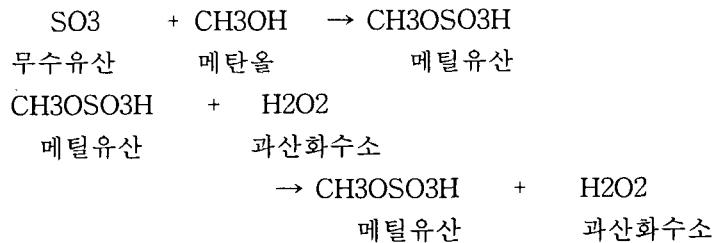
4.3.1 과메탄올의 생성

α -SF 제조 각 공정에 있어서 정상운전시의 과메탄올 농도는 <표 4>에 보였듯이 0.2% 이하의 적은 값이다. 공정별로는 표백산 경우가 가장 높고, 중화공정에서는 감소하고 회수 메탄올 중에서는 표백공정의 약 1/3 - 1/4 까지 감소하고 있다.

표백산 중에는 SO_3 이 일부 존재하고 있고 표백 공정에서 첨가된 메탄올과 반응해서 메틸유산이 부수적으로 생성됐다. 재해 후 연구에 의해 이 메틸유산은 산성 조건 하에서는 과산화수소와 반응해서 과메탄올을 생성한다. 중성-알카리 조건 하에서는 과메탄올을 생성하지 않는 것을 알았다.

<표 4> α -SF 제조 각 공정에 있어서 과메탄올 분석 결과(ppm)

	과메탄올 농도(ppm 대 메탄올)
표백산	8000 - 10000
중화슬러리	6000 - 8000
표백슬러리	검출하지 않음
회수메탄올	2000 - 4000



<그림 5> 과메탄올 용액의 안정성

한편, 과메탄올의 안전성은 <그림 5>에 나타나고 있듯이 약산성 수용액 중에서는

안정하며 거의 분해하지 않지만 중성부터 알카리성 용액 중에서는 불안정하다. 온도에 따라 상당히 빠르게 분해하는 성질을 가지고 있는 것을 알았다. 따라서 실제의 제조공정에서는 과메탄올은 표백공정(pH 1 이하)에서 생성하고 중화공정이라서 새롭게 생성하지 않고 서서히 분해한다고 생각되어진다.

4.4 정류탑에 있어서 과메탄올의 농축

4.4.1 정류탑에 있어서 과메탄올의 농축현상의 확인

千葉공장과 같이 α -SF을 제조하고 있던 오오사가 공장의 메탄올 정류탑(봉단수 37단)을 해체하여 관계관청 입회하에 내부를 점검했다. 그 결과 회수 메탄올의 공급위치(24단과 25단의 사이)보다 조금 위의 20-24단의 봉단트레이, 베블캡 및 측벽부분이 청자색으로 착색되어 있는 것이 확인 되었다. 탑 정상부터 18단까지는 SUS의 지표가 나와 있으며 25-37단은 철이 녹슨 적갈색을 하고 있고, 20-24단은 명료한 차이가 있었다. 이 청자색의 착색부분을 ESCA (X선광전자분석법)에서 분석한 결과 표면층 0.1 - 1.0 μm 정도 산화철(Fe_2O_3)의 존재가 확인되고 표면의 얇은 산화피막의 광간섭 현상에 의한 착색이라고 추정되었다.

과메탄올은 비점이 85-89°C로서 메탄올(64.7°C)과 물(100°C)과의 중간 휘발성이다.

증류 시뮬레이션의 결과 과메탄올은 정상운전 시(환류비 5)에는 절정단계에서 수%의 농도밖에는 없지만 전환류 조작에서는 수십%의 농도까지 농축되어진다는 것. 절정단계 부근의 탑 내온도와 80-90°C 청자색으로 착색 되어 있는 20-24단의 탑 내온도 82-88°C와 개략 일치하는 것을 알았다.

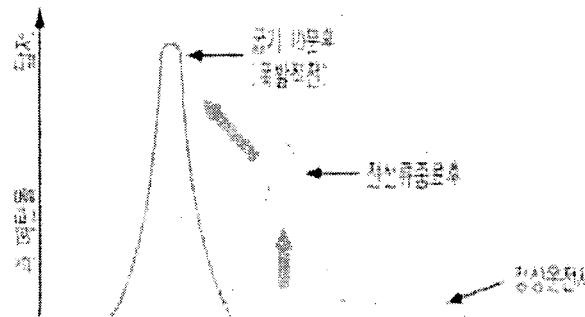
4.4.2 정류탑내에 비류하고 있던 과메탄올양의 추정

과메탄올은 통상 운전 시에는 정류탑 내에 10-20kg 체류하고 있다라고 판단되어진다. 재해 후 당일은 중화공정에서 pH계 고장이 있었다. 중앙제어장치의 pH지시 값은 알카리사이드로 시프트 되어 있고 슬픈산에 대한 가성소다 첨가량을 감소했기 때문에 일부의 시간대에 있어서 중화 슬러리의 pH가 3-5 낮게 되어있었다. 그 때문에 과메탄올은 분해 되기 어려운 상태가 되고 사고 시에는 과메탄올이 약 30-40kg 정류탑 내에 체류하고 있었다라고 판단한다.

