

경계조건을 고려 도미노 효과를 최소화시키기 위한 폭발시설의 배치선정에 관한 연구

김병준, 안성준, 이증원, 이주영, 우경섭, 윤인섭
서울대학교 공정시스템 및 안전연구실

Study on the Optimal Locations of Explosive Facilities for Minimization of Domino Effects including Boundary Conditions Byung Jun Kim, Sung Joon Ahn, Joong Won Lee, Lee Joo Young, En Sup Yoon Process System and Safety laboratory, SNU

1. 서론

도미노 효과는 “해로운 물질의 누출이 사건의 증가를 이끌 경우 발생할 수 있는 위험을 고려한 인자”[1], 혹은 “어떤 시설의 위치와 접근성, 그리고 저장하고 있는 위험물로 인해 사고결과와 피해정도나 그 가능성이 증가되는 것”[2] 등으로 정의된다. Delvosalle[3]는 도미노 효과에 대해 “이전의 사고의 결과가 주요한 사고를 이끄는 공간적, 시간적으로 뒤따르는 일에 의해 증가되는 다단계로 이루어진 일련의 사건”으로 정의하고 있다. 일반적으로 하나의 시설에서 발생한 폭발 등의 사고가 주변의 다른 시설들에 2차, 3차 폭발 등을 유발하는 방법으로 영향을 미치는 것을 도미노 효과라고 할 수 있다.

어떤 시설이 폭발할 때, 다른 시설에 영향을 줄 수 있는 인자로는 화염(flame), 과압(overpressure), 파편(flying object)의 영향이 가장 중요하다. 비록 최초의 폭발이 경미할 지라도 이러한 세 가지 인자에 의해 연쇄적인 폭발로 이어지면 엄청난 피해를 초래한다. 도미노 효과에 대한 대부분의 연구는 사고 후 피해 규모 및 피해 반경의 정량적 분석[4], 시나리오 작성 등을 중심으로 이루어졌다. 최근의 연구에서는 시설물의 설계 및 배치 단계에서 도미노 효과의 영향을 최소화하기 위한 폭발시설의 배치를 비선형 방정식으로 최적화하였으나[5] 입지 조건을 고려하지 않아 폭발시설의 배치가 부지의 가장자리로 배치되는 결과를 보여주었다. 실제 시설의 주변 부지에는 다른 시설물 혹은 주거지역이 존재할 수도 있으므로 부지의 입지 조건을 고려해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 경계조건을 고려하여 도미노 효과를 최소화할 수 있는 알고리즘을 통해 가로 2km, 세로 1km의 직사각형 부지에 100ton의 LPG 저장탱크 n개의 배치를 수행하였다.

2. 이 론(실험 및 방법)

2-1. 화염(flame)

화염의 영향에 대한 연구는 비교적 많이 이루어져있다. 일부의 논문[6, 7]에서 액화된 프로판 혹은 LPG 의 BLEVE fireball의 크기에 관하여 다음과 같은 관계를 보여주었다.

$$R = 3m^{0.33}$$

m =프로판의 질량(kg), R =fireball의 반지름

fireball에서 멀리 떨어질수록 열에 의한 영향은 감소한다. Crawley[8]에 의하면 fireball의 반

지름 R에서 거리 S만큼 떨어진 곳에서 받는 열 플럭스(heat flux)의 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$S = R \left[\frac{Q}{f} \right]^{0.5}$$

Q =emissive power(kWm^{-2})

f =거리 S에서의 flux(kWm^{-2})

으로 주어진다. 위의 식에서 열플럭스 f 와 거리 S 사이에는 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$f \propto \frac{1}{S^2}$$

한편, 복사열에 의해 입는 피해에 대해 표1과[9] 같은 연구결과가 있다.

Radiation intensity(kW/m^2)	observed Effect
37.5	공정의 시설물을 파괴하기에 충분
25	나무가 오랫동안 노출되었을 때, 점화되기에 충분한 최소의 에너지(nonpiloted)
12.5	플라스틱 관이 녹음, 나무가 발화하기에 충분한 최소의 에너지(piloted)
9.5	8초 후에 고통을 느끼며, 20초 후에 2도화상을 입음
4	20초 이내에 보호하지 않으면 고통을 느끼기에 충분함, 물집이 생길수 있음, 치사율 0%
1.6	오랫동안 노출되어도 이상없음

표 1 복사열에 의한 영향(World Bank, 1985)

fireball 표면의 emissive power를 $300kWm^{-2}$ 으로 가정하면, 폭발시 주변 부지의 시설물을 파괴하지 않으려면 경계로부터 최소 2.8R의 거리를 이격시켜야 한다.

