

LPG 충전소의 BLEVE 현상에 따른 피해효과 분석

노삼규·김태환*·함은구**

광운대학교 건축공학과, *서울대 자동화연구소 연구원, **광운대학교 건축공학과
(1999년 8월 12일 접수, 1999년 12월 14일 채택)

A Study on Damage Effect from Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion(BLEVE) of LPG Charging Facility

Sam-Kew Roh, Tae-Hwan Kim, Eun-Gu Ham

Dept. of Architectural Engineering, Kwang-woon University

Automation System Research Institute, Seoul University

Dept. of Architectural Engineering, Kwang-woon University

(Received 12 August 1999 ; Accepted 14 December 1999)

요 약

도심지내에 위치한 부천 LPG충전소 사고 조사를 통하여 가장 피해효과가 큰 탱크로리 폭발에 따른 결과를 분석하였다. 분석범위는 BLEVE 현상에 의한 방출열과 과압이 충전소 주변에 위치한 구조물이나 인체에 미치는 영향을 대상으로, 실제 현장조사를 통하여 수집된 피해결과와 이론적인 모델(PHAST-Process Hazad Analysis Software Tools) 분석 결과를 비교하였다. 부천 LPG 충전소 폭발 사고의 피해효과는 방출열의 경우 두 가지 모두 큰 차이를 보이지 않았으나, 과압의 경우, 실제 피해는 이론적 모델분석결과와 약 15%정도에 해당하는 축소된 거리에서 나타났다. 또한, 충전소 인근에 위치한 구조물에 대한 피해효과는 부분적으로 과압에 의한 균열 및 붕괴 현상보다는 열 효과에 의한 콘크리트 강도 저하와 성상변화가 크게 나타났다.

Abstract - The LPG refueling station's explosion at Bucheon city was a major accident which with rare frequency of occurrence and large damage effect. Therefore, to prevent similar accident in the future from LPG charging stations which located in urban area. It needs to identify the damage effects of such facilities by comparing theoretically quantities risk and actual damage. The BLEVE effects from the accident showed similar damage effect in case of heat flux, however, the overpressure level reflected at the reduced distance by 15%. The structure damage to the near by area showed comparatively large heat radiation damage to the concrete structure strength and shape changes through heat flux while the overpressure effect was small.

Key words : BLEVE effects, overpressure , heat flux, concrete strength

1. 서 론

가스는 국민생활 수준 향상에 따른 편의성 추구하고 청정연료의 선호로 그 사용량이 급격히

증가해 왔다. 80년도에 겨우 8.2%에 불과하던 가스 보급률은 '98년 말 현재 97%를 넘어 이제 거의 모든 국민이 가스를 사용하고 접하고 있는 실정이다. 이에 따라 국내의 가스 관련사

고도 최근 3년간 약 600~400건 정도 발생하였으며 그중 약 70%가 LPG관련 사고로 98년도 사고별 원인 분석에 의하면, 고의사고 30%, 시설미비 16.4%, 공급과 사용자 부주의가 각각 11.6%, 14%로 나타났다¹⁾. 특히 LP가스 충전소는 도심 밀집지역에 위치하고 있는 경우가 많고 또한 저장탱크, 용기 및 자동차에 정기적으로 이·충전 작업이 이루어지고 있어 항상 위험요소가 내재되어 있다. 부천 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 사고 빈도보다 피해강도가 큰 특성을 갖고 있으며 도심에 위치한 관계로 도시외곽에 위치한 LPG 충전소 보다 상대적인 피해효과가 극히 크며 이러한 시설에 대한 대중의 우려도 커지고 있다고 할 수 있다.

본 연구는 이번 사고에 따른 거리별 피해효과를 상정하여 그 피해에 대하여 진단하며, 국내의 LPG 충전시설의 중대재해 시 피해정도를 평가한다. 평가방법은 화재, 폭발 강도는 어느 정도범위 까지 위험성이 미치는 가를 사고 당시의 피해상황을 중심으로 근거리에 위치한 인체에 미치는 화상정도와 구조물의 피해, 유리창 파괴 정도를 수집하여 그 결과를 PHAST(Process Hazard Analysis Software Tools) 모델링과 비교 분석하였다^{1,2,3,4)}. 이러한 분석의 결과는 중대사고시 인근의 구조물에 미치는 과압 및 복사열이 미칠수 있는 경험적데이터(experimental data)로 구체화 할 필요가 있다.

