



조지아 임페리얼 설탕공장

사고가 발생한 공장 내 설탕분말 가공 및 포장작업 공간에서 부유하는 설탕가루와 쏟아진 설탕은 상시적인 문제였고 심각하게 축적되기도 했다. 2008년 2월 7일 심각한 폭발이 발생하기 전까지 소규모 화재가 가끔 있었지만 큰 피해없이 조속히 진화되었었다. 사고 발생 2주전에 포장건물 지붕의 집진기에서 약한 폭발이 일어났는데 방폭벤딩 패널을 통해 배출되었고 그 집진설비는 사고 당시 복구되지 않은 상태였다.

포장건물과 연결된 설탕 사일로 아래에 위치한 철제 벨트 컨베이어에서 최초의 분진 폭발이 발생하였고, 이 폭발로 쌓여있던 설탕 분진이 들어올려져 분진폭발은 건물 전체로 퍼져나갔다. 포장건물 전체, 정제소 일부, 설탕 이송 건물 등으로 여러 차례의 2차 분진 폭발이 이어졌다. 뒤이은 화재로 포장건물, 사일로, 저장창고가 파괴되었고, 정제시설, 설탕이송 구역이 심하게 손상되었다. 사상자는 사망 14명, 부상 36명이었다.



사진 1. 공장 배치사진(원형표시 : 사고 사일로 및 포장 건물)

1. 일반사항

- 소재지 : 미국 Port Wentworth, Georgia
- 사고일시 : 2008년 2월 7일 저녁 7시 15분
- 폭발지점 : 포장건물 1층 사일로
- 재산피해 : 폭발로 인하여 포장건물, 저장창고, 사일로, 이송설비 지역(bulk train car loading area), 설탕정제 공정설비 지역 일부 파괴
- 인명피해 : 사망 14명, 부상 36명
- 발화원인 : 설탕 분진으로 인한 전기합선



사진 2., 3. 서쪽 버킷엘리베이터 타워, 사일로 1, 2, 3, 남쪽 포장 건물의 파괴된 모습

2. 시설 개요

2.1 생산물과 공정

임페리얼 설탕공장에서는 설탕가루, 특수 설탕제품, 액상 설탕제품 등을 만든다. 공장에서는 이 설탕제품을 대용량부터 작은 박스 포장까지 다양한 크기로 포장한다. 고객으로는 제과 회사, 식료품 회사 등이 있다. 2007년에는 130만 톤의 설탕을 만들었고 350명의 직원들이 근무하고 있었다.

임페리얼 설탕공장에는 사탕수수를 설탕과립으로 만들어내는 정제설비가 있다. 이 설탕과립은 정제설비로부터 30미터 정도의 설탕 저장 사일로로 이동하는데, 스크류, 컨베이어 벨트, 버킷 엘리베이터가 사용된다. 그런 후 특수 설탕 공정구역으로 다시 컨베이어와 버킷 엘리베이터로 이동한다. 설탕은 4층의 포장건물에서 포장되는데, 이 건물은 사일로로 둘러싸여 있다.

