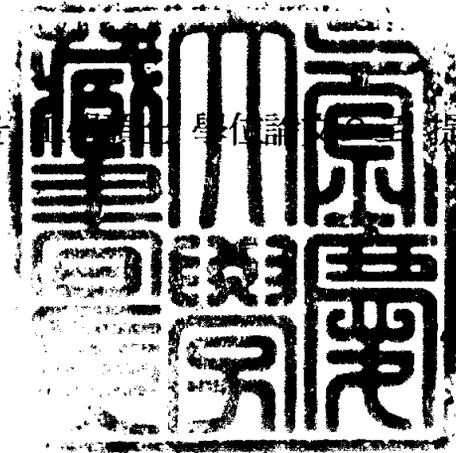


공학석사 학위논문

도심 가스배관에서 누출에 의한 피해범위
예측의 소프트웨어 개발

지도교수 신 봉 기

이 論文을 提出함



2004년 2월

부경대학교 산업대학원

컴퓨터공학과

임 사 환

이 논문을 심사 환의 공학석사
학위논문으로 인준함

2003 년 12월 13일

주 심 공 학 박 사

조 우 현



위 원 공 학 박 사

송 하 주



위 원 공 학 박 사

신 봉 기



목 차

Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1-1. 연구의 배경 및 목적	1
1-2. 연구의 범위 및 방법	2
제 2 장 LNG누출시 화재위험범위 평가에 관한 이론적 고찰	4
2-1. 우리나라의 LNG이용 현황	4
2-1-1. LNG의 용도와 공급체계	4
2-1-2. 우리나라의 LNG 수급현황 및 전망	6
2-2. LNG의 특성과 누출시 위험성	9
2-2-1. LNG의 물리·화학적 특성	9
2-2-2. LNG누출시 위험성	11
제 3 장 평가범위추정을 위한 이론적 고찰	13
3-1. 누출속도	13
3-2. 확산	14
3-3. 증기운폭발 해석	14
3-3-1. 폭발개론	14
3-3-2. 증기운폭발	16
3-3-2-1. 폭풍파 특성	18
3-3-2-2. 증기운폭발 모델	20
3-3-2-3. TNT 상당량 모델	21

제 4 장 피해범위 산정 프로그램 알고리즘	31
4-1. 누출원 해석	31
4-2. 기상누출	36
4-2-1. 저장탱크로부터 기상누출	36
4-2-2. 배관으로부터 기상누출	37
4-3. 액상누출	38
4-3-1. 저장탱크 파손에 의한 액상누출	38
4-3-2. 배관으로부터 기상누출	38
제 5 장 피해 범위 평가	40
5-1. 화재위험범위 도출을 위한 조건의 설정	40
5-1-1. 누출상황과 화재위험범위의 결정	40
5-1-2. 화재위험범위 추정을 위한 계산조건의 설정	40
5-2. 화재위험범위의 도출	41
5-2-1. 풍속에 의한 TNT상당량	41
5-2-2. 대기안정도에 따른 TNT상당량	42
5-2-3. 지면 거칠기에 따른 TNT상당량	42
5-2-4. 상대습도에 따른 TNT상당량	43
5-3. 화재위험범위추정 결과의 분석	43
제 6 장 결론 및 향후과제	48
참고문헌	50

그림 목 차

[그림2-1] 년별 국내 총에너지 소비구성비율	4
[그림2-2] LNG 공급체계	6
[그림3-1] 폭발의 분류	15
[그림3-2] 전과반응의 개념	16
[그림3-3] 폭풍파의 여러 형태	18
[그림3-4] 측면압력과 반사압력	19
[그림3-5] 증기운폭발 모델 개념도	20
[그림3-6] TNT 폭발에 따른 피크 과압, Marshall	22
[그림3-7] 환산거리에 따른 환산 피크 과압	28
[그림3-8] 양의 상 과압 지속시간과 폭풍파 형태	29
[그림5-1] 풍속변화에 따른 피해거리	44
[그림5-2] 대기조건에 의한 피해거리	45
[그림5-3] 지면거칠기에 따른 피해거리	46
[그림5-4] 상대습도에 따른 피해거리	47
[그림6-1] 과압과 거리와의 관계	48

표 목 차

[표2-1] LNG 수급추이	7
[표2-2] LNG 전국공급사업 기본계획	8
[표2-3] LNG 저장탱크 운영현황 및 건설계획	8
[표2-4] LNG를 구성하는 주요물질의 성질	9
[표2-5] LNG의 특성	10
[표2-6] LNG 누출시 피해와 대응방법	12
[표3-1] 증기운폭발사고의 사례	17
[표3-2] 폭발성 증기와 가스에 대한 폭발효율	25
[표3-3] 탄화수소와 수소의 연소열	26
[표4-1] BM 도표 개략 산출 식(연속누출)	35
[표4-2] BM 도표 개략 산출 식(순간누출)	36
[표5-1] 계산식에 적용되는 각 조건	41
[표5-2] 풍속에 의한 TNT상당량의 피해 변화량	42
[표5-3] 대기안정도에 의한 TNT상당량의 피해 변화량	42
[표5-4] 지면거칠기에 의한 TNT상당량의 피해 변화량	43
[표5-5] 상대습도에 의한 TNT상당량의 피해 변화량	43
[표5-6] 풍속에 의한 TNT상당량의 피해영향거리	44

[표5-7] 대기안정도에 의한 TNT상당량의 피해영향거리	45
[표5-8] 지면거칠기에 의한 TNT상당량의 피해영향거리	46
[표5-9] 상대습도에 의한 TNT상당량의 피해영향거리	47
[표6-1] 건축물의 피해정도	49

**Development of Software for Damage area Estimation by Leakage of Gas Pipeline
in a City**

Sa-Hwan Leem

Dept. of Computer Eng., Graduate School,

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

With the sophistication of the industrial society, demand on gas as an environment-friendly source of energy has shown a rapid growth and people's inner desire for safety also has become stronger than ever. In this connection, there have been many studies on the risk assessment. This essay proposes a tool to easily recognize a safe area from leakage of gas in distribution pipelines by predicting the damage range with a risk assessment program. By using this program, one can have the safety management in his control focused on the high consequence areas around city centers and thus can have easy access to the establishment of policy program against economic risk factors.

In this respect, it may not be excessive to say that the current risk assessment based on the formation of pipelines is a very limited evaluation of effects covering a very simple scope. Concludingly, the embodiment of multimedia technology and extensive evaluation of effects by using GPS enables the integrated management of safety on risky areas around city centers is expected to help coming up with an easy evaluation of risk factors.

Hence, further study will be carried out in order to apply the method in reality as a form of virtual reality assessment on the multimedia after conducting more on-site test and analysis of incident cases.

제1장 서론

1-1. 연구의 배경 및 목적

국민경제 발전이 증가함에 따라 최근 우리나라의 에너지소비는 양적으로 크게 증가하고 있다. 그런데 에너지의 사용은 필연적으로 오염물질의 배출이 뒤따르기 때문에 정부에서는 에너지수요증가에 대처하는 한편 환경보전의 측면에서 대기오염을 줄일 수 있는 근원적 방법으로서 저유황연료의 보급과 함께 청정연료인 액화천연가스의 보급을 확대하고 있다. 액화천연가스 즉, LNG(Liquefied Natural Gas)는 수송 및 저장을 쉽게 하기 위하여 냉각시켜 액화한 천연가스인데 연소시에 대기오염물질이 거의 배출되지 않는 무공해 연료로써 세계적으로 널리 사용되고 있으며, 대도시의 대기환경보전에 큰 기여를 할 수 있는 최적의 에너지원으로 평가받고 있다.

LNG는 1986년 처음으로 우리나라에 도입될 당시에는 주로 발전용으로 쓰이다가 이후 정부의 도시가스 확대보급정책에 따라 도시가스용으로 수도권지역에 공급됨으로써 수요가 크게 증가하였으며 앞으로도 그 수요가 급격히 증가될 전망이다. 그런데 LNG나 LPG(Liquefied Petroleum Gas)등의 가스연료이용이 증가함에 따라 사용과정중의 부주의나 시설미비로 인한 폭발 및 화재사고도 빈발하고 있다. 그 중에서도 대규모 저장시설의 누출사고는 대규모의 재해를 초래할 수 있는데 1992년 2월 23일 광주에서 발생한 「해양도시가스 LPG저장탱크 폭발사고」는 위험물질 저장시설의 사고에 대한 기술적·제도적 대책이 시급함을 일깨워 주었다.

가연성 또는 유독성인 위험물질 저장시설은 불가피하게 우리의 환경에 존재함으로써 적지 않은 위험이 되고 있는데 이러한 위험시설의 사고와 그에 따른 위험성에 대한 평가와 대책에 관해서는 지금까지 주로 안전관리의 입장에서 많이 연구되었다. 일반적 폭발재해에 대한 지진웅(1984)의 연구와 김인룡(1985)의 고압가스사고에 관한 연구에서는 사고위험과 피해에 대하여 취급주의라든가 안전의식 고취 등의 대책이 제시되었고, 전병근(1985)은 가스연료 이용시의 폭발위험성에 관한 연구를 한 바 있는데 이 연구에서는 LPG와 전혀 다른 특성과 공급체계를 갖고 있는 LNG에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않았다. 한편 오동규(1986)는 염소가스 누출사고시의 피해범위에 대해 연구하였는데 피해범위 도출을 위하여 대기확산모형을 적용했다는 점에서 본 연구와 유사하지만 대상이 유독물질이라는 점에서 가연성 물질을 다룬 본 연구와는 차이가 있다.

현재 우리나라에서는 산지로부터 해상 수송되어 온 LNG를 저장하고 기화시켜 소비지에 공급하기 위한 시설로서 제1인수기지인 평택에서는 수도권을 제외한 중부지

역에 공급을 하고 있으며, 제2인수기지는 인천에 건설되었으며 수도권을 공급하고 있다. 날로 급증하는 LNG수급확대계획에 의하여 제3인수기지를 통영에 건립하여 완성단계에 있다. 인수기지에는 LNG저장탱크가 설치되는데 LNG는 매우 온도가 낮은 상태(-162℃)로 그리고 통상 대량으로 저장되어 있기 때문에 LNG저장탱크 파손으로 LNG가 누출되면 급속히 기화하여 대기를 통해 넓은 지역에 확산되어 대규모의 화재와 폭발재해를 초래할 수 있고 그 피해의 범위가 넓다는 점에서 주목할 필요가 있다. 이미 외국의 경우에는 LNG사용초기인 1944년과 1973년에 미국에서 LNG저장탱크의 화재폭발사고가 있었으며 1984년에 멕시코에서도 대규모 화재폭발 사고가 일어난 바 있다.

LNG사용의 역사가 비교적 짧은 우리나라에서는 아직 LNG저장탱크의 큰 사고는 경험한 바 없지만 외국의 사례나 LPG에 관련된 사고사례를 비추어 볼 때 LNG의 특성과 저장탱크의 조건을 고려한 누출사고위험에 대한 대책이 마련되어야 할 것이다. 물론 위험물 저장시설에는 최신기술을 이용하여 사고방지를 위한 안전설비를 하도록 되어 있지만 사고란 예측할 수 없는 것이므로 잠재적인 사고의 위험으로부터 인근 주민의 안전을 최대한 확보할 수 있는 제도적 대책이 저장탱크를 포함한 인수기지의 부지결정이나 설계단계에서부터 고려되어야 할 것이다. 그리고 정부나 위험시설물관계자는 위험시설물에 대한 주민의 알 권리를 충족시키고 나아가 사고발생으로 인한 비상시의 행동요령 등을 숙지시켜야 할 것이다. 이와 같이 사고발생의 경우를 대비한 설계과정이나 사고가 일어났을 때 인근주민을 효과적으로 대피시킬 수 있는 비상계획을 세우기 위해서는 사고로 인한 위험의 정도와 범위를 가능한 정확하게 파악하는 것이 관건이다. 그러므로 본 연구에서는 도심가스배관에서의 가연성인 LNG나 LPG 누출사고가 일어나 대기중에 확산되었을 때 화재가 일어날 수 있는 위험범위를 추정해 보고 이러한 작업의 결과를 이용하여 LNG나 LPG 배관망 설계 및 위치선정과 LNG 누출사고시에 안전관리자들은 물론 인근지역주민의 안전을 최대한 확보할 수 있는 대책을 모색해 보고자 한다.

1-2. 연구의 범위 및 방법

LNG누출로 인한 위험은 주로 기화 후의 가연성에 기인한다. 만약 LNG가 누출된 직후에 인화된다면 화재 및 폭발에 의한 피해는 배관망주위에 국한되지만 그렇지 않고 LNG증기가 대기중에 확산된 후에 인화된다면 피해범위가 넓어져서 더 많은 사람들이 그 위험에 노출될 가능성이 있기 때문에 인근 주민의 입장에서는 후자의 경우가 더 중요한 문제가 된다. 그러므로 본 연구에서는 LNG가 누출되어 대기확산

된 후의 가연성으로 인한 화재위험을 대상으로 한다. 이를 위하여 열역학과 대기 확산에 관한 이론식 또는 경험식을 이용하여 LNG누출사고시의 여러 조건에 따른 화재위험범위를 도출하였다. 적용대상은 정부의 에너지 수급계획상 설치가 필요한 인천의 제2인수기지에서의 공급망이며, 인천의 기상자료를 이용하였고 일부조건은 계산식 적용을 위하여 단순화하였다.

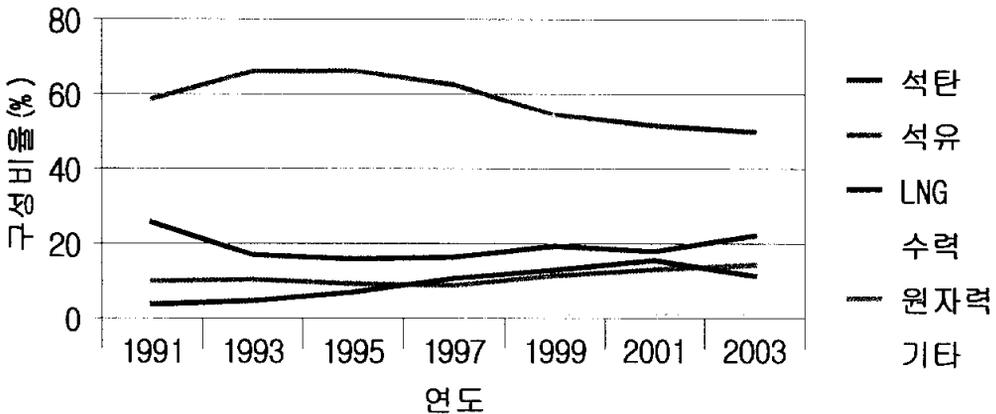
본 논문은 제2장에서 LNG수급과 LNG의 특성과 누출시의 위험성에 대하여 알아보고, 제3장에서는 평가범위추정을 위한 계산식을 이론적으로 고찰하고 위험범위결정에 영향을 주는 요인을 살펴본다. 제4장에서는 가스누출시의 배관망의 조건과 기상조건을 설정하여 평가프로그램을 작성하고 제5장에서는 각 조건에 따른 위험범위를 도출한 후 결과를 분석하고 제6장에서 앞의 결과를 요약하여 결론을 맺는다.

