

LPG 충전소 중대사고의 피해효과에 관한 연구

- 부천 LPG충전소 사고 사례를 중심으로 -

노삼규* 김태환** 함은구*** 홍창문****

◇ 목 차 ◇

- I. 서 론
 - II. 사고개요 및 피해현황
 - III. 중대사고의 피해 및 결과분석
 - V. 결 론
 - 참고문헌
 - ABSTRACT
-

I. 서 론

요근래에 발생한 대형사고를 분석하면 안전에 대한 관심과 노력 덕분으로 사고 건수는 줄어드는 추세이나 많은 사상자와 피해를 동반하는 추세를 보이고 있다. 특히 가스사고

* 광운대 건축공학과 교수, 공학박사.

** 서울대 안전센터 초빙교수, 공학박사.

*** 광운대 건축공학과 석사과정.

**** 삼성화재 위험물관리연구소.

본 연구는 1998년도 광운대 학술 연구비 및 한국과학재단(KOSEF 96-0602-01-01-3)의 지원결과임.

는 그 피해뿐만 아니라 폭발압에 의해 반경 수십·수백미터까지 그 Damage를 입고 있다.

최근 발생한 부천 및 익산의 LPG 충전소 사고는 사상자 및 건물 피해 등 그 피해액이 중대재해의 범주에 속하는 대형 폭발사고로 순간적인 폭발에 의한 폭발압과 방출열 효과는 인근 건물이나 거주자에게 치명적인 결과를 초래한다.

이러한 LPG 충전소의 폭발사고는 사고빈도보다 피해강도가 큰 특성을 갖고 있으며 도심에 위치한 관계로 도시외곽에 위치한 LPG 충전소보다 상대적인 피해효과가 극히 크며 이러한 시설에 대한 대중의 우려도 커지고 있다고 할 수 있다.

이러한 배경에서 본 연구는 부천 LPG 충전소 사고를 모델로 하여 폭발에 따른 거리별 피해효과를 상정하여 그 피해에 대하여 진단하며, 국내의 LPG 충전시설의 중대재해시 피해정도를 평가한다.

본 연구에선 부천 LPG 충전소의 사고시 화재, 폭발 강도는 어느 정도범위까지 위험성이 미치는가를 사고 당시의 상황을 중심으로 근거리에 위치한 구조물의 피해와 유리창 파괴 정도를 중심으로 그 영향을 분석하여, 그 결과를 PHAST(Process Hazard Analysis Software Tools) MODELING과 비교한다. 이러한 분석의 결과는 구조물에 미치는 과압 및 복사열 이산거리 검증 작업과 내압 및 내열성에 대한 실험결과와의 일부로 DATA화한다.

II. 사고개요 및 피해현황

1. 부천 사고개요 및 사고내용

부천시 오정구 소재 D에너지 LPG 충전소에서 1998년 9월 11일(금) 14시 14분경 화재 폭발이 발생하여 인명피해 및 재산손실이 발생하였다.

사고내용은 1998년 9월 11일 13시 30분경 검사를 종료하고 충전소를 떠난 후, 14시경 안전관리자가 작업장의 상주하지 않았는 데도 탱크로리 기사가 혼자서 임의로 부탄 탱크로리(12톤)에서 지하 부탄 저장탱크(39.9톤)로 이·충전 작업을 하기 위하여 액체라인과 기체라인의 로리호스 커플링을 체결한 후 사무실 입구에 설치된 전기 배전판에서 압축기 전원 스위치를 작동시켰으며, 탱크로리 운전자가 이·충전 상태를 확인하지 않고 사무실에 있을 때 밖에서 누군가 가스누출을 인지하고 “가스가 샌다”는 외침에 안전관리자가 듣고 사무실 입구에 설치된 긴급차단장치를 작동시키고 기계실로 뛰어가

핸들이 큰 밸브만 잠그던 중 외부에서 화염이 기계실로 번져 오는 것을 보고 대피하였고, 이로 인해 기계실 옆에서 충전 작업중이던 탱크로리가 파열되는 등 인명 및 재산 피해를 일으킨 사고였다.