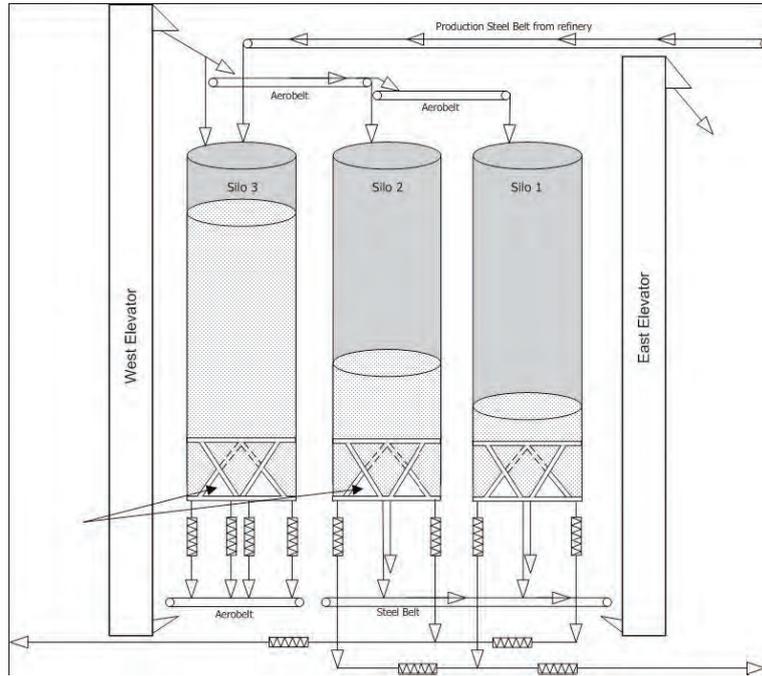


그림 1. 포장건물에서 설탕 결정의 이송로 및 사일로를 통한 방출



사진 4. 사일로 위에 있는 설탕결정 컨베이어 벨트, 관로에 두껍게 설탕분진이 쌓여있고, 바닥에도 설탕이 쏟아져 있다.

2.2 쏟아진 설탕과 분진의 관리

설탕 컨베이어와 가공 설비들은 제대로 구획되어 있지 않아, 상당한 양의 설탕이 바닥으로 흘러내려 방치된 상태였다.

부상 관련 기록, 내부 통신, 그리고 기타 기록들이 쏟아진 설탕의 심각한 축적이 있었음을 확인시켜 준다. 사고 전에 회사 감독관들과 품질관리부서에 의한 자체 검사에서는 쏟아진 수 톤의 설탕이 바닥에서 치워져야 하며, 정제시설로 보내져 재가공 되어야 한다고 지적을 하였다. 포장시설 운영자와 다른 직원들도 포장설비에서 작업공간으로 많은 양의 설탕 분진이 날아든다고 보고를 계속해왔다.

사탕수수 이송설비, 분쇄시설, 설탕가루 포장기계는 작업공간에서 상당히 많은 설탕분진을 만들어낸다. 설탕분말 가공 및 포장작업 공간에서 부유하는 설탕가루와 쏟아진 설탕은 상시적인 문제였고, 심각하게 축적되어 있는 것을 바닥에 있는 설비에서 볼 수 있었다고 작업자들은 증언한다. 한 작업자는 바닥에 있는 설탕을 치우기 위해 교대시간에 고무롤러 청소도구(Squeegee)를 사용했다고 증언하였다.

2.3 집진설비 문제

저장용기에 설탕을 채워 넣는 작업을 하는 때 발생하는 설탕분진을 제거하기 위해 집진설비를 포장기계에 설치한다. 설탕입자 선별기와 분쇄기에도 집진설비가 있다.

설탕가루와 사탕수수 처리설비에 있는 분진이송 덕트는 건식 집진기에 연결되어 있다. 설탕 결정(granulated sugar) 설비의 분진이송 설비는 습식 집진기에 연결되어 있다. 하지만, 2008년 1월의 집진설비 점검보고에 따르면, 이 집진설비들이 고장나 있고, 어떤 설비들은 너무 용량이 작거나 부적합하게 설치되어 있는 상태였다. 어떤 분진 덕트 파이프는 아예 설탕가루로 일부 또는 전체가 채워져 있는 채로 발견되기도 하였다.

공장 측은 집진설비의 유속, 압력 강하, 기타 다른 요소에 대한 개선을 위해 외부전문가를 채용하였다. 이들은 집진설비의 설계 및 유지관리의 수많은 개선사항에 대한 보고서를 제출하였으나, 불행히도 사고 며칠 전에 제출되었기에, 공장은 이 보고서의 권고사항에 대해 행동을 취할 기회를 잃어버렸다.

