



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

수소충전소 설비 배치에 관한 연구



2023년 2월

부경대학교 산업대학원

안전공학과

조 성 주

공 학 석 사 학 위 논 문

수소충전소 설비 배치에 관한 연구

지도교수 이 창 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2023년 2월

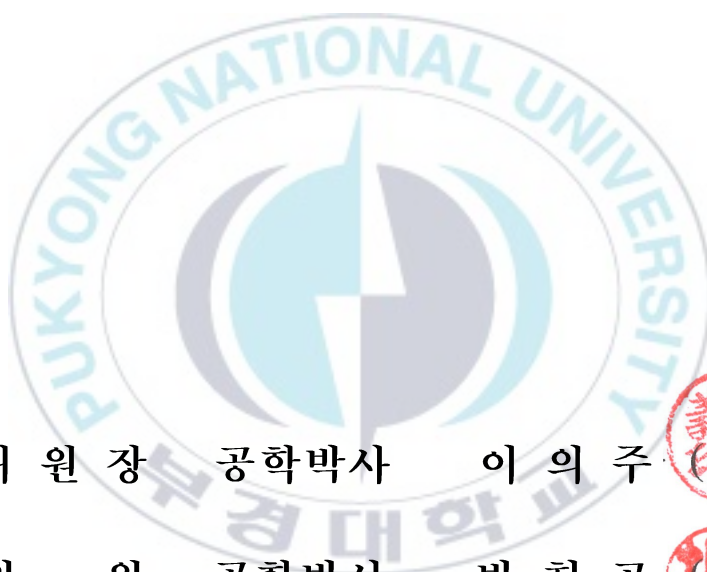
부경대학교 산업대학원

안 전 공 학 과

조 성 주

조성주의 공학석사 학위논문을 인준함.

2023년 2월 17일



위 원 장 공학박사 이 의 주 (인)

위 원 공학박사 박 현 곤 (인)

위 원 공학박사 이 창 준 (인)

목 차

1. 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 기존의 연구	4
1.3 연구 방법	7
2. 피해 금액 산정을 고려한 방법론	8
2.1 TNT 모델을 활용한 과압 산정	8
2.2 과압에 따른 설비 피해 금액 산정	11
2.3 과압에 따른 건물 피해 금액 산정	14
2.4 피해 금액 산정을 위한 목적 함수	23
3. 사례연구	26
3.1 수소충전소 주요 공정 및 주요설비	26
3.2 수소충전소 설치 배치 후보지 선정	30
3.3 누출 시나리오 선정	35
3.4 누출에 따른 과압 산정	37
3.5 피해량 산정을 위한 기초 정보 취합	39
3.6 후보지별 피해 금액 비교 및 최종 후보지 선정	42

4. 결 론	46
--------------	----

참고 문헌	48
-------------	----



Table List

Table 1 Damage type by overpressure	13
Table 2 Building Damage Levels	15
Table 3 Building Types and Description	17
Table 4 Basic equipment information for hydrogen station	39
Table 5 Distance between each equipments and the blast wave source	40
Table 6 Building information surrounding hydrogen station	40
Table 7 Distance between each buildings and the blast wave source	41
Table 8 Comparing total cost of each layouts	44

Figure List

Fig. 1 Hydrogen Economy Roadmap from Ministry of Trade, Industry and Energy	1
Fig. 2 Overpressure as a function of reduced distance (CPR, 1997)	11
Fig. 3 Building Damage Level (BDL) Categories (Examples)	15
Fig. 4 Building Damage Level (BDL), Pressure-Impulse Curves (P-i Curves) and Occupant Vulnerability	16
Fig. 5 Building Type 3 : Steel Frame (P-i Curves)	18
Fig. 6 Building Type 5 : Precast Infill Tilt-Up Wall (P-i Curves)	19
Fig. 7 Building Type 7.5 : Pre Engineered Building (P-i Curves)	20
Fig. 8 Building Type 14 : Wood Frame Structure (P-i Curves)	21
Fig. 9 Building Type 18 : Wood Trailer (P-i Curves)	22
Fig. 10 Blast Wave from the source	25, 42
Fig. 11 Hydrogen supply type of hydrogen stations	26
Fig. 12 Hydrogen Station Process	27
Fig. 13 Case study company site layout and candidate 3 layouts for HRS ..	30
Fig. 14 Layout A and Surrounding buildings (Green)	32
Fig. 15 Layout B and Surrounding buildings (Green)	33
Fig. 16 Layout C and Surrounding buildings (Green)	34
Fig. 17 Blast wave source from Hydrogen station	35
Fig. 18 Overpressure curve from TNT Model	37
Fig. 19 Comparing amount of damage from each layouts	43
Fig. 20 Barriers of Hydrogen station	45

Study for the facility layout of hydrogen stations

SungJoo Cho

Department of Safety Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

To reduce greenhouse gas emissions, the government plans to build 1,200 hydrogen stations by 2040 through Hydrogen Economy Roadmap. However, contrary to the government's plan and growing demand, there are many difficulties in expanding the hydrogen stations due to the problem of securing the necessary site to install the stations and the danger and concern of hydrogen.

Considering the situation, in this study, when constructing a hydrogen station, considering the expected damage to station facilities and buildings surrounding the station, this study propose a method for estimating the damage so that the facilities can be arranged and the installation location can be found.

The overpressure from hydrogen station VCE (Vapor Cloud Explosion) is calculated using the TNT model, and a methodology for estimating the damage to the main facilities of the hydrogen station and the buildings installed around the hydrogen station according to the calculated overpressure is proposed. This study intend to devise a method to minimize damage to hydrogen stations, and apply the methodology through case studies to select the least damaged candidate site among the station candidates to be installed.



1. 서 론

1.1 연구 배경

지구 온난화를 막기 위해 온실가스를 배출하는 화석연료를 대체할 여러 가지 신재생 에너지 중 청정에너지인 수소가 주목을 받고 있으며, 수소를 활용할 기술들이 개발되고 있다¹⁾. 이에 정부에서도 온실가스 저감을 위한 주축으로 그림 1과 같이 “수소 경제 활성화 로드맵(‘19.1.17)”에 2040년까지 수소차 누적 생산량을 620만대, 수소충전소는 1,200개소 확충하겠다는 계획을 세웠고²⁾, 최근 환경부에서는 정부 로드맵에 따른 구체적인 전략적 배치 계획도 마련하였다³⁾.

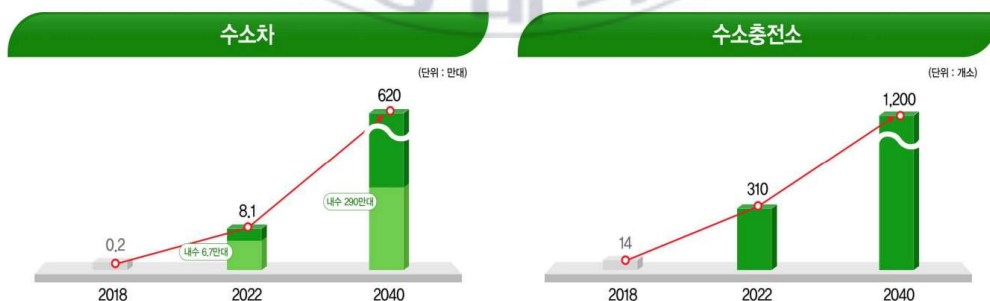


Fig. 1. Hydrogen Economy Roadmap from Ministry of Trade, Industry and Energy²⁾

정부의 수소충전소 보급 계획과 수소자동차 보급에 따른 수소충전소에 대한 수요가 늘어나고 있지만, 늘어나는 수요에 비례하여 그에 따른 작은 누출사고부터 대형 화재·폭발사고까지 다양하게 발생하고 있으며, 특히 충전소의 위치가 도심에 위치하는 경우가 많아 수소충전소 설치에는 위험요소가 많은 것으로 고려 된다⁴⁾. 그리고 수소의 경우 폭발 범위가 넓고, 위험하다는 인식이 많아 수소충전소를 보급·확대하는데, 어려움을 겪고 있다⁴⁾. 이러한 어려움을 인지하여 정부에서도 수소충전소 후보 발굴지를 먼저 발굴하여 민간에 공개 하고⁵⁾, 여러 가지 보조금을 지원하는 등의 노력을 하고 있지만⁶⁾, 여전히 정부의 계획 대비 충전소 보급 실적은 따라와 주지 않는 것이 현 실정이다.

수소의 위험성을 고려하여 고압가스안전관리법에서는 보호시설, 화기, 다른 설비, 사업소 경계와 등의 거리 등을 제시하고 있고 산업안전보건법에서는 인화성 가스를 취급하는 장소에서 폭발위험장소의 종과 범위를 설정하여 관리하도록 규정하고 있지만, 대부분 수소충전소의 경우 차량의 연료공급이라는 특성상 대부분 도심지역에 있고, 도심지역에서 관련 기준을 준수할만한 넓은 보유공지를 갖기는 어렵다.

