

# 해양플랜트 폭발사고 방지를 위한 가스감지기 위치 선정 방법 연구

손정민<sup>1</sup>·백점기<sup>2,3</sup>·김상진<sup>3,†</sup>  
부경대학교 조선해양시스템공학과  
부산대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>  
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원<sup>3</sup>

## Development of Gas Detector Location Index Technique to Prevent Explosion Accidents of Offshore Plant

Jung Min Sohn<sup>1</sup>·Jeom Kee Paik<sup>2,3</sup>·Sang Jin Kim<sup>3,†</sup>  
Dept. of Naval Architecture and Marine Systems Eng., Pukyong National University<sup>1</sup>  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng., Pusan National University<sup>2</sup>  
The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University<sup>3</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Release of hazardous and flammable gas is a significant contributor to risk. The ignition of flammable gas clouds can lead to explosion accidents in the offshore installations. A gas detector, which is one of active protect systems, brings the module into a safe state through emergency shut down processes and reduces the damage by eliminating the dangerous releases. It is critical to understand the gas release, the wind field, and the complex geometry of installations to determine gas detector placement. In this paper, the Gas detector Location Index (GLI) which is a novel index for optimal detector location determination to efficiently prevent explosion accident using probabilistic approach.

**Keywords** : Offshore installations(해양플랜트), Explosion accidents(폭발사고), Gas detector(가스감지기), Gas detector location index(GLI, 가스감지기 위치인덱스)

### 1. 서론

해양플랜트산업은 유정처리를 함에 있어 필연적으로 유해한 가스가 발생하며, 유럽연합은 (ECR, 2012)은 해양구조물 사고원인과의 심각성을 보고하고 있다 (Table 1). 특히, 가연성 가스의 누출은 해양플랜트 사고 중 가장 빈번하고 심각한 결과를 야기하는 원인 중 하나로 가연성 가스구름의 점화로 인해 Piper Alpha 참사와 같은 대형 화재·폭발사고를 발생하였다 (Cullen, 1990).

이러한 사고를 미연에 방지하기 위해 API (2007)는 연소가스가 누출될 경우 충분한 통풍 또는 가스감지기를 통해 안전성을 확보해야한다고 명시되어있다. 가스감지기는 능동적 안전 시스템 (active safety system)으로 가연성 가스가 밀집된 곳에 배치되며, 최저연소한계점보다 낮게 설정된 농도에서의 가스를 사전에

감지하여 경보 및 차단함으로써 인명과 재산상의 재해를 예방하고 피해를 최소화 할 수 있다.

Fig. 1은 가스 누출 후 가스감지기의 발효에 따른 누출 가스 부피변화를 예시로 보여준다. 가스감지기가 가스를 감지한 후 생산시스템을 중단하기에 가연성 가스와 등가성 가스 (가연성 가스의 농도를 1로 평균화 시켰을 경우)의 부피(가스 누출량)가 줄어들음을 확인 할 수 있으며, 이에 따라 폭발 사고를 예방 혹은, 피해를 줄일 수 있다.

즉, 해양플랜트의 안전성은 가스감지 시스템의 효율성과 유효성에 크게 의존된다고 해도 무방하다. 그러나, Thyer (2005)는 가스감지기의 작동율은 감지 실패율 보다는 높지만, 해양플랜트 구조의 복잡성, 가스종류의 다양성, 가스트랩 등으로 인해 전체 가스 누출에서 44%가 미감지 된다고 보고하였다. 또한, 통풍구의 양식, 크기의 다양성과 모듈구성의 복잡성은 가스감지기의 위치결정을 어렵게 하며, 가스 감지기농도 보장하지 못한다.

Table 1 Extent of damage in relation with the main event (European Commission Report, 2012)

Event	Insignificant	Minor	Sever	Significant
Anchor mooring failure	37	45	0	37
Blowout	138	54	6	27
Breakage/fatigue	21	54	96	197
Collision	106	186	68	174
Crane accident	67	20	0	5
Explosion	46	34	10	28
Dropped object	876	69	14	74
Fire	592	132	86	100
Grounding	2	10	21	29
Helicopter accident	30	27	0	0
Out of position	32	15	2	5
Fluid/gas release	1047	132	125	40
Towline failure	53	1	3	2
Well problem	211	14	0	8

- Purpose: leakage/ area monitoring, personal protection
- Operating conditions: temperature, pressure, humidity
- Gas type: flammable/ toxic/liquefied gases
- Flow velocity, flow direction, low vibration, electromagnetic interference, accessibility

HSE (2004)는 프로세스 엔지니어와 매니저를 위한 가연성 가스감지기 선택, 설치, 사용, 유지 등에 관한 지침서를 제공한다. Seo, et al. (2013)은 가스감지기의 효율적인 작동을 위하여, 2차원적 방법을 이용하여, 가스감지기 위치 최적화 방법을 제시하였다. 또한, Legg, et al. (2013)은 CVar(Conditional Value at Risk)기반 통계기법을 사용하여 석유 화학 공정설비의 가스감지기 최적배치를 연구하였다.

