



미국 화학물질 사고 조사국(CSB)  
(U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board)

# 열분해 사고 조사 보고서 (Thermal Decomposition Incident Investigation Report)

(사망 3명)



BP Amoco Polymers, Inc.

Augusta, Georgia

2001년 3월 13일

---

## 핵심 사안:

- 화학반응 위험요소 인식
  - 앗차사고(near-miss)의 교훈
  - 공정장치 개방
- 

Report No. 99-014-1-CA

작성일: 2001년 3월

본 조사 보고서는 2001년 3월 13일, 3명의 사망자가 발생했던, 미국 조지아 주 Augusta에 소재한 BP Amoco Polymers, Inc., 공장에서 발생한 열분해사고에 대한 조사 내용을 담고 있다. 본 보고서는 사고의 근본원인과 원인제공 요인들을 분석하여 앗차사고(near-miss)사고와 공정장치 개방에 대한 교훈을 토대로, 반응적 위험성에 대한 개선 권고사항을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

미국 화학물질 사고 조사국(CSB)은 화학물질로 인한 사고를 예방하고 그 영향을 최소화 함으로써 운전원과 공중의 안전을 도모하는 임무를 맡고 있는 독립적인 미연방 정부 기구이다. CSB는 과학적 조사 기관으로, 규정 시행기관이나 단속기관이 아니다. 1990년의 대기정화법 개정안에 의해 창설된 CSB는 안전관련 개선 권고사항 작성, 화학물질 안전관련 사항에 대한 연구조사, 그리고 화학 안전성과 연관된 기타 정부 기구들의 효율성 평가 등을 통하여 사고의 근본원인과 원인을 분석하는 임무를 맡고 있다. 화학물질로 인한 사고와 관련된 CSB의 최종결론, 조사결과, 또는 개선 권고사항 등은 어떠한 경우에도 조사 보고서에 언급된 사안에 대해 제기되는 손해배상 소송 또는 고소에서 증거 자료로 사용될 수 없다(42U.S.C. § 7412(r) (6) (G) 참조). CSB는 조사 보고서, 요약 보고서, 안전관련 회보, 안전성 권고사항, 기술관련 특별 간행물, 그리고 통계 연구 등을 통한 해당 조치 및 결정을 공표한다. CSB에 대한 보다 상세한 정보는 홈페이지 <http://www.chemsafety.gov>에서 제공된다.

**인명 안전은 최상의 법이다.**

---

### 간행물 관련정보 연락처:

U.S. Chemical Safety and Hazard  
Investigation Board  
Office of Prevention, Outreach, and Policy  
2175 K Street, NW, Suite 400  
Washington, DC 20037  
(202) 261-7600

### CSB 발행 간행물 구입처:

National Technical Information Service(NTIS)  
(국기술정보국)  
5285 Port Royal Road  
Springfield, VA 22161  
(800) 553-NTIS 또는  
(703) 487-4600  
Email: [info@ntis.fedworld.gov](mailto:info@ntis.fedworld.gov)  
해외주문 요청 시,  
<http://www.ntis.gov/support/cooperat.htm>.  
참조  
본 보고서와 관련하여,  
NTIS number PB2002-107365 참조.

## 개요

### 1.0 서론

- 1.1 사고 배경
- 1.2 사고조사 과정
- 1.3 BP Amoco Polymers Augusta 공장 시설
- 1.4 공정개발 연혁

### 2.0 공정 개요

- 2.1 화학반응
- 2.2 공정 구성도
- 2.3 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트

### 3.0 사고 개요

- 3.1 사고 직전 상황
  - 3.1.1 운전 개시
  - 3.1.2 가동 중지
  - 3.1.3 폴리머 캐치 탱크 커버 제거작업 준비
- 3.2 사고 발생
  - 3.2.1 탱크 커버 결함 및 가열된 합성수지 파열
  - 3.2.2 화재·폭발
  - 3.2.3 비상대응
- 3.3 실험 분석
  - 3.3.1 압출기 결함
  - 3.3.2 폴리머 캐치 탱크
  - 3.3.3 물리시험 및 화학반응
  - 3.3.4 용기 가압

### 4.0 사고분석

- 4.1 반응성 화학물질 위험관리
- 4.2 공정안전 정보
- 4.3 변경관리
- 4.4 공정위험분석
- 4.5 설계 결함
- 4.6 공정장치의 안전개방 운전절차
- 4.7 사고 및 앗차사고 조사
  - 4.7.1 폴리머 탱크 파열
  - 4.7.2 폐 폴리머 화재
  - 4.7.3 사고에 대한 부적절한 검토
- 4.8 유사사고에 대한 조사

### 5.0 관련규정 검토

- 5.1 공정안전관리
- 5.2 잠금장치/꼬리표

### 6.0 사고의 근본원인

---

- 
- 6.1 사고의 근본원인
  - 6.2 사고의 직접원인

## 7.0 개선 권고사항

### 별첨 A: 사고 현황

- A.1 사고 이후 현장
- A.2 압출기 결함
- A.3 폴리머 캐치 탱크
- A.4 물리실험 및 화학반응
- A.5 용기 가압

### 별첨 B: 사고 연혁표

### 별첨 C: 논리도

---

- 
1. 단순화된 Amodel 제조공정 흐름도
  2. KD-502 폴리머 캐치 탱크(단순도)
  3. DK-502 폴리머 캐치 탱크(커버 한 개가 제거된 현재 용기)
  4. 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트를 나타내는 단순화된 공정도.
  5. 파손된 보(girder)
  6. 폴리머 캐치 탱크 커버
  7. 폴리머 캐치 탱크 통기구 노즐의 폴리머 막힘
  - A-1. 폴리머 캐치 탱크 통기구 노즐의 폴리머
  - A-2. 폴리머 캐치 탱크 커버에서 떨어져나간 볼트
  - A-3. 내부 프레임이 드러난 반응기 녹아웃 포트
  - A-4. 폴리머층으로 막혀있는 배기배관
  - A-5. 작업 지역에 확산된 폴리머
  - A-6. 사고발생 이전, 3월 11일 폴리머 캐치 탱크에서 추출된 물질.
  - A-7. 정상 운전시 입자의 유동
  - A-8. 기준용량 이상으로 주입시 폴리머 캐치 탱크- 배기관으로 유입되는 입자의 유동.
  - A-9. 폴리머 캐치 탱크에서 방출된 물질 시료
  - A-10. 폴리머 캐치 탱크의 경계선 안쪽에 있는 경화된 폴리머층.
  - A-11. Amodel관련 ARC자료
-

2001년 3월 13일, 미국 조지아주 Augusta에 소재한 BP Amoco Polymers(현 Solvay Advanced Polymers, L.L.C. 1))공장에서 가열된 합성수지(hot plastic)이 저장된 용융조(process vessel)를 열었던 3명의 운전원들이 사망하는 사고가 발생했다. 그들은 용기가 가압되었다는 사실을 인지하지 못했다.

운전원들은 부분적으로 볼트로 체결되지 않은 커버로 인해 가열된 합성수지가 방출되면서 용기를 과열시킨 사고 현장에서 사망했다. 방출 압력으로 인해 주변에 있던 배관이 파손되었다. 배관에서 흘러나온 가열된 액체는 화재로 이어졌다. 본 사고의 심각성을 감안하여, 미국 화학물질 사고 조사국(CSB)은 본 사고의 근본원인을 조사하고 유사한 사고를 사전에 방지하기 위한 개선 권고사항을 작성하기 위하여 조사에 착수했다.

## ES.2 사고발생

BP Amoco Polymers Augusta 공장은 고성능 나일론 제품인 Amodel을 포함해, 합성수지 제품을 생산하는 공장이었다. Amodel은 여러 대의 직렬 반응기를 통해 디아민(de-amine)과 디카복실산(de-carboxylic acid)으로 변환되어 제조된다. 압출기<sup>2)</sup>에서 화학반응이 완성되고 나면, 냉각되어 고체 펠렛(solid pellet)으로 생성된다.

운전원들은 사고가 발생할 당시, 폴리머 캐치 탱크의 커버를 개방하려고 하고 있었다.

이 폴리머탱크는(KD-502)-는 가동 및 정지시에 화학 반응기로부터의 부분적인 화학반응을 거친 부산물인 Amodel이 저장되어 있었다.

사고 발생 12시간 전, 공정을 가동하기 위한 작업이 이루어졌다. 약 1시간 후, 반응기 후단의 압출기에서 발생한 문제점으로 인하여-부분적으로 화학 반응된 다량의 물질이 폴리머 캐치 탱크로 이송되기 이전이 아닌- 가동은 중단되었다.

1) 사고가 발생한 7개월 후, BP Amoco Polymers, Inc의 소유권은 2001년 11월 1일 Solvay Advanced Polymers, L.L.C.로 이전되었다.

2) 압출기는 장착된 배럴에 터닝 나사로 구성된 기계이다. 이는 합성수지를 가열, 혼합 및 주입하는데 사용된다.

사고 발생 12시간 전, 공정을 가동하기 위한 작업이 이루어졌다. 부분적으로 화학반응된 다량의 물질이 폴리머 캐치 탱크로 이송되기 이전은 아니지만, 약 1시간 후 반응기 후단의 압출기결함으로 인하여 반응이 중단되었다.

---

폴리머 캐치 탱크 내부의 가열된 용융(molten) 합성수지가 지속적인 화학 반응을 일으키고 서서히 분해되기 시작함으로써, 가스가 생성되었고 내용물 질이 기포를 일으키게 되었다. 화학물질은 계속적으로 기포를 형성하면서 팽창되었고, 결국 탱크 전체에 가득 차게 되었다. 화학물질은 이후 일반 및 비상용 통기구를 포함한 연결 배관으로 이송되었다.

배관으로 이송된 후 배관 내에서, 합성수지는 냉각되어 응고된다. 3인치에서 5인치 두께의 합성수지 경화층 역시 탱크의 내벽 전체에 형성된다. 그러나, 합성수지 덩어리의 핵심부는 가열되어 용융되었고, 이후 용기를 가압시킨 가스를 생성하면서 지속적으로 분해 된 것으로 추정된다.

폴리머 캐치 탱크를 열기 이전에, 운전 담당자는 용기가 가압되었는지 여부를 확인하기 위해 용기의 배기 배관에 있는 압력계와 송신기(transmitter)를 체크했어야 했다. 운전원들은 공정이 중지된 것을 알고 있었다. 그러나, 압력계는 합성수지가 배기배관으로 유입되어 응고되었기 때문에 압력 수치가 정확하지 않았다.

이전에 몇 번의 경우에서, 폴리머 캐치 탱크를 열었을 때, 탱크에는 압력이 없었다. 탱크 내부에는 다량의 합성수지가 있었으나, 대부분의 경우 합성수지는 뜨거운 상태였지만 항상 응고되어 있었다. 운전원들은 이번에도 이전의 경우와 같을 것이라고 생각하고 탱크 커버에서 44개 볼트를 제거하기 시작했다. 볼트의 절반이 제거되었을 때, 커버가 갑자기 파열되었다. 가열된 합성수지는 현장 지역에 방출되어, 70피트 거리를 모두 덮었다. 커버와 방출된 합성수지가 운전원들을 휩쓸어 사망에 이르게 되었다.

가스와 합성수지 방출로 인한 압력이 폴리머 캐치 탱크를 뒤쪽으로 밀어냈고 연결 배관을 구부러뜨렸다. 반응기 녹아웃 포트(knockout pot)에서 캐치 탱크에 이르는 인입배관 가열을 위한 열매유(hot oil) 공급관(섭씨[℃]370도)이 파손되어 액체가 흘러나오게 되었다. 가연성 스팀운(vapor cloud)이 형성되어 불과 몇 분 이내에 점화되었다. 화재 진압을 위한 소방작업은 몇 시간 동안 지속되었다.

---

## ES.3 주요 결과

1. 제조공장 현장의 운영 및 기술지원 담당직원은 Amodel이 장시간 동안 고온의 상태에 있는 경우, 분해되어 높은 압력을 생성할 수 있다는 사실을 인지하지 못했다.
  2. 회사의 연구개발(R&D)팀이 수행한 생산성능시험에서 합성수지는 공정 온도에서 열분해 될 수 있다는 사실이 입증되었다. 그러나, 제조공정은 예상외의 통제불능 상황 하에서 발생 할 수 있는 위험성을 식별하기 위한 특수설계 검토를 감안하지 않았으며, 합성수지의 화학적 분해과정으로 인해 노출되는 위험성 역시 인지하지 못했다.
  3. 가동중지 시간 동안, 평균량 이상의 가열된 합성수지가 폴리머 캐치 탱크로 유입되었다. 화학물질의 화학반응 및 분해 과정에서 가스가 생성되었으며, 그 결과 합성수지가 기포를 형성하여 팽창되었다. 팽창된 합성수지는 연결배관 부위로 밀려 들어와 응고되어 벤트배관 입구를 막아 놓
-

왔다.

4. 1993년부터 폴리머 캐치 탱크와 폐합성수지(waste plastic) 모두와 관련된 몇 건의 잇따른 사고가 발생했었다. 이러한 일련의 사고에 대한 철저한 조사가 시행되자, 다음과 같은 운전상 위험성에 대한 사안을 인지할 수 있게 되었다:

a. 공장가동 초기, 응고된 폐합성수지의 큰 덩어리가 파열되어, 먼 거리까지 파편이 튀었었다. 이러한 사고에 대한 조사는 덩어리에 함유된 가열되어 용융된 물질이 지속적인 화학반응을 하여 분해되면서 가스와 압력을 생성시킬 수 있다는 사실을 입증할 만큼 철저하게 조사되지 않았었다.

b. 폴리머 캐치 탱크가 개방된 이후, 내부에 있던 폐합성수지에 불이 붙었었던 사례가 한건 있었다. 이는 한 쌍을 이룬 다른 용기를 개방하였을 때에도 역시 발생했었다. 이외에도, 이 같은 용기에서 제거된 폐합성수지가 폐기물 수납기(dumpster)에 저장된 이후 순간 불이 붙었었던 적이 2건이나 있었다. 사고조사는 이러한 화재가 합성수지의 열분해 과정에서 휘발성 및 가연성 물질을 형성하는 것과 관련되어 있다는 점을 입증하지 못했다.

제조공장 현장의 운영 및 기술지원 담당직원은 [합성수지]가 장시간 동안 고온의 상태에 있는 경우, 분해되어 높은 압력을 생성할 수 있다는 사실을 인지하지 못했다.

합성수지의 팽창력은 배기배관의 입구를 응고시켜 막힌 연결배관 내부로 스며들었다. 이러한 상태가 발생하자, 가스는 외부로 방출될 수 없었고 용기는 가압되었다

c. 폴리머 캐치 탱크는 이전에도 용량이상으로 꽉 차있었던 적이 있었는데, 이로 인해 연결배관과 안전밸브의 막힘이 야기되었다. 이러한 사고의 재발을 방지하기 위한 적 합한 조치는 취해지지 않았다.

d. 조사 기간 동안, 안전밸브가 고형 합성수지로 오염되어 작동할 수 없다는 것이 발견되었다. 이러한 오염(fouling)으로 인해 발생 가능한 결과는 분석되지 않았으며, 재발을 방지하기 위한 적합한 조치는 취해지지 않았다.

5. 탱크 가동 경험으로 미루어볼 때, 폴리머 캐치 탱크의 설계는 운전원들이 용기를 개방하기 이전에 위험 요소를 체크하기 위한 효과적이고 신

폴리머 캐치 탱크의 설계는 운전원들이 용기를 개방하기 이전에 위험 요소를 체크하기 위한 효과적이고 신뢰할 만한 방법을 제공하지 못하고 있었다.

회할 만한 방법을 제공하지 못하고 있었다. 드레인장치는 응고된 합성수지로 막혀 있어, 안전보건관리청(OSHA)의 잠금장치/꼬리표 규정과 회사의 공정장치 개방을 위한 안전절차 규정 등에 따라 압력 또는 유해한 화학물질의 존재 여부를 검증할 수 없게 하였다. 그럼에도, 이러한 설계상 결함은 시정되지 않았으며, 용기 개방에 대한 표준 규정은 수립되지 않았다.

6. 공정안전 정보에는 폴리머 캐치 탱크의 설계기준과 작동원리에 대해 부적합하게 기술되어 있었다. 또한 과주입(overflowing)이 발생할 시 그에 따르는 문제점을 해결하기 위한 방법이 논의되지 않았다.

7. 과주입의 가능성은 초기 가동절차가 수정되었을 때 더 높아졌는데, 반응기에서 폴리머 캐치 탱크에 이르는 산출량 변경은 30분에서 50분으로 연장되었다<sup>3)</sup> 절차 수정은 변경관리(MOC)검토의 대상이 되지 않았다.

정상 작동 중 가동 또는 가동중지 시 압출기의 장애로 파생되는 문제점이 고려되지 않았다.

3)1999년 교육훈련 자료에는 압출기를 통한 생산 이전에 가동시간이 40분에서 45분으로 명시되어 있다. 그러나, CSB가 작업관리자들과 감독관들을 대상으로 조사한 결과, 사고 당시 공정유량을 압출기로 보내기 이전에 가동시간을 50분으로 일관되게 적용하였음이 밝혀졌다. 사고발생 몇 년 전에는 가동시간이 30분이었다.

8. 공정위험분석은 부적합했다. 예를 들어:

- 폴리머 캐치 탱크의 과주입 또는 가압에 대한 설득력 있는 시나리오가 작성되지 않았다.
- 정상 작동 중 가동 또는 가동중지 시 압출기의 결함으로 파생되는 문제점이 고려되지 않았다.
- 화학반응 및 분해에 따른 위험성은 부적합하게 취급되었거나 또는 아예 감안되지도 않았다.

9. 운전원들은 폴리머 캐치 탱크가 장애를 일으키는 경우 즉각적으로 취할 수 있는 조치를 수립해 놓고 있지 않았다.

10. 압출기 작동 결함은 가동 중단의 결과로 이어졌다. 사전가동(prestartup)체크리스트는 압출기의 작동성을 확인하도록 요구하고 있었지만, 체크하지 않았다.

---

## ES.4 사고의 근본원인

1. Amoco사의 Amodel 공정 개발자들은 화학적 반응의 위험성을 찾아내기 위한 개념적인 공정설계 검토를 하지 않았다.

Amoco사의 R&D부서나 공정설계 담당부서 중 어느 누구도 예상외의 또는 통제 불능한 화학적 반응으로 인한 위험요소를 식별하고 관리하기 위한 체계적인 특정 절차를 수립하지 않았다.

2. Augusta공장은 설계결함을 시정하기 위한 적합한 검토과정이 없었다.

Augusta 공장은 Amodel을 생산하는 최초의 그리고 유일한 제조시설이었다. 폴리머 캐치 탱크의 설계상 문제점들은 작동 과정에서 드러났다. 관리적인 측면으로 이러한 결함을 적시에 시정조치하도록 만들지 못하였다.

- 작업자들은 잠금장치/꼬리표 그리고 장치 개방 등에 대해 수립된 회사의 정책을 준수할 수 없었는데, 이는 폴리머 캐치 탱크의 배수라인이 막혀있어 탱크내의 압력유무를 점검할 수 없었기 때문이었다.
- 이전에 발생했던 과주입 및 연결배관으로의 합성수지 유입 등은 폴리머 캐치 탱크의 규모가 작아 공정 결함의 예측이 어려웠기 때문이다.
- 폴리머 캐치 탱크의 레벨표시 장치는 신뢰성이 없었다.

---

*Amoco사의 R&D부서나 공정설계 담당부서 중 어느 누구도 예상외의 또는 통제 불능한 화학적 반응으로 인한 위험성을 식별하고 관리하기 위한 체계적인 특정 절차를 수립하지 않았다.*

---

3. 사고 및 앗차사고 조사를 위한 Augusta 공장의 시스템은 원인 및 관련 위험성을 적합하게 규명하지 못했다. 이러한 정보는 사고 재발의 원인이 된 설계 및 작동상 결함들을 시정하기 위해 필요한 것이었다.

---

*운전원들은 잠금장치 / 꼬리표 그리고 장치 개방 등에 대해 수립된 회사의 규정을 준수할 수 없었는데, 이는 폴리머 캐치 탱크의 배수라인이 막혀 탱크내의 압력유무를 점검할 수 없었기 때문이었다*

---

- 폐합성수지의 발화나 또는 폐합성수지 덩어리가 파열된 현상을 규명하기 위한 실질적인 기술적 이론들이 개발되지 않았다.
- 사고 및 앗차사고는 주로 개별적으로 처리되었다. 경영진은 사고의 특성 및 유형을 식별하기 위한 검토 체계를 수립하지 않았다.
- 폴리머 캐치 탱크는 과주입 되어 있었고 배기배관은 막혀 있었다. 이에 대한 재발을 사전에 방지하기 위한 효과적인 조치가 취해지지 않았다.
- 압출기에서 여러 차례 화재가 발생했었다. 그러나 이에 대한 효과적인 대응조치는 이루어지지 않았다.

---

사고 및 앗차사고는 주로 개별적으로 처리되었다. 경영진은 사고의 특성 및 유형을 식별하기 위한 검토 체계를 수립하지 않았다.

---

---

## ES.5 사고의 원인제공

### 1. Amodel공정에 대한 위험평가는 부적합했으며 불충분했다.

---

의도되지 않은 반응성 화학물질의 위험성은 최종 설계단계의 위험성 평가에서 검토되지 않았다.

---

- 의도되지 않은 반응성 화학물질의 위험성은 최종 설계단계의 위험성 평가에서 검토되지 않았다.
- 압출기 작동과 이로 인해 나머지 공정 전체에 미치는 영향은 설계 및 시공 기간 동안 수행된 위험성 평가에서 적합하게 검토되지 않았다.
- 폴리머 캐치 탱크가 과주입 되는 경우의 설득력 있는 시나리오가 검토되지 않았다.

### 2. 설계 자료에는 Amodel 공정이 적합하게 기술되어 있지 않았다.

- 공정 설명서에는 폴리머 캐치 탱크의 설계 기준 및 작동원리가 적합하게 기술되어 있지 않았다. 따라서, 상기 사항에 대한 이해부족의

---

원인이 되었다. 최대저장액위는 명확히 명시되어 있지 않았다. 과주입 시 경고 표시 등은 준비되어 있지 않았다.

- 운영 관리상 절차 및 운영상의 변경 사항 개정하지 않았다.

### 3. 장치의 개방절차에는 안전상 주의사항을 따를 수 없는 경우 취해야 하는 행동에 관해 명시되어 있지 않았다.

사고 발생일과 Amodel 공정에서 수 차례 발생했던 이전의 사고에서, 회사의 해당 절차 및 OSHA의 잠금장치/꼬리표 규정에 명시된 바에 따라 폴리머 캐치 탱크내의 압력 여부를 확인하는 것이 불가능했었다.

사고 발생일과 Amodel 공정에서 수 차례 발생했던 이전의 사고에서, 회사의 해당 절차 및 OSHA의 잠금장치/꼬리표 규정에 명시된 바에 따라 폴리머 캐치 탱크내의 압력 여부를 확인하는 것이 불가능했었다. 압력유무를 점검하는 노즐이 폴리머로 막혀 있었다. 그러한 상황 하에서 검토 및 승인을 요하는 절차의 부재로, 운전원들은 용기가 가압되었음을 확인하는 절차를 거치지 않고 용기를 개방했다.

### 4. 운전절차 변경은 위험성 평가를 위한 변경관리 대상에 포함되지 않았다.

---

---

유량(flow)은 처음에 폴리머 캐치 탱크에서 가동 중 30분으로 설정되어 있었다. 이러한 설정 시간은 부작용 발생의 가능성을 고려하지 않은 채, 이후 50분으로 변경되었고, 이로 인해 용기에 유입되는 물질의 양이 증가되었다.

사고 발생일과 Amodel공정에서 수 차례 발생했던 이전의 사고에서, 회사의 해당 절차 및 OSHA의 잠금장치/꼬리표 규정에 명시된 바에 따라 폴리머 캐치 탱크 내의 압력 여부를 확인하는 것이 불가능했었다.

---

---

## ES.6 개선 권고사항

---

### Solvay Advanced Polymers, L.L.C.사

BP Amoco Performance Polymers에서 요구하는 제조규정을 검토하여, 의도하지 않은 화학적 반응으로 인한 위험요소를 식별하고 관리하기 위한 체계적인 안전검토 절차를 수립하여 적용하도록 한다. 또한, 다음 사항에 해당하는 화학반응의 위험요소를 식별하고 평가한다:

---

- 
- R&D 단계, 새로운 공정의 개념적 설계 단계, 그리고 새로운 공정의 상세한 설계 단계
  - 기존 장치 또는 공정에 변경사항을 적용하기 이전.

본 사안에 대한 검토 결과를 전 직원과 공유한다.

2. BP Amoco Performance Polymers의 규정에 따라, 작동상 경험을 토대로 하여 새로운 그리고 수정된 공정과 연관된 위험요소를 체계적으로 검토하기 위해 해당 계획이 설비에 적용되었는지 여부를 확인한다. 입증된 설계, 작동, 및 유지보수상의 모든 결함사항이 설비를 대상으로 시정되었는지 여부를 확인한다. 작동 노하우가 장치의 설계 기준에 부합하는지 여부를 검증한다.
3. 축적된 용융 폴리머 덩어리에 잠재된 위험요소에 대비하기 위한 Amodel의 물질 안전보건자료(MSDS)를 수정한다. MSDS에 대한 변경 내용을 현행 그리고 이전 고객사(본 제품의 재고를 보유하고 있는 업체)에게 전달한다.

---

#### Solvay Advanced Polymers, L.L.C., Augusta 공장

1. 사고 및 앗차사고에 대한 정기적인 관리검사를 수행하기 위한 계획을 수립한다. 사고들 간의 특성 및 유형을 구분한다. 문제의 근원을 파악하여 시정 조치한다.
  2. 다음의 사항을 포함하여 공정안전 정보를 수정한다:
    - Amodel의 화학적 분해 작용에 관한 정보
    - 설계 목적, 기준, 용량, 및 장비관련 규제사항
    - 설계 목적 및 작동상 규정을 변경하는 경우 따르는 위험요소 및 결과.
  3. 다음의 사항을 검토하기 위한 Amodel공정의 위험분석 재실시:
    - 공정 목적 및 결과에 타당성에 근거한 변경사항
    - 가동 및 가동중지 작동과 관련된 위험요소
  - 잠재적으로 유해한 폴리머 덩어리의 축적 방지
-

- 
4. 유지보수를 위해 장치를 개방하기 이전에 안전성을 고려하는 잠금장치/꼬리표 계획을 수정한다. 장치 개방 절차에 관한한, 장치가 감압 (depressurization), 압력유무를 검증할 수 없는 것과 같은 안전 개방 조건 하에서, 최소한 고위 경영진의 검토 및 승인을 요하는 작업중단 규정이 포함되도록 한다.
  5. 변경관리 정책이 작동상 및 절차상 수정사항에 적용되도록 한다.

---

#### BP Chemicals Group

본 보고서의 결과를 미국에 소재한 화학물질 및 합성수지 제조공장에 전달하여 정보를 공유한다.