제2장 LNG누출시 화재위험범위 평가에 관한 이론적 고찰

2-1. 우리나라의 LNG이용 현황

2-1-1. LNG의 용도와 공급체계

세계적으로 에너지소비량이 계속 증가하는 가운데 년별 국내 에너지 소비의 구성 비율에 있어서 다음의 <그림 2-1>에서 보는 바와 같이 석유와 석탄의 비율은 감소하는 반면 원자력과 천연가스의 비율은 점차 증가하는 추세이다.



자료 : 에너지경제연구원, 「에너지통계연보」, 2003.9

<그림 2-1> 년별 국내 총에너지 소비구성비율

천연가스를 비롯한 가스연료가 사용의 편리함에도 불구하고 우리의 실생활에 이용된 역사가 짧은 주된 이유는 가스연료가 다른 고체나 액체연료에 비하여 저장과 운반이 기술적으로 매우 곤란하였기 때문이다. 그러나 가스연료의 액화기술과 수송수단이 발전하여 이러한 문제가 해결되었고, 사용이 편리하다는 점과 특히 최근 최대의 관심사인 환경오염문제를 해결하는데 기여할 수 있다는 장점 때문에 가스연료의 사용이 급격히 증가하고 있다.

천연가스의 경우에도 네델란드와 북해에서 대규모의 가스전이 발견되고 액화기술의 발전과 해상수송의 발달로 저장과 운반이 용이해 지면서 그 수요가 비약적으로 늘어나기 시작했다.

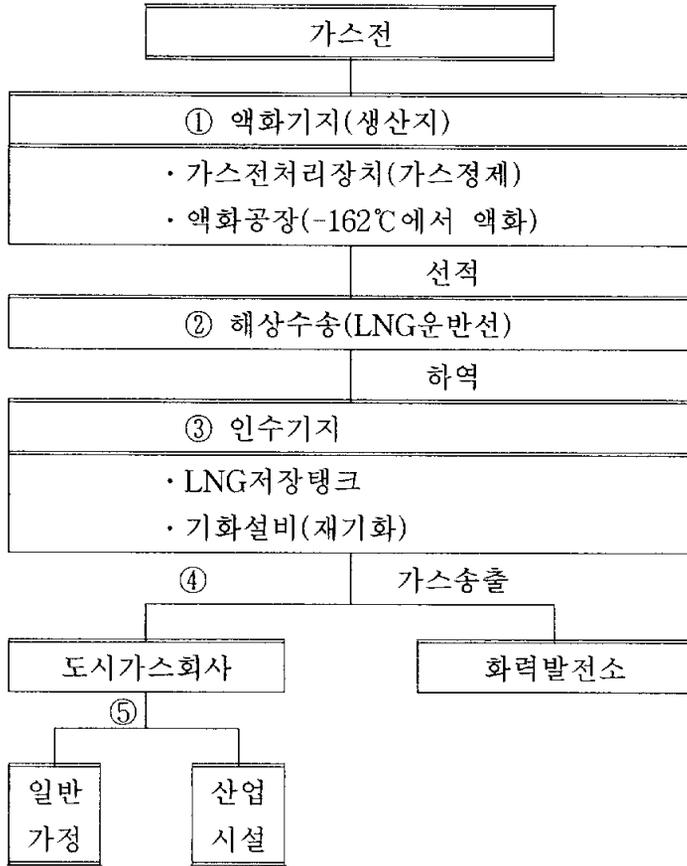
천연가스 중에 함유된 탄산가스와 유화수소 등의 불순물을 제거한 후, 에탄 및 프로판을 일부 함유하고 메탄을 주성분으로 하는 가스를 영하 162℃로 액화한 것이

바로 액화천연가스(LNG)인데 이 천연가스의 액화는 1910년 미국 웨스트버지니아 주에서 최초로 실시된 이후, 1941년 미국 클리블랜드시의 이스트 오하이오(East Ohio) 가스회사에 의해 본격적으로 실용화되기 시작하였다.

LNG는 연소시 대기오염물질의 배출이 적어서 공해방지에 효과적이고, 연소성이 좋아 운전이 편리하며, 안정적 공급이 보장되기 때문에 연료용으로 발전부문과 산업부문에 이용되며 도시가스용 연료로서도 각광을 받고 있다. 한편 LNG는 탄화수소류를 필요로 하는 암모니아, 메탄올, 프로필렌 등을 생산하는 화학공업에 원료로서 이용되기도 하고 LNG의 저온성(-162℃) 자체가 이용되기도 한다.

이러한 LNG를 이용하기 위한 사업은 천연가스전의 개발과 천연가스의 생산·액화·수송·저장·기화 및 공급의 모든 단계가 일관성을 지닌 사업으로서 생산국과 소비국간의 긴밀한 협력하에 수행되는 특수주문 형식의 장기사업이다. 그러므로 LNG사업은 에너지의 다원화와 안정공급이라는 정책적 차원에서 기획·결정·집행되며 계약되기도 보통 20년 또는 그 이상으로 하고 있는 경우가 많다.

우리나라는 현재 인도네시아로부터 LNG를 수입하고 있는데 그 공급체계를 순서대로 설명하면 <그림 2-2>와 같다



자료 : 한국가스공사, 「통영 LNG인수기지플랜트개요」, 2003

<그림 2-2> LNG 공급체계

- ① 가스산지로부터 산출된 천연가스는 가스정제 후 액화공장에 수송되어 -162℃로 냉각된 후 LNG로서 탱크에 저장된다.
- ② 액화기지 탱크에 저장된 LNG는 LNG수송선에 의해 해상으로 수송되어 인수기지 탱크에 저장된다.
- ③ 인수기지 저장탱크의 LNG는 펌프에 의해 기화설비로 이송된다.
- ④ 기화설비에의 재기화되어 생산된 천연가스는 화력발전소나 도시가스망으로 송출된다.
- ⑤ 도시가스를 통한 산업시설 및 일반가정에 배관망을 통하여 공급된다.

2-1-2. 우리나라의 LNG 수급현황 및 전망

우리나라에는 인구밀도가 높은 대도시가 많이 형성되어 있고 가정용, 상업용 연료가 지나치게 연탄중심으로 되어 있었기 때문에 겨울철에는 연료를 안정적으로 공급하기가 어려웠고 연탄재 등의 쓰레기문제 및 분진, 아황산가스등에 의한 대기오염 문제가 심각하게 대두되었다. 또한 두 차례에 걸친 석유파동(1973년과 1979년)은 에너지의 안정수급을 확보하기 위하여 국내 총에너지 수요의 석유의존도를 낮추려는 「에너지원 다변화 정책」을 추진하도록 하는 계기가 되었다. 한편 국민생활수준의 향상에 따라 사용이 편리한 고급에너지에 대한 국민들의 수요가 점차 증대하여 오염물질배출이 적고 사용이 편리한 천연가스의 보급을 확대하게 되었다. 그리하여 우리나라는 인도네시아와 LNG도입계약을 체결하고 1985년부터 도입하여 발전용 및 도시가스용으로 사용하고 있다. 1986년부터 2002년까지의 LNG수급추이를 나타낸 <표 2-1>을 보면 특히 도시가스부문의 소비가 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다.

<표 2-1> LNG 수급추이

(단위 : 천톤)

연도	수입량	소비량					재고
		합계	발전용	지역난방	도시가스	자체소비	
1986	117	54	45	-	-	9	63
1990	2,291	2,329	1,741	-	576	12	46
1995	7,060	7,087	3,412	150	3,417	108	103
2000	14,578	14,556	4,353	335	9,528	340	591
2002	17,470	17,768	5,900	609	11,194	65	426

자료 : 에너지경제연구원, 「에너지통계연보2003년판」, (2003년8월)

2002년 11월에 산업자원부와 한국가스공사는 발전용과 도시가스제조용으로 수요가 증가하고 있는 LNG에 대한 「장기(2002-2015년) 수급계획」을 발표하였다. 이는 신규공급지역 감소, 경제급전방식의 발전용 연료소비가 증가세 둔화의 주 요인으로 소비규모는 5차계획에 비해 도시가스 수요가 더 증가할 것으로 전망되어 전체적으로 다소 확대되었다. <표2-2>에서 보는 바와 같이 2015년에는 28,240천톤에 이를 것으로 전망됨에 따라 1986년부터 운전을 시작하여 현재 공급능력 2,016T/H 규모

인 평택의 제1인수기지는 수요에 부응하기 위해 제2공장을 건설중에 있다.

<표 2-2> LNG 전국공급사업 기본계획

(단위: 천톤, %)

년 도	도시가스		발전용		합 계		
	제5차	제6차	제5차	제6차	제5차	제6차	증감
2001실적	9,580	10,300	6,406	5,287	15,986	15,587	△399
2003	10,770	11,904	6,048	6,355	16,818	18,259	1,441
2005	12,098	13,483	6,202	6,500	18,300	19,983	1,683
2010	14,917	17,482	6,054	4,168	20,971	21,650	679
2015	-	21,243	-	6,997	-	28,240	
연평균증가율(%)							
'01-'10	5.0	6.1	-0.6	-2.6	3.1	3.7	
'01-'15	-	5.3	-	2.0	-	4.3	

주 : 발전용에는 POSCO 및 인천공항에 공급되는 자가발전용 포함

자료 : 산업자원부, “장기천연가스수급계획('02-2015)”, 제2002-225호(2002년11월)

또한 1996년 10월에 2,970T/H 규모의 제2인수기지를 인천에 건설하여 운영중이며, 제3의 인수기지는 통영에 건설하여 990T/H로 공급중이며 계속하여 추가 건설 중이다. 인수기지에 관한 현황과 건설계획은 다음 <표 2-3>과 같다.

<표 2-3> LNG 저장탱크 운영현황 및 건설계획

연도	내 용
1986년11월	평택 인수기지 가동시작
1996년10월	인천 인수기지 가동시작
2002년 9월	통영 인수기지 가동시작
2003년현재	인천 인수기지 #15~18 건설중('97.6~'04.10) 인천 인수기지 #19, 20 건설중('03.8~'09.6) 평택 인수기지 2공장 #11~14 건설중('02.10~'08.6) 통영 인수기지 #4~7 건설중('00.4~'05.6) 통영 인수기지 #8~10 건설중('01.10~'06.8)

자료 : 한국가스공사, “기지 건설사업 추진 현황”, 2003

이상에서 살펴 본 바와 같이 LNG수급확대 계획에 따라 LNG저장탱크의 건설은 계속될 것이다. 현재 배관망은 인천, 평택, 통영에 위치한 천연가스 생산기로부터 각 지역의 도시가스사 또는 발전소의 울타리 경계선까지 펼쳐져 있으며 총 길이는

2,435km에 이르고 있다. 일반적으로 지름이 36인치 배관부터 20인치 배관까지 사용되며 배관을 통과하는 가스의 압력은 최고 70kg/cm²(6.86MPa)에서 최저 8.5kg/cm²(0.83MPa)이고, 이는 물을 수직 상공으로 700m~85m 높이까지 밀어 올릴 수 있는 힘을 의미한다. 또한 이러한 배관은 환상망의 형태로 배관망을 구성하여 천연가스를 공급하고 있다. 따라서 도심가스배관의 건설도 기하급수적으로 늘어나며 이에 따른 사고 위험은 형언하기 어려울 것이다. 이러한 위험시설 없이 살아가는 것이 불가능하다면 모든 안전설비에 만전을 기하여 사고가 일어나지 않도록 하는 것이 최선의 대책이지만 사고가 일어났을 경우에 대비한 대응책을 마련하는 것도 반드시 필요하다. 이를 위하여서는 LNG 누출 사고시 발생할 수 있는 위험이 무엇이며 그에 따른 피해가 어느 정도까지 영향을 미칠 것인가를 정확히 파악하여 그에 대한 대책을 세우고 저장탱크 및 배관의 위치나 규모를 결정할 때 경제적 평가와 함께 반드시 안전성 문제가 고려되도록 해야 할 것이다.

2-2. LNG의 특성과 누출시 위험성

2-2-1. LNG의 물리·화학적 특성

LNG는 천연가스 중에 함유되어 있는 탄산가스, 유화수소 등의 불순물을 제거하고 남은 가스를 대기압 하에서 영하 162℃로 냉각시켜 만든 액체이다. 천연가스를 액화시키면 그 체적이 가스상태의 1/600이 되기 때문에 저장 및 수송면에서 유리한 대신 저온을 유지하기 위한 특수한 저장시설과 운송용 선박이 필요하며 다시 가스로 공급하기 위한 재기화 시설이 필요하다.

<표 2-4> LNG를 구성하는 주요물질의 성질

구성	메탄	에탄	프로판	부탄
분자식	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
분자량	16.04	30.07	44.09	58.12
끓는점(℃)	-161.7	-88.8	-42.6	-0.5
비중(공기=1)	0.553	1.041	1.523	2.010
가연농도(Vol.%)				
범위				
상한	5.0	3.0	2.1	1.8
하한	15.0	12.4	9.5	8.4
자연발화온도(℃)	540	515	450	405

자료 : 1. Medici(김동일 역), p 57

2. Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries(Vol.1), London: Butterworths, 1980. p 485

LNG의 조성은 생산지에 따라 약간의 차이는 있으나 메탄(methane)을 주성분(부피비 91-92%)으로 하고 에탄(ethane, 부피비 6-7%), 프로판(propane, 부피비 약2%)과 그밖에 소량의 부탄(buthane), 이산화탄소, 질소 등을 함유하고 있다. LNG를 구성하는 주요물질의 특성은 <표 2-4>에 나타내었는데 LNG조성의 대부분을 메탄이 차지하므로 일반적인 LNG의 특성은 액화메탄의 성질과 거의 같다.

미국연안경비대(U.S. coast Guard)의 유해화학물질대응정보체계(Chemical hazard Response Information System: CHRIS)의 LNG코드(code)에 수록되어 있는 LNG의 성질을 <표 2-5>에 나타내었는데 여기에 있는 값들은 본 연구의 계산식에 적용될 것이다.

