화약·발파(대한화약발파공학회지)
제34권 제1호, 2016년 3월, pp. 1~10

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 34, No. 1, 2016, pp. 1-10
Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

중국 텐진항 폭발사고 원인과 관련된 폭발 에너지 분석

권상기[1)*], 김하영[1)]

Analysis of Explosion Energy related to the Cause of Tianjin Explosion Accident in China

Sangki Kwon, Ha Yung Kim

Abstract On August 12, 2015, two huge explosions were accidently happened in Tianjin port, China. The explosion energies of the two explosions were similar to those of TNT 3 tons and TNT 21 tons. Until now, the cause of the explosions was not clearly announced but some guesses of the cause were released. One of the possible cause of the explosion is the generation of explosive acetylene gas from the chemical reaction between CaC_2 and spraying water to extinguish fire happened at the storage site of different chemical compounds. The explosion of acetylene gas might ignite the explosion of 800 tons of ammonium nitrate. In this study, the explosion due to the scenario was analyzed in order to check that such a chemical reaction can produce the huge explosion observed at the Tianjin accident.

Key words Tianjin explosion, TNT, Ammonium nitrate, Acetylene gas

초 록 2015년 8월 12일 중국 텐진항에서는 두 번의 대규모 폭발이 발생하였다. 두 번의 폭발은 TNT 3톤, TNT 21톤 규모로 추정되었다. 현재까지 폭발의 정확한 원인은 공표되지 않고 있으며 원인에 대한 몇 가지 추정이 제시되고 있다. 그중 하나는 화재진압을 위해 뿌려진 물과 탄산칼슘의 화학반응에 의해 폭발성 아세틸렌 가스가 발생하고 이 가스의 폭발이 800톤의 질산암모늄의 폭발을 야기했을 것이라는 것이다. 본 연구에서는 이러한 폭발 시나리오에 대한 폭발에너지 분석을 통해 화학적 반응에 의해 텐진항 폭발 사고와 같은 대규모 폭발이 발생 가능한지를 평가하였다.

핵심어 텐진항 폭발, TNT, 질산암모늄, 아세틸렌 가스

1. 서 론

2015년 8월 12일 중국 텐진항 화학물질 보관소에서는 대규모 폭발사고가 발생하였으며 이로 인해 95명의 소방대원과 11명의 경찰을 포함하여 173명의 사망자와 800여명의 부상자가 발생하였다. 당시 폭발은 30초 간격으로 두 번에 걸쳐 일어났으며 중국 지진 네트워크 센터에 따르면 최초 폭발의 경우 지진규모 2.3, 두 번째 폭발은 2.9의 크기로 측정되었다. 이는 TNT (Trinitrotoluene) 3톤, TNT 21톤의 폭발력에 해당하는 위력이었다(BBC.com, 2015). 당시 폭발로 수백 미터에 달하는 화염 기둥이 만들어졌으며 이는 인공위성에서도 관찰될 정도였다. 텐진 폭발사고에서는 중국 역사상 최악의 소방관 참사로 기록될 정도로 화재진압을 위해 투입되었던 소방대원의 인명 피해가 컸다. 아직까지 사고의 구체적인 원인이 규명, 발표되지 않고 있으며 화학물질 보관장소에서 발생했던 사고라는 점에서 화학물질의 폭발일 것으로 추정되고 있다. 당시 텐진항 루이하이 국제물류유한공사가 보관하던 야적 컨테이너에는 700톤의 시안화나트륨과

[1)] 인하대학교 에너지자원공학과
* 교신저자 : kwonsk@inha.ac.kr
접수일 : 2016년 2월 5일
심사 완료일 : 2016년 2월 19일
게재 승인일 : 2016년 3월 3일

800톤의 질산암모늄(ammonium nitrate), 500톤의 질산칼륨(potassium nitrate) 등을 포함한 40여종의 화학물질 3000여 톤이 적재되어 있었던 것으로 보도되었다(Chinadaily.com.cn, 2015). 본 연구에서는 텐진 폭발 사고와 관련되어 제기되는 폭발 원인을 폭발에너지 관점에서 분석하고 이를 바탕으로 해당 폭발 원인의 타당성을 추정하고자 하였다. 이러한 연구는 향후 발생 가능한 유사 폭발사고를 방지하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 국내외 폭발사고 현황

최근 국내외에서는 폭발물 또는 폭발성 가스에 의한 폭발 사고가 많이 발생하고 있다. 급속한 에너지의 분출을 가져오는 폭발은 인명과 재산의 피해를 가져오기 때문에 폭발 현상에 대한 이해는 폭발성 구조물의 방폭 설계와 폭발성 물질의 안전한 관리를 위해 반드시 필요하다. 2차대전 이후 폭약에 의한 폭발 사고를 제외한 해외 주요 폭발 사고는 Table 1과 같다. 폭발원은 질산암모늄(AN), 석유, 가스 등이며 폭발에 의해 상당한 인적, 경제적 피해가 발생함을 알 수 있다.