---

#### American Chemistry Council Society of Plastics Engineers(미국 합성수지공학 화학회)

본 보고서의 결과를 회원에게 전달하여 정보를 공유한다.

---

## 1.1 사고 배경

2001년 3월 13일, 오전 2:40분 경, 미국 조지아주 Augusta에 소재한 BP Amoco Polymers공장의 폴리머 캐치 탱크(KD-502)에서 가압된 화학물질이 갑자기 과열되는 사고로 인해 3명의 작업자가 사망했다. 2명의 작업관리자들과 1명의 정비공은 응고된 합성수지를 추출하기 위해 폴리머 캐치 탱크의 커버를 제거했다. 44개의 볼트 중 반 정도가 제거될 때쯤, 용기 내부의 압력으로 인해 나머지 볼트가 튀어 나갔고 커버가 벗겨져 날아갔다. 작업자들은 커버와 방출된 합성수지로 인해 사망했다. 3명의 작업자들 모두는 BP Amoco의 직원이었다.

미국 화학물질 안전 및 유해성 평가 조사국(CSB)는 본 사고의 근원과 원인을 조사하고 유사한 사고를 사전에 방지하기 위한 권고안을 작성하기 위한 조사에 착수했다.

---

## 1.2 사고조사 과정

CSB는 현장에서 물적 증거를 조사하고, 증거물을 채취, 현직 및 전직 Amoco와 BP Amoco 직원들을 대상으로 탐문수사를 실시했으며, 회사의 내부 문서 및 기술자료 등을 조사했다. 또한, CSB는 합성수지 시험 연구소 2곳에서 관련 실험을 실시했다.

---

## 1.3 BP Amoco Polymers Augusta 공장 시설

BP Amoco공장은 미국 조지아주 Augusta지역의 100에이커 부지에 위치하고 있으며, 다양한 합성수지 제품을 생산하는 전문업체로, 약 250명의 정규직 직원을 고용하고 있다. Amodel-본 사고와 관계된 제품의 상표-은 자동차, 전자제품, 소모품, 그리고 의료장비 등에 사용되는 고성능 나일론 열가소성 합성수지(thermoplastic) 1)이다.

제조공장은 1984년 Dartco Manufacturing에 의해 최초로 건설되었다. Amoco는 이 공장을 1988년 매입하여 1992년 최초의 Amodel공정설비를 구축했다. 1998년, Amoco사와 British Petroleum은 BP Amoco로 합병되었다. 2001년 11월, BP Amoco와 Belgium에 본사를 둔 Solvay SA는 자산교환(asset exchange)작업을 완결한 후, Augusta공장과 관련 산업이 Solvay Advanced Polymers, L.L.C. 로 이전되었다.

1) 나일론은 반복적인 아마이드기(amide groups) 화학작용을 거친 합성수지 형태의 부산물이다. 열가소성 합성수지는 가열되었을 때 용융되는 합성수지다.

---

## 1.4 공정개발 연혁

Amoco사는 1980년대 초 Amodel을 생산하기 위한 공정개발에 착수했다. 미국 일리노이즈주의 Naperville 지역에 건설된 시험설비(pilot plant)<sup>2)</sup>는 나일론 합성수지를 제조하기 위한 첫 번째 시도였다.

---

---

1987년, 반작업(semiwork)<sup>3)</sup> 생산설비(일명 “ 실험 공정” )가 남부 케롤라이나의 Greenville지역에 건설되었다. 1990년, 첨단 폴리머 및 섬유 연구개발(R&D)팀과 시범 공장이 Naperville에서 조지아주의 Alpharetta로 이전되었다. 반작업 공정은 이후 Augusta 공장에 세워졌다. 1992년 공장가동을 시작하여, 1년 후에는 회사의 최초 그리고 유일한 생산 공정으로 자리잡았다.

Amoco는 Amodel 제조공정에 관한 몇 개의 특허를 보유하고 있었다.

2)시험시설은 새로운 공정기술을 평가하기 위해 사용되는 축소형 제조시설이다.

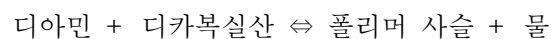
3)반작업 제품시설은 시험시설보다는 규모가 크지만, 일반 생산 공정에 비해서는 규모가 작다. 반작업시설의 목적은 상업적 용도를 위한 제품 샘플을 생산하는 것이다.

---

### 2.1 화학반응

Amodel은 지방족 디아민 그리고 방향족 및 지방족 디카복실산의 화학적 반응으로 생성된 폴리머<sup>4)</sup>이다. 이는 이소프탈산(isophthalic acids))과 테레프탈산(terephthalic acids)에서 추출되었기 때문에 폴리프탈아마이드(polyphthalamide)합성수지로 불려진다.

촉매를 첨가하여 용해 및 가열된 경우, 원료가 반응하여 분자사슬을 형성하기 위해 화합된다. 각각의 첨가된 사슬과 함께, 물분자는 부산물로 형성된다. 정반응과 역반응간에는 다음과 같은 화학적 평형이 존재한다.



중합반응은 액체용액에서 발생하며 약간의 발열(exothermic)<sup>5)</sup> 특성을 갖는다. 생성된 물은 최종적으로 스팀으로 전환되는데, 이는 화학반응이 고온에서 이루어졌기 때문이다. 스팀화된 물은 화학반응으로 방출된 에너지를 흡수한다. 에너지가 스팀으로 형성되어야 하는 경우, 전체적인 화학반응은 약간의 흡열(endothermic)<sup>6)</sup> 특성을 감안하게 된다.

4)폴리머는 최소한 5개의 동일한 소분자(단량체: monomers)의 결합으로 형성된 천연 또는 합성 사슬형 분자이다. 폴리머는 보통 5개 이상의 단량체를 갖고 있으며, 일부의 경우에는 각 사슬에 수백 또는 수천 개의 단량체를 갖고 있다.

5)발열반응은 에너지 방출로 특징 지워진다.

6)흡열반응은 에너지 소비로 특징 지워진다.

### 2.2 공정 구성도

그림 1은 Amodel제조 공정을 단순화한 구성도이다.

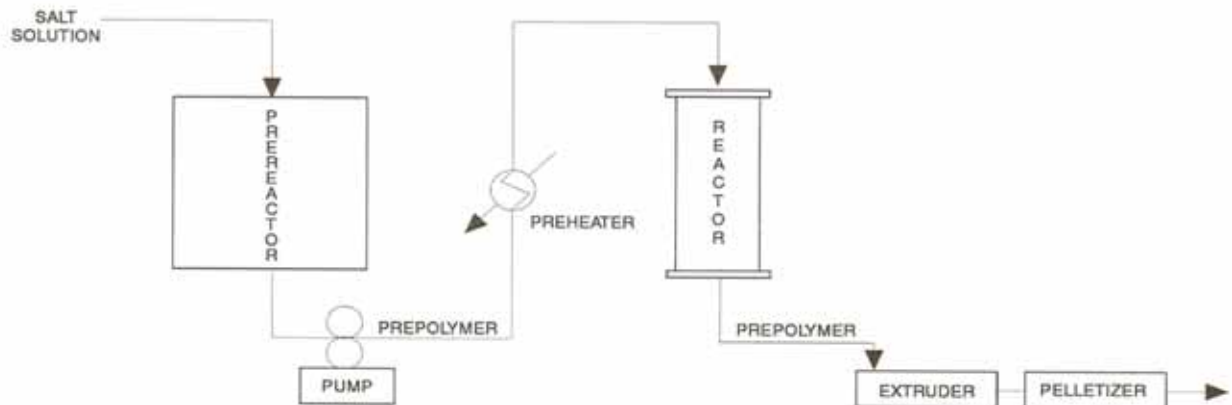


그림 1. 단순화된 Amodel 제조공정 흐름도

합성수지를 제조하기 위해 사용된 화학물질은 상온에서 응고되기 때문에, 공정의 첫 단계는 이를 용해하는 것이다. 그리고 원료인 소금용액은 가압된 전처리 반응이  $190^{\circ}\text{C} \sim 230^{\circ}\text{C}$ 로 승온한다. 화학반응은 프리폴리머(prepolymer)<sup>7)</sup>를 형성하기 위해 이 단계에서 부분적으로 진행된다.

고압의 펌프를 이용하여 프리폴리머를 예열기(preheater)로 보내어  $290^{\circ}\text{C} \sim 340^{\circ}\text{C}$  사이로 가열한다. 상승된 온도로 인하여 화학반응이 진행된다. 용액은 이후 압력을 낮추기 위해 오리피스를 통과하게 되는데, 여기서, 용액에 있는 수분 일부가 즉시 스팀으로 된다.

프리폴리머와 스팀은 관형 반응기(tubular reactor)에 주입되며, 이곳에서 온도가 더 올라간다. 공정 용액은 반응기에서 1분 이하로 체류한다. 용액이 빠져나갈 때, 전체적인 화학반응의 80% 이상이 완결된다.

압출기<sup>8)</sup>에서 반응이 종료되어 원하는 분자무게의 폴리머가 생성된다. 압출기에서 생성된 산출물은 이후 작은 결정체로 만들어져(pelletized), 냉각되어 저장된다.

7)프리폴리머는 최종 산출물(finished product)보다 가벼운 분자를 갖는다.

8)압출기는 장착된 배럴에 터어닝 나사로 구성된 기계이다. 이는 합성수지를 가열, 혼합 및 주입하는데 사용된다.

---

## 2.3 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트

통상적인 공정가동시, 반응기에서 생성된 프리폴리머는 압출기에 주입된다. 가동 및 정지 기간 동안 그리고 압출기에 기계적 문제점이 발생한 경우, 반응기의 유출물은 폐기물수거 용기(waste collection vessel), 즉 폴리머 캐치 탱크(그림 2 및 3 참조)로 이송된다. 캐치 탱크는 750 갤런 용량의 수평식 원통형의 강철로 만들어진 용기로 납작한 커버의 양쪽 끝이 볼트로 조여져 있다. 탱크는 가동전에, 폴리머를 덩어리로 만드는 이동식 금속 프레임을 제외하고 비워진 상태로 놓이게 된다.

---

**가동 및 정지 기간 동안 그리고 압출기에 기계적 문제점이 발생한 경우, 반응기의 유출물은 폐기물수거 용기, 즉 폴리머 캐치 탱크로 이송된다.**

---

폴리머 캐치 탱크는 스팀에서 프리폴리머를 분리하기 위한 체임버 역할을 한다. 반응기에서 빠르게 유출되는 반응물은 탱크지붕의 끝단에 위치한 4인치의 파이프 노즐을 통해 캐치 탱크 안으로 유입된다. 유체 속도는 저장탱크 안으로 들어감에 따라 낮아지는데, 그 결과 액체 방울이 떨어지면서 용기 안에 담기게 된다. 프리폴리머는 용기 안에 축적되고, 스팀은 원통형 동체의 상층부에 위치한 6인치의 통기구 노즐을 통해 배출된다.

이외 3개의 연결 배관은 폴리머 캐치 탱크의 상층부에 위치한다. 배관 중 하나는 안전밸브로 사용되며, 나머지 2개 배관은 용기를 정화하고 물로 씻어 내리는데 사용할 수 있는 질소와 물을 공급하게 된다.

8) 압출기는 장착된 배럴에 터어닝 나사로 구성된 기계이다. 이는 합성수지를 가열, 혼합 및 주입하는데 사용된다.

---

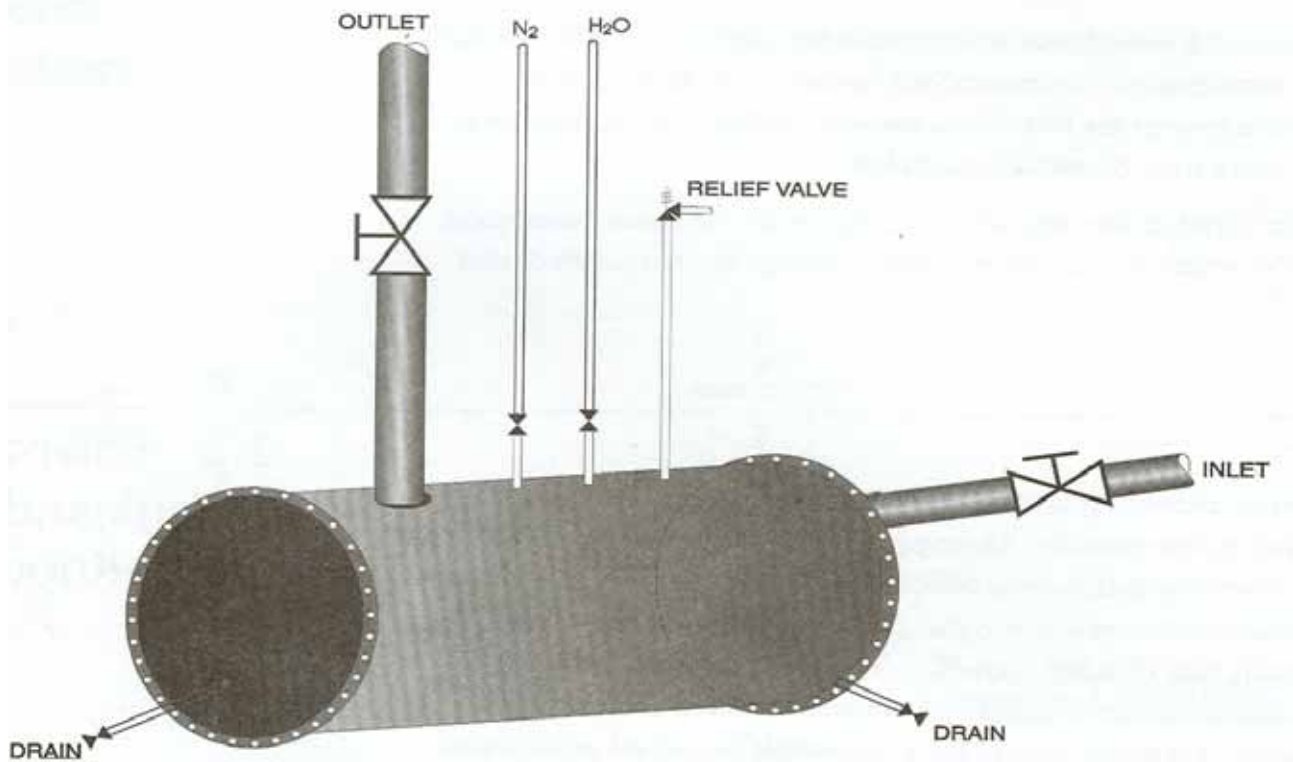


그림 2. KD-502 폴리머 캐치 탱크(단순도)

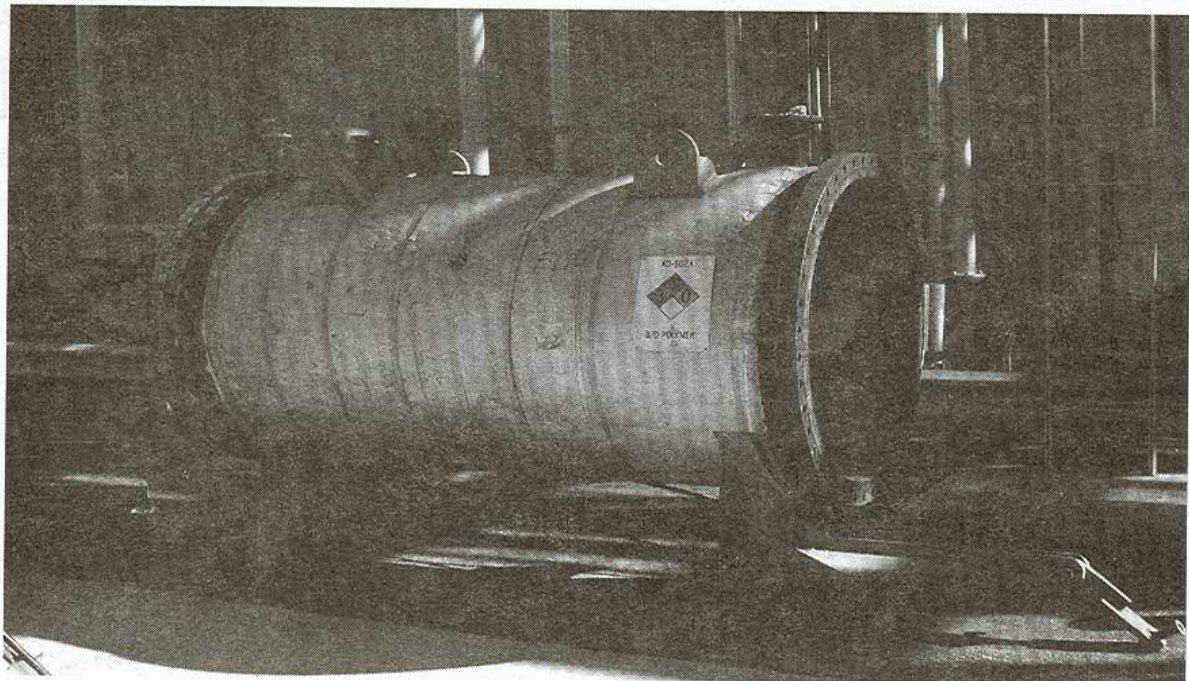


그림 3. DK-502 폴리머 캐치 탱크(커버 한 개가 제거된 현재 용기)

반응기에서 폴리머 캐치 탱크로 유입되는 화학물질은 가열되어 있는데, 이는 탱크에서 가열이나 냉각이 되지 않기 때문에, 화학물질의 총량과 대기 조건 등을 포함해 몇 가지 요인에 의해 냉각비율이 결정되기 때문이다.

일반적으로, 공정 가동 시, 반응기에서의 방출은 압출기로 전환되기 이전 50분9) 동안 폴리머 캐치 탱크로 흐르게 된다(그림 4참조). 가동 중 캐치 탱크 내부에 축적된 프리폴리머는 일반적으로 냉각되어 고형화된다

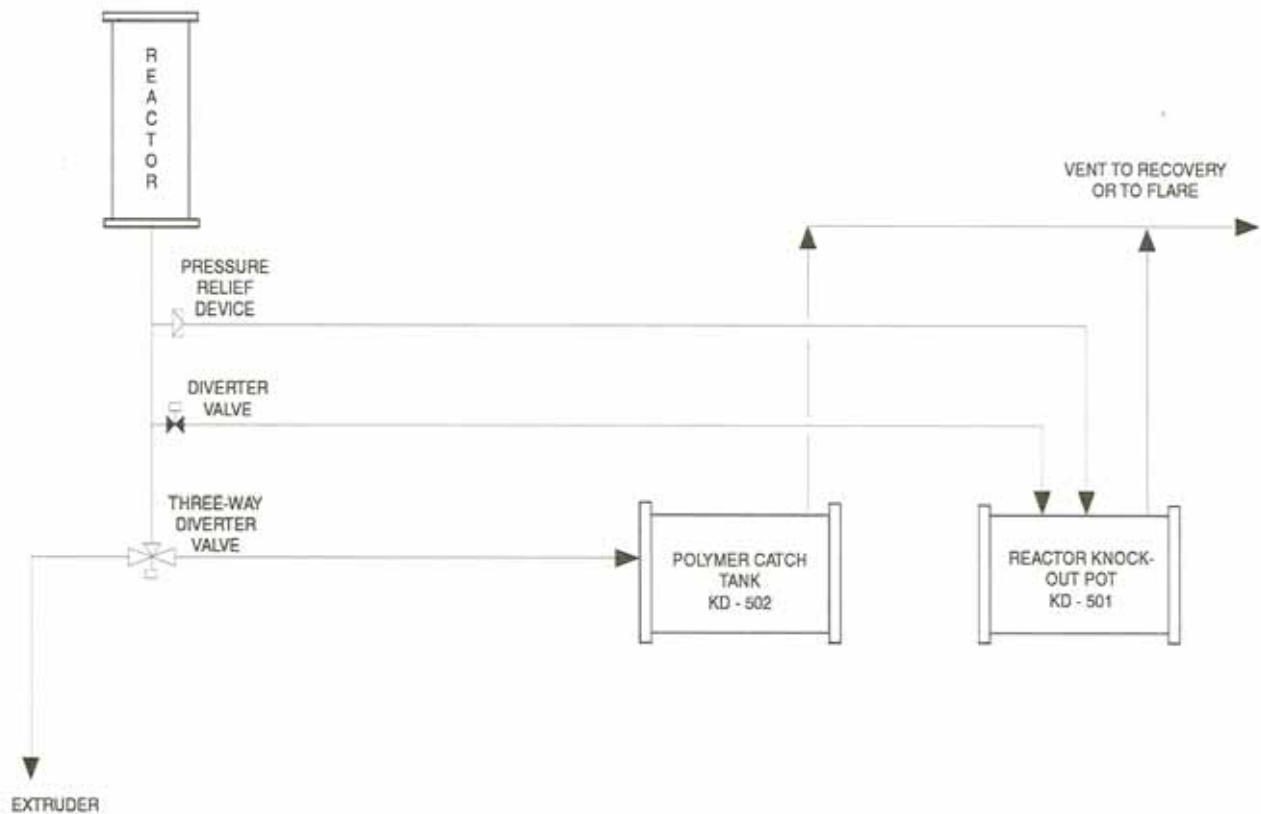


그림 4. 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트를 나타내는 단순화된 공정도.

9)1999년 교육훈련 자료에는 압출기를 통한 생산 이전에 가동시간이 40분에서 45분으로 명시되어 있다. 그러나, CSB가 작업관리자들과 감독관들을 대상으로 조사한 결과, 사고 당시 공정유량을 압출기로 보내기 이전에 가동시간을 50분으로 일관되게 적용하였음이 밝혀졌다.

---

제조공정이 가동 중지된 경우, 원료의 흐름은 중단된다. 용매(solvent)는 프리폴리머를 치환하고 용해시키는데 사용된다. 이 단계의 초기에서, 반응기 출구에서의 흐름은 계속하여 압출기로 흐르게 된다. 압출기에서 용매가 감지되고 나면, 반응기에서의 흐름은 폴리머 캐치 탱크로 흐르게 된다.

용매는 반응기, 배관, 그리고 연결된 시스템 내의 폴리머 잔류물을 용해한다. 폴리머 용액이 폴리머 캐치 탱크로 접근함에 따라 압력은 하강하고 용매는 거의 탱크에 완전히 닿을 정도로 기체화된다. 내부에서, 폴리머는 기체화된 용매에서 분리되어 이미 존재하는 가동물질의 전형적인 고형 잔류물의 상층부에서 액체로 가라앉는다. 용매 기체는 탱크 상층부의 배기배관을 통해 빠져나간다. 통상적인 가동정지 시 용기에 추가된 프리폴리머의 양은 가동 시 보내어진 양에 비해 상대적으로 적다.

물과 스팀으로 장치를 씻어 내리면 가동중지가 완성된다. 용매 세척 및 물 세척 모드는 폴리머 캐치 탱크내부의 폴리머에서 열을 제거하기도 하는데, 일반적으로 합성수지는 고체화 된다. 이후, 커버 중 한 개가 탱크에서 제거되고, 금속 프레임과 그 주변에 있는 축적된 고형 폐기물은 외부로 빠져나가 처리된다.

반응기 녹아웃 포트(KD-501)는 설계적 측면에서 폴리머 캐치 탱크와 매우 유사한 폐기물 용기다. 그림 4는 공정 순서와 연계성을 나타내고 있다. 반응기 출구에 있는 비상안전밸브는 녹아웃 포트에 연결된다. 탱크가 꽉 차 있는 경우 반응물은 녹아웃 포트에 흐르게 된다.

---

## 3.0 사고 개요

### 3.1 사고 직전 상황

Amodel공정은 사고가 발생하기 이전 주에 정상적으로 가동되었다. 그러나, 2001년 3월 10일 토요일, 해당 공정은 압출기에 있는 장치의 장애를 정비하기 위해 가동 중지되었었다. 재가동 일시는 3월 12일로 예정되었다.

가동 중지 이후 항상 그랬던 것처럼, 3월 11일 오전, 폴리머 캐치 탱크의 개방작업이 진행되었고 커버가 제거되었다. 내부 프레임이 추출되었고, 탱크에는 축적된 폴리머가 청결한 상태에 있었다. 유지보수 담당자는 용기가 청결한 상태로 최적의 조건에 있다고 보고했다. 이후 커버를 닫고 볼트로 조였다.

폴리머 캐치 탱크에 레벨 탐지기를 장착하도록 설계되었음에도, 이 장치는 응고된 폴리머를 세척하는 과정에서 종종 장애를 일으켰었다. 3월 11일 탱크가 닫혔을 때 용기에는 레벨 탐지기가 장착되어있지 않았다.

폴리머 캐치 탱크에 레벨 탐지기를 장착하도록 설계되었음에도, 이 장치는 응고된 폴리머를 세척하는 과정에서 종종 장애를 일으켰었다. 3월 11일 탱크가 닫혔을 때 용기에는 레벨 탐지기가 장착되어있지 않았다.

#### 3.1.1 운전 개시

운전원은 3월 12일 오전 6:45분에 가동전 점검을 시작했다. 작업관리팀장은 압출기의 나사를 세척하기 위해 이튿날 밤 동안 폐지되었었다는 내용을 보고 받았다. 관련자료에는 압출기가 3월 12일 오전 2:19분에 폐지되었다고 기재되어 있었다. 작업관리팀장은 압출기를 재폐지할 필요가 없다고 생각했고, 감독관 역시 이에 동의했다.

통상적 가동전 점검의 일환으로, 압출기는 정상 운전되기 이전에 작동 성능을 검증하기 위해 최소한 1분에서 2분 동안 사전 가동될 예정이었다. 이러한 작동 성능 검증은 체크리스트에서 수행되지 않은 것으로 입증되었고, 관리시스템 일지에는 3월 12일 새벽 폐지된 시간에서 운전 개시가 실패한 시간까지, 운전절차에 명시된 바에 따라 압출기가 사전 가동되지 않은 것으로 나타났다.

---

원료 주입은 3월 12일 오후 1:29분 반응공정에서 시작되었다. 온도와 압력은 정상 범위 내에 있었다. 운전절차에 명시된 바에 따라, 초기 생성된 폴리머는 폴리머 캐치 탱크로 유입되어 축적되기 시작했다. 운전절차에서 이러한 작동모드는 반응기에서 유입된 물질이 캐치 탱크에서 압출기로 전환되기 이전에 50분 동안 지속되어야 한다고 규정되어 있었다. 가동을 마치기 위해, 운전원들은 오후 2:17분에 압출기의 가동을 시도했으나, 나사가 돌아가지 않는다는 것을 발견했다.

*이후 25분 동안, 담당자는 문제점을 진단하고 해결하기 위한 몇 차례 시도를 했다. 이 시간 동안, 용융된 폴리머는 지속적으로 폴리머 캐치 탱크로 흘러 들어가고 있었다.*

공정 감독관들과 생산담당자는 가동 시도 시, 공정에 있었고, 즉시 압출기의 문제점에 대해 통보 받았다. 유지보수 작업이 요구되는 상황이었다. 이후 25분 동안, 담당자는 문제점을 진단하고 해결하기 위한 몇 차례 시도를 했다. 이 시간 동안, 용융된 폴리머는 지속적으로 폴리머 캐치 탱크로 흘러 들어가고 있었다.