<표 2-5> LNG의 특성

구 분	내 용
일반적 특성	기체는 무색 무취 또는 약한 스컹크 냄새 물에 뜨며 비등 가연성의 눈에 보이는 증기 방출
화학적 반응성	물과 반응안함
수질오염	어류에 대한 독성 : 없음 수서조류에 대한 독성 : 없음 생물학적산소요구량(BOD) : 없음 먹이사슬을 통한 농축력 : 없음
선적정보	순도 : 생성점에 따라 다르다. 일반적으로 최소 90%의 메탄과 소량의 에탄, 프로판, 부탄, 펜탄, 이산화탄소, 질소 등으로 이루어져 있음. 보관온도 : -161.7℃
물리적 및 화학적특성	분자량 : 17.0 끓는점(1기압) : -161.7℃=112 °K 액체비중 : 0.415-0.45(-162℃) 기체비중 : 0.55-1.0 액체밀도 : 414.8kg/m' [저장온도(-162℃)에서] 증발잠열 : 121.8cal/g 공기중 발화한계 : 5.0-15.0(Vol.%) 자연발화점 : 537.2℃

자료 : U.S. Coast Guard. A Condensed Guide to Hazardous Chemical Data(LNG code), 1985.

2-2-2. LNG 누출시 위험성

환경문제에 있어서 환경의 유해물질에 노출된 인간이 받게 될 잠재적 건강상 악영향의 특성을 밝히기 위해 위험성 평가라는 방법이 사용된다. 미국 EPA의 정의에 따르면 위험(risk)이란 사람에게 상해, 질병 혹은 사망을 초래할 가능성을 말하고 사람이 잠재적인 환경위해에 노출됨으로써 상해, 질병 혹은 사망을 초래할 가능성을 특별히 환경위험(environmental risk)이란 용어로 표현한다. 이때 영어의 Risk를 우리말로 표현함에 있어 위험, 위해 또는 위험성, 위험도 등의 단어가 혼용되고 있다. 그러나 '위험'이라는 단어가 갖고 있는 두가지 개념 즉, 인적·물적 피해를 초래할 잠재성을 가진 물리적 상황(Hazard)과 그 피해가 일어날 확률(Risk)을 구분하여 용어를 통일할 필요가 있다. 본 연구에서 언급하는 위험은 피해가 일어날 확률, 즉 Risk의 개념이다.

앞에서 살펴본 LNG의 특성을 볼 때 LNG의 두가지 위험성은 저온성과 가연성이다. 만약 액체상태의 LNG가 피부에 닿는다면 급격히 증발해 버리지만 동상을 일으킬 수 있을 것이다.

한편 LNG가 외부로 누출되면 주위로부터 열을 흡수하면서 기화되고 곧 대기에 확산되고 넓은 범위에 걸쳐 화재발생의 위험이 존재하게 된다. 즉, 기화된 LNG는 독성이 없으므로 누출시의 위험이란 가연성으로 인한 화재 및 폭발위험이며 이 폭발위험은 화재에 따른 것이고 LNG는 대기압 하에서 저온저장으로 고압에 의한 폭발위험은 없다고 본다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 LNG누출후의 화재위험범위를 추정하려는 것이다.

우리나라의 경우 지금까지 보고된 가스연료사용에 따른 많은 사고들은 주로 최종 소비의 단계에서 일어났다. 그에 따라 가스연료사용에 있어서의 안전문제는 주로 최종소비시의 안전대책에만 관심을 두고 있는 실정이다. 그러나 LNG는 특성상 대규모의 인수기지가 필요하고 그 인수기지에는 하역시설, 기화시설과 더불어 저장시설 즉, 저장탱크가 있는데 탱크 역시 규모가 크다. LNG사용의 역사가 오래된 외국의 경우에는 몇 차례의 대형사고가 있었는데 외국에서 일어난 사고의 사례는 다음과 같다.

1. 1944년 10월 20일, 미국 오하이오주 클리블랜드시에 있는 이스트 오하이오(East Ohio)가스회사의 LNG저장탱크가 파손되어 저장중이던 전량이 누출되는 사고가 일어났다. 기화된 LNG증기는 즉시 인화되어 강렬한 불길의 공장을 뒤덮고 하수구를 따라 흘러나간 액체는 기화되면서 계속 폭발을 일으켜 많은 피해를 주었다. 이 사고로 총 128명이 사망하고 부상자는 200-400명인 것으로 추정되었다. 이 사고를 조

사한 광산국(Bureau OF Mines)은 조사결과보고서에서 사고의 원인은 부적당한 강재의 사용이고 이런 공장은 주거지역과 적어도 800m이상 격리되어야 하며 저장탱크 주변에 방류둑(disk or bund)설치가 필요하다고 밝혔다.

2. 1973년 미국 뉴욕 스테이튼 아일랜드에서 LNG저장탱크화재로 40명이 사망하였다.

3. 1984년 11월 19일 새벽 멕시코시티 북방 10km지점의 국영 페멕스 석유회사의 천연가스공장단지에서 화재발생과 연쇄폭발사고로 인근 주민을 포함한 544명이 사망하고 1,500명이 부상당했으며 10만명 이상의 이재민이 발생했다.

위의 사고사례에서 보는 바와 같이 LNG저장탱크의 누출사고는 화재와 폭발로 이어지며 피해의 규모가 크다는 것을 알 수 있다. 참고로 미국연안경비대의 유해화학물질 대응정보체계에서는 LNG누출로 인해 야기될 수 있는 피해와 대응방법을 <표 2-6>의 내용과 같이 제시하고 있다.

<표 2-6> LNG누출시의 피해와 대응방법

구 분		내 용
화재	특정	가연성 증기를 따라 역인화가 일어날 수 있음 밀폐된 공간에서 증기가 인화될 경우 폭발할 수도 있음
	대응책	가능한 한 유출을 중지시킨다. 오염된 지역은 물을 뿌려 냉각하고 진화하는 사람보호 불은 타도록 내버려 둬
신체노출	증기	흡입시 현기증, 호흡곤란, 의식불명의 증세 눈, 코, 목에 비자극적 대피하여 신선한 공기를 마심 호흡중단시 인공호흡 실시 호흡곤란시 산소호흡기 이용 의료지원 요청
	액체	동상을 일으킴 오염지역을 물로 충분히 세척 오염부위를 문지르지 말것 의료지원 요청

자료 : U. S. Coast Guard, A Condensed Guide to Hazardous Chemical Data(LNG code), 1985.

제 3 장 평가범위 추정을 위한 이론적 고찰

3-1. 누출속도

위험성 가스누출은 파이프라인 또는 저장탱크 파손에 의하여 내부물질의 누출에 따른 것인데 누출전 물질의 상태에 따라 액체가 누출되어 증발되거나 가스가 누출되어 증기운을 형성하게 된다. 이때 누출속도에 대하여 표현되는 계산식은 크게 가압탱크로부터 액상 또는 기-액상 분출과 가압탱크로부터의 기체누출로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 가압탱크로부터의 기체 누출과 유사한 도심가스배관에서의 누출에 대하여서만 논하였다. 기상누출은 음속이거나 음속이하의 속도로 누출되는데, 이를 구별하기 위하여 먼저 임계류압력비(critical flow pressure ratio)에 대한 조건식은

$$\frac{P_s}{P_a} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

P_s : 탱크내에서 가스의 압력(N/m²)

P_a : 대기압력(N/m²)

$$\gamma : \text{비열비} \left(\frac{C_P}{C_V}\right) \quad (2)$$

만약 위 조건식을 만족하면 방출기체는 음속이상으로 누출되며, 누출속도는

$$Q = C_D \sqrt{\left(\frac{\gamma M}{R \cdot T_s}\right) \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

Q : 방출속도(kg/s)

C_D : 방출계수(≤ 1.0)

A : 방출직경 면적(m²)→오리피스의 단면적

M : 분출량(kg-mol)

R : 가스상수(8310 J/kg-mol °K)

T_s : 대기온도(°K)→저장탱크의 온도

만약 식(1)을 만족하지 않을 경우 방출기체는 음속미만이고 누출속도는

$$Q = C_D A 2 \rho_s \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \sqrt{\left(\frac{P_A}{P_S}\right)^{\frac{2}{\gamma}} \left(\frac{P_A}{P_S}\right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}}} \quad (4)$$

ρ_s : 탱크내에서 가스의 밀도(kg/cm³)

P_s : 탱크내에서 압력(N/m²)

C_D : 분출계수로서 대부분의 choked flow에서 0.8로 가정한다.

3-2. 확산

대기중에 증기운의 분산모델 형태는 연속적인 누출 근원지로부터 방출되는 물질의 정상상태농도를 나타내는 plum과 고정된 양의 단일 방출로 물질의 일시적인 고농도를 나타내는 puff의 형태로 나눌 수 있다. 가스가 방출하여 공기와 혼합 및 분산되어 가는 과정을 4단계로 구별할 수 있는데

첫째 단계는 방출속도와 팽창에너지에 의하여 공기와 희석되는 난류단계이고 두 번째 단계는 처음 난류단계와 증기운의 거동이 혼합된 단계이다. 이 단계에서도 방출된 가스는 여전히 공기와 혼합되며, 혼합속도는 초기 난류도에 의하여 결정된다. 세 번째 단계는 공기보다 무거운 가스가 방출될 경우 중력에 의하여 지면으로 가스가 퍼지게 되어 지표면에 도달하게 되면 증기운은 공기보다 무거운 증기운의 거동을 하게 된다. 마지막 단계는 주위공기와 혼합에 의하여 증기운의 밀도가 거의 주위 대기와 비슷하게 되기 때문에 증기운의 부역 또는 압력을 무시할 수 있는 영역으로 주위 대기의 거동에 의하여 공기와 혼합 및 확산이 일어나는 수동적 확산영역이 된다. 또 증기운의 대기중 확산에 영향을 미치는 인자는 풍속, 대기안정도, 표면거칠기, 누출지점의 높이, 누출된 초기 물질의 부력과 운동량에 있다. 풍속이 증가할수록 가스의 확산은 더욱 가늘고 길어지며, 풍향으로 더욱 빨리 이동되며 더욱 많은 공기의 양에 의해 보다 빨리 희석된다. 또한, 누출지점의 높이는 지표면의 농도에 영향을 미치는데 누출지점의 높이가 높을수록 대기의 농도는 감소한다. 그리고 누출된 물질의 부력과 운동량은 누출의 효과적인 고도의 변화를 가져오는데 이러한 요소들에 의하여 누출된 가스가 확산되어 가는 특성을 갖는다.

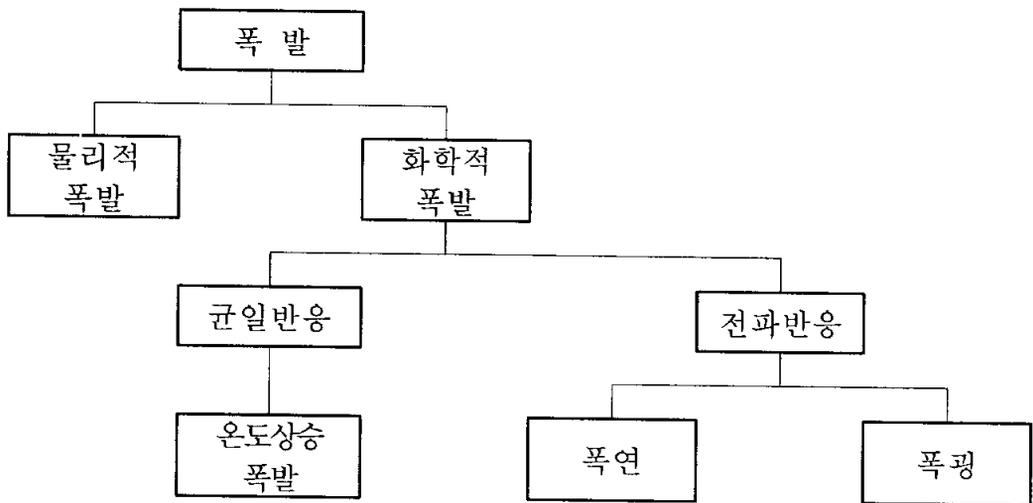
3-3. 증기운폭발현상 해석

3-3-1. 폭발개론

폭발은 에너지 누출지점 주위 공기의 밀도, 압력, 속도의 순간적인 변화를 일으키는 에너지의 누출로 정의한다. 또한 CMR의 가스폭발핸드북에서는 압력의 빠른 증가로 인해 유도되는 사건으로 폭발을 정의하고 있으며, 예혼합가스(연료-공기 또는

산화제)의 연소가 빠른 압력 증가를 일으키는 공정으로 가스폭발을 정의하고 있다.

<그림 3-1>은 일반적인 폭발의 분류를 나타낸 것으로 폭발에는 물리적 폭발과 화학적 폭발로 나눌 수 있으며, 물리적 폭발은 액상 또는 기상에서 기상으로의 상변화, 온도상승이나 충격 등에 의하여 압력이 이상적으로 상승하여 일어나는 폭발로 보일러 폭발 또는 BLEVE 등과 같이 물리적인 힘에 의하여 재료가 파열되어 폭발하는 것을 말하고, 화학적 폭발은 화학반응에 의해 폭발이 일어나는 것을 의미한다. 예를 들어 가연성 가스가 공기 중에 혼합된 후 연소될 때 일어나는 폭발현상을 말한다.

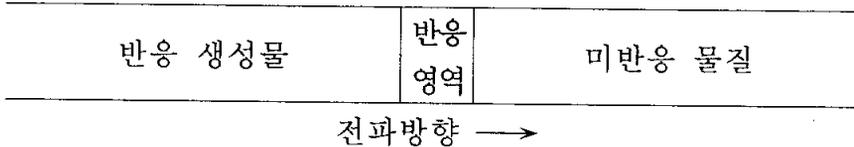


<그림 3-1> 폭발의 분류

화학적 폭발은 균일한 화학반응(uniform reactions)과 전파반응(propagating reactions)으로 구분하며, 균일한 화학반응은 탱크내부에서 모든 부분이 거의 동시에 같은 속도로 화학반응이 일어나는 것을 말하며, 주로 기상반응기에서 일어난다. 즉 기상반응기 내부 반응에 의하여 발생하는 열의 제거가 잘 되지 않을 때, 반응기 내부는 거의 균일하게 온도가 상승하게 되고, 온도에 의하여 반응속도는 더욱 가속화됨으로써 결국 시스템은 폭발하게 된다. 이때 폭발강도는 화학반응속도와 반응기의 강도에 의존한다.

전파반응은 화학반응이 물질 내 임의의 한 점에서 시작되어 미반응 물질로 전파

되어가며 화학반응을 일으키는 것을 말한다. 정상상태에서 연속적인 반응의 전파를 위해서는 반응영역의 에너지가 반응하지 않은 물질로 전달되어야 한다. 전파반응은 반응영역에서 미반응물질로 에너지 전달 메카니즘에 따라 폭연(deflagrations)와 폭굉(detonation)으로 분류한다.



<그림 3-2> 전파반응의 개념

폭연은 반응영역에서 미반응물질로 에너지 전달이 일반적인 전달과정(열 및 물질 전달)을 통해 일어나는 전파반응으로 이러한 반응의 전파속도는 음속보다 작다. 그러나 폭굉은 반응영역에서 미반응물질로 에너지 전달이 충격파에 의하여 전달되며, 반응의 전파속도는 음속보다 크다.