1965년부터 2003년까지 국내에서 발생한 중대산업사고를 분석하면 유형별 사고 발생은 폭발 > 화재 > 누출 > 질식 순으로 나타나며 전체 중대산업사고 중 폭발, 화재가 60% 이상을 차지하고 있다(이근원, 2005). Table 2는 1994년 이후 국내에서 발생한 폭발 위험물질에 의해 발생한 주요 폭발사고 사례를 보여준다. 우리나라는 도심지 부근에 에너지 시설이 밀집되어 있어 고압가스, 도시가스, LPG(Liquid Petroleum Gas)와 관련된 크고 작은 가스 사고 발생 시 중대 재난으로의 이어질 가능성이 높은 것으로 여겨진다.

3. 텐진 폭발 사고 현황

텐진항 폭발 사고 당시 최초의 보고자에 따르면 화재가 발생하였고 화재진압의 시도에도 불구하고 불길을 잡을 수 없었다. 현장에 도착했던 소방관들은 그곳에 위험한 화학물질이 적재되어 있다는 것을 인지하지 못하고 화재진압을 위해 물을 분사하였으며 이는 물과 반응하는 화학물질의 폭발적인 반응을 일으켰을 것으로 추정되고 있다(BBC.com, 2015).

Table 1. World explosion accidents without explosives after world war II

Year	Location	Source	Amount (TNT 등가량)	Death toll
1947	미국 텍사스시	AN (Ammonium Nitrate)	7700ton	581
1947	프랑스 Brest 항구	AN	3300ton	22
1974	영국 Flixborough	Cyclohexane vapour		28
1978	스페인 Los Alfaques	Prohylene	23ton	217
1983	Newark	Oil		1
1984	멕시코, San Juanico	LPG	11,000m^3	500
1988	미국 Henderson	Ammonium perchlorate + natural gas	3900ton + α (TNT 1000ton)	2
1994	중국, Xingping	AN	27.6ton	22
2001	프랑스 Toulouse	AN	200~300ton (TNT 20~40ton)	31
2004	스페인, Barracas	AN	25ton	2
2004	루마니아, Buzau	AN	20ton	18
2005	영국 Hertforhertford	Oil	(TNT 29.5ton)	0
2007	멕시코, Coahuila	AN	22ton	37
2013	미국 텍사스주 West	AN	(TNT 7.5~10ton)	15

Table 2. Cases of domestic explosion accidents since 1994

Year	Location	Source	Cause	Death
1994	서울 아현동	도시가스	노후 배관 및 불량시공	12
1995	대구 상인동 지하철 공사장	도시가스	도시가스 배관 관통	101
1998	경기 부천 LPG 충전소	LPG	충전 작업 부주의	1
1998	전북 익산시 동양가스 충전소	LPG	충전 호스 파손	1
2000	전남 여수 호성케멕스 공장	화학반응 가스	화학공정 오류	6
2001	전남 여수 황산 저장 탱크	수소가스	가스 누출	1
2003	전남 여수 호남석유화학 공장	에틸렌, 수소, 프로필렌, 부탄	잔류가스 누출	1
2008	경북 김천 페놀수지 제조공장	페놀수지	원료공급 비율 오류	2
2010	서울 행당동	CNG (Compressed Natural Gas)	버스 가스통 손상	-
2013	대구 대명동	LPG	불법 충전으로 인한 가스 누출	2
2013	강원 영월 포스코 엠텍	-	-	-
2014	경기 남양주 빙그레 공장	암모니아	배관 손상	1
2014	경남 합천 도자기공장	LPG	가스 누출	2
2014	경북 포항 포스코	가스	가스 누출	1
2015	경남 울산 한화케미칼 공장	가연성 가스	용접 작업 불티	6

(a) Before. (b) After.

Fig. 1. Before and after the explosion at Teinjin port.