본 연구에서는 통계자료기반 확률론적 방법을 적용하여 인덱스 기법을 도입하고, 3차원 가스구름 계산 및 이를 이용한 가스감지기 위치 최적화기법을 개발하였다. 확률적 방법을 토대로 가스 확산 시나리오를 선정하고, 3차원 CFD(Computational Fluid Dynamics)해석을 수행하였다. 가스 확산결과를 바탕으로 가스감지기 위치인덱스(gas-detector location index)를 적용하였으며, 가스감지기 위치 최적화를 수행하였다. 또한, 기존의 설치 위치에 따른 감지 결과와 비교를 통하여, 제시된 기법의 효율성을 검증하였다.

## 2. 가스감지기 위치인덱스

본 연구에서는 가스감지기 위치 최적화를 위하여, 가스감지기 위치인덱스(GLI) 를 개발하였으며, 아래와 같다.

$$Id_i = \sum_{j=1}^{TS} BN_{i,j}, \quad i = 1, 2, 3 \dots TM \quad (1)$$

$$BN_{i,j} = \begin{cases} 0 & (ER_{i,j} < LFL) \\ 1 & (ER_{i,j} \geq LFL) \end{cases} \quad (2)$$

$$ER = \frac{(m_{fuel}/m_{oxygen})_{actual}}{(m_{fuel}/m_{oxygen})_{stoichiometric}} = \frac{(V_{fuel}/V_{oxygen})_{actual}}{(V_{fuel}/V_{oxygen})_{stoichiometric}} \quad (3)$$

여기서,  $Id_i$  (Index) 는 감지 횟수,  $BN_{i,j}$  은 임의수 ( $ER_{i,j}$  이 시간에 상관없이 LFL보다 클 경우  $BN_{i,j}$  은 1, 또는 0),  $TS$ 는 총 시나리오 수,  $TM$ 은 총 모니터링 위치 수이다.

$ER_{i,j}$ (Equivalent Ratio)은 등가비로 식 (3)과 같이 표현되며,  $m_{fuel}$ ,  $m_{oxygen}$  은 연료와 산화제의 실제와 화학량적 조건에서의 질량이며,  $V_{fuel}$ ,  $V_{oxygen}$  은 해당조건에서의 부피를 말한다. 등가비는 일정량의 이론적인 연료와 공기의 혼합비에 대하여 실

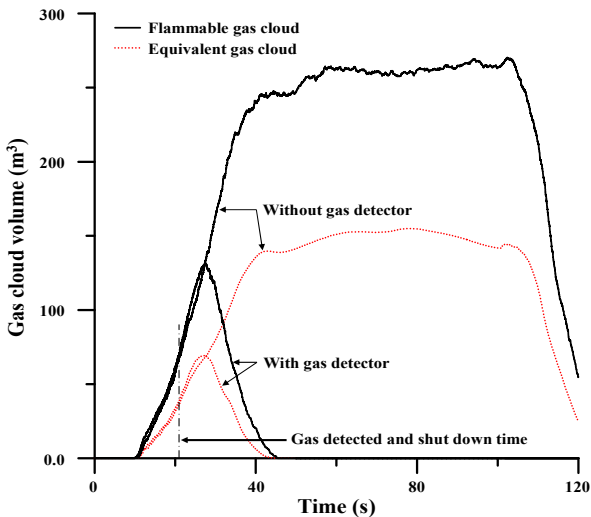


Fig. 1 An effect of gas detector on gas cloud volume

ANSI/ISA (2013)과 API (1991)에 따르면, 설비 특수성으로 인해 가스감지기의 설치 개수와 위치에 대해 정확한 답을 제시하지 못하고 있지만, 기본적으로 위험도 평가에 따른다고 명시되어 있다. 또한, 가스감지기 위치를 결정하기 위해서는 아래요소를 반드시 고려하여야한다.

제 연소되는 연료와 공기의 혼합비로 등가비가 1인 경우 완전연소로서 연료와 산화제의 혼합이 이상적이다. LFL(Low Flammable Limit)은 최저연소한계점(최저 폭발한계점)으로 연소 가능한 범위 중 최소농도이다.

GLI는 임의의 시나리오에서 감지기 설치가 가능한 가상의 위치에서 가연성가스 (점화가능한 가스, 하한값 이상)의 발생수를 표현함으로써 가스 확산을 방지할 수 있는 위치가 선정된다. 또한, 사용자에게 따라 기준 값을 변경하여 사용 할 수 있도록 개발되었다.

Fig. 2는 하나의 모니터링 위치에서의 임의의 시나리오에서의 시간별 가스구름 등가비로 BN값을 정의하기 위한 예시이다. 시간에 관계없이 LPG가스의 최저연소한계점 (ER=0.531) 보다 큰 경우 가연성가스가 감지되며, 가스확산이 진행되더라도 한계점의 초과하지 않을 경우 0을 가진다. 다수의 가스 확산 시나리오를 종합하여, 하나의 모니터링 위치에서의 최종 인덱스가 결정되며, 인덱스의 값이 클수록 가스감지기의 설치가 요구된다.