2.4 사고 전의 징조

이 사고 이전에 대형 폭발사고는 이 공장에서 발생하지 않았다. 하지만 분진 축적 및 부유는 지속적인 문제를 일으키고 있었다.

소규모 화재가 건물에서 가끔 있었으며, 큰 피해 없이 조속히 진화되었다고 작업자들이 증언했다. 2008년 폭발사고 2주전에는 포장건물 지붕에 있는 건식 집진기에서 약한 폭발이 일어났는데, 다행히 방폭 벤딩 패널을 통해 배출되었다. 그 집진설비는 사고 시까지 복구되지 않은 상태였다.

버킷 엘리베이터 내의 버킷이 가끔 느슨해져서 엘리베이터 바닥으로 떨어진다고 해당 시설 운영자가 이야기했다. 10년 전에는 이 떨어진 버킷이 설탕 저장고의 화재 발화원이 된 것으로 여겨지고 있다. 그 당시 다행히 큰 사고로 이어지지는 않았다.

2.5 손해보험사의 검사

재물 보험사에서 리스크를 평가하기 위해서 검사를 수행한다. 취리히 보험사는 2007년 봄에 이 공장에

대한 검사를 하였고, 보험가입자 리스크 개선 보고서를 2007년 5월 경영진에게 제출하였다.

이 보고서의 내용은, 모든 시설들에 대한 검사가 이루어졌고, 재물 손실 방지측면에서의 여러 관점에서 평가를 하였으며 건물구조, 용도별 운영, 저장물 배치, 청소 유지관리, 경영적인 손실 방지 및 자체 점검 프로그램 등을 점검하였다.

CSB 조사관들은 취리히 사의 검사가 있기 전과 후의 기록들(사진, 사고 보고서, 품질 자체관리검사, 종업원 증언)을 통해 새어 나온 설탕과 분진 축적에 대해 검토하였다. 취리히 보험사의 검사 시에 전형적인 설탕분진 축적이 사진에서 볼 수 있었고, 검사 몇 달 후에도 그대로인 상태였다는 결론을 내렸다. 하지만, 취리히의 조사보고서는 이러한 설탕분진 축적과 방치에 대해 언급하고 있지 않다.

취리히 보험사는 자사의 시설 검사관들에게 가연성 분진 폭발 위험성에 대한 훈련을 실시한다고 하였다. 이 훈련 프로그램은 수석 리스크 엔지니어에 의해 수행되고, 79페이지로 이루어졌다. 하지만, 취리히 보험사는 그 훈련 프로그램을 임페리얼 설탕공장 또는 다른 보험 가입자와 공유하지는 않았다고 한다.

3. 사고 상황

2008년 2월 7일 저녁 7시 15분 경, 새로 임명된 CEO가 3명의 근로자와 함께 공장을 순시하고 있었다. 그때 포장건물에서 마차 지게차에서 무거운 것이 떨어지는 것처럼 소리가 들려 놀랐다. 3~5초 후 뒤에서 거대한 폭발음이 들렸고, 잔해들이 포장건물 문을 통해 날아들었다.

포장건물에서 일하던 근로자들은 벽, 설비, 가구가 날릴 때까지 아무 징조도 얻지 못했다. 뜨겁게 가열된 공기로 화상을 입었고, 작업자들은 연기가 짙은 어두운 작업실에서 출구를 찾으려 애썼다. 어떤 피난구는 붕괴된 벽돌 벽과 다른 잔해들에 의해 막혔다. 폭발이 급수관을 망가트려 스프링클러도 무용지물이었다. 설탕분진이 바닥에서 떨어지면서 계속 불이 붙어, 북쪽과 남쪽 건물, 포장 건물로 계속적으로 화구(Fireball)가 이동하였다.