3-3-2. 증기운폭발(UVCE)

영국 Flixborough에 위치한 Nypro사의 카프로락탐 공장에서의 폭발, 네덜란드 Beek에 위치한 DSM의 NCC에서의 폭발과 같이 주요 산업현장에서의 사고는 거대한 증기운폭발의 충격으로 널리 알려져 있다.

모든 UVCE는 저장탱크, 공정 또는 수송용 용기, 배관으로부터 누출된 대규모의 가연성 액체 또는 가스로 인해 형성된 가연성 가스운의 점화에서 비롯된다. 그러나, 모든 누출이 반드시 UVCE가 되는 것은 아니다. 피해를 줄만한 과압을 지닌 UVCE가 발생하려면 다음과 같은 몇 가지 조건이 필요하다.

a) 누출된 물질이 가연성이어야 하며 압력, 온도가 적절한 조건에 있어야 한다. 적절한 물질의 예는 프로판, 부탄과 같은 압축액화가스, 싸이클로 헥산, 납사와 같은 특별히 고온 또는 고압에서 가연성 액체, 메탄, 아세틸렌과 같은 압축가스 등이다.

b) 점화에 앞서 가스운이 형성되어야 한다. 누출 즉시 점화가 발생하면 화염이 발생할 것이고 국지적인 복사열 피해를 일으킬 뿐이고 광범위한 피해를 끼칠 수 있는 심대한 폭발압력은 발생하지 않는다.

c) 가스운의 일부분이 물질의 가연성 범위 내에 있어야 한다. 증기운은 일반적

으로 3개의 영역으로 구분되는 데 누출지점의 rich 영역, 가스운 가장자리의 lean 영역, rich 영역과 lean 영역사이의 가연성범위가 그것이다.

d) 증기운폭발에 의한 폭풍효과는 화염전파 속도에 의해 결정된다. 화염전파가 빠를수록 보다 높은 과압이 생기고 가스운 외측의 폭풍효과가 증가할 것이다.

e) 난류가 존재해야 한다. 층류조건에서는 일반적인 탄화수소의 화염속도는 5-30m/s로 심대한 과압을 생성하기에는 너무 낮다. 난류는 제트누출, 용기의 대규모 파단 등 가연성 물질 자체의 누출에 의한 것과 화염의 팽창과정에서 복잡한 공정장치 등 장애물 있는 경우 발생이 가능하다. 물론 복잡한 지역내에서 제트누출과 같이 이 두 개의 매커니즘이 동시에 발생할 수도 있다.

Lenoir and Davenport(1992)에 의한 사고분석결과, 가장 많은 사상자를 초래한 대표적인 증기운폭발은 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 증기운폭발사고의 사례

일자	위치	물질	개요	사상자수
1989. 6. 3.	Ufa.USSR	Natural gas	도관(pipeline) 누설	645
1948. 7.28.	Ludwigshafen, 독일	Dimethyl ether	과충전 및 태양열에 의한 Railcar 파손	245
1943. 7.29.	"	Butadiene and Butylene	"	80
1978. 2.11.	Poblado Tres, 멕시코	Natural gas	도관(pipeline) 누설	40
1974. 6. 1.	Flixborough, 영국	Cyclohexane	배관 파손	28
1959. 6.28.	Meldrin, Georgia	LPG	케도이탈로 인한 Railcar 파손	23
1989.10.23.	Pasadena, Texas	Isobutane mixture	반응기 내용물의 이상 토출(accidental discharge)	23
1990.11. 6.	Bombay, India	Ethane, Propane	도관(pipeline) 누설	21
1975. 4.30.	Eagle Pass, Texas	LPG	전복에 의한 탱크로리 파손	17

실제 UVCE 사고로부터 알 수 있는 것은 폭풍으로의 전파는 극히 드물며 대부분

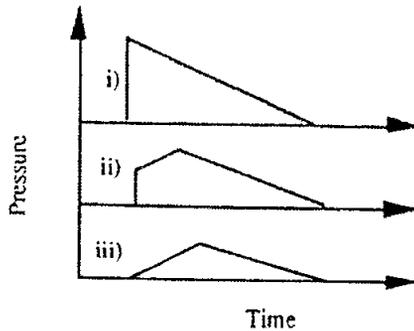
의 경우 폭연으로 화염이 전파한다. 그러나 에틸렌 옥사이드와 같은 반응성 높은 가스는 폭굉의 가능성이 있다. 폭연의 가스운은 두개의 형태로 발전될 수 있는데, 중대한 과압이 발생하지 않을 정도로 화염전파가 느린 경우 플래시화재가 되며 중대한 과압이 발생될 정도로 화염전파가 빠른 경우 증기운폭발(UVCE)가 되는 것이다.

3-3-2-1. 폭풍파(Blast wave) 특성

폭풍파는 폭발에 의해 발생하는 운동에 따른 공기의 파장(air wave)으로 정의될 수 있다. 폭풍파는 음속의 압축파와 충격파, 희박파(rarefaction wave)를 포함한다. <그림 3-3>은 폭풍파의 여러 형태를 보여주고 있다.

i)충격파 후에 희박파 ii)충격파 후에 음속 압축파(sonic compression wave), 그 다음에 희박파 iii)음속 압축파와 희박파

폭풍파의 형태는 에너지가 폭발시 어떻게, 언제 누출되었는지에 의존하고 폭발지역으로부터 거리에 의존한다. 강한 폭발에 대해서는 분류 i)이 전형적이다. 약한 폭발은 초기에 분류 iii)이지만 충격이 상승되어 분류 i)이 될 수 있다.



<그림 3-3> 폭풍파의 여러 형태

폭풍파와 충격파에 대해서는 측면압력(static or side-on pressure)와 반사압력(reflected pressure)를 사용한다. 측면압력은 wave의 전파방향에 수직으로 측정된 것으로 충격파 뒤에 있는 정압이다. 반사압력은 wave가 벽과 같은 물체를 때릴 때 측정되는 데 반사(reflection)는 등엔트로피 과정이 아니므로 정지압력과 반사압력

사이에는 차이가 있다.



<그림 3-4> 측면압력과 반사압력

폭풍파와 충격파에 대해서 사용되는 동압(P_{Dyn})은 팽창에 의하여 움직이는 가스가 물체에 부딪칠 때 운동에너지에 의해 발생된 압력으로 다음 식과 같다.

$$P_{Dyn} = \frac{\rho \cdot u^2}{2} \quad (5)$$

$$\rho = \left[\frac{2\gamma P_a + (\gamma + 1)P_s}{2\gamma P_a + (\gamma - 1)P_s} \right] \rho_a \quad (6)$$

여기서, P_{Dyn} = 동압(Pa)

P_s = 충격파 뒤의 피크압력(Pa)

P_a = 충격파 앞의 대기압력(Pa)

ρ = 충격파 뒤의 공기의 밀도(kg/m³)

ρ_a = 충격파 앞의 주위 공기의 밀도(kg/m³)

u = 충격파 뒤의 피크 풍속(입자속도) (m/sec)

γ = 공기의 비열비

반사압력(P_r)는 물체에 실제 부딪칠 때의 압력으로 폭풍이 평평한 표면에 정면으로 부딪칠 때의 압력과 P_r 은 다음 식과 같다.

$$P_r = 2P_s + (\gamma + 1)P_a \quad (7)$$

공기의 경우 비열비는 거의 1.4이므로 근사적으로 다음 식과 같이 된다.

$$P_r = 2P_s + (\gamma + 1)P_a \approx 2(P_s + P_a) \quad (8)$$

충격파 중 양의 상을 적분한 값이 건물의 설계에 중요한 변수로 작용하는데, 이

값을 Positive Incident Impulse라고 하고 아래 식과 같다. 파형이 거의 삼각형이므로 근사식으로 표현된다.

$$I_s = \int_{t_0}^{t_p} P(t) dt \cong \frac{1}{2} P_s(t_p - t_0) \quad (9)$$

여기서, I_s = Positive Incident Impulse, (Pa-msec)

$P(t)$ = 주어진 위치에서 시간의 함수로서 과압(Pa)

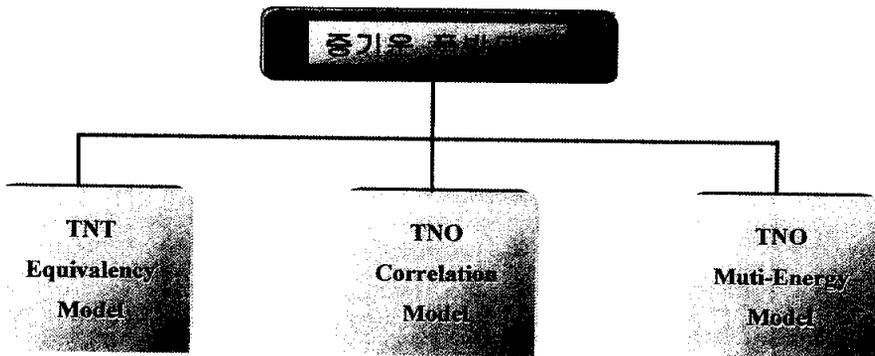
t_0 = 주어진 위치에서 충격파의 도달시간(msec)

t_p = 충격파의 양의 상이 끝나는 시간(msec)

정압 또는 측면압력으로도 알고 있는 과압은 충격파(shock wave)의 positive phase 동안 발생하는 대기압 위의 순(net) 압력을 말하며, 이때 최대압력을 피크압력이라 한다.

3-3-2-2. 증기운폭발모델

증기운폭발모델 해석은 관심거리에서의 과압 및 과압지속시간 등을 계산하며 계산된 과압은 피해영향 예측모델의 입력값으로 이용되어 인체 및 구조물에 미치는 영향을 분석한다. 증기운폭발에 관한 해석모델은 <그림 3-5>와 같이 3개의 모델로 분류된다.



<그림 3-5> 증기운폭발 모델 개념도

3-3-2-3. TNT 상당량 모델

수년동안 군사목적으로 고성능 폭발물의 파괴능력이 연구되었고 결과적으로 고성능 폭발물과 피해사이에 관계식, 즉 폭발사고의 폭발력과 TNT 상당량과의 관계식이 정립되었다. 이러한 방법으로 가스폭발에 대해서도 많은 증기운폭발사고에서 관측된 피해형태를 통해 TNT 상당량과의 관계식을 도출하였다.

TNT 상당량 모델은 비록 가스폭발의 폭풍과 TNT 폭풍사이에는 차이가 있지만 TNT 폭풍에 대한 그래프가 가스폭발로부터 발생하는 폭풍의 예측을 위해 폭넓게 이용되어 왔다.

기본적으로 폭풍 예측 목적으로 사용되는 TNT 상당방법은 매우 간단하다. 증기운에 있는 연소 가능한 에너지가 다음 식으로부터 TNT 상당량으로 전환된다.

$$Q_{TNT} = \frac{\eta M_f H_c}{H_{cTNT}} \quad (10)$$

여기서, Q_{TNT} = TNT 상당량(kg)

M_f = 누출된 가연성 물질의 질량(kg)

η = 실험적 폭발효율(0.01~0.2)

H_c = 가연성가스의 연소열(kJ/kg)

H_{cTNT} = TNT의 연소열(4680kJ/kg)

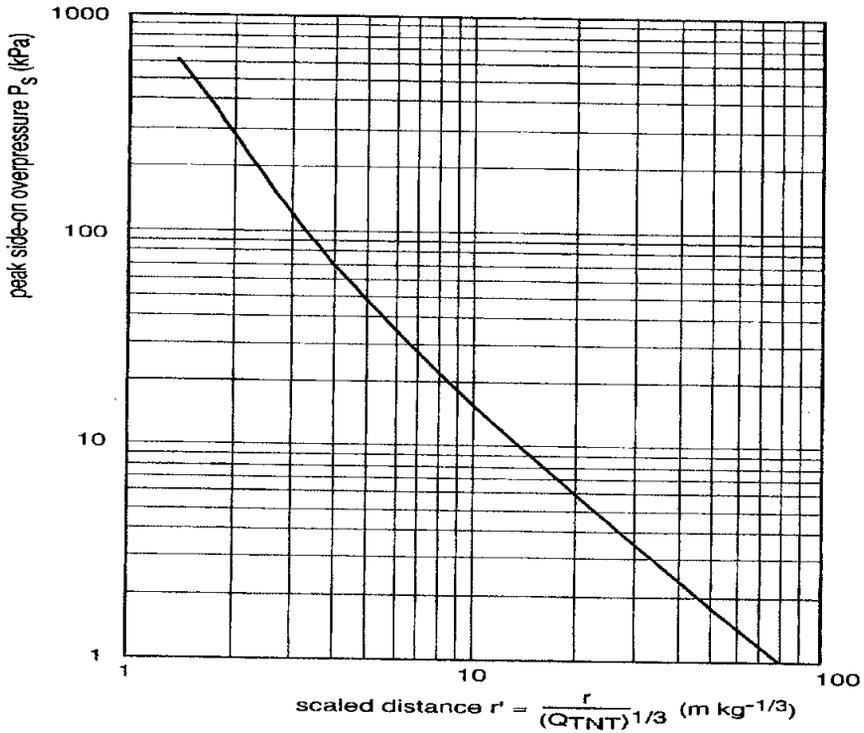
누출된 가연성 물질의 폭발에 대응되는 TNT상당량을 계산한 후 환산거리를 구하여 그래프로부터 과압 P_s 를 구하는 데, 환산거리는 다음 식과 같다.

$$r' = \frac{r}{Q_{TNT}^{1/3}} \quad (11)$$

여기서, r' = 환산거리(m/kg^{1/3})

r = 폭발원으로부터 관심거리(m)

Q_{TNT} = TNT 상당량(kg)



<그림 3-6> TNT 폭발에 따른 피크 과압, Marshall [1976]

TNT 상당량 모델의 절차는 다음과 같다.

- 연소 가능한 가스의 질량(M_f)을 예측
- 가연성 물질에 대해 연소열 H_c 결정
- 폭발효율에 대한 값 결정
- TNT 상당질량 Q_{TNT} 계산
- <그림 3-6>을 이용하여 관심거리에서 과압(P_s) 계산

(1) 연소 가능한 가스의 질량(M_f) 예측

가스운에서 연소 가능한 가스의 질량은 누출속도, 증기운의 대기확산, 점화시기 등에 영향을 받는다. 만약 누출 후 수 분내로 증기운이 빨리 점화되는 경우 점화 시점까지 누출된 증기의 총량을 연소 가능한 가스의 질량으로 한다. 그러나 누출 후 어느 정도 시간이 경과된 다음 점화되었을 때 연소 가능한 가스의 질량은 대기확산

모델을 이용하여 연소상한농도(UFL)과 연소하한농도(LFL)의 경계면을 구하고, 연소영역 안의 가스운의 부피를 예측한다. 가연성 증기의 질량을 결정하기 위하여 연소영역내의 가스운 증기의 평균밀도와 가스운의 부피를 곱한다.