- 8월 12일 22시 50분 화재 신고
- 8월 12일 23시 30분 진도 2.3 규모의 최초 폭발 발생. 30초 후 진도 2.9 규모의 두 번째 폭발 발생
- 8월 15일 11시 40분 8번의 연속적인 소규모 폭발

폭발에 의해 소실된 면적은 2만 m^2였으며 Fig. 1은 폭발 전후의 모습을 비교하여 보여준다. 지표면 폭발로도 진도 2.3, 2.9 규모의 지진이 발생하였다는 것은 그 폭발의 규모가 엄청났다는 것을 의미한다. 폭발 지점 인근에 야적되어 있던 8천여 대의 신차가 소실되었으며 반경 2km에 위치한 아파트의 유리창이 파손 피해를 입었다. 4km 떨어진 곳에 위치한 백화점에서도 건물 벽과 지붕에 피해가 보고되었다. 또한 수 km 떨어진 국립슈퍼컴퓨터 센터에서도 창문이 흔들리고 일부 천정이 파손되는 피해가 있었다. Fig. 2는 폭발 지점을 중심으로 폭발의 영향 범위를 보여준다.

텐진항 폭발의 원인으로 크게 두 가지 주장이 있다.

1) 적재 야적 컨테이너에서 위험한 화학물질이 터

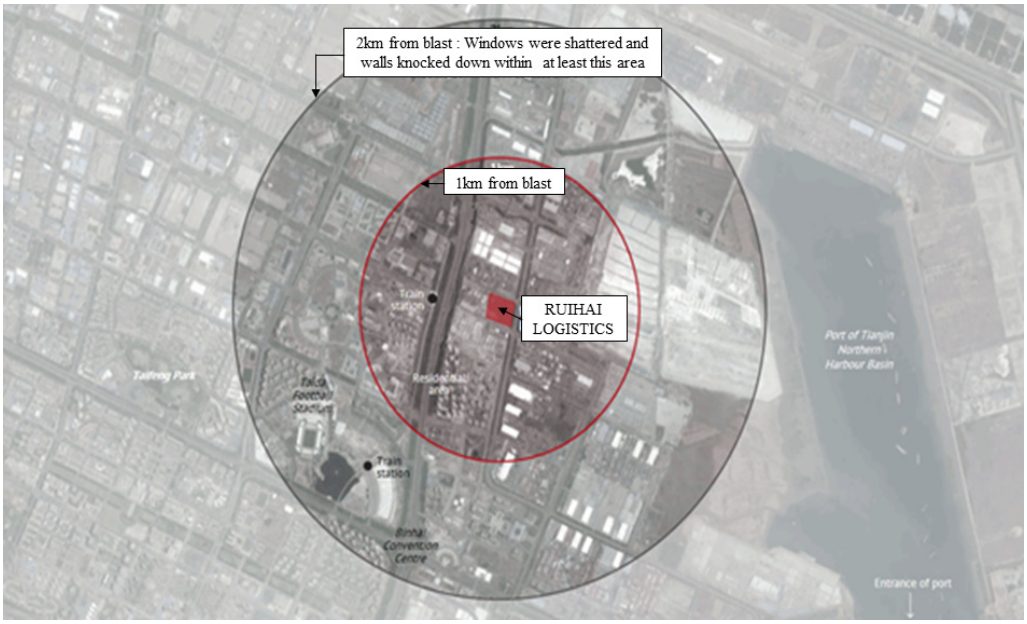

Fig. 2. Damaged boundary by the Tianjin explosion.

져서 화재가 벌어지고 그로 인해 주변의 기름 저장고에 불이 옮겨 붙어 초대형 폭발이 일어남.

2) 초기 화재를 진압하기 위해 창고에 물을 뿌렸고 그것이 대량 저장된 탄화칼슘과 만나 1차적으로 TNT 3톤급의 대형 폭발을 일으켰고 그 후 질산암모늄으로 TNT 21톤급 초대형 폭발이 발생.

두 가지 추정 모두 화재가 먼저 발생하였고 이로 인해 초대형 폭발이 일어났다고 보고 있다. 첫 번째 추정의 경우, 저장된 기름의 양과 저장 상태에 대한 정보가 없는 상황이므로 추가적인 분석에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 두 번째 주장을 중심으로 폭발 원인으로서의 가능성을 평가해 보았다. 폭발 장소에 보관 중이던 화학물질의 종류와 양을 알고 있기 때문에 이에 대한 분석을 통해 폭발 원인으로서의 타당성을 검토할 수 있다.