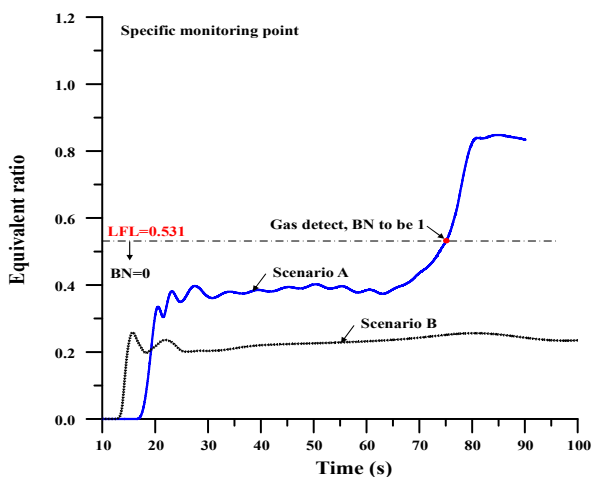


Fig. 2 Scheme of calculation of gas detector location index

### 3. 적용 예시

가스감지기 위치인덱스기법을 적용하여 FLNG 상부구조물 가상의 모듈(Fig. 3)을 가스감지기 최적설치 위치를 도출하였다. 가스감지기는 확률적으로 가스가 가장 많이 위치하는 곳에 설치함이 효율적이며, 이를 위해 가스 확산해석이 요구된다 (FLACS, 2016).

Fig. 4와 같이 가스 확산해석은 가스 확산에 영향을 미칠 수 있는 모든 인자들을 변수로 정하고, 구조물의 복잡성, 가스농도, 바람 및 가스 확산방향, 누출 위치 및 량에 대하여 히스토리컬 데이터와 설계 레이아웃을 기반으로 확률밀도함수를 구성하였다. 각 변수는 시나리오 개수만큼 동일한 확률인 대푯값을 가지고 라틴 하이퍼큐브 기법을 통해 50개의 확산 시나리오가 선정되었다.

Fig. 5는 모니터링 위치의 예시이며, 최대한 많은 위치에서 감

지가 이루어 질 수 있게 1m간격으로 높이 당 204개씩 총 816개를 배치하였다. 모듈의 외곽의 경우 압력용기, 파이프와 같은 가스 누출을 발생하는 장비가 없기에 제외하였다.

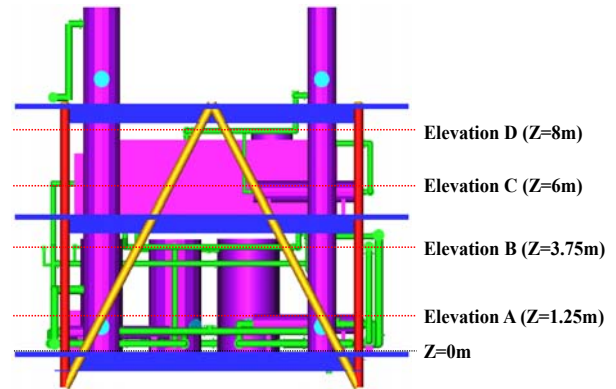


Fig. 3 Side (elevation) view of the target structure

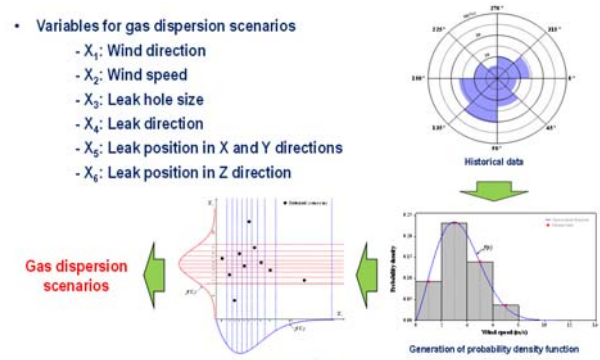


Fig. 4 Procedure for selection of gas dispersion scenarios (Kim, 2016)