사진 5. 폭발 15분 후의 화구(Fireball)의 모습(포장 건물)

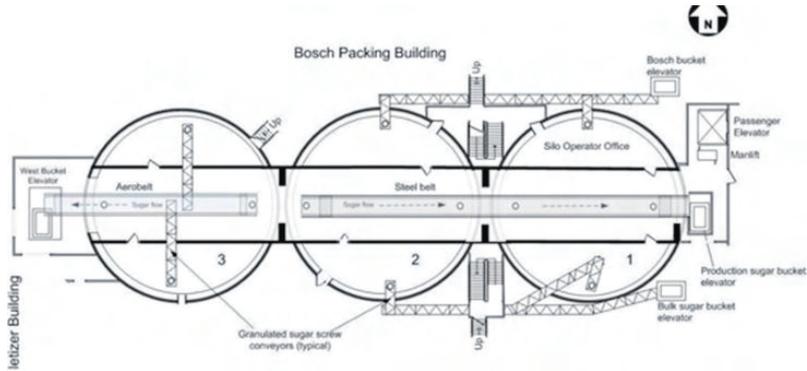


그림 2. 최초 폭발이 시작된 포장건물의 1층 도면, 가운데 원형의 사일로 아래의 컨베이어 벨트에서 폭발이 발생해 2차 폭발로 이어졌다.

설탕분진과 결정들이 설비 밑으로 비오듯 떨어지면서 불은 더욱 거세졌다. 화구(Fireball)는 계속 이동하여 최초 시작점인 포장건물에서 수십 미터 떨어진 정제시설과 저장시설까지 옮겨갔다. 설탕이 계속 가연물 공급을 해주어 격렬한 화구는 15분 이상 계속되었다.

CSB는 이 공장 화재는 최초 폭발과 여러 번의 2차 분진 폭발의 조합이라고 결론지었다. 분진 방출과 설탕 누출을 최소화하기 위해 설탕 이송과 포장 설비에 대한 일상적인 유지관리를 하였다면 2차 폭발이 현실적으로 무척 제한적이었을 것이라고 한다.

4. 사고원인분석

4.1 주요 가연성 분진의 출처

사고 3~4일 전에 근로자들이 강철 벨트 위에 있는 사일로 1 설탕 배출구멍의 설탕 덩어리를 청소했다고 증언하였다. 설탕 배출구멍 아래와 위에 있는 설탕 덩어리를 부수고 치우기 위해 철 막대를 사용하였다고 한다.

설탕 결정들이 무빙 강철 컨베이어에서 이동 중에 막혀진 배출구 근처에서 흘러내려, 설탕 분진이 구획된 컨베이어 내 최소폭발농도 이상 축적되어 버렸고, 그 후에 발화되었다고 결론 내렸다. 이 폭발은 포장건물, 저장소 등으로 2차 폭발을 빠르게 확산시켰다.

4.2 가능성 있는 점화원에 대한 고찰

가연성 분진은 스파크, 정전기, 가열 표면, 나화, 마찰로 인해 뜨거워진 표면 또는 스파크로 인해 발화될 수 있다.

(1) 벨트 컨베이어 구획 내의 점화원 가능성

CSB는 최초 발화는 사일로 1, 2 아래의 강철 벨트 구획실 내에서의 폭발로 결론지었다. 여러 개의 점화원이 부서진 강철 벨트를 검사하면서, 또 설비운영 및 관리 요원들과의 논의를 통해 나타났다. 하지만, 광범위한 폭발 및 오랫동안 지속된 화재가 정확한 폭발 원인을 결정짓는 것을 방해하였다.

4개의 리미트 스위치가 컨베이어 벨트 구획 내에 설치되어 있었다. 따라서 이것들은 부유하는 설탕 분진에 노출되어 있었다. 4개의 스위치 중 손상되지 않은 2개의 스위치를 검사한 결과 방폭형 스위치였다. 따라서 이것들은 점화원이 아니라고 결론지었다.