---

### 3.1.2 가동 중지

3월 12일 오후 3:35분 경, 압출기 오작동은 여전히 해결되지 않았고, 감독관은 가동중지를 결정했다. 운전원들은 화학반응기로 유입되는 원료를 차단시켰다. 축적된 폴리머의 배관 및 장치 세척을 시작하기 위해 세척 용매가 주입된 것은 오후 2:14분 이었다. 압출기가 작동하지 않았기 때문에, 용융 폴리머는 지속적으로 폴리머 캐치 탱크로 흐르고 있었다.

세척 작업은 11시와 2시 방향 사이 위치에 폴리머 캐치 탱크의 볼트로 조여진 커버 상단에서 기체가 누출하는 것을 엔지니어가 발견한 오전 3:45분 경까지 정상적으로 진행되고 있었다. 공장 담당자는 기체 누출은 용매의 특성 때문이라고 말했다.

감독관은 누출을 확인하고, 폴리머 캐치 탱크와 인접한 반응기 녹아웃 포트에 공정흐름을 전환하기로 결정했다. 이러한 작업은 오후 3:55분 경에 완결되었다. 이 시점에서 3월 13일 오전 2:14분까지-사고가 발생했던 시간-캐치 탱크 안으로 주입된 추가 화학물질은 없었다.

---

---

공정흐름이 반응기 녹아웃 포트에 전환된 후 얼마 지나지 않아서, 커버에서 기체가 또다시 누출되기 시작했다. 3월 12일 오후 6:53분, 용매세척이 끝났고, 물이 순환되었다. 물은 스티프 형태로 녹아웃 포트를 통해 지나가고 있었다. 폴리머 캐치 탱크가 이전에 우회되었기 때문에, 내부에 있는 뜨거운 폴리머는 스티프 세척에 의한 냉각과정을 거치지 않았다. 운전원들은 이후 몇 시간 동안 온도와 압력을 모니터링 했다. 오후 11:21분, 물세척이 중지되었고, 가동정지가 완료되었다.

---

### 3.1.3 폴리머 캐치 탱크 커버 제거작업 준비

---

질소 라인 이외에, 폴리머 캐치 탱크에 연결된 라인에는 잠금장치 또는 꼬리표가 부착되어 있지 않았다.

---

가동이 중단된 동안 축적된 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트를 비우라는 내용의 작업 지시서가 야간근무자에게 전해졌다. 정비공은 작업을 하기 위해 3월 13일 오전 2:15분 현장에 도착했다.

운전원은 두 개의 용기에 질소를 주입하는 밸브를 닫았고 에너지 차단 꼬리표를 붙였다. 질소 라인 이외에, 폴리머 캐치 탱크에 연결된 배관에는 잠금장치 또는 꼬리표가 부착되어 있지 않았다. 탱크 내부의 압력 또는 액체 유무를 확인하기 위해 탱크에 있는 드레인 밸브를 이용하려는 시도가 있었는지는 알 수 없다.

운전원이 작성한 장치차단 리스트 10)는 운전원과 정비공에 의해 서명되었다. 2명의 운전원들은 탱크 개방과 세척을 지원하기 위해 정비공과 함께 있었다.

10)장치차단 리스트는 보수작업을 실시하기 이전에 de-energize 및 사용되는 장치와 기계, 장치 또는 시스템을 확인하기 위해 사용되고 서면 기록표이다. 장치에는 밸브, 제어기, 전기 스위치기어, 잠금장치 그리고 경고 꼬리표 등이 포함된다.

---

---

## 3.2 사고 발생

---

### 3.2.1 탱크 커버 결함 및 가열된 합성수지 파열

1과 1/8인치 크기의 44개 볼트 11)가 폴리머 캐치 탱크의 플랜지 뚜껑에 동그란 형태로 조여져 있었다. 3월 13일 오전 2:25분, 2명의 운전원들과 함께 정비공은 공압식 스패너를 사용해 볼트를 풀기 시작했다. 각 볼트가 제거됨에 따라 플랜지 뚜껑을 조이고 있는 힘이 느슨해 졌다. 오전 2:36분, 22개의 볼트가 제거된 후, 플랜지 뚜껑의 1:30분 방향과 7:30분 방향 사이의 위치에서 나머지 볼트가 갑자기 부러지며, 압력이

1,750파운드의 커버가 폴리머 캐치 탱크에서 떨어져 나가, .....가열된 합성수지 덩어리는 탱크 개구부 48인치 직경에서 방출되었다.

---

외부로 방출되었다.

1,750파운드의 플랜지 뚜껑이 폴리머 캐치 탱크에서 떨어져 나가, 북쪽 방향 위로 치솟았다. 플랜지 뚜껑은 천장의 빗물뚝개에 있는 거더(girder) 12를 들이받고는 원래 위치에서부터 약 14피트 거리에 떨어졌다(그림 5 및 6 참조) 가열된 합성수지 덩어리는 탱크 개구부 48인치 직경에서 방출되었다. 3명의 운전원들이 이 물질에 휩싸였고 이는 곧 사방으로 퍼져나갔다.

사고 목격자들은 Amodel 공정에서 이후 흰색 연기 또는 스팀이 형성되었지만, 1차 폭발 이후 화재 발생의 증거는 없었다고 진술했다. 정비공과 두 명의 운전원들은 중상을 입었다. 그들 중 2명은 현장에서 사망했고, 다른 한 명은 조지아 대학병원에 도착하자마자 사망했다.

- 11) 볼트는 11/8인치로, 한쪽 끝에 나사산 스톱드와 너트로 용접되어 있었다.  
12) 보(Girder)는 건물의 뼈대를 보강하는데 사용되는 수평식 구조물이다.



그림 5. 파손된 보(Girder)

---

### 3.2.2 화재·폭발

폴리머 캐치 탱크에 저장된 물질이 급속히 파열되면서 생성된 압력으로, 연결배관이 구부러지면서 탱크가 뒤쪽으로 밀려났다. 탱크의 인입배관에 있는 히팅재킷의 열매유 공급관이 파손되었고, 방출된 열매유는 증기운을 형성해, 오전 2:42분 불이 붙었다.

반응기 녹아웃 포트(knockout pot)에서 탱크에 이르는 인입배관 가열을 위한 열매유(hot oil) 공급관(섭씨[℃]370도)이 파손되어 액체가 흘러나오게 되었다. 가연성 증기운(vapor cloud)이 형성되어 불과 몇 분 이내에 점화되었다. 화재 진압을 위한 소방작업은 몇 시간 동안 지속되었다.

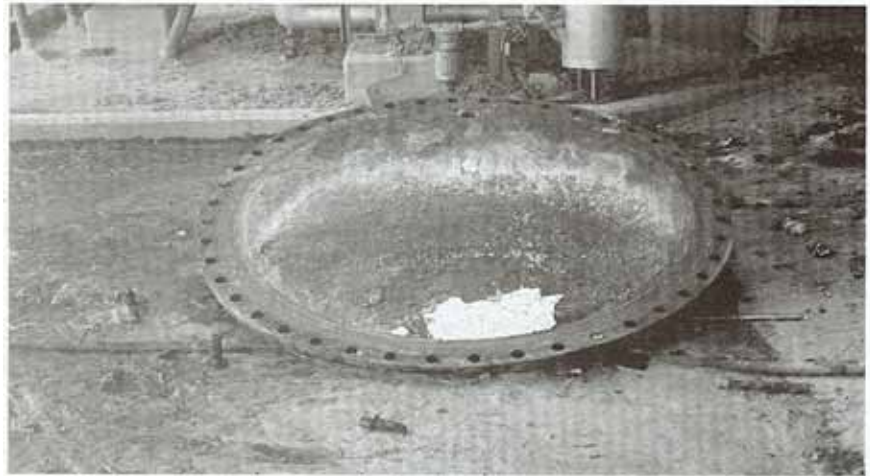


그림 6. 폴리머 캐치 탱크 커버

1차 폭발음을 들었던 사고 현장 목격자들은 2차 사고를 거대한 오렌지 불덩어리로 묘사했다. 첫 번째 섬광에 뒤이어, 방출된 열매유로 인해 불길은 지속적으로 타오르고 있었고, 폴리머 캐치 탱크뒤쪽 구역에서 몇 시간 동안 타 들어가고 있었다.

---

### 3.2.3 비상대응

첫 번째 폭발이 일어나자, 공장의 비상대응팀, 공장 화재진압반, 그리고 Richmond 주 소방당국은 화재진압을 위해 출동했다.

---

공장의 소화설비 시스템과 수동식 호스가 화재 진압을 위해 동원되었다. 사고 희생자들이 구조되었고, 그들 중 한 명에게 심폐소생술(CPR)이 시행되었다. 3월 13일 오전 8:15분, 비상대응팀이 열매유 시스템을 차단하자, 화재는 진화되었다.

## 3.3 실험 분석

### 3.3.1 압출기 결합

사고 이후 압출기 조사결과 상당량의 재(ash)가 압출기 내부에 축적된 것으로 밝혀졌다. 별첨A에 명시된 바와 같이, 재는 잔류물 정화 물질과 관련된 내부 불꽃의 결과인 것으로 추측되었다(3월 12일 새벽 몇 시간 동안 압출기 내부에서 작은 불꽃이 관찰되었었다). 압출기가 분말가루를 운반하도록 설계된 것이 아니기 때문에, 축적된 재는 그날 오후 기계 가동을 시도했었을 때 나사못 주변에 가라앉았을 것으로 추정된다.

여러 운전원의 진술에 따르면, 반응기의 가동과 함께 우연의 일치로 압출기가 장애를 일으킨 것은 처음 있는 일이라고 말했다. 그런, 기계 또는 해당 부품은 통상적 작동 중에 이따금 장애를 일으킨 것으로 알려졌다. 3월 10일, 생산 라인이 가동되는 동안 공장 가동이 중지된 원인은 압출기 부품의 결합때문이었다. 2001년 2월 초, 연속 이틀 동안 압출기 모터에서 발생한 기기 장애 역시 공정 가동 중단의 원인이었다.

BP Amoco사의 담당자는 원인이 무엇이건 간에, 생산라인 가동 중의 압출기 오작동 가능성에 대해 인지하고 있었다. 압출기의 기계적 문제점이 발견되자, 반응기의 반응물을 폴리머 캐치 탱크 또는 반응기 녹아웃 포트에 이송해야 했다. 이전에 발생했던 최소한 2건의 사례에서, 이러한 문제로 인해 2개의 용기 중 한군데가 과충전되었고 공동 벤트배관이 막히게 되었다.

압출기의 기계적 문제점이 발견되자, 반응기 반응물을 폴리머 캐치 탱크 또는 반응기 녹아웃 포트에 이송해야 했다. 이전에 발생했던 최소한 2건의 사례에서, 이러한 문제로 인해 2개의 용기 중 한군데가 과충전되었고 반응기의 가동과 함께 공동 벤트 배관이 막히게 되었다.

### 3.3.2 폴리머 캐치 탱크

사고조사에서, 폴리머 캐치 탱크에 저장된 대부분의 내용물질이 사고 발생 당시 방출되었음이 밝혀졌다. 그러나, 3인치에서 5인치 가량 두께의 폴리머 고형층은 용기 내부에 남아 뒤쪽 커버를 포함해, 내부 표면 전체를 덮고 있었다(커버 사진 참조).

폴리머 고형층은 용기 내부에 남아 뒤쪽 커버를 포함해, 내부 표면 전체를 덮고 있었다. 통기구 노즐을 포함해, 용기의 노즐들은 폴리머로 완전히 막혀 있었다.

통기구 노즐을 포함해, 용기의 노즐은 폴리머로 완전히 막혀있었다(그림 7 참조). 다량의 폴리머는 통기구 시스템에서 발견되었다. 별첨A에는 물적 증거에 대한 보다 상세한 내용이 제시되어 있다.

3월 12일 가동 중단으로 인해, 평균양의 2배 이상의 가열된 프리폴리머양이 탱크로 유입되고 있었다.



그림 7. 폴리머 캐치 탱크 통기구 노즐의 폴리머 막힘

정상 가동 기간 동안, 폴리머 캐치 탱크로 운반된 프리폴리머의 양은 용기의 절반 이하로 채워져 있었다. 3월 12일 가동 중단으로 인해, 평균양의 2배 이상의 가열된 프리폴리머가 탱크로 유입되고 있었는데, 13) 이는 이전의 경우에서 연속적으로 발생된 적이 없었다. 그 결과, 용기 내부의 열에너지량은 그 어느 때보다 더 많았던 것으로 추정된다.

폴리머 캐치 탱크의 벽체 가까이에 있는 합성수지가 냉각되어 고형화 되었지만, 그 중심부는 오랜 시간 동안 뜨거운 용융상태로 존재했을 것이다. 용기가 용량을 초과하여 채워져 있었기 때문에, 용융 프리폴리머에서 유입되는 증기를 분리하는 성능이 저감되었다.

Amodel의 특성은 효율적인 보온에 있다 14). 폴리머 캐치 탱크의 벽체 가까이에 있는 합성수지가 냉각되어 고형화 되었지만, 그 중심부는 오랜 시간 동안 뜨거운 용융상태로 남아있었을 것이다. 용기가 용량을 초과하여 채워져 있었기 때문에, 용융 프리폴리머에서 유입되는 스팀을 분리하는 성능이 저감되었다. 폴리머 방울이 스팀과 함께 벤트 시스템 15)으로 들어가 배관 내부에서 축적되어 경화되었다.

13)여기에는 가동 시 생성된 프리폴리머와 압출기 정비 기간 동안 생산된 프리폴리머, 그리고 가동 중단 결정에 이은 용매세척 기간 동안 공장의 반응공정에서 발생한 가열된 화학물질이 포함된다.

14) Amodel은 즉시 고체화되는데, 고형 폴리머는 열전달을 방해한다.

15)별첨A에는 폴리머 유입 원리에 관한 보다 상세한 내용이 포함되어 있다.

---

배관에서의 지속적인 폴리머 축적은 결국 통기구 시스템을 통한 스팀유입을 제한하게 된 부분적인 장애의 원인이 되었다. 이 같은 스팀유입 제한이 폴리머 캐치 탱크가 용매 세척 시 가압된 원인이 되었을 가능성이 있다. 탱크 내부에 축적된 압력은 플랜지 뚜껑과 용기 플랜지간 직경 4피트의 볼트 연결부의 밀봉 용량을 초과했는데, 이는 3월 12일 오후 3:45분 플랜지 뚜껑 상단에서 용매스팀이 누출된 이유를 설명해 주고 있다.

유량이 제한적이었던다고는 하나, 용매가 통기구 시스템과 폴리머 캐치 탱크를 통해 지속적으로 유입되었기 때문에, 당시 통기구 배관을 막고 있는 물질은 완전히 제거되지 않은 것으로 보인다. 그러나, 통기구 시스템의 막힘 상태는 심각했으며 용매 세척이 중단된 이후 몇 시간 동안 더욱 악화되었다.

3월 12일 오후 8:10분, 물세척 작업이 진행되는 동안 결국 반응기 녹아웃 포트에 있는 안전밸브가 작동되었다 16). 공동 통기구 배관의 침전물 누적이 최종적으로 녹아웃 포트의 배압(back pressure)이 안전밸브 설정 압력을 초과하는 원인을 제공하기에 충분하였을 것이다.

---

### 3.3.3 물리시험 및 화학작용

나일론 합성수지에 관한 관련문헌을 보면, 나일론 합성수지는 열분해 및 부가반응이 가능한 것으로 기술되어 있다. 위와 같은 메커니즘으로 모두는 이산화탄소, 암모니아, 및 수증기 등이 포함될 수 있는 가스를 생성한다. 다른 증거와 함께, 이러한 화학반응적 특성을 감안할 때, CSB는 폴리머 캐치 탱크 내부의 압력 발생원인이 의도되지 않은 화학적 반응으로 인한 가스 형성이라는 결론을 내렸다. 별첨A에는 CSB가 수행한 화학시험에 관한 보다 상세한 내용이 명시되어 있다.

---

이러한 화학반응적 특성을 감안할 때, CSB는 폴리머 캐치 탱크 내부의 압력 발생원인이 의도되지 않은 화학적 반응으로 인한 가스 형성이 라는 결론을 내렸다.

---

16)3월 12일 오후 6:53분에서 11:21분까지, 물은 공정내를 통해 순환하고 있었고 스팀은 폴리머 캐치 탱크를 통해 배출되었다.

---

---

가속열량계(ARC)를 이용한 시험을 통해서, 합성수지의 열분해 가능성에 대한 또 다른 신빙성 있는 증거를 확보하게 되었다.

---

상당한 농도의 일산화탄소, 이산화탄소, 암모니아, 그리고 수분이 발견되었는데, 이들 모두는 분해 또는 부가반응과 일치했다. 이러한 물질들은 적정온도에서 가스로 발화하며 밀폐된 용기 내부에서는 압력을 증가시킬 수 있다.

---

조사의 일환으로, CSB는 전형적인 압출 Amodel을 시험하기 위한 준비를 했다. 폴리머 캐치 탱크 내부 조건과 유사한 환경 하에서(예, 최대 12시간 동안 315℃) 하나의 샘플이 열무게법(thermogravimetry) 17)에 의해 시험되었다. 시험 결과 Amodel은 이러한 조건 하에서 상당량의 중량이 손실되는 것으로 밝혀졌다. CSB는 중량 손실이 합성수지의 열분해와 부가반응에 각각 부분적으로 기인한다는 결론을 내렸다. 가속열량계(ARC) 18)를 이용한 시험을 통해서, 합성수지의 열분해 가능성에 대한 또 다른 신빙성 있는 증거를 확보하게 되었다(별첨A).

실험 샘플들은 폴리머 캐치 탱크의 내부 벽체에서 발견된 경화 합성수지 층에서도 채취되었다. BP Amoco사가 수행한 시험에서 폴리머 사슬이 다수 형성된 것으로 나타났는데, 이는 열분해 이외에도 용기 내부에서 부가반응이 발생했다는 사실을 명확히 입증하고 있다.

Amoco사는 Amodel이 340℃로 가열되었을 때 생성된 기체 역시 분석했다. 상당한 농도의 일산화탄소, 이산화탄소, 암모니아, 그리고 수분이 발견되었는데, 이들 모두는 분해 또는 부가반응과 일치했다. 이러한 물질들은 적정온도에서 가스상태로 있으며 밀폐된 용기 내부에서는 압력을 증가시킬 수 있다.

---

### 3.3.4 용기 가압

---

3월 12일 오후 3:55분 이후에는 폴리머 캐치 탱크내부로 유입된 화학물질은 없었다. 이후 몇 시간 동안, 용기 중심부의 화학반응에서 대부분 스팀이 생성되었기 때문에 탱크 전체를 가득 채운 점성의 용융 물질을 형성하여 팽창시키는 원인이 되었다. 지속된 팽창은 탱크 노즐을 통해 화학물질을 밀어내고, 벤트배관과 비상안전밸브를 완전히 막으면서 유입된 것으로 보인다. 폴리머가 용기 표면의 양쪽과 위쪽에 닿으면서, 냉각되어 고체화 되었다. 19) 이는 또한 노즐과 연결 배관을 냉각시키고 응고시켰다. 이러한 상태가 발생하자, 방출된 스팀은 탈출로를 찾지 못해 캐치 탱크를 가압시키게 되었다.

---

3월 12일 오후 3:55분 이후에는 폴리머 캐치 탱크내부로 유입된 화학물질은 없었다. 이후 몇 시간 동안, 용기 중심부의 화학반응에서 대부분 스팀이 생성되었기 때문에 탱크 전체를 가득 채운 점성의 용융 물질을 형성하여 팽창시키는 원인이 되었다. 지속된 팽창은 탱크 노즐을 통해 화학물질을 밀어내고, 벤트배관과 비상안전밸브를 완전히 막으면서 유입된 것으로 보인다. 폴리머가 용기 표면의 양쪽과 위쪽에 닿으면서, 냉각되어 고체화 되었다. 19) 이는 또한 노즐과 연결 배관을 냉각시키고 응고시켰다. 이러한 상태가 발생하자, 방출된 스팀은 탈출로를 찾지 못해 캐치 탱크를 가압시키게 되었다.

17)열무게법은 가열상태에서 화학물질의 질량변화를 측정하는 방법이다. 질량 손실은 탈수, 분해, 탈착, 증기화 또는 가스형태의 부산물을 생성하는 화학반응 등에 기인한다.

18) ARC는 Arthur D. Little, Inc사의 상표이다.

19)폴리머 캐치 탱크가 보온되어 있었지만, 가열되지 않았었다. 열 손실은 폴리머 응고의 원인이 된다.

---

## 4.0 사고 분석

---

## 4.1 화학 반응 위험관리

BP Amoco사의 Augusta 공장의 운전 및 기술지원 담당자는 Amodel 공정에서의 분해 반응에 대한 잠재적인 위험성을 인지하지 못했다. 일단 화학물질이 폴리머 캐치 탱크로 이송되고 나면 추가 반응은 일어나지 않을 것이라고 확신하고 있었다.

그러나, 2001년 3월 13일 사고에서, 사고 조사관들은 어떠한 형태의 반응에 의하여 압력이 상승하였으며 사고가 발생하였는지에 관해서는 가시적으로 확인되지 않지만, 폴리머 캐치 탱크내부에서 화학적 반응이 발생한 것으로 추정하고 있다. 사고 이후 수행된 화학 실험에서 가교(crosslinking)반응과 분해 반응이 압력상승의 원인이 되었음이 입증되었다.

CSB조사관들은 1980년대 초 회사 설립 초기에서부터 Amodel 공정과 관련된 연구개발담당자들과 엔지니어들을 대상으로 탐문조사를 실시했다. 개발팀은 Amodel 공정의 정상적 또는 예기치 않은 반응으로 인한 위험성에 관한 연구를 시행하지 않았다. 20) Amoco사는 생산연구, 공정개발, 또는 제조공정의 공학적 설계 등을 검토하기 위한 규정이나 절차를 수립하지 않았다 21).

---

*BP Amoco사의 Augusta 공장의 운전 및 기술지원 담당자는 Amodel 공정에서의 분해 반응에 대한 잠재적인 위험성을 인지하지 못했다. 일단 화학물질이 폴리머 캐치 탱크로 이송되고 나면 추가 반응은 일어나지 않을 것이라고 확신하고 있었다.*

---

20) 이러한 연구에는 일반적으로, 문헌조사, 스크리닝 열량계, 그리고 필요한 경우, 에너지 또는 가스 부산물에 대한 잠재적 위험 방출을 조사하기 위한 의도된 그리고 예기치 않은 화학반응 모두에 대한 보다 정밀한 열량계측 등이 포함된다.

21) 화학반응 위험성 평가절차는 *공정설계에 대한 화학반응성 평가 및 적용에 관한 지침*(CCPS, 1995a), *반응성 물질의 안전저장 및 취급에 관한 지침*(CCPS, 1995b), *화학반응 위험성, 안전지침*(Barton and Rogers, 1997), 그리고 *안전한 화학반응공정의 설계 및 운영*(HSE, 2000)에 명시되어 있다. 비고: 상기 지침들이 Amodel 공정이 설계될 당시 출판되지 않았었지만, 이들 지침서는 1980년대 규정된 업체규정 내용의 일부분을 토대로 하여 작성된 것이다.

---

*사고 이후 수행된 화학 실험에서 가교(crosslinking)반응과 분해 반응이 압력상의 원인이 되었음이 입증되었다.*

---

---

Amodel 공정의 설계 시기는 영국화학공학협회(ICChemE)의 화학반응 위험성, 안전지침이 발간되기 이전이었다. 그러나, 상기 지침서에서는 다음과 같이 명시되어 있다:

다음과 같은 단계별 화학반응 위험성을 평가하기 위한 의무사항을 규정하고 절차를 수립하는 것은 필수적인 요소이다:

- 화학공정/운영 조건 정의;
- 잠재적인 화학반응 위험성 조사;
- 안전조치 선정 및 규정;
- 안전조치 수립 및 유지

(Barton and Rogers, 1997; p. 14)

별첨A에 명시된 바와 같이, 일반에게 공개된 관련문헌에는 나일론계 폴리머의 잠재적 분해반응 및 가교반응이 명시되어 있다. 그러한 문헌을 신중히 검토하여 위험성을 집중적으로 검토하였다면, BP Amoco사는 장시간 동안 용융온도 또는 그 온도에 가까운 조건 하에서 Amodel이 분해하여 다량의 가스 부산물을 생성한다는 사실을 발견할 수 있었을 것이다.

---

**장시간 동안 용융온도 또는 그 온도에 가까운 조건 하에서 Amodel이 분해하여 다량의 가스 부산물을 생성한다**

---

그리고, 이러한 정보가 공정개발팀에 전달되었었다면, 그들은 용융 폴리머의 대규모 축적을 최소화하거나 제거하기 위한 방법을 Amodel 공정에 적용하여 설계를 했을 것이고, 따라서 이러한 화학반응 사고를 사전에 방지할 수 있었을 것이다. 용융 폴리머 축적은 3월 13일 사고에서만 발생한 것이 아니라, 폐 폴리머의 연소 또는 폭발과 관련된 다른 사고의 경우에서도 발생했었다.

가속열량계(별첨A참조)는 Amodel이 서서히 흡열반응(enothermic manner)(예, 열 흡수)으로 진행되는 하지만, 349℃ 이하의 온도에서 분해하여 가스형태의 부산물을 형성한다는 것을 나타내고 있다. 반응성 물질의 안전저장 및 취급 지침에는 서서히 진행되는 가스형성 반응에 관한 위험성을 다음과 같이 명시하고 있다:

여러 건의 공정사고는 밀폐계에서 발생하였는데, 이는 발생된 가스로 압력이 상승하여용기의 파열을 가져오기 때문이다(CCPS, 1995b; p. 22)

---

**BP Amoco사의 대량생산규모에서, 가스형태의 부산물 생성은 서서히 흡열반응을 일으킨다 할지라도, 심각한 위험의 원인이 될 수 있는 3월 13일의 비극적인 사고를 초래할 수 있다는 것을 입증하고 있다.**

---

---

이러한 현상은 소량의 폴리머를 취급하는 경우, 심각한 위험을 초래하지 않는다. 그러나, BP Amoco사의 대량생산규모에서, 가스형태의 부산물 생성은

---

---

서서히 흡열반응을 일으킨다 할지라도, 그것은 심각한 위험의 원인이 될 수 있는 3월 13일의 비극적인 사고를 초래할 수 있다는 것을 입증하고 있다.

1990년과 1994년, Amoco사의 R&D팀은 생산기술 지원으로 Amodel의 열무게(thermogravimetric) 실험을 수행했다. 실험의 목적은 plate-out 22), 사출성형기에서의 현상 23) 등을 최소화하기 위한 방법을 조사하기 위한 것이었다. 1994년 시험에서는 8분 동안 335℃에서 가열하는 경우, Amodel 폴리머는 서서히 분해하여 24) 제품품질에 지장을 초래할 수 있는 휘발성 화합물을 생성하는 것으로 밝혀졌다.