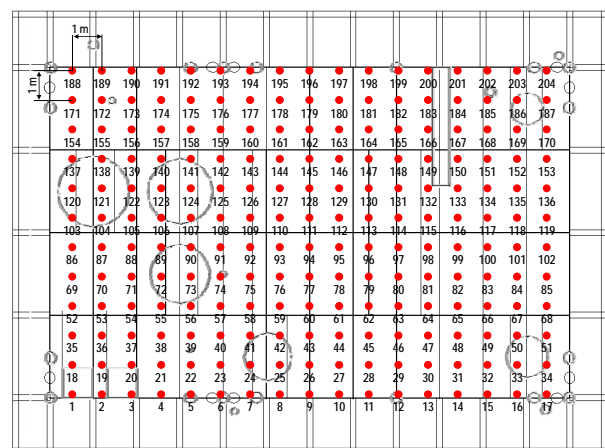


Fig. 5 An example for location of monitoring points

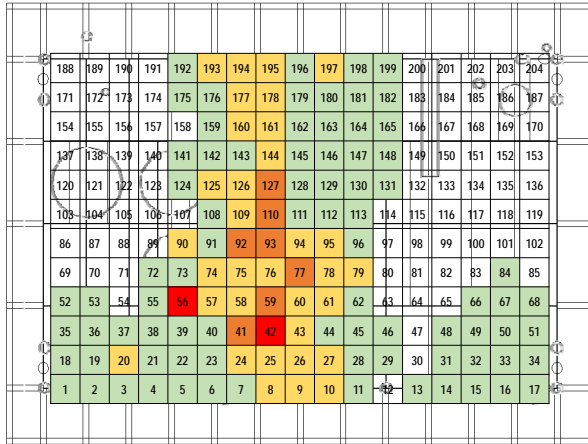
Table 2는 가상의 가스감지기 위치에서 해당 인덱스 값과 50개 시나리오의 평균 등가비를 정리하였으며, 인덱스 값이 2 이상인 경우만 수록하였다. 등가비는 실제 가스구름 농도와 이상적인 가스의 비로써 LFL과 UFL사이에서 연소가 진행되며, UFL 값이 클수록 가스 농도가 짙어져, 잠정적인 연소가능성을 가지고 있다.

Table 2 Calculated index at each monitoring location

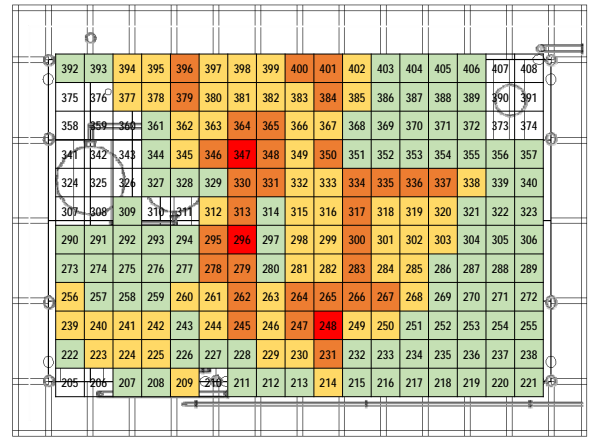
Point No.	Id.	Average ER	Point No.	Id.	Average ER	Point No.	Id.	Average ER	Point No.	Id.	Average ER
8	2	4.67E-02	178	2	2.95E-02	282	2	2.31E-01	364	3	1.31E-01
9	2	4.49E-02	193	2	2.98E-02	283	3	1.96E-01	365	3	9.27E-02
10	2	2.60E-02	194	2	3.11E-02	284	2	1.40E-01	366	2	6.78E-02
20	2	2.94E-02	195	2	3.27E-02	285	2	9.19E-02	367	2	3.59E-02
24	2	2.40E-02	197	2	3.50E-02	295	3	1.24E-01	377	2	2.33E-02
25	2	1.14E-01	209	2	2.24E-02	296	4	1.59E-01	378	2	7.32E-02
26	2	9.69E-02	214	2	1.71E-01	298	2	1.22E-01	379	3	7.92E-02
27	2	2.05E+00	223	2	5.10E-02	299	2	1.60E-01	380	2	8.09E-02
41	3	4.67E-02	224	2	5.12E-02	300	3	1.34E-01	381	2	8.06E-02
42	4	6.03E-02	225	2	4.78E-02	301	2	8.91E-02	382	2	6.63E-02
43	2	2.95E-02	229	2	4.91E-02	302	2	4.82E-02	383	2	6.23E-02
56	4	4.86E-02	230	2	7.15E-02	303	2	4.30E-02	384	3	4.10E-02
57	2	2.90E-02	231	3	9.56E-02	312	2	4.41E-02	385	2	3.35E-02
58	2	3.52E-02	239	2	2.21E-02	313	3	9.81E-02	394	2	2.87E-02
59	3	3.74E-02	240	2	2.43E-02	315	2	8.23E-02	395	2	5.27E-02
60	2	2.32E-02	241	2	3.50E-02	316	2	1.05E-01	396	3	7.63E-02
61	2	1.80E-02	242	2	3.21E-02	317	3	8.91E-02	397	2	7.59E-02
74	2	2.10E-02	244	2	3.62E-02	318	2	5.98E-02	398	2	6.95E-02
75	2	3.68E-02	245	3	8.33E-02	319	2	3.08E-02	399	2	5.77E-02
76	2	3.65E-02	246	2	9.29E-02	320	2	2.61E-02	400	3	6.17E-02
77	3	2.76E-02	247	3	1.21E-01	330	3	1.12E-01	401	3	3.72E-02
78	2	2.01E-02	248	4	1.38E-01	331	3	6.17E-02	402	2	2.80E-02
79	2	1.37E-02	249	2	1.26E-01	332	2	5.11E-02	429	2	3.64E-02
90	2	3.79E-02	250	2	1.15E-01	333	2	6.12E-02	446	2	3.59E-02
92	3	4.12E-02	256	2	2.50E-02	334	3	3.15E-01	463	2	3.42E-02
93	3	2.97E-02	260	2	3.62E-02	335	3	5.43E-02	467	2	4.01E-02
94	2	1.80E-02	261	2	5.12E-02	336	3	3.81E-02	480	2	3.63E-02
95	2	1.80E-02	262	3	1.73E-01	337	3	3.32E-02	482	2	2.56E-02
109	2	3.99E-02	263	2	1.85E-01	338	2	2.79E-02	484	2	3.57E-02
110	3	3.39E-02	264	3	1.98E-01	345	2	2.44E-01	518	2	2.71E-02
125	2	5.14E-02	265	3	2.42E-01	346	3	8.96E-02	533	2	2.17E-02
126	2	6.14E-02	266	3	2.16E-01	347	4	1.02E-01	704	2	6.77E-02
127	3	3.38E-02	267	3	1.70E-01	348	3	1.02E-01	705	2	7.41E-02
144	2	2.81E-02	268	2	1.30E-01	349	2	4.69E-02	721	2	1.72E-02
160	2	2.44E-02	278	3	5.54E-02	350	3	3.40E-02	722	2	3.43E-02
161	2	2.59E-02	279	3	1.78E-01	362	2	7.82E-02			
177	2	2.89E-02	281	2	1.88E-01	363	2	8.93E-02			