4.4.3 정류탑 내에서의 과메탄올 농축 시뮬레이션

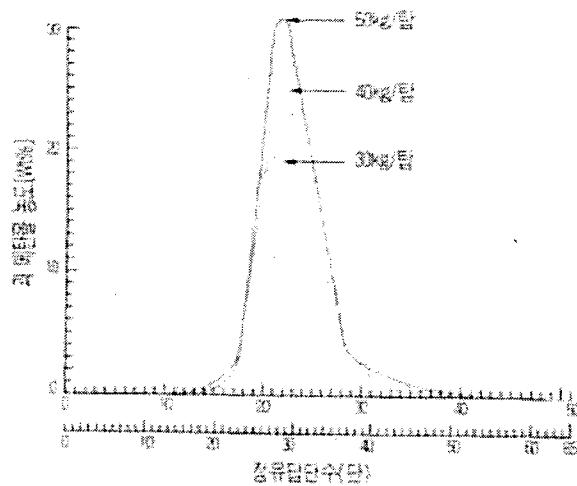
정류탑의 운전 정지는 홀드조작, 전환류조작, 굽는조작의 순에 행해지고 굽는 조작 개시 10분 뒤에 사고가 발생했다. 정류탑 내의 과메탄올 농축의 양자를 <그림 6>에 모델로서 보이고 있다. 과메탄올은 정상운전에서는 정류탑 내에 넓게 분포하고 있지만 전환류 조작에서는 국부적으로 농도가 높아지고 굽는 조작에서는 농축이 진행됨에 따

라 절정단의 정류탑 위 방향으로의 이동이 일어났다라고 판단된다.

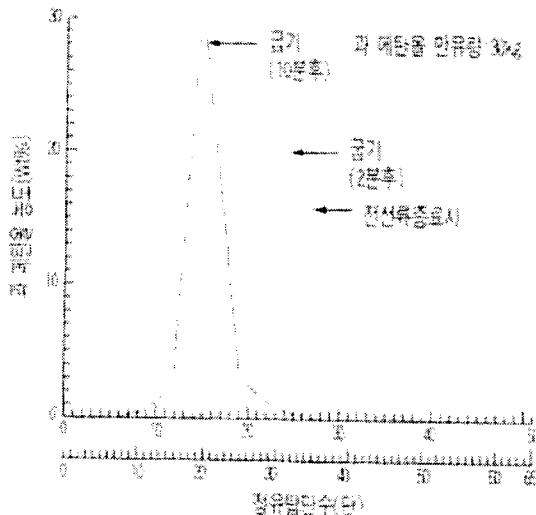


<그림 6> 정류탑에서의 과메탄을 용액의 농축과정 모델

증류 시뮬레이션은 전통국제정보 서비스(주)에 의뢰하여 「DESIGN II」 프로그램을 이용하여 행했다. <그림 7>은 정류탑 내의 과메탄을 체류량이 30, 40, 50kg의 케이스에 있어서 전환류 조작 종류시의 시뮬레이션 결과이다.



<그림 7> 정류탑에 있어서 과메탄을 용액의 농축 시뮬레이션(전환류 조작)



<그림 8> 정류탑에 있어서 과메탄올 용액의 농축 시뮬레이션(급기 조작)

<그림 8>은 전환류 조작 종료 후 급는 조작을 행한 경우의 시뮬레이션 결과로서 정류탑 내의 과메탄올 체류량이 30kg의 케이스인 경우이다. 전환류 조작종료시의 과메탄올 농도는 절정단에서 약 20%, 급는 조작 10분 후에는 약 40%까지 농축되어지는 것을 알 수 있다. 이 계산은 50단에서 행하여지고 있기 때문에 급는 조작 10분 후의 농축 절정 위치 11단은 $14.3\text{단} (11 \times 65 / 50 = 14.3)$ 에 상응하며 폭발의 중심부(정류탑 11 ~ 17)과 일치하고 있다.

4.5 원인 추정의 결론

회수 메탄올 중에 미량 함유 되어져 있던 과메탄올이 정류탑의 운전정지 과정에서 정류탑 내에서 국부적으로 응축 되어져서 고농도액이 되고 열폭발을 일으켰다라고 판단된다.

