KOSHA GUIDE

KOSHA GUIDE

KOSHA GUIDE

KOSHA GUIDE

KOSHA GUIDE
기술지원규정

사고 피해예측 기법에 관한 기술지원규정
C-C-56-2026

한국산업안전보건공단

기술지원규정은 산업안전보건기준에 관한 규칙 등 산업안전보건법령의 요구사항을 이행하는데 참고하거나 사업장 안전·보건 수준향상에 필요한 기술적 권고 규정임

기술지원규정의 개요

○ 개정자 : 한국산업안전보건공단 전문기술실

○ 제·개정경과

- 1996년 6월 화학안전분야 기준제정위원회 심의
- 1996년 8월 총괄기준제정위원회 심의
- 1998년 6월 화학안전분야 기준제정위원회 심의(제1차 개정)
- 1998년 7월 총괄기준제정위원회 심의(제1차 개정)
- 1999년 7월 화학안전분야 기준제정위원회 심의(제2차 개정)
- 1999년 9월 총괄기준제정위원회 심의(제2차 개정)
- 2000년 5월 화학안전분야 기준제정위원회 심의 (제3차 개정)
- 2000년 6월 총괄기준제정위원회 심의 (제3차 개정)
- 2012년 7월 총괄 제정위원회 심의(개정, 법규개정조항 반영)
- 2013년 9월 화학안전분야 기준제정위원회 심의 (제4차 개정)
- 2021년 11월 화학안전분야 기준제정위원회 심의 (제5차 개정)
- 2025년 12월 화학안전분야 전문위원회 심의(개정)
- 2026년 1월 표준제정위원회 본위원회 심의(개정)

○ 관련규격 및 자료

- Consequence Analysis of Chemical Release(미국 CCPS)
- Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs(미국 CCPS)
- Chemical Process Quantitative Risk Analysis(미국 CCPS)
- Consequence Assessment & Mitigation(미국 CCPS)
- ILO Major hazard Control : A Practical Manual
- API 521
- Loss Prevention in Process Industries(Frank Lees)
- Use of Vapor Cloud Dispersion Models(미국 CCPS)

○ 기술지원규정의 적용 및 문의

- 이 기술지원규정에 대한 의견 또는 문의는 산업안전포털 홈페이지(portal.kosha.or.kr)의 기술지원규정(KOSHA GUIDE) 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.
- 동 규정 내에서 인용된 관련규격 및 자료, 법규 등에 관하여 최근 개정본이 있을 경우에는 해당 개정본의 내용을 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2026년 1월 30일
제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

목 차

1. 목적 ····· 1

2. 적용범위 ····· 1

3. 용어의 정의 ····· 1

4. 사고피해예측 절차 ····· 3

5. 누출 ····· 4

6. 피해예측 ····· 4

7. 위험 기준의 정립 ····· 7

8. 피해예측 보고서 ····· 8

<부록 1>확산피해예측 절차(가벼운 가스) ····· 18

<부록 2>확산피해예측 절차(무거운 가스) ····· 32

<부록 3>TNO 액면화재모델 피해예측 절차 ····· 43

<부록 4>API 고압분출화재모델 피해예측절차 ····· 50

<부록 5>비등액체 팽창 폭발/화구 피해예측 절차 ····· 57

<부록 6>물리적 폭발 피해예측 절차 ····· 63

<부록 7>TNT당량 모델 피해예측 절차 ····· 92

<부록 8>액화석유가스의 증기운 폭발 ····· 97

사고 피해예측 기법에 관한 기술지원규정

1. 목 적

이 규정은 공정위험성 평가시 화재·폭발·누출과 같은 사고시의 피해정도 및 피해범위 등을 정량적으로 산정하고 피해최소화 대책을 수립하는 등의 공정 위험성 평가서를 작성하는데 필요한 사항을 정하는데 그 목적이 있다.

2. 적용범위

이 규정은 산업안전보건기준에 관한 규칙(이하 “안전보건규칙” 이라 한다) 별표1의 위험물질 중 인화성 액체, 인화성 가스 및 급성 독성물질을 취급하는 화학설비 및 그 부속설비에 의한 사고피해예측에 적용한다.

3. 용어의 정의

(1) 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

(가) “위험물질”이라 함은 안전보건규칙 별표1의 제4호 인화성 액체, 제5호 인화성 가스 및 제7호 급성 독성물질을 말한다.

(나) “누출 모델 (Source term model)”이라 함은 피해예측 특히 확산결과를 계산하기 위하여 사용되는 누출에 관한 일련의 자료, 즉 누출량(또는 누출속도), 누출되는 기간 및 누출되는 위험물질의 상태 등을 예측하는 방법을 말한다.

(다) “순간누출”이라 함은 짧은시간에 위험물질이 누출되는 것을 말한다.

(라) “연속누출”이라 함은 오랜 시간 동안 위험물질이 누출되는 것을 말한다.

(마) “확산”이라 함은 위험물질이 공기등과 같은 주변의 유체에 의하여 희석되어지는 것을 말한다.

(바) “퍼프 (Puff)”라 함은 순간누출에 의하여 형성되는 증기운을 말한다.

(사) “플름 (Plume)”이라 함은 연속누출에 의하여 형성되는 증기운을 말한다.

(아) ″비등액체 팽창증기폭발 (BLEVE : Boiling liquid expanding vapor explosion)” 이라함은 가연성인 위험물질이 용기 또는 배관 내에 비점 이상의 온도 및 압력하에서 액체상태로 저장·취급되는 경우 외부화재, 부식, 내부압력초과 및 설비결함 등에 의하여 용기의 파손과 함께 대기 중으로 누출되면 액체상태의 위험물질이 증발되면서 갑자기 증기로 변화되어 외부로 치솟게 되는데 이때에 외부 화재, 스파크, 정전기, 담뱃불 등의 발화원에 의하여 폭발 및 화염을 발생시키는 현상을 말한다.

(자) ″화구 (Fireball)” 라 함은 저장·취급조건에 따라 다르긴 하지만 비등액체 팽창증기폭발에 의하여 공중에 생성된 공같은 모양의 화염 덩어리를 말한다.

(차) ″증기운 폭발 (Vapor cloud explosion)” 이라 함은 가연성의 위험물질이 용기 또는 배관내에 저장·취급되는 과정에서 서서히 지속적으로 누출되면서 대기 중에 구름형태로 모이게 되어 바람·대류 등의 영향으로 움직이다가 담배불, 정전기, 기계적 마찰, 스파크 등의 발화원에 의하여 순간적으로 모든가스가 동시에 폭발하는 현상으로서 폭발에 의한 과압에 의하여 엄청난 손상을 가져오는 현상을 말한다.

(카) “밀폐계 증기운 폭발 (Confined vapor cloud explosion)”이라 함은 용기나 건물 등 밀폐된 공간에서 위험물질의 가스 또는 증기와 공기와의 혼합물에 의한 폭발을 말한다.

(타) “물리적 폭발 (Physical explosion)”이라 함은 압력용기가 과압방지장치의 고장, 부식·마모·화학적 침식 등에 의한 두께의 감소 및 과열·재질의 결합 등에 의한 용기의 강도 감소 등에 의하여 내부압력에 견디지 못하고 폭발하는 현상을 말한다.

(파) “과압 (Overpressure)”이라 함은 어느 지점에 대기압 보다 큰 압력으로 전달되는 압력을 말한다.

(하) “폭발파 (Blast wave)”라 함은 폭발에 의하여 형성되는 압력 파동을 말한다.

(거) “증기운 화재 (Flash fire)″라 함은 누출된 위험물질이 공기중으로 확산되어 구름형태로 떠다니다가 물질의 폭발하한계 이하로 희석되기전 발화원을 만나면 화재가 발생하는 것을 말한다. 이 경우 화염의 속도는 음속보다 작으며 무시할 수 있을 정도의 과압이 발생한다.

(너) “고압분출 화재 (Jet fire)”라 함은 배관, 저장 탱크등에서 연속적으로 누출되는 고압의 위험물질이 누출원 근처의 발화원에 의하여 점화되는 현상을 말하며 이 경우 연속적으로 복사열이 발생된다.

(더) “액면 화재 (Pool fire)”라 함은 액체(액화가스포함)의 위험물질이 누출되어 주변 바닥에 고여 있는 액체가 기화하여 발화원에 의해 점화된 것을 말한다.

(2) 그 밖에 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙 및 안전보건규칙에서 정하는 바에 따른다.

4. 사고피해예측 절차

가상사고를 중심으로 사고피해 예측을 수행하되 그중 사고 발생 빈도 또는 가능성이 높은 가상사고를 중점적으로 분석한다. 가상사고 시나리오 선정은 KOSHA GUIDE C-C-58-2026「최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지원규정」과 KOSHA GUIDE C-C-60-2026「화학공장의 피해최소화 대책수립에 관한 기술지원규정」을 활용한다.

4.1 1단계(근본적인 위험 요소 확인)

정성적인 위험성 평가 단계로서 주로 위험과 운전 분석 기법 또는 체크리스트 기법 등에 의하여 공정내에 잠재하고 있는 위험요소를 확인한다.

4.2 2단계(누출 모델 작성)

누출 모델은 물질이 어떻게 누출되는지를 분석하는 것으로서 배관의 파손, 플랜지 누출, 안전밸브 작동, 운전원 실수 등에 의한 잠재적인 누출원 등을 확인하여 방출되는 위험물질의 양, 온도, 밀도, 시간, 누출상태(가스, 증기, 액체, 혼합물) 등을 계산한다.

4.3 3단계(확산 모델)

2단계의 누출 모델을 근거로 하여 대기 중으로 확산되는 위험물질의 거리에 따른 농도, 확산되는 증기운 구름의 크기, 농도, 형태를 예측한다.

4.4 4단계(피해예측)

누출되는 위험물질이 인화성가스 또는 인화성액체인 경우에는 화재·폭발로 인하여 사업장내의 근로자 및 주변 시설에 미치는 화재·폭발의 영향을 계산하며 독성물질인 경우에는 작업자, 인근 주민 또는 주변 환경에 미치는 영향을 계산 한다.

5. 누출

5.1 누출의 형태

누출의 형태는 위험물질을 저장 또는 취급하고 있는 용기 등에서의 운전원 실수 또는 기계적 결함의 정도, 저장 또는 취급 온도·압력 조건 및 물질의 물리화학적 성질에 따라 달라진다. 일반적으로 누출되는 위험물질의 증기는 누출시간에 따라 순간누출 및 연속누출, 그리고 증기운의 밀도에 따라 가벼운 가스와 무거운 가스로 구분하며 누출량은 설비에서 누출되는 경우와 배관에서 누출되는 경우에 따라 증기 또는 가스 상태, 액체 상태 및 2상(액체-증기) 상태에 대해 유체역학을 적용하여 산출한다. 자세한 내용은 KOSHA GUIDE C-C-47-2026「누출원 모델링에 관한 기술지원규정」을 참고한다.

5.2 누출결과

인화성가스 및 인화성액체의 누출결과는 최악의 경우 화재 또는 폭발로 나타날 수 있다. 이 화재·폭발의 결과는 누출되는 물질의 특성과 점화되는 시점에서 물질의 상태, 예를들면 누출된 물질이 증기, 가스 또는 액체로 존재하는가 등에 달려있다.

독성물질의 누출에 의한 결과는 누출시간, 누출지점으로 부터의 거리 및 기상 조건에 따라 달라지기 때문에 인화성가스 및 인화성액체의 누출에 의한 결과를 예측하는 것보다 더 어렵다. 따라서 독성물질의 확산에 따른 피해를 최소화 하기 위하여는 독성물질 누출원으로 부터 확산 거리에 따른 농도, 독성 가스운의 지속시간 등을 예측하여야 하며 누출 물질의 독성 정보를 제공하여야 한다.

6. 피해예측

위험물질을 취급하는 화학설비 및 그 부속설비는 근로자, 주변 시설물 및 환경에 심각한 영향을 미칠 수 있는 화재, 폭발 또는 독성물질의 누출 등과 같은 중대산업 사고의 발생 가능성이 있다.

6.1 확산

누출된 인화성액체 또는 인화성가스가 누출 즉시 점화되지 않는다면 증기운을 형성하여 먼 거리까지 확산된다. 이 증기운은 확산 되면서 공기와 희석되고 결과적으로 폭발 하한계에 도달하여 더 이상 화재의 위험이 없게 된다. 그러나 독성물질인 경우에는 독성물질이 바람에 의해 상당히 먼 거리까지 확산되어 농도가 낮다 할지라도 근로자 및 주민에게 심각한 영향을 미칠 수 있다.

6.1.1 가벼운 가스

공기보다 가벼운 가스의 확산은 확산되는 지역의 대기조건에 의하여 영향을 받는다. 적용 가능한 모델은 다음과 같으며 가우시안 플름모델 및 퍼프모델을 이용한 확산 피해예측 절차는 <부록 1>의 “확산피해예측절차(가벼운 가스)”를 참조한다.

(1) 가우시안 플름(Gaussian plume) 모델

(2) 가우시안 퍼프(Gaussian puff) 모델

(3) 기타

6.1.2 무거운 가스

공기보다 무거운 가스의 확산모델은 다음과 같으며 에이치엠피(HMP)모델 및 비엠(BM) 모델을 이용한 확산피해예측절차는 <부록 2>의 “확산피해예측절차(무거운 가스)”를 참조한다.

(1) BM(Britter & McQuaid) 모델

(2) HMP(Hoot, Meroney & Peterka) 모델

(3) Degadis 모델

(4) 기타

6.2 액면 화재/증기운 화재/고압분출 화재

누출된 증기운이 점화되면 누출원 쪽으로 화재가 전파된다. 만약 배관 또는 플랜지 부위에서 누출되는 물질이 즉시 점화된다면 고압분출 화재 또는 액면 화재를 형성하게 된다.

증기운 화재시는 가연성 증기운의 크기를 측정하여 복사열을 예측할 수 있도록 대기 확산 모델을 사용하고, 액면 화재시에는 TNO 모델 등의 적절한 액면 화재 모델을 사용한다. 간단히 정량적으로 예측할 수 있는 계산절차는 <부록 3>의 “TNO 액면화재모델 피해예측절차”를 참조한다.

고압분출 화재는 미국석유협회(API) 또는 TNO 모델을 사용하여 복사열을 예측한다. 간단히 정량적으로 예측할 수 있는 계산절차는 <부록 4>의 “미국석유협회(API) 고압분출 화재모델 피해예측절차”를 참조한다.

6.3 비등액체 팽창증기폭발・화구

화재시 저장 탱크의 순간적인 파열에 의해 비등액체 팽창증기폭발・화구 등이 발생할 수 있는데 화구의 크기 또는 화구로 부터 거리에 따른 복사열 등은 비등액체 팽창증기폭발 및 화구 모델을 사용하여 쉽게 예측할 수 있다. 따라서 비등액체 팽창증기폭발 또는 화구 발생시의 거리에 따른 복사열 등이 주변 시설물 및 근로자에 미치는 영양을 예측하도록 한다. 비등액체 팽창증기폭발・화구의 피해예측 모델은 TNT 당량 또는 단열팽창 모델 등을 사용하여 계산한다.

간단히 정량적으로 예측할 수 있는 계산절차 및 예시는 <부록 5>의 “비등액체 팽창증기폭발・화구 피해예측 절차” 및 <부록 5-예>의 “복사열 산정 예시”를 참조한다.

6.4 물리적 폭발

압력용기의 물리적폭발은 저장하고 있는 에너지를 방출시키는 것으로서 방출에너지는 폭풍파 및 용기 조각의 비산등으로 나타나며 용기에서 인화성가스나 액화성물질을 취급하는 경우에는 그 물질이 2차적으로 폭발을 일으키게 된다.

물리적 폭발 예측에 사용되는 모델은 다음과 같다.

(1) TNT 당량 모델

(2) 기타

간단한 수 계산에 의한 물리적 폭발 피해예측 절차는 <부록 6>의 “물리적 폭발 피해예측 절차”를 참조한다.

6.5 증기운 폭발

대량의 인화성가스 또는 인화성액체의 누출에 따른 증기운 폭발의 발생 확률은 비교적 낮지만 그 결과는 매우 엄청나다. 증기운 폭발의 위력은 과압, 폭풍파 등으로 표시된다. 증기운 폭발시에는 거리에 따른 폭발압력이 인체 및 주변 시설물에 미치는 영향을 예측하여야 한다. 증기운 폭발 예측에 사용되는 모델은 다음과 같다.

(1) TNT 당량 모델

(2) TNO 상관 모델

(3) TNO 멀티에너지 모델

(4) 기타

간단한 수계산에 의한 증기운 폭발 피해예측절차 및 예시는 <부록 7>의 “TNT당량모델 피해예측절차,” <부록 8>의 “액화석유가스의 증기운 폭발” 및 <부록 8-예>의 “폭발압 산정 예시” 를 참조한다.

6.6 밀폐계 증기운폭발

밀폐된 공간에서의 증기운 폭발은 매우 높은 과압, 폭풍파 또는 용기 조각의 비산 등으로 나타난다. 밀폐계 증기운 폭발에 의한 손상의 크기는 화학물질의 양 및 폭발 압력에 따라 다르게 나타난다.

밀폐계 증기운 폭발 예측에 사용되는 모델은 다음과 같다.

(1) TNT 당량 모델

(2) TNO 상관 모델

(3) TNO 멀티에너지 모델

(4) 기타

7. 위험 기준의 정립

화재, 폭발 또는 독성물질의 누출 등과 같은 중대산업사고의 발생시 복사열, 과압 또는 공기중에 확산되어 있는 독성물질에 의하여 사업장 내의 근로자, 인근 주민 또는 주변 시설물 등에 어느 정도의 위험이 미치는지 또는 이 위험을 받아들일 수 있는지 여부를 판단할 수 있는 위험기준을 작성한다

7.1 확산

(1) 독성물질

대기중에 확산되는 독성 물질에 근로자, 인근 주민 등이 노출되는 경우 독성물질의 농도 및 노출시간에 따른 인체에 미치는 영향을 판단할 수 있는 기준은 KOSHA GUIDE C-C-46-2026 「화학물질폭로영향지수(CEI) 산정에 관한 기술지원규정」에서 규정하는 ERPG-2 농도에 도달할 수 있는 거리로 한다.

(2) 인화성가스 및 인화성액체

인화성가스 및 인화성액체가 누출되어 대기중에 확산되는 경우에는 그 물질에 의한 화재에 의하여 근로자, 인근주민 및 주위환경에 영향을 주므로 그 판단 기준은 그 물질의 폭발하한농도가 되는 최대거리로 한다.

7.2 화재(복사열)

화구 등과 같이 짧은 시간동안 발생하는 강렬한 복사열에 의한 위험 또는 증기운 화재, 고압분출 화재, 액면 화재 등에 의한 장시간의 복사열에 의하여 근로자 또는 주변 기기에 미치는 영향을 판단할 수 있는 기준은 5 kW/㎡(1,585 Btu/hr/ft^2)의 복사열이 미치는 거리로 한다. 참고로 복사열에 의한 영향은 <별표 1>과 같다.

7.3 폭발(과압)

증기운 폭발 등과 같은 폭발 사고시 주변 기기 및 근로자 등에 미치는 영향을 판단할 수 있는 기준은 0.07 kgf/㎠ (6.9 kPa, 1 psi)의 과압이 도달하는 거리로 한다. 참고로 과압에 의한 영향은 <별표 2>와 같다.

8. 피해예측 보고서

피해예측 보고서에는 누출량, 누출시간, 기상 조건등 확산모델 계산에 사용한 누출모델 기본자료 및 거리에 따른 과압, 복사열, 독성물질의 농도등 가상 사고로 인한 피해를 예측할 수 있는 자료가 포함되어야 하며<별지 양식 1> 내지<별지 양식3>의 양식에 그 결과를 요약한다.

8.1 기상 자료

풍향, 풍속, 온도, 습도 등 사업장의 기상자료. 다만, 사업장 내의 기상 자료가 없는 경우에는 주변 기상청, 공항 등에서 측정한 자료를 인용할 수 있다.

8.2 누출 물질의 정보

(1) 누출 물질의 명칭 및 양

(2) 누출 시간

8.3 피해예측 결과

제 6항의 피해예측 결과 각 사고 시나리오별로 최소한 다음과 같은 결과가 포함되도록 한다.