수소충전소를 건설할 때 충전소에 피해를 고려하여 충전소를 배치할 수

있도록 피해를 산정 할 수 있다면, 피해가 최소화되는 지역에 부지를 선택 할 수 있고, 부지 선택에 적절한 한정된 부지 안에서 가장 적절한 설비 배치 방안을 발굴할 수 있다. 또한, 해당 부지가 수소충전소 배치에 적절한 부지인지 판단하는데도 큰 도움이 될 것으로 생각한다.

본 연구에서는 크게 두 단계로 나뉘 수소충전소 배치에 따른 피해를 산정하고자 한다. 첫 번째는 TNT 모델을 기반으로 폭연에 의한 과압을 도출하고, 두 번째에서는 도출된 과압에 따른 수소충전소의 각 설비에 대한 피해 비용, 수소충전소 인근 건물 피해 비용을 산정하여 해당 배치에서 최종 피해 금액을 합산하여 피해 금액을 확인하고자 한다.

1.2 기존의 연구

수소충전소 설치 시 적합한 설비 배치에 대한 방법을 찾는 문제는 피해를 확인할 수 있는 모델링을 찾는 것과 피해를 산정하는 방법을 찾는 연구로 요약할 수 있다.

수소충전소에서 발생하는 피해 양을산정 하는 방법은 연구배경에서 설명한 바와 같이 TNT모델로 산정하였다. TNT 모델은 가장 대중적인 모델로 연료의 에너지를 당해질량의 TNT로 간편하게 계산할 수 있는 장점이 있어 선택 하였다⁷⁾.

Sochet (2010)은 Cloud에서 연료의 질량을 기반으로 TNT 등가량에 대한 경험 식을 제시 하였다⁸⁾.

E. Lopez (2015)는 UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosions)에 적용되는 TNT 모델에서 efficiency factor로 적합한 값을 나타냈다⁹⁾.

김종락 (2011)은 Tube Trailer 저장시설에 대한 사고피해예측에 관한 연구에서 TNT 모델을 활용하여 피해 강도에 따른 피해 거리 평가를 시행 하였

다¹⁰⁾.

Junji Sakamoto (2016) 의 경우 수소충전소 사고에서 누출 타입에 관한 연구를 시행하여 최근 미국과 일본에서 수소충전소 노출에 주요 원인을 분석하였다¹¹⁾.

이호형 (2021) 은 TNT 등가 모델을 활용하여 지하주차장 수소연료 차의 수소탱크 폭발 압력에 따른 인체 및 건물의 영향을 검토 하였다¹²⁾.

김혜림 (2017) 은 국·내 외 충전소 사고 현황을 분석하여 수소, LPG, CNG 등을 포함한 충전소에서 발생하는 주요 사고 현황과 사고 원인 등을 분석하였고, 사고 현황에 따른 피해 거리도 예측하였다¹³⁾.

기존의 연구에서는 수소에 대한 피해 측정을 위한 TNT 모델을 활용하여 피해를 측정하고 검토한 연구가 많았고, 수소충전소 관련 사고에 대한 통계 및 사고 원인에 대한 분석도 있었지만, 수소 폭발 시 발생 가능한 과압의 피해를 최소화하기 위한 수소충전소 설비 배치에 관한 연구는 거의 없었다. 이호형 등 일부 연구자들은 TNT 모델 등을 활용한 수소충전소에 대한 위험성 평가를 시행한 이력은 있었지만, 수소충전소 설치 위치 선정 및

한정된 후보지에서 어떠한 수소충전소 설비 배치가 가장 적합한지에 대한 연구는 전무 하다.



1.3 연구 방법

본 연구에서는 수소충전소 배치에 따른 충전소 내부의 설비와 주변 건물에 피해에 따른 피해 금액을 산정하여, 여러 개의 수소충전소 배치 중 가장 피해가 적은 배치모형을 찾고자 한다.

본 논문 구성은 크게 4가지 단계로 이뤄지는데, 첫 번째 단계에서는 수소충전소 폭연에 대한 과압을 예측하는 TNT 모형을 활용하여 과압을 산정하는 방법을 다루고자 한다. 두 번째 단계에서는 산정된 과압으로 인한 수소충전소 주요설비와 주변 건물에 대한 피해 금액 산정하는 방법을 확인하고자 한다. 세 번째로는 피해 산정하는 방법을 정리하여 목적함수로 만들고, 마지막 단계에서는 만들어진 목적함수를 사례 연구에 적용하여 실제 수소충전소 설치 예정 후보지에 따른 피해 금액을 비교하고, 가장 피해가 최소화되는 후보지를 선정하고자 한다.

2. 피해 금액 산정을 고려한 방법론

2.1 TNT 모델을 활용한 과압 산정

TNT 모델은 인화성 연료의 에너지를 당해질량의 TNT로 계산하는 간편한 방법으로 손쉽게 인화성 연료의 에너지를 추정할 수 있다는 장점이 있다⁷⁾. 이러한 장점 때문에 수소충전소에 피해를 예측하는 모델로 TNT 모델을 활용하였다.

Sochet (2010)은 Cloud에서 연료의 질량을 기반으로 TNT 등가량에 대한 아래와 같은 경험 식을 제시하였다⁸⁾. 아래 식에서 W_{TNT} 는 TNT의 등가량 (kg), W_f 는 공기 중에 있는 연료의 총량 (kg), H_f 는 연료의 연소열 (MJ/kg), H_{TNT} 는 TNT의 폭발 에너지 (4.5 MJ/kg), η_e 는 경험적 폭발효율 계수 (무단위) 이다. 수소의 연소열은 사고피해예측기법에 관한 기술지침에 따라 143 MJ/kg으로 계산에 활용하였다¹⁴⁾.

$$W_{TNT} = \eta_e \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} \quad (1)$$

TNT 등가 모델에서 중요한 문제는 폭발효율이며, 이 폭발효율은 인화성 물질에 대한 공기의 불완전한 혼합과 열에너지의 기계적 에너지로의 불완전한 전환을 포함하는 여러 가지 인자의 추정치를 조정하는데 이용한다⁷⁾.

E. Lopez (2015)는 UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosions)에 적용되는 TNT 모델에서 0.01에서 0.1까지 통상 적용되는 efficiency factor에서 고압의 수소 실린더 폭발에서는 0.01 (1%)가 적합하다고 언급했다⁹⁾. 해당 내용은 이번 수소충전소 폭발사고 시나리오와 비슷한 시나리오로 판단되어 해당 효율을 식에 활용하였다.

TNT 모델을 활용하는 절차는 먼저 폭발에 관계된 공기 중에 있는 연료의 총량을 결정해야 하고, 폭발효율을 선택하여 (1) 식에 대입하여 TNT 당량을 계산한다. 이후 (2) 식에 거리에 따른 TNT 당량을 대입하여 환산거리를 구하고 구한 환산거리를 활용하여 (3) 과 (4) 식에 주어진 환산 법칙을 이용하여 과압을 계산하는 순서로 진행하였다⁷⁾.

$$\bar{R} = \frac{R}{W_{TNT}^{(1/3)}} \quad (2)$$

$$\frac{p_o}{P_a} = \frac{1616[1 + (\frac{\bar{R}}{4.5})^2]}{\sqrt{1 + (\frac{\bar{R}}{0.048})^2} \sqrt{1 + (\frac{\bar{R}}{0.32})^2} \sqrt{1 + (\frac{\bar{R}}{1.35})^2}} \quad (3)$$

$$p_s = \frac{p_o}{P_a} \quad (4)$$

식 (2)에서 R 은 폭발 기점에서의 거리이고, \bar{R} 은 환산 거리이다. 식 (4)에서 p_o 는 최고 입사 과압이며, p_s 는 환산과압 (무단위)이며, P_a 는 대기압이다.



2.2 과압에 따른 설비 피해 금액 산정

과압에 따른 피해를 산정할 때 중요한 요소는 수소충전소 주요설비에 대한 피해이다. 수소충전소를 운영하기 위해서는 공급된 수소를 가압하는 압축기와 가압으로 인한 열을 냉각시키기 위한 냉각설비, 차량에 수소를 충전시키기 위한 충전설비 등 여러 가지 설비를 동반한다. 이러한 설비들도 수소충전소 공급을 위해 꼭 설치되어야 하고, 배치에 따라 피해 정도가 달라질 수 있어, 피해산정 범위에 포함하였다.