자연점화에 대해 다른 방법으로는 대기확산모델을 이용하여 최소연소농도가 도달하는 거리를 구한 다음 바람의 속도를 고려하여 최소연소농도까지 도달시간을 계산하여 구한 값과 누출속도를 곱하여 연소 가능한 총 가스질량을 계산한다. 만약 누출초기 점화되는 경우 총 누출량이 앞에서 계산한 연소 가능한 총질량 보다 작을 경우가 발생하는데 이때는 총 누출량을 연소 가능한 가스의 질량으로 본다.

(2) 폭발효율 η

이론적으로는 가스폭발의 경우 폭발효율이 40%를 초과할 수 있다. 그러나, 폭발효율의 경우 실험과 많은 증기운폭발사고에서 관측된 피해로부터 유도되는 데 대부분의 주요 증기운폭발 사고의 경우 폭발효율은 누출된 연료 전량의 연소열에 기초하여 1%~10% 정도로 추정된다.

폭발효율에 관하여 많은 연구가 수행되어 제시되었는 데 주요한 것은 다음과 같다.

- Brasie and Simpson[1968], Brasie[1976] : 폭발원 근처(near field) 2%, 폭발원에서 멀리 떨어진 곳(far field) 5% 제시
- Eichler and Napadensky[1977] : 6.9kPa의 과압수준에서 20% 제시
- Health Safety Executive[1979, 1986] : 메탄과 같은 평균반응성을 가진 가스의 경우 3%, Propent Oxide와 같은 평균이상의 가스의 경우 6%, Ethene Oxide와 같은 매우 반응성이 있는 가스의 경우 10% 제시, 이때 가스운에서 최대 과압은 100kPa, 폭풍(blast wave)의 지속시간은 100-300m/s 이어야 함.
- CCPS[1994] : 개방지역에서 3%, 반밀폐 또는 장애물 지역에서 10%
- Industrial Risk Insurers[1990] : 2% 제시
- CRE-14E[1988] : 10% 제시

<표 3-2>는 CCPS 최근 자료로 본 연구 프로그램 운용시 물질별 폭발효율로서 사용토록 한다.

(3) TNT 상당량을 이용한 위 식의 적용시 필요한 가정

- 폭발원은 하나의 점으로 고려한다.
- 거리에 따른 과압의 감소는 TNT의 경향과 유사하다.

- 폭발원 근처에서 과압이 과대 예측된다.
- 폭발원에서 멀리 떨어진 위치에서는 과압이 과소 예측된다.
- 지형, 건물 또는 장애물 효과를 고려하지 않는다.

(4) TNT 상당량 모델의 결점

- 폭발강도가 다양한 증기운폭발의 주요한 특성이 고려되지 않는다.
- TNT 폭풍 특성이 증기운폭발의 폭풍특성과 적절히 상관되지 않는다. 단지, 증기운 폭풍에서 관측되는 피해를 TNT 상당량에 의존한 거리로 표현한 것이다.
- 특히, 저강도의 증기운폭발의 폭풍은 TNT 폭풍으로는 만족스럽게 표현되지 않는다.(약한 가스폭발의 표현 곤란)
- 일정하지 않은 n 가 필요하며, 실제 효율이 불확실하다.

(5) TNT 상당량 모델의 특성 및 사용시 고려사항

TNT 폭풍은 증기운폭발 폭풍에 대해 미흡한 모델이다. TNT가 매우 높은 진폭(amplitude)과 짧은 지속시간을 지닌 충격파(shock-wave)인 반면 증기운폭발은 보다 낮은 진폭과 보다 긴 지속시간을 지닌 폭풍파(blast wave)이다. 따라서 구조물 반응의 계산이 모델링의 출발점이라면 제어실과 같은 폭풍에 저항력이 큰 구조물의 설계시는 폭풍파의 형태와 지속시간이 중요한 변수이므로 TNT 상당량 모델은 만족스럽지 못한 모델이 될 것이다.

그럼에도 불구하고 TNT 상당량 모델은 매우 간단하고 실제적인 방법으로 증기운폭발의 폭풍효과를 모델링할 수 있도록 한다. TNT 상당량 모델의 특징은 구조물 피해와 TNT 상당량의 관계가 직접적이고 실험적인 관계식이므로 증기운폭발의 재산손실 가능성이 주요한 관심사항이라면 유용한 방법일 수도 있다.

TNT 상당량 모델을 요약하면 다음과 같다.

- TNT량과 증기운내 에너지 함량 사이의 비례적 관계를 가정한다.
- 사고통계에 기초한 폭발효율을 사용함에 따른 부정확한 관계식은 기본적으로 위의 비례적 가정에 상반된다.
- 따라서, 통계적 신뢰성이 부족하다.
- 다양한 폭발강도를 고려하지 않고 있다.
- 증기운폭발의 폭풍특성과 일치하지 않는다.(거리 의존성 효율만 고려)
- 폭발원 근처에서는 영향이 과대 예측된다.

<표 3-2> 폭발성 증기와 가스에 대한 폭발효율

폭발효율	물 질 명		
η=0.03	Acetaldehyde	Furfural Alcohol	N-Butyl Acetate
	Acetone	Hydrocyanic Acid	N-Decane
	Acrylonitrile	Hydrogen	N-Heptane
	Amyl Alcohol	Hydrogen Sulphide	N-Hexane
	Benzene	Iso-Butyl Alcohol	N-Pentane
	1,3-Butadiene	Isobutylene	N-Propanol
	Butene-1	Iso-Octane	N-Propyl Acetate
	Carbon Monoxide	Iso-Propyl Alcohol	O-Dichlorobenzene
	Cyanogen	Methalamine	P-Cymene
	1,1-Dichloroethane	Methane	Petroleum Ether
	1,2-Dichloroethane	Methanol	Phthalic Anhydride
	Dimethyl Ether	Methyl Acetate	Propane
	Dimethyl Sulphide	3-Methyl-Butene-1	Propionaldehyde
	Ethane	Methyl-Butyl-Ketone	Propylene
	Ethanol	Methyl Chloride	Propylene Dichloride
	Ethyl Acetate	Methyl-Eutyl-Ketone	P-Xylene
	Ethylamine	Methyl Formate	Styrene
	Ethyl Benzene	Methyl Mercaptan	Tetrafluroethylene
	Ethyl Chloride	Methyl-Propyl-Ketone	Toluene
	Ethyl Cyclohexane	Monochlorobenzene	Vinyl Acetate
	Ethyl Formate	N-Amyl Acetate	Vinyl Chloride
Ethyl Propionate	Naphthalene	Vinylidene Chloride	
	N-Butane	Water Gas	
η=0.06	Acrolein	Diethyl Ether	Ethyl Nitrate
	Carbon Disulphide	Divinyl Ether	Methyl-Vinyl-Ether
	Cyclohexane	Ethylene	Propylene Oxide
η=0.19	Acetylene	Hydrazine	Nitromethane
	Ethylene Oxide	Isopropyl Nitrate	Vinyl Acetylene
	Ethyl Nitrate	Methyl Acetylene	

- 지속시간이나 폭발파의 형태가 아닌 과압만이 예측된다.
- 간단하고 적용하기 쉽다.
- 비록 만족스럽지 못하더라도 일반적으로 사용된다.

양론적 가스 혼합물의 반구 부피 V에 들어있는 에너지 E(J) 계산

① 개별 가스운의 부피 V에 양론적 탄화수소-공기 혼합물의 연소열에 대한 평균값인 $3.5 \times 10^6 \text{J/m}^3$ 를 곱하여 연소에너지를 계산한다.

<표 3-3> 탄화수소와 수소의 연소열 [Harris 1983]

연료	연소열 (288K, 1atm) (MJ/m ³)	양론적 부피비 (%)	양론적 혼합된 연료-공기 연소열 (MJ/m ³)
메탄	34	9.5	3.23
에탄	60.5	5.6	3.39
에틸렌	56	6.5	3.64
프로판	86.4	4.0	3.46
프로필렌	81.5	4.4	3.59
부탄	112.4	3.1	3.48
부틸렌	107.1	3.4	3.64
싸이클로 헥산	167.3	2.3	3.85
수소	10.2	29.5	3.01

② 연소에너지 $E = (3.5 \times 10^6 \text{J/m}^3) \times V(\text{m}^3)$

관심거리에 대한 환산거리 계산

$$r' = \frac{r}{(E/P_a)^{1/3}} \quad (12)$$

$$r_0' = \frac{r_0}{(E/P_a)^{1/3}} \quad (13)$$

여기서, r' : 반구형 폭발원 중심으로부터 환산거리

r : 반구형 폭발원 중심으로부터 관심거리(m)

r_o' : 반구형 폭발원 반경에 대한 환산거리

r_o : 반구형 폭발원 반경(m)

E : 연소에너지(J)

P_a : 대기압력(Pa)

최대 과압 계산

① <그림 3-7>로부터 환산거리에 따른 환산 피크 과압 P_s' 계산

② 최대 과압 P_s 계산

$$P_s = P_s' \times P_a \quad (14)$$

폭풍파 형태 및 양의 상 과압의 지속시간 계산

① <그림 3-8>으로부터 환산 거리 r' 에 따른 환산 지속시간 t_p' 구한다.

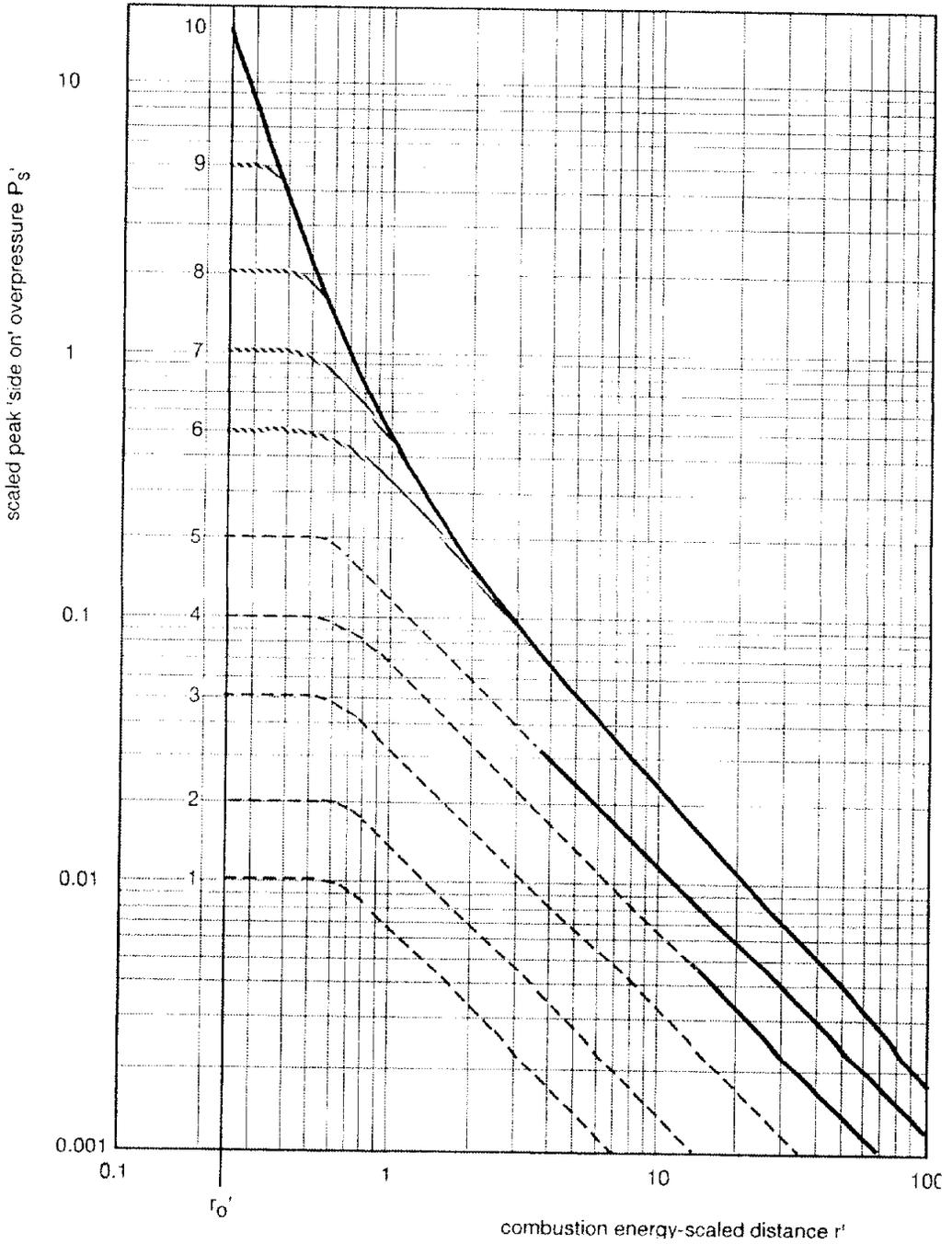
② 과압 지속시간 t_p 계산

$$t_p = \frac{t_p' \times (E/P_a)^{1/3}}{C_o} \quad (15)$$

여기서, t_p = 과압 지속시간(sec)

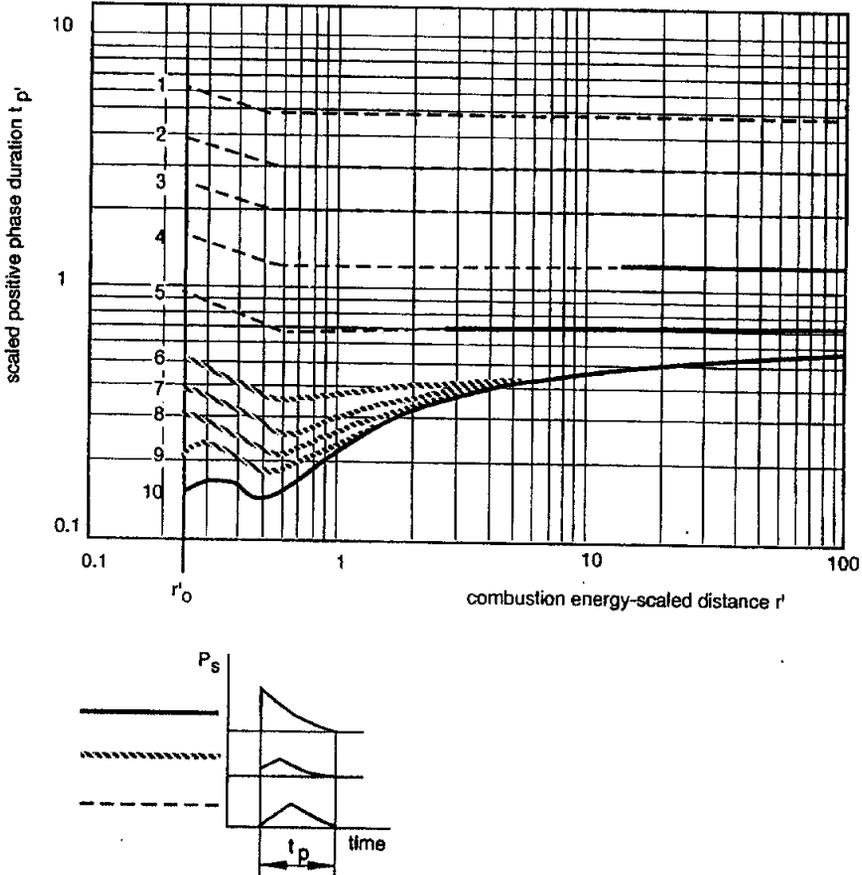
t_p' = 환산 지속시간(sec)

C_o = 음속(m/s)



<그림 3-7> 환산거리에 따른 환산 피크 과압

③ 폭풍파 형태는 <그림 3-8>로부터 구한다.