공정안전 측면과 관련된 이러한 정보의 중요성은 인식되지 않았다. Amoco사는 생성물질은 온도 349℃에서 안정적이며 열분해를 방지하기 위해 이 보다 높은 온도를 피할 것을 권고하는 내용이 명시된 Amodel(다양한 단계)의 물질안전보건자료(MSDS)를 제외하고는, 생산관련 회보에 그 이외의 실험결과를 게재하지 않았다. 이 임계치는 제조공정에서 가장 높은 온도보다 약간 높은 온도이다.

1990년, 미국 일리노이즈주 Naperville에 소재한 Amoco사 연구센터의 엔지니어는 화학반응에 대한 정밀한 실험을 수행하기 위한 열물성치(thermophysical properties)연구실의 필요성에 대해 경영진을 설득했다. Amoco사는 화학반응 위험성 평가에 필요한 인원과 장비에 대한 지원 약속을 하였으나, 이에 대한 추가적인 지원계획과 조치는 수반되지 않았다.

결국 연구실은 Amoco사의 공정과 생산품에 대한 약간의 작업을 수행했다. 1995년 엔지니어가 퇴사하자, Amoco사는 실험 장비를 대학 연구소에 기증했다.

22)plate-out은 압출다이의 개방면(open face)에 축적된 불필요한 물질을 의미한다. 이러한 물질은 주조에 장애를 일으킬 수 있기 때문에, 다이를 청소할 수 있도록 생산공정은 반드시 정기적으로 가동 중단되어야 한다.(Grander and Giacomini, 1997)

23)사출성형기는 합성수지 원료를 완제품으로 사출성형하기 위해 사용된다.

24)분해율은 1분당 0.05%이하 또는 시간당 3%로 나타났다.

---

## 4.2 공정안전 정보

Augusta 공장 직원들은 다음과 같이, 문서화된 공정안전 정보가 없는 폴리머 캐치 탱크의 운전원리에 대한 중요성을 인지하지 못했다:

---

*Augusta 공장 직원들은 다음과 같이, 문서화된 공정안전 정보가 없는 폴리머 캐치 탱크의 운전원리에 대한 중요성을 인지하지 못했다*

---

- 설계정보에는 캐치 탱크가 분리기의 역할을 한다는 점에 관해 설명되어 있지 않았다. 최대운전레벨과 같이 분리기의 성능에 영향을 미치는 중요한 변수들이 명시되지 않았다.
- 설계문서에는 탱크가 세척 가동 중에 사용될 수 있다고 명시되어 있지만, 가동 및 공정 장애 시 요구되는 역할에 관해서는 명시되어 있지 않았다. 또한 용기는 특정 유량에서 약 한 시간 동안 가동될 수 있다고 명시되어 있지만, 각 가동 단계별 예상되는 수거 물질량에 대해서는 언급되어 있지 않았다. 공정이상 발생에 대비하여, 용기의 여분을 어느정도 확보해야 하는지에 관한 지침 또한 없었다.
- 탱크에서 폐 합성수지에 기포가 발생하는 경우, 기포의 발생 가능성

탱크의 최대로 운전가능한 레벨은 규정되지 않았으며, 비정상적인 조건하에서의 운전결과에 대해서도 규정된 바 없었다. 용기가 분리기의 역할도 담당하기 때문에, 특정레벨 이상으로 가동할 경우, 액체상태의 합성수지가 통기구 배관으로 유입된다.

이 언급된 정보가 없었다. 기포는 화학물질의 밀도를 변화시킨다.

사고 조사관들은 공장의 기술담당자 대부분이 가동 시도 및 중지 시, 용기가 과주입 된 것에 대해 의아해 하고 있음을 알게 되었다. 이와 관련하여 이들이 조사관들에게 해당 사안에 관해 설명했을 때, 기술담당자들은 그들이 산정한 불순물이 없는Amodel의 밀도에 대해 언급했다. 그들은 기포 형성이 합성수지의 밀도를 떨어뜨릴 수 있다는 사실을 인지하지 못했다(불변량에서, 밀도가 낮은 물질은 더욱 빠른 속도로 용기에 주입된다).

- 탱크의 최대로 운전가능한 레벨은 규정되지 않았으며, 비정상적인 조건하에서의 운전결과에 대해서도 규정된 바 없었다. 용기가 분리기의 역할도 담당하기 때문에, 특정레벨 이상으로 가동할 경우, 액체상태의 합성수지가 통기구 배관으로 유입된다.

사고 당일, 폴리머 캐치 탱크는 용량 이상으로 주입되어 있었다. 따라서, 액체 합성수지가 기체를 따라 통기구 라인으로 유입되면서, 용기는 분리기로써의 성능을 발휘하지 못했다. 용기의 중심부에 있는 가열된 용융 폴리머의 기포가 결국 통기구 및 비상 라인을 완전히 막아버린 원인이 되었지만, 주원인은 과주입이었다.

미국화학공학회(AIChE)의 후원 산하기관인 화학공정안전센터(CCPS)는 공정안전정보(CCPS의 일명 “공정지식 문서”)를 화학공정안전관리의 12개 항목 중 하나로 제시하고 있다. 이러한 항목에는 공정 및 장치설계 기준 등과 같은 정보가 포함된다

[공정안전정보]에는 기존 장치구조에 대한 설계 조건과 화학물질에 관한 내용이 기록되어있는데, 작동 및 유지보수가 본래의 목적에 부합하도록 지원하는 역할을 한다.

CCPS(1989년)는 공정안전 정보를 준수하고 사내에서 해당 정보를 공유해야 하는 몇 가지 이유에 대해 다음과 같이 언급하고 있다:

- 이는 공정이 가동되어야 하는 방식과 이유에 대한 이해를 돕기 위한 기준을 제시한다.
- 여기에는 기존 장치구조에 대한 설계 조건과 화학물질에 관한 내용이 기록되어있는데, 작동 및 유지보수가 본래의 목적에 부합하도록 지원하는 역할을 한다.
- 이는 주요 시설을 계획하는 단계에서 핵심 설계 결정사안을 위한 이론적 근거를 제시하고 있는데, 향후 계획 및 수정사항 등과 같은 다양한 사안에 유용하게 적용할 수 있다.
- 이는 공정변경 평가를 위한 “기초”를 제공한다.

---

폴리머 캐치 탱크에 관한 Amoco사의 공정안전정보에 제시된 제한된 정보는 본래의 설계 목적에 반하는 작동 결과에 관한 정보를 담당직원에게 제공하는데 부적합했다. 3월 13일 사고의 원인을 제공한, 용융 폴리머의 과도한 축적은, 공정안전정보가 보다 많은 정보를 제공했었다면 치명적인 사고로 발전하지 않았을 것이다.

폴리머 캐치 탱크에 관한 Amoco사의 공정안전정보에 제시된 제한된 정보는 본래의 설계 목적에 반하는 작동 결과에 관한 정보를 담당직원에게 제공하는데 부적합했다.

---

---

1990년대 중순, 가동 물질이 폴리머 캐치 탱크로 주입되는 시간은 30분에서 50분으로 연장되었다. 처음 20분 동안, 가동 물질은 주로 통기구 배관을 통해 스팀으로 배출되는 물로 구성되었다. 폴리머 축적율은 나머지 30분 동안 상당량 증가했다.

#### 4.3 변경관리

---

50분 간 가동 시간을 연장한 것은 가동 시 폴리머 캐치 탱크로 인입되고 폴리머양의 약 3배가 증가하게 된다.

---

---

50분 간 가동 시간을 연장한 것은 실제 가동 시 폴리머 캐치 탱크로 인입되는 폴리머양의 약 3배가 증가하게 된다. 따라서, 압출기에 문제가 발생하는 경우 용기의 저장용량이 저감되기 때문에, 과주입 가능성이 증가하게 된다.

Augusta 공장에는 “공정변경요청절차” (PCR)로 알려진, 공정변경에 대한 안전성 결과를 평가하는 관리시스템이 있었다. 그러나, 이는 설비 변경시에는 적용되었으나, 운전절차 및 운영에 관한 수정사항과 관련해서는 별다른 해당 사항이 없었다. *화학/공정 안전: 사고사례로부터의 교훈*에는 공정변경과 관련하여 다음과 같은 사항이 명시되어 있다:

변경을 수행하기 위하여는 이전에 공정, 화학물질, 기술, 장치 및 절차에 관한 모든 변경사항(‘교체’를 제외한)에 대한 공정안전 위험분석을 요한다. 위험분석은 변경내용의 기술 기준 그리고 안전 및 건강에 영향을 미치는 변경사항들이 반드시 포함되어야 한다(Sanders, 1999; p. 223)..

폴리머 캐치 탱크의 가동시간을 30분에서 50분으로 연장하는 절차상 변경에 대한 변경관리(MOC) 절차는 이행되지 않았다.

---

#### 4.4 공정위험분석

몇 년 동안 공장이 가동된 이후, 1990년과 1999년 설계 당시, Amoco 사는 화학공정위험성평가(HAZOP) <sup>26)</sup>기법을 사용하여 Amodel 공정의 공정위험분석 <sup>25)</sup>을 수행했다. 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트가 분석 대상에 포함되었으나, 과도한 압력이나 레벨의 위험성을 찾아낼 수 있는 신빙성 있는 안이 도출되지 않았었다

---

**폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트는 반응물을 제거할 수 있는 유일한 수단이었다. 그러나, HAZOP팀은 이러한 상황이 각각의 용기에 과도한 폴리머를 축적하고 레벨을 상승시키는 원인이 될 수 있음을 감안하지 않았다.**

25)공정위험성 평가(PHA)는 예상외의 결과를 야기시킬 수 있는 사안(계획안)에 대한 논리적인 경로를 밝혀내고; 이러한 계획안의 결과를 평가하고; 위험성을 감소 또는 제거하고, 발생 가능한 상황을 예방하거나, 또는 그 영향을 최소화하는 장치, 절차 및 관리 시스템에 대한 개선안을 제안함으로써, 잠재적인 위험성 발생 요인을 제어하기 위한 화학공정의 체계적인 평가방법이다.

26)HAZOP은 잠재적 위험성 또는 운전상 문제점에 관한 결과가 될 수 있는 통상적인, 의도된 운전의 변경사항을 식별하는데 사용된다.

---

---

1990년 HAZOP평가에서, 담당팀은 압출기 결함이 “주입 불가”상태를 야기시킬 수 있음을 밝혀냄에 따라, 폴리머 유입(flow)이 중단되어야 한다고 권고했었다. 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트는 반응물을 제거할 수 있는 유일한 수단이었다. 그러나, HAZOP팀은 이러한 상황이 각각의 용기에 과도한 폴리머를 축적하고 레벨을 상승시키는 원인이 될 수 있음을 감안하지 않았다.

1990년 HAZOP평가지 압출기에 대한 위험성 평가가 철저히 이루어지지 않았다. 담당팀은 불충분한 설계자료를 이용하여 위험성 평가를 수행해야 한다는 점을 인식하고 설계도면이 완성되고 나면 압출기에 대하여 다시 HAZOP 평가를 실시할 것을 권고했다. 그러나, 평가는 시행되지 않았다.

1993년 사고에서, 압출기가 오작동을 일으켰을 때, 폴리머 캐치 탱크는 과주입 되어 있었다. 폴리머는 배기 라인으로 유입되어 고형화되어 있었기 때문에 라인을 절단해야 했다. 그럼에도, 1999년 HAZOP평가에서는 용기 내부에서 레벨이 과도하게 상승될 수 있다는 사실을 여전히 밝혀내지 못했다.

과주입은 2001년 3월 12일 사고의 원인이 되었는데, 이는 폴리머 캐치 탱크에 국한된 합성수지 덩어리가 통기구와 안전밸브 배관의 막힘을 야기시킨 것에 부분적으로 책임이 있었기 때문이었다. HAZOP평가지 압출기 오작동에 기인한 용기의 과주입 및 압력상승과 관련된 위험요인을 도출하였다면, 위험성의 가능성 또는 심각성을 최소화하기 위한 별도의 예방조치가 제시되었을 것이다. 과주입이 효율적으로 관리되었었다면, 설령 분해작용의 위험에 관해 인지하지 못했다고 해도, 3월 13일의 사고로 이끌었던 일련의 사고를 줄일 수 있었을 것이다.

1990년 HAZOP평가가 시행되는 동안, 담당팀은 비상안전밸브 시스템 방출라인이 응고된 폴리머로 막히게 되는 경우, 반응기 녹아웃 포트 내에서 높은 압력이 발생할 수 있다는 사실을 알게 되었다. 따라서, 작동 시 배관을 깨끗한 상태로 유지하도록 시스템을 규정하는 개선 권고사항이 작성되었지만, 그러한 시스템은 수립되지 않았다.

1999년 HAZOP평가에서, 담당팀은 일반 통기구가 막히는 비상안전밸브 시스템이 이에 적합한 안전장치임을 확인했다. 팀은 3월 13일에 발생했던 것과 같이, 일반 및 비상 통기구가 동시에 폴리머로 막힐 수 있다는 사실을 인지하지 못했다.

---

..... HAZOP 문서에는 폴리머 캐치 탱크 또는 반응기 녹아웃 포트와 관련된 화학반응 사안이 포함되어 있지 않았다.

---

---

1990년 HAZOP팀은 압력이 누적된 경우, 폴리머 캐치 탱크커버를 개방하게 되면 해당 운전원이 부상을 입게 될 수도 있다는 사실을 깨달았다. 압력계(pressure gauge)는 이러한 문제점을 보완하기 위해 권고된 바에 따라 배기배관에 설치되었다. 그러나, 1990년과 1999년 의 HAZOP평가에서는 배관을 막은 폴리머가 압력계를 무용지물로 만들 수 있다는 가능성이 제기되지 않았었다.

가동 및 가동정지 작동과 관련된 잠재적인 위험요소는 HAZOP평가의 요구사항이 아니었기 때문에 검토되지 않았다.

평가문서에도 용기 내부 물질의 화학반응과 관련된 문제점이 언급되어 있지 않았다<sup>27)</sup>. 1999년 평가는 화학적 반응을 감안하여 수행되지 않았다. 1999년 평가에는 화학반응을 포함시키기 위한 목적으로 표제어가 “화학물질의 특성”으로 되어있었지만, HAZOP문서에는 폴리머 캐치 탱크또는 반응기 녹아웃 포트와 관련된 화학반응 사안이 포함되어 있지 않았다.

---

#### 4.5 설계 결함

Amodel 공정을 가동하기 이전에, Amoco사는 나일론 합성수지의 상업 생산에 관한 경험이 없었다. 공업용 제조설비의 설계는 시험설비(pilot plant)및 반작업(semiwork)가동에서 몇 년 동안 쌓아온 경험에 기초한 것이다. 폴리머 캐치 탱크의 문제점은 전체 설비를 작동함에 따라 가시화되었다.

---

*Amodel 공정을 가동하기 이전에, Amoco사는 나일론 합성수지의 상업생산에 관한 경험이 없었다.*

---

폴리머 캐치 탱크의 레벨 표시장치는 정확하지 않았으며 오작동하는 것이 다반사였다. 뿐만 아니라, 용기에서 폐 합성수지를 제거할 때 종종 고장이 나는가 하면, 재가동 이전에 원위치로 돌아오지 않았다. 몇 개의 대안이 검토되어 시험되었지만, 탱크 내부의 폴리머 레벨을 표시하는 신뢰할만한 방법이 도출되지 않았다.

---

*몇 개의 대안이 검토되어 시험되었지만, 탱크 내부의 폴리머 레벨을 표시하는 신뢰할만한 방법이 도출되지 않았다*

---

27)HAZOP평가가 위험성을 식별하기 위한 유용한 수단이기 는 하지만, 유해한 화학적 특성을 식별하기 위한 주요한 원리는 아니다. 이는 화학실험 대신 적용되는 것이 아니다. PHA는 반응성 화학물질의 위험성을 효율적으로 관리할 수 있는 유일한 부품이다.

---

폴리머 캐치 탱크 또는 반응기 녹아웃 포트 중 하나가 완전히 막 차있었던 경우가 몇 번 있었다. 이는 1993년 초에 발생했었는데, 그때마다, 폴리머는 통기구 시스템 내부로 유입되었다. 합성수지는 냉각상태에서 급속히 고체화하는 성향을 갖기 때문에, 과주입은 통기구 배관 및 비상안전밸브의 작동 장애를 일으킬 수 있다. 이러한 상태는 매우 위험한 것인데, 왜냐하면 상류(upstream) 공정이 용기의 최대허용압력보다 훨씬 높은 압력을 받고 있기 때문이다. 운전원은 1993년 탱크의 규모가 너무 작았다는 것을 알고 있었지만, 과주입으로 인한 결과는 인지하지 못했다.

---

**합성수지는 냉각상태에서 급속히 고체화하는 성향을 갖기 때문에, 과주입은 통기구 배관 및 비상안전밸브의 작동 장애를 일으킬 수 있다.**

---

폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트에 있는 스프링 작동 안전밸브는 과압력으로부터 용기를 보호하기 위해 장착된 것이었다. 그러나, 안전밸브 전단 배관은 파열판(rupture disk)<sup>28)</sup>에 의하여 보호받지 못하였다. 공정 유체가 고형화 되어 안전밸브 입구를 막는 곳에서는, 그러한 보호수단으로 파열판을 설치하는 것이 공학적 관례이다. 그러나 Upstream 공정의 다른 안전밸브를 보호하도록 설치되었다.

ICHEME 안전밸브 시스템 지침서에서는 파열판으로 안전밸브를 보호해야 하는 필요성에 대해 다음과 같이 언급하고 있다:

...그 목적은 부식, 오염 또는 악화된 조건에서 가압된 시스템으로부터 안전밸브를 보호하기 위한 것이다 (Parry, 1998; p. 30).

---

유지보수 기록에는 폴리머 캐치 탱크에 있는 안전밸브가 폴리머 오염으로 인하여 1993년 6월에 가공되어 수리되었음이 기재되어 있다. 밸브는 다시 작동되었지만, 불과 2개월 후에 또 다시 정비되어야 했다. 이와 유사한 장애가 1995년에도 발생했었다. 밸브는 Amodel 공정에 있는 다른 어떤 안전밸브보다 더 자주 정비되었었다. 반응기 녹아웃 포트의 안전밸브는 같은 기간 2회 정비되었었다.

이러한 문제점의 전례가 있었음에도 불구하고, 1995년부터 사고가 발생할 때까지 안전밸브에 대한 점검이 없었다. 안전밸브 시스템에서 발생한 문제점들은 폴리머 캐치 탱크의 설계적 결함에 따른 결과였다. 그러나, 부적합한 앓너밸브 성능이 3월 13일의 사고에 직접적인 원인을 제공했다는 결정적인 증거는 없다. 29)

28)파열판은 설정 압력에서 파열되도록 설계된 금속 또는 복합물질로 구성된 얇은 판이다.  
29)별첨A에 명시된 바와 같이, 장애가 발생할 당시, 폴리머 캐치 탱크내부의 압력이 상당히 불확실한 것으로 나타났는데, 용기의 최대허용압력을 초과했는지 여부에 관해서는 알 수 없다.

---

---

**탱크 내부에 있는 합성수지는 용기의 가압 및 개방 시 안전 상태 여부를 검증하기 위한 목적으로 설치된 램형 밸브 노즐에 이따금 장애를 일으켰다**

---

폴리머 캐치 탱크의 인입배관과 배기배관에 있는 이중차단 블리드 밸브(double block and bleed valves)<sup>30)</sup>들은 유지보수 작업 중 공정으로부터 용기를 안전하게 차단하기 위해 설치된 것이다. 각 용기의 커버 끝에는 드레인 또는 배기 용도의 램형(ram-type)밸브<sup>31)</sup>가 함께 설치되었다. 그러나, Augusta 공장이 가동되자마자, 이중차단밸브의 비효율성이 드러나기 시작했다. 응고된 합성수지는 내부장치를 마비시켰고, 밸브는 잠기지 않았다. 마찬가지로, 탱크 내부에 있는 합성수지는 용기의 가압 및 개방 시 안전 상태 여부를 검증하기 위한 목적으로 설치된 램형 밸브 노즐에 이따금 장애를 일으켰다. 사고 당일, 고흥 폴리머는 비정상적으로 작동한 드레인 밸브 노즐에 축적되어 있었다.

폐 합성수지는 폴리머 캐치 탱크내부에 단단히 점착되어 있었다. 케이블을 용기에 있는 금속 프레임에 연결하여 합성수지를 밀어내어 추출하기 위해 포크리프트를 사용하는 것이 일반적인 관행이었다. Augusta의 운전원은 이러한 수동식 제거작업을 수행하는 동안 유지보수 운전원들에게 발생할 수 있는 산업재해에 관한 우려를 표명했었다.

이러한 문제들로 인하여, 운전원은 폴리머 캐치 탱크 설계를 다각적으로 고려했다. 완전 재설계를 위한 공학적 요청서는 2000년 말이 되어서야 접수되었다.

상기 언급된 각각의 문제점에 대해 Augusta 공장 경영진은 폐처리 시스템의 위험성을 재고했고, 일부의 경우, 공학적 또는 절차상의 안전조치를 강화 할 뜻을 보였다. 총체적으로, 이러한 결함 사항들은 시스템 설계상의 하자를 의미하는 것으로, 결함을 효과적으로 시정하기 위해서는 근본적인 재평가 작업이 이루어져야 했다.

---

30)이중차단 블리드는 두 개의 밸브 사이에 드레인 밸브와 함께 직렬로 설치되어있는 배열을 말한다. 차단시에는, 두 개를 잠그고 드레인 밸브는 개방한다. 첫 번째 밸브에서 누출된 유체는 드레인 밸브를 통해 처리된다.

31)램형 밸브는 막힘을 방지하기 위해 설계되었다.

---

---

## 4.6 공정장치의 안전개방 운전절차

위험 에너지 관리 및 잠금장치/꼬리표 등에 대한 Augusta 공장의 규칙에는 공정장치 개방을 위한 개별적인 서면 절차를 시행하여야 한다고 규정되어 있었다. 그러나, 폴리머 캐치 탱크에 대한 서면 지침서가 있기는 했지만, 비효율적인 것으로 입증된 드레인 밸브의 사용에 관한 것이었기 때문에 적용될 수 없었다. 따라서, 지침서는 사용되지 않았고, 용기 개방 이전에 압력이 감압되었는지 여부를 확인하기 위해 운전원들이 사용할 수 있는 지침이 없었다.

한 정비공은 CSB조사관들에게 드레인 밸브 중 하나를 열고 폴리머 캐치 탱크 배기배관으로 공기가 유입되어 진공상태에 있는지 여부를 확인하는 것이 그의 업무였다고 말했다. 그는 확인 작업이 끝나면, 용기 내부를 부분적으로 정화하여, 감압으로 개방시 안전할 것이라고 추측했다고 말했다. 다른 직원들의 말에 따르면, 그들은 막힘으로 인하여 드레인 밸브를 사용하지 않았다고 한다.

조사관들은 이전에 완성된 장치 차단 리스트를 검토하여 드레인 밸브가 폴리머 캐치 탱크의 감압을 검증하기 위해 사용된 적이 거의 없다는 사실을 확인했다. 어떤 직원은 용기 내부의 압력을 체크하기 위해 배기배관에 있는 압력계에 의존할 수 밖에 없었다고 말했다.

위험 에너지 관리 및 잠금장치/꼬리표 등에 대한 Augusta 공장의 규칙에는 장치의 de-energization 효율성을 검증하기 위한 목적인 “시험 단계” (try step)<sup>32)</sup> 실시를 규정하고 있었다. 폴리머 캐치 탱크의 경우, 시험 단계를 수행하기 위한 논리적 방법은 가스, 액체 또는 압력 유무를 확인하기 위해 용기에 있는 드레인 밸브를 여는 것이었다.

사고당일 작성된 장치 차단 리스트에는 시험 단계 내용이 없기 때문에, 드레인 밸브가 사용되었는지 여부는 알 수 없다. 그러나, 사고 이후 드레인 밸브가 잠겨 있는 상태로 발견되었기 때문에, 드레인 밸브를 사용하지 않은 것으로 추정된다.

---

*용기 개방 이전에 감압되었는지 여부를 확인하기 위해 운전원들이 사용할 수 있는 규정이 없었다.*

---

---

*3월 13일, 운전원들은 공정이 가동 중단되었다는 사실로 미루어-그리고 아마도 막혀있는 배기배관의 압력계 수치를 토대로 하여-폴리머 캐치 탱크에 압력이 없다는 결론을 내렸다. 이 사안은 구체적으로 검증되지 않았다*

---

32)시험 단계는 장치가 de-energization되었는지 여부를 검증하기 위한 수단이다. 여기에는 확실히 가동이 안 되는지 여부를 확인하기 위해 기계-또는 공정장치-의 가동버튼을 누르거나 압력이 없음을 확인하기 위해 통기구나 배수관을 열어보는 것 등이 포함된다.

사고 조사관들은 3월 13일, 운전원들은 공정이 가동 중단되었다는 사실로 미루어-그리고 아마도 막힌 배기배관에 있는 압력계 수치를 토대로 하여-폴리머 캐치 탱크에 압력이 없다는 결론을 내린 것으로 추론하고 있다. 이 사안은 구체적으로 검증되지 않았다.

*Augusta 공장의 위험 에너지 정책관리 규칙에는 문제가 발생하는 경우 그리고 안전장치 개방 시 주의사항을 준수할 수 없는 경우 운전원들이 어느 시점에서 작업을 중단해야 하는지에 관해 제시되어 있지 않았다.*

석유화학업체 규정인, *설비 및 장치의 안전 차단*에는 압력계에 의존하는 검증작업에 대한 잠재적 위험성을 경고하고 있다:

압력계는 현재 압력 수치를 확인하기 위해서는 적합한 장치이지만 감압상태를 확인하는 장치는 아니다. 개방 이전에 압력 없음 상태를 최종 확인하기 위해서는 반드시 통기구 개방을 항상 확인해야 한다(HSE, 1997; p. 27).

Augusta 공장의 위험 에너지 관리규칙에는 문제가 발생하는 경우 그리고 안전장치 개방 시 주의사항을 준수할 수 없는 경우 운전원들이 어느 시점에서 작업을 중단해야 하는지에 관해 제시되어 있지 않았다. 이러한 상황 하에서, 작업 중지-대안적인 작업 절차에 대해 고위 경영진의 검토 및 승인을 요하는-규정은 안전을 확보할 수 있을 것이다.

예를 들어, 시험 단계 중 긍정적인 결과를 얻지 못하는 경우, 작업중지 규정이 적용될 수 있을 것이다. 그러한 정책이 시행되었었다면, 벨브의 막힘 문제가 최초로 가시화 되었던 몇 년 전 발생했던 사고 이전에 폴리머 캐치 탱크의 차단 및 de-energization 검증을 위한 절차가 경영진에 의해 검토되었을 것이다. 이러한 검토가 있었다면 장치의 재설계가 추진되었을 수도 있었을 것이다.