이로 인해 용기 충전장에서 지속적이고 격렬한 화염이 탱크로리를 가열시킴으로서 내부온도 110℃, 압력 18Kg/sq cm 정도에서 안전밸브가 작동하였으나, 급상승한 내부 압력과 임계온도 이상에 도달한 탱크로리는 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) 현상이 발생되면서 파열됐다.

2. 발생 시간대별 개요

- ① 10:30~12:30 가스안전공사에서 탱크로리 이충전 배관의 기밀시험 (약 18kg/cm²) 등 정기검사를 실시함.
- ② 15톤 용량의 부탄 탱크로리 및 프로판 탱크로리 2대가 충전소에 도착, 프로판 탱크로리는 대기, 부탄 탱크로리는 지하 저장탱크에 기밀시험 완료 후 하역작업을 실시함.
- ③ 14:14 - 기계실 주변에서 화재, 폭발발생
- ④ 14:24 - 부탄 탱크로리 복사열에 의한 가열로 2차 폭발, 2차 폭발에 의한 프로판 탱크로리 3차 폭발(비등액적 팽창 증기폭발)
- ⑤ 17:10 - 주변화재 진압되었으나 지하 저장탱크에서 프로판 및 부탄가스가 계속 누출, 연소됨에 따라 6일 후에야 완전 소화됨.

3. 사고현장 피해상황

사고현장 피해상황은 충전소 내의 건물 및 시설, 용기 등이 소손되었고, 기계실의 방호벽은 2면이 파손되어 형체를 알아볼 수 없었다. 또 충전소 주위 반경 약 100m까지 화재 및 폭발로 건물에 피해를 주었고 탱크로리 차량 등 122대 전소 또는 파손, 충전 보관중이던 용기 5,750여개가 열영향 및 파열되었다. 부탄 탱크로리는 파열되면서 앞경판이 약 67.4m, 프로판 탱크로리는 후경판은 약 28.5m, 앞경판은 동판 일부와 함께 약 12.6m 비산되었으며, 지하 저장탱크에 있는 잔류가스를 6일 동안 퍼지(Purge)시켜 소멸시켰다.

Ⅲ. 중대사고의 피해 및 결과분석

1. 피해조사

피해조사 방법은 현장 답사를 통해 사고 대상 설비와 그 주변 시설들에 대하여 다음과 같은 사항을 조사하였다.

대상지역 내 구조물의 폭풍압 및 방출열에 의한 피해정도 조사, 인근의 건물 내, 외벽의 파괴정도, 폭풍압에 의한 유리창 파괴 정도 등을 조사하였다. 이러한 피해조사 data를 바탕으로 먼저 사고 현상에 따른 폭풍압의 영향범위를 PHAST 프로그램을 통하여 산정하고 그 결과를 실제의 현장조사를 통해 나타난 유리창 파괴 정도와 비교하여 이론치와 현장의 경험치와의 상관관계를 규명한다.

두 번째로 방출열에 의한 영향 범위도 PHAST 프로그램상의 이론 방출열과 사고 당시 열상의 의한 경험치를 비교한다.

세 번째 구조적인 측면에서 건물 외부 치장재의 파괴정도과 구조체 벽면에 균열정도를 육안검사와 측정장치를 통한 조사로 나타난 결과를 건물의 콘크리트 요구 구조 강도와 비교 결함 상태를 파악하고 구조물의 어느 정도의 물리력이 가해졌는지를 분석한다.

2. 피해결과 분석

사고의 피해결과는 전형적인 BLEVE/Fieball에 의한 피해결과로서 사고 형태는 주로 과압에 의한 구조물 피해와 방출열에 의한 열상의 피해로 나타났다. 먼저 과압에 의한 피해는 사고 지점 인접 구조물의 경우 방출열에 의한 피해와 동시에 나타나기 때문에 육안으로 구별 하기는 한계가 있다. 따라서 과압에 의한 피해는 PHAST MODELING을 통해 산정된 데이터와 유리창 파괴 등으로 극명하게 과압에 의한 피해로 보여주는 데이터를 비교하여 산정하였다. 복사열에 경우, PHAST MODELING을 통한 결과 값을 구조물 열상 피해와 치장재의 열상 유무, 특히 인체의 화상 정도와 비교해 볼 때 PHAST MODELING 결과와 실제 피해와의 오차가 거의 없는 것으로 나타났다.