8.3.1 확산

(1) 누출물질의 농도, 온도, 밀도

(2) 거리에 따른 농도 등

8.3.2 액면 화재

(1) 액면의 크기(지름)

(2) 불꽃의 기울기

(3) 복사열량

(4) 거리에 따른 복사열 강도 등

8.3.3 증기운 화재

(1) 가연성 증기운의 크기(지름)

(2) 증기운의 밀도 및 온도

(3) 복사열량

(4) 거리에 따른 복사열 강도 등

8.3.4 고압분출 화재

(1) 거리에 따른 복사열 강도

(2) 불꽃의 기울기

(3) 복사열량 등

8.3.5 비등액체팽창증기폭발

(1) 복사열량

(2) 화구의 지름

(3) 화구의 높이 등

(4) 거리에 따른 복사열 강도 등

8.3.6 증기운 폭발

(1) 증기운의 크기

(2) 증기운의 밀도 및 온도

(3) 거리에 따른 과압

(4) 최대 과압 등

8.3.7 밀폐계 증기운 폭발

(1) 거리에 따른 과압

(2) 파편의 비산에 의한 영향 등

8.3.8 물리적 폭발

(1) 거리에 따른 과압

(2) 파편의 비산에 의한 영향 등

<별표 1>

복사열의 영향 판단 표

1. 통증을 느끼기 시작하는 시간(인용: API 521)

복사열 강도		고통을 느끼기 시작하는 시간
($Btu/hr/ft^2$)	(kW/m^2)	(sec)
500	1.6	60
740	2.3	40
920	2.9	30
1500	4.7	16
2200	6.9	9
3000	9.5	6
3700	11.7	4
6300	19.9	2

2. 허용 설계 기준

복 사 열		조 건
($Btu/hr/ft^2$)	(kW/m^2)	
5000	15.8	건축물 내에서도 운전원이 임무 수행 곤란하며 건축물내의 기기에도 복사열이 전달
3000	9.5	보호의를 착용하고 최대 30초간 간헐적으로 노출될 수 있음.
2000	6.3	개인 방호물 없이 보호의를 착용하고 1분간 노출될 수 있는 복사열
1500	4.7	개인 방호물 없이 평상복을 착용하고 1분간 노출될 수 있는 복사열
500	1.6	연속적으로 노출 가능

3. 복사열의 영향 (인용: World Bank)

복사열 강도		영 향
(Btu/hr/ft^2)	(kW/m^2)	
11900	37.5	장치 및 설비가 손상됨
7900	25	오랫동안 노출되면 최소한의 에너지에 의해 목재가 발화됨
4000	12.5	목재 또는 플라스틱 튜브의 착화를 유도하는데 충분한 최소의 에너지
3000	9.5	8초 후에는 심한 고통을 느끼며, 20초 후에는 2도 화상을 입음.
1300	4	20초 내에 보호되지 않으면 통증을 느끼며 피부가 부푸러 오름
500	1.6	장기간 노출되면 불편함을 느낌

<별표 2>

폭발 과압의 영향 판단 표

과압		영 향
kPa	(psi)	
0.15	0.02	소음 발생
0.2	0.03	유리창 일부 파손
0.3	0.04	큰 소음 발생
1	0.15	유리파열 압력
2	0.3	집의 지붕과 유리창의 10% 파손
3	0.4	구조물의 가벼운 손상
3.5-7	0.5-1.0	유리창이 부서지며 일부 창틀이 파손
5	0.7	주택의 구조물 파손
7	1.0	주택의 일부 파손(복구불가능)
9	1.3	철구조물이 약간 손상
15	2	주택의 벽과 지붕이 약간 파손
15-20	2-3	비강화콘트리트 벽 파손
16	2.3	구조물이 심하게 손상되기 시작
18	2.5	주택의 블록이 50%정도 파손
20	3	건축물의 철구조물이 손상되며 기초에서 이탈
20-28	3-4	지지대가 없는 철제 건축물 또는 기름 저장 탱크 파손
30	4	공장건물의 파손
35	5	나무 기둥이 부러짐
35-50	5-7	주택의 완파
50	7	짐 실은 화물차가 전복
50-55	7-8	두께 20-30 cm 의 벽돌벽이 붕괴
60	9	대형 화물차의 전파
70	10	대부분의 건축물 전파

<별지 양식 1>

피해예측결과 요약(확산)

1. 사업장 및 대상공장

사 업 장 명	
주 소	
대상공장명	

2. 기상자료 및 지형

풍 속	m/sec	풍 향	
온 도	℃	상대습도	%
누출시간	□낮 □밤	주변지형	□ 도시지형 □ 농촌지형

3. 가상시나리오

물 질 명		물질의 분류	□ 독성 □ 가연성/인화성
누출물질의 밀도	kg/㎥	누 출 량	kg, kg/sec
누 출 원		누출원의 지름	m
누출/운전온도	℃	누출/운전압력	kgf/㎠
누출의 종류	□연속 □순간	누 출 기 간	sec

4. 피해예측결과

물질의 ERPG 2 농도	mg/㎥	물질의 폭발하한농도	%
ERPG 1거리	m	폭발하한농도 거리	m
ERPG 2거리	m		
ERPG 3거리	m		
사용한 모델	□가우시안 플름 □가우시안 퍼프 □HMP □BM □CEI □ 기타( )		

5. 첨부(계산근거)

<별지 양식 2>

피해예측결과 요약(화재)

1. 사업장 및 대상공장

사 업 장 명	
주 소	
대상공장명	

2. 기상자료 및 지형

풍 속	m/sec	풍 향	
온 도	℃	상대습도	%
누출시간	□낮 □밤	주변지형	□ 도시지형 □ 농촌지형

3. 가상시나리오

물 질 명		물질의 분류	□ 인화성가스 □ 인화성액체
누출물질의 밀도	kg/㎥	누 출 량	kg, kg/sec
누 출 원		누출원의 지름	m
누출/운전온도	℃	누출/운전압력	kgf/㎠
누출의 종류	□연속 □순간	누 출 기 간	sec

4. 피해예측결과

화재의 종류	□ 액면화재 □ 증기운화재 □ 고압분출화재 □ 화구・BLEVE □ 기타( )		
복사열량	kW/㎡	화재/화구의 크기(지름)	m
불꽃의 기울기		화구의 높이	m
복사열이 5kW/㎡인 지점의 거리			m
사용한 모델	□TNO □API □TNT 당량 □단열팽창 □ 기타( )		

5. 첨부(계산근거)

<별지 양식 3>

피해예측결과 요약(폭발)

1. 사업장 및 대상공장

사 업 장 명	
주 소	
대상공장명	

2. 기상자료 및 지형

풍 속	m/sec	풍 향	
온 도	℃	상대습도	%
누출시간	□낮 □밤	주변지형	□ 도시지형 □ 농촌지형

3. 가상시나리오

물 질 명		물질의 분류	□ 인화성가스 □ 인화성액체
누출물질의 밀도	kg/㎥	누 출 량	kg, kg/sec
누 출 원		누출원의 지름	m
누출/운전온도	℃	누출/운전압력	kgf/㎠
누출의 종류	□연속 □순간	누 출 기 간	sec

4. 피해예측결과

화재의 종류	□ 증기운 폭발 □ 밀폐계 증기운 폭발 □ 용기폭발 □ 기타( )		
증기운의 크기	m	최대과압	kgf/㎠
0.07kgf/㎠의 과압이 미치는 거리			m
최대과압이 미치는 거리			m
파편의 비상거리			m
사용한 모델	□TNO 상관 □TNT 당량 □TNO 멀티에너지 □ 기타( )		

5. 첨부(계산근거)

<부록 1>

확산피해예측 절차(가벼운 가스)

제 1 장 일반사항

1. 적용범위

위험물질 중 가벼운가스가 화학설비 및 부속설비에서 누출되어 대기중으로 확산되는 경우에 적용한다.

2. 피해요인

누출된 인화성액체 또는 인화성가스가 누출 즉시 점화되지 않는다면 증기운을 형성하여 먼 거리까지 확산된다. 이 증기운은 확산 되면서 공기와 희석되고 결과적으로 폭발 하한계에 도달하여 더 이상 화재의 위험이 없게 된다. 그러나 독성물질 경우에는 독성물질이 바람에 의해 상당히 먼거리까지 확산되어 농도가 낮다 할 지라도 근로자 및 주민에게 심각한 영향을 미칠 수 있다.

3. 적용기준

3.1 연속누출과 순간누출

연속누출과 순간누출의 분류는 누출물질의 도달시간을 기준으로 다음과 같이 구분한다.

(1) 도달시간의 산정

$$t_{tr} = \frac{2X}{u} \quad \cdots\cdots\cdots\

(2) 연속누출과 순간누출의 분류

연속누출 : $t_d \geq t_{tr}$ 인 경우

순간누출 : $t_d < t_{tr}$ 인 경우

여기서, t_d : 누출기간(s)

3.2 가벼운 가스와 무거운 가스

3.2.1 가벼운 가스의 확산

(1) 가벼운 가스의 확산은 대기의 난류에 의하여 영향을 받는다.

(2) 가벼운 가스가 대기중에 섞여 있어도 대기중에서의 바람의 흐름에 영향을 주지 않는다.

3.2.2 무거운 가스의 확산

(1) 무거운 가스의 확산은 누출된 가스가 중력에 의하여 유도되는 흐름에 영향을 받는다.

(2) 무거운 가스가 대기중에 섞여 있으면 대기중에서의 바람의 흐름에 영향을 준다.

3.2.3 가벼운 가스와 무거운 가스의 적용기준

가벼운 가스와 무거운 가스의 분류 기준은 다음과 같다.

(1) 연속누출인 경우

무거운 가스 : $Ri_o \geq 0.003$ 인 경우

가벼운 가스 : $Ri_o < 0.003$ 인 경우

리차드슨 수 (Ri_o : Richardson number)는 다음식을 이용하여 계산한다.

$$Ri_o = \frac{g(\rho_r - \rho_a) \times V_V}{\rho_a \times u_{10}^3 \times d} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}2)$$

여기서, Ri_o : 리차드슨 수

g : 중력가속도 (9.8m/s^2)

ρ_r : 누출되는 물질의 비중(kg/m^3)

ρ_a : 대기 온도에서 공기의 비중(kg/m^3)

u_{10} : 지상으로부터 10m 높이에서의 바람의 속도(m/s)

V_V : 체적 누출속도(m^3/s)

d : 누출원의 지름(m)

(2) 순간누출인 경우

무거운 가스 : $Ri_o \geq 0.04$ 인 경우

가벼운 가스 : $Ri_o < 0.04$ 인 경우

리차드슨 수는 다음식을 이용하여 계산한다.

$$Ri_o = g\frac{(\rho_r - \rho_a) \times V^{1/3}}{\rho_a \times u_{10}^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}3)$$

여기서, V : 누출량(m^3)

제 2장 가우시안 플름(Gaussian plume) 모델

4. 적용대상

가우시안 플름모델은 가벼운가스의 연속누출에 적용한다.

5. 전제조건

가우시안 플름모델의 적용시에는 다음의 전제조건이 있다.

(1) 누출속도가 일정하다.

(2) 장애물이 없는 평평한 곳에서 누출이 일어난다.

(3) 화학반응이나 열역학적 영향이 없다.

(4) 누출기간이 일정지점에 도달하는데 걸리는 시간보다 길다.

(5) 누출된 물질은 오랜시간동안 공기중에 머무를 수 있는 안정된 가스이다.

(6) 플름이 지표면 및 혼합되는 높이에서 완전하게 반사된다.

(7) 누출이 한 지점에서 일어난다.

6. 농도예측순서

6.1 확산계수(ρ_y, ρ_z)산출

<표 1-1>과 <표 1-2>를 사용하여 ρ_y 와 ρ_z을 각각 산출한다.

6.2 유효누출높이 산출

6.2.1 부력플럭스 산출

$$F_B = \frac{g \times v \times d^2 \times \triangle T}{4 T_s} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}4)$$

여기서, F_B : 부력플럭스(m^4/s^3)

v : 누출속도(m/s)

d : 누출원의 지름(m)

$\triangle T$: $(T_s - T_a)$ (K)

T_s : 누출되는 온도의 물질(K)

T_a : 대기온도(K)

6.2.2 대기안정도 변수산출

$S = 0.02\frac{g}{T_a}$, 대기안정도가 E인 경우 $\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$ (1-5)

$S = 0.035\frac{g}{T_a}$, 대기안정도가 F인 경우 $\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$ (1-6)

여기서, S : 대기안정도 변수(s^{-2})

<표 1-1> 확산계수(σ_y)

대기안정도	$\sigma_y(m) = 465.11628 \times \tan\Theta$ $\Theta = 0.017453293\ (c - d \log_e x)$	
	c	d
A	24.1670	2.5334
B	18.3330	1.8096
C	12.5000	1.0857
D	8.3330	0.72382
E	6.2500	0.54287
F	4.1667	0.36191

여기서, x :누출원으로부터의 거리(m)

<표1-2> 확산계수(σ_z)

대기안정도	x(km)	$\sigma_z(m) = ax^b$	
		a	b
A	< 0.10	122.80	0.94470
	0.10 - 0.15	158.080	1.05420
	0.16 - 0.20	170.220	1.09320
	0.21 - 0.25	179.520	1.12620
	0.26 - 0.30	217.410	1.26440
	0.31 - 0.40	258.890	1.40940
	0.41 - 0.50	346.750	1.72830
	0.51 - 3.11	453.850	2.11660
	>3.11	(주1)	(주1)
B	< 0.20	90.673	0.93198
	0.21 -0.40	98.483	0.98332
	>0.40	109.300	1.09710
C	모든경우	61.141	0.91465
D	< 0.30	34.459	0.86974
	0.31 - 1.00	32.093	0.81066
	1.01 - 3.00	32.093	0.64403
	3.01 - 10.00	33.504	0.60486
	10.01 - 30.00	36.650	0.56589
	> 30.00	44.053	0.51179

대기안정도	x(km)	$\sigma_z(m) = ax^b$	
		a	b
E	<0.10	24.260	0.83660
	0.10 - 0.30	23.331	0.81956
	0.31 - 1.00	21.628	0.75660
	1.01 - 2.00	21.628	0.63077
	2.01 - 4.00	22.534	0.57154
	4.01 - 10.00	24.703	0.50527
	10.01 - 20.00	26.970	0.46713
	20.01 - 40.00	35.420	0.37615
	>40.00	47.618	0.29592
F	<0.20	15.209	0.81558
	0.21 - 0.70	14.457	0.78407
	0.71 - 1.00	13.953	0.68465
	1.01 - 2.00	13.953	0.63227
	2.01 - 3.00	14.823	0.54503
	3.01 - 7.00	16.187	0.46490
	7.01 - 15.00	17.836	0.41507
	15.01 - 30.00	22.651	0.32681
	30.01 - 60.00	27.074	0.27436
	>60.00	34.219	0.21716

여기서, x : 누출원으로 부터의 거리

주1) σ_z = 5,000m로 사용

주2) 계산된 σ_z가 5,000m 이상인 경우에는 σ_z = 5,000m로 사용

주3) 대기안정도 적용기준은 31쪽 <붙임 1-1> 참조

6.2.3 세류(Downwash)높이 조정계수($\triangle H_D$) 산출

$$\triangle H_D = 2[\frac{V}{u} - 1.5]d, \quad v < 1.5u \text{ 인 경우} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}7)$$

$$\triangle H_D = 0, \quad v \geq 1.5u \text{ 인 경우} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}8)$$

6.2.4 임계온도차($\triangle T_c$)산출

(1) 대기안정도가 A~D인 경우

$$\triangle T_c = \frac{0.0297 V^{1/3} \times T_s}{d^{2/3}}, \quad F_B < 55\text{인 경우} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}9)$$

$$\triangle T_c = \frac{0.00575 V^{2/3} \times T_s}{d^{1/3}}, \quad F_B \geq 55\text{인 경우} \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}10)$$

(2) 대기안정도가 E ~ F인 경우

$$\triangle T_c = 0.019582 v \times T_a \times \sqrt{S} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}11)$$

6.2.5 부력영향높이 조정계수($\triangle H_B$) 산출

(1) 대기안정도가 A~D인 경우

$$\triangle H_B = \frac{21.425 F_B^{3/4}}{u}, \quad F_B < 55\text{인 경우} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}12)$$

$$\triangle H_B = \frac{38.71 F_B^{3/5}}{u}, \quad F_B \geq 55\text{인 경우} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}13)$$

(2) 대기안정도가 E ~ F인 경우

$$\triangle H_B = 4 F_B^{1/4} \times S^{-3/8}, \quad F_B \geq 175.87\, u^4/S^{1/2}\text{인 경우} \cdots\cdots \quad (1\text{-}14)$$

$$\triangle H_B = 2.6\left[\frac{F_B}{u \times S}\right]^{1/3}, \quad F_B < 175.87\, u^4/S^{1/2}\text{인 경우} \cdots\cdots \quad (1\text{-}15)$$

6.2.6 타성(Momentum)영향높이 조정계수($\triangle H_M$) 산출

(1) 대기안정도가 A~D인 경우

$$\triangle H_M = \frac{3d \times v}{u} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}16)$$

(2) 대기안정도가 E~F인 경우

$$\triangle H_M = 1.5\left[\frac{v^2 \times d^2 \times Ta}{4Ts \times u}\right]^{1/3} / S^{1/6} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}17)$$

6.2.7 유효누출높이(H_E) 산출

$H_E = Hs + \triangle H_D + \triangle H_B$, $\triangle T > \triangle T_c$인 경우 · · · · · · · · · · · (1-18)

$H_E = Hs + \triangle H_D + \triangle H_M$, $\triangle T \leq \triangle T_c$인 경우 · · · · · · · · · · · (1-19)

여기서,

H_E : 유효누출높이(m)

H_S : 실제누출높이(m)

$\triangle H_D$: 세류높이조정계수(m)

$\triangle H_B$: 부력영향높이조정계수(m)

$\triangle H_M$: 타성영향높이조정계수(m)

$\triangle T$: $(T_s - T_a)$(K)

$\triangle T_c$: 임계온도차(K)

T_s : 누출되는 물질의 온도(K)

T_a : 대기온도(K)

6.3 일정지점에서의 농도 산출

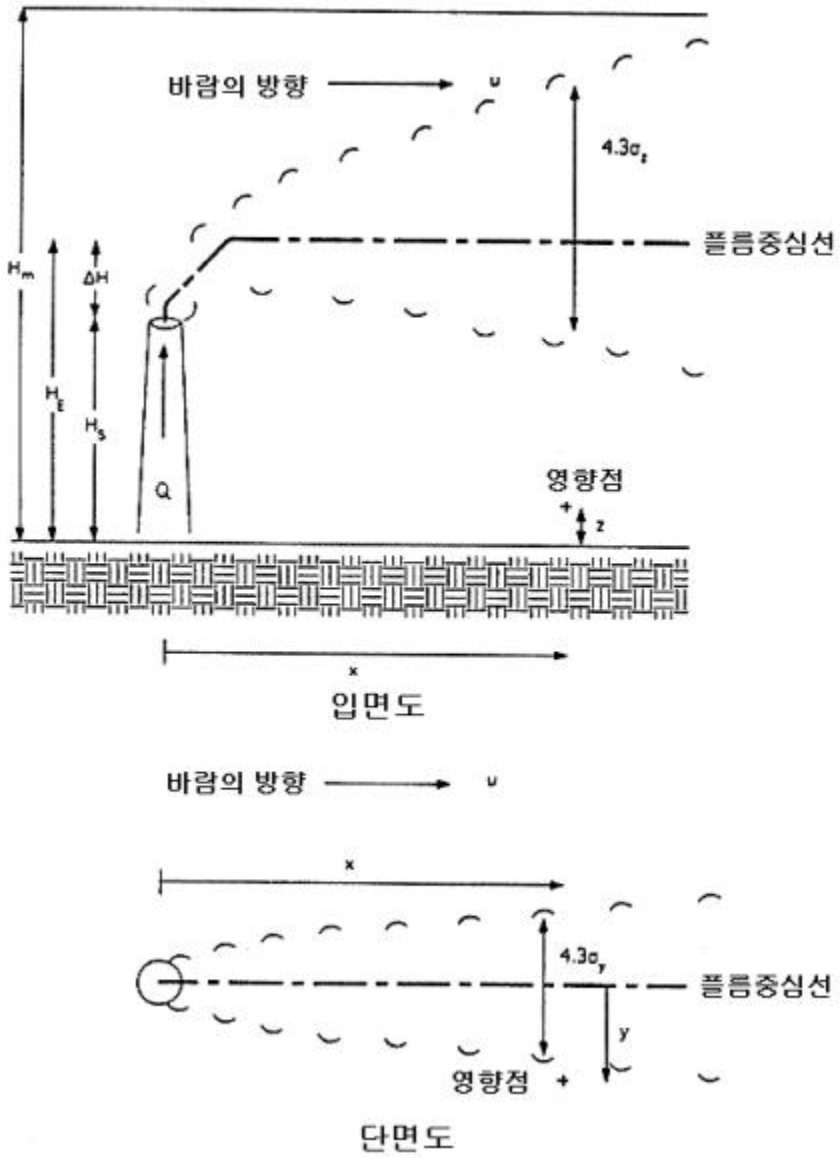
6.3.1 $\sigma_z < 1.6H_m$ 인 경우

$$C(x,y,z,H_E)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp\left[-0.5\left(\frac{H_E-z}{\sigma_z}\right)^2\right]\right.$$
$$+\exp\left[-0.5\left(\frac{H_E+z}{\sigma_z}\right)^2\right]+\sum_{i=1}^{N}\left\{\exp\left[-0.5\left(\frac{2iH_m+H_E-z}{\sigma_z}\right)^2\right]\right.$$
$$+\exp\left[-0.5\left(\frac{2iH_m-H_E-z}{\sigma_z}\right)^2\right]+\exp\left[-0.5\left(\frac{2iH_m-H_E+z}{\sigma_z}\right)^2\right]$$
$$\left.\left.+\exp\left[-0.5\left(\frac{2iH_m+H_E+z}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}20)$$

6.3.2 $\sigma_z \geq 1.6H_m$ 인 경우

$$C(x,y,z.H_E)=\frac{Q}{(2\pi)^{1/2}\sigma_y H_m u}\exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1\text{-}21)$$

여기서, C : 위치(x, y, z)에서의 누출물질의 농도(kg/㎥)
H_E : 유효누출높이(m)
Q : 누출량(kg/s)
σ_y : 측면 확산계수(m)
σ_z : 수직 확산계수(m)
u : 실제 누출높이 H_s에서의 풍속(m/s)
H_m : 혼합높이(m)
N : 혼합높이 반사 숫자(통상 3 또는 4 사용)
x : 누출원으로 부터의 거리(m)(그림 1-1 참조)
y : 플름중심으로 부터의 거리(m)(그림 1-1 참조)
z : 영향점의 지상으로 부터 높이(m)(그림 1-1 참조)



<그림 1 - 1> 가우시안 플름 모델

제 3 장 가우시안 퍼프 (Puff) 모델

7. 적용대상

가우시안 퍼프모델은 가벼운가스의 순간누출에 적용한다.

8. 전제조건

가우시안 퍼프모델의 적용시에는 다음의 전제조건이 있다.

(1) 장해물이 없는 평평한 곳에서 누출이 일어난다.

(2) 화학반응이나 열역학적 영향이 없다.

(3) 누출기간이 일정지역에 도달하는데 걸리는 시간보다 짧다.

(4) 누출된 물질은 오랜시간 동안 대기중에 머무를 수 있는 안정된 가스이다.

(5) 예측농도가 순간누출의 최대농도이다.

(6) 누출이 한 지역에서 일어난다.

9. 농도예측순서

9.1 확산계수산출

<표 1-3>을 이용하여 확산계수를 산출한다.

<표 1-3> 확산계수

확산계수(m)	대기안정도		
	A~C	D	F~E
σ_x, σ_y	$0.14x^{0.92}$	$0.16x^{0.92}$	$0.02x^{0.89}$
σ_z	$0.53x^{0.73}$	$0.15x^{0.70}$	$0.05x^{0.61}$
x : 바람방향에서의 누출원과의 거리			

9.2 유효누출높이 산출

6.2항을 이용하여 산출한다.