<그림 3-8> 양의 상 과압 지속시간과 폭풍파 형태

(6) ME 모델 적용을 위한 가정과 제한사항

- 반구형 용량인 지면폭발에 적용한다.
- 폭발원으로 정의된 공간 내 모든 연료 혼합물이 폭발에 참여한다.
- 많은 주관성과 경험이 폭발중심 강도 예측뿐만 아니라 양론적 가스운의 부피를 예측하는 데 있어 부분적으로 제한된 공간 또는 장애물이 있는 지역을 정확하게 정의하는 데 필요하다.
- 현재 ME 모델의 적용을 위한 보다 명확한 지침서가 필요하다.

(7) ME 모델의 특성 및 적용시 고려사항

과압은 주로 반밀폐 또는 장애물 영역의 증기운폭발에서 생성되며, 이러한 기본적인 매커니즘은 ME 모델의 개념을 강조하고 있다. 기본적인 특성인 피크 과압, 지속시간, 임펄스 및 파형 등은 각 폭발 중심의 강도(source strength)에 의존한다.

ME 방법과 관련하여 강도의 선택은 과압의 기초가 된다. ME 폭풍 커브는 폭풍의 형태를 제공하고 그 결과는 인명과 건축물에 미치는 피해의 계산을 위한 영향평가 모델에서 중요하다.

ME 모델을 요약하면 다음과 같다.

- 기본적인 가스폭발 매커니즘으로 인정되며,
- 가스운 부피보다 경계조건에 보다 기반을 두고 있다.
- 통계를 사용하지 않고 폭풍을 결정할 실제 조건을 사용한다.
- 다양한 폭발 강도를 고려한다.
- 과압, 지속시간과 폭풍형태의 모든 조합이 가능하다.
- 보수적인 방법으로 사용할 경우 간단하다.
- 훨씬 좋은 대안의 방법으로 폭넓게 인정된다.

제4장 피해범위 산정 프로그램 알고리즘

4-1. 누출원 해석

라이브러리 함수를 작성하는 것으로 Microsoft Visual Studio 6.0을 이용(Visual Basic 언어)을 사용하여 Source Code를 작성하고 만들어진 Source Code를 사용하여 DLL 함수로 변환하였다.

4-1-1. 리차드슨 수 DLL 구조

리차드슨 수는 공기보다 가벼운 가스 또는 무거운 가스의 연속누출 또는 순간누출의 판정을 위해 사용된다.

4-1-1-1. 연속누출 및 순간누출 판정

(1) 가스의 관심지역까지의 도달시간(t_{tr}) 계산

$$t_{tr} = \frac{2X}{u} \quad (16)$$

(2) 누출시간(t_d)과 도달시간의 비교로 연속 또는 순간누출을 판정

$t_d \geq t_{tr}$: 연속누출

$t_d < t_{tr}$: 순간누출

4-1-1-2. 무거운 가스과 가벼운 가스의 판정

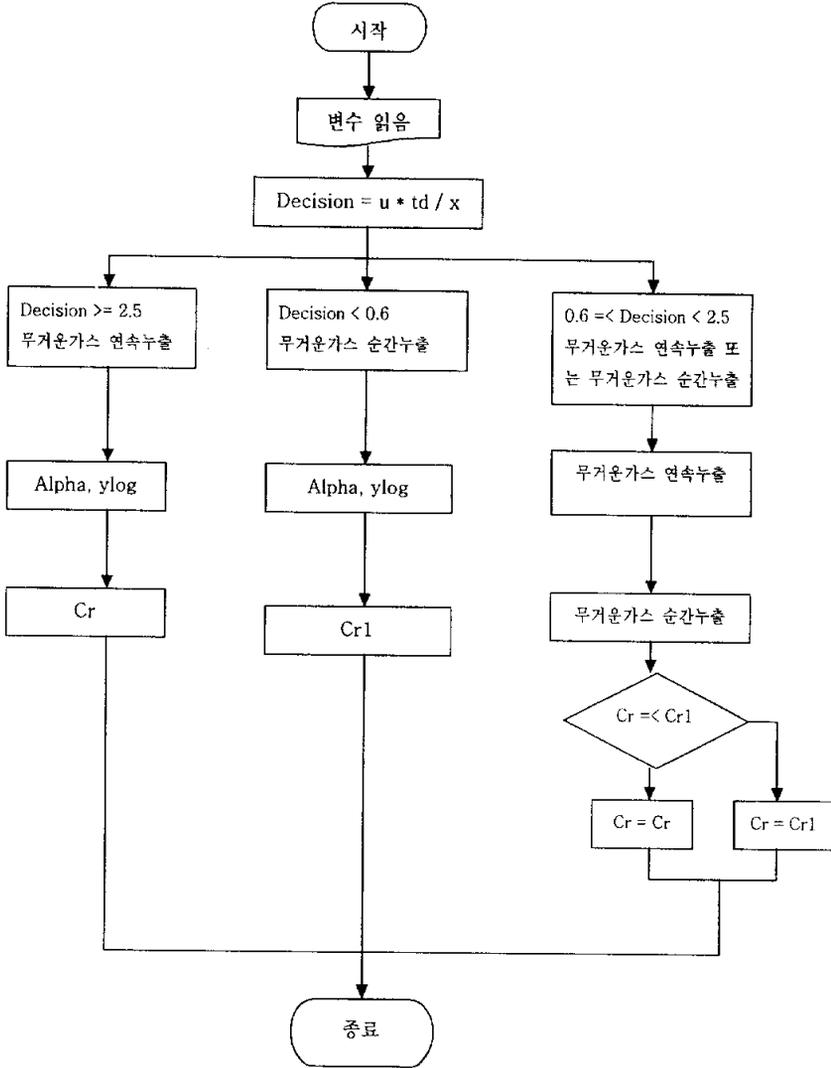
연속누출시 : $Ri_o \geq 0.003$ 이면 무거운 가스

순간누출시 : $Ri_o \geq 0.04$ 이면 무거운 가스

4-1-1-3. 입력변수

- 누출원으로부터의 거리(m) : x
- 누출시간(sec) : t_d
- 공기의 밀도(kg/m^3) : Q_a
- 누출원의 지름(m) : D
- 가스 누출율(kg/sec) : V_{kv}
- Plume or Puff 의 초기밀도 (kg/m^3) : si_r
- 10m 높이에서의 바람속도(m/sec) : u_{10}
- 누출물질 초기 농도(vol %) : C_0
- 누출되는 물질의 온도(K) : ts
- 누출부피유속(m^3/sec) : V_v
- 누출량(m^3) : V

4-1-1-4. DLL Flow Chart



4-1-2. 혼합높이 계산

Mixing Height는 구름의 양과 지표면의 거칠기 대기안정도 등에 따라 영향을 받게 된다. 이런 변수를 감안하여 Mixing Height를 계산한다.

4-1-3. 관심거리의 농도계산

관심거리에서의 농도는 상기의 변수를 포함하여

$$C(x, y, z; \overline{H_e}) = \frac{Q'}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \right\} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-\overline{H_e}}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} + \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+\overline{H_e}}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (17)$$

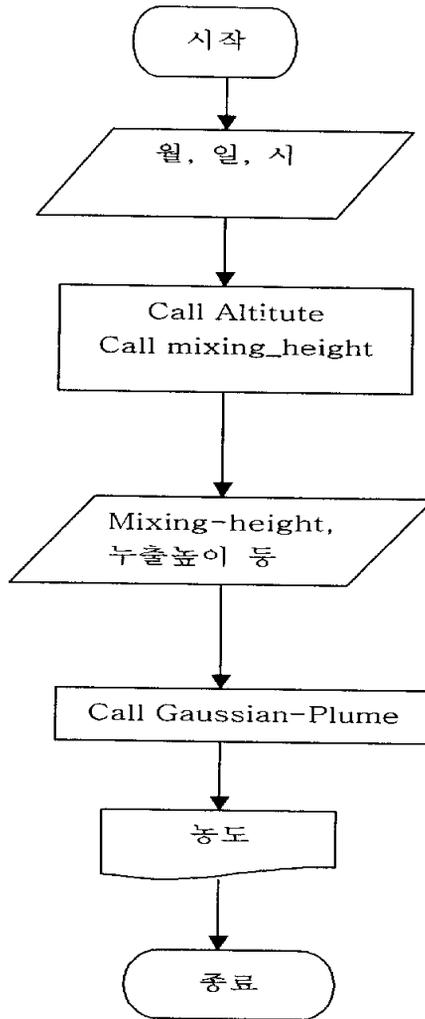
식을 이용하여 계산한다.

여기에서 사용되는 확산계수는 Briggs Rural 확산계수를 사용하였다.

4-1-4. 입력변수

- 월(Month) : month_number
- 일(Day) : m_date
- 시(Time, 24시간으로 표시) : hour
- 대기 온도(K) : ta
- 대기 안정도(A, B, C, D, E, or F)
- 10m 상공에서의 바람의 속도(m/sec) : u_10
- 누출량(kg/sec) : q
- 누출속도(m/sec) : v
- 누출원의 지름(m) : d
- 누출높이(m) : hs
- 누출되는 물질의 온도(K) : ts
- 관심지역의 누출원으로부터의 거리(m)(X) : x
- 관심지역의 Plume 중심으로부터의 거리(m)(Y) : y
- 관심지역의 지상으로부터의 높이(m)(Z) : z

4-1-5. Flow Chart



<표 4-1> BM 도표 개략 산출 식(연속누출)

Concentration rate Cm/Co	Valid range for $\alpha = \log_{10} (g_0^2 Vv/u^5)^{1/3}$	Equation for $\beta = \log_{10} [x/(Vv/u)^{0.5}]$
0.1	$\alpha \leq -0.55$ $-0.55 < \alpha \leq -0.14$ $-0.14 < \alpha \leq 1$	$\beta = 1.75$ $\beta = 0.24\alpha + 1.88$ $\beta = 0.50\alpha + 1.78$
0.05	$\alpha \leq -0.68$ $-0.68 < \alpha \leq -0.29$ $-0.29 < \alpha \leq -0.18$ $-0.18 < \alpha \leq 1$	$\beta = 1.92$ $\beta = 0.36\alpha + 2.16$ $\beta = 2.06$ $\beta = -0.56\alpha + 1.96$
0.02	$\alpha \leq -0.69$ $-0.69 < \alpha \leq -0.31$ $-0.31 < \alpha \leq -0.16$ $-0.16 < \alpha \leq 1$	$\beta = 2.08$ $\beta = 0.45\alpha + 2.39$ $\beta = 2.25$ $\beta = -0.54\alpha + 2.16$
0.01	$\alpha \leq -0.70$ $-0.70 < \alpha \leq -0.29$ $-0.29 < \alpha \leq -0.20$ $-0.20 < \alpha \leq 1$	$\beta = 2.25$ $\beta = 0.49\alpha + 2.59$ $\beta = 2.45$ $\beta = -0.52\alpha + 2.35$
0.005	$\alpha \leq -0.67$ $-0.67 < \alpha \leq -0.28$ $-0.28 < \alpha \leq -0.15$ $-0.15 < \alpha \leq 1$	$\beta = 2.40$ $\beta = 0.59\alpha + 2.80$ $\beta = 2.63$ $\beta = -0.49\alpha + 2.56$
0.002	$\alpha \leq -0.69$ $-0.69 < \alpha \leq -0.25$ $-0.25 < \alpha \leq -0.13$ $-0.13 < \alpha \leq 1$	$\beta = 2.60$ $\beta = 0.39\alpha + 2.87$ $\beta = 2.77$ $\beta = -0.50\alpha + 2.71$

<표 4-2> BM 도표 개략 산출 식(순간누출)

Concentration rate Cm/Co	Valid range for $\alpha = \log_{10} (g_0 \cdot V_0^{1/3} / u^2)^{1/2}$	Equation for $\beta = \log_{10} [x/V_0^{1/3}]$
0.1	$\alpha \leq -0.44$	$\beta = 0.70$
	$-0.44 < \alpha \leq 0.43$	$\beta = 0.26\alpha + 0.81$
	$0.43 < \alpha \leq 1$	$\beta = 0.93$
0.05	$\alpha \leq -0.56$	$\beta = 0.85$
	$-0.56 < \alpha \leq 0.31$	$\beta = 0.26\alpha + 1.0$
	$-0.29 < \alpha \leq -0.18$	$\beta = -0.12\alpha + 1.12$
	$0.31 < \alpha \leq 1$	
0.02	$\alpha \leq -0.66$	$\beta = 0.95$
	$-0.66 < \alpha \leq -0.32$	$\beta = 0.36\alpha + 1.19$
	$-0.32 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.26\alpha + 1.38$
0.01	$\alpha \leq -0.71$	$\beta = 1.15$
	$-0.71 < \alpha \leq 0.37$	$\beta = 0.34\alpha + 1.39$
	$0.37 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.38\alpha + 1.66$
0.005	$\alpha \leq -0.52$	$\beta = 1.48$
	$-0.52 < \alpha \leq 0.24$	$\beta = 0.26\alpha + 1.62$
	$0.24 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.30\alpha + 1.75$
0.002	$\alpha \leq 0.27$	$\beta = 1.83$
	$0.27 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.32\alpha + 1.92$
0.001	$\alpha \leq -0.10$	$\beta = 2.075$
	$-0.10 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.27\alpha + 2.05$

4-2. 기상누출

4-2-1. 저장탱크로부터 기상누출

저장탱크로부터 기상누출에 관한 음속 및 아음속 누출시 누출속도식은 식(19)와 식(20)이며, 이에 대한 프로그램 알고리즘 구성 개념은 다음과 같다.