---

#### 4.7 사고발생 및 앗차사고(near-miss) 조사

Amodel 생산 공정은 1993년 말 초기 가동 시부터 폴리머 화학반응 사고가 있었다. 이러한 일련의 사고들은 공정 설계 시 식별되지 않았던 반응성 화학물질의 위험성을 인지하게 되는 계기가 되었다.

*가동 첫날 밤에 생산된 약 500개 정도의 pod는 다음날 아침 파열되기 시작했다.*

---

##### 4.7.1 폴리머 포드 파열

Amodel 생산공정의 초기 가동 시, 가동담당팀은 펠레타이징(palletizing)시스템이 작동 불능 상태에 있을 때 장시간 동안 화학반응 시스템과 압출기를 작동했다.

---

---

압출기에서 배출된 폴리머는 펠레타이저에서 전환되어 외발손수레(wheelbarrow)에 수동식으로 수거되었다. 이후 물 스프레이로 냉각되어 표면이 경화되었다. 그 결과물은 외발손수레와 모양이 비슷한 폴리머 “pod” 였는데, 이는 후속 처리를 위해 냉각되도록 처리되었다. 가동 첫날 밤에 생산된 약 500개 정도의 pod는 다음날 아침 파열되기 시작했다. 경화된 외부 동체의 큰 조각이 파열되어 30피트 이상 거리까지 날아갔다. 파편 1개의 무게는 약 9파운드에 달했다.

포드는 약 315℃의 초기 온도에서 용융된 물질에서 형성되었다. 고체 Amodel이 단열재 기능을 갖고 있기 때문에, 포드의 내부 중심부는 외부 동체가 냉각, 경화 및 두꺼워짐에 따라 열 손실을 효과적으로 방지할 수 있다. 사고 목격자들은 폭발된 포드 내부에 용융 중심부가 있다고 말했다.

사내조사에 의하면 불규칙한 냉각상태로 인해 경화된 외부 동체에 상당한 응력이 발생했고, 이로 인해 포드의 단편이 파손되어 터져나가게 되었기 때문에 포드가 폭발한 것이라는 결론을 내렸다. 이러한 문제점을 시정하기 위해, Amoco사는 부산물(waste)을 소량의 조각으로 나누어 배분하여 폴리머가 펠레타이징 다이를 통해 압출성형 될 수 없는 경우 신속하게 냉각할 수 있는 시스템을 설치했다.

소량의 포드가 생성되었으며, 이는 원거리로 옮겨져 냉각되었다. 이러한 작업은-이외 다른 작동상 변경과 함께-포드 파열의 재발을 현저히 감소시켰다.

별첨A에 명시된 바와 같이, 나일론 합성수지가 용융 상태에서 고온을 유지하게 되는 경우 화학반응 및 분해가 발생하게 된다. 이러한 상황 하에서는 수증기 및 가스가 생성되어 압력<sup>33)</sup>이 형성될 수 있다. 사고 목격자들은 파열된 포드의 용융 중심부가 분해 현상과 동일한 변색된 상태였다고 말했다. 포드 파열은 가스 형성 분해 작용에 기인한 내부 압력상승이 부분적 원인이 되었다.

33)315℃에서 스팀(폴리머의 부가반응으로 생성된)의 포화압력은 1평방인치당 (psig) 약 1,500파운드이다. 분해작용은 다른 가스를 형성할 수 있고, 높은 압력으로 증가할 수 있다.

---

*고체 Amodel이 단열재 기능을 갖고 있기 때문에, 포드의 내부 중심부는 외부 동체가 냉각, 경화 및 두꺼워짐에 따라 열 손실을 효과적으로 방지할 수 있다. 포드 파열은 가스 형성 분해작용에 기인한 내부 압력상승이 부분적 원인이 되었다*

---

---

#### 4.7.2 폐 폴리머 화재

3월 13일 사고가 발생하기 이전, 압출기와 주변기기에서 화재가 수 차례 발생했었다. CSB조사관들은 폴리머의 화학적 분해작용에 의한 화재 사고와 거의 유사하다. 1997년부터 발생한 21건의 앗차사고를 검토했는데, 이는 대부분의 화재사고는 소규모로 손상 정도가 경미하거나 손상되지 않은 사례들이었는데, 이들 사고는 장치 내부로 공기가 유입될 때 발생되었다. 그러나, 2000년 7월, 압출기 내부에서의 발생했던 화재는 압출기 배기 시스템인 닥트에 “적색 경보”가 켜지고 외부 보온재를 연소시킬 정도로 심각한 사고였다. 각각의 사고가 보고되어 문서화되었지만, 가연성 또는 인화성 물질의 원인/근본원인을 밝히기 위한 적합한 조사가 수행되지 않았다. 분해반응은 사고요인으로 인식되지 않았다.

---

**4건의 점화사고에 관한 어떠한 조사에서도 화재 원인이 합성수지가 분해되어 휘발성 및 가연성 물질이 형성되었다는 사실을 밝혀내지 못했다.**

2000년 8월, 압출기가 폴리에틸렌계 세척 물질로 정화되는 도중 화재가 발생했다. 사고조사 결과, 압출기 화재를 진화하기 위해 필요한 조치가 취해졌던 것으로 밝혀졌다. 다른 종류의 세척물질이 선정되었지만, 화재는 지속적으로 발생했다. 그러나, 이에 대한 후속조치는 취해지지 않았다.

---

2001년 3월 12일, 정화 물질과 관련된 유사한 화재로 인해 압출기 시스템이 오작동을 일으켜, 가동중단을 야기시켰다. 화재는 진화되었지만 사고보고서는 작성되지 않았다.

이외에도, 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트가 개방되었을 때, 화재가 2건 발생했었다. 또한, 용기에서 추출된 폐 합성수지가 폐기물 수납기(dumpster)에 옮겨진 이후에도 2건의 자연적인 화재가 있었다. 사고 조사는 폐기물 수납기 화재 원인이 외부물질의 자연발화에 기인한 것이라는 잘못된 결론을 내렸다. 상기 4건의 발화사고에 관한 어떠한 조사에서도 화재 원인이 합성수지가 분해되어 휘발성 및 가연성 물질이 형성되었다는 사실을 밝혀내지 못했다

---

---

---

---

#### 4.7.3 사고에 대한 부적절한 검토

이러한 일련의 사고들은 위험성이 명확히 도출되지 않았고 재발방지를 위한 대책이 수립되지 않은 것을 입증하는 것이었다. 앗차사고 보고체계 이외에도, Augusta 공장은 사고를 분석하여 문제점을 찾아내어 적절한 대책을 수립할 수 있는 체계를 갖추고 있지 않았다.

---

*앗차사고 보고체계 이외에도, Augusta 공장은 사고를 분석하여 문제점을 찾아내어 적절한 대책을 수립할 수 있는 체계를 갖추고 있지 않았다.*

---

Amodel의 거대한 덩어리에서의 잠재적인 반응성 화학물질의 위험성은 재발 사고의 유형을 파악하여 포드(pod) 파열과 폐 합성수지 화재 사고의 원인을 보다 철저히 규명했었다면 밝혀질 수 있었던 문제였다. 사고 조사를 철저히 수행했었다면, 다량 축적된 용융 폴리머에 치명적인 위험 요소가 잠재되어 있다는 사실을 인지했었을 것이다. 또한, Amodel 공정에서 축적된 용융 폴리머에 이와 유사한 위험요소가 잠재되어 있다는 사실 역시 발견할 수 있었을 것이다. 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트는 이러한 가능성에 대한 가장 유력한 증거였다.

---

#### 4.8 유사 사고에 대한 조사

CSB는 미국 워싱턴의 Anacortes에 소재한 Equilon Enterprises 정유공장의 지연코오킹 공정(delayed coking unit) 34에서 발생한 유사한 사고를 조사했다(CSB, 2001). 1998년 11월 25일, 코오크 드럼이 열렸을 때, 드럼의 밑바닥 헤드에서 가열된 석유액체와 스팀이 갑자기 방출되었다. 드럼 근처에서 작업을 하던 6명의 운전원은 화재로 인해 중상을 입었다.

화재 발생 이전, 전기공급차단과 스팀공급차단으로 공정에 문제가 발생하였는데, 이로 인해 Batch 공정에 필요한 냉각 사이클이 장애를 일으켰다. 배관의 타르유(tarry oil)가 증가하여 코오크 드럼의 내용물질을 냉각시키기 위한 스팀과 물의 주입을 방해했기 때문에, 부분적으로 채워진 드럼을 비워야 했었다

34)지연코오킹 공정에서는 타르 류의 증류를 경유 및 연료유와 같은 경유를 생산한다. 석유 코오크는 공정의 부산물이다. 석유 코오크는 대규모 드럼에 저장되어 Batch 공정에서 생산된다. 코오크 드럼에는 스팀과 물이 투입되어 냉각될 때, 석탄류의 물질(코오크)로 고체화되는 타르 덩어리가 저장되어있다. 드럼의 상단과 하단은 냉각 사이클이 완료되면 개방되며, 코오크의 고체 덩어리는 여러 조각으로 잘라져 용기에서 옮겨진다.

---

공정 감독관과 공정팀은 단전된 후 2일 동안 내용물질은 안전한 정도에서 냉각되었다고 판단했다. 실제로 내부 벽체에 인접한 물질만이 냉각된 경우 바닥 플랜지의 온도가 낮게 나타날 수 있는데 이로 인해 드럼 내부 물질이 완전히 냉각되었다고 생각할 수 있다.

---

두 회사의 사고에서, 용기 내부의 예기치 않은 화학 반응으로 가스와 압력이 발생되었다. 용기 표면 부근에 있는 물질층이 차단 효과 및 압력경계 역할을 했다.

---

현장에 있던 운전원들은 모르고 있었지만, 드럼 내부의 중심부(core)물질은 단열되어 있었다. 중심부 내에서, 잔류 열은 hot pocket을 생성하면서 석유를 지속적으로 반응하게 하여 분해시켰고, 탄화수소를 가압했다. 드럼이 개방되었을 때, 탄화수소가 쏟아져 나와 가연성 스팀운을 형성하여 점화되었다.

BP Amoco사와 Equilon사의 사고는 다음과 같은 사항과 관련된 유사한 사고다:

- 용기 중심부의 온도 및 압력표시가 잘못되었거나 상태를 제대로 파악하지 못했을 때 장치 개방
- 가스형태의 부산물을 생성하는 흡열분해 반응
- 비정상적인 가동 또는 가동중지 작동에 의한 위험성 발생
- 가열된, 가압된 장치의 수동식 개방.

---

흡열반응은 에너지를 흡수하지만, 이는 충분한 에너지를 공급하는 경우 화학반응이 진행된다. 만약 온도가 충분히 높은 경우에는, 물질 자체에 있는 에너지는 용기(reservoir)의 역할을 하게 된다.

---

두 회사의 사고에서, 용기 내부의 예기치 않은 화학반응으로 가스와 압력이 발생했다. 용기 표면 부근에 있는 물질층이 차단효과 및 압력경계 역할을 했다. 공정용 계기 및 개방지침 그 어느 것 하나도 내부물질의 위험상태를 적절히 나타내지 못했다. 발열반응의 위험성은 에너지의 급격한 방출인데 이런 위험성은 문헌에 명시되어 있다. 반면, 흡열반응의 위험성에 대한 자료는 상대적으로 적다. 흡열반응은 에너지를 흡수하지만, 이는 충분한 에너지를 공급하는 경우 화학반응이 진행된다. 만약 온도가 충분히 높은 경우에는, 물질 자체에 있는 에너지는 용기(reservoir)의 역할을 하게 된다.

상기 2건의 사고에서, 화학반응은 서서히 진행된 것으로 추측된다. 그러나, 흡열반응은 빠른 반응속도에서도 진행될 수 있다. 더욱이, 이러한 화학반응은 가스 생성이나 또는 독성물질 형성 등과 같은 기타 위험성을 수반할 수 있다.

---

여러 사고 후, 운전원이 직접 장치를 개방하지 않도록 공정이 재설계 되었다. 코오크 드럼의 경우, 원격조정실(remotely controlled station)을 새로 설치하여 드럼의 압력이 낮아져 있을 때 운전원은 드럼으로부터 멀리 떨어져 있을 수 있다. Amodel 공정은 용융 합성수지의 다량 축적을 방지하기 위해 재설계되었다.

---

## 5.0 관련규정 검토

### 5.1 공정안전관리

---

미국 산업안전보건청(OSHA)은 독성, 반응성, 가연성, 또는 폭발성 화학물질 방출로 인한 치명적인 사고를 방지하고 그 영향을 최소화하기 위한 목적으로 공정안전관리(PSM) 규정을 발표했다.<sup>35)</sup> 본 규정은 137OSHA에

---

---

나열된 “치명적인 화학물질”을 규정수량 이상 취급하는 공정 36)에 적용된다. 화학물질은 독성 또는 화학반응적 특성을 토대로 분류되었다. 가연성 물질 또한 분류 내용에 포함된다.

Augusta 공장에서의 특정 제조공정은 상기 명시된 규정의 기준에 포함되기 때문에 OSHA의 PSM규정에 준해야 한다. 그러나, Amodel 공정은 상기 분류된 화학물질 중 어느 것에도 포함되지 않았으며, 가연성 기준에 부합하는 물질 역시 포함되어 있지 않았다. 따라서 PSM 대상에서 제외된다.

OSHA 요구사항에 준하기 위해, BP Amoco사는 OSHA 규정의 14개 안전관리항목을 토대로 PSM 규정을 제정했다. 현장 PSM 계획서에는 OSHA 규정에 포함된 내용을 이행하기 위한 계획이 명시되어 있다. 그러나, BP Amoco사는 그러한 계획을 Amodel 공정에 임의적으로 적용했다.

예를 들어, 회사는 공정안전 정보를 수집하여 PHA를 수행했고, 표준운영절차를 수립했으며, 교육훈련을 실시하고, MOC 정책을 적용했으며, 사고를 조사했다. Augusta 공장 직원을 대상으로 한 인터뷰에서-대부분의 PSM 계획 항목이 Amodel 공정에 적용되었지만-상기 내용 중 일부는 다른 항목에 비해 엄격히 적용되지 않았다는 것이 밝혀졌다.

Amodel 공정과 관련하여, CSB는 다음과 같은 BP Amoco사의 PSM 계획서 이행에 대한 취약점이 사고와 일부 인과관계를 갖고 있다는 사실을 발견했다.

35)29CFR 1910. 119. 치명적인 화학물질에 대한 공정안전관리.

36)OSHA는 공정을 치명적인 화학물질의 사용, 저장, 제조, 처리, 또는 그러한 물질의 현장 운반과 관련된 모든 활동, 또는 이러한 활동의 조합으로 정의하고 있다. 이러한 정의와 관련하여, 잠재적 누출과 관련될 수 있는 치명적인 화학물질이 저장된 상호 연계된 그리고 개별적인 모든 용기는 단일 공정으로 고려되어야 한다고 규정하고 있다.

---

- 
- PSM 규정에는 제조공정의 초기 가동 이전에 PHA 평가를 완료할 것을 규정하고 있다. 그러나, 압출기가 Amodel 공정의 가동 이전에 PHA에 포함되지 않았는데, 이는 일부 압출기의 오작동은 폴리머 캐치 탱크의 과주입에 대한 잠재적 원인으로 식별되지 않았기 때문이다(4.4절 참조).

---

폴리머 캐치 탱크를 개방하기 위한 준비작업 절차는 차단 및 드레인 밸브가 비효과적이라는 것이 발견된 이후 무효화되었다.

---

- 변경 이전에 MOC 절차를 통하여 안전성을 확인하여야 한다. 주요 운전절차에 관해 변경을 하는 때에는 MOC는 Amodel 공정가동 시간이 30분에서 50분으로 변경되었을 때 시행되지 않았다. 이러한 변경사항 적용은 완전히 이루어 지지 않았다(4.3절 참조)
- 폴리머 캐치 탱크를 개방하기 위한 준비작업 절차는 차단 및 드레인 밸브가 비효과적이라는 것이 발견된 이후 무효화되었다. PSM 규정에는 운전절차의 정기적인 재검토를 요하고 있었다. 이러한 요구사항이 보다 철저히 적용되었었다면, 폴리머 캐치 탱크에 대한 설계 변경 필요성이 조기에 논의되었을 것이다.

---

OSHA PSM규정에 있는 항목 중 하나는 공정 화학물질에 대한 열안정성 자료 수집을 규정하고 있다.

---

- OSHA PSM 규정 <sup>37)</sup>에 있는 항목 중 하나는 공정 화학물질에 대한 열안정성 자료 수집을 규정하고 있다. BP Amoco사의 R&B팀이 Amodel에 관한 일부 열안정성 자료를 작성했지만, 제품 품질과 관련된 문제로 인해, 이러한 자료구축은 공정 안전성에 적용 가능한 것으로 인정되지 않았다.

37)29 CFR 1910. 119, (d) (1) (vi)

---

---

## 5.2 잠금장치/꼬리표

OSHA는 위험 에너지원 관리규정(잠금장치/꼬리표)을 제정했다.<sup>38)</sup> 규정의 목적은 운전원이 기계 또는 장치를 운전할 때 잠재된 에너지의 예기치 못한 작동(energization), 가동, 또는 방출 등을 방지하는 것이다. 본 규정은 사업주가 에너지원 관리계획을 수립하고 잠금장치/꼬리표<sup>39)</sup>장치나 에너지 차단장치, 또는 이와 반대로 그러한 장치를 사용할 수 없는 것과 같은 사항을 적용하기 위한 절차를 준수하도록 요구하고 있다.

Augusta 공장은 OSHA의 잠금장치/꼬리표 요구사항에 따른 규정을 수립해 놓고 있었다. 그러나, 가압된 상태에서의 폴리머 캐치 탱크개방은 위험 에너지원 관리가 소홀했음을 입증하는 것이다.

---

*가압된 상태에서의 폴리머 캐치 탱크개방은 위험 에너지원의 관리가 소홀했음을 입증하는 것이다.*

---

38)29CFR 1910. 147, 위험 에너지 관리(잠금장치/꼬리표)

39)OSHA는 “잠금장치”(lockout)를 에너지 차단 장치 및 설비가 관리되어 잠금장치가 제거될 때까지 작동되지 못하도록 하는 규정된 절차에 따라 에너지 차단 장치에 잠금장치를 설치하는 것으로 정의하고 있다. OSHA는 “꼬리표”(tagout)란 에너지 차단 장치 및 설비가 관리되어 꼬리표가 제거될 때 까지 작동되지 못하도록 하는 규정된 절차에 따라, 에너지 차단장치에 꼬리표를 부착하는 것으로 정의하고 있다(29CFR 1910. 147 (b)).

---

## 6.0 사고의 근본원인

### 6.1 사고의 근본원인

1. Amoco사의 Amodel 공정 개발자는 반응성 화학물질로 인한 위험성을 식별할 수 있도록 공정설계 개념을 적합하게 검토하지 않았다.

Amoco사의 R&D팀이나 공정설계 담당부서 중 어느 누구도 의도되지 않은 또는 통제 불능의 화학적 작용으로 인한 위험성을 식별하고 관리하기 위한 체계적인 절차를 수립하지 않았다.

2. Augusta 공장은 설계 결함을 시정하기 위한 적합한 감사공정을 수립하지 않았다.

Augusta 공장은 Amodel을 생산하는 최초의 유일한 상업용 제조 시설이었다. 폴리머 캐치 탱크의 설계상 결함은 작동 시 드러나기 시작했다. 운영관리자는 이러한 결함을 적시에 시정하지 않았다.

- 운전원들은 폴리머 캐치 탱크의 막힌 드레인 배관으로 탱크의 압력 유무를 확인할 수 없었기 때문에 회사가 수립한 잠금장치/꼬리표 규정 및 설비개방 규정을 준수할 수 없는 상황이었다.
- 과주입 그리고 연결 배관으로의 합성수지 유입 등 이전에 재발한 사고들은 폴리머 캐치 탱크가 예측 가능한 공정사고를 처리하기에는 규모가 너무 작았다는 것을 입증하고 있다.
- 폴리머 캐치 탱크의 레벨 표시장치는 정확하지 않았다.

3. 일련의 사고 및 앗차사고 조사를 위한 Augusta 공장의 체계로는 사고의 원인 또는 관련 위험성을 적합하게 식별하지 못했다. 이러한 정보는 사고의 재발을 야기시킬 수 있는 설계 및 작동상 결함을 시정하기 위해 필요한 것이었다.

- 폐 합성수지의 자연발화 또는 폐 합성수지 덩어리가 파열된 현상을 규명하기 위한 기술적 타당성 논리는 작성되지 않았다.
- 일련의 사고와 앗차사고는 별개의 사고로 취급되었다. 경영진은 사고의 특징 및 유형을 분류하는 검토 체계를 수립하지 않았다.

- 이전에도 여러 번, 폴리머 캐치 탱크는 과주입 되었으며 배기배관은 막혀 있었다. 이러한 사고의 재발을 방지하기 위한 효과적인 조치는 취해지지 않았다.
- 압출기에서 여러 건의 화재가 발생했었지만, 이에 대한 효과적인 대응조치는 취해지지 않았다..

1. Amodel 공정의 위험성 평가는 부적합했으며, 불충분했다.

- 예외적인 화학반응과 같은 화학반응 위험성은 최종 설계단계의 위험성 평가에서 검토되지 않았다.

### 6.2 사고의 직전원인

- 
- 압출기 작동과 이로 인해 공정 전체에 미치는 영향은 설계 및 시공 과정에서 수행된 위험평가 기간 중 적절하게 검토되지 않았다.
  - 폴리머 캐치 탱크가 과주입 될 수 있는 가능성은 사전에 도출되지 않았다.

## 2. 설계자료에는 Amodel 공정에 관해 명확히 기술되어있지 않았다.

- 공정 설명서에는 폴리머 캐치 탱크의 설계 기준 및 작동원리에 대해 적절하게 설명되어있지 않았다. 따라서, 이러한 특성에 대한 이해 부족을 야기시켰다. 최대주입레벨은 명확히 정의되어 있지 않았다. 과주입 결과에 따른 경고표시 역시 없었다.
- 절차 및 운전에 관한 변경사항을 반영하기 위한 문서의 갱신이 이루어지지 않았다.

## 3. 장치개방 절차에는 안전조치규정을 따를 수 없는 경우 취해야 하는 조치에 대해 명시되어있지 않았다.

사고발생 당일과 Amodel 공정이 가동 시 발생한 후속 사고의 경우, 폴리머 캐치 탱크내부의 압력 유무는 회사의 절차와 OSHA 잠금장치/꼬리표 규정에서 요구하는 바에 의거하여 검증될 수 없는 상황이었다.

---

---

탱크 내부의 압력 유무를 검증할 수 있는 고품 폴리머가 배수 노즐을 막은 상태였다. 경영진의 검토 및 승인을 요하는 절차에도 불구하고, 운전원들은 이런 상황에서 가압된 상태가 아님을 입증하는 검증절차 없이 용기를 개방했다.

**4. 운전절차에 대한 변경은 안전성 평가를 위한 변경관리 대상에 포함되지 않았다.**

최초 가동 시 30분 동안 폴리머 캐치 탱크로 물질이 주입되었다. 가동시간은 발생 가능한 부정적인 결과를 고려하지 않고, 이후 50분으로 연장되었는데, 이로 인해 용기에 저장되는 물질의 양이 증가했다.

---

## 7.0 개선 권고사항

Solvay Advanced  
Polymers, L.L.C.

1. BP Amoco Performance Polymers사로부터 취득한 제조공정을 점검하여 예기치 못한 반응성 화학물질로 인해 야기될 수 있는 위험성을 도출하고 이러한 위험성을 제어하기 위한 체계적인 안전성 검토 절차를 수립하여 적용하여야 한다. 또한, 다음과 같은 단계에서 반응성 화학물질의 위험성을 식별하고 평가하여야 한다:

- R&D 단계, 새로운 공정의 개념적 설계 단계, 그리고 새로운 공정의 상세한 설계 단계
- 기존 장치 또는 공정의 변경 이전.

본 사안에 대한 검토 결과를 전 직원과 공유한다(2001-03-I-GA-R2)

2. 운전경험을 토대로 하여 새로운 그리고 수정된 공정과 연관된 위험성을 체계적으로 도출할 수 있도록 위와 같은 계획을 BP Amoco Performance Polymers사로부터 취득한 설비에 적용되도록 하여야 한다. 공정설비에 대한 모든 입증된 설계, 작동, 및 유지보수 결함사항이 시정되도록 한다. 운전경험이 장치의 설계 기준에 부합하는지 여부를 검증한다(2001-03-I-GA-R2).

3. 축적된 용융 폴리머 덩어리에 잠재된 위험성에 대비하기 위한 Amodel의 물질안전보건자료(MSDS)를 수정한다. MSDS에 대한 변경 내용을 현행 그리고 이전 고객사(본 제품의 재고를 보유하고 있는 업체)에게 전달한다(2001-03-I-GA-R3).

Solvay Advanced  
Polymers, L.L.C., Augusta  
공장

1. 사고 및 앗차사고에 대한 정기적인 관리검토를 수행할 수 있도록 계획을 이행한다. 사고들 간의 특성 및 유형을 구분한다. 문제의 근본원인을 파악하여 시정 조치한다(2001-03-I-GA-R4).

2. 다음의 사항을 포함하여 공정안전 정보를 수정한다(2001-03-I-GA-R5):

- Amodel의 화학적 분해 작용에 관한 정보
- 설계 목적, 기준, 용량, 및 장치관련 규제사항
- 설계 목적 및 운전상의 기준에서 벗어나는 경우 이에 따른 위험성 및 결과.

- 
3. Amodel 공정의 위험성 평가 재실시하여 다음과 같은 사항을 규명한다(2001-03-I-GA-R6):
    - 공정 목적에서 벗어나는 경우의 결과
    - 가동 및 가동중지와 관련된 위험성
    - 잠재적으로 유해한 폴리머 덩어리의 축적 방지
  4. 유지보수를 위해 장치를 개방하기 이전에 안전성이 확보되도록 잠금 장치/꼬리표 계획을 수정한다. 장치를 개방하는 경우 감압(depressurization) 또는 압력유무를 검증할 수 없는 경우 등에는 장치 개방 절차에 최소한 고위 경영진의 검토 및 승인을 요하도록 규정하여 작업중단이 되도록 한다(2001-03-I-GA-R7).
  5. 운전 및 절차상 수정사항이 발생하는 경우에는 변경관리 절차가 적용되도록 한다(2001-03-I-GA-R8).

---

|                                                 |                                                                      |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| BP Chemicals Group                              | 본 보고서의 결과를 미국에 소재한 화학물질 및 합성수지 제조공장에 전달하여 정보를 공유한다(2001-03-I-GA-R9). |
| American Chemistry Council<br>(미국 화학회)          | 본 보고서의 결과를 회원에게 전달하여 정보를 공유한다 (2001-03-I-GA-R10).                    |
| Society of<br>Plastics Engineers<br>(합성수지 공학학회) | 본 보고서의 결과를 회원에게 전달하여 정보를 공유한다 (2001-03-I-GA-R11).                    |

---

작성자:  
 미국 화학물질 안전 및 유해성 평가 조사국(CSB)  
  
 Gerald V. Poje, Ph. D. 위원  
  
 Isadore Rosenthal, Ph. D. 위원  
  
 Andrea Kidd Taylor, Dr. P.H. 위원

작성일: 2002년 5월 20일.