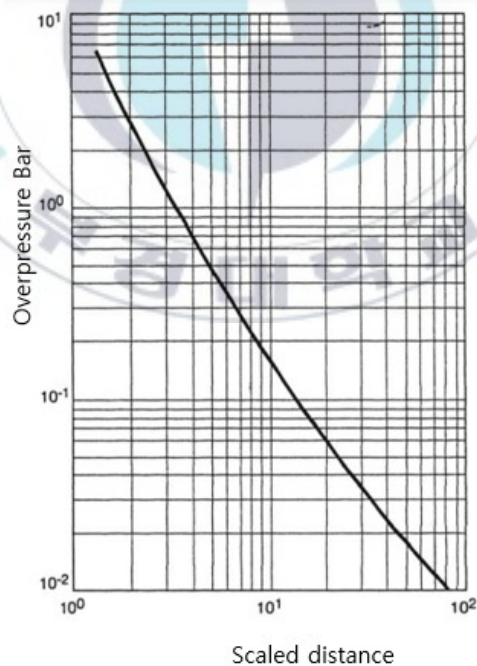


Fig. 2. Overpressure as a function of reduced distance (CPR, 1997)⁸⁾

수소충전소 내 설비에 대해서는 과압으로 인한 피해로 인해 철골이 변형되거나 파괴되는 것으로 가정하였다¹⁵⁾. TNT 모델에 따른 과압은 그림2와 같이 거리에 따라 압력이 떨어지는데, 이때 TNT 모델로 얻은 과압으로 각 각의 거리에 있는 수소충전소 설비에 피해를 산정하였다. 폭발로 인한 손실을 평가할 때 20kPa 이상의 폭발 압력에 노출되면 설비가 완전히 파괴되는 것으로 가정하고 피해를 산정하였다¹⁶⁾. 그리고 20kPa 미만의 폭발 압력에 노출되면 설비가 폭발 압력에 따라 설비가 손상을 입을 것으로 가정하고 피해를 산정하였다. 과압에 따른 설비의 피해를 산정할 때, 과압의 발생하는 위치로부터 직선거리인 설비만 피해산정으로 가정하였고, 직선으로 위치한 설비 뒤에 배치된 설비에 대해서는 피해 규모가 작다고 보고 해당 피해에 산정에 포함하지 않는 것으로 가정하였다.

Table 1. Damage type by overpressure¹⁵⁾

Overpressure	Type of damage
0.21kPa	Partial damage of window made of glass
1.03kPa	Glass bursting pressure
2.07kPa	10% of glass window is broken
2.76kPa	Small damage limitation of building
4.83kPa	House small breakage
8.96kPa	Building steel frame flexure
13.80kPa	Weak concrete wall fracture
15.86kPa	Serious structural damage low-level
20.68kPa	Steel frame building flexure
27.58kPa	Oil storage tank explosion
41.37kPa	House whole breakag
68.95kPa	Whole destruction of building

2.3 과압에 따른 건물 피해 금액 산정

수소충전소는 이용하는 고객의 접근이 쉽도록 도심지역에 설치해야 한다¹⁷⁾. 따라서 대부분의 수소충전소 주변에는 도심지역에 있는 건물들이 존재한다. 이러한 수소충전소 주변의 건물들도 수소충전소를 배치 및 부지를 선정하는데 중요한 요인이므로, 건물에 대한 피해 금액을 산정하여 수소충전소 배치에 활용하고자 한다.

수소충전소 주변 건물에 대한 피해를 산정하기 위해 Vulnerability Model을 활용하였다. BDL (Building Damage Level)은 건물의 손상 수준을 파악하는 척도로써, 아래의 표2에 언급된 바와 같이 정성적으로 판단되며, 건물 내 상주하는 인원의 취약성을 파악하는데 사용되는 매개 변수이다¹⁸⁾. 그림 3에서는 각각의 BDL 단계에 따른 건물 손상 정도의 예시가 표현되어 있다.

Table 2. Building Damage Levels¹⁸⁾

Building Damage Level	Description
1	Onset of visible damage to reflected wall of building
2	Reflected wall components sustain permanent damage requiring replacement, other walls and roof have visible damage that is generally repairable
2.5	Reflected wall components are collapsed or very severely damaged. Other walls and roof have permanent damage requiring replacement
3	Reflected wall has collapsed. Other walls and roof have substantial plastic deformation that may be approaching incipient collapse
4	Failure of substantial areas of the building roof and walls



Fig. 3. Building Damage Level (BDL) Categories (Examples)¹⁸⁾

매개 변수로 판단하기 위한 건물은 아래와 같이 표 2에 따라 구분되는데, 건물에 따라 그림 4와 같이 건물 내에 인원에 대한 취약성을 판단한다. 이번 연구에서는 BDL 2.5 이상이면, 건물을 사용하기 힘들 정도로 피해가 간다고 가정하고, 해당 취약성에 따라 건물 피해 범위를 산정하는 것으로 가정하였다. 설비 피해를 산정할 때와 마찬가지로 과압에 대한 누출 원으로부터 직선거리에 있는 건물들만 피해 금액에 포함하였고, 해당 건물 뒤쪽으로 배치된 건물에 대해서는 피해가 없는 것으로 가정하였다.

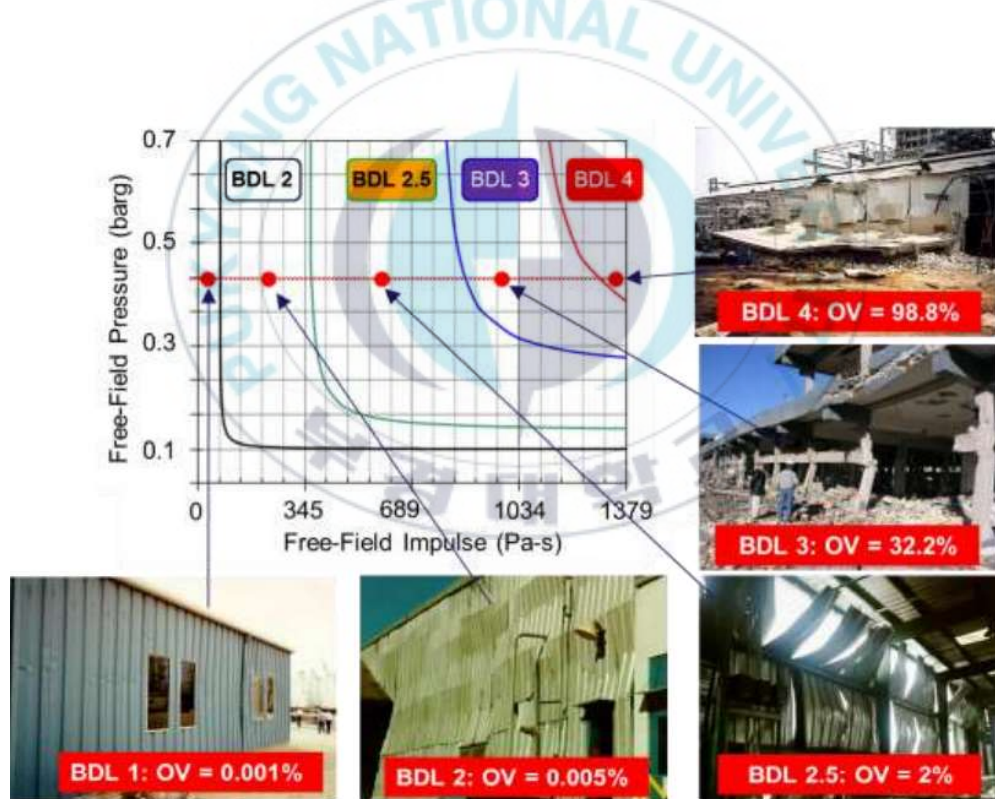


Fig. 4. Building Damage Level (BDL), Pressure-Impulse Curves (P-i Curves) and Occupant Vulnerability¹⁸⁾

Vulnerability Model에서는 건물 형태에 따른 압력과 충격에 따른 서로 다른 BDL을 제안하는데, 각각의 건물 형태는 표 3과 같이 정리된다.

Table 3. Building Types and Description¹⁸⁾

Building Type	Description	Construction
3	Steel frame concrete buildings	Steel frame with unreinforced masonry walls
5	Commercial buildings including office and apartments	Steel frame with precast concrete cladding
11	Control room/ shop/ compressor building in Asia	Concrete frame with unreinforced masonry walls
14	House and small shops	Wood frame with brick or siding
18	Portable trailer	Wood frame with steel or aluminum cladding

서로 다른 건물 형태에 따른 과압과 충격파에 따른 취약성은 아래의 그래프 같이 나타난다. 그림5에서 9까지는 각 건물 타입에 따른 과압과 충격파의 그래프로 과압 또는 충격파를 확인하면 그에 따른 취약성에 관한 확인이 가능하다.