① 음속 또는 아음속 흐름 결정을 위한 초크흐름 압력비 계산

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_{CR} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (18)$$

② 음속흐름일 경우 식(19), 아음속 흐름일 경우 식(20)으로 초기 누출속도 계산

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{\gamma M W}{R_g T_s} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (19)$$

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{2 M W}{R_g T_s} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_a}{P_s} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_s} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right]} \quad (20)$$

4-2-2. 배관으로부터 기상누출

배관으로부터 기상누출에 관한 음속 및 아음속 누출시 누출속도식은 식(24)와 식(26)이며, 고압배관의 기상누출에 대한 단순모델식은 식(27)과 같다. 프로그램 알고리즘 구성 개념은 다음과 같다.

① 음속 또는 아음속 흐름 결정을 위한 초크흐름 압력비 계산

$$\left(\frac{P}{P_s} \right)_{CR} = M \sqrt{\frac{2 + (\gamma - 1) M^2}{\gamma + 1}} \quad (21)$$

② 식(21)로부터 Fanning 마찰계수 f_p 를 구하고 식(22)를 이용하여 Mach 수 M 을 결정한다.

$$\frac{1}{\sqrt{f_p}} = -4 \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{d} \right) \right], \quad \text{for } \epsilon > 0 \quad (22)$$

$$\frac{\gamma + 1}{2} \ln \left[\frac{2 + (\gamma - 1) M^2}{(\gamma + 1) M^2} \right] - \left(\frac{1}{M^2} - 1 \right) + \gamma \left(4 f_p \frac{L_p}{d} \right) = 0 \quad (23)$$

③ 음속흐름일 경우 식(24)으로 초기 누출속도 계산

$$\dot{Q} = A M P_s \sqrt{\frac{\gamma M W}{R_g T_s}} \quad (24)$$

④ 아음속흐름일 경우 식(25)으로 누출 가스온도를 계산하고 식(26)으로 초기 누출속도 계산

$$\frac{\gamma + 1}{\gamma} \ln \left(\frac{P_s T}{P_a T_s} \right) - \left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} \right) \left(\frac{P_s^2 - P_a^2 T_s^2}{T - T_s} \right) \left(\frac{1}{P_s^2 T} - \frac{1}{P_a^2 T_s} \right) + \left(\frac{4 f_p L_p}{d} \right) = 0 \quad (25)$$

$$\dot{Q} = A \sqrt{\frac{2MW}{R_g} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\frac{T - T_s}{\left(\frac{T_s}{P_s}\right)^2 - \left(\frac{T}{P_a}\right)^2} \right]} \quad (26)$$

⑤ 고압배관의 기상누출에 대한 단순 모델식의 경우 식(27)으로 초기 누출속도 계산

$$Q = \frac{\frac{\pi d^2 \alpha}{4} \sqrt{\gamma p_0 p_0 \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}}{\sqrt{1 + \frac{4\alpha^2 f_F L}{d} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}} \quad \text{for} \quad \frac{P_a}{P_{2t}} \leq \left(\frac{2}{\gamma-1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (27)$$

4-3. 액상누출

4-3-1. 저장탱크 파손에 의한 액상누출

저장탱크 파손(hole)에 의한 액상누출에 관한 초기 누출속도식은 식(28)이며, 이에 대한 프로그램 알고리즘 구성 개념은 다음과 같다.

① 식(28)으로 초기 누출속도 계산

$$\dot{Q} = C_D A \sqrt{\rho_l \left[\frac{2(P_s - P_a)}{\rho_l} + 2gh \right]} \quad (28)$$

4-3-2. 배관으로부터 기상누출

배관으로부터 액상누출에 관한 층류 및 난류흐름에서의 누출속도식은 식(29)와 식(31)이며, 이에 대한 프로그램 알고리즘 구성 개념은 다음과 같다.

① 층류일 경우 fanning 마찰계수($f_p = \frac{16}{Re}$)를 구하고 식(29)로 초기 누출속도 계산

$$\dot{Q} = \frac{A \rho_l (Re \sqrt{f_p}) \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[\frac{(P_s - P_a)}{\rho_l} + gh \right]}}{16} \quad (29)$$

② 난류일 경우 식(30)로 fanning 마찰계수를 구하고 식(31)으로 초기 누출속도

계산

$$\frac{1}{\sqrt{f_p}} = -4 \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{d} \right) + \frac{1.255}{Re\sqrt{f_p}} \right] \quad (30)$$

$$\dot{Q} = -4A\rho_l \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{d} \right) + \frac{1.255}{Re\sqrt{f_p}} \right] \times \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[\frac{(P_s - P_d)}{\rho_l} + gh \right]} \quad (31)$$

제5장 피해 범위 평가

5-1. 화재위험범위 도출을 위한 조건의 설정

5-1-1. 누출상황과 화재위험범위의 결정

본 연구는 옥상의 LNG저장탱크 또는 배관망에서 LNG누출 후 기화·확산으로 인한 위험범위를 추정하는 것이 목적인데 LNG는 독성이 없으므로 기화된 LNG의 위험은 대기중에 퍼진 후에 일어날 수 있는 화재로 한정한다. 그리고 탱크로부터의 누출은 탱크의 아랫부분이 크게 파손되어 액체가 바닥에 즉시 쏟아지는 상태를 가정하였다.

제 2장의 <표 2-5>에서 보았듯이 기화된 LNG의 대기중 농도가 5.0 - 15.0% 범위 일 때 화재가 일어날 수 있다. 즉 누출후 기화된 LNG가 대기확산되어 대기중 농도가 5.0 - 15.0%로 되는 경우가 바로 위험범위에 속하게 되는 것이다. 이러한 위험범위는 누출상황과 기상조건에 따라 시간·공간적으로 다양하게 변화된다.

5-1-2. 화재위험범위 추정을 위한 계산조건의 설정

LNG누출로 인한 화재위험범위를 도출하기 위해서는 여러 인자를 고려해야한다. 고려할 인자는 먼저 대상물질인 LNG의 특성인데 제2장의 <표 2-5>에서 제시한 자료를 이용하였다. 저장탱크와 배관망에 관한 자료는 한국가스안전공사의 자료를 근거로 하였다. 기상조건은 인천의 기상자료를 적용하였다. 이상 계산식에 적용될 각 조건을 <표 5-1>에 정리하였다.

<표 5-1> 계산식에 적용되는 각 조건

LNG 성질	저장온도 : -162.0℃ 액체밀도 : 414.8kg/m ³ [저장온도(-162.0℃)에서] 증발잠열 : 121.8 cal/g 발화농도범위 : 5.0 - 15.0%(공기중 부피비)
저장탱크	높이 : ①내부 43.17m ②외부 : 52.20m 지름 : ①내부 57.04m ②외부 : 59.26m 용량 : 100,000m ³ = 41,480,000kg
배관당	지름 : 100mm 높이 : 60cm 증발계수(A) : 3.39cal/s ^{1/2} cm ² (바닥재질이 콘크리트임)
기상조건	기온 : -10.0℃, 11.3℃, 30.0℃ 풍속 : 1.0m/sec, 3.9m/sec, 5.0m/sec 대기안정도 : B, D, F

5-2. 화재위험범위의 도출

5-2-1. 풍속에 의한 TNT상당량

<표 5-2>에서는 풍속이 감소할수록 폭발하한계 이상의 방출량과 TNT상당량이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 풍속이 감소할 때 방출된 가스는 증기와의 완전한 혼합을 통하여 TNT상당량이 증가한다.

<표 5-2> 풍속에 의한 TNT상당량의 피해 변화량

풍속(m/s)	폭발범위사이의 방출량(kg)	폭발범위사이의 방출량(kg)	TNT상당량(kg)
1 ^{m/s}	11,434	11,569	3,456.7
2 ^{m/s}	3,336	3,446	1,062.2
3 ^{m/s}	1,835.8	1,939	579.2
4 ^{m/s}	1,015.3	1,128.5	337
5 ^{m/s}	723.1	864.4	258.2
6 ^{m/s}	554.9	638.9	190.8

5-2-2. 대기안정도에 따른 TNT상당량

<표 5-3>에서는 대기의 안정도가 A일 때 초기누출가스는 공기와의 급속한 혼합을 보이며, TNT상당량이 증가한다는 것을 보여주며,

<표 5-3> 대기안정도에 의한 TNT상당량의 피해 변화량

안정도등급	폭발범위사이의 방출량(kg)	폭발범위사이의 방출량(kg)	TNT상당량(kg)
A	2,025	2,196.1	656
B	2,363.5	2,594.4	775
C	2,837.2	3,120.1	932
D	3,336	2,556.6	1,062.4
E	4,277.9	4,592.1	1,371.7
F	7,453.8	7,914.7	2,364.1

5-2-3. 지면거칠기에 따른 TNT상당량

<표 5-4>에서는 지면거칠기가 낮아질수록 방해물의 영향이 적으므로 TNT상당량이 증가함을 볼 수 있다.

<표 5-4> 지면거칠기에 의한 TNT상당량의 피해 변화량

지면거칠기	폭발범위사이의 방출량(kg)	폭발범위사이의 방출량(kg)	TNT상당량(kg)
0.01	5,375.6	6,181	1,846.3
0.05	4,283.1	4,416	1,319.1
0.1	3,835.9	3,977.3	1,188
0.15	3,429.6	4,162.7	1,243.4
0.2	3,336	3,556.6	1,062.4

5-2-4. 상대습도에 따른 TNT상당량

<표 5-5>에서 상대습도는 TNT상당량에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

<표 5-5> 상대습도에 의한 TNT상당량의 피해 변화량

상대습도	폭발범위사이의 방출량(kg)	폭발범위사이의 방출량(kg)	TNT상당량(kg)
20	3,229.7	3,993	1,192.7
35	3,230.4	3,987	1,191
50	3,323.2	3,550.3	1,060.5
65	3,336	3,556.7	1,062.4
80	3,335.3	3,549.5	1,060.2

5-3. 화재위험범위추정 결과의 분석

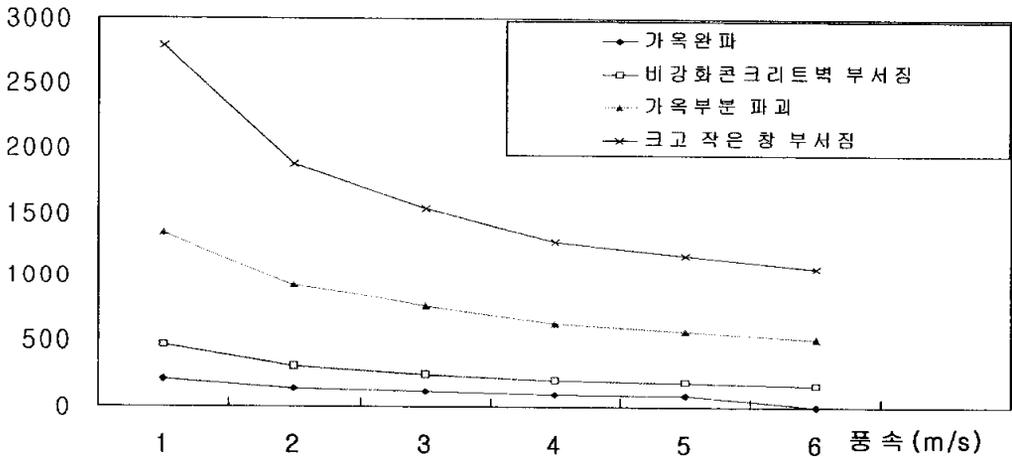
<표 5-6>는 <표5-2>의 풍속의 변화에 의한 TNT상당량의 변화에 따라 폭풍에 의한 피해거리를 나타낸 것으로서 풍속이 감소할수록 피해거리가 증가한다.

<표 5-6> 풍속에 의한 TNT상당량의 피해영향거리

풍속에 따른 TNT 상당량(kg)	3,455.7	1,062.2	579.2	337	258.2	190.8
풍속에 의한 가옥피해						
유리 약10% 파손 (P=0.3psi, Z=185m)	2,796.9	1,887.6	1,542.1	1,287.4	1,178	1,065
유리완파 (P=0.7psi, Z=90m)	1,360.7	918.3	750.2	626.3	573.1	518.1
구조물의 심각한 손상 (P=236psi, Z=31m)	468.7	316.3	258.4	215.7	197.4	178.5
가옥의 완전한 파괴 (P=6psi, Z=15m)	226.8	153	125	104.4	95.5	86.4

풍속변화에 따른 피해거리

피해거리 (m)



<그림 5-1> 풍속변화에 따른 피해거리

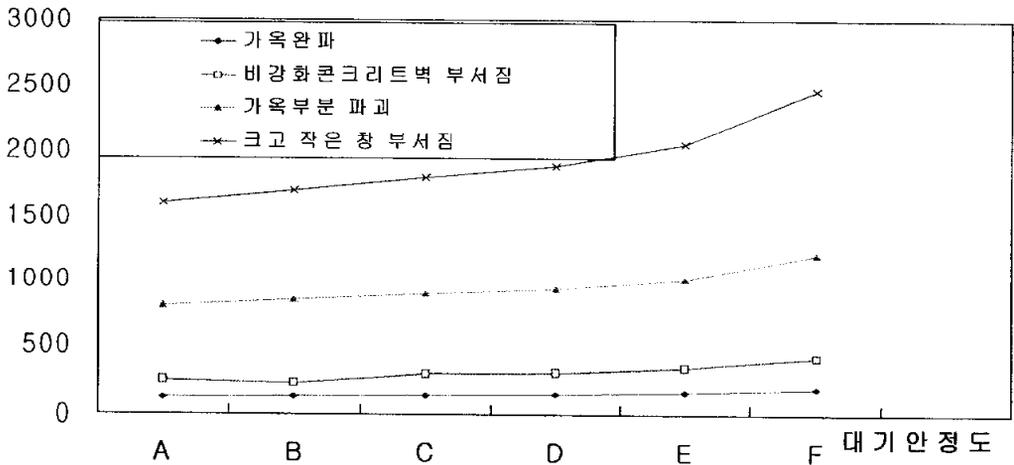
<표5-7>은 <표 5-3>에 의한 대기의 안정도가 안정될수록 TNT상당량의 증가에 따른 폭풍과압에 의한 피해를 나타낸 것으로 대기가 안정될수록 피해는 증가한다.