탄화칼슘(CaC_2)은 물과 반응하면 아래와 같은 화학반응을 통해 calcium hydroxide(slaked lime)과 고폭발성 가스인 아세틸렌(C_2H_2)을 발생시킨다.

$$CaC_2(s)+2H_2O(l) \rightarrow Ca(OH)_2(s)+C_2H_2(g)\Delta H = -127.7kJ/mol \quad (1)$$

아세틸렌 가스는 무색 무취이며 공기 중에 2.5~81% 포함되어 있으면 폭발할 수 있다. 화재진압을 위해 뿌려진 물과 탄화칼슘이 반응하면서 생긴 아세틸렌 가스가 폭발한 후(1차 폭발), 800톤의 질산암모늄이 폭발(2차 폭발)하였을 것이라고 추정할 수 있다. 아세틸렌 가스가 산소와 반응하면 3600K의 화염을 발생시킬 수 있는데 이는 쇠를 녹일 수 있을 만큼의 온도로 질산암모늄의 기폭에 기여했을 것이다. 아세틸렌 가스가 무색, 무취이기 때문에 소방관들은 가스의 발생을 인지하지 못하였을 것이다.

질산암모늄은 비료의 필수 원료인 질소의 공급원으로 사용되는 흰색 결정으로 200℃에서도 아무런 변화가 일어나지 않을 정도로 화학적으로 안정적이지만 Table 1에서와 같이 조건에 따라 대규모 폭발을 일으킬 수 있다. 질산암모늄은 TNT에 비해 폭발력이 42% 정도로 평가된다(US Army, 2007). 특히 경유 등과 같은 연료와 만나면 더욱 강력한 폭발을 일으키게 된다. 현재 노천광산에서 가장 많이 사용되는 폭약인 ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil)의 경우, 질산암모늄과 경유가 94:6 정도의 비율로 혼합되어 있다. ANFO의 폭발력은 TNT의 74%로 평가된다. 본 연구에서는 물류창고에 보관되어 있던 화학물질들의 양을 바탕으로

폭발에너지를 계산해 보고 화학반응에 의해 발생하는 온도, 압력 증가를 계산해 봄으로써 추정되는 화학반응에 의해 TNT 21톤 규모의 초대형 폭발이 가능할지를 분석하고자 한다.

4. 폭발 에너지 분석

4.1 TNT 폭발에너지

Table 1에서 알 수 있듯이 해외 폭발 사례의 경우, TNT 등가량(TNT equivalent) 개념으로 폭발 현상을 모사하고 그 폭발 충격을 분석하고 있다. TNT($C_7H_5N_3O_6$)는 폭발물의 강도에 대한 기준 폭약으로 사용되고 있으며 폭약의 폭발력을 나타내기 위해 사용되는 RE 계수(Relative Effectiveness factor)는 동일한 질량의 폭발 시 TNT 대비 폭발력의 강도비를 의미한다. TNT 등가량을 알면 환산거리(scaled distance)에 따른 폭발압력의 변화 곡선을 이용하여 폭발에 따른 충격을 모사할 수 있게 된다. TNT 등가량 결정을 위한 비교 자료는 plate dent 시험, ballistic mortar 시험, trauzl(lead block) 시험, sand crush 시험, air blast 시험을 통해 얻어진다. TNT 등가량 개념은 air blast, cratering, structural response, physiological 공학적 평가를 위해 사용되기도 한다. 권과 박(2015)이 보고한 여러가지 방법을 이용한 TNT 폭발에너지 계산에 따르면 TNT의 폭발 시 에너지는 4359kJ/kg, 온도 3560℃, 폭굉속도는 6517 m/sec, 폭굉압은 17.9GPa로 나타난다. 3톤의 TNT 폭발 시 발생하는 총에너지는 13,000MJ이며 21톤의 TNT 폭발에 의해서는 91,500MJ이다.

폭발에 의한 충격파의 특성에서 가장 중요한 인자가 최대 폭발압력(peak overpressure)과 임펄스(impulse)이다. 임펄스는 시간에 따른 폭발압력 변화 양상에 따라 결정되며 양의 압력이 유지되는 기간 동안 폭발압력 곡선을 적분하여 얻어지는 값을 의미한다. TNT 특성곡선은 환산거리(Z')에 따라 달라지며 환산거리는 TNT의 양(W_{TNT})과 측정 지점과 기폭지점 사이의 거리(R)를 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Z' = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \tag{2}$$

Alonso (2006)는 환산거리에 따라 폭발압과 임펄스를 계산하기 위한 다음과 같은 방정식을 제시하였다.

i) $1 < Z' < 10$

- $P_s(MPa) = 1.13Z'^{(-2.01)}$ (3)

- $i_{TNT} = 203 \times Z'^{(-0.91)}$ (4)

ii) $10 < Z' < 200$

- $P_s(MPa) = 0.183Z'^{(-1.16)}$ (5)

- $i_{TNT} = 335 \times Z'^{(-1.06)}$ (6)

여기서 P_s는 폭발압, i_{TNT}는 환산거리에 따른 임펄스이다.