9.3 일정지점에서의 농도 산출

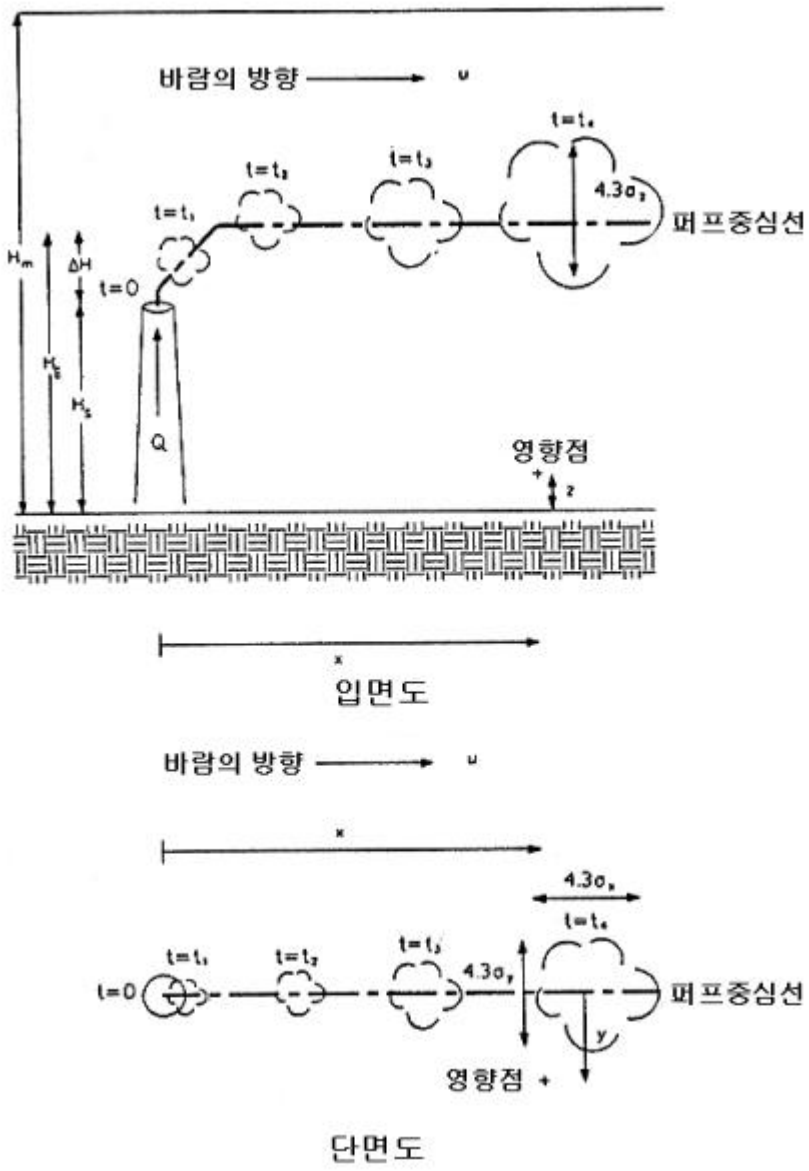
9.3.1 $\sigma_z \leq 0.8H_m$ 인 경우

$$\cdot\ C_P(x,y,z,t,H_E) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\exp\left[-0.5\left(\frac{x-ut}{\sigma_x}\right)^2\right]\exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]$$
$$\times\left\{\exp\left[-0.5\left(\frac{H_E-z}{\sigma_z}\right)^2\right]+\exp\left[-0.5\left(\frac{H_E+z}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\} \cdot\cdot\cdot\cdot \quad (1\text{-}22)$$

9.3.2 $\sigma_z > 0.8H_m$ 인 경우

$$C_P(x,y,z,t,H_E) = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y H_m}\exp\left[-0.5\left(\frac{x-ut}{\sigma_x}\right)^2\right]\exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot\cdot\cdot \quad (1\text{-}23)$$

여기서, C_P : 위치(x, y, z) 및 시간(t)에서의 누출물질의 최고순간 농도(kg/m³)
H_E : 유효누출높이(m)
Q : 누출량(kg)
σ_x : 바람방향의 확산계수(m)
σ_y : 측면확산계수(m)
σ_z : 수직 확산계수(m)
u : 실제 누출높이에서의 풍속(m/s)
H_m : 혼합높이(m)
t : 누출 순간으로 부터의 측정 시간(s)
x : 누출원으로 부터의 거리(m)(그림 1-2 참조)
y : 플름중심으로 부터의 거리(m)(그림 1-2 참조)
z : 영향점의 지상으로 부터 높이(m)(그림 1-2 참조)



<그림 1 - 2> 가우시안 퍼프 모델

<붙임 1 - 1>

대기안정도

바람속도, S (m/s)	낮			밤	
	복사강도의 크기				
	강	중	약	흐림	맑음
S≤2	A	A-B	B	F-G	G
2<S≤3	A-B	B	C	E	F
3<S≤5	B	B-C	C	D	E
5<S≤6	C	C-D	D	D	D
6<S	C	D	D	D	D

주) 1. “바람속도”는 지상 10m에서 측정한 수치임
2. “밤”이라 함은 해지기 1시간 전부터 해뜬후 1시간 사이를 말함
3. “강”이라 함은 맑은 날씨에서 태양의 고도가 60°이상을 말함
4. “중”이라 함은 맑은 날씨에서 태양의 고도가 60°미만 35°이상을 말함
5. “약”이라 함은 맑은 날씨에서 태양의 고도가 35°미만을 말함
6. 안전도 구분
A : 매우 불안정함
B : 약간 불안정함
C : 약간 불안정함
D : 중간
E : 약간 안정함
F : 안정함
G : 매우 안정함

<부록 2>

확산피해예측 절차(무거운 가스)

제 1 장 일반사항

1. 적용범위

위험물질 중 무거운 가스가 화학설비 및 그 부속설비에서 누출되어 대기중으로 확산되는 경우에 적용한다.

2. 피해요인

누출된 인화성액체 또는 인화성가스가 누출 즉시 점화되지 않는다면 증기운을 형성하여 먼 거리까지 확산된다. 이 증기운은 확산 되면서 공기와 희석되고 결과적으로 폭발 하한계에 도달하여 더 이상 화재의 위험이 없게 된다. 그러나 독성물질인 경우에는 독성물질이 바람에 의해 상당히 먼 거리까지 확산되어 그 농도가 낮다 할지라도 근로자 및 주민에게 심각한 영향을 미칠 수 있다.

제 2 장 HMP 모델

3. 전제조건

HMP모델을 사용할 때는 다음의 전제조건이 따른다.

(1) 연속 수직방향으로 직접누출되는 무거운 가스의 연속누출 플름에 적용한다.

(2) 플름은 단상(Single phase)의 가스로 가정한다.

(3) 장애물이 없는 평평한 지역에서의 확산으로 가정한다.

(4) 대기안정도가 E~F인 경우에 적용한다

(5) 액면(Liquid pool)에서의 증발시에는 적용하지 아니한다.

4. 농도예측순서

4.1 리차드슨 수 산출

$$Ri_o = \frac{g(\rho_r - \rho_a) \times V_V}{\rho_a \times u_{10}^3 \times d} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}1)$$

여기서, Ri_o : 리차드슨 수

g : 중력가속도 ($9.8 m/s^2$)

ρ_r : 누출되는 물질의 비중(kg/m^3)

ρ_a : 공기의 비중(kg/m^3)

u_{10} : 지상으로부터 10m 높이에서의 바람속도(m/s)

V_V : 체적 누출속도(m^3/s)

d : 누출원의 지름(m)

4.2 플름상승높이(Plume rise) 산출

$$\triangle h = 2.96 \times \frac{v \times d}{\sqrt{g \times d\left(\frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r}\right)}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}2)$$

여기서, $\triangle h$: 플름상승높이(m)

v : 누출속도(m/s)

4.3 플름희석계수 산출

$$D_H = 0.0567 \left[\frac{u \times d^2}{V_V \times \rho_r}\right]\left[\frac{\triangle h}{d}\right]^{1.85}\left[\frac{M_s}{T_a}\right] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}3)$$

여기서, D_H : 플름희석계수

M_s : 누출되는 물질의 분자량

T_a : 대기온도 (K)

u : 누출높이에서의 바람속도(m)

4.4 최대상승높이에서의 상당분자량 및 온도 산출

$$M_H = \frac{M_s + 28.96(D_H - 1)}{D_H} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}4)$$

$$T_H = T_a - \frac{M_s(T_a - T_s)}{M_H \times D_H} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}5)$$

여기서, M_H : 상당분자량
T_H : 최대상승높이에서의 온도(K)
T_S : 누출물질의 온도(K)

4.5 분류비중비율(Fractional density ratio) 산출

$$\delta = \frac{M_H \times T_a}{28.96\, T_H} - 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}6)$$

여기서, δ : 분류비중비율

4.6 무거운 가스 여부 확인

4.6.1 4.5항에서 계산한 분류비중비율(δ)이 0.005이하이면 가벼운 가스 모델을 사용한다.

4.6.2 분류비중비율이 0.005를 초과하는 경우 무거운 가스 모델 즉 HMP모델을 사용한다.

4.7 플름이 최대로 상승하는 지점까지의 거리 산출

$$Xm = d\left\{\frac{v}{\left[g \times d \times \left(\frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r}\right)\right]^{\frac{1}{2}}}\right\}^2 \times \frac{u}{v} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2\text{-}7)$$

여기서, X_m : 플름이 최대로 상승하는 지점까지의 거리
g : 중력가속도(9.8m/s^2)

4.8 플름이 최대로 상승하는 지점에서의 농도 산출

$$C_{mp}=2.15\left[\frac{V_v\times\rho_r}{ud^2}\right]\times\left[\frac{\triangle h}{d}\right]^{-1.85} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}8)$$

여기서, C_{mp} : 플름이 최대로 상승하는 지점에서의 농도(kg/m³)

4.9 플름이 지상에 도달한 지점의 거리 산출

$$X_{TD}=X_m+0.56d\times\frac{u}{\left(g\times d\times\frac{\rho_r-\rho_a}{\rho_a}\right)^{1/2}}\times\left(\frac{u}{v}\right)^{1/2}\times\left\{\left(\frac{\triangle h}{d}\right)^3\left[\left(2+\frac{H_s}{\triangle h}\right)^3-1\right]\right\}^{1/2}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}9)$$

여기서, X_{TD} : 플름이 지상에 도달한 지점의 거리(m)

H_s : 누출원의 높이(m)

4.10 플름이 지상에 도달한 지점에서의 농도 산출

$$C_{TD}=3.1\times\frac{V_v\times\rho_r}{u\times d^2}\times\left(\frac{H_s+2\triangle h}{d}\right)^{-1.95} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}10)$$

여기서, C_{TD} : 플름이 지상에 도달한 지점에서의 농도(kg/m³)

4.11 일정지점에서의 농도산출

$$C=C_{TD}\times\left(\frac{X}{X_{TD}}\right)^{-0.65} \quad , X\le X_c\text{인경우} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}11)$$

$$C=C_{TD}\times\left(\frac{X_c}{X_{TD}}\right)^{-0.65}\times\left(\frac{X}{X_c}\right)^{-1.7} , X>X_c\text{인경우} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}12)$$

여기서 C : 일정지점에서의 농도(kg/m³)

X : 일정지점까지의 거리(m)

X_c : $X_{TD}\times\left(\frac{5000ppm}{C_{TD}(ppm)}\right)^{-1.538}$

$C_{TD}(ppm)$: $\frac{C_{TD}(\text{kg/m}^3)}{M_s}\times 22.4\times\frac{T_a}{273}\times 10^6$

(주) X_c가 X_{TD}보다 작은 경우에는 $X_c=X_{TD}$를 사용한다.

제 3 장 BM모델

5. 전제조건

BM모델을 사용할 때에는 다음의 전제조건이 따른다.

(1) 모멘트(Momentum)을 무시할 수 있는 연속누출 및 순간누출시의 지상에서의 농도 계산시에 적용한다.

(2) 장애물이 없는 평평한 지형에서 확산되는 것으로 가정한다.

(3) 대기안정도가 C 또는 D인 경우에 사용한다.

(4) 연속누출농도는 3분에서 10분까지의 평균농도로 산출한다.

(5) 순간누출인 경우에는 최초의 지름과 높이의 비를 1로 가정한다.

(6) 플름에서 화학반응이 일어나지 않는다.

(7) 열역학적인 영향을 고려하지 않는다.

6. 누출원 구분

6.1 연속누출과 순간누출의 구분

6.1.1 $u_{10} \times t_d / X \geq 2.5$ 인 경우는 연속누출로 간주한다.

여기서, u_{10} : 10m 높이에서의 바람속도 (m/s)
t_d : 누출시간(s)
X : 누출원으로부터의 거리

6.1.2 $u_{10} \times t_d / X \leq 0.6$ 인 경우는 순간누출로 간주한다.

6.1.3 $0.6 < u_{10} \times t_d / X < 2.5$ 인 경우에는 연속누출과 순간누출로 간주하여 모두 계산한후 농도가 작은 것을 사용한다.

6.2 무거운 가스 여부 확인

6.2.1 연속누출인 경우

(1) 다음 경우에 무거운 가스 누출로 간주한다.

$$\left[\frac{g'_o \times V_v}{u_{10}^3 \times d_c}\right]^{1/3} \geq 0.15 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}13)$$

여기서, g'_o : 초기부력계수, $g(\frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_a})(m/s^2)$

V_v : 체적 누출속도(㎥/s)

d_c : 연속누출의 특성치, $\sqrt{V_v/u_{10}}(m)$

(2) 전항의 경우 이외에는 가벼운 가스 누출로 간주한다.

6.2.2 순간누출인 경우

(1) 다음의 경우에 무거운 가스 누출로 간주한다.

$$\left[\frac{g'_o \times V_o}{u_{10} \times d_i}\right]^{\frac{1}{2}} \geq 0.20 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}14)$$

여기서, V_o : 초기 증기운 부피(㎥)

d_i : 순간누출의 특성치, $\sqrt[3]{V_o}$ (m)

(2) 전항의 경우 이외에는 가벼운 가스 누출로 간주한다.

7. 농도예측

7.1 연속누출인 경우

7.1.1 <그림 2-1>을 사용하여 농도를 계산한다.

7.1.2 <표 2-1>는 <그림 2-1>의 상관관계식을 보여준다.

7.1.3 x가 0에 가까울 때($x \leq 30d_c$) C_m/C_0가 1이 되게 하기 위해서 내삽을 포함한 해석적인

식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{C_m}{C_0} = \frac{306(x/d_c)^{-2}}{1+306(x/d_c)^{-2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}15)$$

7.2 순간 누출인 경우

7.2.1 <그림 2-2>를 사용하여 농도를 계산한다.

7.2.2 <표 2-2>는 <그림 2-2>의 상관관계식을 보여준다.

7.2.3 연속누출과 마찬가지로 x가 0에 가까울 때($x \leq 3d_i$) 사용할 수 있도록 해석적인 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{C_m}{C_0} = \frac{3.24(x/d_i)^{-2}}{1+3.24(x/d_i)^{-2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}16)$$

여기서, V_o : 초기 증기운 부피(㎥)

V_v : 체적 누출속도(㎥/s)

u_{10} : 10m 높이에서 측정한 풍속(m/s)

t_d : 누출시간(s)

ρ_r : 플름/퍼프의 초기밀도(kg/㎥)

ρ_a : 대기온도에서의 공기의 밀도(kg/㎥)

g : 중력가속도(9.8m/s^2)

g'_o : 초기부력계수, $g(\frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_a})$(m/s^2)

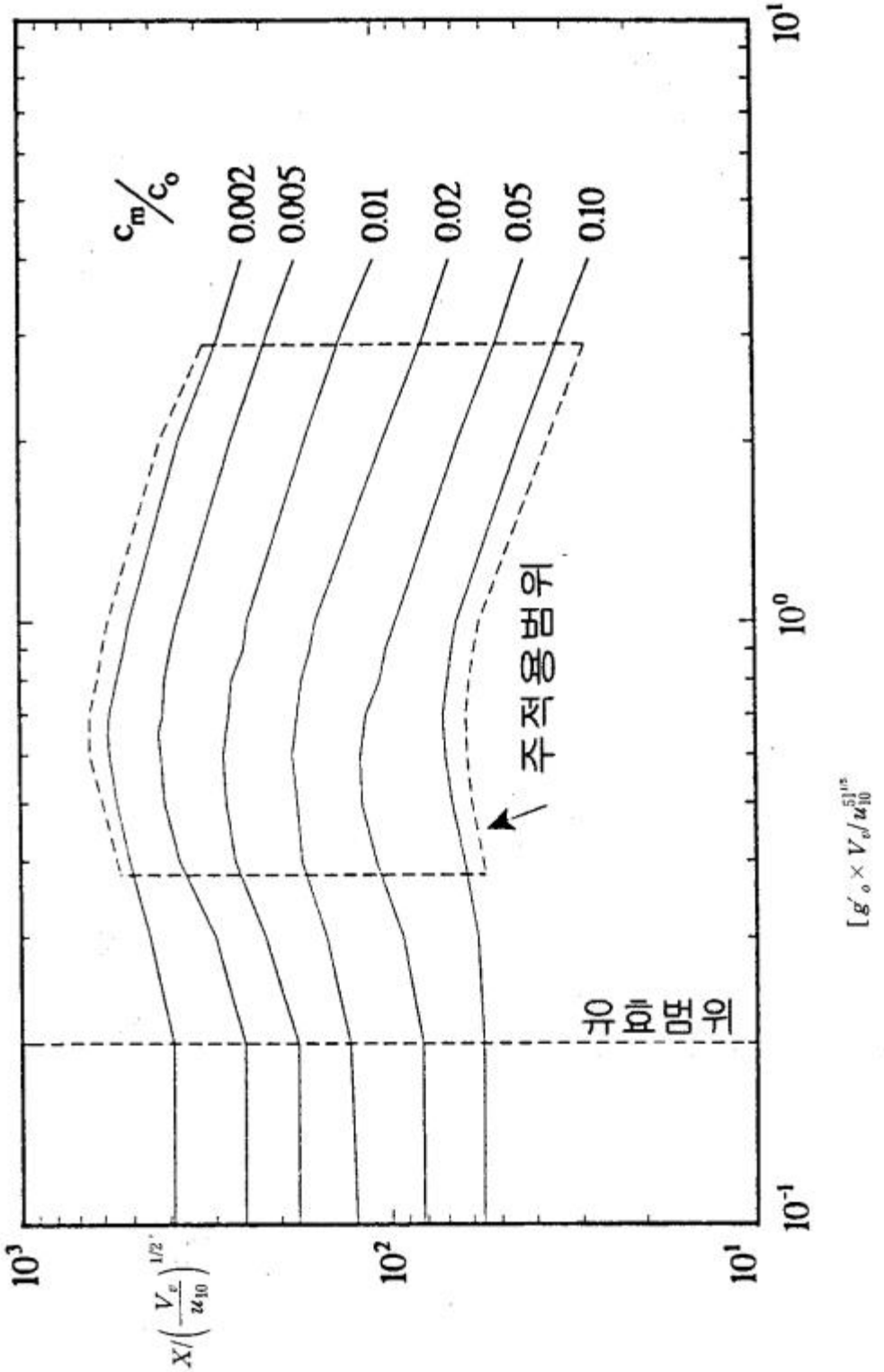
d_i : 순간누출의 특성치, $V_o^{1/3}$(m)

d_c : 연속누출의 특성치, $(V_v/u_{10})^{\frac{1}{2}}$(m)

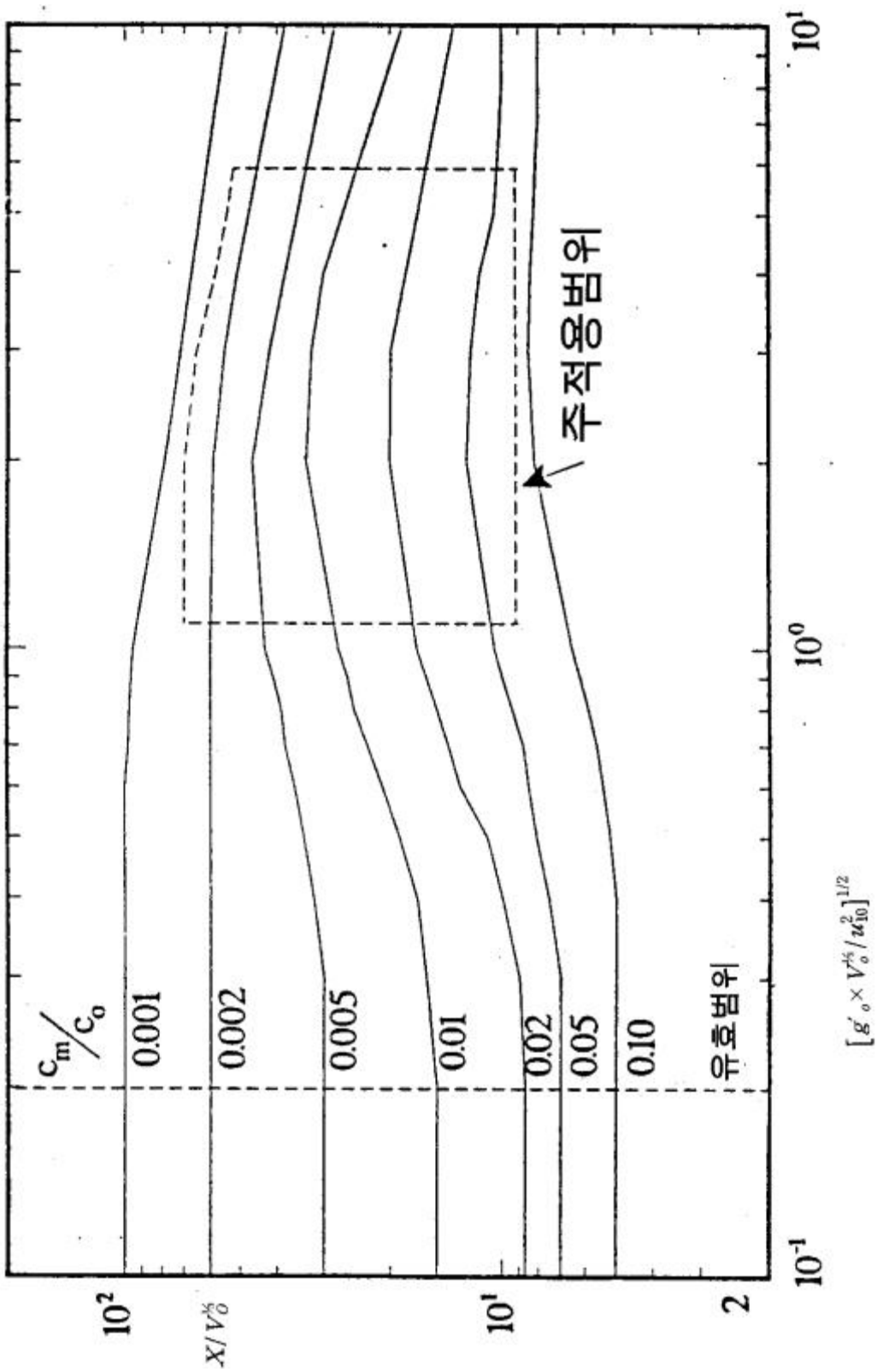
X : 이동거리(m)

C_o : 초기농도(vol%)

C_m : 지면, 중심농도(vol%)