인덱스는 해당 위치에서의 LFL이상의 가스가 감지 된 횟수를 의미한다. 그러나, 표를 살펴보면 인덱스와 등가비의 상관관계가 항상 비례하지 않음을 알 수 있다. 예를 들어, ER 만 보고 가스 감지기 위치를 선정할 경우 가상의 위치 27번 에서 가장 큰 값 (ER=2.05)을 기록하여, 해당 위치에 감지기가 설치되어야 하지

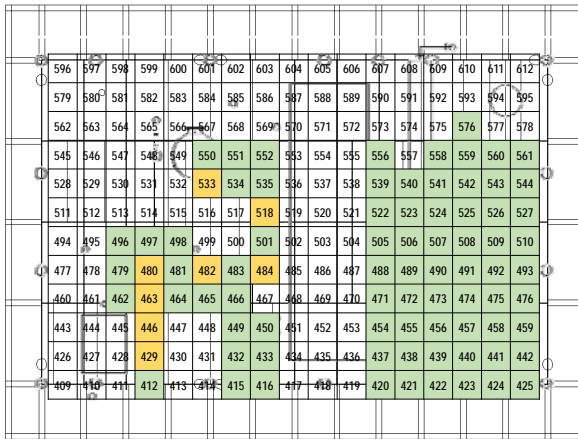
만, 해당 위치는 50개의 시나리오 중 2개의 시나리오에서만 가스 감지를 하였다. 반면 42번의 경우 ER=6.03e-02로 27번보다 작은 값이지만 4개의 시나리오에서 가스가 감지되었기에, 가스감지기를 설치할 경우 사고 방지에 효율적이다. 즉, 가스감지는 ER이 아닌 인덱스로 판단되어야함을 확인할 수 있다.



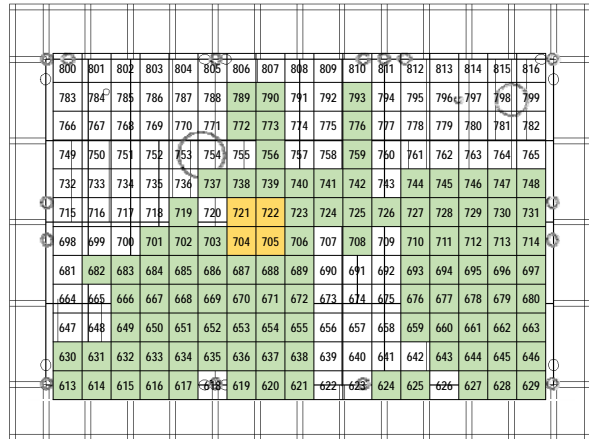
(a) Elevation A



(b) Elevation B

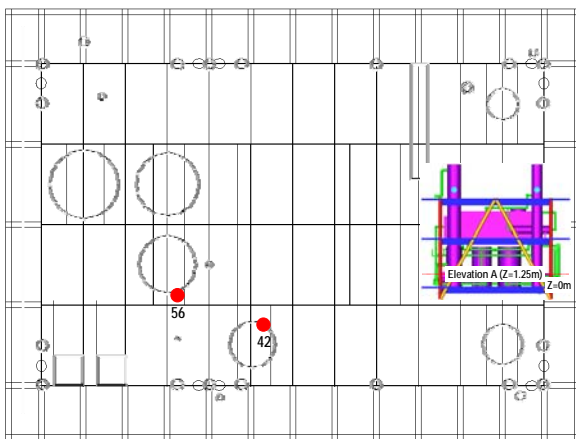


(c) Elevation C

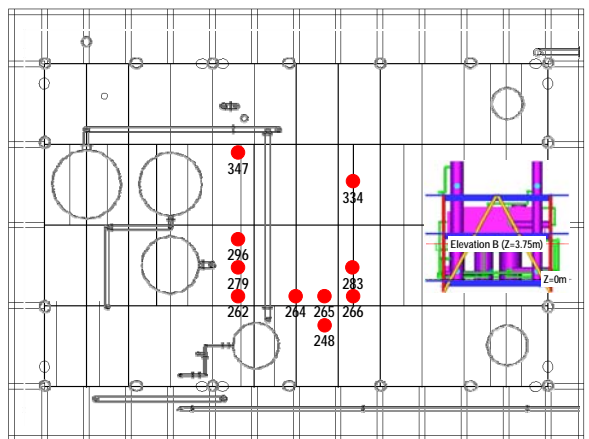


(d) Elevation D

Fig. 6 The results for gas detector location index at each elevation



(a) Elevation A (2 detectors)