(1) PHAST MODELING 통한 프로판 15톤(BLEVE)에 대한 방출열 및 과압에 의한 피해범위

① PHAST MODELING 통한 프로판 15톤(BLEVE)에 대한 방출열에 의한 피해 범위 [표1 참고]

표1에서 방출열 $12,500 \text{ kw/m}^2$ 는 나무를 연소시키는 최소 점화 에너지로 영향범주가 약 190.20m 까지 나타나고 실제로 사고 당시 이 범주에 있던 사람 대부분이 2도 화상 정도를 입은 것으로 나타났다. $25,000 \text{ kw/m}^2$ 에 경우 영향범주는 140.40 m^2 로 이 범주에서 나타난 피해정도는 3도 화상이 대부분이며 건물 치장재 등의 용융이 된 현상을 나타냈다. 그리고 $37,500 \text{ kw/m}^2$ 에 경우 104.70m에 영향범주를 가지며 구조체의 심각한 열 손상을 가져왔다.

② PHAST MODELING 통한 프로판 15톤(BLEVE)에 대한 과압에 의한 피해 범위 [표2 참고]

표2는 과압이 미치는 범위를 거리대별로 나타낸 것이며 최고 14.5psig가 반경 60m까지 일정하게 나타나며 그 이후로 급격히 감소하는 형태로 나타난다. 실제로 이 영향범위에 포함되는 구조물이 과압에 의한 충격파로 유리창 등의 완파는 물론 구조체의 크랙이 나타났다. 그리고 각각의 과압 레벨에 따른 피해 반경을 나타낸 것으로 0.1psi 경우 10% 유리창의 파괴를 가져 올 수 있는 과압으로 약 1400m까지의 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다.

(2) 부천사고 과압별 PHAST결과와 실제 조사치 비교 [표3 참고]

표3에서 나타나듯이 부천 충전소 사고를 PHAST MODELING과 실제 피해로서의 동일과압 수준에 나타난 거리를 비교한 결과 실제 과압이 미친 거리로 평균 15.42로 감소한 거리에 나타난다. 이러한 이유는 BLEVE에 의한 용기 폭발시 압축 Energy가 40~80% 폭발압으로 전환되어 용기 파열효과로 전위됨과 동시에 과압이 최종 피해 목적물에 이르기까지 건물 등 구조물이 중첩되어 그 효과가 감소한 것으로 추정된다.

3. 구조물 피해

LPG 폭발 당시 연속적인 폭발과 장기간의 화재로 인해 인근 건물 대부분이 파손 및 그을림 피해가 발생하였으며, 특히 화재가 장시간 지속된 건물의 경우 내부의 구조물

일부가 탈락되어 있으며 탱크로리 파편으로 인해 인근건물 외벽 파손이 현저하게 나타났다.

충전소 주변의 4~5층 건물들은 폭발 및 화재로 인한 직접적인 피해로 그 손실규모가 매우 클 것으로 추정되나 나머지 건물의 경우 상기 건물이 방호벽을 함에 따라 큰 피해는 발생되지 않았다[표4 참고] [그림1 참고].

구조물 화재 조사를 1차적으로 육안에 의한 상태조사를 우선적으로 시행하였으며 화재로 인한 손상부위가 큰 일부 건물에 대해서는 화재로 인한 내하력 저하 유무를 파악하고자 콘크리트 테스트 해머 등 비파괴 장비를 이용한 콘크리트 압축강도를 측정하였다.

그 상태를 조사한 결과 :

① 건물 (W 전기공업)

3층 RC조 SLAB층의 건물로 탱크로리와의 이격거리는 20m이며 탱크로리 폭발시 탱크의 일부가 비산, 본 건물의 외벽부에 충격을 주어 외벽(조적벽)의 일부가 파손되어 있는 상태로 나타났다. 또한 과압에 의해 창문이 모두 부숴져 있으며 장시간의 화재로 인해 건물의 외벽과 내부부재(기둥, 보, 슬래브) 등이 검게 그을려 있는 상태로 나타났다[그림2 참고].