그 밖에도 Newmark and Hansen(1961), Mill(1987), Brode(1955) 등이 제안한 TNT 특성곡선 방정식들이 있다. 권과 박(2015)의 연구에 따르면 각 방정식들은 비교적 유사한 결과를 나타낸다. 텐진 폭발사고에서 추정되는 TNT 3톤(1차 폭발), TNT 21톤(2차 폭발)이 폭발하는 경우, Alonso 식을 이용하여 얻어진 TNT의 최대폭발압력 및 임펄스 특성 곡선은 Fig. 3, 4와 같다. 21톤 TNT 폭발 시 약 0.5km에서 폭발압력이 3.5kPa, 약 1km 지점에서 폭발압력이 1.0kPa, 2km 지점에서는 0.2kPa로 추정되었다. Table 3은 폭발압력에 따른 피해 정도를 psi 단위와 KPa 단위로 환산하여 표시하였다. 계산식과 피해 기준을 비교해 보면 21톤 TNT 폭발 시, 반경 100m 내에 위치하는 건물은 완전 파괴되며 500m 지점까지 유리창 파손이 예상되며 건물에 피해가 발생하는 것으로 예상할 수 있다. 하지만 Fig. 2에서와 같이 반경 2km까지 유리창 파손이 발생하였던 사실에 비추어 실제 폭발은 TNT 21톤 이상일 수도 있을 것이다.

4.2 가스 폭발에너지

본 연구에서는 텐진 폭발사고의 원인으로 추정되는 화학반응에 대하여 폭발 에너지 분석을 실시하였다. 폭발 에너지 분석을 위해 사용된 화학성분들의 물성은 Table 4와 같다.

화학 반응에 의한 폭발 에너지, 온도, 폭굉속도(VOD,

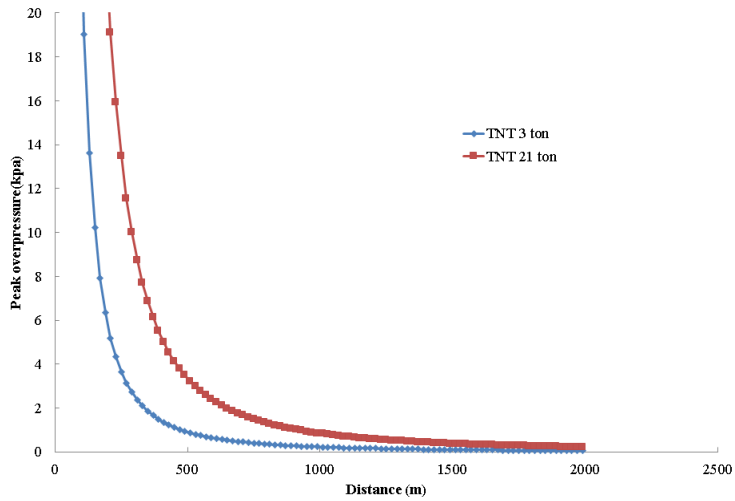

Fig. 3. Peak overpressure change with distance when TNT 3 tons and 21 tons were detonated.

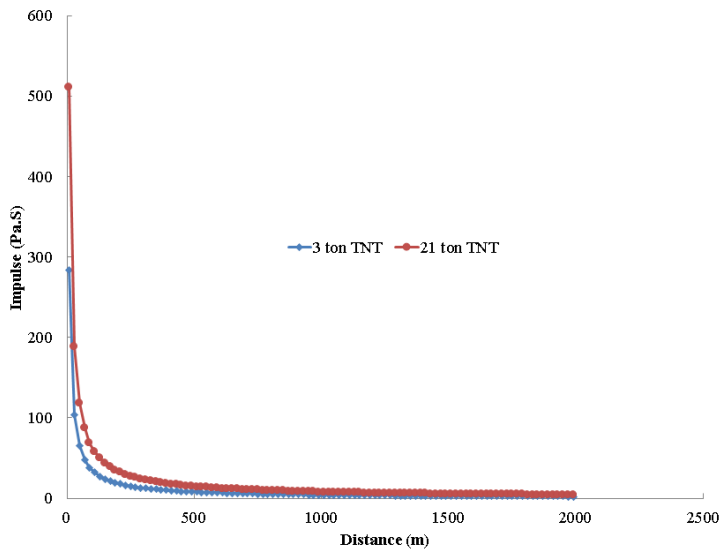

Fig. 4. Impulse change with distance when TNT 3 tons and 21 tons were detonated.