<그림 2-1> BM 모델 연속누출 곡선



<그림 2-2> BM 모델 순간누출 곡선

<표 2-1> 그림 2-1을 추정하는 관계식

Concentration ration C_m/C_0	Valid range for $\alpha = \log_{10}\left(\frac{g_0^2 V_v}{u_{10}^5}\right)$	Equation for $\beta = \log_{10}\left(\frac{x}{(V_v/u_{10})^{1/2}}\right)$
0.1	$\alpha \leq -0.55$	$\beta = 1.75$
0.1	$-0.55 < \alpha \leq -0.14$	$\beta = 0.24\alpha + 1.88$
0.1	$-0.14 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.50\alpha + 1.78$
0.05	$\alpha \leq -0.68$	$\beta = 1.92$
0.05	$-0.68 < \alpha \leq -0.29$	$\beta = 0.36\alpha + 2.16$
0.05	$-0.29 < \alpha \leq -0.18$	$\beta = 2.06$
0.05	$-0.18 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.56\alpha + 1.96$
0.02	$\alpha \leq -0.69$	$\beta = 2.08$
0.02	$-0.69 < \alpha \leq -0.31$	$\beta = 0.45\alpha + 2.39$
0.02	$-0.31 < \alpha \leq -0.16$	$\beta = 2.25$
0.02	$-0.16 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.54\alpha + 2.16$
0.01	$\alpha \leq -0.70$	$\beta = 2.25$
0.01	$-0.70 < \alpha \leq -0.29$	$\beta = 0.49\alpha + 2.59$
0.01	$-0.29 < \alpha \leq -0.20$	$\beta = 2.45$
0.01	$-0.20 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.52\alpha + 2.35$
0.005	$\alpha \leq -0.67$	$\beta = 2.40$
0.005	$-0.67 < \alpha \leq -0.28$	$\beta = 0.59\alpha + 2.80$
0.005	$-0.28 < \alpha \leq -0.15$	$\beta = 2.63$
0.005	$-0.15 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.49\alpha + 2.56$
0.002	$\alpha \leq -0.69$	$\beta = 2.60$
0.002	$-0.69 < \alpha \leq -0.25$	$\beta = 0.39\alpha + 2.87$
0.002	$-0.25 < \alpha \leq -0.13$	$\beta = 2.77$
0.002	$-0.13 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.50\alpha + 2.71$

<표 2-2> 그림 2-2를 추정하는 관계식

Concentration ration Cm/C0	Valid range for $\alpha = \log_{10}\left(\frac{g_0 V_0^{1/3}}{u^2}\right)$	Equation for $\beta = \log_{10}\left(\frac{x}{V_0^{1/3}}\right)$
0.1	$\alpha \leq -0.44$	$\beta = 0.70$
0.1	$-0.44 < \alpha \leq 0.43$	$\beta = 0.26\alpha + 0.81$
0.1	$0.43 < \alpha \leq 1$	$\beta = 0.93$
0.05	$\alpha \leq -0.56$	$\beta = 0.85$
0.05	$-0.56 < \alpha \leq 0.31$	$\beta = 0.26\alpha + 1.0$
0.05	$0.31 < \alpha \leq 1.0$	$\beta = -0.12\alpha + 1.12$
0.05		
0.02	$\alpha \leq -0.66$	$\beta = 0.95$
0.02	$-0.66 < \alpha \leq 0.32$	$\beta = 0.36\alpha + 1.19$
0.02	$0.32 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.26\alpha + 1.38$
0.02		
0.01	$\alpha \leq -0.71$	$\beta = 1.15$
0.01	$-0.71 < \alpha \leq 0.37$	$\beta = 0.34\alpha + 1.39$
0.01	$0.37 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.38\alpha + 1.66$
0.01		
0.005	$\alpha \leq -0.52$	$\beta = 1.48$
0.005	$-0.52 < \alpha \leq 0.24$	$\beta = 0.26\alpha + 1.62$
0.005	$0.24 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.30\alpha + 1.75$
0.005		
0.002	$\alpha \leq 0.27$	$\beta = 1.83$
0.002	$0.27 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.32\alpha + 1.92$
0.002	$\alpha \leq -0.10$	$\beta = 2.075$
0.002	$-0.10 < \alpha \leq 1$	$\beta = -0.27\alpha + 2.05$

<부록 3>

TNO 액면화재모델 피해예측 절차

1. 적용범위

저장탱크 또는 배관에서 인화성 물질이 누출되어 그 물질이 액면을 형성하여 화재를 일으키는 경우에 적용한다.

2. 피해요인

액면화재(Pool fire)는 화재시의 복사열에 의하여 피해를 입게 된다.

3. 전제조건

TNO 액면화재모델의 적용시에는 다음의 전제조건이 있다.

(1) 지상에서의 액표면 화재에 적용한다.

(2) 산소가 충분히 공급되는 것으로 가정한다.

(3) 액표면적이 일정한 것으로 가정한다.

(4) 완전연소로 가정한다.

(5) 연소시 생성되는 이산화탄소 및 검댕에 의한 투과도에 영향을 미치지 않는 것으로 가정한다.

4. 피해예측순서

4.1 연소속도 산출

연소속도라 함은 액표면에서의 단위면적당 증발량을 말하며 다음의 식 또는 <표 3-1>에서 구한다.

4.1.1 액체의 비점이 대기온도보다 높은 경우

$$m = \frac{0.001 H_c}{C_p(T_b - T_a) + \triangle H_v} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3\text{-}1)$$

4.1.2 액체의 비점이 대기온도보다 낮은 경우

$$m = \frac{0.001 H_c}{\triangle H_v} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3\text{-}2)$$

여기서, m : 연소속도(kg/㎡ · s)
H_c : 순연소열량(J/kg)
$\triangle H_v$: 증발잠열(J/kg)
C_p : 비열(J/kg · K)
T_a : 대기온도(K)
T_b : 비점(K)

<표 3-1> 연소속도

물 질		연소속도
저온유체	액체수소	0.017
	LNG(CH_4)	0.078
	LPG(C_3H_8)	0.099
알코올류	메탄올	0.017
	에탄올	0.015
유기연료	부탄	0.078
	벤젠	0.085
	헥산	0.074
	헵탄	0.101
	자일렌	0.090
	아세톤	0.041
	디옥산	0.018
	디에틸에테르	0.085
석유제품	휘발유	0.055
	등유	0.039
	항공유(JP - 4)	0.051
	항공유(JP - 5)	0.054
	변압기유	0.039
	중유	0.035
	원유	0.022 - 0.045

4.2 불꽃의 길이 산출

4.2.1 불꽃이 기울어진 경우

$$L_f = 110R\left[\frac{m}{\rho_a\sqrt{2\times g\times R}}\right]^{0.67}\times U^{-0.21} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3\text{-}3)$$

여기서, L_f : 불꽃의 길이

m : 연소속도(kg/㎡ · s)

R : 액표면의 반지름(m)

ρ_v : 정상 비점에서의 액면증기의 밀도(kg/㎥)

ρ_a : 대기온도에서의 공기의 밀도(kg/㎥)

g : 중력가속도(9.8m/s^2)

u : 1.6m 높이에서의 바람속도(m/s)

U : $\dfrac{u}{\left[\dfrac{2g\times m\times R}{\rho_v}\right]^{1/3}}$, $u \geq \left[\dfrac{2g\times m\times R}{\rho_v}\right]^{1/3}$ 인 경우

1 , $u < \left[\dfrac{2g\times m\times R}{\rho_v}\right]^{1/3}$ 인 경우

4.2.2 불꽃이 수직인 경우

$$L_f = 84R\left[\frac{m}{\rho_a\sqrt{2g\times R}}\right]^{0.61} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3\text{-}4)$$

여기서, L_f : 불꽃의 길이

R : 액표면의 반지름(m)

m : 연소속도(kg/㎡ · s)

ρ_a : 대기온도에서의 공기의 밀도(kg/㎥)

g : 중력가속도(9.8m/s^2)

4.3 불꽃의 기울기 산출

$\cos\Theta = 1$, U ≤ 1 인 경우

$\cos\Theta = \frac{1}{\sqrt{U}}$, U > 1 인 경우

여기서, U : $\frac{u}{\left[\frac{2g \times m \times R}{\rho_V}\right]^{1/3}}$

4.4 표면방출 플럭스량(Surface emitted flux) 산출

$$E = \frac{\beta \times m \times H_c \times S}{2\pi R \times L_f + S} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3\text{-}5)$$

여기서, E : 표면방출 플럭스량(W/㎡)
β : 전체복사열의 비율(<표 3-2>참조)
H_c : 연소열(J/kg)
S : 액표면적(㎡)
R : 액표면의 반지름(m)
L_f : 불꽃의 길이(m)

<표 3-2> 전체복사열의 비율

물질명	액표면의 지름(mm/in)	β
메탄올(Methanol)	80/3 150/6 1200/48	0.162 0.165 0.170
액화천연가스(LNG)	1500/60 3000/120 6000/240	0.15-0.24 0.24-0.34 0.20-0.27
부탄(Butane)	300/12 450/18 750/30	0.199 0.205 0.269
휘발유(Gasoline)	1200/48 1500/60 3000/120	0.30-0.40 0.16-0.27 0.13-0.14
벤젠(Benzene)	80/3 450/18 750/30 1200/48	0.35 0.345 0.35 0.36

주) 일반 탄화수소의 경우에는 0.35로 한다.

4.5 지형시계인자(Geometric view factor) 산출

4.5.1 수직지형시계인자 (F_v)

(1) 불꽃이 수직인 경우

$$F_v = \frac{1}{\pi Y}\tan^{-1}\left[\frac{X}{\sqrt{Y^2-1}}\right] + \frac{X}{\pi}\left[\frac{A-2Y}{Y\sqrt{A\times B}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{(Y-1)A}{(Y+1)B}} - \frac{1}{Y}\tan^{-1}\sqrt{\frac{Y-1}{Y+1}}\right] \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3\text{-}6)$$

여기서, X : 불꽃의 길이와 불꽃의 반지름의 비(무차원)
Y : 불꽃으로부터의 떨어진 거리와 불꽃의 반지름의 비(무차원)
A : $(1+Y)^2 + X^2$
B : $(1-Y)^2 + X^2$

(2) 불꽃이 기울어진 경우

$$F_V = \frac{X\cos\Theta}{Y-X\sin\Theta}\times\frac{A-2Y(1+X\sin\Theta)}{\pi\sqrt{A'\times B'}}\times\tan^{-1}\sqrt{\frac{A'(Y-1)}{B'(Y+1)}} + \frac{\cos\Theta}{\pi\sqrt{C'}}\left\{\tan^{-1}\left[\frac{XY-(Y^2-1)\sin\Theta}{\sqrt{(Y^2-1)\times C'}}\right] + \tan^{-1}\left[\frac{\sin\Theta\times\sqrt{Y^2-1}}{\sqrt{C'}}\right] - \frac{X\cos\Theta}{\pi(Y-X\sin\Theta)}\times\tan^{-1}\sqrt{\frac{Y-1}{Y+1}}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3\text{-}7)$$

여기서, A' : $A-2X(Y+1)\sin\Theta$
B' : $B-2X(Y-1)\sin\Theta$
C' : $1+(Y^2-1)\cos^2\Theta$

4.5.2 수평지형시계인자(F_h)

(1) 불꽃이 수직인 경우

$$F_h = \frac{1}{\pi}\left[\tan^{-1}\sqrt{\frac{Y+1}{Y-1}} - \frac{X^2(Y+1)(Y-1)}{\sqrt{A\times B}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{A(Y-1)}{B(Y+1)}}\right] \cdots (3\text{-}8)$$

(2) 불꽃이 기울어진 경우

$$F_h = \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\sqrt{\frac{Y+1}{Y-1}} - \frac{A-2(Y+1+XY\sin\Theta)}{\pi\sqrt{A'\times B'}}\tan^{-1}\sqrt{\frac{A'(Y-1)}{B'(Y+1)}} + \frac{\sin\Theta}{\pi\sqrt{C'}}\left\{\tan^{-1}\left[\frac{XY-(Y^2-1)\sin\Theta}{\sqrt{(Y^2-1)\times C'}}\right] + \tan^{-1}\left[\frac{\sin\Theta\times\sqrt{Y^2-1}}{C'}\right]\right\} \cdots\cdots (3\text{-}9)$$

4.5.3 최대 지형시계인자(F) 산출

$$F=\sqrt{F_v^2+F_h^2} \cdots\cdots (3\text{-}10)$$

4.6 투과도(Transmissivity) 산출

$$\tau = 2.02\ [\ P_{pw} \times \ell\ ]^{-0.09} \cdots\cdots (3\text{-}11)$$

여기서, τ: 투과도(무차원)

P_{pw} : $R_H \times P_W$

ℓ : 불꽃으로부터 떨어진 거리(m)

R_H : 상대습도

P_W : 물의 증기압(N/㎡, <표 3-3> 참조)

<표 3-3> 물의 증기압

온도℃	P_w(N/㎡)	온도℃	P_w(N/㎡)	온도℃	P_w(N/㎡)
0	610	18	2060	30	4240
2	705	19	2200	31	4490
4	815	20	2340	32	4760
6	935	21	2490	33	5030
8	1070	22	2640	34	5320
10	1230	23	2810	35	5620
11	1310	24	2980	36	5940
12	1400	25	3170	37	6280
14	1600	26	3360	38	6630
15	1700	27	3570	39	6990
16	1820	28	3780	40	7380
17	1940	29	4000	41	7780

4.7 복사열량 산출

$$Q = \tau \times F \times E \cdots\cdots\cdots\

<부록 4>

API 고압분출화재모델 피해예측절차

1. 적용범위

압축가스 및 액화가스가 저장탱크 또는 배관의 일정한 구멍을 통하여 고압으로 분출되면서 화재를 일으키는 경우에 적용한다.

2. 피해요인

저장탱크 또는 배관의 일정한 구멍을 통하여 고압으로 분출되어 화재를 일으키는 경우 화재에 의한 복사열에 의하여 피해를 입게된다.

3. 전제조건

API 고압분출화재모델의 적용시에는 다음의 전제조건이 있다.

(1) 분출속도가 일정하다.

(2) 수직으로 누출이 일어난다.

(3) 완전연소가 일어난다.

(4) 생성된 이산화탄소 및 검댕에 의하여 투과도에 영향을 주지 않는다.

(5) 고압분출화재에 의하여 모든 열이 방출된다.

4. 피해예측순서

4.1 총 방사열량 산출

$$Q_t = W \times H_c \cdots\cdots\cdots\

W : 분출속도(kg/s)

H_c : 연소열량(kJ/kg)

4.2 투과도 산출

<부록 3>의 4.6항을 이용하여 투과도를 산출한다.

4.3 복사열비율 산출

복사열비율(β)는 다음의 수치를 이용한다.

(1) 수소인 경우 : β = 0.15

(2) 메탄인 경우 : β = 0.2

(3) 기타 탄화수소인 경우 : β = 0.3

4.4 불꽃의 중심점 산출

4.4.1 분출음속(Sonic velocity) 산출

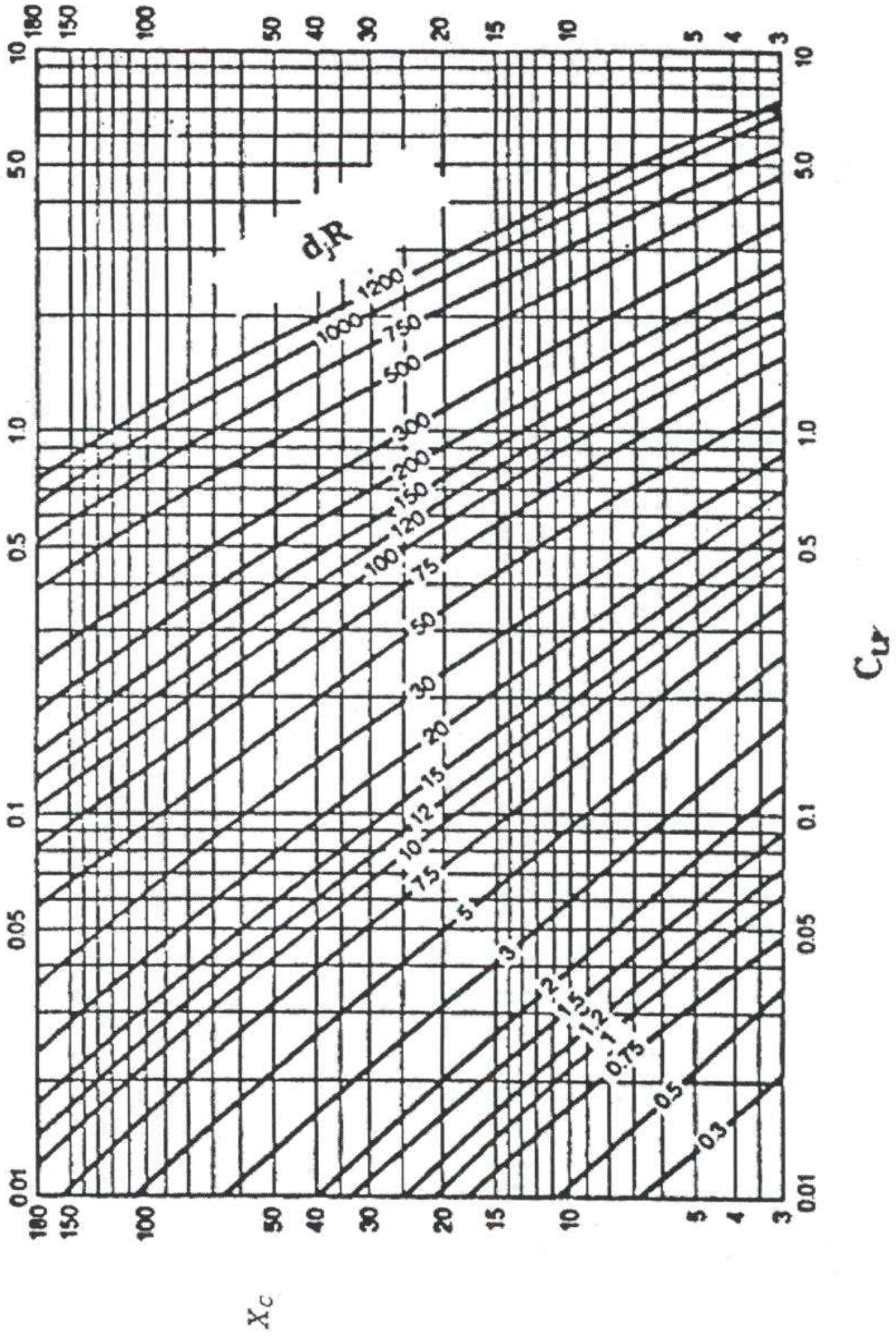
$$v_s = 91.2\sqrt{\frac{\gamma T_s}{M_s}} \quad \cdots\cdots\cdots\

4.4.3 분출속도(Exit velocity)산출

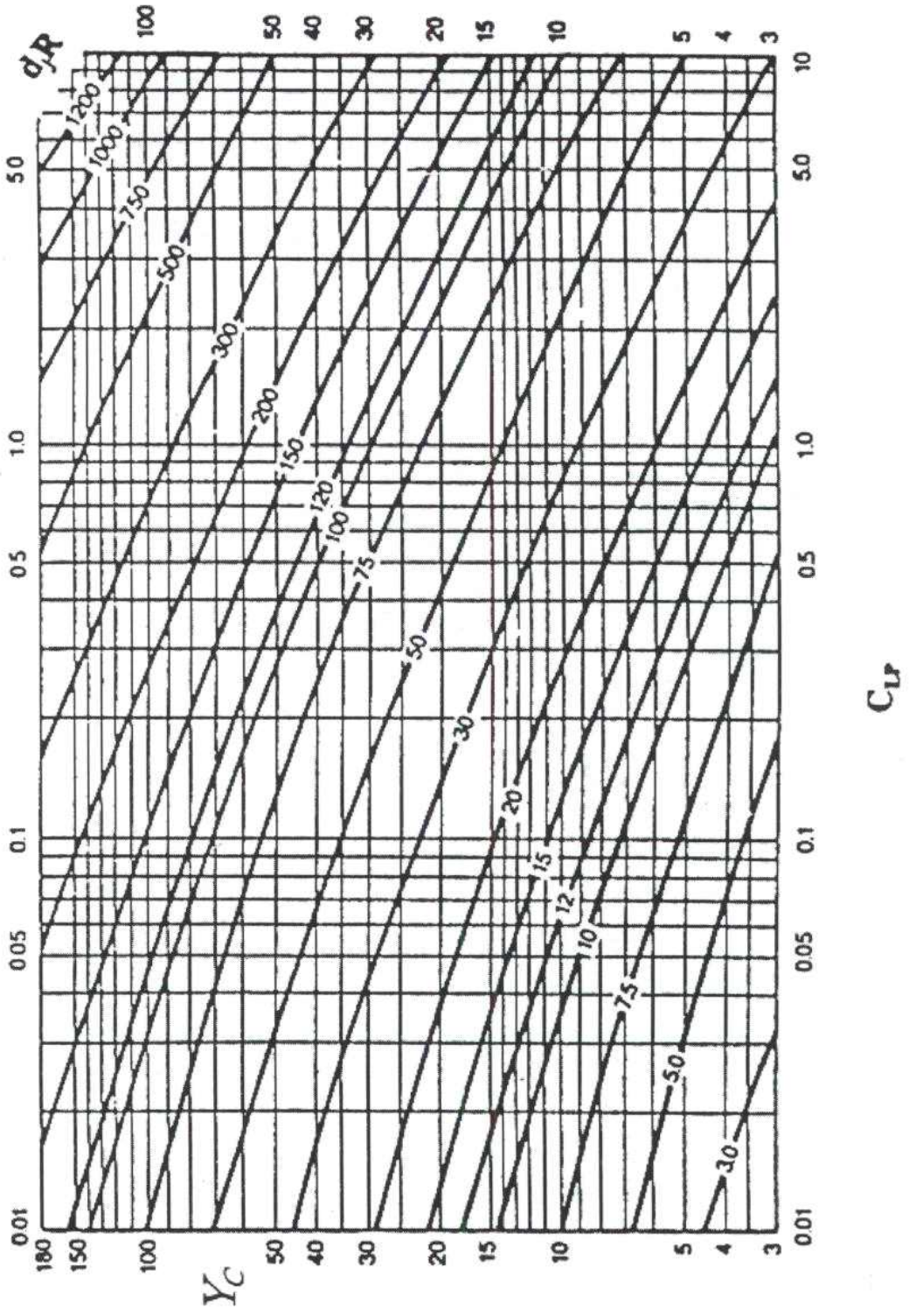
$$v = v_s \times M_a \quad \cdots\cdots\cdots\

4.6 일정거리에서의 복사열량 산출

$$Q = \frac{\tau \times \beta \times Q_t}{4\pi D^2} \cdots\cdots\cdots\



<그림 4-1> 불꽃중심으로 부터의 수평거리



<그림 4-2> 불꽃중심으로 부터의 수직거리

<부록 5>

비등액체 팽창 폭발/화구 피해예측 절차

1. 적용범위

액화가스 또는 과열 액체를 저장·취급하고 있는 용기 또는 배관이 갑자기 파손되어 외부로 내용물이 누출되는 경우에 적용한다.

2. 피해요인

액화가스 또는 과열 액체의 누출사고에 의한 비등액체 팽창 폭발이 일어나면 폭발압에 의한 피해를 입는다. 그러나 저장·취급하는 물질이 가연성인 경우에는 폭발과 동시에 화재가 발생하고 생성된 화구에 의하여 강한 복사열이 발생하여 폭발압과 복사열에 의한 피해를 동시에 입는다. 그러나 피해의 크기에 있어서 폭발압에 의한 피해보다는 복사열에 의한 피해가 훨씬 심각하다.