2. LPG 폭발에 의한 BLEVE 효과

BLEVE란 다량의 압축과열 액체가 갑작스럽게 대기 중으로 방출되면서 일어나는 물리적 현상을 말한다. 또한, 다량의 액체가 방출되면서 외부 화염에 의한 점화로 인하여 화구(fireball)를 형성하여 주변 시설 및 사람에게 커다란 피해를 가져올 수 있다. BLEVE에 의하여 발생될 수 있는 피해를 예측하는 방법은 크게 화구의 의한 복사열, 초기 물리적 폭발에 의한 과압력, 폭발파편으로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 화구에 의한 복사열과 과압력에 대하여 고려하였다.

BLEVE에 의하여 발생될 수 있는 피해를 예측하는 방법은 일반적으로 화구에서 발생되는 복사열에 의한 영향력을 고려한다. 이때 화구에 의한 복사열 관계식은 BLEVE 직경과 지속시간 및 질량과 관계되는 power law에 기반을 두고 있다. 본 연구에서 응용한 BLEVE의 물리적 변수에 관계된 식은 다음과 같다^{6,7)}.

$$D_{max}(m) = 6.48 M^{0.325}$$

$$t_{BLEVE}(s) = 0.825 M^{0.26}$$

$$H_{BLEVE}(m) = 0.75 D_{max}$$

M = 초기 가연성 액체량 [Kg]

2.1. 피해영향분석의 적용기준

본 논문에서 피해영향분석은 화재·폭발로 인하여 조업자나 공정 시설물, 그리고 더 나아가서 주변지역에 미칠 수 있는 피해결과를 평가하는 것을 말한다. 일반적으로 영향모델은 화재·폭발에 의한 모델과 독성물질에 의한 독성 영향 모델로 대별할 수 있으나, LPG 폭발의 경우 독성에 대한 위험이 상대적으로 낮아 독성물질에 대한 평가는 배제하였다.

화재·폭발에 대한 영향모델은 복사열에 의한 피해효과를 계산하는 방출열모델링과 폭발압력에 의한 피해효과를 계산하는 과압효과 모델링으로 분류할 수 있다. 방출열 효과는 복사열로 인하여 사람과 건물에 미칠 가능성이 있는 피해나 손상을 예측하는 것이다. table 1은 복사강도에 따른 피해효과를 나타내고 있다.

Table 1. Effect of thermal radiation

복사강도 (kw/m ²)	효 과
4	개인에게 고통을 야기할 수 있는 에너지
12.5	목재를 연소시키는 최소점화에너지
25	장기간 노출시 목재 자연발화 에너지
37.5	공정설비에 손상

source : World Bank(1985)

3. 부천 LPG 충전소 사고 피해 및 결과분석

3.1. 피해조사

피해조사 방법은 현장 답사를 통해 사고 대상 설비와 그 주변 시설들에 대하여 대상지역 내 구조물의 폭풍압 및 방출열에 의한 피해정도 조사, 인근의 건물 내, 외벽의 파괴정도, 폭풍압에 의한 유리창 파괴 정도를 조사하였다. 이러한 피해조사 데이터를 바탕으로 먼저 사고 현상의 따른 과압의 영향범위를 PHAST 모델링을 통한 결과와 비교하였다. 두 번째로 방출열에 의한 영향 범위도 이론 방출열과 사고 당시 열상의 의한 피해결과를 비교하였다. 세 번째 구조적인 측면에서 건물 외부 치장재의 파괴정도와 구조체 벽면에 균열정도를 육안검사와 측정장치를 통한 조사로 나타난 결과를 건물의 콘크리트 요구 구조 강도와 비교 결합상태를 파악하고 구조물에 어느 정도의 물리력이 가해졌는지를 분석하였다.

3.2. 피해결과 분석

사고의 피해결과는 BLEVE/Fieball에 의한 피해결과로서 사고 형태는 주로 과압에 의한 구조물 피해와 방출 열에 의한 열 상의 피해로 나타났다. 먼저 과압에 의한 피해는 사고 지점 인접 구조물의 경우 방출 열에 의한 피해와 동시에 나타나기 때문에 육안으로 구별 하기는 한계가 있다. 따라서 과압에 의한 피해는 PHAST 모델링을 통해 산정된 데이터와 유리창 파괴 등으로 극명하게 과압에 의한 피해로 보여주는 데이터를 비교하여 산정 하였다. 복사열에 경우, PHAST 모델링을 통한 결과 값을 구조물 열상 피해와 치장 재의 열상 유무, 특히 인체의 화상 정도와 비교해 볼 때 PHAST 모델링 결과와 실제 피해와의 오차가 거의 없는 것으로 나타났다.

table 2에서 방출열 12.5 kw/m² 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. 25.0 kw/m² 에 경우 영향범주는 140.40m로 이 범주에서 나타난 인체에 미치는 피해정도는 3도 화상이 대부분이며 건물 치장재 등이 용융이 된 현상을 나타냈다. 그리고 37.5 kw/m²에 경우 104.70m의 영향범주로 나타났으며 구조체의 심각한 열 손상을 가져왔다.