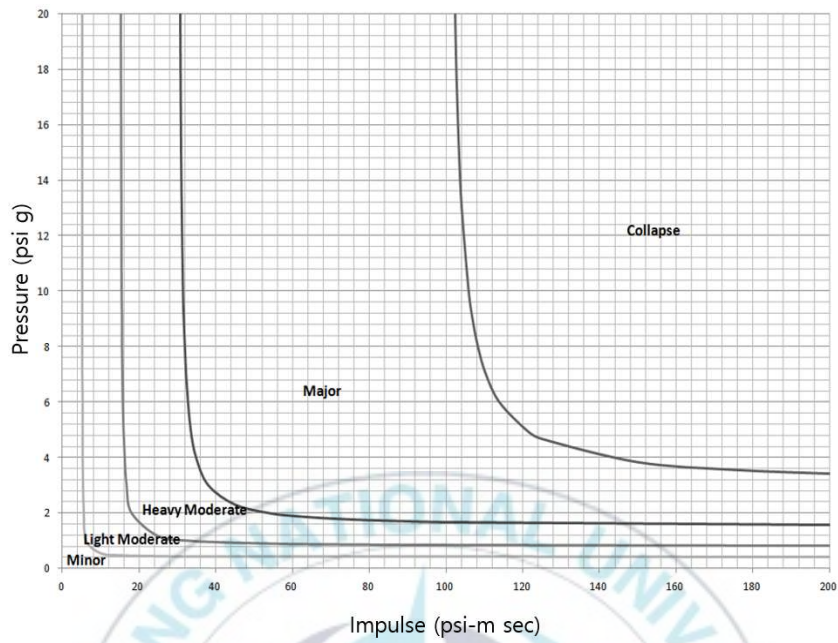


Fig. 5. Building Type 3 : Steel Frame, Pressure-Impulse Curves (P-i Curves)¹⁸⁾

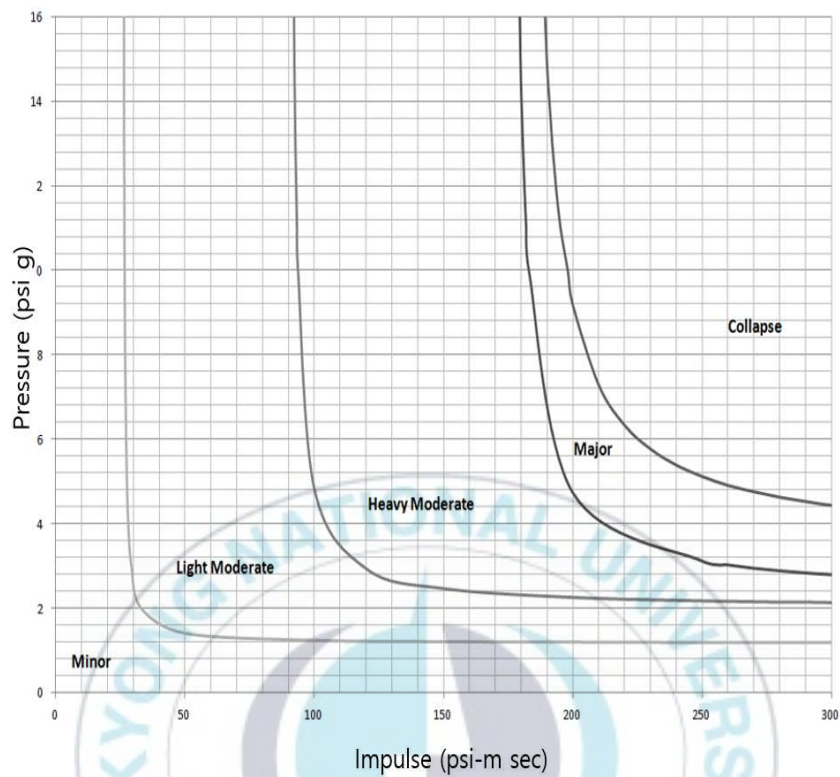


Fig. 6. Building Type 5 : Precast Infill Tilt-Up Wall, Pressure-Impulse Curves

(P-i Curves)¹⁸⁾

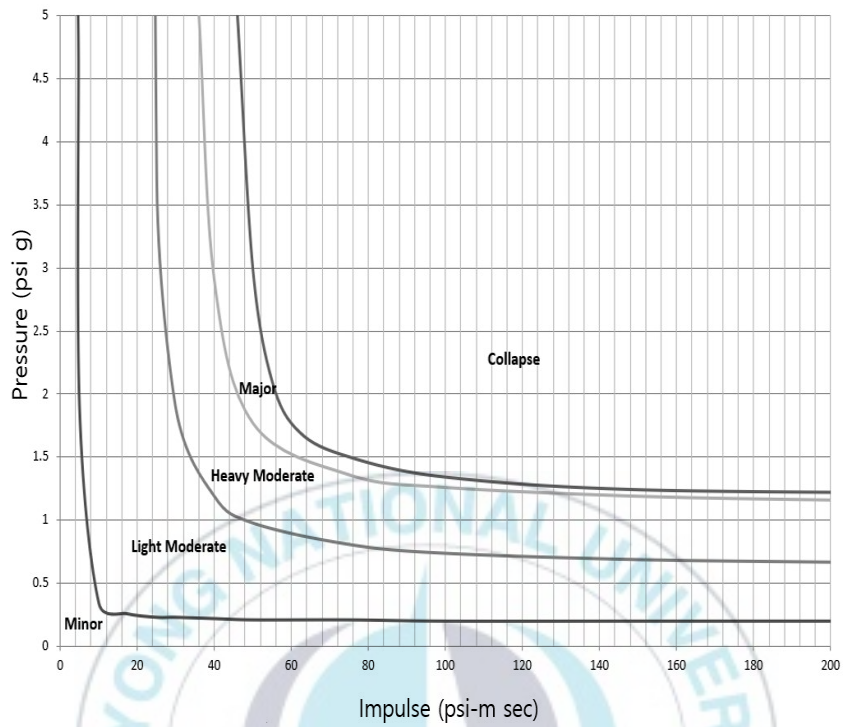


Fig. 7. Building Type 7.5 : Pre Engineered Building, Pressure-Impulse Curves
(P-i Curves)¹⁸⁾