<표 5-7> 대기안정도에 의한 TNT상당량의 피해영향거리

풍속에 따른 TNT 상당량(kg)	656	775	932	1,062.4	1,371.7	2,364.1
풍속에 의한 가옥피해						
유리 약10% 파손 (P=0.3psi, Z=185m)	1,607.5	1,699.3	1800	1,887.7	2,055.5	2,464.5
유리완파 (P=0.7psi, Z=90m)	782	826.7	879.1	918.3	1,000	1,198.9
구조물의 심각한 손상 (P=236psi, Z=31m)	269.4	248.7	302.8	316.3	344.4	413
가옥의 완전한 파괴 (P=6psi, Z=15m)	130.3	137.8	146.4	153.1	166.7	199.8

대기조건에 의한 피해거리

피해거리 (m/s)



<그림 5-2> 대기조건에 의한 피해거리

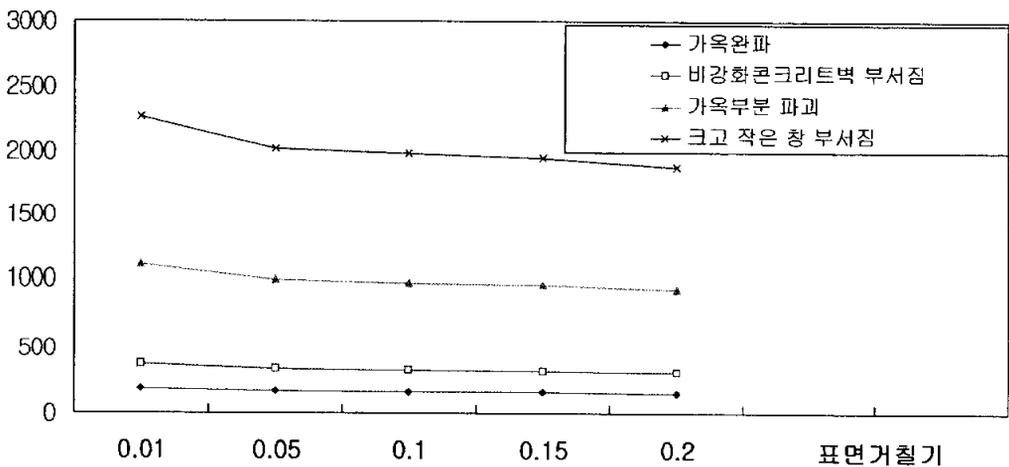
<표5-8>은 <표 5-4>에 의한 지면거칠기가 낮아질수록 TNT상당량의 증가에 따른 폭풍과압의 피해를 나타낸 것으로 지면거칠기가 낮을수록 즉, 방해물의 영향이

적을수록 피해가 증가함을 볼 수 있다.

<표 5-8> 지면거칠기에 의한 TNT상당량의 피해영향거리

풍속에 따른 TNT 상당량(kg)	1,846.3	1,319.1	1,243.4	1,188	1,062.4
풍속에 의한 가옥피해					
유리 약10% 파손 (P=0.3psi, Z=185m)	2,269.5	2,028.9	1,989.3	1,959.3	1,887.7
유리완파 (P=0.7psi, Z=90m)	1,104.2	987	967.8	953.2	918.3
구조물의 심각한 손상 (P=236psi, Z=31m)	380.3	340	333.3	328.3	316.3
가옥의 완전한 파괴 (P=6psi, Z=15m)	184	164.5	161.3	158.9	153.1

피해거리(m/s) 지면거칠기에 따른 피해거리



<그림 5-3> 지면거칠기에 따른 피해거리

<표5-9>은 <표 5-5>에서 습도에 의한 TNT상당량의 변화에 의한 폭풍피해를 나

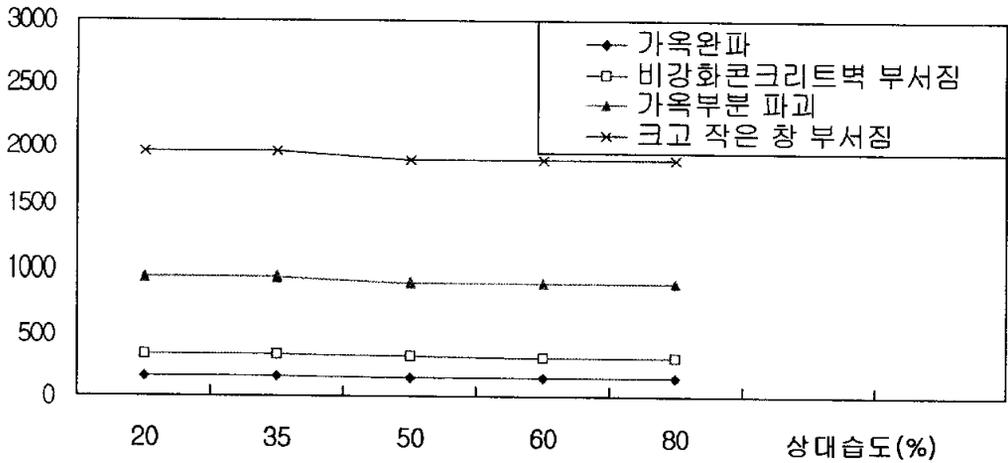
타넨 것으로 습도가 TNT상당량에 별 영향을 주지 않으므로 폭풍피해도 커다란 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

<표 5-9> 상대습도에 의한 TNT상당량의 피해영향거리

풍속에 따른 TNT 상당량(kg)	1,192.7	1,191.1	1,062.4	1,060.5	1,060.2
풍속에 의한 가옥피해					
유리 약10% 파손 (P=0.3psi, Z=185m)	1,961.9	1,961	1,887.7	1,886.6	1,886.4
유리완파 (P=0.7psi, Z=90m)	954.4	954	918.3	917.8	917
구조물의 심각한 손상 (P=236psi, Z=31m)	328.8	328.6	316.3	316.1	316.1
가옥의 완전한 파괴 (P=6psi, Z=15m)	159.1	159	153.1	153	153

상대습도에 따른 피해거리

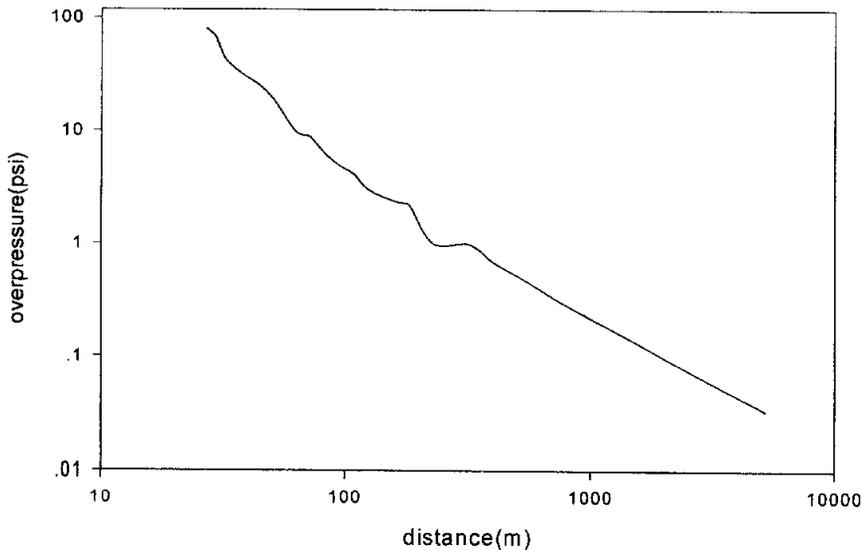
피해거리(m/s)



<그림 5-4> 상대습도에 따른 피해거리

제6장 결론 및 향후대책

여기서는 LPG 및 LNG 배관에서 누출의 폭발로 인한 피해 정도를 평가하였다. 이를 위해 먼저 폭발은 UVCE의 경우를 가정하였고, 폭발의 영향 범위는 scaling법을 사용하여 평가하였다. 그리고 건축물들은 LPG 및 LNG 배관이 있는 장소에 균일하게 분포한다고 가정하여 피해를 입는 건축물의 수 및 피해정도를 예측하였다. 또한 확산모델링에서 바람의 속도 및 방향은 유해물질이 확산되는 방향을 결정하며, 바람의 속도에 따라 유해물질의 누출경로가 약간 길어짐을 보이고 있다. 이러한 현상은 연속누출보다는 갑작스런 누출의 경우에 더욱 두드러지게 나타나는데, 배관의 갑작스런 파열로 인한 누출의 경우 피해반경이 누출지점을 중심으로 원의 형태로 나타나며, 이러한 증기운은 바람의 속도와 방향에 따라 이동함을 알 수 있다.



<그림 6-1> 과압과 거리와의 관계

바람의 방향은 위험범위를 결정하는데 가장 중요한 인자이다. 증발된 LNG는 바람에 따라 이동하므로 누출 사고시에는 그 어느것 보다도 바람의 방향을 파악하는 것이 급선무이다. 바람의 속도 즉, 풍속 역시 위험범위 결정에 중요한 인자이지만 계

산 결과에 의하면 풍속은 위험범위의 면적보다는 위험이 존재하는 지속시간에 더 영향을 미친다.

<표 6-1> 건축물의 피해정도

피해정도	건축물 수 (채)
크고 작은 창 부서짐	12
가옥 부분 파괴	4
비강화콘크리트벽 부서짐	1
가옥전파	0

또한, 현재의 관망 형성에 따른 위험평가는 피해 범위가 한정된 단순범위에 해당하는 영향평가로 그칠 뿐이다. 따라서 멀티미디어 기술의 구현과 GPS에 의한 광범위에 대한 영향평가로 도심지역의 위험지역에 대한 중점 관리가 가능하기에 경제적인 위험요인에 대해서 쉽게 평가를 내릴 수 있을 것이다. 향후 더 많은 사고사례와 현장 실험을 통한 멀티미디어상에서의 가현실상의 평가로서 현실에 도입이 가능하도록 후속 연구를 진행할 것이다.

참고문헌

1. 한국가스안전공사 "가스사고편람", 1997.
2. 한국가스안전공사 "1998 가스사고연감", 1999.
3. 한국가스안전공사 "2002 가스사고연감", 2003.
4. Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar, *"Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications"*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1990.
5. Morton M. Denn, *"Process Fluid Mechanics"*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1980.
6. Center for Chemical Process Safety(CCPS), *"Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis(CPQRA)"*, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1989.
7. 탁송수, 조영도, "액체배관으로부터 위험물질 누출속도 산정에 관한 연구", KIGAS Vol. No.1, March, 2002.
8. Y.-D. Jo, B.-J. Ahn, "A simple model for the release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines", *Journal of Hazardous Materials*, 2002.
9. Y.-D. Jo, B.J. Ahn, "Analysis of Hazard Area Associated with High-Pressure Natural-Gas Pipeline", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2002.
10. A.J. Osiadacz, *"Simulation and Analysis of Gas Network"*, E.&F.N. Spon Ltd., London, 1987
11. D.P. Nolan, P.E., *"Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Factories"*, Noyes Publications, New Jersey, 1996.
12. Carl L.Yaws, "MATHESON GAS HANDBOOK", 7th edn., MATHESON TR I · GAS, , McGraw-Hill, New York, 2001.
13. I.H. Shames, *"Mechanics of Fluids"*, 2nd edn., McGraw-Hill, Singapore, 1992.
14. A.C. Daniel, F.L. Joseph, *"Chemical Process Safety Fundamentals with Applications"*, Prentice-Hall, New Jersey, 1990.

15. C.G. Segeler, *"Gas Engineers Handbook"*, Industrial Press, New York, 1981.
16. M.R. Acton, G. Hankinson, B.P. Ashorth, M. Sanai, and J.D. Colton, *"A Full Scale Experimental Study of Fires Following the Rupture of Natural Gas Transmission Pipelines"*, 2000 International Pipeline Conference, Volume 1 ASME 2000, 2000.
17. Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Evaluating the Characteristic of Vapor Cloud Explosions, Flash Fire, and BLEVEs*, American Institute of Chemical Engineers, 1994
18. Center for Chemical Process Safety, *"Guideline for Use of Vapor Cloud Dispersion Models"*, Second Edition, American Institute of Chemical Engineers, 1996
19. Chushkin, P.I., and L. V. Shurshalov., "Numerical computations of explosions in gases", *Proc. 8th Int. Conf. on Num. Meth. in Fluid Dynam*, 1982
20. Dag Bjerketvedt, Jan Roar Bakke, *"Gas Explosion Handbook"*, version1.2, Christian Michelsen Research, 1993
21. EPA Home page
22. Harris, R.J., and M.J. Wickens. *"Understanding vapor cloud explosions-an experimental study"*, *55th Autumn Meeting of the Institute of Gas Engineers*, 1989
23. Hjertager, B. H. *"Numerical simulation of flame and pressure development in gas explosions"*, *SM study No. 16*, 1982
24. 산업자원부, 「산업자원부 2002」, 2003
25. 김용욱, "(최신)화공안전공학", 형설출판사, 1994
26. 에너지경제연구원 「에너지통계연보 2003년판」, 2003
27. 한국가스공사 홈페이지 참조(www.kogas.or.kr)
28. 에너지경제연구원 홈페이지 참조(www.keei.re.kr), 통계정보시스템

감사의 글

오늘 이 글을 남길 수 있도록 많은 격려와 지도를 아낌없이 베풀어주신 모든 분들과 진심 어린 마음으로 감사를 드립니다. 3년 동안 인생과 학문에 대한 끊임없는 보살핌과 밝은 웃음으로 지도편달 해주신 신봉기 지도교수님께 감사드립니다. 부족한 점이 많은 저를 오늘까지 이끌어주신 교수님의 사랑을 잊을 수 없을 것 같습니다. 그리고, 넉넉한 마음으로 심사해 주신 조우현 교수님과 송하주 교수님께 감사를 드립니다. 또한, 어렵게 시작한 학창시절을 편안하게 할 수 있도록 도움을 주신 박순철선배님과 여러 선배님, 동기들 그리고 후배님들에게도 진심으로 감사드립니다.

바쁜 업무중에도 무사히 학업을 마칠 수 있도록 물심양면으로 힘이 되어준 한국가스안전공사 부산지역본부 이동진본부장님 이하 정원기부장님과 동료 선·후배님 그리고 가스안전교육원의 한진규부장님, 영작에 도움을 주신 한귀호과장님과 해외협력부 이인범과장님께 감사를 드립니다. 또한, 옆에서 힘이 되어주신 개론팀 과장님과 교수실 선배님들께 항상 마음으로 감사를 드립니다.

나름대로 최선을 다한 학창시절이었다고 생각하지만 막상 이렇게 학업을 마치게 되어 보니 부족한 점이 너무도 많습니다. 어려운 시절을 함께 힘이 되어준 동료 이상은, 마성준과 김재문, 남승, 양기수형, 후배 보혁이 그리고 멀리 떨어져 있어도 마음으로 힘이 되어준 홍근이와 재필이에게 고마움을 금치 못하겠습니다. 그리고 누구보다도 가까이에서 어려움을 이해하고 격려해 주셨던 아버지, 어머니, 형님, 형수님, 동생과 제수에게 감사하고, 많은 시간을 학업에 열중하도록 배려해준 그녀에게 감사합니다.

끝으로, 아빠로써 많은 시간을 함께 해주지 못하였지만 잘 자라준 재창이에게 너무도 고맙고 이제부터는 함께 하는 아빠가 되도록 하겠습니다. 고맙습니다.

2003년 12월

임 사 환 올림