Table 2. Comparion PHAST modeling simulation and survey result

RADIATION EFFECT : BLEVE/Fireball <1.5:D>			
방출열 (kw/m ²)	PHAST 결과(m)	피해효과 (world bank 1985)	실제 피해정도
12.5	190.2	나무를 연소시키는 최소에너지, 10초내 1도 화상	2도 화상
25.0	140.4	나무에 장시간 노출시 자연발화, 10초내의 중대한 상해	3도 화상
37.5	104.7	공정설비손상,1분 이내 100% 사망	3도 화상

Table 3. Overpressure effect for PHAST modeling simulation

과 압(psig)	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

table 3은 과압이 미치는 범위를 거리대별로 나타난 것으로 최고 14.5 psig가 반경 60m까지 일정하게 나타나며 그 이후로 급격히 감소하는 형태로 나타난다. 실제로 이 영향범위에 포함되는 구조물이 과압에 의한 충격파로 유리창 등의 완파는 물론 구조체에 크랙이 나타났다. 특히, 0.1 psig 경우 10%유리창 파괴를 가져올 수 있는 과압으로 약1400m까지의 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다.

table 4에서 나타나듯이 부천 충전소 사고를 PHAST 모델링과 실제 피해로서의 동일과압 수준에 나타난 거리를 비교한 결과 실제 피해 거리는 이론적 모델분석결과의 약 15%에 해당하는 거리로 나타났다. 이러한 이유는 BLEVE에 의한 용기 폭발시 압축 에너지가 40~80% 폭풍압으로 전환되어 용기 파열효과로 전위됨과 동시에 과압이 최종 피해 목적물에 이르기까지 건물 등의 구조물이 증첩되어 그 효과가 감소한 것으로 추정된다.

Table 4. Comparing PHAST modeling simulation and survey result for overpressure effect

과압 (psig)	PHAST MODELING 결과(m)	실제 조사치(m)	PHAST 결과와 실제파해 거리의 비율(%)	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

3.3. 구조물 피해

LP 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 인근 건물 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. 구조물 화재 조사를 육안에 의한 상태조사를 우선적으로 시행하였으며 화재로 인한 손상부위가 큰 일부 건물에 대해서는 화재로 인한 내하력 저하 유무를 파악하고자 콘크리트 테스트 햄머등 비파괴 장비를 이용한 콘크리트 압축강도를 측정하였다. [Fig. 1. 참고]

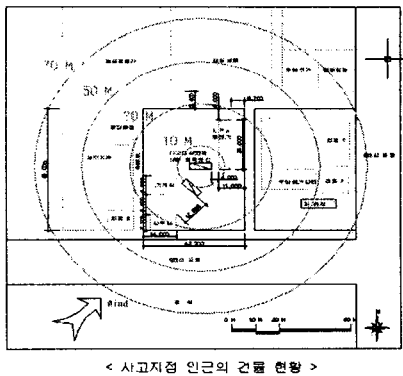


Fig. 1. Location of surroundings buildings by distance

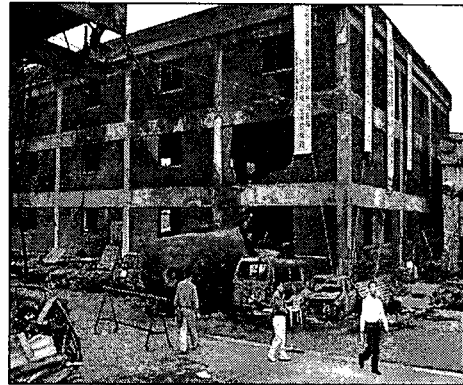


Fig. 2. structure Damage by heat radiation and missile effect of tank lorry of tank lorry fragment

① 건물 (우진전기공업)

3층 RC조 SLAB구조로 탱크로리와 의 이격 거리는 20m이며 탱크로리 폭발 시 탱크의 일부가 비산, 본 건물의 외벽 부에 충격을 주어 외벽 (조적벽)의 일부가 파손되어 있는 상태로 나타났다. 또한 과압에 의해 창문이 모두 부서져 있으며 장시간의 화재로 인해 건물의 외벽과 내부부재(기둥, 보, 슬래브)등이 검게 그을려 있는 상태로 나타났다. [Fig. 2. 참고]

② 건물 (우진 전기공업 후면 건물)

본 건물도 상기 건물과 마찬가지로 3층 RC 조 SLAB구조 건물로 폭발당시 ①의 건물(우진 전기공업)이 방폭역할을 함에 따라 건물의 손상은 없으며 또한 창문의 파손도 전혀 없는 상태였고, 다만 인접한 ①의 건물이 장기간의 화재로 인한 연소로 본 건물의 외벽이 약간 그을린 상태로 나타났다.