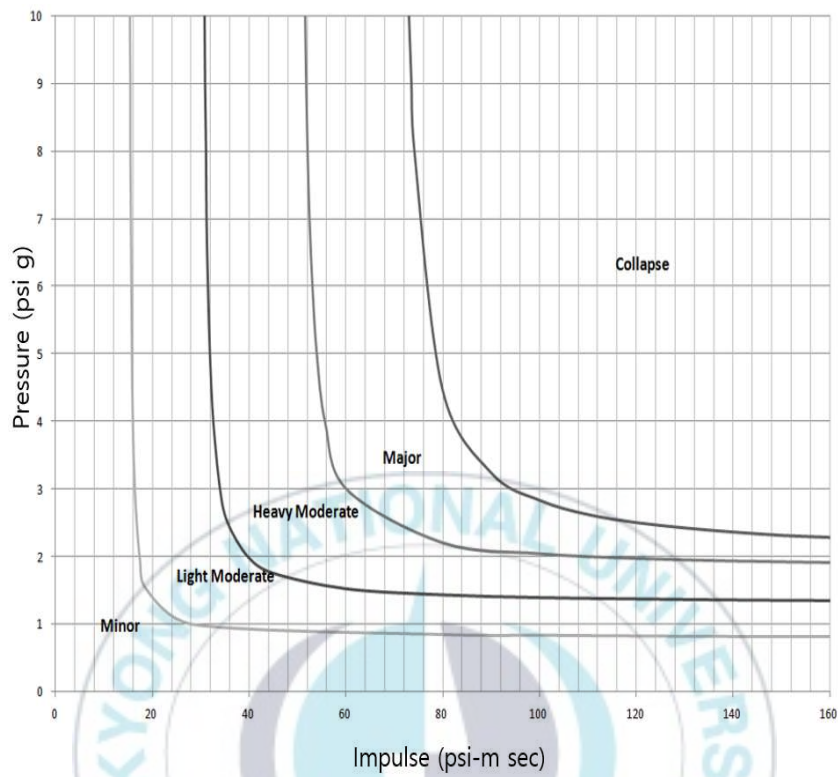


Fig. 8. Building Type 14 : Wood Frame Structure, Pressure-Impulse Curves

(P-i Curves)¹⁸⁾

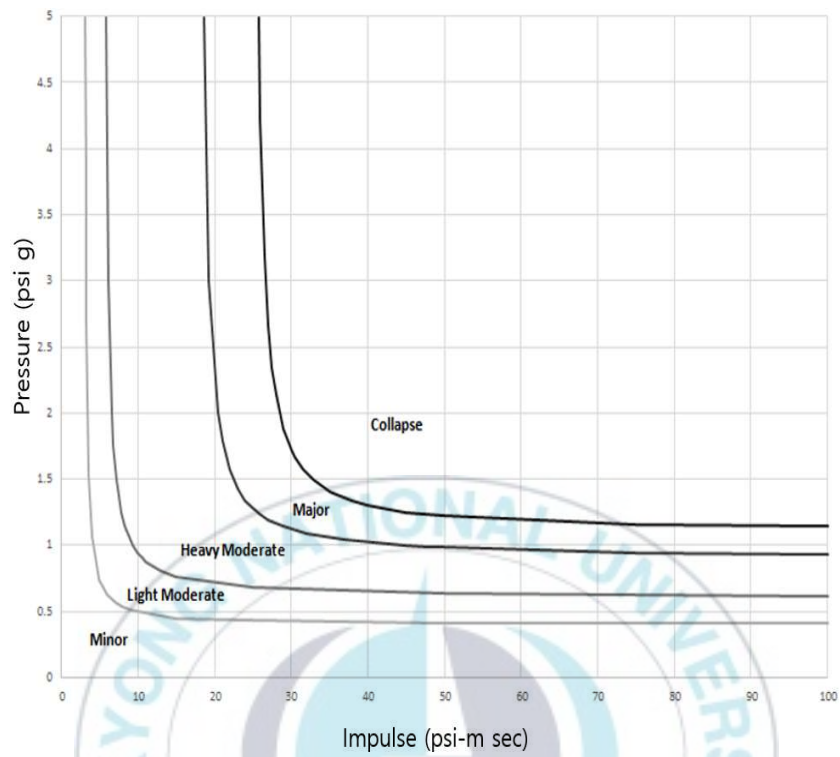


Fig. 9. Building Type 18 : Wood Trailer, Pressure-Impulse Curves (P-i Curves)¹⁸⁾

2.4 피해 금액 산정을 위한 목적함수

확인된 과압에 따른 피해를 산정하기 위해 먼저 아래와 같이 설비에 대한 피해를 함수로써 표현하면 식 (5)와 (6)과 같다. 앞서 피해산정에서 언급한 바와 같이 철골로 이루어진 수소충전소 설비는 20kPa 이상의 압력에서 파손이 생기므로 20kPa 이상의 압력에서는 설비금액 전체를 피해 금액으로 산정하였고, 그 이하로 과압이 발생하는 경우, 과압에 따른 설비금액을 비례적으로 산정하였다. 아래의 식에서 P 는 누출 원에서 폭발로 발생하는 과압이고, F 는 수소충전소에 설치된 설비의 가격이다.

$$Loss \alpha_i = P / 20 kPa \times F_i \quad (5)$$

$$(P \leq 20kPa)$$

$$Loss \alpha_i = F_i \quad (6)$$

$$(P > 20kPa)$$

건물에 대한 피해를 함수로 표현하면 식 (7), (8), (9)와 같다. 건물피해산정에서 언급한 바와 같이 기준을 BDL 2.5 이상으로 잡고, 취약성에 따른 건물의 피해 금액을 산정하였다. 취약성이 100%이면, 건물의 전체 금액을 피해 금액으로 산정하였고, 100 이하이면 각각의 취약성에 따른 피해 금액

을 비율로 산정하는 것으로 가정하였다.

$$Loss \beta_i = Vulnerability \times B_i \quad (7)$$

(Vulnerability > 0% and Vulnerability < 100%)

$$Loss \beta_i = B_i \quad (8)$$

(Vulnerability = 100%)

$$Loss \beta_i = 0 \quad (9)$$

(Vulnerability = 0%)

위 내용을 모두 정리한 수소충전소 폭발로 인한 충전소 주요설비와 주변 건물의 피해 금액을 전체 합산한 함수는 아래의 식 (10)과 같고, 그림으로 나타내면 그림 10과 같이 표현할 수 있다.

$$Total \ Loss = \sum_{i=1}^n Loss \alpha_i + \sum_{i=1}^n Loss \beta_i \quad (10)$$

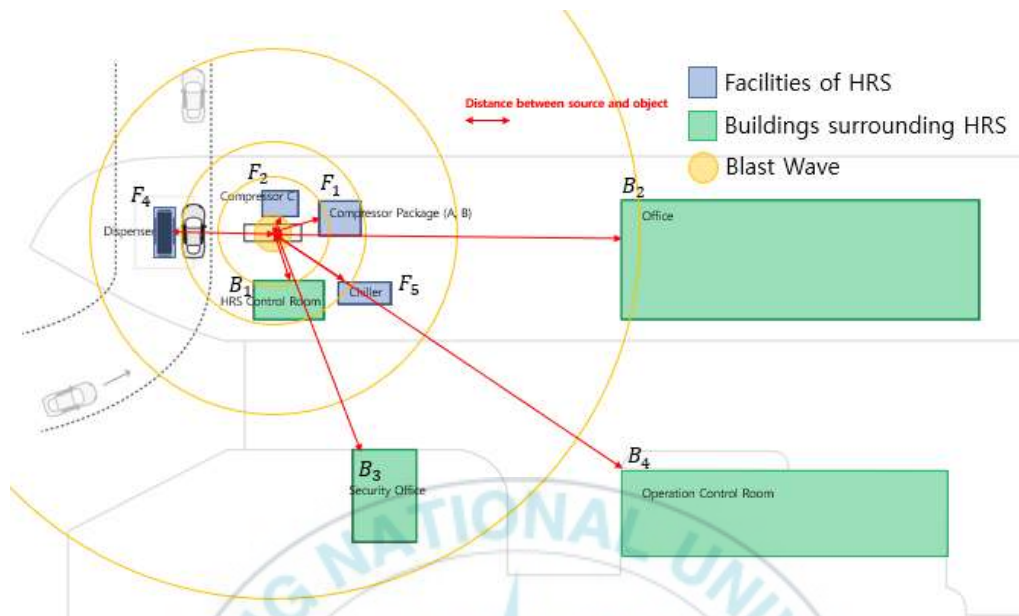


Fig. 10. Blast Wave from the source

3. 사례 연구

3.1 수소충전소 주요 공정 및 주요설비

수소충전소는 그림11과 같이 크게 수소를 현지에서 공급하는 유형과 중앙에서 수소를 공급받는 형태로 분류된다. 이번 연구에서 사례 연구로 선택한 A사의 수소충전소 공정은 파이프라인으로 이송되는 수소를 압축기 및 저장 용기에 공급하여 차량에 충전되는 저장식 수소충전소이다.



Fig. 11. Hydrogen supply type of hydrogen stations²¹⁾

A사의 수소충전소 주요 공정은 그림12와 같으며, 파이프라인으로 이송되

는 수소를 Blowdown 탱크로 공급하고 저압 압축기를 통해 압축된 수소는 저압 Buffer 탱크를 통해 중압 압축기로 공급된다. 중압 압축기에서 압축된 수소는 중압 저장 탱크로 공급되며 다시 고압 압축기에서 압축되어 고압 저장 탱크로 이송된다. 중간에 냉각을 위한 열교환이 있으며, 고압 저장 탱크로 공급된 수소는 다시 Priority Fill Panel을 통해 Pre-Cooler로 공급되어 Dispenser를 통해 차량으로 충전되며, 주요설비에 대한 설명은 아래와 같다.

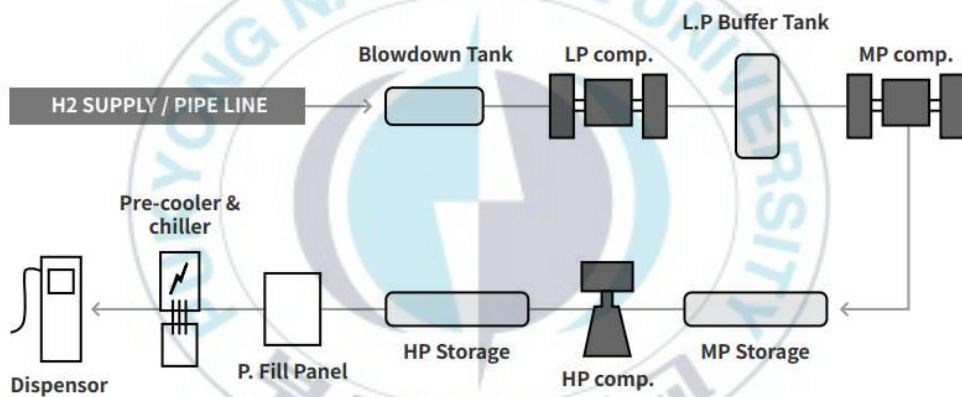


Fig. 12. Hydrogen Station Process

3.1.1 Blowdown 탱크

제조소에서 파이프라인으로 이송되는 수소를 일정하게 저압 압축기로 공급하며 저압 압축기에서 발생하여 고압의 수소의 압력을 완화 시켜주는 장치이다.