② 건물 (W 전기공업 후면 건물)

본 건물도 상기 건물과 마찬가지로 3층 RC조 SLAB층의 건물로 폭발 당시 ①의 건물(우진전기공업)이 방폭역할을 함에 따라 건물의 손상은 없으며 또한 창문의 파손도 전혀 없는 상태였고, 다만 인접한 ①의 건물이 장시간의 화재로 인한 연소로 본 건물의 외벽이 약간 그을린 상태로 나타났다[그림3 참고].

③ 건물(C 정밀)

2층 RC조 SLAB층의 건물로 건물 외측부 창문 개구부를 중심으로 균열이 발생되어 있는 상태이며 이러한 현상은 건조수축에 의한 균열현상으로 사고 이전에 발생되어 있는 균열로 추정된다.

④ 건물 (K 전기)

2층 RC조 SLAB층의 건물로 건물외관상 피해의 흔적은 없으나 건물에 세로로 부착된 간판의 경우 열 또는 과압에 의해 골격만 남은 상태로 나타났다.

⑤ 건물 (T 냉동)

3층 RC조 SLAB층의 건물로 폭발로 인한 비산으로 건물 외벽부에 약간의 ncdehfgms적이 있으나 부재의 손상은 없는 상태로, 다만 외벽쪽에 적재물과 차량의 화재로 인해 그을린 상태이며, 건물의 1,2층 내부는 화재가 발생하지 않았으나 3층 내부는 전소되어졌다[그림4 참고].

⑥ 건물 (B 금형)

2층 RC조 SLAB층 지붕으로 옥탑에 간이 PANEL 형식의 단층건물이 있었으나 폭발로 인한 과압 및 화재로 인해 지붕 위의 단층건물이 전소되었으며 1,2층 건물 내부도 화재로 인해 전소되어 있는 상태임. 건물의 일부 파손부위는 화재에 의한 붕괴 외에도 상부구조물 붕괴에 따른 충격하중으로 일부 붕괴되었을 것으로 추정되어진다[그림6 참고].

그 결과를 분석해 보면 보통의 콘크리트에서는 300~350℃ 이상이 되면 강도저하가 현저하게 되고 500℃에서는 강도의 약 60% 이하로 저하됨. 일반적으로 콘크리트에서는 500℃ 이상에 가열된 것을 구조재로써 재 사용하는 일은 안전에 좋지 못한 결과를 초래할 수도 있다.)

조사대상건물의 현재의 상태, 결합정도, 콘크리트 압축강도에 대한 조사결과는 W 전기의 경우 탱크로리 폭발에 따른 비산으로 외벽부가 일부 파손되었으며 폭발지점 측 기둥과 벽체의 균열이 타부재에 비해 균열현상 및 폭(1.2mm로 허용기준 초과함)이 현저히 나타남에 따라 과압에 의한 것으로 추정되고, 장기간 화재로 인해 내부부재에 균열이 발생하였으며 기둥의 강도가 118.8kg/cm², 121.8kg/cm²로 측정되어 설계기준강도 210kg/cm²에 비해 강도가 매우 저하된 것으로 판단된다.

D 냉동의 경우 외벽쪽에 적재물과 차량의 화재로 그을린 상태이며 3층 내부 부재의 균열은 화재시 콘크리트표면온도 상승에 의한 부재의 수축으로 균열이 발생되었을 것

1) 「고온하에서의 콘크리트 성상변화(콘크리트학회 논문, 1997)」

화재를 입은 콘크리트의 압축강도는 그 화재온도의 100℃~300℃ 범위에서 화재를 입지 않은 콘크리트보다 높게 나타나고, 400℃ 이상의 고온 시에는 전반적으로 낮게 나타났으며, 800℃에서는 1/10 이하로 나타났다. 이것의 특징 중에서 100℃~300℃ 범위에서 화재를 입지 않은 콘크리트 강도가 높게 된 원인으로 건조수축에 의한 것인지 시멘트의 수화반응이 촉진된 것인지는 연구자료에 따라 다른 견해를 가지고 있으며 지금까지 명확하게 밝혀지지 않고 있다.

- 가열된 콘크리트의 강도회복

일반적으로 가열온도가 상승함에 따라 잔존 강도비는 직선적으로 저하하고, 700℃를 넘어서면 대부분의 콘크리트는 잔존강도비가 50% 이하로 되며, 그 후의 강도회복도 기대할 수 없는 것으로 알려지고 있다.