- 
- Ballistreri, A., D. Garozzo, M. Giuffrida, and G. Montaudo, 1987. "Mechanism of Thermal Decomposition of Nylon 66," *Macromolecules*, Vol. 20, pp. 2991-2997.
- Ballistreri, A., D. Garozzo, P. Maravigna, M. Giuffrida, and G. Montaudo, 1987. "Thermal Decomposition Processes in Aromatic-Aliphatic Polyamides Investigated by Mass Spectrometry," *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 25, pp. 1049-1063.
- Barton, John, and Richard Rogers, 1997. *Chemical Reaction Hazards, A Guide to Safety*, Rugby, U.K.: Institution of Chemical Engineers (IChemE).
- Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1995a. *Guidelines for Chemical Reactivity Evaluation and Application to Process Design*, American Institute of Chemical Engineers (AIChE).
- CCPS, 1995b. *Guidelines for Safe Storage and Handling of Reactive Materials*, AIChE.
- CCPS, 1989. *Technical Management of Chemical Process Safety*, AIChE.
- Gander, Jesse D., and A. Jeffrey Giacomini, 1997. "Review of Die Lip Buildup in Plastics Extrusion," *Polymer Engineering & Science*, July 1997.
- Health and Safety Executive (HSE), 2000. *Designing and Operating Safe Chemical Reaction Processes*, Norwich, U.K.: HSE Books.
- HSE, 1997. *The Safe Isolation of Plants and Equipment*, Oil Industry Advisory Committee, Norwich, U.K.: HSE Books.
- Kamerbeek, B., G. H. Kroes, and W. Grolle, 1961. *Thermal Degradation of Polymers*, SCI Monograph No. 13, London, U.K., pp. 357-391.
- Kohan, Melvin, 1995. *Nylon Plastics Handbook*, Hanser Publishers.
- Kohan, Melvin, 1973. *Nylon Plastics*, Wiley Interscience.
- Ohtani, H., T. Nagaya, Y. Sugimura, and S. Tsuge, 1982. "Studies on Thermal Degradation of Aliphatic Polyamides by Pyrolysis-Glass Capillary Gas Chromatography," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 4, pp. 117-131.
-

---

Parry, Cyril F., 1998. *Relief Systems Handbook*, Rugby, U.K.:  
IChemE.

Sanders, Roy F., 1999. *Chemical Process Safety: Learning From Case  
Histories*, Butterworth-Heinemann.

Schulten, H., and B. Plage, 1988. "Thermal Degradation of Aliphatic  
Polyamides Studied by Field Ionization and Field Desorption  
Mass Spectrometry," *Journal of Polymer Science, Part A:  
Polymer Chemistry*, Vol. 26, pp. 2381-2394.

U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), 2001.  
*Safety Bulletin, Management of Change*, No. 2001-04-SB,  
August 2001.

---

## 별첨A: 사고 현황

### A.1 사고 이후 현장

#### A.1.1 현장가동 중단

2001년 3월 13일 사고 이후, BP Amoco사는 안전점검과 별도의 교육 훈련을 실시하기 위해 Augusta 공장 제조공정의 가동을 전면 중단했다. 4월 8일 공정 1곳이 그리고 4월 13일에는 다른 공정의 가동이 복구되었다. Amodel 공정은 주요 설계 변경사항으로 인하여 7월 17일까지 가동이 재개되지 않았다.

#### A.1.2 폴리머 캐치 탱크

3인치에서 5인치 두께의 노란색 폴리머 고품층은 용기 내부에 남아있었고 내부 표면 전체를 덮고 있었다

금속 프레임을 포함한 폴리머 캐치 탱크의 내용물이 대부분이 방출되었다. 3인치에서 5인치 두께의 노란색 폴리머 고품층은 용기 내부에 남아있었고 내부 표면 전체를 덮고 있었다(그림 A-1참조). 고품층에는 일부 기포와 공간이 남아있었지만, 상대적으로 밀도가 높은 물질로 구성되어 있었다. 폴리머는 용기의 모든 노즐 안으로 들어가, 입구를 완전히 막고 있었다(그림 A-1참조).



그림 A-1. 폴리머 캐치 탱크 통기구 노즐의 폴리머 막힘

폴리머 캐치 탱크의 커버는 볼트로 조여져 있었는데, 플랜지의 상층부는 휘어져 있었다. 갑작스런 방출로 인해 발생한 압력으로 캐치 탱크는 반대방향으로 밀려나 있었다. 이 같은 위치변경으로 인해 용기 인입배관이 휘어졌고 용기 뒤쪽에 있는 열매유 배관이 파손되었다.

탱크 커버는 폴리머 캐치 탱크에서 14피트 떨어진 곳에서 발견되었다. 캐치 탱크와 압출기를 보호하고 있던 덮개(canopy) 보강대가 구조물에서 떨어져 나갔다. 커버가 탱크에서 떨어져 나가면서 보강대를 들이받은 것으로 추정된다.

탱크 커버를 조사한 결과, 커버의 볼트가 파열되면서 발생한 압력으로 휘어진 것으로 판단된다. 44개 볼트 중 절반은 사고 당시 커버에 남아있었는데, 이후 나머지 볼트 모두가 발견되었다(그림 A-2참조). 볼트에 관한 조사에서는 연성(ductile) (예, 파손 이전에 얇아진) 및 전단변형(shear)(예, 급속한 오버로드)등의 결합형태가 밝혀졌다. 너트에서 분리되어 떨어져나간 스터드는 없었다. 커버에 연결된 드레인 밸브는 잠겨진 상태로 발견되었다.

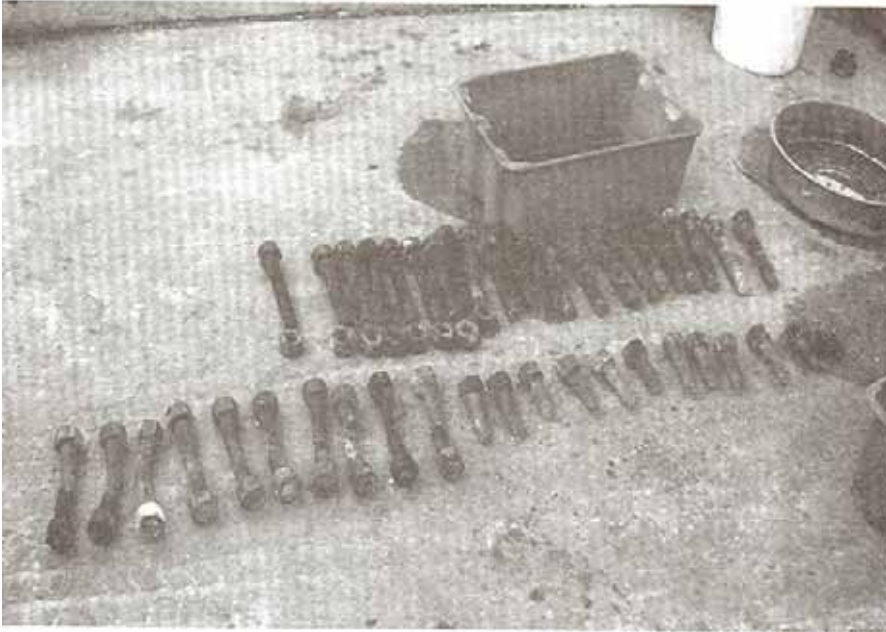


그림 A-2. 폴리머 캐치 탱크 커버에서 떨어져나간 볼트

---

#### A.1.3 반응기 녹아웃 포트

반응기 녹아웃 포트는 안전작업 계획서의 작성 및 위험성 평가를 실시하기 위해 2001년 4월 17일까지 개방되지 않았다. 개방된 이후, 용기의 바닥면에 있는 6인치 물 질층을 제외한 나머지 공간이 비어있는 것으로 발견되었다(그림 A-3)..

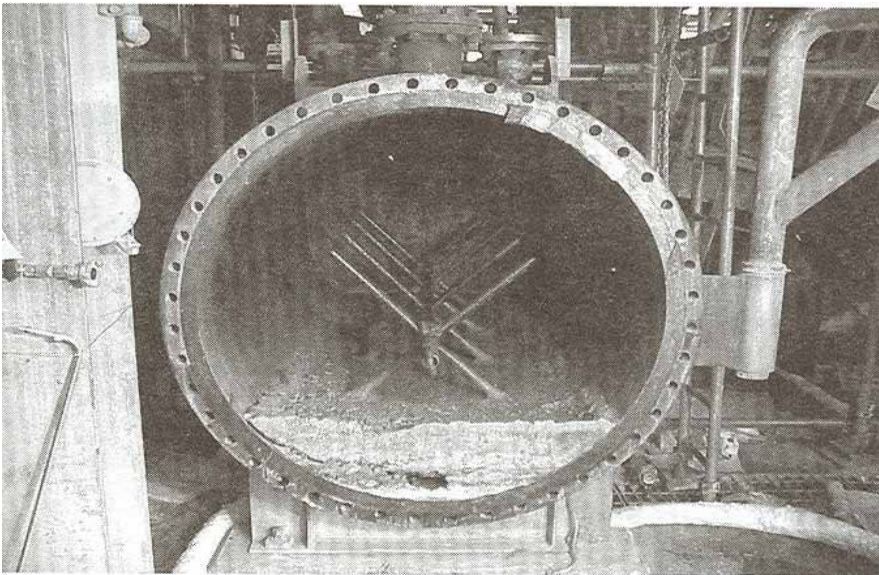


그림 A-3. 내부 프레임이 드러난 반응기 녹아웃 포트

---

#### A.1.4 배기관

---

배관 내부의 폴리머는 수 년 간에 걸쳐 축적된 것으로 보이는 층이 형성되어 있었는데, 각기 다른 색깔로 분리되어 있었다.



그림 A-4. 폴리머층으로 막혀 있는 배기배관

폴리머 캐치 탱크에 연결된 6인치의 배기배관에 있는 출구 노즐은 고품 폴리머로 막혀 있었다(그림 A-4). 배기배관 자체는 중심부에 뚫린 작은 홀을 제외하고는 모두 막혀 있었다. 총 22피트 6인치의 배관은 압력계가 설치된 부분을 포함해 폴리머로 막혀 있었다. 막혀 있는 상태는 그림 4(2.3절)에 나타난 바와 같이, 반응기 녹아웃 포트와 공유하는 배기배관의 공통 부분에까지 연장되어 있었다. 배관 내부의 폴리머는 수 년 간에 걸쳐 축적된 것으로 보이는 층이 형성되어 있었는데, 각기 다른 색깔로 분리되어 있었다.

#### A. 1.5 안전밸브

안전밸브와 여기에 연결된 배관은 조사를 위해 제거되었다. 안전밸브의 인입배관은 장치가 설치된 곳까지 폴리머로 막혀 있었다. 배기배관은 안전밸브 뒤쪽에서 깨끗한 상태로 있었다. CSB는 안전밸브가 사고발생 이전에 가동된 것 같지 않다는 결론을 내렸다.

6인치의 배기배관에 있는 압력계 탭<sup>1)</sup>은 배관 자체의 심각한 막힘에도 불구하고 깨끗한 상태로 발견되었다.

나사못은 서로 부딪혀 재(ash) 형태의 물질로 오염된 것으로 추정된다..

#### A. 1.6 압출기

압출기는 분해되어 검사되었다. 기어박스는 작동(synchronization)되지 않은 채로 발견되었고, 스크류 베어링에 균열이 있었다. 나사못은 서로 부딪혀 재(ash)형태의 물질로 오염된 것으로 추정된다.

3월 12일 오후 3:45분 경, 압출기 오작동에 대해 점검을 하는 동안 (3.1.2절 및 3.3.1절 참조), 공정가동 중단 시, 정비공이 처음으로 재(ash)를 발견했다. 나사못에서 재가 발견된 것은 이때가 처음이었으나, 당시 이러한 문제점에 대해 규명되지 않았다.

1) 탭은 주관(larger pipe)에 연결된 좁은 직경의 가지관(branch pipe)이다.

#### A.1.7 일반 구역

방출된 폴리머는 폴리머 캐치 탱크에서 70피트 거리에 있는 지역인 북쪽 방향으로 확산되었다(그림 A-5). 일부 폴리머는 화재로 인해 까맣게 타 있었다. 이 지역의 대부분이 미세한 실리카 재(fine silica ash)로 덮여 있었는데, 이는 화재를 부추긴 열전달 액체의 연소로 발생한 부산물인 것으로 추정된다.

이 지역의 대부분이 미세한 실리카 재(fine silica ash)로 덮여 있었는데, 이는 화재를 부추긴 열전달 액체의 연소로 발생한 부산물인 것으로 추정된다.

탱크에서 떨어져나간 금속 선반(rack)은 용기에서 40피트 떨어진 곳에서 차단밸브관 배관에 있는 보온체(insulation)에 끼워진 채 발견되었다.



그림 A-5. 작업 지역 전역에 확산된 폴리머

## A.2 압출기 결함

압출기에 장착된 온도측정기는 이 기간 동안 비정상적으로 높은 온도를 기록했는데, 압출기 내부의 정화 잔류물질이 점화된 것으로 보인다.

사고 이후, 압출기 배럴에 관한 조사에서 압출기 내부의 화재로 인해 발생한 것으로 추정되는 다량의 재(ash)가 발견되었다. 공정이 중단되기 약 12시간 전인, 3월 12일 새벽, 압출기 온도는 315℃로 상승되었고, 장치는 정화물질(purging material)에 의해 잠깐 동안 사전 가동되었었다. 이러한 작업은 통상적인 절차로, 공장의 반응기가 가동되기 바로 직전에 항상 시행되었었다.

그러나, 이번 경우, 화학반응기 쪽에서 발생한 기계적 장애로 가동은 3

---

월 12일 오후로 연기되었다. 압출기 배럴 중 하나에 있는 개방된 전환 밸브로 공기가 유입되어 나사못을 통해 흐른 것으로 추정된다. 압출기에 장착된 온도측정기는 이 기간 동안 비정상적으로 높은 온도를 기록했는데, 압출기 내부의 정화 잔류물질이 점화된 것으로 보인다.

정상온도보다 높은 온도가 관찰된 것은 정화물질의 연소로 인해 열이 방출된 것과 일치한다. 가스형태의 부산물은 압출기 상층부에 있는 통기구를 통해 재를 남기고 방출된 것으로 보인다..

---

**모터를 시동하려는 수 차례의 시도로 인하여 장치에 조여져 움직이지 않는 나사못에 토크를 가했는데, 이것이 베어링이 균열되고 기어박스가 작동하지 않은 원인이 된 것으로 보인다.**

압출기가 분말가루를 운송하도록 설계된 것이 아니기 때문에, 축적된 재는 3월 12일 오후 2:16분 경에 장치를 시동하려고 하자 나사못이 움직이지 않은 원인이 된 것으로 추측된다. 30분 이상 모터의 시동 버튼이 작동되었지만, 맞물린 상태가 모터의 가동중지를 반복적으로 되풀이한 원인이 되었다. 모터를 시동하려는 수 차례의 시도로 인하여 장치에 조여져 움직이지 않는 나사못에 토크를 가했는데, 이것이 베어링이 균열되고 기어박스가 작동하지 않은 원인이 된 것으로 보인다.

---

**3월 10일의 공장 가동중단 원인은 생산공정 가동 시, 압출기 부품의 장애였다. 2001년 2월 초, 이틀간 연속으로 발생한 일련의 압출기 모터의 기계적 장애는 공정의 가동중단으로 막을 내렸다.**

몇 명의 운전원들의 말에 따르면, 화학반응기가 가동된 때에 맞추어 압출기가 장애를 일으킨 경우는 이번이 처음이라고 했다. 그러나, 장치 또는 부품은 정상 가동 중에서 가끔씩 장애를 일으킨 것으로 알려졌다. 3월 10일의 공장 가동중단 원인은 생산공정 가동 시, 압출기 부품의 장애였다. 2001년 2월 초, 이틀간 연속으로 발생한 일련의 압출기 모터의 기계적 장애는 공정의 가동중단으로 막을 내렸다.

---

BP Amoco사의 담당자는 여러 건의 오작동이 생산 공정 중 압출기 작동에 장애가 될 수 있다는 사실을 인지하고 있었다. 압출기의 기계적 결함 발생으로 반응기의 방류를 전환하고 폴리머 캐치 탱크 또는 반응기 녹아웃 포트에 폴리머를 축적해야 했다. 이전의 몇 건의 사례에서, 이러한 조치는 용기 중 하나의 과주입을 야기시켰고 공동 배기배관을 막는 원인이 되었다.

---

### A.3 폴리머 캐치 탱크

---

---

### A.3.1 열(thermal)관련 사안

통상적인 가동 시, 폴리머 캐치 탱크로 운송된 프리폴리머의 양은 용기의 거의 절반을 차지했다. 일반적으로 공정이 장시간 동안 가동되기 때문에, 가동 시 축적된 프리폴리머는 가동중지 및 용매 세척 시 추가되는 가열된 물질을 주입하기 이전에 냉각되어 고형화되었다.

3월 12일 가동이 중단됨에 따라, 평상시보다 두 배나 많은 양의 가열된 프리폴리머가 지속적으로 폴리머 캐치 탱크로 흘러 들었다. 이러한 상황에서 가동 시 생성된 프리폴리머와 압출기 정비작업이 있었고, 설상가상으로 가동이 중단된 후 용매 세척 시 공장의 화학반응기에서 유입된 가열된 물질이 여기에 포함되어 있었다. 이 같은 양의 프리폴리머가 캐치 탱크에 지속적으로 주입된 전례가 없었다. 용기 내부의 열에너지량은 그 어느 때보다 엄청난 양인 것으로 보인다.

Amodel은 쉽게 고형화되어, 보온체의 역할을 한다. 폴리머 캐치 탱크의 동체를 통한 열 손실량은 결국 동체에 붙어있는 합성수지 고형층을 형성하는 결과가 되었다. 일단 고형층이 형성되고 나면, 고형층은 보온 역할을 하게 되는데, 용기 내부에 있는 물질의 중심부가 장시간 동안 뜨거운 용융상태로 남게 된다.

---

*일반적으로 공정이 장시간 동안 가동되기 때문에, 가동 시 축적된 프리폴리머는 가동중지 및 용매 세척 시 추가되는 가열된 물질을 주입하기 이전에 냉각되어 고형화되었다.*

---

---

### A.3.2 용량초과 주입

CSB의 조사관들은 캐치 탱크가 오버로드(예, 설계기준 이상의 조건에서 가동된)된 것으로 미루어볼 때, 다량의 폴리머가 폴리머 캐치 탱크와 반응기 녹아웃 포트의 배기 시스템 내부로 빠져나간 것으로 추정했다. 축적된 물질량이 어느 정도인지는 알고 있었지만, 캐치 탱크 내부의 액체레벨은 밀도가 확실치 않기 때문에 알 수 없었다.<sup>2)</sup>

3월 11일 캐치 탱크에서 제거된 폐 폴리머는, 이전 생산공정 가동에 이어, 층(layer)간의 틈(void)이 넓은 다양한 밀도의 복합층으로 구성되었다(그림 A-6참조). 폐 폴리머는 용기 용량의 55%를 차지하고 있었고 용적 밀도는 단 3lb/gal에 불과했다.

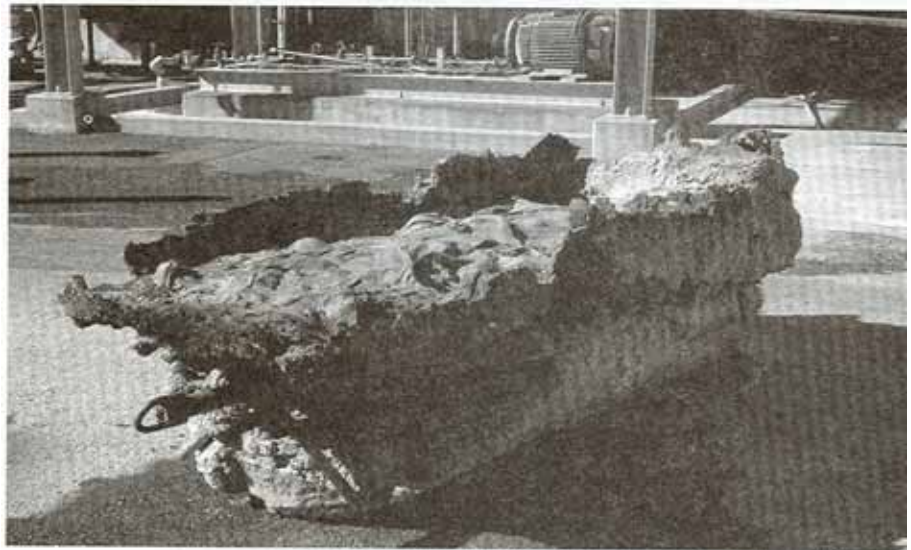


그림 A-6. 사고발생 이전, 3월 11일 폴리머 캐치 탱크에서 추출된 물질.

---

**폴리머 캐치 탱크가 기준용량 이상으로 주입됨으로써, 용융 프리폴리머에서 스티를 분리하는 성능이 저하되었다.**

---

반응기 유출물질은 다량의 스티와 함께 폴리머 2단계 혼합물로 폴리머 캐치 탱크로 유입되었다. 그림 A-7에 나타난 바와 같이, 스티는 용기 내부에서 액체로부터 분리된다. 이외 추가 스티는 물과 과도한양의 반응물질이 용해과정에서 증발할 때 생성된다.

2) BP Amoco사 공장의 공학담당자는 이후 최종 Amodel제품의 밀도가 되는, 폴리머 캐치 탱크내부에 있는 물질의 용적밀도가 갤런당 7파운드에서 10파운드(lb/gal) 정도 될 것이라고 추정했다. 사고발생 이후 용기에서 추출된 물질의 용적 밀도는 5~7lb/gal정도 였지만, 이것이 압력이 방출되기 이전에 용기 내부의 밀도라고는 볼 수 없다.

---

---

폴리머 캐치 탱크가 기준용량 이상으로 주입됨으로써, 용융 프리폴리머에서 스팀을 분리하는 성능이 저하되었다. 폴리머 방울은 스팀 스트림과 함께 배기 시스템 내부로 유입되었다(그림 A-8참조). 배기 시스템으로 유입된 후, 폴리머는 배관으로 흘러 들어가, 경화되어, 스팀의 흐름을 제한한다. 이러한 작용은 캐치 탱크의 가압 원인이 되었다.

축적된 압력은 결국 탱크의 커버 개스킷(gasket)의 밀폐력(sealing capacity)을 초과하게 되었고, 용매 스팀은 4피트 직경의 볼트로 조여진 커버 상단에서 누출되었다. 누출이 발견되고 나서, 용매의 흐름은 폴리머 캐치 탱크에서 반응기 녹아웃 포트<sup>3)</sup>로 전환되었는데, 다량의 폴리머는 포트 가압의 원인을 제공하면서, 공동 배기관에 축적되었기 때문에 누출이 시작되었다. 배기배관의 직경이 넓은 것은 아니지만, 그 당시 플러그는 완전히 제거되지 않았고, 유입물질은 지속적으로 흘러 들었다. 앞쪽의 압력은 정상작동 범위 내에 있었다

---

**축적된 압력은 결국 탱크의 커버 개스킷의 밀폐력을 초과하게 되었고, 용매 스팀은 커버 상단에서 누출되었다.**

---

---

### A.3.3 과주입 예방을 위한 안전조치

폴리머 캐치 탱크안에 있는 물질의 레벨이 표시되지 않았던 것은 레벨탐지장치가 장착되어있지 않았기 때문이다. 용량레벨 탐침(capacitance-type level probe)이 사용되었었지만, 이 장치는 종종 폴리머로 오염되었기 때문에 정확한 측정이 불가능했다.

---

**폴리머 캐치 탱크안에 있는 물질의 레벨이 표시되지 않았던 것은 레벨탐지장치가 장착되어있지 않았기 때문이다.**

---

타이머는 축적된 프리폴리머가 생산공정 가동을 중단해야 하는 범위까지 도달하여 용기의 여분 용량이 감소되었을 때의 상태를 표시하기 위해 1994년 폴리머 캐치 탱크에 설치되었다. 타이머는 가동 또는 비정상 가동 시 캐치 탱크 내부로 유입되는 프리폴리머 시간을 표시하지만, 가동 중단의 용매세척 단계 시 유입되는 프리폴리머 시간은 표시하지 않는다.

타이머 설정기준은 폴리머 캐치 탱크내의 충분한 용량에 별도의 불특정 안전 여분을 더하여 결정된다. 타이머가 물질의 밀도 변화율<sup>3)</sup>이나 또는 스팀-액체 변환(disengagement)에 대한 추가 요구사항을 감안하여 표시되었다는 증거는 없다. 이러한 한계를 감안할 때-그리고 가동중지 시 유입된 프리폴리머 시간을 표시하지 않는다는 점-타이머는 용기의 여분 용량을 정확히 표시하지 않은 것이다.

3)타이머 알고리즘은 완성된 폴리머에 상응하는 10lb/gal의 폴리머 밀도를 기준으로 한다.