3.1.2 저압 / 중압 / 고압 압축기 Package

수소를 차량에 충전을 위해 중압과 고압으로 승압하여 공급하는 장치이다. 해당 Package 안에는 수소의 압력을 올려주기 위한 저압 / 중압 / 고압 압축기와 전기모터, 쿨러, 유압장치 등으로 구성된 장치들이 있다. 원리는 전기모터 동력에 의해 피스톤을 작동하여 유압에 의해 수소가스를 승압시키는 방법이다.

3.1.3 Priority Fill Panel

수소 저압 / 중압 / 고압 압축기 Package에서 중압과 고압으로 승압 된 수소가스를 중압 저장 탱크와 저압 저장 탱크로 각각의 라인 압력센서의 신호를 받아 교차하여 충전할 수 있게 조작이 가능한 시스템으로 되어있다.

3.1.4 중압 / 고압 저장 탱크

중압과 고압 압축기에서 승압 된 중압과 고압의 수소를 저장하는 장비이다.

3.1.5 수소 Chiller

고압 탱크의 수소를 차압 방식으로 차량에 충전 시 단열팽창에 의한 가스 온도 상승을 조절하기 위한 냉각장치로 냉동시스템과 순환 펌프 장치로 구

성되어있다.

3.1.6 냉각수 Ciller

저압 / 중압 / 고압 압축기의 승압 과정에서 상승 된 가스 온도를 냉각하기 위한 냉각수 공급 및 수소 Ciller에 열교환을 하는 시스템으로 냉동시스템과 순환 펌프 등으로 구성된 장치이다.

3.1.7 Pre-Cooler

고압 탱크의 수소를 차량에 충전 시 단열팽창에 의한 가스 온도 상승을 조절하기 위한 열교환 장비로 수소 Chiller의 냉매를 이용하여 온도를 조절하는 장치이다.

4.1.8 수소 Dispenser

고압 탱크의 수소를 차압 방식으로 차량에 충전하는 장치로 유량 조절 밸브 및 유량계를 통해 충전량을 조절하며, 충전량을 계산하여 금액으로 환산하는 장치이다.

3.2 수소충전소 설치 배치 후보지 선정

본 연구에서는 제조업종으로 회사부지에 수소충전소를 설치하려는 A사 사례를 토대로 연구에 활용하였다. 먼저 수소충전소 설치를 위해 A사 부지 중 가용 가능한 부지와 향후 충전소의 판매가 쉬운 위치로 세 군데의 배치 후보지를 선정하였다.



Fig. 13. Case study company site layout and candidate 3 layouts for HRS

그림 13은 사업장 부지 내 각각의 세 군데 후보지의 위치를 표현한 그림이다. 그림 13에서 A와 B는 해당 사업장의 정문 근처에 배치한 장소이고, C는 해당 사업장의 후문으로 충전 차량의 접근이 쉬운 위치를 선정하여 후보지를 고려하였다. 각각의 후보지 모두 향후 수소충전소 판매 시, 충전 차량 접근이 쉬운 것을 확인하였다. 또한, 세 군데의 후보지 모두 고압가스 안전관리법에 따른 이격거리와 산업안전보건법에 따른 안전거리도 모두 준수하는 것으로 내부 확인하였다.

후보지 A의 경우 그림14와 같이 사업장 정문 근처에 위치이며, 주변의 인명피해가 가능한 건물은 초록색으로 표현하였으며, 근로자들이 근무하는 사무동과 정문 경비실, 공장 설비를 운전하는 운전실이 근처에 위치한다.

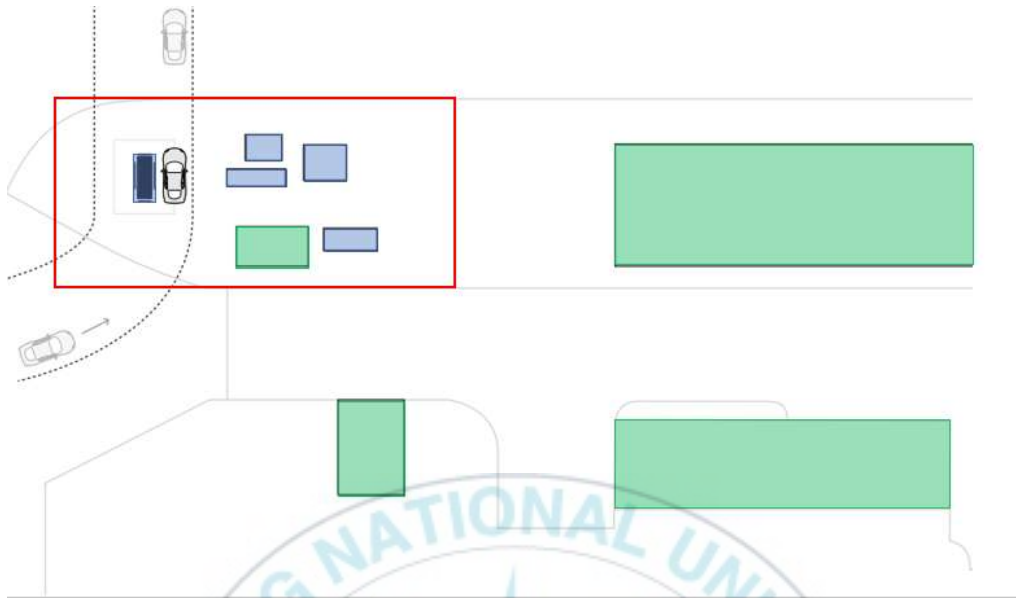


Fig. 14. Layout A and Surrounding buildings (Green)

후보지 B의 경우 그림15와 같이 A와 마찬가지로 사업장 정문 근처에 있다. 후보지 B 역시 A와 마찬가지로 정문 근처에 있으므로, 인명피해가 예상되는 사무동과 정문 경비실, 운전실이 근처에 있다. 역시 마찬가지로 영향을 받는 건물들은 모두 초록색으로 표기하였다.

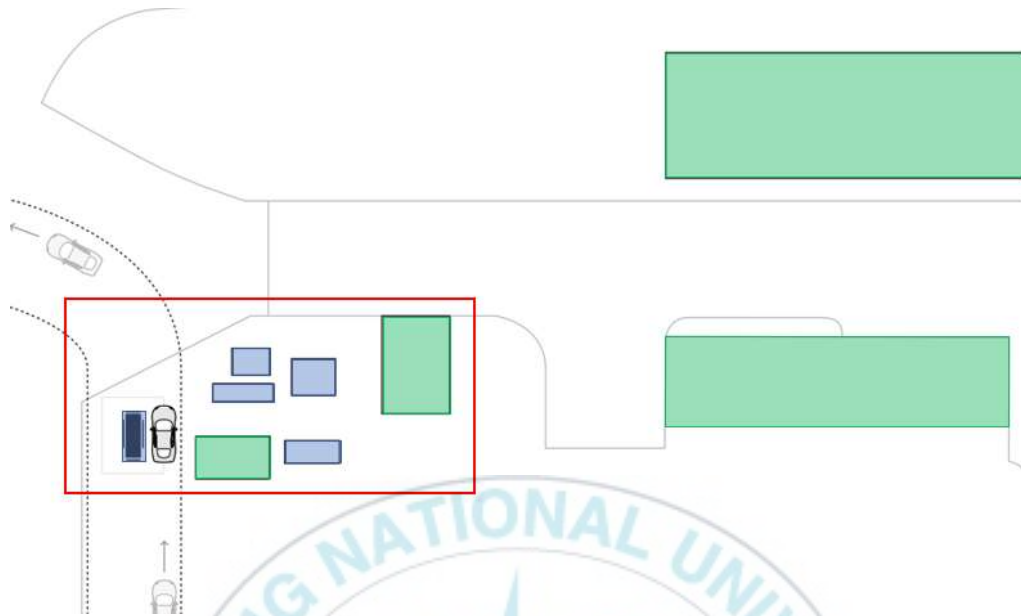


Fig. 15. Layout B and Surrounding buildings (Green)

후보지 C의 경우 그림 16과 같이 사업장 후문 쪽에 있으며, 주변에 인명 피해가 예상되는 건물로는 실린더 보관을 위한 창고가 있으며, 추가로 A 회사 사업장 부지 밖으로 다른 B 회사의 근로자가 근무하는 사무동이 근처에 있다.