4.6 원인 추정에 도달한 경위

조사초기 단계에서는 회수 메탄올 중의 과산화물중에 과메탄올이 포함되어져 있는 것을 모르고 과산화수소나 산소가 관여한 기상폭발, 액상폭발, 정류탑 내에서의 폭발성 유기 과산화물 형성에 의한 고상폭발 등의 가능성을 생각하였지만 인정되지 않았다.

사고 발생 후 2개월이 지나서 회수 메탄올 중에 과메탄올이 약 1700ppm정도가 들어 있는 것을 알았다. 이 과메탄올은 비점이 86~89°C로서 메탄올과 물 비점의 사이에 있다.

중류시뮬레이션의 결과, 조작조건에 의해서는 정류탑 내에서 국부적으로 농축될 수 있다는 가능성을 알았기 때문에 이후의 원인 추정은 「과메탄올 농축액상의 폭발」로 조여 갔다.

위험성 평가의 결과 순과메탄올의 분석에 의한 발열량이 약 1.7kcal/g으로 측정되었다.

또, ARC 측정의 결과 과메탄올은 농도 상승과 함께 발열 속도 및 압력 상승이 가속도적으로 빠르게 되고 거의 순간에 분해한다고 평가되었다. 더욱이 KHT법에 의한 폭평계산에 의하면 고농도 과메탄올 용액은 폭평하는 가능성이 있는 것을 알았다.

재해시의 상황에 근거하여 중류 시뮬레이션의 결과 과메탄올이 정류탑 운전정지 과정에서 수십%의 농도에까지 국부적으로 농축되어진 가능성이 있고 또, 굽는 조작에 의해 정류탑 내의 열平衡가 깨졌기 때문에 기폭했을 가능성이 높다라고 판단된다.

고농도 과메탄올 용액의 폭평성이 뇌관기폭시험에 의해 확인되었다.

이상의 검토의 결과 사고 원인은 「과메탄올 농축액상의 열폭발」이라고 판단되었다.

5. 결 론

본 연구는 일본 치바의 한 제조공정에서 일어난 폭발 사례에 대해서 사고 발생 경위와 추정 원인이 무엇인지 연구해 보았다. 그 결과 사고는 극히 0.1% 오더의 과산화물을 포함한 회수 메탄올의 정류공정에서 발생했으며, 이 과산화물은 사고 후 2개월이 지나 과메탄올인 것을 알았고 게다가 정류탑 내에서 통상 생각할 수 없는 농도에까지 농축되었음을 알게 되었다.

과메탄올의 정량방법, 위험성평가 데이터, 정류탑 굽는 조작에 있어서 국부적인 농축의 진행 등은 이번의 사고 원인 조사에서 처음으로 명확하게 되었고, 사고 시의 샘플을 다량으로 보존하고 있던 것이 그 이후의 폭발물질 특정과 폭평 실험에 큰 도움이 되었다.

유사의 사고 예는 존재하지 않고 이번과 같은 폭발사고가 발생하는 것을 예측하는 것은 어려운 것이다. 그러나, 현실적으로 폭발이 일어나고 생명을 잃어버리고 있다.

최근의 사고사례를 보면 자기 반응성 물질(유기과산화물)이나 미량물질이 프로세스 조건과의 관련해서 발생하는 경우도 증가하고 있다. 또 지금까지는 서구에서 위험성이 확인되어진 프로세스를 채용해 왔지만 이번은 일본이 개발 위험을 등에 지는 시대가 되고 있다. 이번의 사고를 중요한 사례로서 소개하고 보다 안전한 화학 공정개발에 주력해 가야 할 것으로 사료되어 진다.

6. 참 고 문 헌

- [1] 라이온(주) 사고원인 조사 위원회
- [2] 이치하라 소방국 사고원인 조사위원회
- [3] 혜은경, “NaCl 수용액 전기분해를 위한 귀금속 담지 전극 제조와 성능에 관한 연구”, 전남대학교 석사학위논문, 2002
- [4] 최규원, “분석화학”, 박영사, 1991
- [5] 정기호, “분석화학”, 자유 아카데미, 1997
- [6] http://www.nces.go.kr/R_Study/mpaqec/theory/volumetric/v-varietiy/i2.htm
- [7] <http://nengjung.kit.ac.kr/%7Ephome07/cyber/lfc/fd-chem03.htm>
- [8] <http://home.kmu.ac.kr/%7Eeclab1/lectures/13544n16.pdf>

저 자 소 개

원 유 존 : 현 한국컨테이너풀(주) 상무이사, 명지대학교 박사과정
관심분야- 신 물류시스템 개발, 물류시스템 신뢰성 분석, 공정 위험성 평가

강 경 식 : 현 명지대학교 산업공학과 교수, 경영학박사, 공학박사
대한 안전경영과학회 회장