으로 추정되고, 또한 철근과 콘크리트의 부착력저하로 발락현상이 발생하였고 내부콘크리트벽체와 보의 강도측정결과 118.1kg/cm^2 과 $124.7118.1\text{kg/cm}^2$ 로 측정되어 강도가 매우 저하된 것으로 판단된다.

기타 건물의 내·외부 또는 옥탑부 등의 피해는 대부분 화재시 열효과의 피해로 판단된다.

조사된 압축강도 결과치를 기초로 하여 사고 당시 콘크리트에 미친 화재정도를 추정한 결과는 압축 강도 측정치는 평균 120kg/cm^2 로 설계기준강도 210kg/cm^2 (추정치)에 대한 비는 $57\%(=120 \times 100 / 210)$ 로 상기표를 기준으로 약 500°C 온도가 콘크리트에 영향을 준 것으로 나타남. 그러나 대부분이 시공 당시 설계기준강도 이상으로 시공되었을 것으로 추정되므로 당시 실제 콘크리트 강도를 $230 \sim 280\text{kg/cm}^2$ 정도로 시공되었을 것으로 가정한다면 이 때의 콘크리트에 가열된 온도는 약 500°C 이상이 될 것으로 추정된다.

일반적으로 가열온도가 상승함에 따라 잔존강도는 저하하고 700°C 를 넘어서면 대부분의 콘크리트는 잔존강도비가 50% 이하로 되며, 그 후의 회복강도도 기대할 수 없는 것으로 알려지고 있다. 그러나 다음의 표를 참조하면 가열온도가 500°C 이하의 경우에는 콘크리트의 강도는 냉각 후 약 1개월에서 최저치를 나타내지만 그 이하에서는 시일이 경과함에 따라 회복하여, 냉각 후 1년에서 90% 이상으로 나타났다.

IV. 결 론

부천 충전소 사고를 PHAST MODELING을 통한 이론치와 실제 피해조사치의 동일 과압 수준에 나타난 거리를 백분율로 환산하여, PHAST MODELING을 통한 이론치에 의한 피해효과와 실제 조사에 의한 경험치의 피해효과를 비교 이론치와 경험치의 상관관계를 분석하였다.

분석결과 실제 피해과압은 PHAST MODELING결과의 평균 15.42% 감소된 영향거리로 나타났다. 이러한 이유는 BLEVE에 의한 용기 폭발시 압축 Energy가 40~80% 폭발압으로 전환되어 용기 파열효과로 전위됨과 동시에 과압이 최종 피해 목적물에 이르기까지 건물 등 구조물이 중첩되어 그 효과가 감소한 것으로 추정된다.

사고 대상 인접 건물의 조사된 압축강도 결과치를 기초로 하여 사고 당시 콘크리트에 미친 화재정도를 설계기준강도와 압축강도 측정치를 비교한 결과 약 500°C 온도가 콘크

리트에 영향을 준 것으로 나타났다.

보통의 콘크리트에서는 300~350℃ 이상이 되면 강도저하가 현저하게 되고, 500℃에서는 강도의 약 60% 이하로 저하된다. 일반적으로 콘크리트에서는 500℃ 이상에 가열된 것을 구조재로써 재사용하는 일은 안전에 좋지 못한 결과를 초래할 수 있다고 판단된다.

사고로 인한 성상변화의 주요원인은 과압에 의한 충격하중으로 건물의 분손 및 균열이 나타났으며, 과압이 미치는 영향효과는 건물의 배치상태 및 위치에 따라 크게 저감될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 대체로 이번 사고의 경우 BLEVE현상의 결과 열 효과에 의한 구조물 피해가 과압의 영향보다 더 심각한 것을 알 수 있다.