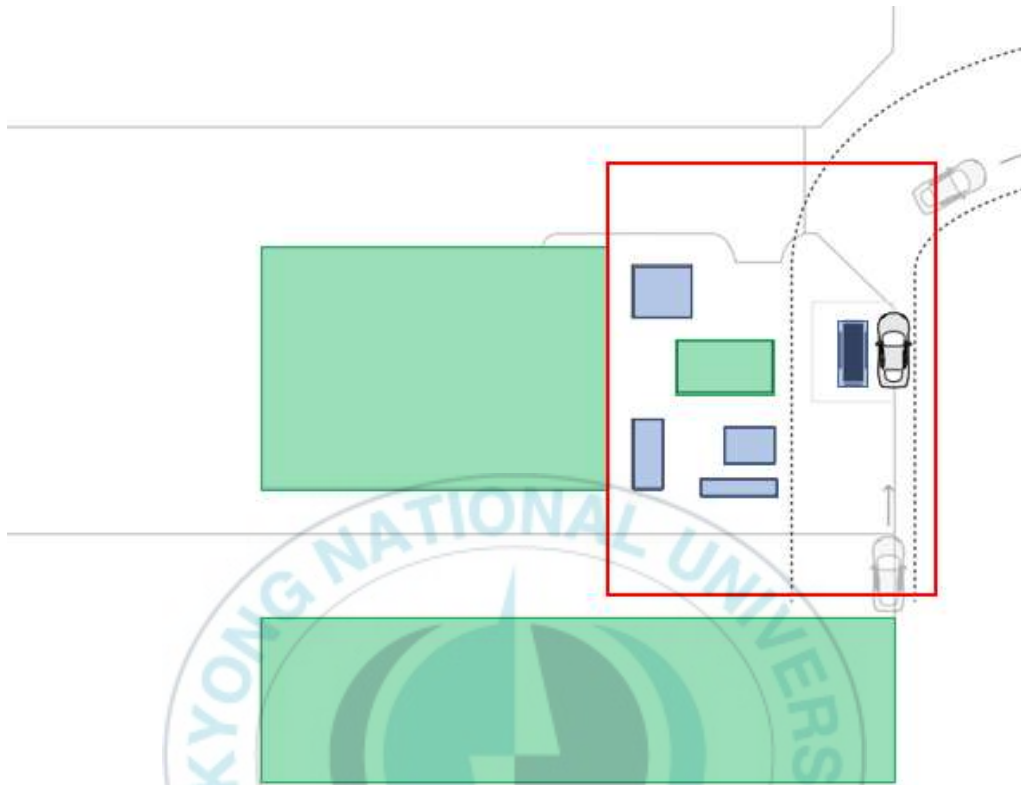


Fig. 16. Layout C and Surrounding buildings (Green)

앞서 설명한 피해 금액 산정을 고려한 방법론을 적용하여, 상기 3가지 후보지로 VCE (Vapor Cloud Explosion) 폭발로 과압에 의한 수소충전소의 설비 피해와 충전소 주변의 배치된 건물에 따른 피해 비용을 고려하고 가장 피해가 최소화되는 최적의 선정지를 도출하고자 한다.

3.3 누출 시나리오 선정

A사에서 선정한 수소충전소에서 누출 시나리오는 저압 / 중압 / 고압 저장 탱크 Package에서 누출 원으로 발생하는 폭발로 인한 과압으로 인한 피해 시나리오로 최근 사고 사례 및 수소연료탱크에서 발생한 화재 누출 폭발 연구에 의해 선정하였다¹⁹⁾. 디스펜서와 압축기도 누출 원으로 고려되었으나, 설치된 쿨러 및 최근에 일어난 사고 사례를 고려하여 최종적으로 저장 탱크에서 누출되는 시나리오로 선정하였다. 그리고 설비와 설비 사이의 배관은 모두 플랜지 부분이 없는 가능한 한 모두 용접 형태로 배관을 연결하였다. 아래의 그림 17에 배치된 설비에서 선정된 시나리오에서 정한 압력 용기의 누출 원을 표기하였다.

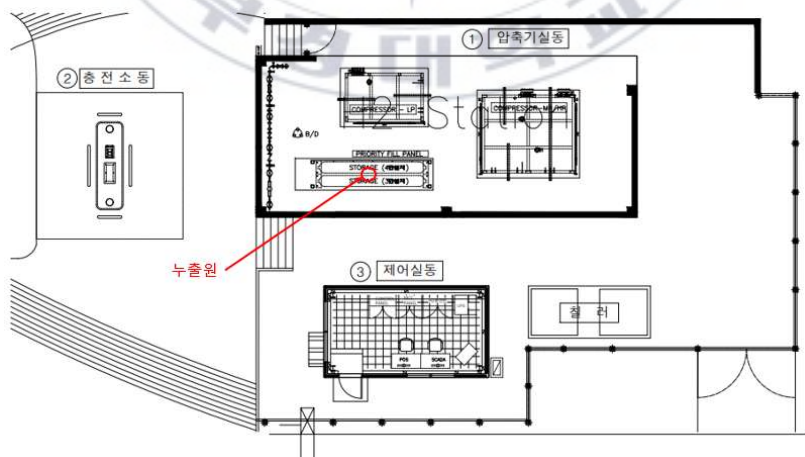


Fig. 17. Blast wave source from Hydrogen station

수소충전소를 설치하는 A사의 사내 요구사항에 따라 수소충전소 설비 전체에 지붕이 없는 개방형태로 설계하였는데, 이로 인해 누출 양을 선정할 때 Confined volume이 아닌 Congested volume으로 양을 선정하였다. 누출된 수소는 대부분 공기 중으로 확산하나, 일부 수소는 공기와 혼합되어 20%의 농도에 도달하여 폭발하는 것으로 가정하였고, 저장 탱크의 용량을 고려하여 폭발 시 약 0.39kg의 가연성 질량이 발생한 것으로 누출 시나리오를 최종적으로 결정하였다. 본 사례 연구에서는 A사에서 선정한 시나리오에 따라 연구를 진행하였다.



3.4 누출에 따른 과압 산정

누출 시나리오에서 가정된 0.39 kg의 인화성 연료의 질량에서 나온 TNT 당량에 따라 계산된 과압은 아래와 같이 도출되었으며, 그림18과 같이 그래프로 나타낼 수 있다. 앞에서 언급한 과압을 산정하는 방법에 따라 식 (1)에서 공기 중에 있는 연료의 총량 (W_f)은 0.39kg으로 가정하였으며, 연료의 연소열 (H_f)은 143MJ/kg으로 활용하였고, TNT 폭굉 에너지(H_{TNT})는 4.5 MJ/kg), 마지막으로 폭발효율 계수(η_e)는 0.01로 활용 하였다.

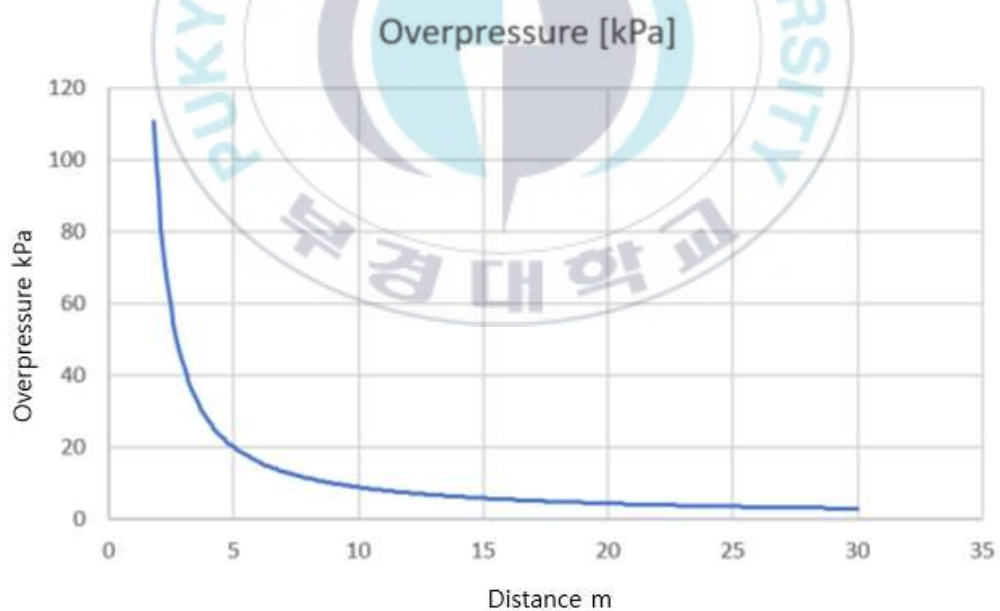


Fig. 18. Overpressure curve from TNT Model

$$W_{TNT} = \eta_e \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} \quad (1)$$



3.5 피해량 산정을 위한 기초 정보 취합

먼저 수소충전소에 들어가는 주요설비에 관한 정보는 표 4와 같다. 수소충전소는 총 6개의 설비로 구성되어있으며, 각각의 정보와 금액을 정리하였다. 각 설비에 관한 정보는 모두 A사에 활용된 설비 정보를 활용하였다.