(b) Elevation B (10 detectors)

Fig. 7 Selected top 12 ranked positions of gas detectors

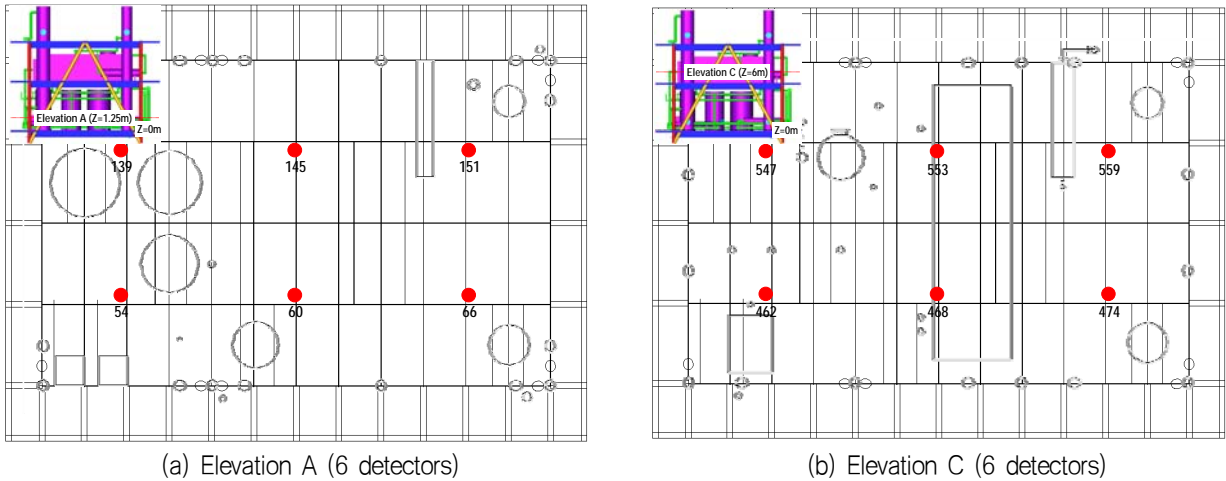


Fig. 8 Location of uniformly distributed 12 gas detectors (Case I)

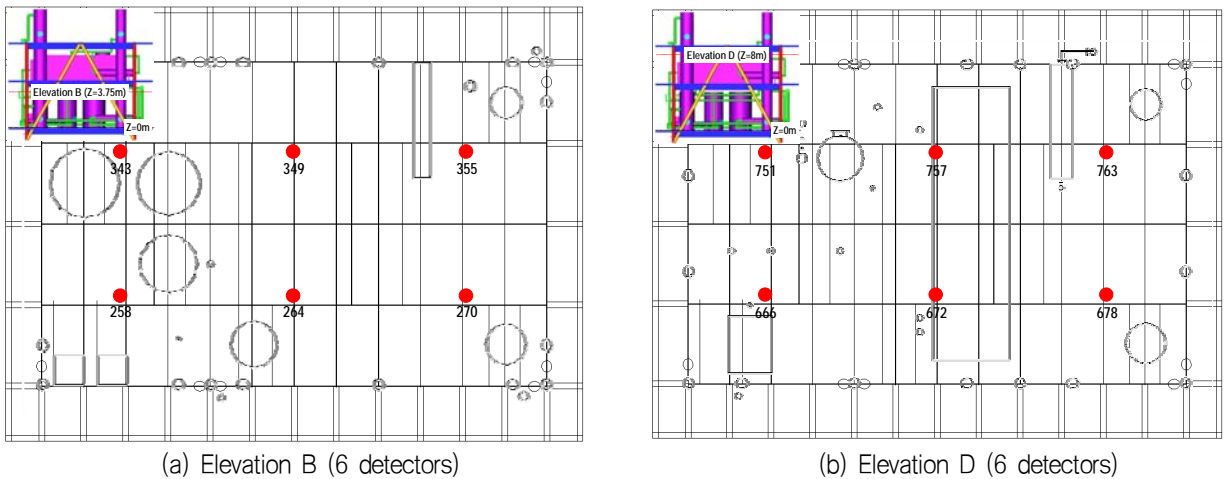


Fig. 9 Location of uniformly distributed 12 gas detectors (Case II)

Fig. 6은 가스감지기 위치인덱스 결과를 가시화한 그림으로 색이 짙어질수록 감지가 많이 되었음을 알 수 있으며, 해당 위치에 감지기 설치 필요하다. 또한, 상위 인덱스값이 A, B 높이에 집중된 것으로 보아 모듈 1층에서 가연성 가스 생성이 많았음을 예상 할 수 있다.