3. 피해예측 순서

3.1 복사열에 의한 피해

3.1.1 화구의 크기 산출

$$D = 5.8 \times M^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5\text{-}1)$$

여기서, D : 화구의 지름(m)

M : 용기 또는 배관 파열시 그 내부에 저장·취급중인 물질의 양(kg)

3.1.2 화염의 지속시간 산출

(1) 누출된 물질의 양(M)이 30,000kg미만인 경우

$$t = 0.45 \times M^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5\text{-}2)$$

여기서, t : 화염지속시간(초)

(2) 누출된 물질의 양이 30,000kg이상인 경우

$$t = 2.6 \times M^{1/6} \quad \cdots\cdots\cdots\

3.1.6 시계인자(View factor) 산출

(1) $L \geq D/2$ 인 경우

$$F_V = \frac{L \times (D/2)^2}{(L^2 + H^2)^{3/2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5\text{-}8)$$

여기서, F_V : 시계인자(무차원)

(2) $L < D/2$ 인 경우

$$F_V = \frac{H \times (D/2)^2}{(L^2 + H^2)^{3/2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5\text{-}9)$$

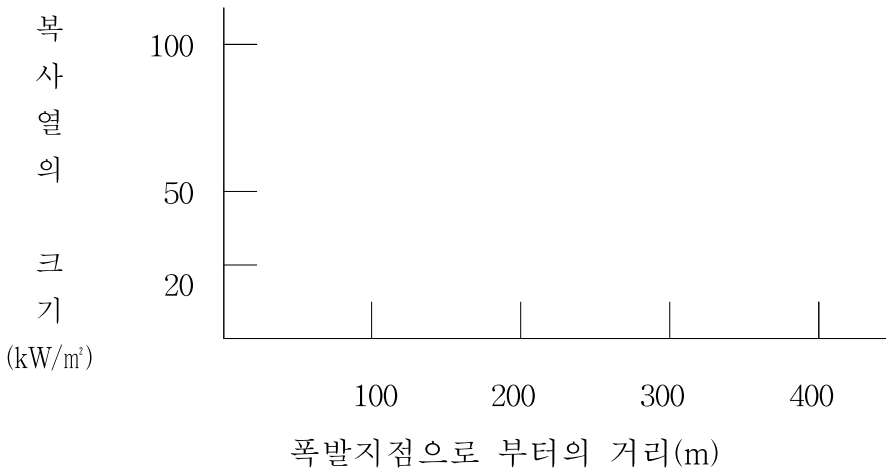
3.1.7 복사열 산출

$$Q = \tau_a \times E \times F_V \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5\text{-}10)$$

여기서, Q: 일정 지점에서의 복사열(kW/㎡)

3.1.8 폭발지점으로부터 거리별 복사열 산출

3.1.1항 내지 3.1.7항에서 화구로부터 피해 지점까지의 거리를 바꾸어 반복 계산하면 폭발지점으로부터 일정거리별 복사열을 산출하여 다음과 같은 양식에 의한 그래프를 작성할 수 있다.



3.1.9 피해예측

3.1.8항에서 산출한 거리별 복사열의 크기를 알게 되면 그 지점에서의 피해는 간단히 예측할 수 있다. 본 코드 12쪽의 <별표 1>을 이용하여 복사열에 의한 주변 근로자 및 설비에 미치는 피해의 크기를 객관적으로 산정한다.

3.2 폭발압에 의한 피해

<부록 6> "물리적 폭발 피해예측 절차"에서 규정하는 방법에 따른다.

<부록 5-예>

복사열 산정 예시

100톤 용량의 LPG 탱크의 액위가 50%인 상태에서 LPG 누출사고가 일어나 대형 비등액체 팽창폭발/화구(BLEVE/Fire ball)가 발생하였다.
이 경우 폭발지점부터 300m 떨어진 지역에서의 복사열량을 계산하라
이때 대기의 조건은 절대 습도는 60%, 온도는 25℃이다.
또한 LPG의 순 연소열량은 46,350 kJ/kg이다.

(1) 화구의 크기 산출

식<5-1>로부터

$$M = 100 \times 0.5 = 50톤 = 50,000kg$$

$$D = 5.8 \times M^{1/3} = 214m$$

(2) 화염의 지속 시간 산출

식<5-3>으로부터

$$t = 2.6 \times M^{1/6} = 15.8초$$

(3) 화구 중심의 높이 산출

식<5-4>로 부터

$$H = 0.75D = 160.5m$$

(4) 대기 열전도도 산출

식<5-5> 및 식<5-6>으로부터

$$\begin{aligned} P_w &= 1013.25 \times R_H \times \exp(14.4114 - 5328/T_a) \\ &= 1013.25 \times 0.6 \times \exp(14.4114 - 5328/298) \\ &= 18.96 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_s &= \sqrt{H^2 + L^2} - D/2 \\ &= \sqrt{160.5^2 + 300^2} - 214/2 \\ &= 233m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_a &= 2.02(P_w \times X_s)^{-0.09} \\ &= 0.95 \end{aligned}$$

(5) 표면 방사에너지 산출

식<5-7>로부터

$R = 0.3$

$M = 30,000kg$

$H_c = 46,360kJ/kg$

$D = 214m$

$t = 15.8초$

$$E = \frac{R \times M \times H_c}{3.14 D^2 \times t}$$
$$= \frac{0.3 \times 50,000 \times 46,350}{3.14 \times 214^2 \times 15.8}$$
$$= 306 kJ/m^2 \cdot s$$
$$= 306\ \mathrm{kW}/m^2$$

(6) 시계인자 산출

식<5-8>로부터

$$F_v = \frac{L^2 \times (D/2)^2}{(L^2 + H^2)^{3/2}}$$
$$= \frac{300 \times (214/2)^2}{(300^2 + 160.5^2)^{3/2}}$$
$$= 0.087$$

(7) 복사열 산출

식<5-10>으로부터

$$Q = \tau_a \times E \times F_v$$
$$= 0.95 \times 306 \times 0.087$$
$$= 25.29\ \mathrm{kW}/\mathrm{m}^2$$

<부록 6>

물리적 폭발 피해예측 절차

제1장 일반사항

1. 적용범위

가압된 가스 및 액체를 저장·취급하고 있는 압력용기가 갑자기 파손되어 외부로 내부 에너지가 방출되는 경우에 적용한다.

2. 압력용기 파손원인

압력용기가 파손되어 물리적 폭발을 일으키는 원인은 다음과 같다.

(1) 압력조절장치 또는 과압방지 장치의 기능상실

(2) 부식·마모·화학적반응에 의한 부식(Chemical Attack)에 의한 두께의 감소

(3) 과열·자재결합·화학적 반응에 의한 부식(응력부식균열·침식·부풀음 등) 등에 의한 압력 용기의 응력 감소

(4) 내부의 이상 반응

(5) 기타

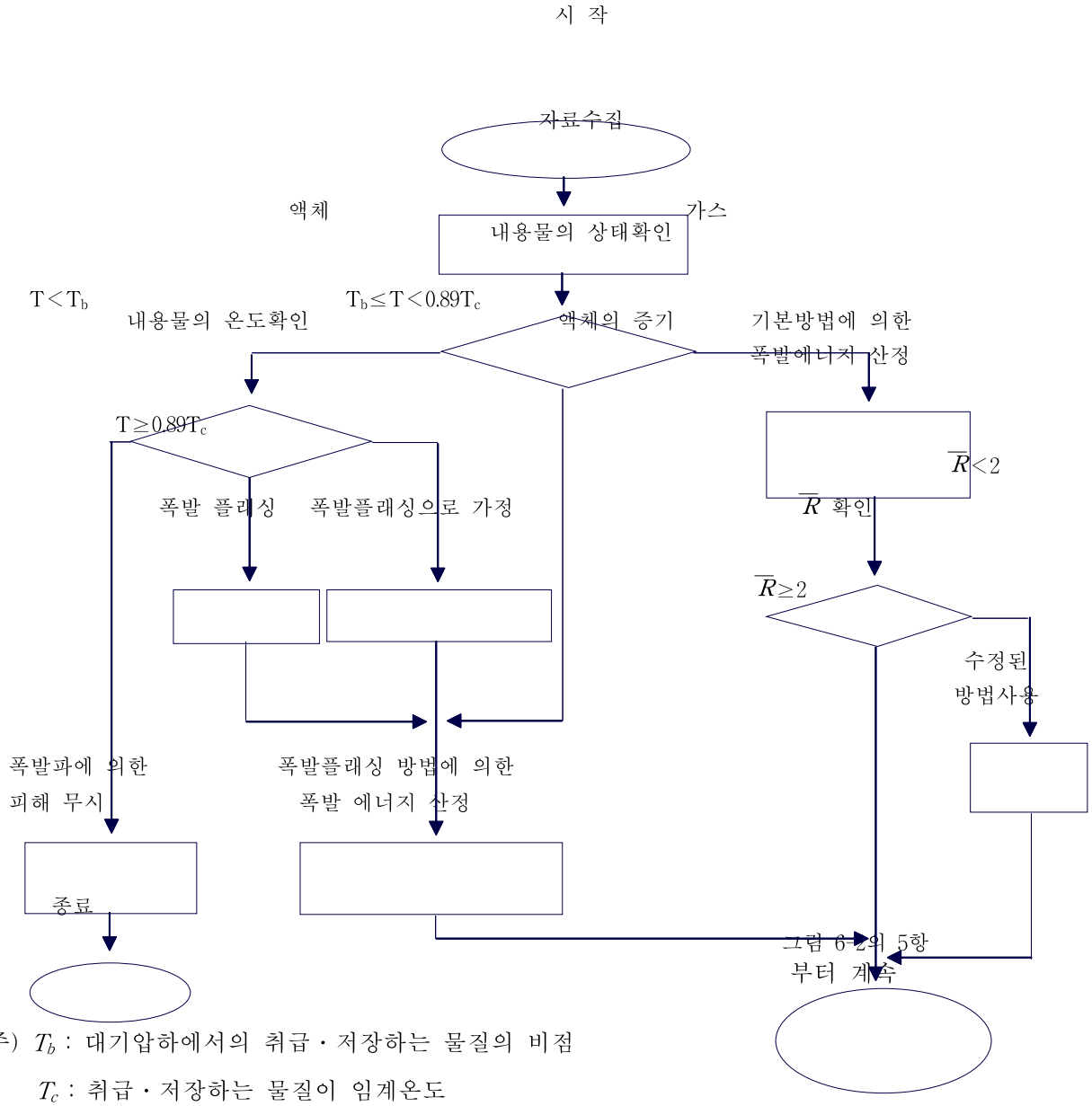
3. 피해요인

물리적 폭발이 일어나면 폭발파 및 압력용기 파편의 비산등에 의한 피해를 입는다. 저장·취급하는 물질이 가연성·인화성인 경우에는 누출된 물질에 의한 화재·폭발에 의하여 2차 피해를 입는다.

제2장 폭발파에 의한 피해예측

4. 피해예측 방법의 선정

폭발파에 의한 피해 예측 방법은 <그림 6-1>에 의하여 선정한다.



주) T_b : 대기압하에서의 취급·저장하는 물질의 비점

T_c : 취급·저장하는 물질이 임계온도

T : 취급·저장하는 물질의 온도

<그림 6-1> 피해예측방법선정 흐름도

5. 가스 압력용기의 폭발

5.1 적용범위

가스를 취급하는 압력용기의 폭발에 의하여 발생하는 폭발파에 의한 피해예측에 적용한다.

5.2 피해 예측 순서

피해 예측 순서는 <그림 6-2>에 따른다.

5.3 피해 예측 방법

5.3.1 피해 예측에 필요한 자료

(1) 압력용기의 폭발압력(P_1)

(2) 대기압(P_0)

(3) 가스로 채워진 부분의 압력용기의 체적(V_G)

(4) 비열계수 ($\gamma = C_p/C_v$)

(5) 압력용기의 중심으로부터 피해 지검까지의 거리(γ)

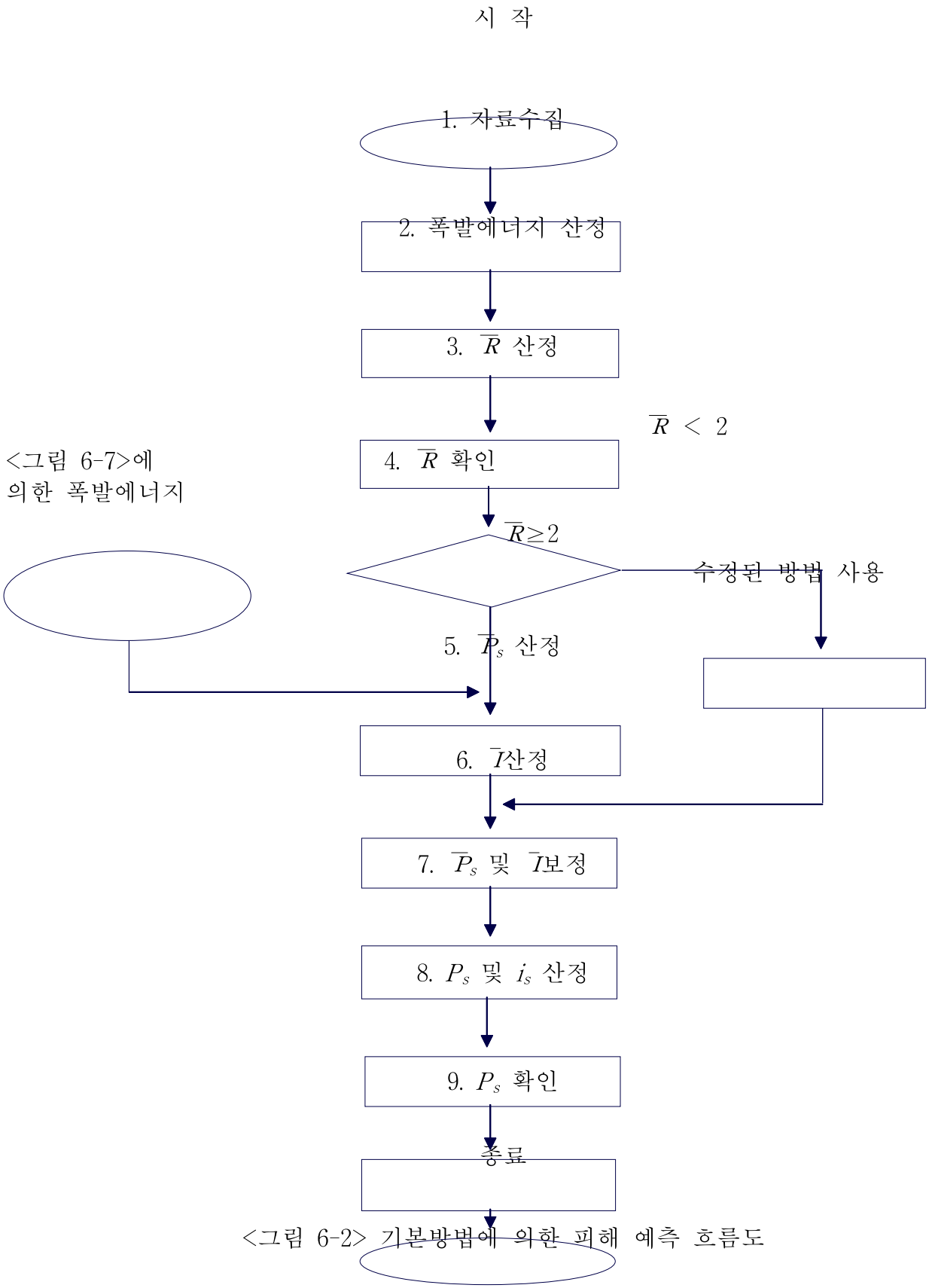
(6) 압력용기의 형태(구형 또는 원통형)

5.3.2 기본방법에 의한 단계별 계산 절차

(1) 폭발에너지 산정

$$E_{ex} = \frac{(P_{ex} - P_0) \times 2 \times V_G}{\gamma - 1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}1)$$

여기서, E_{ex} : 폭발에너지 (J)
P_{ex} : 압력용기의 폭발압력 (N/㎡(abs))
P_0 : 대기압 (N/㎡(abs))
V_G : 가스로 채워진 부분의 압력용기 체적(㎥)
γ : 비열계수



<그림 6-2> 기본방법에 의한 피해 예측 흐름도

(2) 에너지 환산거리($\overline{R}$)의 산정

$$\overline{R} = r \times \left(\frac{P_o}{E_{ex}} \right)^{1/3} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (6\text{-}2)$$

여기서, $\overline{R}$: 에너지 환산거리(Scaled distance, 무차원)

r : 압력용기의 중심으로부터 피해 지점까지의 거리(m)

(3) 에너지 환산거리($\overline{R}$)확인

$\overline{R}$가 2이상인 경우에는 다음 절차에 따라 계속하고 2미만인 경우에는 5.3.3항에 의한 수정된 방법을 이용하여 피해예측을 한다.

(4) 환산초과압력(Scaled overpressure, $\overline{P_s}$)의 산정

<그림 6-3>을 이용하여 앞에서 산정된 $\overline{R}$로부터 $\overline{P_s}$를 구한다.

(5) 환산임펄스(Scaled impulse, $\overline{I}$)의 산정

<그림 6-4>을 이용하여 앞에서 산정된 $\overline{R}$로부터 $\overline{I}$를 구한다.

(6) $\overline{P_s}$ 및 $\overline{I}$의 보정

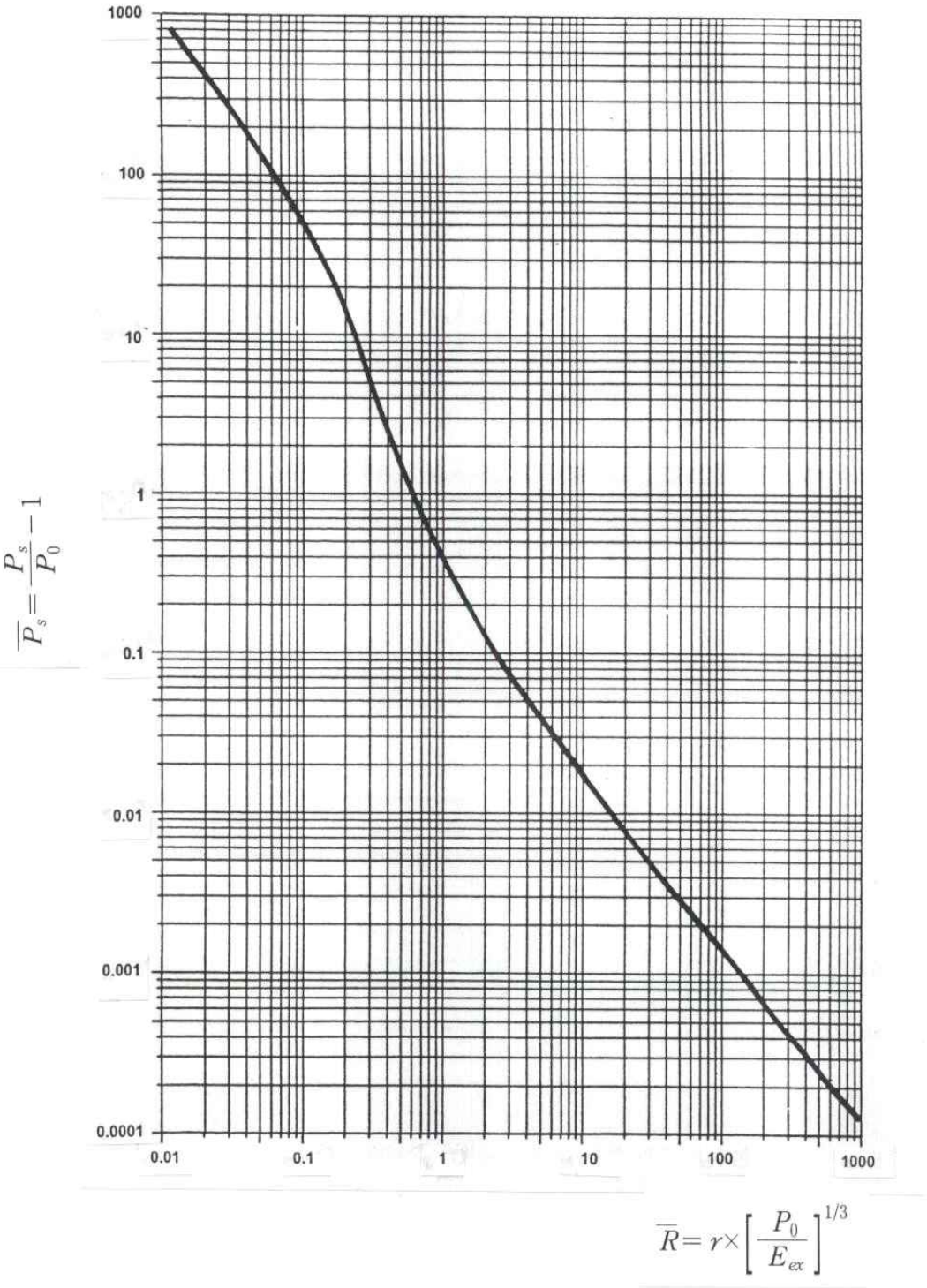
앞에서 구한 $\overline{P_s}$ 및 $\overline{I}$는 지상에 설치된 구형인 경우를 기준한 것이므로 압력용기의 형태 및 설치 높이에 따라 다음과 같이 보정한다.