Table 3. Damage approximation related to air blast(modified from Kinney and Grahm, 1985)

Damage	Overpressure (psi)	Overpressure (KPa)
Typical window glass breakage	0.15-0.22	1.034-1.517
Minor damage to some buildings	0.5-1.1	3.447-7.58
Panels of sheet metal buckled	1.1-1.8	7.58-12.4
Failure of concrete block walls	1.8-2.9	12.4-20
Collapse of wood framed buildings	Over 5	Over 34.4
Serious damage to steel framed buildings	4-7	27.5-48.2
Severe damage to reinforced concrete structures	6-9	41.3-62
Probable total destruction of most building	10-12	68.8-82.6

Table 4. Properties of chemical compounds considered in this study

Chemical	Molar weight (g/mol)	Heat of formation (kJ/mol)	Molar heat capacity (cal/mol·K), constant volume	Density (g/cm^3)
CaC_2	64.1	-59.8		2.22
H_2O	18	-241.8 (g)	7	1
$Ca(OH)_2$	74.093	-986.6	20.9	2.211
C_2H_2	26.037	227.4	7.91	1.097e-3
NH_4NO_3	80	-365		1.12
CO_2	44	-393.5	6.7	1.977
O_2	32	0	5.0	1.429e-3
H_2	2	0	4.86	0.0852e-3
TNT	227.13	-54.4	58.15(*Cp)	1.654
CO	28	-110.5	4.86	1.25e-3
N_2	28	0	4.9	1.251e-3

*Cp : constant pressure.

velocity of detonation), 압력은 다음과 같이 계산할 수 있다. 폭발에너지 계산. 폭발 전후 화학 성분들의 생성열(heat of formation) 차이를 통해 폭약의 생성열(Q)를 계산한다.

(a) 폭발 후 생성된 성분들의 몰수(n_i)와 몰 열용량(molar heat capacity)을 이용하여 온도 상승 정도를 계산한다.

$$Q = \Sigma n_i C_{vi} (T_2 - T_1) \quad (7)$$

여기서 Q는 1mol의 반응에서 발생하는 열(cal), C_{vi}는 몰 열용량 (cal/mol·k), T_1은 초기온도(℃), T_2는 나중온도(℃)이다.

(b) 반응열을 이용하여 폭굉속도를 추정할 수 있다(Sen, 1995).

$$VOD = \sqrt{Q}(1+1.3\rho) \quad (8)$$

여기서 Q는 생성열(J/kg), ρ는 폭약의 밀도(g/cm^3), VOD는 폭굉속도(m/sec)이다.

(c) 폭굉속도와 밀도를 이용하여 폭굉압(P_d)을 계산할 수 있다(Sen, 1995).

$$P_d = \rho \times \frac{VOD^2}{4} \quad (kPa) \quad (9)$$

위 식들을 이용하여 텐진 폭발 사고의 원인으로 추정되는 화학반응에서의 폭발에너지를 분석하였다.

4.2.1 아세틸렌 가스의 발생

$$CaC_2(s)+2H_2O(l) \rightarrow Ca(OH)_2(s)+C_2H_2(g) \quad (10)$$

4.2.2 아세틸렌 가스 폭발(1차 폭발)

아세틸렌은 공기중 농도가 부피 기준 2.5~81% 사이에서 폭발한다. 텐진 폭발의 경우, 화학반응에 의해 아세틸렌의 농도가 점진적으로 증가하는 과정에서 폭발하였을 것이기 때문에 최저 농도 부근에서 폭발하였을 것으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 아세틸렌의 농도가 5%인 경우에 대해 폭발에너지를 계산하였다. 공기 중의 산소 농도는 부피 기준 21%이고 질소가 78%를 차지하고 있는 것으로 가정하였다. 따라서, 공기 95%, 아세틸렌 5%인 상태에서 부피 V(m^3)에 포함된 산소의 질량은

$$0.95V \times 0.21 \times 1.429(kg/m^3) = 0.285V(kg) \quad (11)$$

$$0.285V \times 1000(g)/32(g/mol) = 8.9V(mol) \quad (12)$$

동일 부피 V에서의 질소의 질량은

$0.95V \times 0.78 \times 1.251(kg/m^3) = 0.927V(kg)$ (13)

$0.927V \times 1000(g)/28(g/mol) = 33.1V(mol)$ (14)

아세틸렌 가스의 질량은

$0.05V \times 1.097(kg/m^3) = 0.0549V(kg)$ (15)

$0.0549V \times 1000(g)/26.037(g/mol) = 2.11V(mol)$ (16)

따라서 반응 가스의 몰비를 고려한 반응식은 다음과 같다.

$$C_2H_2(g)+4.21O_2(g)+15.7N_2(g) \rightarrow 2CO_2(g)+H_2O(g)+1.72O_2(g)+15.7N_2(g) \quad (17)$$