제시된 기법의 효율성을 검증하기 위하여, 감지기를 등분포로 위치시킨 경우와 비교를 하였다. Fig. 7은 인덱스기법을 기반으로 배치하였으며, 인덱스 값이 큰 순으로, 동일값일 경우 ERI 큰 순으로 상위 12개의 최적 위치를 선정하였다.

기존 방법은 각 데크의 상·하부 설치 경우를 구별하여 분석하기 위하여, 모듈의 층(2개층)별로 6개의 가스감지기를 균일하게 배치하였으며, 데크의 하부에 위치한 경우 (Fig. 8), 데크상부에 위치한 경우 (Fig. 9)를 비교하였다.

Fig. 10은 50개의 가스 확산 해석 결과로 3가지의 가스감지기 설치 경우와 설치 않았을 경우에 따른 등가 가스구름을 비교하였다. 등가 가스구름크기가 커짐은 해당 크기만큼 점화될 수 있는 범위가 커짐을 말하며, 즉, 폭발확률이 상승함을 의미한다. 그림에서 선형직선은 가스감지에 실패하였음을 의미하며, 삼각구역은 가스가 감지되어 가스구름크기가 줄어들었음을 보여준다.

가스감지기를 설치하지 않았을 경우 모든 시나리오에서 직선에 놓였기에 가스구름크기에 변화가 없음을 알 수 있다. GLI기법 적용경우는 7개의 시나리오, case 2는 5개, case 1은 4개 순으로 가스감지가 이루어졌다. 그러나, 12개의 가스감지기를 설치했음에도 불구하고, 모든 경우 가스 확산을 막지 못했으며, 감지유무는 가스구름크기와 무관하다.

Fig. 11과 Table 3은 등가 가스구름 크기별 확률 분포를 나타내며, 확산결과를 바탕으로 확률적으로 최적화된 범주로 구분하였다. 가스감지기 설치유무에 따라 가스구름의 크기가 현저하게 줄어들었으며, 가스감지기 설치 경우 중에서도 GLI기법이 작은 구름 크기분포가 가장 많았다. 이에 따라, 제시된 가스감지기 최적위치 선정 방법이 기존의 방법보다 효율적임을 알 수 있다.

Fig. 12와 Table 4는 전체 50개 시나리오의 가스량을 모두 합하여 비교 한 것으로, GLI 기법이 설치되지 않았을 경우보다 38.8% 감소하였으며, 기존의 기법보다 최대 15%정도 개선효과를 보인다. 또한, case 2와 case 1보다 가스량이 줄어든 이유는 높은 데크 B에 집중되기 때문이다.

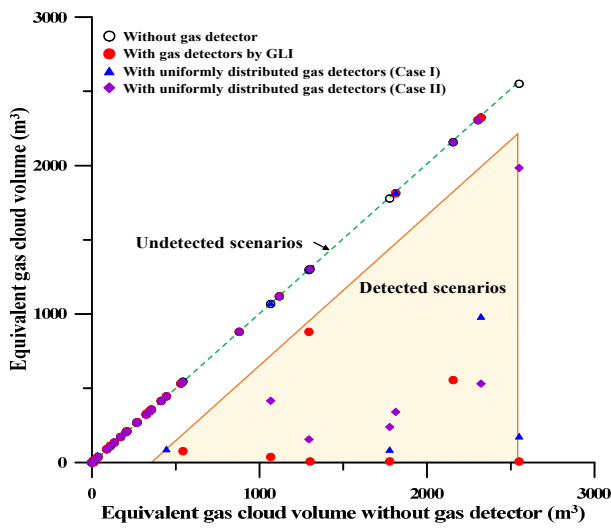


Fig. 10 Comparison of equivalent gas cloud volume with or without gas detectors

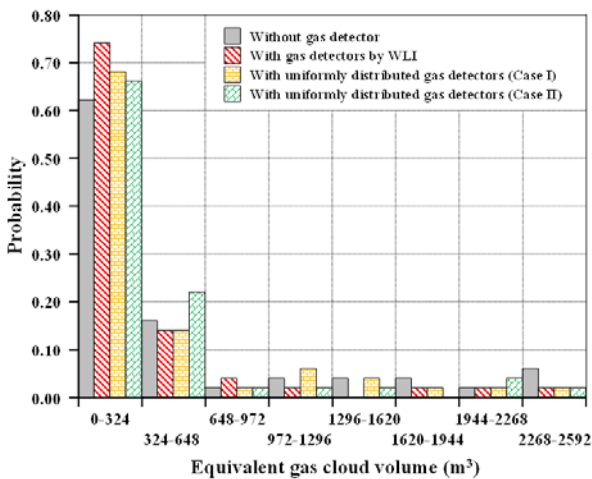


Fig. 11 Probability of equivalent gas cloud volume with or without gas detectors

Table 3 Probability of equivalent gas cloud volume with or without gas detectors

Equivalent gas cloud volume (m <sup>3</sup> )	Probability			
	W/o gas detector	With gas detectors by GLI	*Case I	*Case II
0-324	0.62	0.74	0.68	0.66
324-648	0.16	0.14	0.14	0.22
648-972	0.20	0.40	0.20	0.20
972-1296	0.40	0.20	0.60	0.20
1296-1620	0.40	0.00	0.40	0.20
1620-1944	0.40	0.20	0.20	0.00
1944-2268	0.20	0.20	0.20	0.40
2268-2592	0.60	0.20	0.20	0.20
Total	1.00	1.00	1.00	1.00