(가) 압력용기가 원통형인 경우

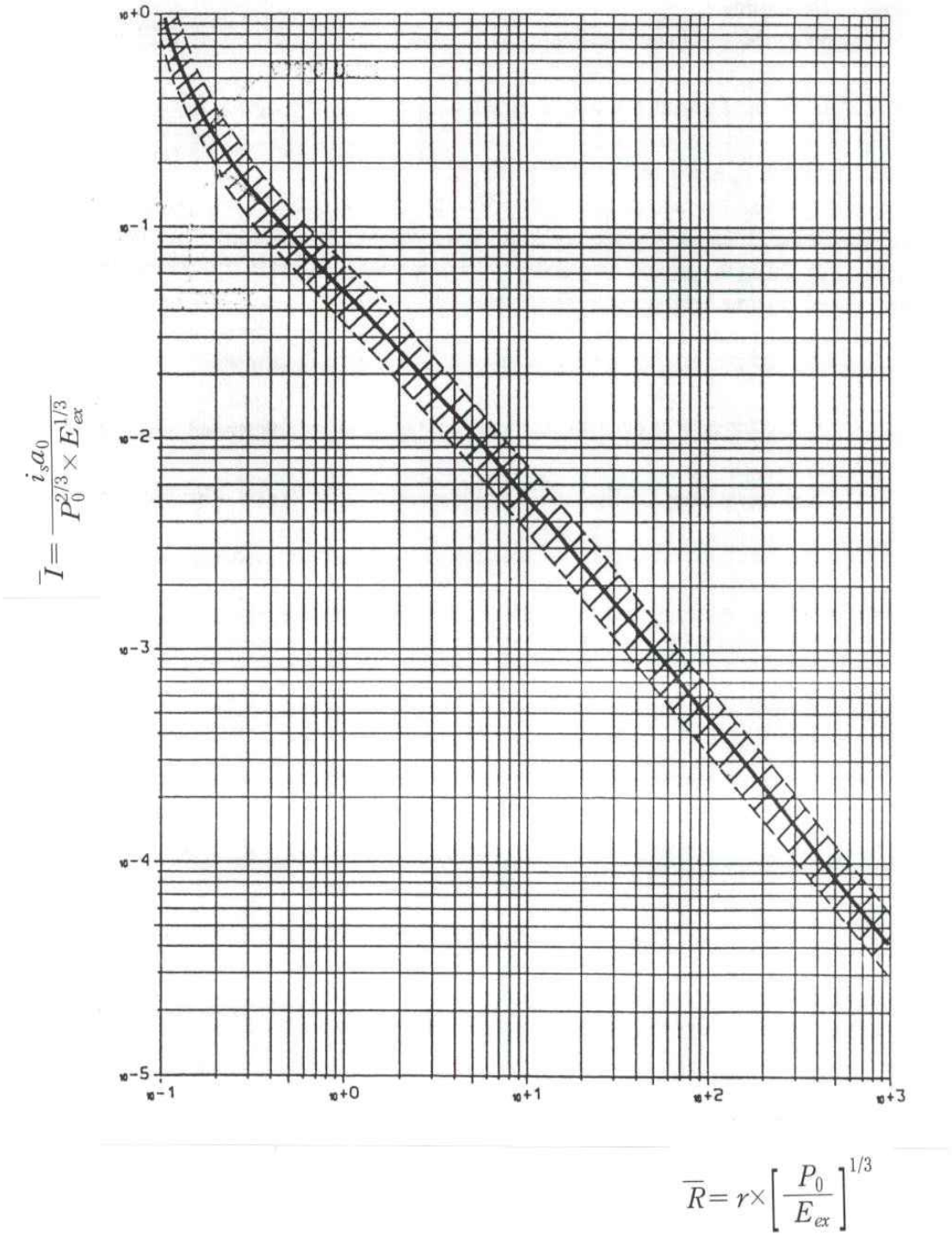
앞에서 구한 $\overline{P_s}$ 및 $\overline{I}$에 <표 6-1>에 의한 보정계수를 곱하여 보정된 $\overline{P_{s,a}}$ 및 $\overline{I_a}$를 계산한다.

(나) 지상보다 높이 설치된 구형인 경우

앞에서 구한 $\overline{P_s}$ 및 $\overline{I}$에 <표 6-2>에 의한 보정계수를 곱하여 보정된 $\overline{P_{s,a}}$ 및 $\overline{I_a}$를 계산한다.



<그림 6-3> 에너지 환산거리와 환산초과압력 곡선



<그림 6-4> 에너지 환산거리와 환산임펄스 곡선

<표 6-1> 원통형 보정 계수

$\bar{R}$	보정계수	
	$\bar{P}_s$	$\bar{I}$
$\bar{R} < 0.3$	4	2
$0.3 \leq \bar{R} \leq 1.6$	1.6	1.1
$1.6 < \bar{R} \leq 3.5$	1.6	1
$3.5 < \bar{R}$	1.4	1

<표 6-2> 지상보다 높이 설치된 구형 보정계수

$\bar{R}$	보정계수	
	$\bar{P}_s$	$\bar{I}$
$\bar{R} < 1$	2	1.6
$1 \leq \bar{R}$	1.1	1

(다) 지상보다 높이 설치된 원통형인 경우

앞에서 구한 $\bar{P}_s$ 및 $\bar{I}$에 <표 6-1> 및 <표 6-2>에 의한 보정계수를 동시에 곱하여 보정된 $\bar{P}_{s,a}$ 및 $\bar{I}_a$를 계산한다.

(7) 최대압력 및 임펄스 산정

가. 최대압력(Peak overpressure, P_s)

$$P_s = P_o (\bar{P}_{s,a} + 1) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}3)$$

여기서, P_s : 최대압력(N/㎡(abs))

P_o : 대기압력(N/㎡(abs))

$\bar{P}_{s,a}$: 보정된 환산초과압력(무차원)

나. 임펄스 (Impulse,i_s)

$$i_s = \frac{\bar{I} \times P_o^{2/3} \times E_{ex}^{1/3}}{a_o} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}4)$$

여기서, i_s : 임펄스(N/㎡(abs))
$\bar{I}_a$: 보정된 환산임펄스(무차원)
P_o : 대기압력(N/㎡(abs))
E_{ex} : 폭발에너지(J)
a_o : 대기중에서의 음속(340m/s)

(8) 최대압력의 확인

계산된 최대압력이 압력용기의 폭발압력보다 큰 경우에는 압력용기의 폭발 압력 대신에 계산된 최대압력을 삽입하여 처음부터 다시 계산한다.

(9) 폭발지점으로부터 거리별 최대압력 및 임펄스 산정

폭발지점으로부터 피해거리를 바꾸어 계산하여 폭발지점으로부터 일정 거리별 최대압력 및 임펄스를 산정하여 가로축을 폭발지점으로부터의 거리, 세로축을 최대압력 또는 임펄스로하여 도표를 작성한다.

(10) 피해 범위 예측

거리별 최대압력 또는 임펄스를 알게되면 그 지점에서의 피해는 간단히 예측할 수 있다. 본 코드 14쪽의 <별표 2>를 이용하여 폭발파에 의한 주변 근로자 및 설비에 미치는 피해의 크기를 객관적으로 산정한다.

5.3.3 수정된 방법에 의한 단계별 계산 절차

(1) 폭발에너지 산정

식<6-1>을 이용하여 폭발에너지를 산정한다.

(2) 에너지 환산거리($\bar{R}$)의 산정

식<6-2>를 이용하여 에너지 환산거리를 산정한다.

(3) 에너지 환산거리 확인

전항에서 산정한 에너지 환산거리가 2 미만인 경우에 한하여 <그림 6-5> “수정된 방법에 의한 피해예측 흐름도”에 따라 계속한다.

(4) 폭발한 압력용기의 가상 반지름 산정

수정된 방법은 폭발파(Explosion's blast wave)가 완전 대칭으로 형성된다는 가정하에서 제안된 방법이며, 이 경우에는 지면에 설치된 반구형의 압력 용기에서 폭발한 것으로 간주하여 가상 반지름을 산정한다.

$$r_o = 0.782\,V^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6\text{-}5)$$

여기서, r_o : 폭발용기의 가상 반지름(m)
V : 압력용기의 체적(m³)

(5) 초기시작거리(Initial starting distance)의 산정

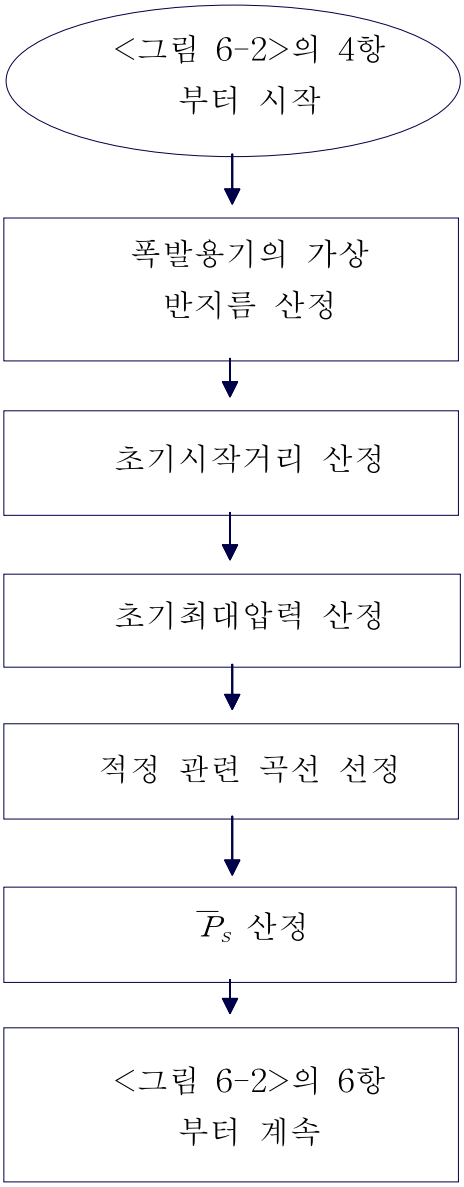
$$\overline{R}_0 = r_o\left(\frac{P_0}{E_{ex}}\right)^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6\text{-}6)$$

여기서, $\overline{R}_0$: 초기시작거리(무차원)

(6) 초기최대압력(Initial peak pressure) 산정

$$P_b = \overline{P}_{so}\left[1 - \frac{3.5(\gamma - 1)(\overline{P}_{so} - 1)}{\sqrt{(\gamma T/M)(1 + 5.9\,\overline{P}_{so})}}\right]^{-2r/r-1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6\text{-}7)$$

여기서, P_b : 압력용기의 폭발압력(bar(abs))
$\overline{P}_{so}$: 초기최대압력(bar(abs))
T : 취급·저장하는 물질의 온도 (K)
M : 취급·저장하는 물질의 분자량 (kg/kg-mole)



<그림 6-5> 수정된 방법에 의한 피해예측 흐름도

(7) 에너지 환산거리와 환산초과압력 관련 곡선선정

(5)항과 (6)항에서 산정한 $\overline{R}_o$와 $\overline{P}_{so}$를 <그림 6-6>에서 읽어 그 교차점을 지나는 가상곡선을 <그림 6-6>에 그린다. 이때에 $\overline{P}_{so}$를 $\overline{P}_s$로 하여 읽는다.

(8) $\overline{P}_s$ 산정

(2)항에서 구한 에너지 환산거리($\overline{R}$)와 <그림 6-6>에 그린 가상곡선이 교차되는 점의 $\overline{P}_s$를 구한다.

(9) 가상임펄스($\overline{I}$)산정

<그림 6-4>를 이용하여 (2)항에서 산정된 $\overline{R}$로부터 $\overline{I}$를 구한다.

(10) $\overline{P}_s$ 및 $\overline{I}$의 보정

5.3.2의 (6)항을 이용하여 $\overline{P}_s$ 와 $\overline{I}$를 보정한다.

(11) 최대압력 및 임펄스 산정

식<6-3>과 식<6-4>를 이용하여 최대압력과 임펄스를 산정한다.

(12) 최대압력의 확인

계산된 최대압력이 압력용기의 폭발압력보다 큰 경우에는 압력용기의 폭발압력 대신에 계산된 최대압력을 삽입하여 처음부터 다시 계산한다.

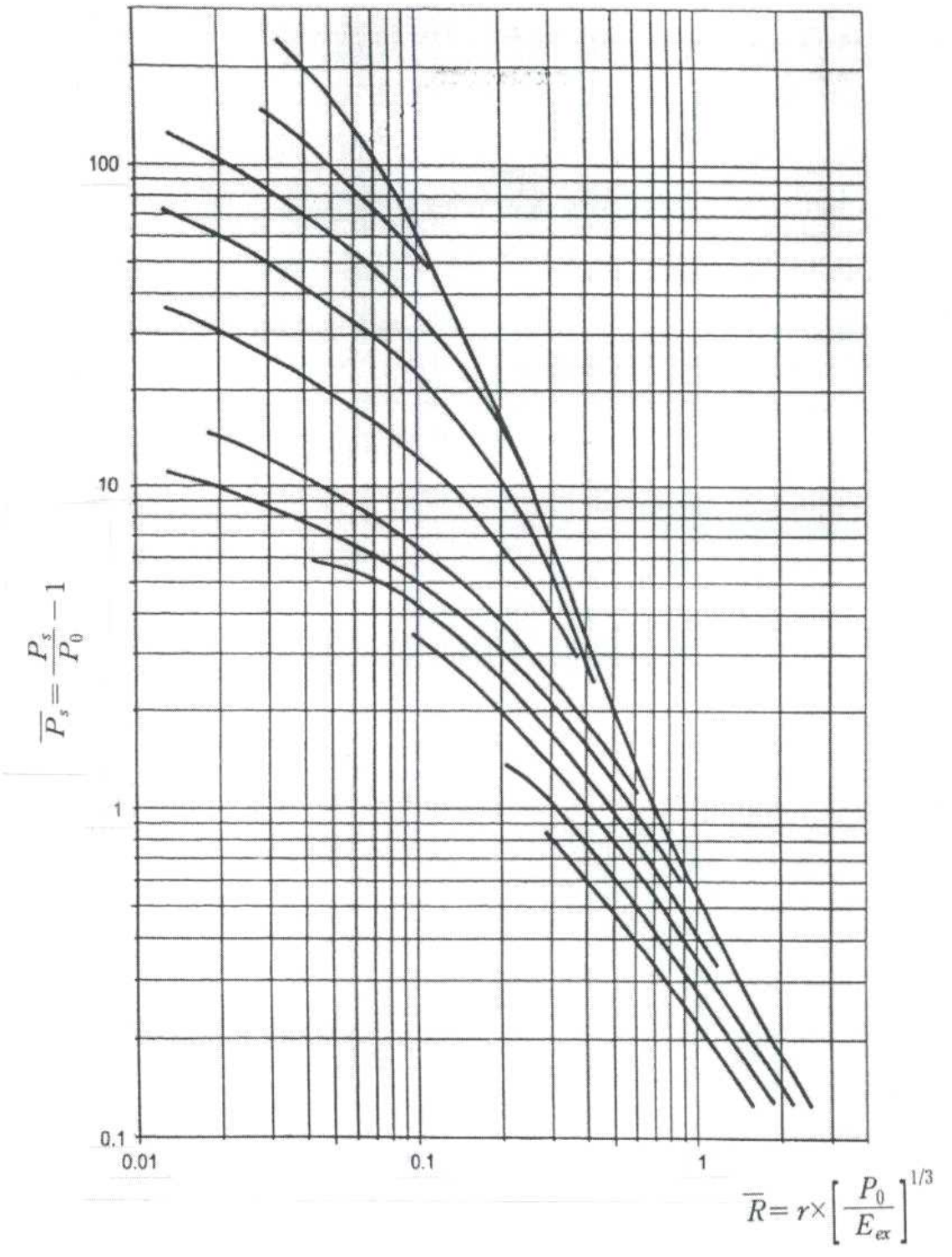
(13) 폭발지점으로부터 거리별 최대압력 및 임펄스 산정

폭발지점으로부터 피해거리를 바꾸어 계산하여 폭발지점으로부터 일정 거리별 최대압력

및 임펄스를 산정하여 가로축을 폭발지점으로부터의 거리, 세로축을 최대압력 또는 임펄스로하여 도표를 작성한다.

(14) 피해범위 예측

거리별 최대압력 또는 임펄스를 알게되면 그 지점에서의 피해는 간단히 예측할 수 있다. 본 코드 14쪽의 <별표 2>를 이용하여 폭발파에 의한 주변 근로자 및 설비에 미치는 피해의 크기를 객관적으로 산정한다.



<그림 6-6> 에너지 환산거리와 환산초과압력 곡선

6. 폭발플래싱

6.1 적용범위

과열 액체 및 액체의 증기를 저장·취급하는 압력용기의 폭발에 의하여 발생하는 폭발파에 의한 피해예측에 적용한다.

6.2 피해예측 순서

피해예측 순서는 <그림 6-7>에 따른다.

6.3 피해예측 방법

6.3.1 피해예측에 필요한 자료

(1) 압력용기의 폭발압력(P_{ex})

(2) 대기압력(P_0)

(3) 누출된 물질의 양(m_1)

(4) 압력 용기의 중심으로부터 피해지점까지의 거리(r)

(5) 압력용기의 형태

(6) 저장·취급하는 물질의 물성

① 비엔탈피 (Specific enthalpy, h)

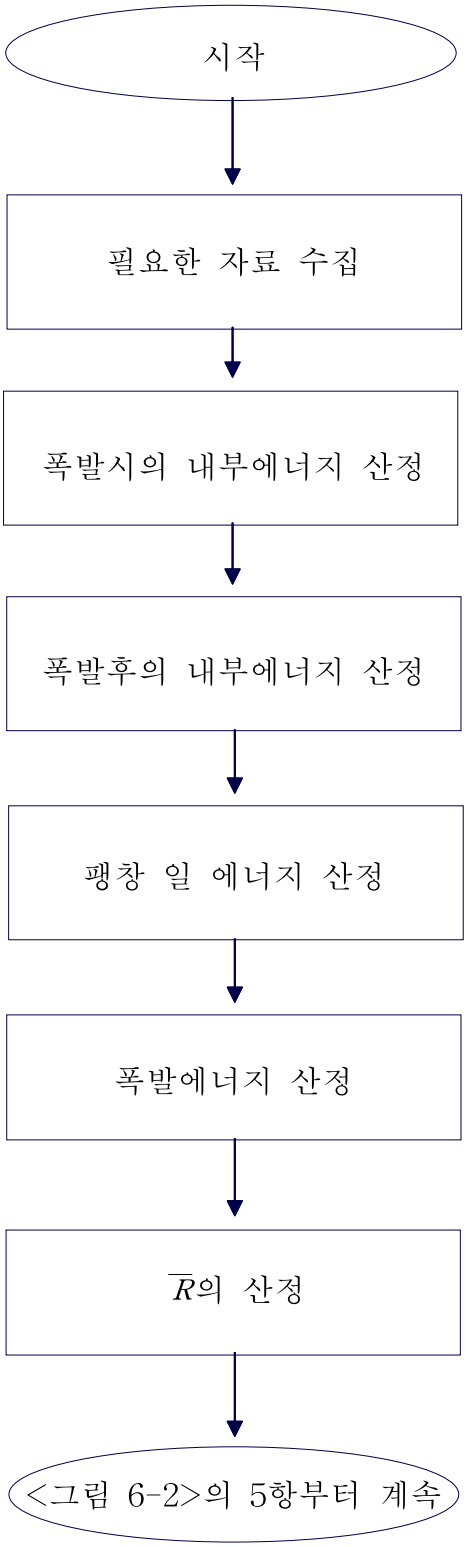
② 비엔트로피 (Specific entrophy, s)

③ 비용적 (Specific volume, v)

6.3.2 단계별 계산절차

(1) 폭발시의 내부에너지(Internal energy) 산정

$u_{ex} = h_{ex} - P_{ex}v_{ex}$ · · ·



<그림 6-7> 폭발플래싱 압력 용기폭발 피해예측 흐름도

(주) 상기 자료는 열역학 그라프(Thermodynamic graph) 또는 열역학 테이블(Thermodynamic table)로부터 구한다.

(2) 폭발후의 내부에너지 산정

가. 열역학 그라프를 이용하는 방법

열역학 그라프를 이용하여 압력용기의 폭발압력(P_{ex})으로부터 등엔트로피(Isentrophic) 팽창곡선을 따라 대기압력 (P_0)에 있어서의 비엔탈피(h_2), 비엔트로피(s_2) 및 비용적(v_2)를 구하여 다음식을 이용하여 폭발후 내부에너지를 구한다.

$$u_2 = h_2 - P_0 v_2 \cdots\cdots\cdots\

(4) 폭발에너지 산정

$$E_{ex} = 2 \times e_{ex} \times m_1 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6\text{-}12)$$

여기서, m_1 : 누출된 물질의 량 (kg)

(주) 저장·취급하는 물질이 혼합물인 경우에는 혼합물을 이루고 있는 각각의 물질에 대하여 (1)항 내지 (4)항에 의한 에너지를 산정하여 모두 합하여 혼합물에 대한 폭발에너지를 구한다.

(5) 에너지 환산거리($\overline{R}$)의 산정

$$\overline{R} = r \times \left(\frac{P_0}{E_{ex}} \right)^{1/3} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6\text{-}13)$$

여기서, r : 압력용기의 중심으로부터 피해지점까지의 거리(m)

(6) 최대압력 및 임펄스 산정 및 확인

5.3.2 (4)항 내지 (8)항을 이용하여 산정 및 확인한다.

(7) 폭발지점으로부터 거리별 최대압력 및 임펄스 산정

폭발지점으로부터 피해 거리를 바꾸어 계산하여 폭발지점으로 부터 일정 거리별 최대압력 및 임펄스를 산정하여 가로축을 폭발지점으로 부터의 거리, 세로축을 최대압력 또는 임펄스로하여 도표를 작성한다.

(8) 피해범위 예측

거리별 최대압력 또는 임펄스를 알게되면 그 지점에서의 피해는 간단히 예측할 수 있다. 본 코드 14쪽의 <별표 2>를 이용하여 폭발파에 의한 주변 근로자 및 설비에 미치는 피해의 크기를 객관적으로 산정한다.

7. 등온 팽창 용기 폭발

7.1 적용 범위

등온 팽창에 의하여 가스를 저장·취급하는 압력용기가 폭발하여 발생하는 폭발파에 의한 피해예측에 적용한다.