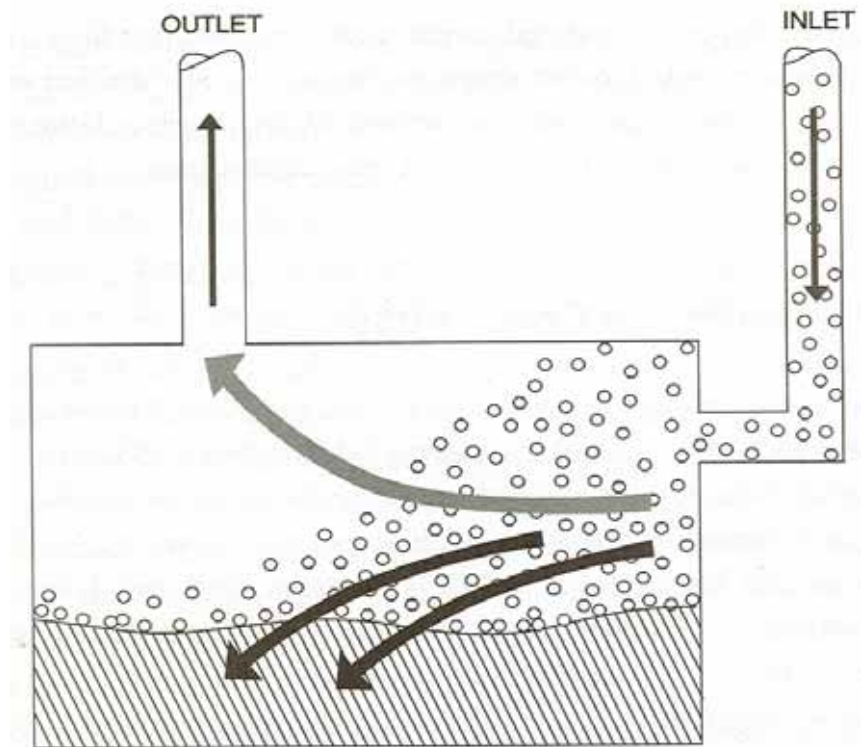


그림 A-7. 정상 운전시 입자의 유동

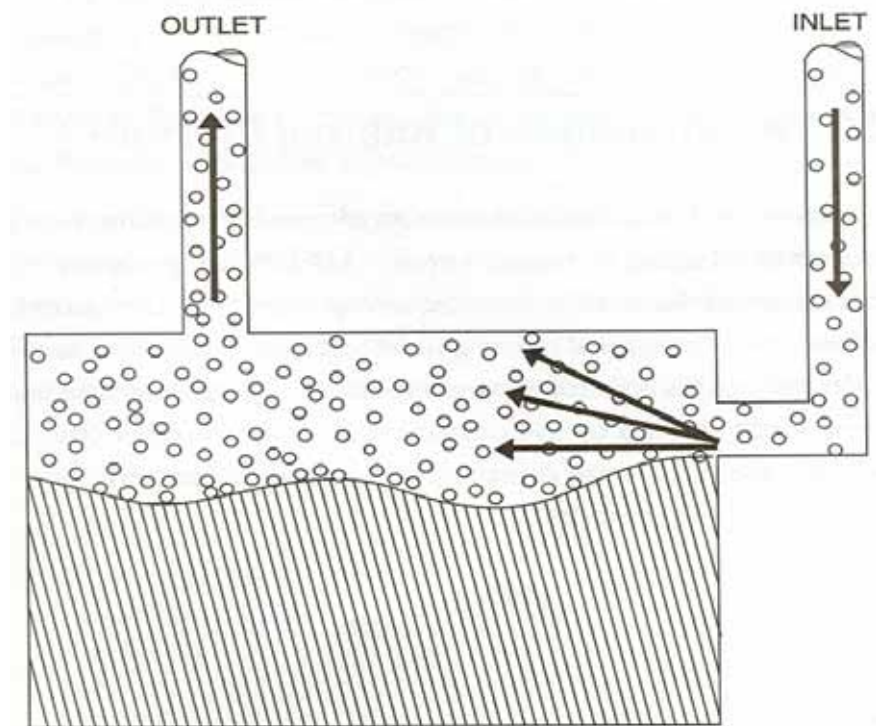


그림 A-8. 기준용량 이상으로 주입된 폴리머 캐치 탱크-배기관으로 유입되는 입자의 유동

커버는 각각 11/8인치 직경의 44개의 탄소강 등급 SA-193 B16볼트로 폴리머 캐치 탱크에 부착되었다. 떨어져 나간 22개의 볼트는 파손 또는 결함 유무를 확인하기 위해 조사되었다. 손상되지 않은 2개의 볼트는 ASTM(미국재료시험학회) A370, 강철제품의 기계적 시험을 위한 표준시험방법 및 정의(Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products)에 의거하여 분석한 결과, 수율(yield)및 인장강도 사양범위 이내인 것으로 나타났다.

볼트를 시험했을 때, 취성과파괴(brittle fracture)특성은 관찰되지 않았으나, 연성형태(ductile model)에서는 취약성이 드러났다. 시험표본들간에 약간의 편차가 있었다. 이러한 시험결과를 토대로 할 때, 볼트는 사고 이전 결함이 없었으며 노후화, 사전 오버로딩, 또는 환경적 조건 등에 기인한 손상이 없었던 것으로 결론이 내려졌다..

볼트를 시험했을 때, 취성과파괴특성은 관찰되지 않았으나, 연성형태에서는 취약성이 드러났다. 이러한 시험결과를 토대로 할 때, 볼트는 사고 이전 결함이 없었으며 노후화, 사전 오버로딩, 또는 환경적 조건 등에 기인한 손상이 없었던 것으로 결론이 내려졌다

#### A.3.5 내압 측정

폴리머 캐치 탱크는 1평방인치당(psig) 108파운드의 최대허용압력이 되었다. 사고 발생 당시 탱크 내부의 압력이 표시되지 않았다. 따라서, 내압은 22개 볼트가 떨어져 나가는데 필요한 힘(force)과 압력을 기준으로 추정되었다. 그러나, 이러한 분석은 나머지 22개 볼트에 적용된 저항력(restraining force)이 커버의 동심원(concentric)에 있지 않았다는 사실로 복잡해졌다. 볼트는 1:30분에서 7:30분 방향의 위치에서 순차적으로 제거되었다.

BP Amoco사의 요청으로 미국 오하이오주의 M&M Engineering of Shaker Heights는 사고 당시 탱크 커버의 압력을 추정하기 위해 유한요소분석(FEA)을 수행했다. 폴리머 캐치 탱크의 동체, 메이팅(mating) 플랜지, 플랜지 개스킷, 커버, 그리고 볼트의 3차원 모델이 생성되었다. 볼트의 정적특성(static properties)은 상기 언급된 시험 결과를 토대로 하였고, 장력(tensile)특성은 동적효과(예, 볼트변형 속도)를 감안하여 증가시켰다.

분석결과, 나머지 22개 볼트의 현저한 수용력저하는 저항력의 편심특성이 원인인 것으로 나타났다.

|                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>사고 당시 폴리머층의 강도가 순수한 Amodel과 상승된 온도로 구성된 차이점에 기인한다는 사실에는 상당히 불명확하다</p> | <p>FEA분석 결과, 나머지 22개 볼트를 떨어져 나가게 하기 위해 필요한 최대 압력은 50psig(정적 장력 특성을 전제로)에서 70psig(정적 강도에 대한 30% 동적 증가를 전제로)인 것으로 나타났다. 볼트의 동적 로딩에 대한 불확실성을 감안할 때, 110psig는 손상을 줄 수 있는 압력(failure pressure)의 적정 상한선 수치가 된다. 이러한 값은 동적효과에 기인한 장력특성에서의 100%증가분에 해당한다. 분석결과, 나머지 22개 볼트의 현저한 수용력(capability)저하는 저항력의 편심(eccentric)특성(예, 기하학적 중심이 아닌)이 원인인 것으로 나타났다.</p> <p>FEA는 폴리머 캐치 탱크내부에 덮인 3인치에서 5인치의 경화 폴리머층에 의해 생성된 추가 저항력을 감안하지 않았다. 물딩된 Amodel은 대기 온도에서 12,000psig의 장력을 갖는 고강도 폴리머이다. 사고 당시 폴리머층의 강도가 순수한 Amodel과 상승된 온도로 구성된 차이점에 기인한다는 사실에는 상당히 불명확하다.</p> <p>폴리머 코팅에 FEA가 산정한 50~70psig범위 이상의 상당한 압력이 포함될 수 있다고 해도, 이러한 추가 압력에 대한 분석은 상기 언급된 불명확성을 감안할 때 상당히 모험적이라고 할 수 있다. CSB는 사고 당시 폴리머 캐치 탱크내부의 압력은 최소한 50psig였다는 결론을 내렸다</p> |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>A.4 물리실험 및 화학반응</p> <p>폴리머 캐치 탱크내부의 압력원은 열분해에 기인한 가스 형성이었다.</p> | <p>A.4.1 잠재적 화학적 반응</p> <p>나일론 합성수지에 관해 공개된 관련문헌에는 열분해의 영향을 받기 쉬운 것으로 기술되어있다. <i>나일론 합성수치 지침서</i>에는 열반응의 일반적인 2가지 형태에 관해 명시되어 있다(Kohan, 1995). 하나는 폴리머의 아마이드기(amide groups)의 분해와 관련된 것이고, 다른 하나는 원료 자체의 불안정한 특성과 연관된 것이다. 후자의 경우는 카복실산의 열분해로 가스형태의 이산화탄소를 형성한다. 디-카복실산에서 생성된 나일론 폴리머는 이러한 유형의 분해에 해당될 수 있다.</p> |
|                                                                    | <p>관련 문헌에는 폴리머의 단량체 단위 분해에 대한 이외의 복합적인 가능성에 관해 언급되어 있다. 이러한 가능성을 토대로, 이외 다른 증거들과 함께, CSB조사관들은 폴리머 캐치 탱크내부의 압력원이 열분해에 기인한 가스 형성이라는 가설을 세웠다.</p>                                                                                                                                                                  |

---

부가 반응은 용융 나일론 폴리머가 가스를 생성할 수 있다는 또 다른 원리가 적용된다. Kohan(1995)은 나일론 폴리머 분자에서 분리된 2개의 아민 말기(amine ends)가 트리아민기(triamine group)와 함께 단분자를 생성하고 암모니아 분자를 생성하면서 응축반응에 결합할 수 있는 방법에 대해 설명하고 있다. 새로 형성된 분자의 트리아민 속성은 물 분자를 방출하면서, 카복실산말기(carboxylic acid end group)를 갖는 다른 폴리머 분자와의 2차 응축으로 반응 할 수 있다. 상기 2 종류의 화학반응이 발생하면, 폴리머 분자는 가지(branches)<sup>4)</sup>를 통해 화학적으로 연결된다.

이러한 현상의 결과 중 하나를 “겔화”(gelation)라고 한다. 분파된 분자들은 상당히 높은 분자 무게를 갖는 일명 겔(gels)이 된다. Amodel 공정에 대한 BP Amoco사의 문서에는 이러한 잠재적인 분화(branching)작용에 관한 간략한 내용이 포함되어 있으며, 화학반응 조합이 온도를 상승시키는 시간을 제한하게 되면 반응이 최소화 될 것이라고 명시되어있다.

August공장은 다양한 종류의 Amodel을 생산하고 있다. 다양한 종류들 간의 주요 특성은 얼마나 다양한 디-카복실산이 성분에 함유되어 있는지 여부에 따라 분류된다. Amodel은 이소프탈산과 아디핀산으로 만들어진다.

가동이 중단될 당시, 방향산(aromatic acid)의 저비율 등급이 생산되고 있었다. 유기화학의 기본 원리에는 열 안정성은 방향산 물질 감소로 저감되어야 한다고 언급되어 있다. 이러한 Amodel등급은 다른 등급에 비해 상대적으로 녹는점이 높다.

---

#### A.4.2 방출 합성수지의 특성

조사관들은 폴리머 캐치 탱크에서 방출된 합성수지의 잔여분을 수거했다. 물질은 경화되어, 깨지기 쉬운 상태였고, 기포로 가득 차 있었다(그림 A-9 참조). 그러나, 합성수지는 방출될 당시 부분적으로 용융되어 끈적한 상태에 있었는데, 일부가 근처에 있는 강관 파이프에 붙어있었고, 저장창고(shanty)측면이 용기에서 약 70피트 거리에 위치해 있었기 때문이었다.

---

**합성수지는 방출될 당시 부분적으로 용융되어 끈적한 상태에 있었다.**

---

---

4)분지(side branches)를 통한 폴리머 분자의 상호연결은 가교(crosslinking)로 알려져 있다.

---



그림 A-9. 폴리머 캐치 탱크에서 방출된 물질 시료

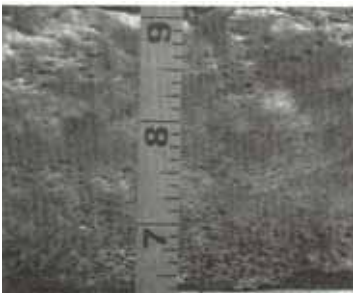


그림 A-10. 폴리머 캐치 탱크의 경계선 안쪽에 있는 경화된 폴리머층.

방출된 물질과 세포구조 내부의 기포는 물질이 용융상태에 있는 동안의 가스 생성과 밀폐 상태와 일치한다.

[크림색의 폴리머]는 용기의 벽체 가까이에 있었기 때문에, 곧 냉각되었고 부가 화학반응과 열분해 반응의 영향을 덜 받았다.

방출된 물질에 있는 기포로 인해 세포구조가 형성되었다. 따라서, 물질의 용적밀도는 압출 Amodel 상품 시료와 비교하여 상대적으로 낮았다. 그러나, 개별 세포를 싸고 있는 합성수지의 밀도는 높았다. 비중은 일반적인 압출 Amodel제품과 같은 1.1이었다. 방출된 물질과 세포구조 내부의 기포는 물질이 용융상태에 있는 동안의 가스 생성과 밀폐(entrapment)상태와 일치한다. 이러한 특성은 분해반응 및 부가 반응이-물질이 폴리머 캐치 탱크내부에서 용융되는 동안 발생한-가스와 압력을 생성한다는 이론을 뒷받침하고 있다.

일반적인 압출 Amodel완성품이 크림 색상인데 반해, 방출된 물질은 노란색을 띄고 있었다. 이러한 변색 특성 역시 장시간 동안 고온에 노출되었다는 증거이다

#### A.4.3 용기에 남아있는 합성수지의 특성

3~5인치 두께의 합성수지 링은 용융 중심부가 파열된 이후 폴리머 캐치 탱크내부에 남아있었다(그림 A-10참조). 용기 벽체 가까이에 있는 가장 바깥쪽의 일부분이 크림색인데 반해, 링은 대체적으로 노란색을 띄고 있었다. 링에 있는 합성수지는 방출된 물질에 비해 더 적은 기포를 포함하고 있었다. 기포의 밀도는 용기 벽체에서 중심부 쪽으로 갈수록 더 높게 나타났다

폴리머 캐치 탱크가 주입된 시간부터 개방될 때까지 탱크의 체벽을 통한 열손실은, 용기 벽체에 붙어있던 물질이 고체화된 당시 운전원들이 커버를 개방하기 시작한 이유를 설명해준다. 또한, 링의 경계선 가장 바깥쪽을 따라 퍼져있는 크림색이 관찰된 것 또한 이를 입증하는 증거이다. 이 물질은 용기 벽체 가까이에 있었기 때문에, 곧바로 냉각되었고 부가 화학반응과 열분해의 영향을 덜 받게 되었다.

폴리머 캐치 탱크내부의 합성수지 링에 대한 BP Amoco사의 분석 결과, 용기에서 더 멀리 떨어진 곳에 있는 노란색의 물질이 젤 형태로 되어있는 반면, 외부의 백색 물질은 전형적인 Amodel색상과 유사하다는 점이 밝혀졌다..

---

. 또한, 트리아민기 레벨이 비정상적으로 높았으며, 카복실산기 레벨은 비정상적으로 낮게 나타났다. 이러한 차이점은 용기의 벽체에서 가장 멀리 떨어진 곳에 있는 물질이 상기 언급된 분파적(branching) 부가 화학반응에 더 민감하게 반응할 수 있다는 가능성을 지적하고 있다. 이러한 반응은 가스를 생성하는데, 링의 최대 기포밀도가 벽체에서 가장 먼 곳에서 관찰된 점과 일치한다

---

#### A.4.4 단순화 열시험

사고 이후, CSB는 일반적인 압출 Amodel제품의 입상체(pellete) 시료 시험을 계획했다. 시료는 미국 텍사스주 Houston에 소재한 Polyhedron Laboratories, Inc.,로 보내졌다. 2그램(gram)의 크림색 입상체는 건조되어, 증기멸균기(autoclave) <sup>5)</sup>의 밑바닥에 배치되었으며 진공으로 만든 다음 60psig 질소로 3회 가압하였다. 결국, 물질은 315℃(폴리머 캐치 탱크의 용융 중심부와 거의 동일한 조건 하에서)로 가열되었고, 12분 동안 그 온도를 유지했다. 고형의 갈색 잔류물이 바닥에 나타났고, 스팀멸균기의 내부 표면 전체는 갈색 액체로 덮였다. 이 실험으로 결과에 따라, CSB는 Amodel이 시험 온도에서 분해된다는 결론을 내렸다.

---

*나일론 폴리머의 분해이론 관련자료를 토대로, CSB는 중량 손실이 합성수지의 분해 반응과 부가 화학반응에 각각 부분적으로 기인한다는 결론을 내렸다.*

---

이러한 실험 이후, 입상체 시료 일부가 미국 미저리주 Maryland Heights에 소재한 Chemir/Polytech Laboratories에서 열중량측정(thermogravimetry) <sup>6)</sup>에 의해 실험되었다. 입상체는 분말로 만들어져 12시간 동안 100℃에서 진공 건조되었다. 실험은 2시간과 12시간 동안 315℃를 유지하는 두 가지로 조건으로 설정되었다. 2시간 실험 결과, 중량이 2.2% 감소했으며, 2회에 걸친 12시간 실험에서는 중량 손실비율이 각각 4.9%와 5.8%로 나타났다. 나일론 폴리머의 분해이론 관련자료를 토대로, CSB는 중량 손실이 합성수지의 분해 반응과 부가 화학반응에 각각 부분적으로 기인한다는 결론을 내렸다.

5) 스팀멸균기는 고온에서 가열하고 내용물을 흔들어 저울 때 사용하는 기밀(airtight)용기이다.

6) 열중량측정은 가열 상태에서 물질의 질량변화를 측정한다. 질량 손실은 탈수, 분해, 탈착(desorption), 스팀화, 또는 가스형태의 부산물을 생성하는 화학적 반응에 기인한다.

---

---

#### A.4.5 열분석

BP Amoco사는 완성품 합성수지의 열 안정성 실험을 수행하기 위해 미국 오하이오주 Franklin에 소재한 Kinetica, Inc.,에게 실험을 의뢰했다. Kinetica사는 가속열량계(ARC)를 사용하여 실험을 수행했다.

한 등급(grade)의 Amodel 제품이 열량계에서 가열되자, 시료의 스팀공간 압력이 350℃에서 증가하기 시작했다. 상승률은 곧 380℃에 이르렀고, 최초 압력의 4.3배에 이르는 지점에서 최고점을 기록했다. 반응과정에서, 특히 압력이 증가하는 기간 동안 흡열반응이 관찰되었다.

다른 등급(grade)의 Amodel 제품을 대상으로 두 번의 실험이 수행되었다. 두 실험 모두에서, 압력은 최초에 330℃에서 증가되었다. 첫 번째 실험에서, 370℃에서 압력이 급속히 증가되었고, 두 번째 실험에서는 같은 온도에서 갑자기 압력이 상승했지만 첫 번째 실험에 비해서 속도가 느렸다. 압력의 최고점은 첫 번째 실험에서는 최초 압력의 4.5배 시점에서, 두 번째 실험에서는 4.4배 시점에서 나타났다. 화학반응 과정은 흡열성이었다. Amoco사의 내부감사 보고서에 포함된-그림 A-11은 첫 번째 실험에서의 온도 및 압력을 나타내고 있다.

ARC자료는 합성수지가 분해된다는 결론을 전적으로 입증하고 있다. 한 등급의 Amodel을 대상으로 수행된 실험에서 관찰된 압력상승에 대한 낮은 설정 온도는 이러한 조건이 다른 등급에 비해 분해반응 가능성이 더 높은 것으로 나타났다.

---

**화학반응 과정은 흡열성이었다... ARC자료는 합성수지가 분해된다는 결론을 전적으로 입증하고 있다.**

---

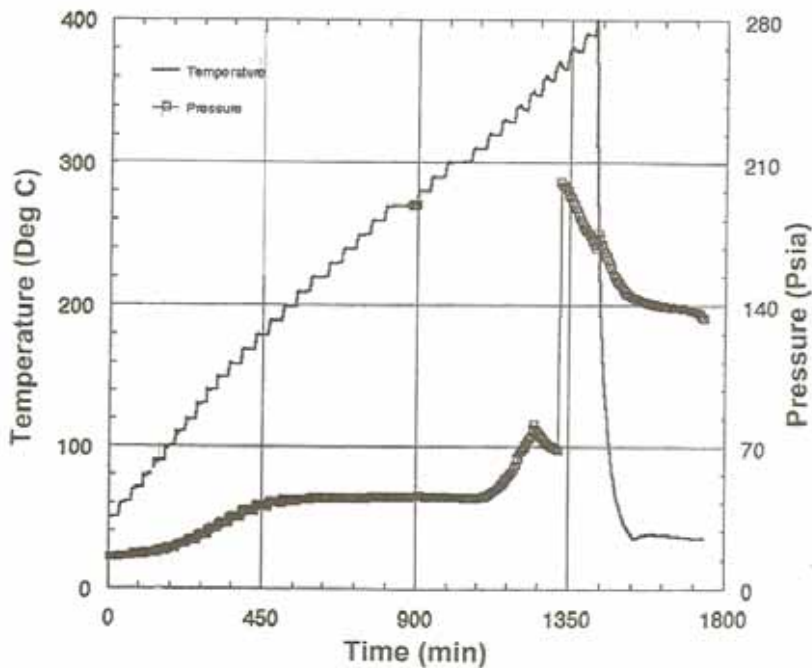


그림 A-11. Amodel 관련 ARC자료

#### A. 4.6 분석 화학

BP Amoco사는 Amodel의 열분해반응으로 생성된 스팀의 화학질량 분석을 위해 Western Kentucky University의 Thermal Analysis Laboratory에게 실험을 의뢰했다. 열중량측정 분석기는 Amodel 가열에 사용되었다. 생성된 스팀은 질량분광분석법(mass spectrometry)과 적외선분광분석법(Fourier transform infrared spectrometry)으로 분석하기 위해 수집되었다.

사내조사보고서에 보고된 내용과 같이, 연구소는 특정 가스에 대한 합성 수지의 질량 변화를 다음과 같이 제시했다.

분열반응 시 특정 가스형태의 생성물질에 대한 Amodel의 질량 변화

| 종류    | 생성질량 % |
|-------|--------|
| 일산화탄소 | 0.86   |
| 이산화탄소 | 1.93   |
| 암모니아  | 3.98   |
| 물     | 0.53   |

이러한 자료를 토대로, CSB는 가스가 제한된 조건에서 생성된 경우 압력이 발생했을 것이라는 결론을 내렸다.

---

상기 표는 적정 온도에서의 모든 가스를 표시한 것이다. 이러한 자료를 토대로, CSB는 가스가 제한된 조건에서 생성된 경우 압력이 발생했었을 것이라는 결론을 내렸다.

---

**생성된 유기 화합물의 상대적으로 낮은 분자질량은 폴리머 캐치 탱크내부의 온도에서 다량의 스팀 압력을 방출할 수 있었던 것으로 보인다.**

---

미국 일리노이주, Naperville에 소재한 BP Amoco Performance Chemicals Laboratory 에서는 폴리머 캐치 탱크의 잔류 링에서 추출된 합성수지 시료를 340℃에서 가열했다. 생성된 스팀은 가스 크로마토그래피/질량분석기에 의한 분석을 위해 초저온 트랩(cryogenic trap)에 수집되었다. 분자질량 200이하의 다량의 유기화합물질이 확인되었다. 니트릴 화합물이 다량 검출되었다.

Kohan(1995)은 니트릴 화합물은 특정 나일론 형태의 아미드기 분열로 생성된 분해 생성물들 중에 있었다. 생성된 유기 화합물의 상대적으로 낮은 분자질량은, 상기 언급된 바와 같이, 폴리머 캐치 탱크내부의 온도에서 다량의 스팀 압력을 방출할 수 있었던 것으로 보인다. 이 같은 분석을 감안할 때, 니트릴 화합물은 추가적인 가압의 원인을 제공한 것으로 추정된다..

---

#### A.5 용기 가압

---

3월 12일 오후 3:45분 이후 폴리머 캐치 탱크내부로 유입된 추가 물질은 없었다. 그러나, 이후 몇 시간 동안 용기 중심부에서의 화학반응으로 증기가 발생되었으며, 이로 인해 점착성의 용융 물질이 형성되어 팽창되었다. 결국, 형성된 물질은 캐치 탱크 전체를 채우게 되었다.

---

**물질은 배기배관과 비상 입구에서 냉각되어 고형화 되었다. 이러한 상황이 발생하자, 용기에서 가스가 배출될 수 있는 통로가 차단된 셈이었다.**

---

내부 압력으로 인하여 물질이 6인치의 배기배관과 안전밸브 입구를 포함해, 용기의 노즐 내부로 들어가게 되었다. 폴리머가 용기의 양쪽 측면과 상층부 표면에 붙어 있었기 때문에, 냉각되어 고형화 되었다.<sup>7)</sup> 또한 이러한 물질은 배기배관과 비상 입구에서 냉각되어 고형화 되었다. 이러한 상황이 발생하자, 용기에서 가스가 배출할 수 있는 통로가 차단된 셈이었다..

7)폴리머 캐치 탱크는 보온되어 있었지만, 이는 열매유 재킷으로 가열되지 않았었다. 대기에서 손실된 열이 폴리머를 고체화시킨 원인이 되었을 것이다.

---

---

통기구 시스템의 막힘은 심각한 상태에 있었고, 폴리머 캐치 탱크에서 통기구 시스템 내부로 폴리머가 밀려들어감에 따라 몇 시간 동안 상태는 더욱 악화되었다. 결국, 통기구의 막힘 상태는 더욱 더 악화되어 3월 12일 오후 8:10분 경 반응기 녹아웃 포트에 있는 안전밸브가 작동하기에

---

---

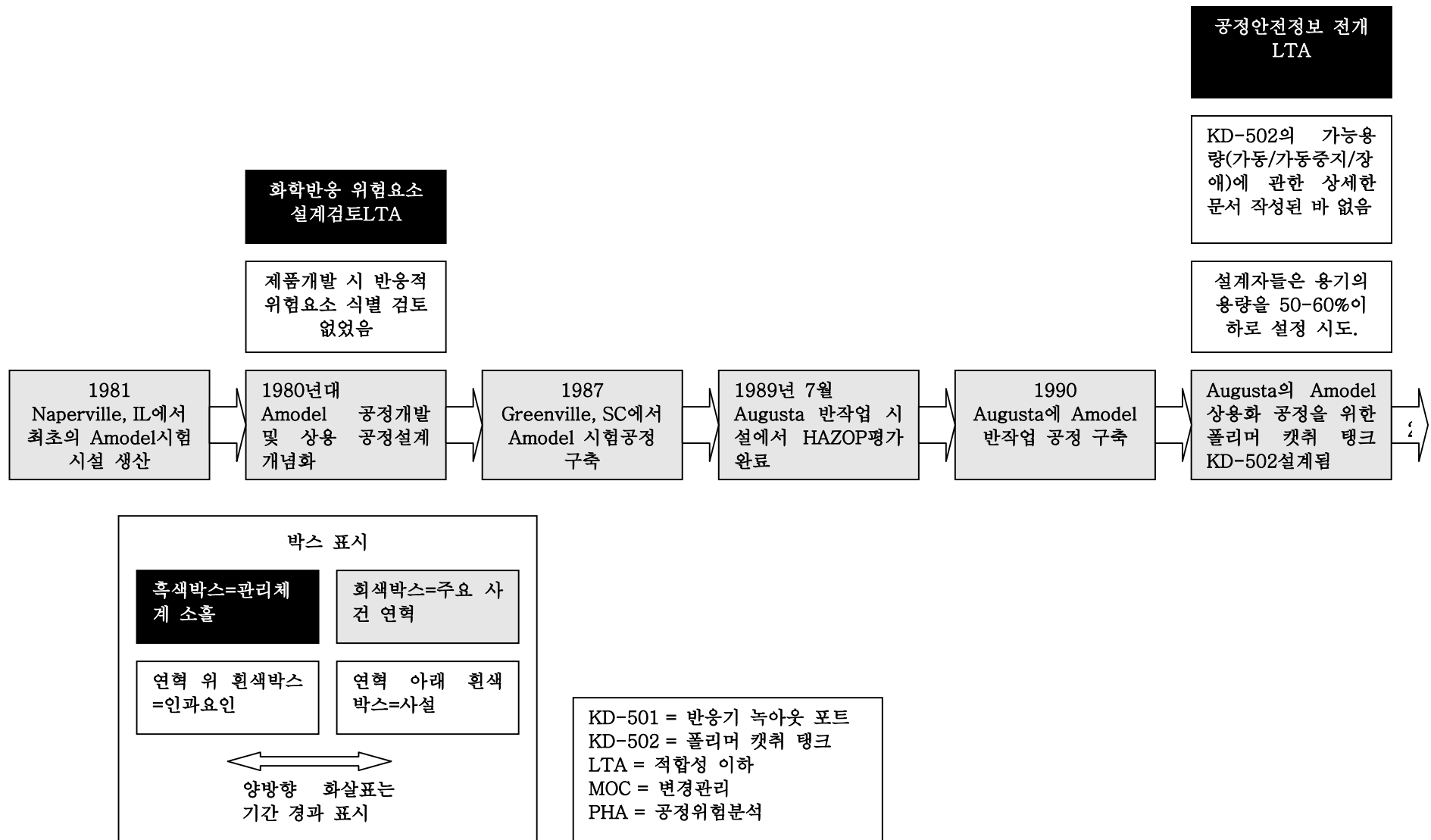
이르렀다<sup>8)</sup>.