2-2. 과압(overpressure)

시설의 폭발시 과압에 의한 2차적 피해는 TNT 당량법을 주로 사용하며, 많은 실험적 데이터가 도출되어 있다. Birk[10]에 의하면 액화 프로판은 TNT 당량의 1.3%에 해당하는 에너지를 내며, saturated vapour에서는 TNT 당량의 2.7%에 해당하는 폭발력을 갖는다.

또한 kinney와 Graham[11]에 따르면 과압에 의한 손상의 정도는 표 2 와 같다.

압력	손상
30~50mbar	창문 파손
70~90mbar	작업자 쓰러짐
350~1000mbar	고막 손상
2000~5000mbar	폐 손상

표 2 과압에 의한 손상

Birk의 실험적 데이터에 따르면 70~90mbar의 과압을 나타내는 거리는 대략 2R 정도이다. 따라서 폭발시설 경계 밖의 사람이 쓰러지지 않기 위해서는 경계로부터 2R의 거리를 이격해야 한다. 여러 문헌 및 논문[5,9]에 의하면 과압에 의한 영향도 화염에 의한 피해와 같이 거리 S 에 관한 함수로 나타낼 수 있으며 다음과 같은 관계를 보인다.

$$P \propto \frac{1}{S^2}$$

2-3. 파편(flying objects)

많은 연구 결과에서[10,12] 시설의 폭발시 파편에 의한 효과는 거리 r과 파편이 r보다 멀리 날아갈 확률 또는 r보다 멀리 날아가는 파편의 비율의 관계로 표현된다. 멕시코 시티의 LPG 폭발 사고에서 얻은 실험식에 의하면 그 관계는 다음과 같다.[12]

$$P = e^{-0.004r}$$

P=r보다 멀리 날아가는 파편의 비율

r=폭발원으로부터의 거리(m)

따라서 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 이하의 파편만 부지 밖으로 나가게 하기 위해서는 경계와의 거리가 각각 576m, 402m, 301m, 229m, 173m 이상이 되게 배치하여야 한다.

이외의 많은 문헌에서 $P = e^{-kr}$ 의 관계를 가짐을 알 수 있으며 k의 값은 양수로서 폭발 시설 및 저장물질의 양과 종류에 의해 결정되는 수치이다. 최근의 연구 결과[5]에 의하면 도미노 효과를 최소화하기 위한 폭발시설의 배치에 있어서 목적함수가 다름에도 불구하고 화염, 과압에 의한 효과를 고려한 결과와 파편의 영향을 고려한 결과는 거의 일치함을 알 수 있다.

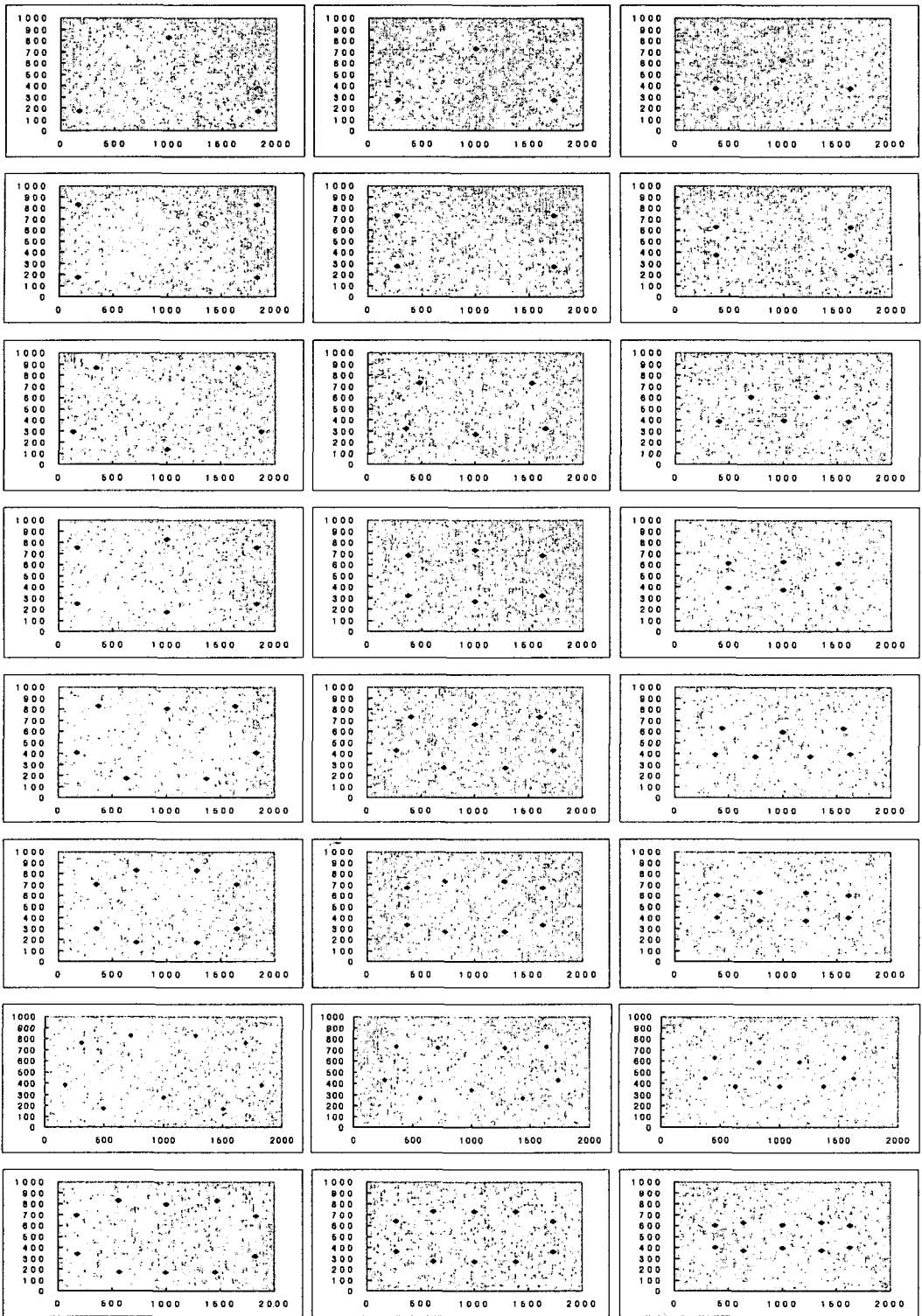
3. 실험(결과 및 고찰)