7.2 피해예측 방법

7.2.1 폭발에너지 산정

$$W = 4\times10^{-5} V\times\left(\frac{P_b}{P_0}\right)\times R\times T_0\times \ln\left(\frac{P_b}{P_0}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}14)$$

여기서, W : 폭발에너지 (kg-TNT)
V : 압력용기내의 가스 부피 (m^3)
P_b : 압력용기의 폭발압력 (bar(abs))
P_0 : 대기압력 (bar(abs))
T_0 : 표준 상태에서의 온도(273K)
R : 이상기체상수 (1.987 ㎉/kg-mole·K)

7.2.2 압력용기 표면에서의 최대압력 산정

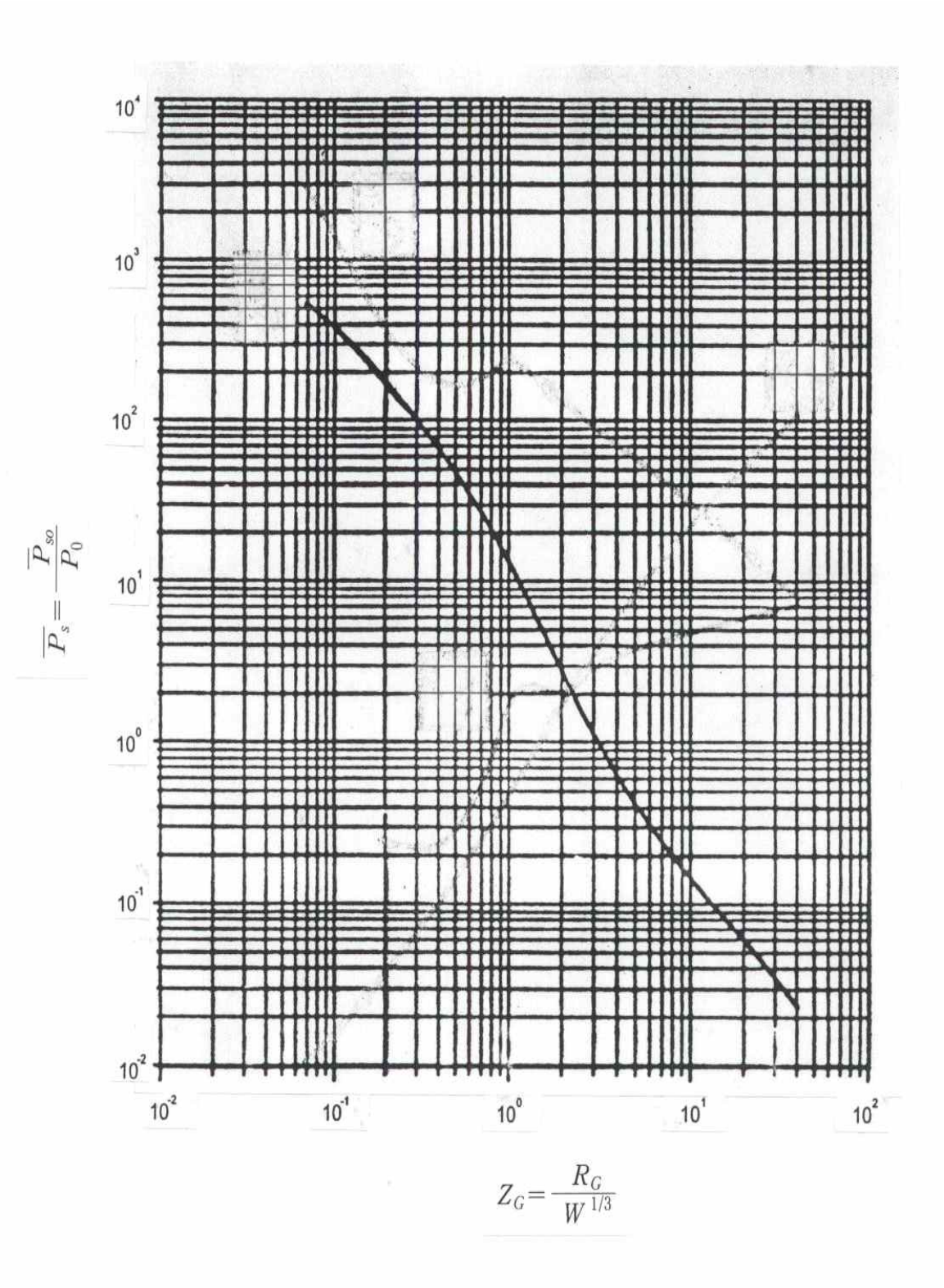
식<6-7>을 이용하여 압력용기 표면에서의 최대압력을 산정한다. 이때에 $\overline{P_{so}}$를 압력용기 표면에서의 최대압력으로 한다.

7.2.3 환산초과압력 산정

$$\overline{P}_s = \frac{\overline{P_{so}}}{P_0} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}15)$$

7.2.4 환산거리(Z_G) 산정

<그림 6-8>로부터 세로축의 값을 $\overline{P}_s$로 하여 환산거리(Z_G)를 구한다.



<그림 6-8> 환산거리와 환산초과압력 곡선

7.2.5 사고지점으로 부터의 거리(R_G) 산정

$$R_G = Z_G \times W^{1/3} \cdots\cdots\cdots\

7.4 피해범위 예측

거리별 과압을 알게되면 그 지점에서의 피해는 간단히 예측할 수 있다. 본 코드 14쪽의 <별표2>를 이용하여 폭발파에 의한 주변 근로자 및 설비에 미치는 피해의 크기를 객관적으로 산정한다.

제 3 장 폭발파편에 의한 피해예측

8. 가스 저장·취급 압력용기 폭발

8.1 적용 범위

가스를 저장·취급하고 있는 압력용기의 폭발시에 파편에 의한 피해 범위를 산정하는데 적용한다.

8.2 피해예측 방법

파편에 의한 피해예측은 다음 순서에 따른다.

(1) 전체 에너지 산정

$$E = k\frac{P_{ex}V}{\gamma - 1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6\text{-}20)$$

$$k = 1 - \left(\frac{P_o}{P_{ex}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + (\gamma - 1)\left(\frac{P_o}{P_{ex}}\right)\left[1 - \left(\frac{P_o}{P_{ex}}\right)^{-1/\gamma}\right] \quad \cdots\cdots\cdots \quad (6\text{-}21)$$

여기서, E : 전체에너지 (J)

k : 상수

P_{ex} : 압력용기의 폭발압력(N/㎡(abs))

P_o : 대기압(N/㎡(abs))

V : 압력용기의 체적(m^3)
γ : 비열계수

(2) 가상 에너지(Scaled energy) 산정

$$\overline{E}=\left(\frac{2E}{M_v a_o^2}\right)^{1/2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}22)$$

여기서, $\overline{E}$: 가상에너지(J)
M_v : 압력용기의 무게(kg)
a_o : 저장·취급 물질속에서의 음속(m/s)

(3) 파편의 초기속도 산정

가. 가상에너지가 0.8 이하인 경우

다음 2가지 방법중 하나를 이용하여 파편의 속도를 계산한다.

① 전체운동 에너지를 이용하는 방법

$$v_i=\left[\frac{2E_k}{M_v}\right]^{1/2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}23)$$

여기서, v_i : 파편의 초기 속도(m/s)
E_k : 전체 운동에너지(J)
(E_k = 0.5E)

② 이론적인 방법
㉮ 유체속에서의 음속 산정

$$a_o=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M_s}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}24)$$

여기서, a_o : 저장·취급 물질 속에서의 유속(m/s)
R : 이상기체 상수(8,313J/K·kg-mole)
M_s : 저장·취급 물질의 분자량(kg/kg-mole)

㉯ $\overline{P}$의 산정

$$\overline{P}=\frac{(P_{ex}-P_0)V}{M_v a_o^2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}25)$$

여기서, $\overline{P}$: 가상 압력(무차원)

㉰ 파편의 초기 속도 산정

$$\ln\left(\frac{v_i}{K_f a_o}\right)=a\ln\overline{P}+b \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}26)$$

$$K_f = 1.306 \times F_f + 0.308446 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}27)$$

여기서, K_f : 파편 보정 계수
a : 상수 (표 6-3 참조)
b : 상수 (표 6-3 참조)
F_f : 파편의 무게 분율

<표 6-3> 파편 속도 상수

파편의 수	구형 압력 용기		원통형 압력 용기	
	a	b	a	b
2	0.622206	0.213936	0.814896	0.355218
10	0.598495	0.221165	0.598255	0.564998
100	0.287515	0.287515	0.591785	0.602712

나. 가상에너지가 0.8을 초과하는 경우

$$v_i=1.092\sqrt{\frac{E\times G}{M_v}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}28)$$

여기서, G : $\frac{1}{1+3M_G/5M_v}$ (구형 압력용기인 경우)・・・・・・・(6-29)

$\frac{1}{1+M_G/2M_v}$ (원통형 압력용기인 경우)・・・・・・ (6-30)

M_G : 저장・취급 물질의 무게(kg)

(4) 파편의 초기환산속도의 산정

$$\overline{v_i} = \frac{\rho_o \times C_D \times A_D \times v_i^2}{M_f \cdot g} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}31)$$

여기서, $\overline{v_i}$: 파편의 초기환산속도 (무차원)

ρ_o : 대기의 밀도 (kg/㎥)

C_D : 항력계수 (Drag coefficient, 표 6-4 참조)

A_D : 파편이 힘을 받는 면적 (㎡)

M_f : 파편의 무게

g : 중력가속도 (9.8m/sec^2)

(5) 파편의 환산비산반경 산정

<그림 6-9>에서 파편의 환산비산반경($\overline{R_f}$)를 읽는다.

양력・항력비(Lift to drag ratio, C_LA_L/C_DA_D)를 모르는 경우에는 C_L을 "0"으로 가정한다.

여기서, C_L : 양력계수 (Lift coefficient, 무차원)

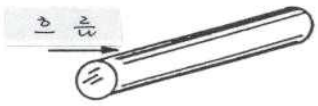
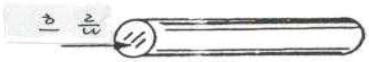
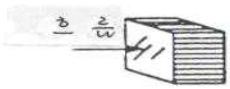
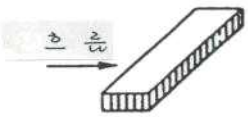
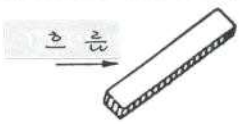
A_L : 파편이 힘을 받는 방향과 평행을 이루는 부분의 면적(㎡)

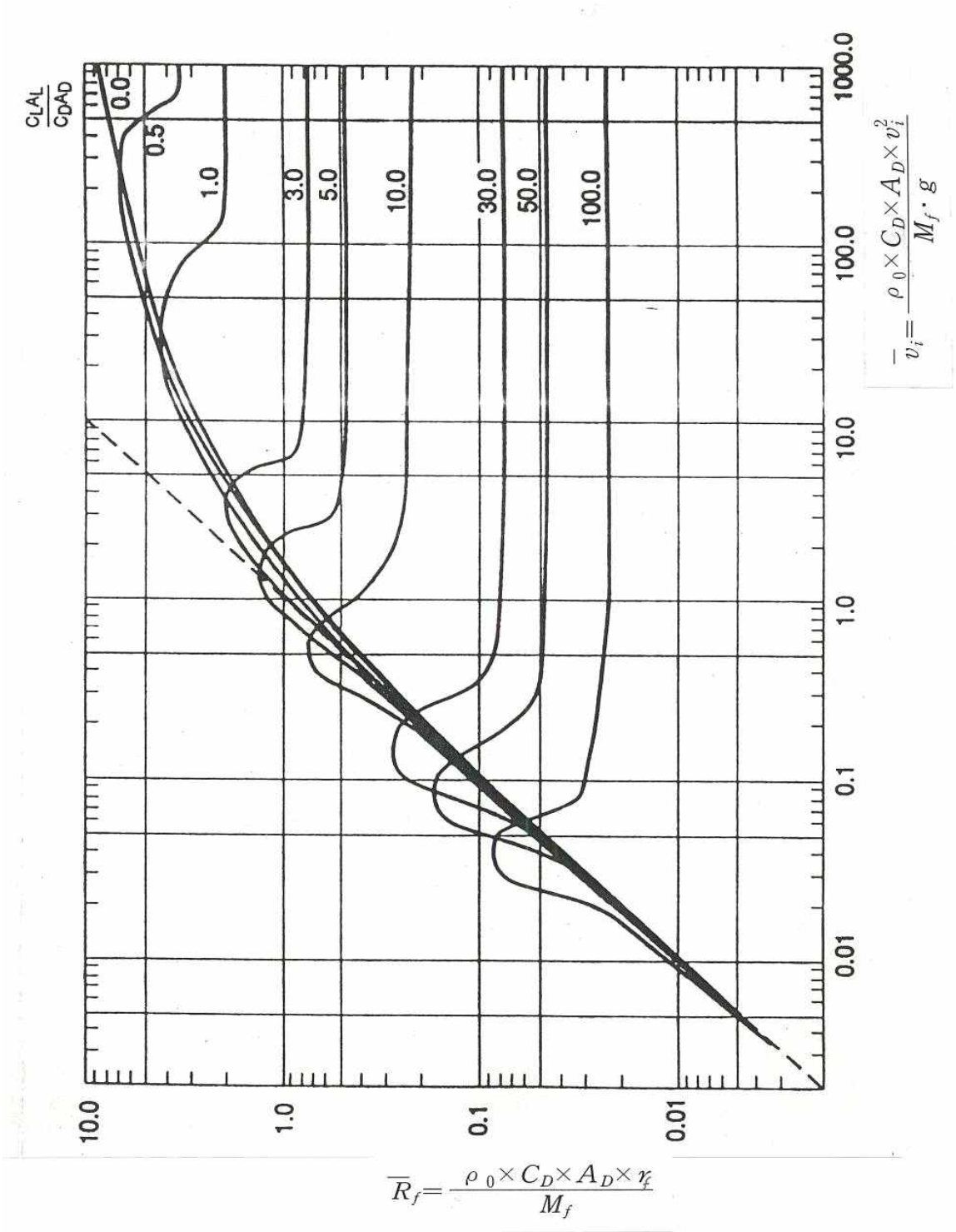
(6) 파편의 비산반경 산정

$$r_f = \frac{\overline{R_f} \times M_f}{\rho_o \times C_D \times A_D} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6\text{-}32)$$

여기서, r_f : 파편의 비산반경 (m)

<표 6-4> 항력 계수

파편의 형상	C_D
	1.20
	0.47
	0.82
	1.17
	1.05
	0.80
	2.05
	1.55
	1.98



<그림 6-9> 파편의 초기환산속도와 환산비산반경 곡선

9. 액체 저장·취급 압력용기 폭발

9.1 적용 범위

액체를 저장·취급하고 있는 압력용기의 폭발시에 파편에 의한 피해 범위를 산정하는데 적용한다.

9.2 피해예측 방법

8.2항에 의한 피해예측 방법을 활용하여 계산한다. 다만 파편의 초기 속도는 <식 6-23>를 이용하여 계산하여야 한다.

제 4 장 복사열에 의한 피해예측

10. 가연성 가스 및 인화성 물질 저장·취급 압력용기 폭발

10.1 적용 범위

가연성 가스 및 인화성 물질을 그 물질의 대기압하에서의 비점 이상에서 저장·취급하는 압력 용기가 폭발하여 화제를 일으킨 경우에 적용한다.

10.2 피해예측 범위

<부록 5> “ 비등액체 팽창 폭발/화구 피해예측 절차”에서 규정하는 방법에 따른다.

<부록 7>

TNT당량 모델 피해예측 절차

1. 적용범위

대량의 인화성가스 또는 인화성액체가 용기나 배관 등에서 지속적으로 누출되어 증기운 폭발을 일으키는 경우에 적용한다.

2. 피해요인

대기중에 누출된 인화성가스 또는 인화성액체의 증기에 대한 증기운폭발이 일어나면 화재·폭발에 의한 복사열과 동시에 폭발압에 의한 피해를 동시에 입는다. 그러나 피해의 크기에 있어서 복사열에 의한 피해보다 폭발압에 의한 피해가 훨씬 심각하다.

3. 피해예측순서

3.1 누출량 산출

누출원 모델을 이용하여 누출된 인화성가스 또는 인화성액체의 양을 산출한다.

3.2 연소열량 산출

누출된 인화성가스 또는 인화성액체의 연소열량을 Perry's Handbook 등의 자료를 이용하여 산출한다.

3.3 폭발수율계수의 결정

폭발수율계수는 실험적으로 얻는 수치이다. 통상 0.01 내지 0.1을 사용한다. 본 지침에서는 0.1을 사용한다.

3.4 TNT 당량 산출

$$W = \frac{\mu \times M \times E_c}{2000} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7\text{-}1)$$

여기서, W : TNT당량(kg 또는 lb)
μ : 폭발수율계수(0.1사용)
M : 누출된 인화성가스 또는 인화성액체의 량 (kg 또는 lb)
E_c : 폭발을 일으킨 물질의 연소열(kJ/kg또는 Btu/lb)

3.5 환산거리(Scaled distance) 산출

$$Z_G = R_G / W^{1/3} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7\text{-}2)$$

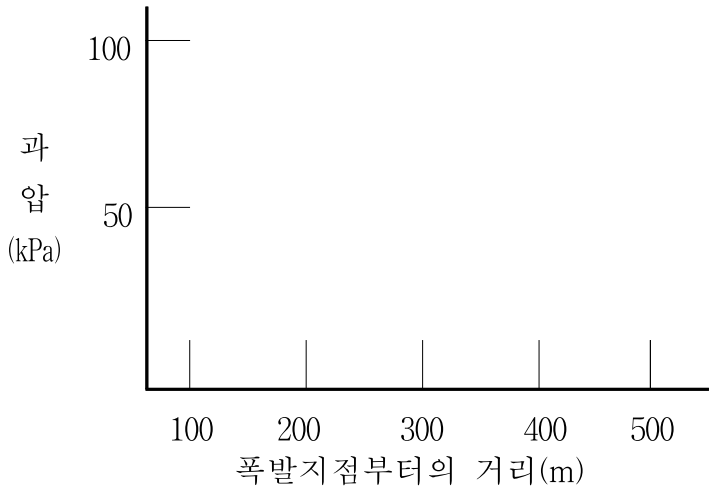
여기서, Z_G : 환산거리(m/kg$^{1/3}$ 또는 ft/lb$^{1/3}$)
R_G : 사고지점으로 부터 거리(m 또는 ft)
W : TNT당량 (kg 또는 lb)

3.6 과압 산출

<그림 7-1> 및 <그림 7-2>로부터 사고지점으로부터 일정거리에서의 과압을 산출한다.

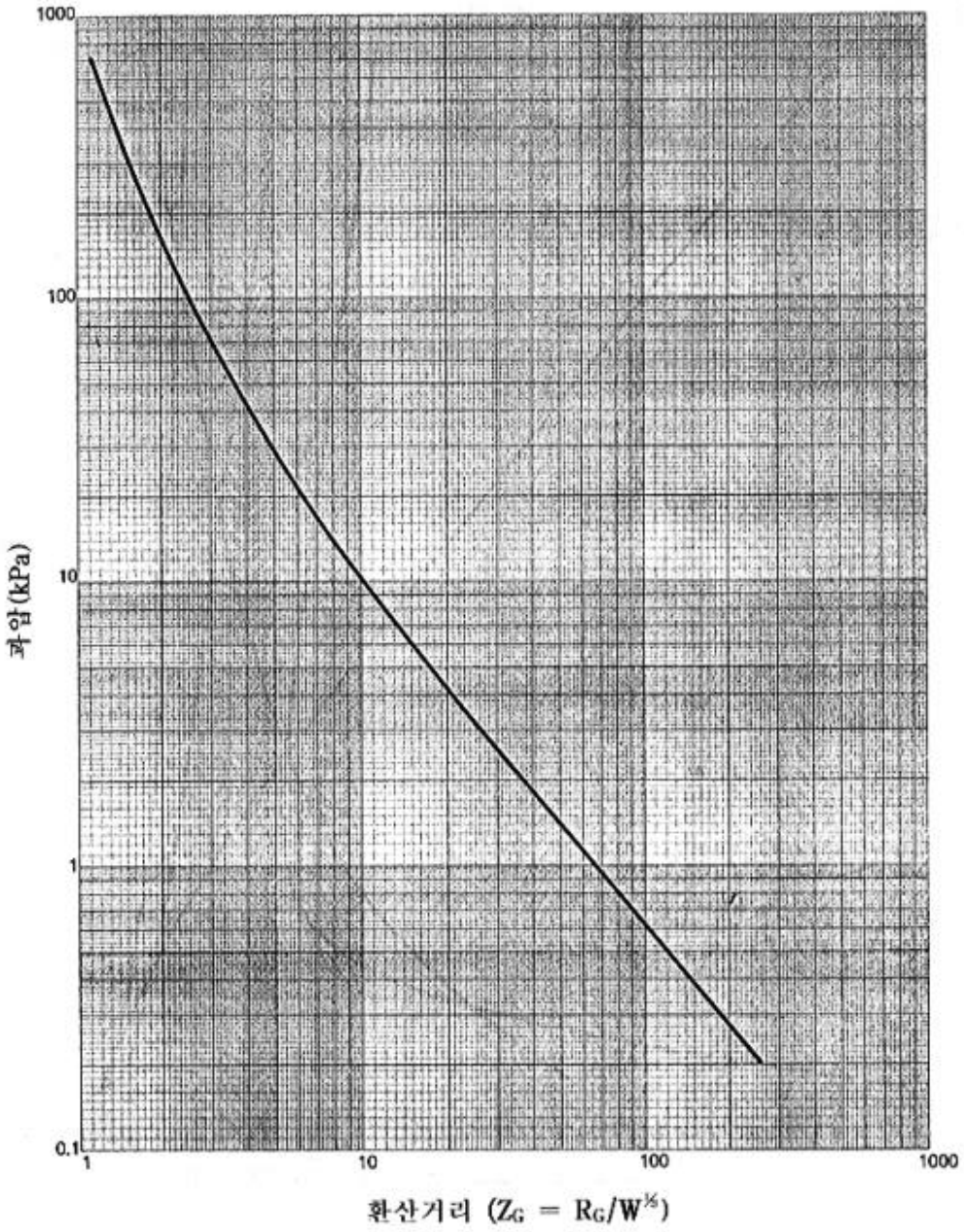
3.7 폭발지점으로부터 거리별 과압 산출

3.4항 및 3.5항에서 일정거리를 바꾸어 반복계산하면 폭발지점으로부터 일정거리별 과압을 산출하여 다음과 같은 양식에 의한 그래프를 작성할 수 있다.

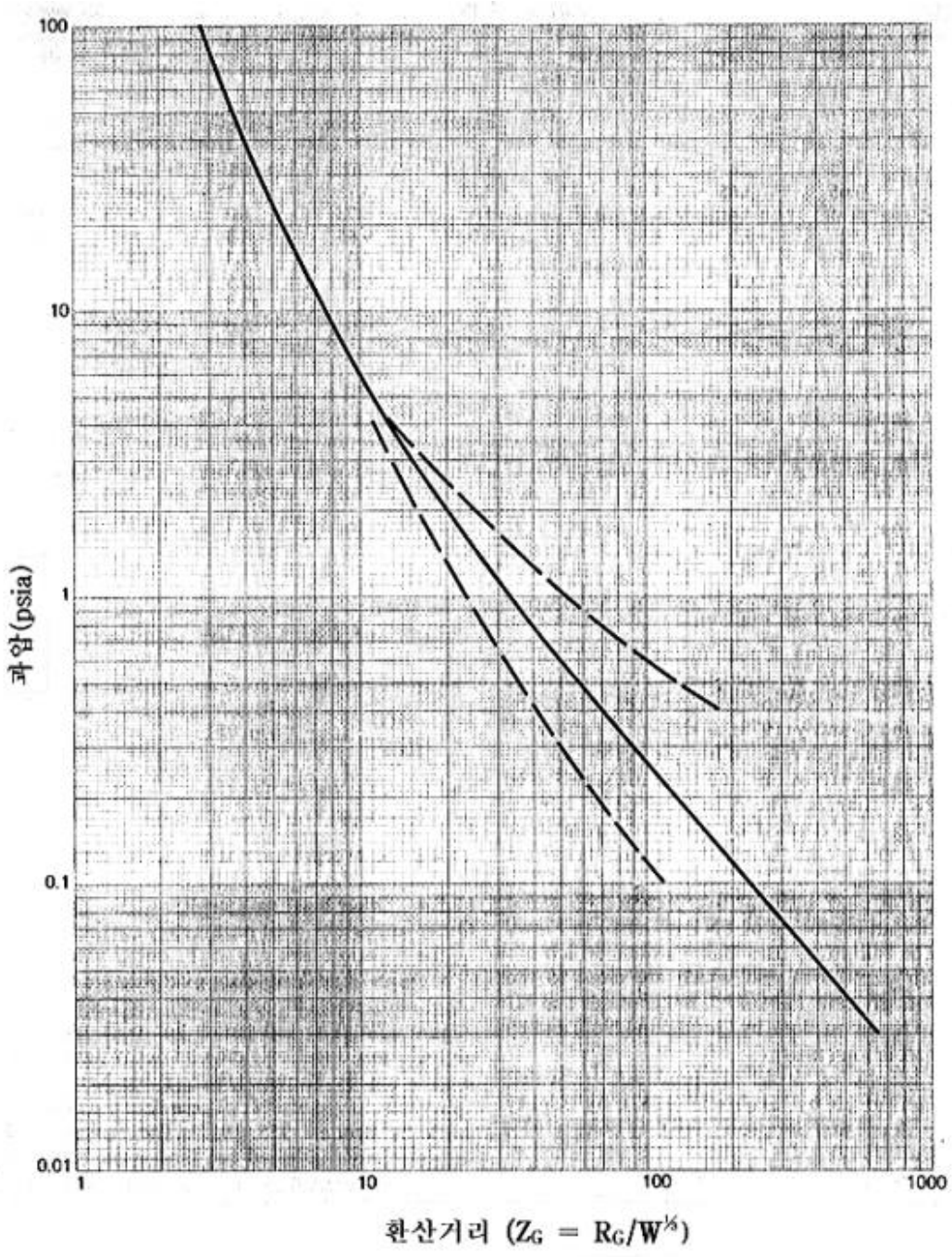


3.8 피해예측

3.7항에서 산출한 거리별 과압을 알게 되면 그 지점에서의 피해는 간단히 예측할 수 있다. 본 코드 12쪽의 <별표 2>를 이용하여 과압에 의하여 주변 근로자 및 설비에 미치는 피해의 크기를 객관적으로 산출한다.