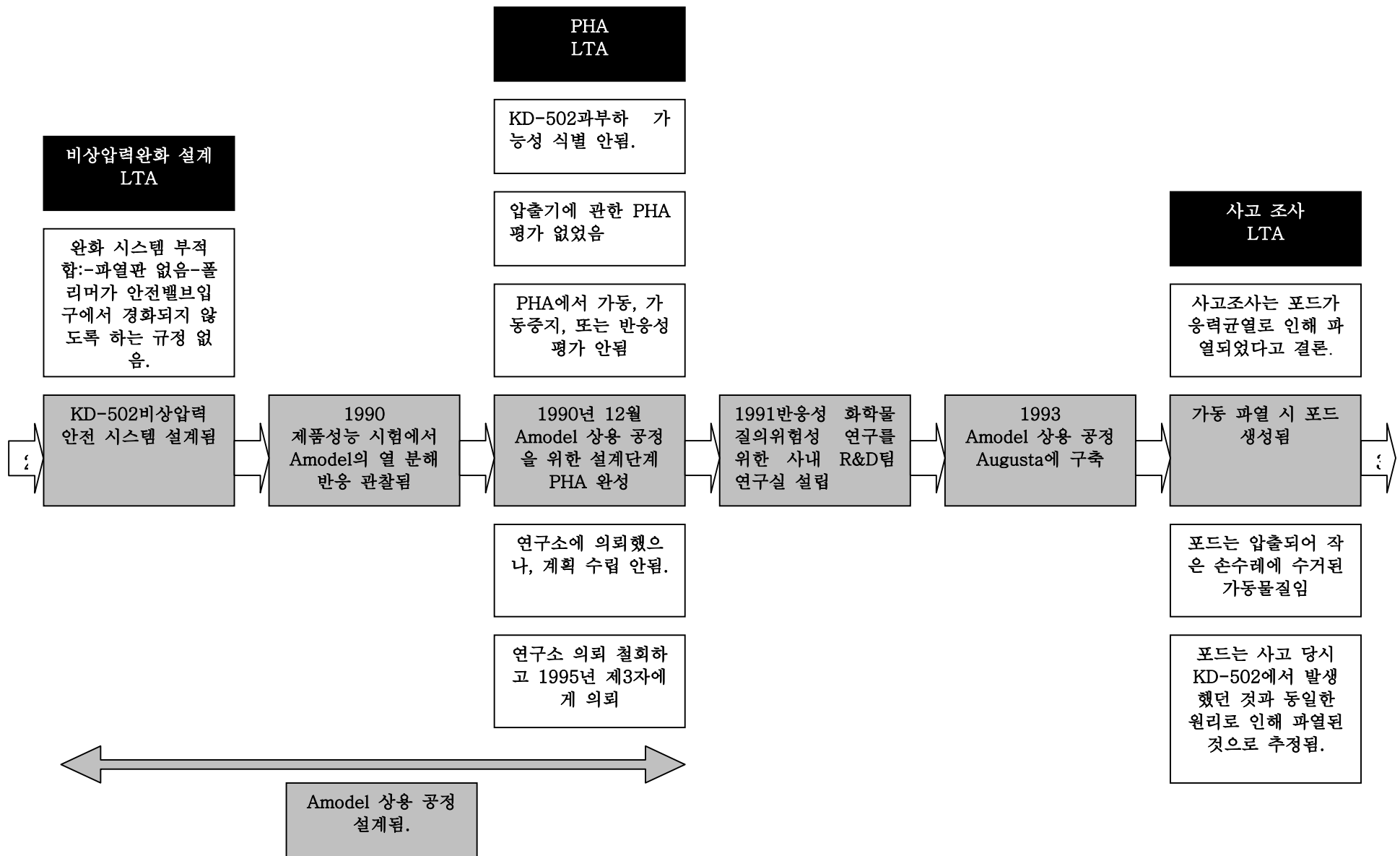
폴리머 캐치 탱크에서 발생한 열이 대기에서 점차적으로 손실됨에 따라, 고체화 현상은 용기의 내부 벽체 전체에 걸쳐 발생되었다. 3~5인치 두께의 폴리머 경화층이 생성되었지만, 그 중심부는 지속적인 화학반응으로 몇 시간 후에 분해되었고, 결국 가스를 생성했다. 갇혀있던 가스는 용기를 가압했다..

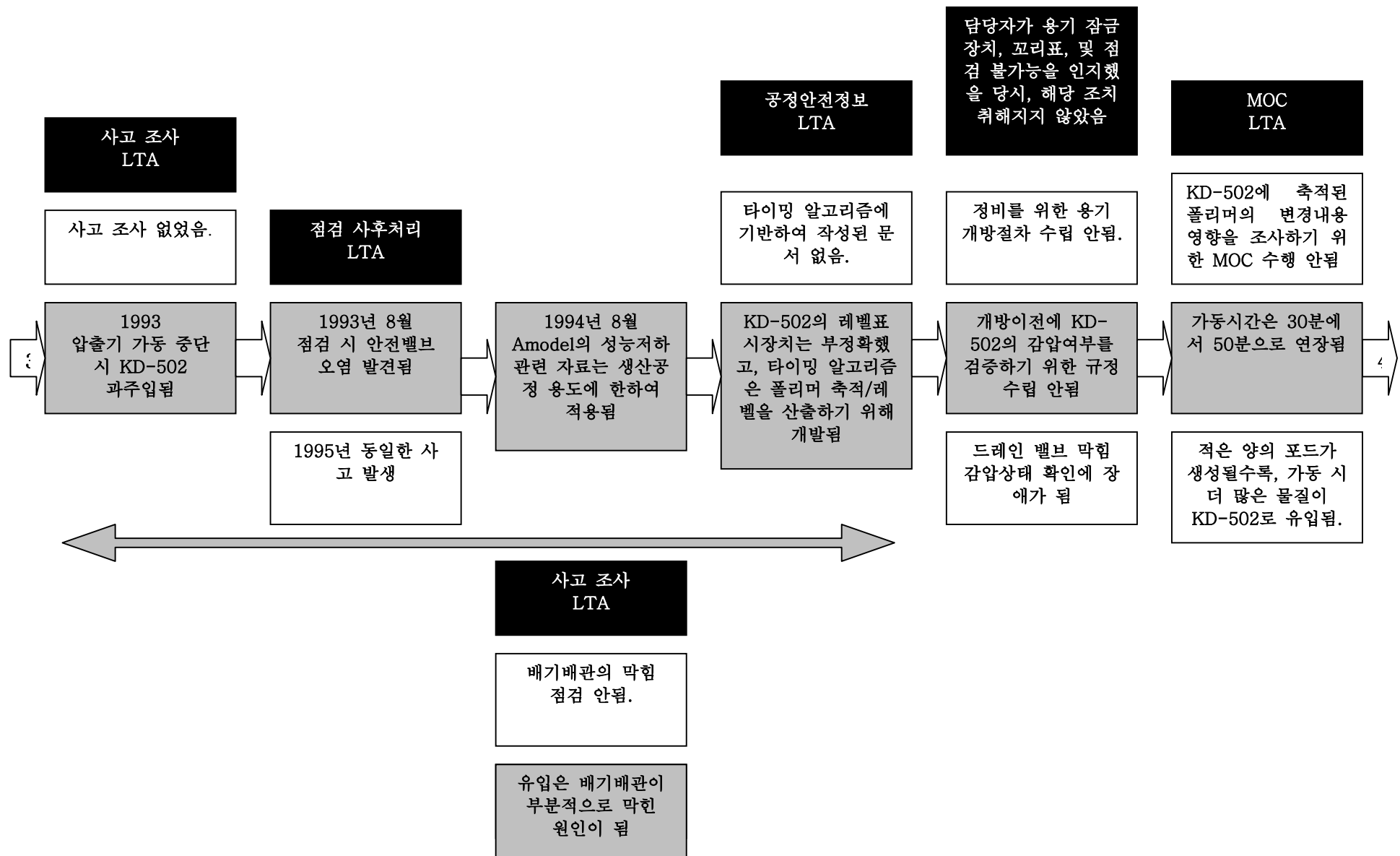
8)3월 12일 오후 6:53분에서 11:21분 사이, 물은 Amodel 공정을 통해 순환하고 있었고 스티프는 반응기 녹아웃 포트를 통해 방출되었다. 녹아웃 포트와 폴리머 캐치 탱크는 공동 배기관을 사용하고 있었다.

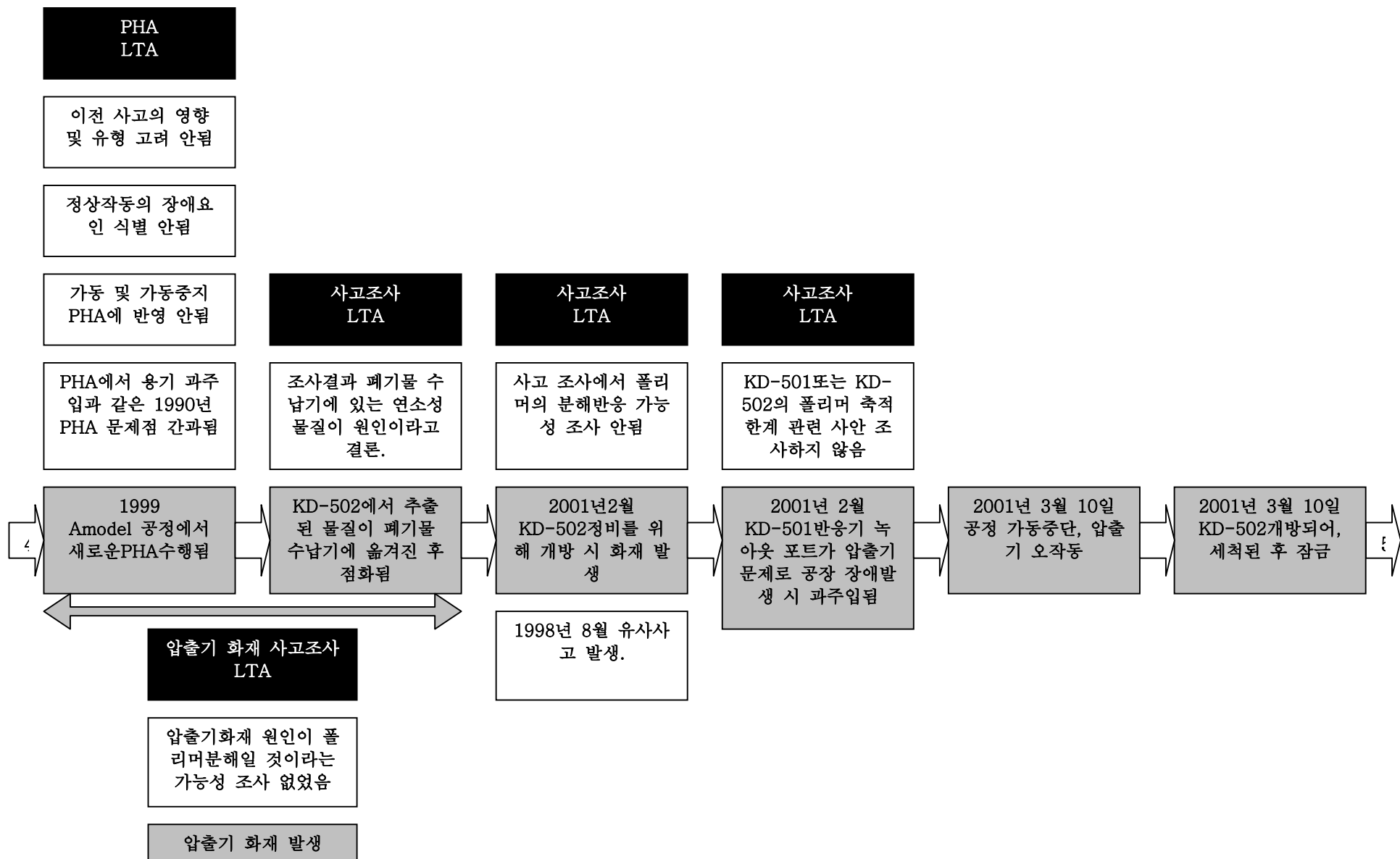
---

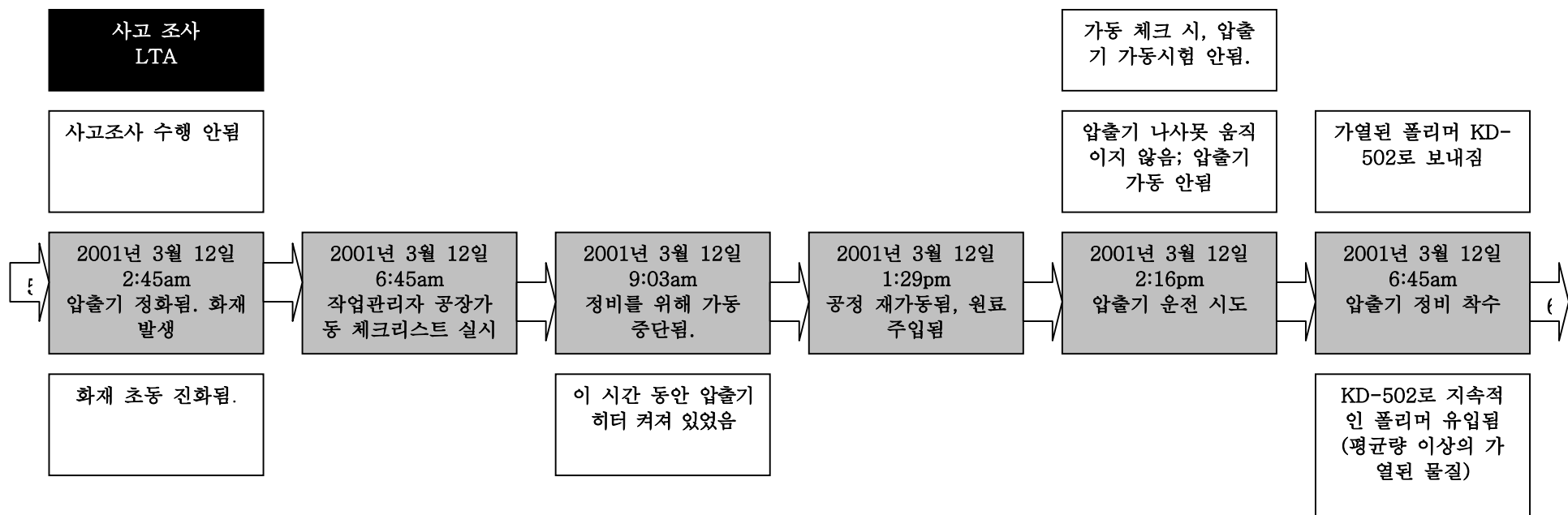
## 별첨B: 사고 연혁표

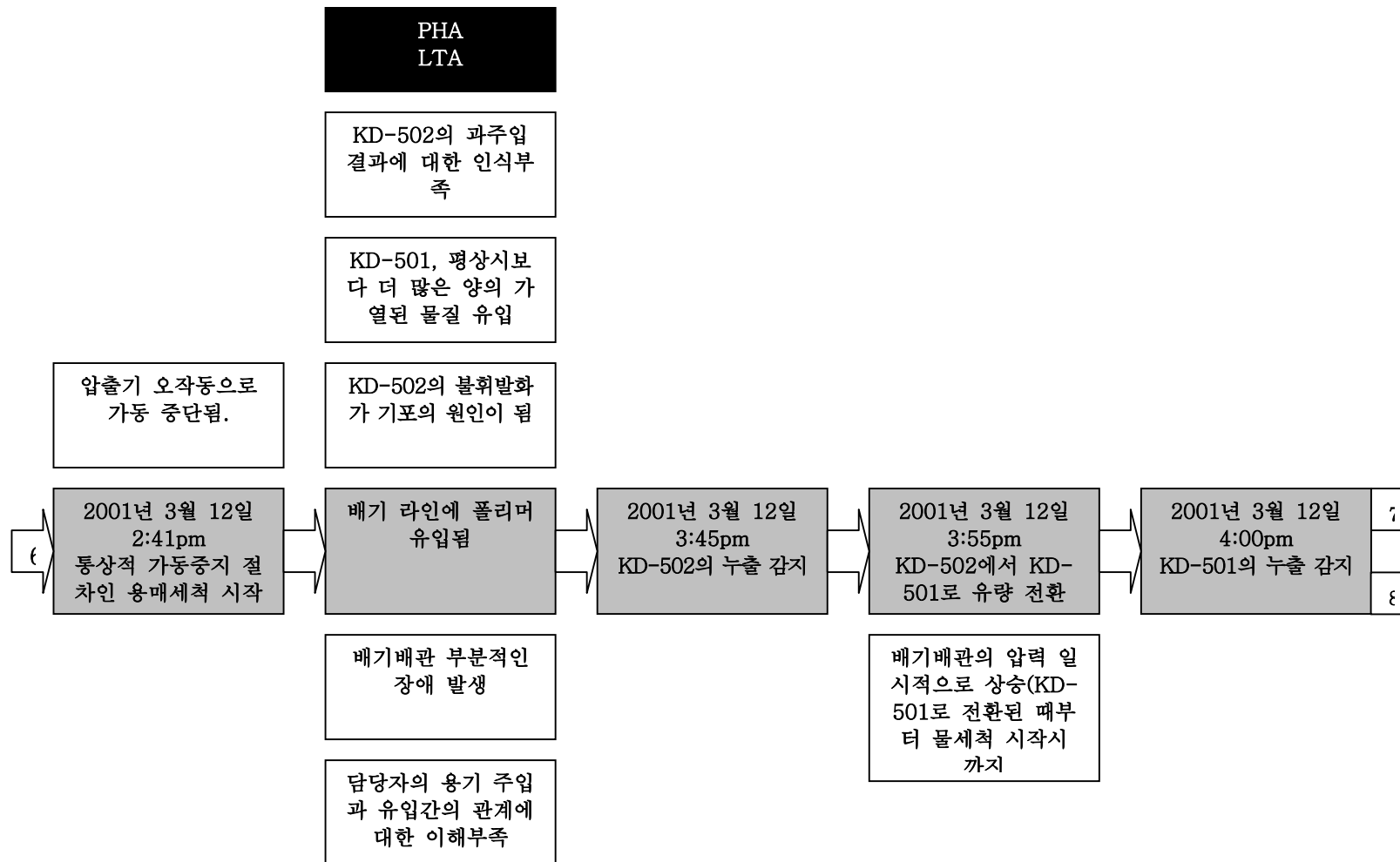


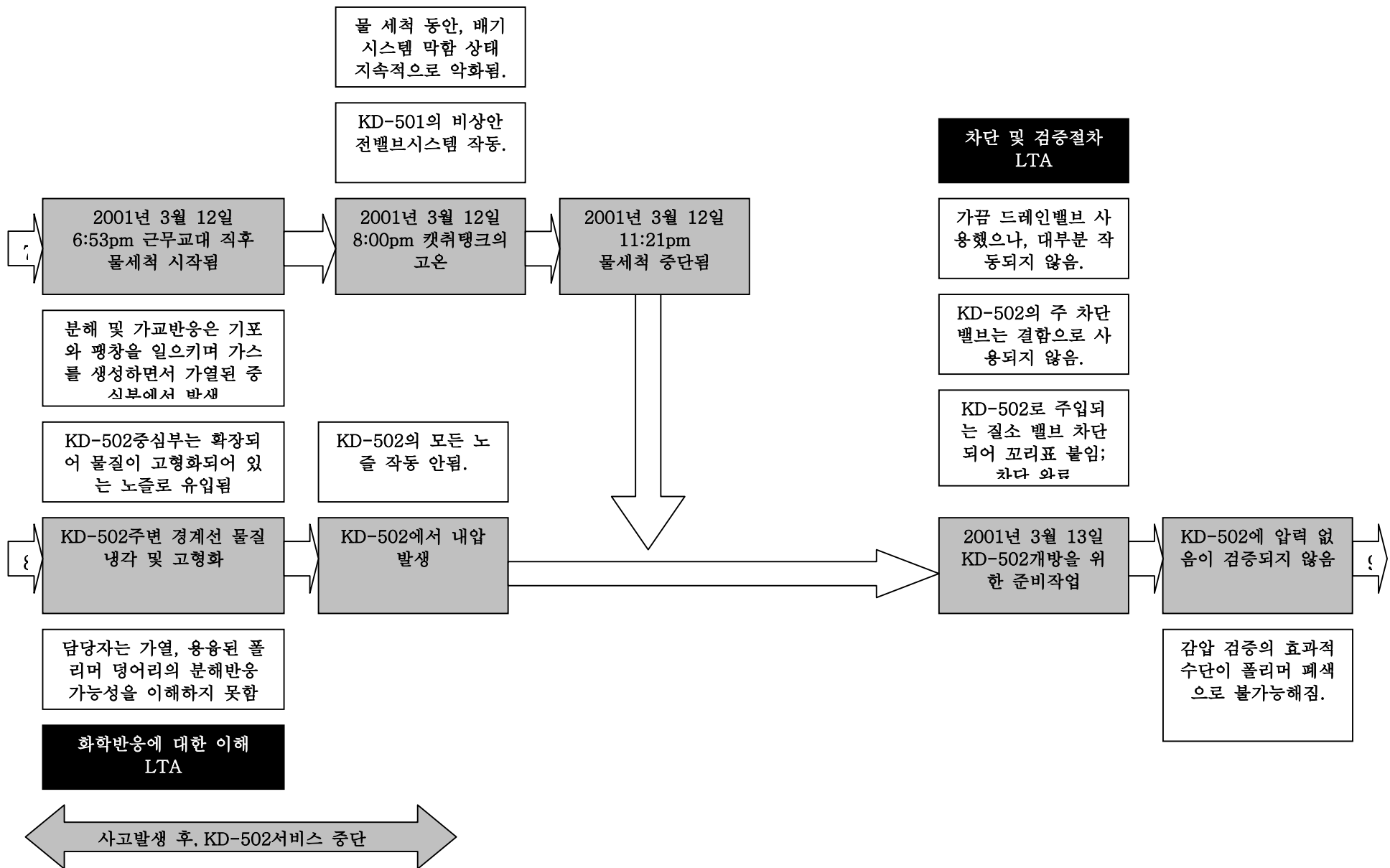


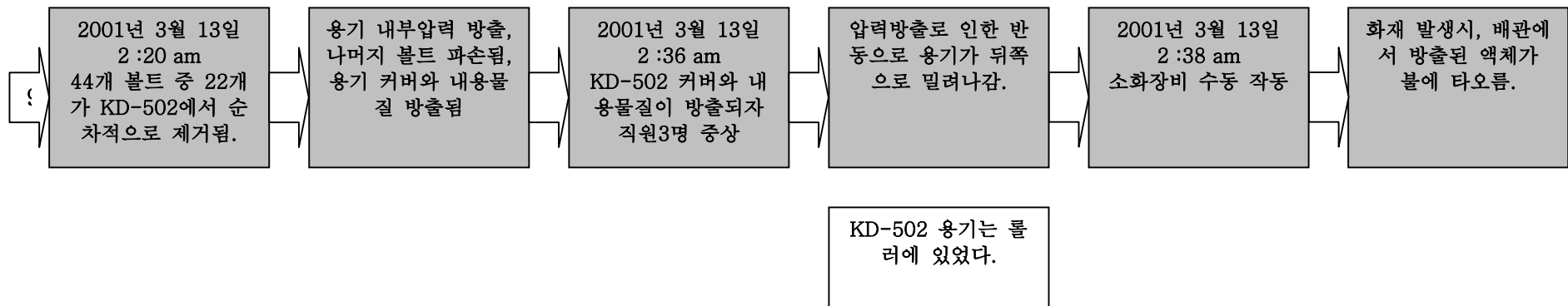




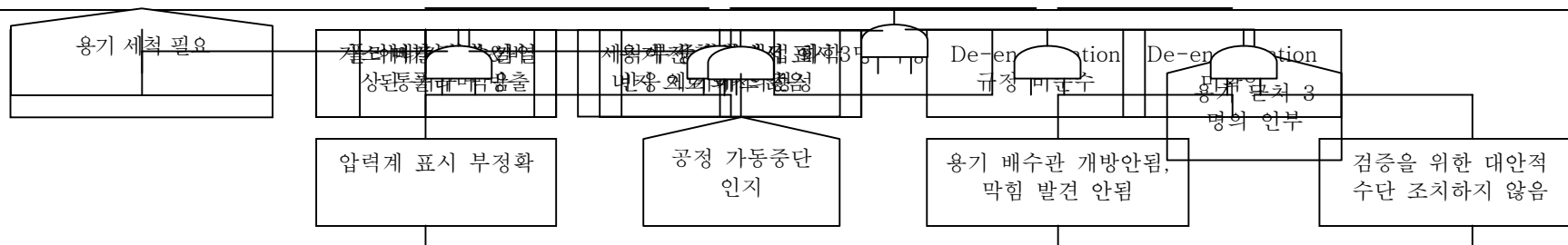






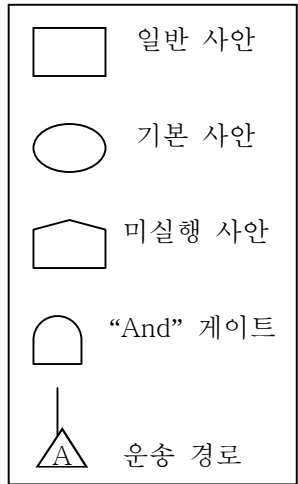


# 별첨C: 논리도



△C

△D



LTA = 적합성 이하  
 MOC = 변경관리  
 PHA = 공정위험분석