3-1. 문제에 대한 분석

본 연구에서는 가로 2km 세로 1km의 부지에 100ton의 LPG 탱크를 배치하는 것으로 가정하여 최적화를 수행하였다. 앞서 제시된 $R = 3m^{0.33}$ 식에 의하면 fireball의 반지름 R의 값은 약 134m이다. 따라서 2R=268m, 2.8R=375m가 되어 화염에 의해 주변의 시설물이 파괴되지 않게 하기 위해서는 375m, 부지 주변의 사람이 쓰러지지 않게 하기 위해서는 268m의 경계로부터의 이격거리가 각각 필요하며, 밖으로 나가는 파편이 50%이하가 되게 하기 위해서는 173m의 이격거리가 필요하다는 것을 알 수 있다.

이외에도 여러 가지 다른 기준들을 적용할 수 있으나, 주변부지에의 충분한 안전을 보장할 수 있는 정도의 기준에 의하여 계산하면 저장시설간의 거리가 과도하게 인접하게 되어 의미없는 결과가 도출될 것이다. 예를 들어 20%의 파편만이 밖으로 나가게 하려면 가로 2km 세로 1km의 부지에서 주변에 402m씩을 남기고 시설을 배치해야 하므로 가로 1200m 세로 200m의 부지만 활용할 수 있게 되어 폭발시설간의 충분한 거리를 이격할 수 없다.

본 연구에서는 화염, 과압, 파편에 의한 영향을 거리의 함수로만 표현하였으며, 화염과 과



(a)

(b)

(c)

그림 1. n개의 LPG 탱크가 폭발하였을 때 (a)부지밖으로 나가는 파편의 비율이 50%이하가 되게 하는 (b)부지 밖의 작업자가 쓰러지지 않게 하는 (c) 주변부지의 설비가 파괴되지 않게 하는 최적의 배치

압에 의한 영향은 r^{-2} 에 비례하고, 파편에 의한 영향은 $e^{-0.004r}$ 에 비례하는 것으로 간주하여 n개의 LPG탱크에 대해 도미노 효과를 최소화시키는 배치를 찾았다. 동시에 부지 경계로의 영향을 고려하여 탱크가 경계의 173m, 268m, 375m 이내로 각각 접근하지 않도록 제약 조건을 설정하였다.

본 연구의 수행에서는 GAMS NLP tool을 이용하였다.