(2) 뜨거운 표면에서의 점화

분진운의 최소 발화온도는 실험적으로 360~420도로 알려져있다. 실험을 통해 테스트 기기에 분진운이 머무는 시간에 대한 영향도 알려져 있다.(0.1~0.4초) 이 실험에서는 머무는 시간이 늘어날수록 최소 발화온도가 줄어드는 것으로 나왔다.(Eckhoff,2003)

구획된 컨베이어 실에는 늘상 분진운이 존재하였고, 특히 배출구멍이 막혀 설탕결정을 계속 컨베이어로 쏟아버리게 되는 경우에 심하다.

설비운영자의 증언에 의하면, 강철벨트 롤러지지대의 베어링이 가끔 고장을 일으켰고, 아주 뜨거워졌다고 한다. 뜨거운 베어링은 부유하는 설탕분진을 발화시킬 수 있다. 특히 이 분진이 수십 초 동안 뜨거운 표면과 접촉하고 있다면 말이다. 또한 뜨거운 표면과 접촉하고 있는 설탕분진이 혼소를 시작하고 그 연소 가스가 부유 산소 분진과 섞이는 경우, 발화온도는 순수한 설탕 분진의 그것보다 작아지게 된다.(Eckhoff, 2003)

5. 피해상황

CSB는 설탕 사일로 밑에 위치한 밀폐된 철재 벨트 컨베이어에서 최초의 분진폭발이 발생하였다고 결론 내렸다.

벨트 컨베이어 위에 최근에 설치된 철재 덮개 패널로 인해 밀폐 공간 안에 설탕 분진이 폭발 농도만큼 축적되게 하였다. 불명의 발화원이 설탕분진을 점화시켰고, 급격한 폭발이 발생하였다. 그 폭발은 바닥과 위에 있는 수평면에 쌓여져 있던 설탕 분진을 들어 올렸고, 분진폭발은 건물 전체로 퍼져나갔다.

2차 분진폭발은 포장건물, 정제소 일부, 설탕이송 건물에서 일어났다. 폭발로 인한 압력파는 두꺼운 콘크리트 바닥을 들썩이게 하였고, 벽돌 벽을 붕괴시키고, 계단과 다른 피난통로를 가로막아 버렸다. 뒤이은 화재는 포장건물, 사일로, 저장창고를 파괴하고, 정제시설과 설탕이송 구역을 심각하게 손상시켰다.

포장건물에서는 1층에서 부상 8명(이후 2명 사망), 2층에서 사망 5명, 부상 8명(이후 2명 사망), 3층에서 사망 1명, 부상 9명(이후 1명 사망), 4층에서 사망 2명 등의 사상자가 발생하였고, 전체 사상자는 사망 14명, 부상 36명 이었다.

6. 사고를 발생시킨 원인들과 사고를 더욱 악화시킨 원인

- (1) 설탕과 사탕수수 이송 설비는 설탕과 설탕분진을 작업구역으로 퍼지는 것을 최소화할 수 있게 설계되거나 유지관리되지 못했다.
- (2) 청소관리가 적절치 않아 바닥과 위쪽 표면에 가연성 설탕 파우더가 포장건물 전체에 축적되어 있었다.
- (3) 사일로 1, 2 밑의 구획된 강철 벨트 컨베이어 내에서 부유하는 가연성 설탕 분진이 폭발가능 농도를 이루었다.
- (4) 강철 벨트 컨베이어 내에 과열된 베어링이 분진폭발을 점화시킨 것으로 가장 유력하다.
- (5) 사일로 1, 2 밑의 강철 컨베이어 벨트 내에서 주 폭발이 포장건물 전체의 엄청난 2차 폭발 및 화재를 촉발시켰다.
- (6) 14명의 희생자는 2차 폭발 및 화재에 의한 것으로 강력히 추정된다.
- (7) 공장의 비상 피난 계획이 부적절하다. 정제시설 내와 포장건물 내에서의 비상경보는 쌍방향 무전기와 휴대전화로만 직원들에게 통보되었다. 많은 직원들은 비상시에 구두로 경고를 전달하였다. 또한 회사는 비상 피난 훈련을 수행하지 않았다.