Table 4의 화학식을 구성하는 분자들의 반응열(heat of formation) 값을 이용하여 폭발에너지를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = 227.4-2\times(-393.5)-(-241.82) = 1256KJ/mol=300000cal/600g \quad (18)$$

아세틸렌 가스 폭발에너지가 몰당 300000cal이므로 식 (7)을 이용하여 폭발에 의한 온도 상승을 예측할 수 있다. 초기 온도는 15℃로 가정하였다.

$$300000cal/mol=[2\times(6.7)+7+1.72\times(5)+15.7\times(4.9)]\ (T_2-15) \quad (19)$$

폭발에 의한 온도 상승 T_2는 2847℃로 계산된다. 일반적으로 산소와 아세틸렌이 1:1인 경우, 아세틸렌 불꽃의 온도가 약 3200-3500℃인데 비해 낮은 온도로 추정되는 것은 아세틸렌의 농도와 산소의 공급 차이에 의한 것으로 보인다.

공기(95%)와 아세틸렌 가스(5%)의 밀도는

$$0.95\times0.21\times1.429+0.95\times0.78\times1.251+0.05\times1.097=1.267E\text{-}3g/cm^3 \quad (20)$$

아세틸렌 가스 폭발에 의해 발생하는 Q=1256 KJ/mol =2,093,333J/kg이므로 폭굉속도는

$$VOD=(2,093,333)^{1/2}(1+1.3\times1.267E\text{-}3)=1446m/sec \quad (21)$$

폭굉압은

$$P_d=1.267e\text{-}3\times(1446)^2/4=662KPa \quad (22)$$

가스의 폭발 시 비중이 낮기 때문에 위 경험식을 이용하는 경우 고체 폭약에 비해 상대적으로 낮은 폭굉속도가 예측된다. 가스 폭발에 적합한 경험식을 활용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4.2.3 질산암모늄 폭발(2차 폭발)

아세틸렌 가스의 폭발에 의해 질산암모늄이 갑자기 기폭되었다고 보면 다음 화학반응이 발생하였을 것으로 추정할 수 있다. 연료의 역할을 하는 유류의 유입을 확인할 수 없는 상황이므로 질산암모늄의 분해 반응만을 고려하였다.

$$NH_4NO_3(s) \rightarrow N_2(g)+2H_2O(g)+1/2O_2(g) \quad (23)$$

$$Q=-365-2\times(-241.8)=118.6kJ/mol=28,238cal/mol=1,482,500J/kg \quad (24)$$

질산암모늄의 몰당량이 80g이므로 800톤의 질산암모늄이 동시에 폭발하는 경우, 발생하는 폭발 에너지는

$$800000000/80(mol)\times118.6(kJ/mol)=1,186,000MJ=282,380Mcal \quad (25)$$

따라서 질산암모늄 800톤이 폭발하면 TNT 21톤의 폭발 시 발생하는 폭발에너지 91,500MJ 보다 13배에 달하는 폭발에너지가 발생할 수 있다. 즉, 질산암모늄 800톤 중 일부가 폭발하더라도 TNT 21톤의 폭발에 맞먹는 폭발이 가능하며 따라서 텐진 폭발사고의 2차 폭발은 질산암모늄의 폭발이 원인이 될 수 있는 것으로 추정할 수 있다. 질산암모늄의 폭발 시 폭발에 의한 온도상승, 폭굉속도, 폭굉압은 식 (7)~(9)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$T_2=28238/(4.9+2\times7+2.5)+15=1334℃ \quad (26)$$

$$VOD=(1482500)^{1/2}(1+1.3\times1.12)=2990m/sec \quad (27)$$

$$P_d=1.12\times(2990)^2/4=2,503,228,000Pa=2.5GPa \quad (28)$$

질산암모늄의 폭발 시 아세틸렌 가스 폭발에 비해 높은 폭굉압과 폭굉속도가 발생하는 것을 알 수 있으며 이는 1차 폭발 보다 훨씬 강력했던 2차 폭발을 설명하는 근거가 될 수 있을 것이다. 폭발 과정에서 인접한 유류저장소에 저장된 연료유의 유입이 있는 경우, 질산암모늄은 더욱 강력한 폭발을 일으킬 수 있었을 것이다.