3-2. 실험결과

화염, 과압, 파편에 의한 배치 결과는 같은 크기와 모양의 부지에서는 거의 동일하게 나타난다는 사실이 이미 밝혀져 있으므로 여기에서는 화염, 과압에 의한 영향을 고려한 결과만을 나타내었다. 그림 1 은 $n=3\sim 10$ 일 때의 각각의 제한조건 하에서 도미노 효과를 최소화할 수 있는 LPG 탱크의 최적 배치를 나타낸다. 각각에서 (a)에 해당하는 그림은 모든 LPG 저장시설이 부지의 경계에서 173m 이내로 접근할 수 없게 하는 제한조건을 설정하여 폭발시 외부로 날아가는 파편의 비율이 50%이하가 되도록 설정한 것이며, (b)에 해당하는 그림은 폭발사고시 과압에 의하여 부지밖에 있는 사람이 쓰러지지 않도록 268m 이상 이격시킨 경우이다. (c)는 화염에 의하여 부지 밖의 다른 시설이 파괴되지 않도록 하기 위하여 375m의 이격거리를 확보한 경우이다. 만약 각각의 경우에 (c)와 같은 시설의 배치를 한다면 세 가지 제한조건을 모두 만족시킬 수 있지만 폭발시설 간의 거리는 더욱 근접하게 됨으로서 폭발 사고 시 도미노 효과에 의한 위험도는 더 증가하게 된다.

4. 결론

도미노 효과는 여러 개의 폭발 가능한 시설이 일정한 부지 내에 배치되어 있을 때 하나의 시설에서 발생한 폭발 등이 인접한 다른 탱크의 2차 폭발을 야기하여 피해를 배가시키는 원인이 된다. 따라서 도미노 효과를 최소화 시키는 시설의 배치를 고려하여 설계하여야 한다. 또한 폭발시설과 인접하여 다른 시설이나 주거지역 등이 있을 수 있으므로 만약의 폭발 사고 시 외부로 향하는 피해를 최소화할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 도미노 효과를 최소화시키는 시설의 배치를 선정함에 있어서 경계조건을 고려하여 외부로의 위험을 최소화시키는 방법을 제안하였다. 특히 100ton의 LPG 탱크 3~10개를 가로 2km 세로 1km의 부지에 적절히 배치하여 부지 밖으로 나가는 파편의 비율이 50%이하가 되게 하는 제한조건, 부지 밖의 작업자가 쓰러지지 않게 하는 제한조건, 주변부지의 설비가 파괴되지 않게 하는 제한조건을 각각 적용하였다. 그러나 제한조건이 엄격할수록 폭발 사고 시 외부에서 받을 수 있는 피해는 줄어들지만 폭발시설간의 거리는 가까워짐으로써 잠재적인 위험의 증가를 야기할 것으로 예상된다. 따라서 도미노 효과와 경계조건에 대한 후속 연구가 필요하다.

5. 참고문헌

1. Lees, F. P. ; Loss Prevention in the Process Industries, 593-602, Butterworth.(1998)
2. Council Directive 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, Official Journal of the European Communities, No. L 10/13 of 14 January (1997)
3. Delvosalle Ch., "Domino effects phenomena: Definition, Overview and Classification,"European Seminar on Domino Effects, Leuven, Belgium, Federal Ministry of Employment, Safety Administration, Direction Chemical Risks, Brussels, Belgium, 5-15 (1996)
4. Cozzani V., Ernesto Salzano; "The Quantitative Assessment of Domino Effects

- Caused by Overpressure Part I. Probit Models," J. Hazardous Materials., Vol. 107, Issue 3, 67-80 (2004)
5. 이주영, "도미노 효과를 최소화시키기 위한 폭발시설의 배치선정", 서울대학교 대학원, (2005)
 6. Moorehouse, J. and Pritchard, M. J. 'Thermal radiation hazards from large pool fires and fireballs, a literature review', IChemE Symposium Series No. 71, Pergamon Press, Oxford, (1982)
 7. Roberts, A. F. 'The effect of conditions prior to loss of containment on fireball behavior, assessment of major hazards', IChE Symposium Series No. 71. Pergamon Press, Oxford, (1982)
 8. Crawley, F. K. 'The effects of the ignition of a major fuel spillage, assessment of major hazards', IChE Symposium Series No. 71, Pergamon Press, Oxford, (1982)
 9. AIChE CCPS, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd ed., NY, (1999)
 10. Birk, A. M., "Hazards from Propane BLEVEs: An Update and Proposal for Emergency Responders," J. Loss Prevention, Vol. 9, No. 2., 173-181(1996)
 11. Kinney, G. F. and Graham, K. J. 'Explosive shocks in air', Springer, New York, 1985
 12. Pietersen, C. M., "Analysis of the LPG-Disaster in Mexico City," J. Hazardous Materials, 20, December, 85-107 (1988)