參 考 文 獻

- 철근콘크리트균열대책, 건축학회, 1977.
- 콘크리트 건물의 균열, 탐구문화사, 1995.
- “고온에서의 콘크리트 성상변화 연구”, 콘크리트학회 논문, 1997.
- “철근콘크리트구조물의 내화성능에 관한 연구”, 한국화재학회 논문, 1988
- 부천 LPG 폭발 조사결과보고서. 건물피해, 삼성화재 위험관리연구소, 1998
- 부천 내동 피해조사 보고서, 부천 내동 동사무소, 1998.
- 중대산업사고 조사 보고서, 한국산업안전공단, 1998.
- 사고연감, 한국가스안전공사, 1995.
- 가스안전 22권 3호 통권 86호, 한국가스안전공사, 1996, “Risk 관리프로그램 Screening 분석기술”
- H Otway, “Risk assessment, Risk and Cho-ice”, 1980.
- “가스폭발 위험성의 이론과 예측”, 가스안전 22권 4호 통권 88호.
- 일본, 산업안전 공학, 해문당, 1989.
- 일본, 안전공학강좌 2연구 안전공학 협회편, 해문당, 1989.
- 노삼규·전성우·강태희·서영민, “LPG 판매업소의 안전제어계획”, 한국화재·소방학회지 제12권 제4호 (통권 32호).

※ MODELING PROGRAM

PHAST professional 5.01

<표 참고>

<표 1> 방출열 영향 범위 및 효과

RADIATION EFFECT : BLEVE/Fireball<1.5; D>		
방출열	피해반경	피해효과
12.500 kw/m ²	190.20m	나무를 연소시키는 최소 점화 에너지
25.000 kw/m ²	140.40m	나무에 장시간 노출시 자연발화 에너지
37.500 kw/m ²	104.70m	공정 설비의 손상

<표 2> 과압 영향 범위 및 피해효과

과 압(psi)	피해반경(m)	피해효과
14.5	60	1% 사망률
0.5	550	90% 유리창 파괴
0.25	950	50% 유리창 파괴
0.1	1400	10% 유리창 파괴

<표 3> 과압별 PHAST 결과와 실제 조사치 비교

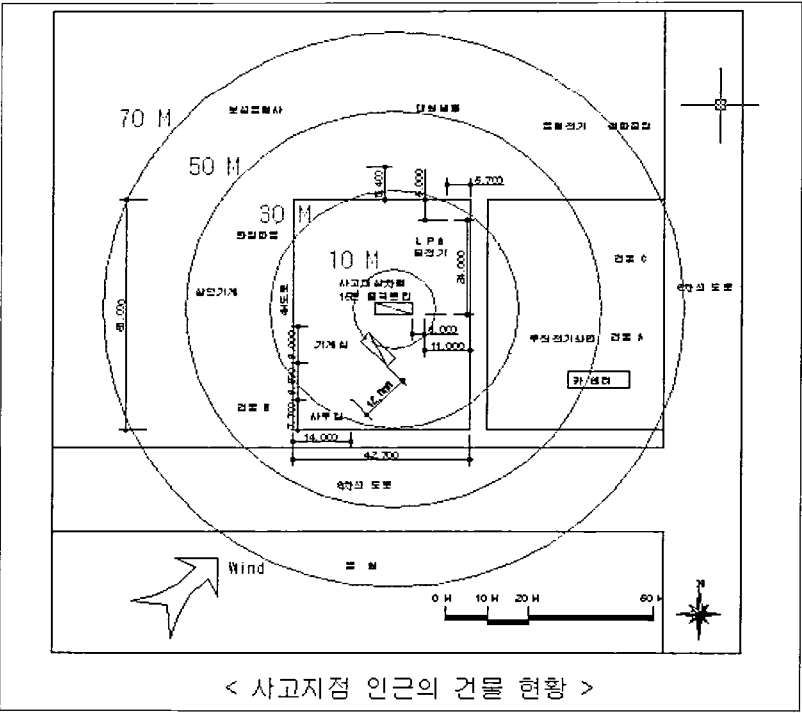
과압(psi)	PHAST MODELING 결과(m)	실제 조사치(m)	PHAST VS 실제 피해거리(%)	피해정도
0.5	550	90	16.36	90% 유리창 파괴
0.25	950	135	14.21	50% 유리창 파괴
0.1	1400	220	15.71	10% 유리창 파괴