③ 건물(청화 정밀)

2층 RC조 SLAB구조의 건물로 건물 외측부 창문 개구부를 중심으로 균열이 발생되어 있는 상태이며 이러한 현상은 건조수축에 의한 균열 현상으로 사고이전에 발생되어 있는 균열로 추정된다.

④ 건물 (금형전기)

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

⑤ 건물 (대원냉동)

3층 RC조 SLAB구조의 건물로 폭발로 인한

비산으로 건물 외벽부에 약간의 흔적이 있으나 부재의 손상은 없는 상태로, 다만 외벽 쪽에 적재 물과 차량의 화재로 인해 그을린 상태이며 건물의 1,2층 내부는 화재가 발생하지 않았으나 3층 내부는 전소되어졌다.

⑥ 건물 (보성금형)

2층 RC조 SLAB구조로 옥탑에 간이 PANEL 형식의 단층건물이 있었으나 폭발로 인한 과압 및 화재로 인해 지붕 위의 단층건물이 전소되었으며 1,2층 건물내부도 화재로 인해 전소되어 있는 상태임. 건물의 일부 파손부위는 화재에 의한 붕괴 외에도 상부구조물 붕괴에 따른 충격하중으로 일부 붕괴되었을 것으로 추정되어진다.

보통의 콘크리트에서는 300 ~ 350°C 이상이 되면 강도저하가 현저하게 되고 500°C에서는 강도의 약 60%이하로 저하된다. 일반적으로 콘크리트에서는 500°C 이상에 가열된 것을 구조재로써 재 사용하는 일은 안전에 좋지 못한 결과를 초래할 수도 있다⁸⁾. 조사대상건물의 현재의 상태, 결합정도, 콘크리트 압축강도에 대한 조사결과는 우진 전기의 경우 탱크로리 폭발에 따른 비산으로 외벽부가 일부 파손되었으며 폭발지점 측 기둥과 벽체의 균열이 타 부재에 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 설계기준 강도210Kg/cm²에 비해 강도가 매우 저하된 것으로 판단된다.

대원냉동의 경우 외벽 쪽에 적재물과 차량의 화재로 그을린 상태이며 3층 내부 부재의 균열은 화재 시 콘크리트표면온도 상승에 의한 부재의 수축으로 균열이 발생되었을 것으로 추정되고, 또한 철근과 콘크리트의 부착력저하로 박리현상이 발생하였고 내부 콘크리트 벽체와 보의 강도측정결과 118.1Kg/cm²과 124.7118.1Kg/cm²로 측정되어 강도가 매우 저하된 것으로 판단된다. 기타 건물의 내·외부 또는 옥탑부 등의 피해는 대부분 화재 시 열효과의 피해로 판단된다. 조사된 압축강도 결과치를 기초로 하여 사고당시 콘크리트에 미친 화재정도를 추정한 결과는 압축 강도 측정치는 평균120Kg/cm²로 설계기준강도 210Kg/cm²(추정치)에 대한 비는 57%(=120×100/210)로 Fig. 3을 기준으로 약 500°C 온도가 콘크리트에 영향

을 준 것으로 판단된다. 그러나 대부분이 시공 당시 설계기준강도 이상으로 시공되었을 것으로 추정되므로 당시 실제 콘크리트 강도를 230 ~ 280Kg/cm² 정도로 시공되었을 것으로 가정한다면 이때의 콘크리트에 가열된 온도는 약 500°C 이상이 될 것으로 추정된다. 일반적으로 가열온도가 상승함에 따라 잔존강도는 저하하고 700°C를 넘어서면 대부분의 콘크리트는 잔존강도비가 50%이하로 되며, 그후의 회복강도도 기대할 수 없는 것으로 알려지고 있다. 그러나 Fig. 4을 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.^{8,9,10)}