\*: with uniformly distributed gas detectors

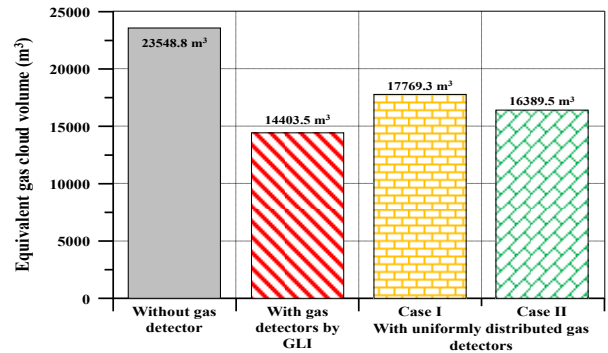


Fig. 12 Histogram of total equivalent gas cloud volume of 50 dispersion scenarios

Table 4 Effect of gas detectors on total equivalent gas cloud volume of 50 dispersion scenarios

Effect of gas detectors	Total equivalent gas cloud volume (m <sup>3</sup> )	With gas detectors / without gas detector
Without gas detector	23548.8	1.000
With gas detectors by GLI	14403.5	0.612 *(38.8%)
With uniformly distributed gas detectors	Case I	0.755 *(24.5%)
	Case II	0.696 *(30.4%)

\*: reduction ratio

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 해양플랜트 폭발 사고를 보다 효율적으로 사전 방지하고 피해를 최소화시키기 위한 가스감지기 위치 선정 기법을 소개하였다. 확률적인 방법을 바탕으로 가스 확산 시나리오를 선정하였고, 결정된 50개의 시나리오에서 가스 확산 전산유체해석 수행한 결과를 토대로 최적의 가스감지기 위치를 선정하였다.

본 연구의 결과분석을 통해 가스감지는 단순 등가비가 아닌, 감지 횟수, 즉 가스 감지 인덱스로 판단되어야 한다. 또한, 감지 유무는 가스구름의 크기보다는 자주 발생하는 지역 (가스 누출 확률이 높은 지역)과 밀접한 관계가 있었다.

제한된 개수의 감지기로는 발생 가능한 모든 가스 확산을 방지는 불가능하였지만, GLI 기법을 통해 제시된 위치에 설치된 가스감지기가 기존 등분포 설치위치에 비하여 아래와 같이 가스 확산을 효율적으로 방지함을 확인하였다.

- 전체 가스 구름량 기준, 14.3% (Case I), 8.4% (Case II) 가스 구름량 감소
- 최대 가스 구름 크기 (2551m<sup>3</sup>) 기준, 99.8% (6.23m<sup>3</sup>) 가스 구름 크기 감소 (Case I: 93.3%, Case II: 22.2%)

기존의 감지기 위치 (등분포) 역시, 확산되는 가스를 많은 부분 감지 할 수 있지만, 본 연구를 통하여 개발 된 인덱스 시스템을 통하여 선정된 위치는 보다 더 많은 가스를 감지함으로써, 확산량을 줄일 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- ANSI/ISA, 2013. *Explosive atmospheres – Part 29-1: Gas detectors – performance requirements of detectors for flammable gases*. Approved American National Standard: North Carolina, USA.
- API, 1999. *Combustible gas detector systems and environmental and operational factors influencing their performance*. American Petroleum Institute: Washington D.C., USA.
- API, 2007. *Recommended practice for analysis, design, installation, and testing of basic surface safety systems for offshore production platforms*. American Petroleum Institute: Washington D.C., USA.
- Cullen, W., 1990. *The public inquiry into the pipe alpha disaster*. Stationery Office Books: London, UK.
- ECR, 2012. *Safety of offshore oil and gas Operations: Lessons from past accident analysis, European commission report EUR 25646 EN*. Ispra, European Commission: Luxembourg.
- FLACS, 2016. *User's manual*. Gexcon AS: Bergen, Norway.
- HSE, 2004. *The selection and use of flammable gas detectors, Health and safety executive report*. Health and Safety Executive: London, UK.
- Kim, S.J., 2016. *A study on a new procedure for nonlinear structural consequence analysis of offshore installations subjected to explosions*. Ph.D. thesis. Pusan National University.
- Legg, S.W. Wang, C. Benavides-Serrano, A.J. & Laird, C.D., 2013. Optimal gas detector placement under uncertainty considering conditional-value-at risk. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26, pp.410-417.
- Seo, J.K. Kim, D.C. Ha, Y.C. Kim, B.J. & Paik, J.K., 2013. A methodology for determining efficient gas detector locations on offshore installations. *Journal of Ships and Offshore Structures*, 8(5), pp. 524-535.
- Thyer, A.M, 2005. *Offshore ignition probability argument, Report No. HSL-2005-50*. Health and Safety Laboratory: Derbyshire, USA.