<그림 7-1> TNT 과압 곡선(SI단위)



<그림 7-2> TNT 과압 곡선(fps 단위)

<부록 8>

액화석유가스의 증기운 폭발

1. 적용범위

액화석유가스(LPG)가 용기나 배관 등에서 지속적으로 누출되어 증기운 폭발을 일으키는 경우에 적용한다.

2. 피해 요인

증기운 폭발은 순간적으로 일어나기 때문에 화염에 의한 복사열의 피해는 미약하고 폭발 순간의 압력이 엄청나기 때문에 폭발압에 의하여 피해를 산정한다.

3. 전제조건

(1) 저장 취급하는 용기 또는 배관에 액화석유가스가 완전히 차있다.

(2) 누출된 액화석유가스는 대기온도(15℃)에서 단열팽창을 하면서 증기 또는 에어로졸 형태로 된다.

(3) 1톤의 액화석유가스는 약 0.42톤의 TNT와 동등한 폭발위력을 갖는다.

4. 산출방법

4.1 누출량 산출

4.1.1 액체 상태의 액화석유가스 누출인 경우

(1) <그림 8-1>를 이용하여 탱크 또는 배관이 파열된 경우 파열 직경별 최대 누출 속도를 찾는다.

(2) 누출 지속 시간을 산출한다.

(3) 총 누출량을 산출한다.

총 누출량 = 최대 누출속도(kg/s) × 누출시간(s)・・・・・・・・・・・・(8-1)

4.1.2 기체상태/기체・액체 상태의 액화석유가스 누출인 경우

(1) <그림 8-2> 및 <그림 8-3>를 이용하여 탱크 또는 배관이 파열된 경우 파열 직경별 최대 누출속도를 찾는다.

(2) 누출된 지속시간을 산출한다.

(3) 총 누출량을 산출한다.

4.2 환산거리(Scaled distance) 산출

$$환산거리 = \frac{d}{(0.42\times M)^{1/3}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8\text{-}2)$$

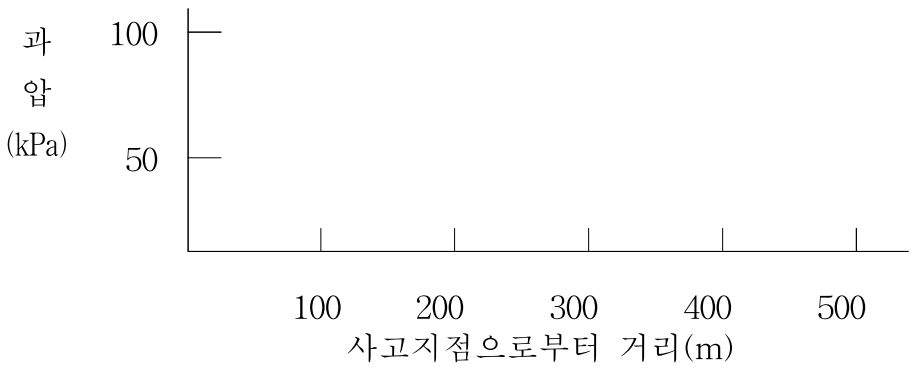
여기서, d : 일정거리(m)
M : 누출로 형성된 증기운의 무게(Ton)

4.3 과압산출

4.2항에서 계산된 환산거리를 이용하여 <그림 8-4>로 부터 과압을 찾는다.

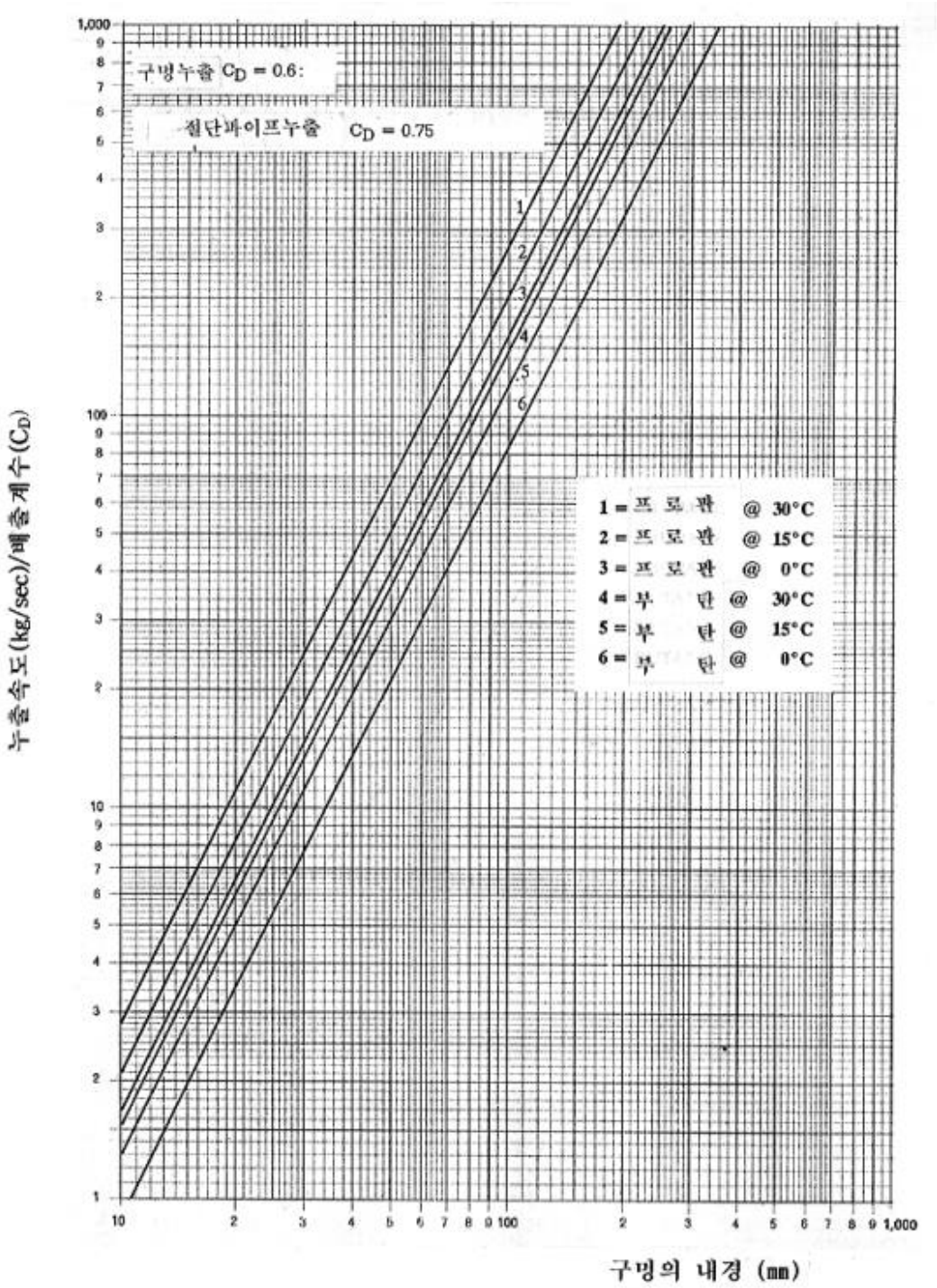
4.4 사고지점으로부터 거리별 과압 산출

4.2항 및 4.3항에서 일정거리를 바꾸어 반복 계산하면 사고지점으로부터 일정거리별 과압을 산출하여 다음과 같은 양식에 의한 그래프를 작성할 수 있다.

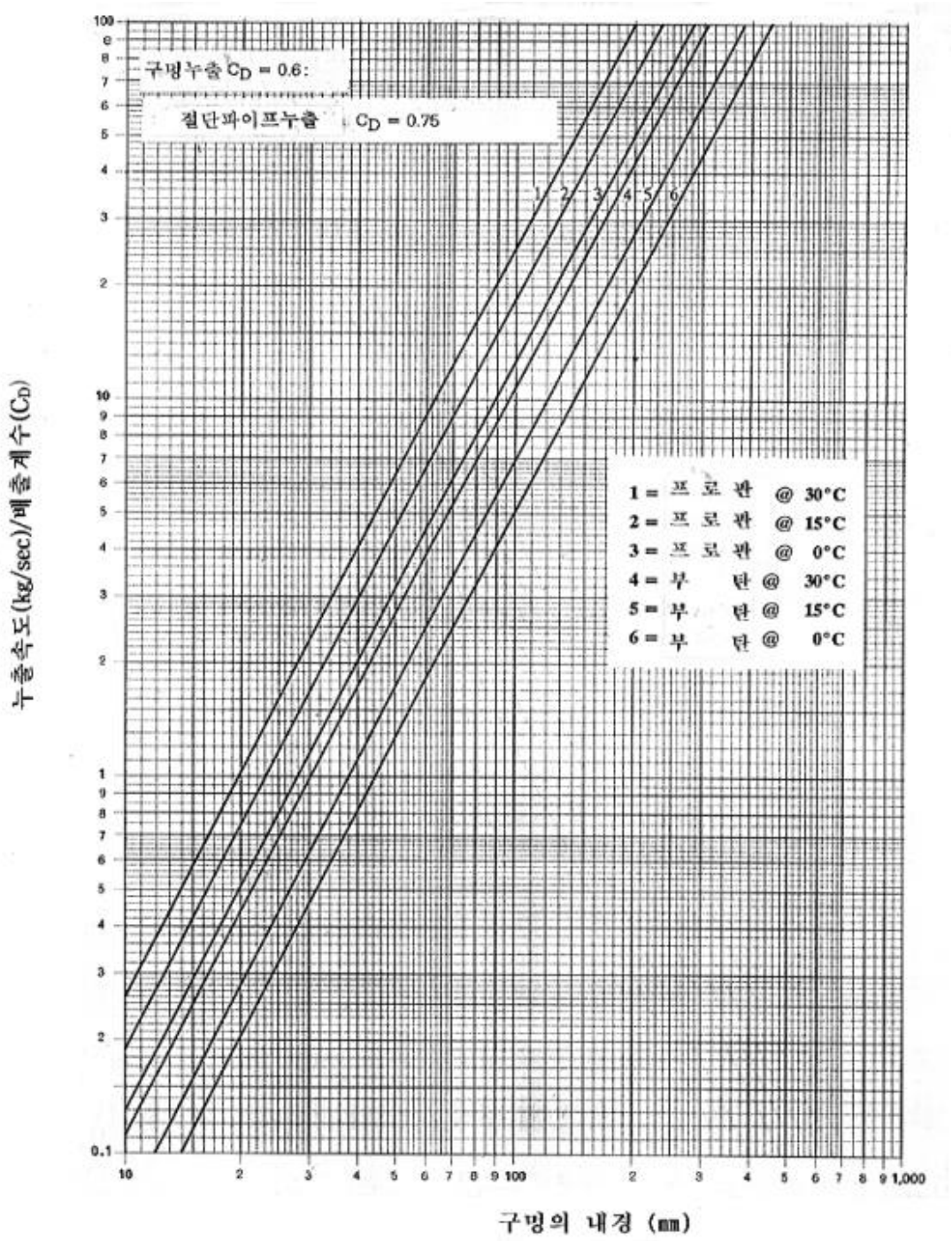


4.5 피해예측

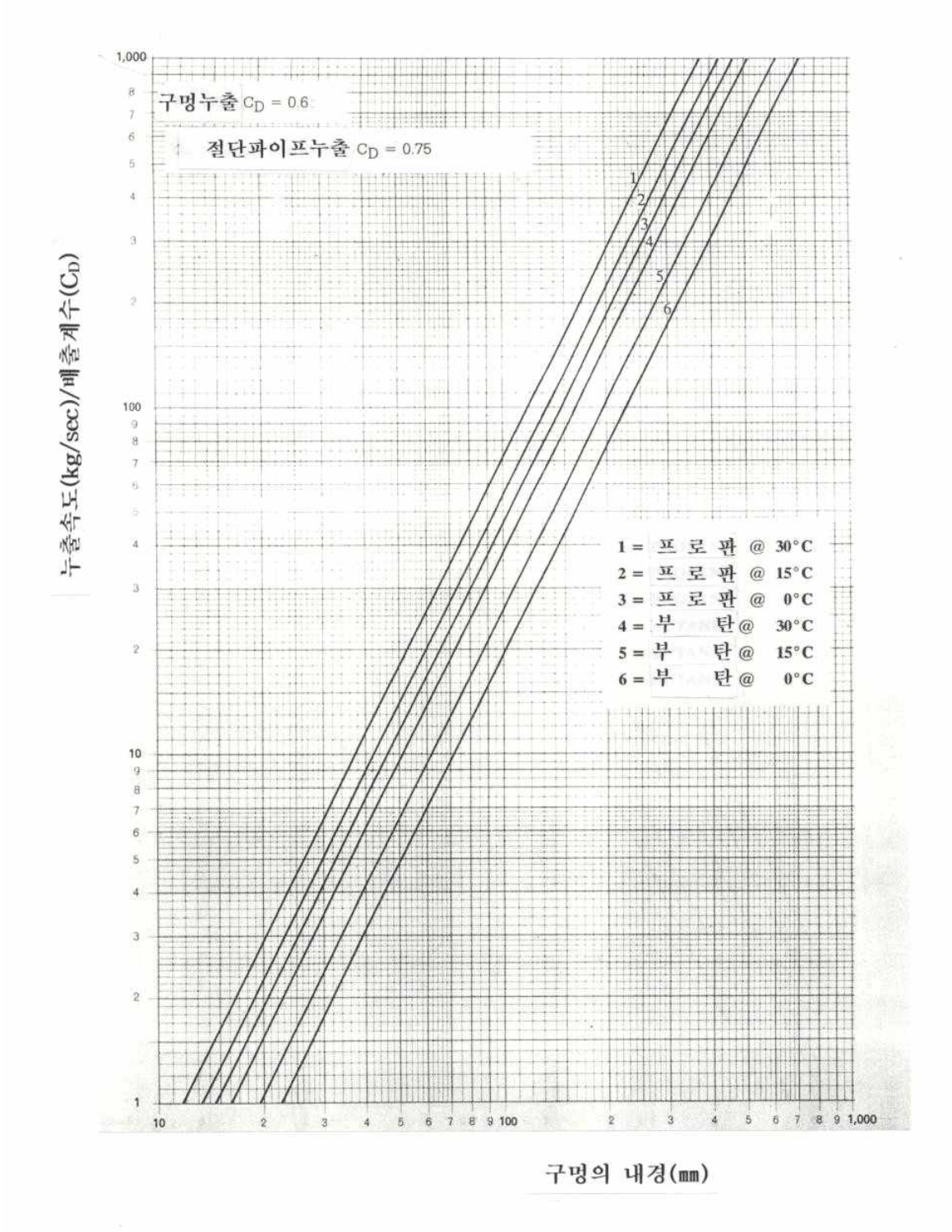
4.4항에서 제시한 바와 같이 거리별 과압을 알게 되면 그 지점에서의 피해는 간단히 예측할 수 있다. <별표 2>을 이용하여 과압에 의하여 주변 운전원 또는 설비에 미치는 피해의 크기를 객관적으로 산정한다.



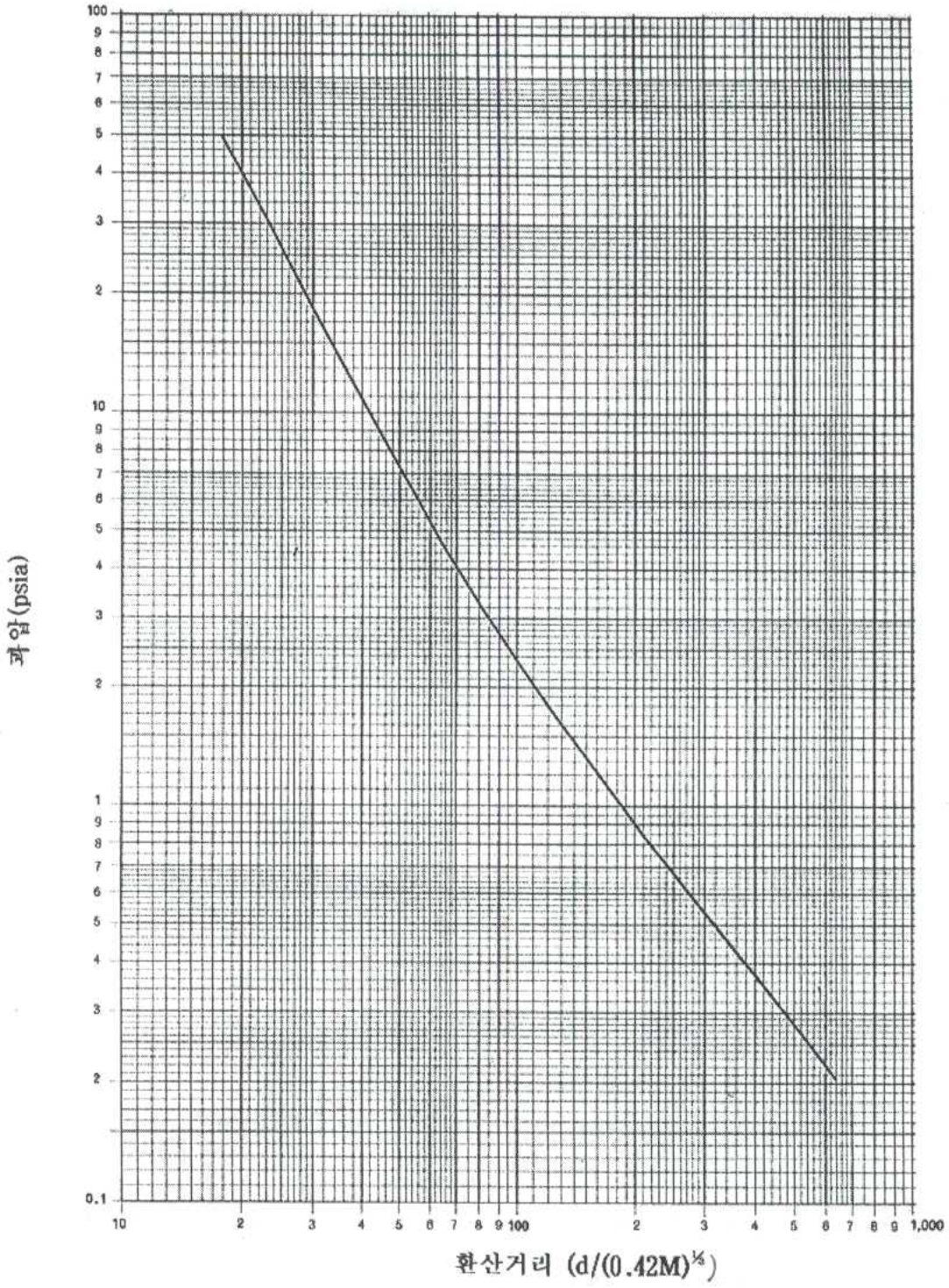
<그림 8-1> LPG의 액체 최대 방출속도



<그림 8-2> LPG의 가스 최대방출속도



<그림 8-3> LPG의 기·액 최대방출속도



<그림 8-4> LPG의 TNT 과압곡선

<부록 8-예>

폭발압 산정 예시

- 가득차 있는 LPG 탱크가 국부적으로 파손되어 지속적으로 LPG가 누출되었다.
- 누출된 LPG가 대기온도(15℃)에서 단열팽창을 하면서 증기 또는 에어로졸 형태로 되었다.
- 1톤의 LPG는 약 0.42톤의 TNT와 동등한 위력(폭발압)을 갖는다.

위와 같은 조건에서 100톤의 액체 프로판 저장탱크로 부터 62톤의 프로판이 누출되어 증기운폭발(VCE)사고가 났을때 300m 떨어진 지점에서의 과압은 다음과 같이 산출한다.

(1) 환산거리(Scaled Distance) 계산

$$\text{환산거리} = \frac{\text{거 리}}{(0.42\times\text{누출된 증기운의 무게(톤)})^{1/3}}$$

$$= \frac{300}{(0.42\times 62)^{1/3}} = 101\text{m/톤}^{1/3}$$

(2) 과압산출

<그림 8-4>로 부터 환산거리를 알면 과압(Over pressure)를 찾을 수 있다. 즉, 과압은 약 2.23psi가 된다.

따라서 100톤의 LPG 탱크에서 62톤의 프로판이 외부로 방출되어 체류 또는 증기운을 형성하고 있다가 증기운 폭발(VCE)되었을 경우 300m 지점에서의 과압은 약 2.23psi가 될 것이다.

(주) 이 예시에서 누출량을 62톤으로 가정하였으나 실제에 있어서는 <그림8-1> 내지 <그림 8-3>를 이용하여 누출량을 산출하여야 함.

기술지원규정 개정 이력

□ 개정일 : 2026. 1. 30.

○ 개정자 : 한국산업안전보건공단 전문기술실

○ 개정사유 : 확인(체계정비)

○ 주요 개정내용

- 국문 명칭(기술지침→기술지원규정) 개정

KOSHA GUIDE
기술지원규정

·규정번호 : C-C-56-2026
·심　　의 : 산업안전보건표준제정위원회
·공 표 일 : 2026. 1. 30.