<표 4> 인근건물의 피해현황

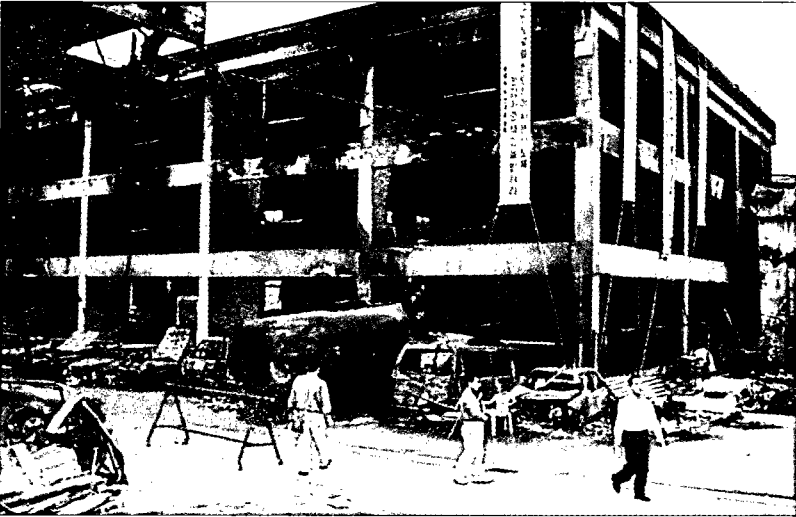
건물명	구조	피해상태
W 전기공업	3층 R/C조 SLAB	탱크로리파편에 따른 충격으로 조적벽면 파괴, 구조체 약화 창문완파, 화재로 인한 내부부재 전소
W 전기공업 후면건물	3층 R/C조 SLAB	건물손상 없음, 창문파손 없음 외부벽 약간 그을림
C 정밀	3층 R/C조 SLAB	창호부 균열현상, 건물피해 없음 화재피해 없음
K 전기	3층 R/C조 SLAB	건물파손 없음, 간판파손
T 냉동	3층 R/C조 SLAB	3층부 화재로 전소 1,2층부 화재피해 없음, 사고지점 측면의 창문파손, 외벽 약간 그을림
B 금형	3층 R/C조 SLAB	옥탑 간이 건물 전소, 건물 일부 붕괴
H 화공	단층 ST조 전막	전막 전소

<그림 참고>

<그림 1> 현장피해전경 및 주변 배치도



<그림 2> 외벽일부 파손



<그림 3> 큰 손상없이 약간 그을린 상태



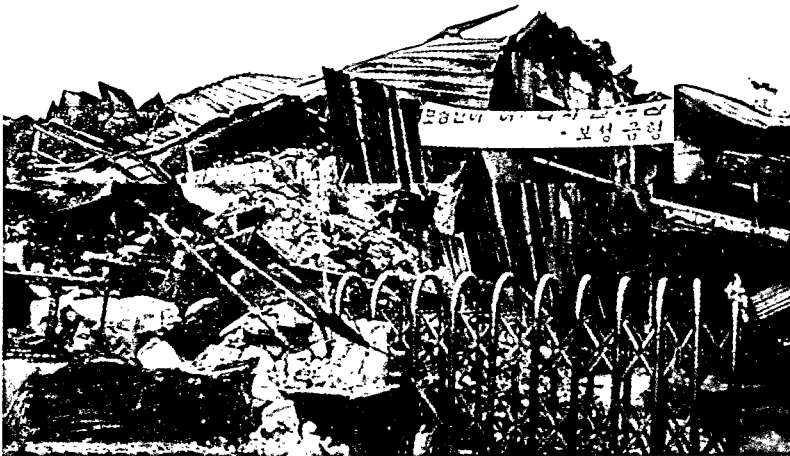
<그림 4> 외벽부 그을린 상태



<그림 5> 2층내부 전소상태



<그림 6> 건물일부 붕괴



Abstract

A Study on Damage Effect from
Major Accident of LPG Charging Facility.

- A case study of an LPG Charging and Automotive Outlet -

By Roh Sam Kew, Kim Tae Hwan,
Ham Eun Gu, Hong Chang Moon

The LPG station's explosion at Bucheon city was a major accident which with rare frequency of occurrence but large damage effect. Therefore, to prevent similar accident in the future from LPG charging stations which located at inner urban area, it needs to identify the damage effects of such facilities by comparing theoretically quantities risks-PHAST. The BLEVE effects from the accident showed similar level in case of heat flux, however, the over pressure level reflected at reduced distance. The structure damage to the nearby area showed comparatively large reduction of concrete strength and shape changes through by heat effect while the overpressure effect was small.