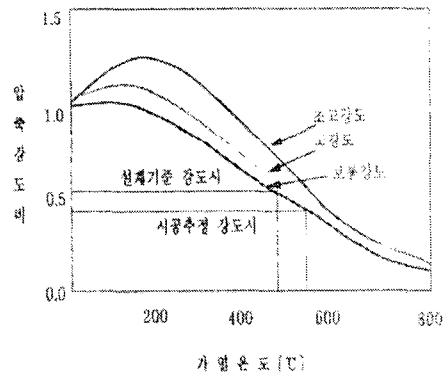


Fig. 3. Ratio for Compressed strength by temperature

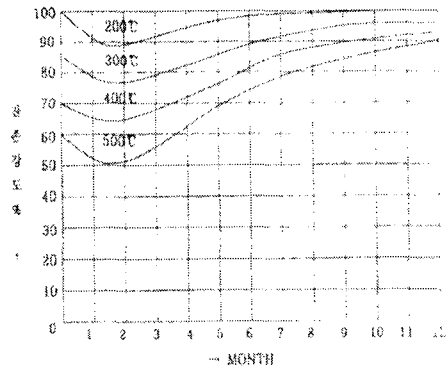


Fig. 4. elasticity recovery ratio on burned concrete by time

4. 결 론

도심지내의 위치한 부천 LPG충전소 사고 조사를 통하여 과압과 방출열에 대한 피해효과를 분석을 하였다.

1) 과압의 경우, PHAST 모델링을 통한 이론치와 실제 피해조사치의 동일과압 수준에 나타난 거리를 백분율로 환산하여본 결과 실제 피해 과압은 PHAST 모델링 결과의 평균 15.42%에 해당하는 거리로 나타났다. 이러한 이유는 BLEVE에 의한 용기 폭발시 압축에너지가 40~80% 폭발압으로 전환되어 용기 파열효과로 전위됨과 동시에 과압이 최종 피해 목적물에 이르기까지 건물 등의 구조물이 증첩되어 그 효과가 감소한 것으로 추정된다.

2) 방출열에 경우에는 이론치와 인체와 구조물에 미치는 영향을 조사한 결과, 실제조사치와 큰 차이를 보이지 않고 유사한 거리에서 나타나는 것으로 분석되어졌다.

3) 구조물의 경우 사고 대상 인접 건물의 조사된 압축강도 결과치를 기초로 하여 사고당시 콘크리트에 미친 화재정도를 설계기준강도와 압축 강도 측정치를 비교한 결과 약 500°C 온도가 콘크리트에 영향을 준 것으로 나타났다. 보통의 콘크리트에서는 300~350°C 이상이 되면 강도저하가 현저하게 되고 500°C에서는 강도의 약 60%이하로 저하된다. 사고로 인한 손상변화의 주요원인은 과압에 의한 충격하중으로 건물의 붕괴 및 균열이 나타났으며, 과압이 미치는 영향효과는 건물의 배치상태 및 위치에 따라 크게 저감될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

따라서, 향후 PHAST 모델값과 실제조사결과의 비교치가 유사 또는 상이하게 나타난 점을 고려하여, LPG 충전소와 같이 도심에 위치한 소비 제품 유형의 고압가스 취급소의 안전은

중대재해의 가장 큰 피해효과인 BLEVE를 모델링을 이용해 상정할 경우 그 안전대책이 과압을 대상으로한 방호효과보다 복사열 방지를 위한 방호효과를 향상시킬 필요가 있다.

감 사

본 연구는 1999년도 광운대 학술 연구비 및 한국과학재단(KOSEF 96-0602-01-01-3)의 지원에 의하여 수행하였으므로 이에 감사합니다.

참 고 문 헌

1. 가스안전공사, 제 97호 (98-17), "가스뉴스레터"
2. 삼성화재위험관리연구소, "부천 LPG 폭발 조사결과보고서" 1998
3. 부천 내동 동사무소, "부천 내동 피해조사 보고서" 1998
4. 산업안전공단, "중대산업사고 조사 보고서" 1998
5. 한국가스안전공사, "사고연감" 1995
6. H Otway, "Risk assessment, Risk and Choice" 1980
7. 김윤화, "화학공장의 데이터베이스를 기반으로 한 정량적 위험성 평가 시스템 개발"
8. 콘크리트학회, "고온에서의 콘크리트 성상 변화 연구"
9. 탐구문화사, "콘크리트 건물의 균열"
10. 건축학회, "철근콘크리트균열대책"
11. 가스안전공사, 장치산업에서의 정량적 위험성 평가, 가스안전 vol 23 1997
12. 가스안전공사, "Risk 관리프로그램 Screening 분석 기술가스안전 22권 3호 통권 86호 1996
13. 가스안전 22권 4호 통권 88호, "가스폭발 위험성의 이론과 예측"