5. 결 론

2015년 8월 발생한 텐진항 폭발사고는 많은 인명, 재산상의 피해를 가져왔다. 텐진항 폭발사고는 화학물질을 보관하는 장소에서 발생하였으며 물과 탄화칼슘(CaC_2)의 반응에 의해 발생하는 아세틸렌 가스의 1차 폭발, 이에 의한 질산암모늄(NH_4NO_3)의 2차 폭발이 원인으로 추정되고 있다. 본 연구에서는 폭발의 원인으로 추정되는 화학반응에 대하여 개략적인 폭발에너지 분석을 실시하였다. 중국에서 발생한 폭발사고로 인터넷에서 얻은 제한된 정보를 바탕으로 한 분석이기 때문에 여러 가지 가정이 포함될 수밖에 없었다. 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 질산암모늄 800톤의 폭발은 TNT 21톤 폭발에 비해 13배 정도의 폭발에너지를 발생시킬 수 있다. 즉 저장된 질산암모늄의 일부만 폭발하더라도 텐진항에서 발생한 대규모 2차 폭발과 같은 폭발력을 보일 수 있다.
2) 아세틸렌 가스의 폭발 시 2800℃ 이상의 높은 열이 발생할 수 있으며 이는 질산암모늄에 의한 2차 폭발을 야기할 수 있을 것이다. 특히 유류 저장소에 보관된 연료가 혼입되는 경우, 폭발은 더욱 강하게 발생하였을 것으로 예상할 수 있다.
3) 아세틸렌 가스의 폭발 시 폭굉속도는 1446m/sec, 폭굉압은 662kPa로 계산되며 질산암모늄에 의한 2차 폭발 시 폭굉속도는 2990m/sec, 폭굉압은 2.5GPa로 추정된다. 이는 1차 폭발(TNT 3톤)과 2차 폭발(TNT 21톤)의 폭발 충격 차이를 설명할 수 있다.
4) 경험식을 이용하여 TNT 21톤 폭발 시 폭발압력의 거리에 따른 변화를 추정해본 결과, 폭발 지점에서 약 500m 떨어진 곳에서 유리창 파손이 있는 것으로 평가되지만 실제 2km 떨어진 아파트에서 유리창 파손이 관찰된 것으로 보아 실제 폭발 규모는 TNT 21톤 폭발 보다 컸을 수도 있다. 이는 텐진항 폭발이 지표에서 발생하였으며 따라서 지진규모로 환산되는 TNT 환산량 보다는 그 폭발력이 더 클 수 있음을 의미한다.
5) 텐진항 사고의 원인이 명확하게 밝혀지지 않았지만 화학물질의 반응에 의해 유사한 폭발이 발생할 수 있음을 본 연구를 통해 알 수 있었다. 따라서 국내에서 유사한 사고를 방지하기 위해서는 화학물질이 보관된 곳에서의 화재 시 화재진압에 유의해야 할 것이다. 또한 평소 안정적인 물질이 온도와 혼합물의 존재에 따라 강력한 폭발물로 바뀔 수 있으므로 화학물질의 이러한 특성을 고려하여 보관을 하도록 유도하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 권상기, 박정찬, 2015, 가스폭발에 따른 폭발에너지를 평가하기 위한 TNT 등가량 환산 방법에 대한 고찰, 화약발파, 33권 3호, pp. 1-13.
2. 이근원, 2005, 중대산업사고 사례 데이터베이스를 이용한 사고원인 분석, 한국산업안전공단 보고서 2005-15-33.
3. Alonso, F.D., 2006, Characteristic overpressure-impulse-distance curves for the detonation of explosives, pyrotechnics or unstable substances, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 19, no. 6, pp. 724-728.
4. BBC.com, 2015, China explosions:Tianjin blasts ‘on seismic scale’.
5. BBC.com, 2015, China explosions: Potent cheical mix behind Tianjin blasts.
6. Brode, H.L., 1955, Numerical solution of spherical blast waves, Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, New York.
7. Chinadaily.com.cn, 2015, 3000 tons of dangerous chemicals stored at warehouse, confirms official.
8. Kinney G.F. and Grahm K.J., 1985, Explosive shocks in air, Springer, Verlag.
9. Mills, C.A., “The design of concrete structure to resist

explosions and weapon effects," Proceedings of the 1st Int. Conference on concrete for hazard protections, Edinburgh, UK, pp. 61-73, 1987.
10. Newmark, N.M. and Hansen, R.J., 1961, Design of blast resistant structures, Shock and Vibration Handbook, vol. 3, Eds. Harris and Crede, Mcgraw-Hill, New York, USA.
11. Sen, G.C., 1995, Blasting technology for mining and civil engineers, ISBS Inc., Portland, USA.
12. US Army, 2007, Explosive and demolitions, FM3-34.214.

권 상 기
인하대학교 에너지자원공학과 부교수

Tel: 032-860-7554
E-mail: kwonsk@inha.ac.kr

김 하 영
인하대학교 에너지자원공학과
암석역학 연구실 석사과정

Tel: 032-860-7554
E-mail: hy_cool@naver.com