Table 4. Basic equipment information for hydrogen station

Number	Equipment	Width [m]	Depth [m]	Purchase cost [Won]
1	Compressor Package (A, B)	4.2	3.6	570,000,000
2	Compressor C	3.6	2.4	260,000,000
3	Pressure Tank Package (A, B, C)	5.65	1.3	430,000,000
4	Dispenser	1.1	3.6	270,000,000
5	Chiller Package	5	2.14	220,000,000
6	Control Room	6	3	151,000,000

표 5는 정리된 수소충전소 주요설비별로 누출 원인으로 지정된 저장 탱크로부터의 거리를 각각의 후보지 별로 정리하였다. 해당 정보는 모두 과압에 따른 피해 양 산정을 하는 데 활용하였다.

Table 5. Distance between each equipments and the blast wave source

Number	Equipment	Layout A (m)	Layout B (m)	layout C (m)
1	Compressor Package (A, B)	6.9	5.9	6.4
2	Compressor C	3.2	3.2	3.4
3	Dispenser	10.4	12.1	11.1
4	Chiller Package	10.8	11.1	10.9

수소충전소 주변의 건물에 관한 정보는 건물 자체가 노후 되어 감가에 대한 사항을 고려할 수 없었고, A사 부지 밖에 건물에 대한 다른 사업장의 건물에 대한 연식, 노후화 정도 등의 정보를 확인할 수가 없어, 건축법 제 25조 제12항 및 표준조례 운영지침에 따른 건축물 신축 단가표에 따라 비용을 산정하였다²⁰⁾. 해당 건축물 신축 단가표에 따라 산정된 비용과 구글 맵스로 확인한 건축물의 정보는 표 6과 같다.

Table 6. Building information surrounding hydrogen station

Num ber	Building surrounding H2 Station	Width [m]	Depth [m]	Purchase cost [Won]
1	Office (three-story)	35.6	11.8	1,093,000,000
2	Security Office (ground)	4.3	7.1	6,200,000
3	Control Room (ground)	32.4	8.6	241,600,000
4	Gas Cylinder Storage Room (ground)	24.8	17.2	369,900,000
5	Other Company Office (three-story)	45.6	20.6	2,443,600,000
6	HRS Control Room (ground)	6	3	151,000,000

수소충전소 설비와 마찬가지로 표7과 같이 누출 원으로부터 거리 정보를 취합하였고, 누출 원으로부터 후보지에 따라 거리가 무의미할 정도로 떨어진 건물에 대해서는 해당 없음으로 표기하였다.

Table 7. Distance between each buildings and the blast wave source

Number	Buildings surrounding HRS	Layout A (m)	Layout B (m)	layout C (m)
1	Onsite-Office	35.3	45.1	N/A
2	Security Office	24.4	13.1	N/A
3	Operation Control Room	42.4	40.1	N/A
	Packaged Gas			
4	Cylinder Storage Room	N/A	N/A	9.4
5	Offsite-Office	N/A	N/A	9.3
6	HRS Control Room	4.5	3.5	4.2

3.6 후보지별 피해 금액 비교 및 최종 후보지 선정

앞서 정리된 식 (10) 에 따라, 그림 10과 같이 누출 원으로부터의 후보지별 피해 금액을 산정하였다.

$$\text{Total Loss} = \sum_{i=1}^n \text{Loss } \alpha_i + \sum_{i=1}^n \text{Loss } \beta_i \quad (10)$$

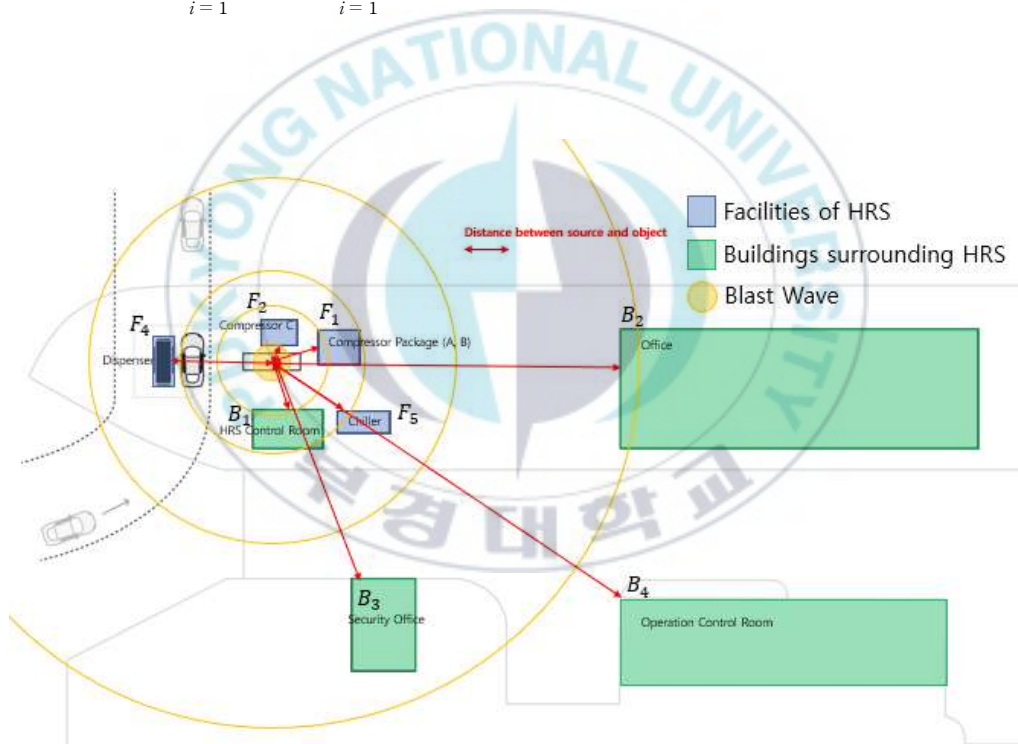


Fig. 10. Blast Wave from the source

그림 10과 같이 각각의 후보지별로 누출 원에서부터 설비까지의 거리 및

건물까지의 거리를 구하였고, 과압에 따른 거리별 피해 금액을 산정하였고, 비교한 금액은 그림 19와 같다.

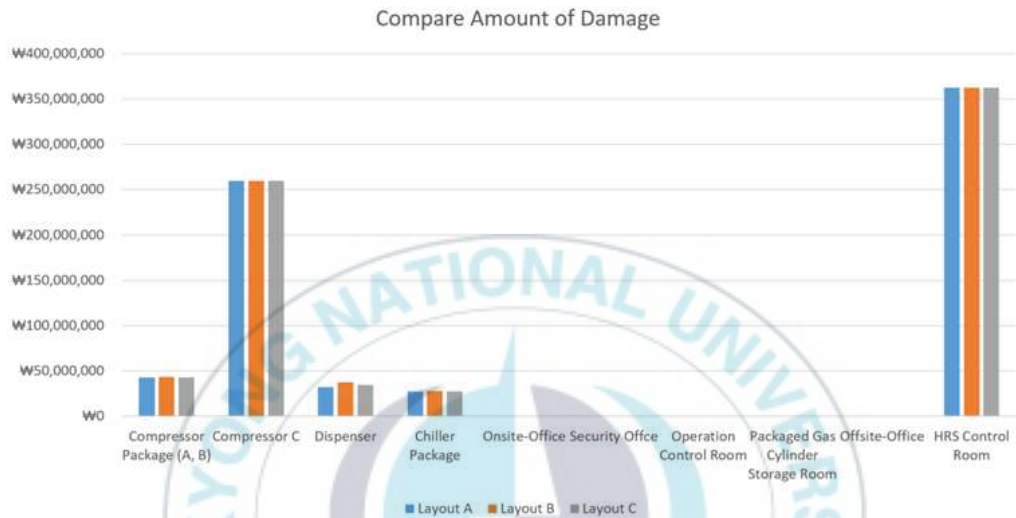


Fig. 19. Comparing amount of damage from each layouts

각각의 설비 위치에 따라 피해 금액을 전부 합산을 하면 표 8과 같이 나타낼 수 있다. 전체 피해 금액을 후보지 별로 비교하면 후보지 A가 가장 피해 금액이 적게 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Table 8. Comparing total cost of each layouts

Layout	Facilities and Buildings distance from the source (m)	Total Cost (Won)
A	F1 (6.9 m), F2 (3.2 m), F4 (10.4 m), F5 (10.8 m), B1 (35.3 m), B2 (24.4 m), B3 (42.4 m), B6 (4.5 m)	724,703,153
B	F1 (5.9 m), F2 (3.2 m), F4 (12.1 m), F5 (11.1 m), B1 (45.1 m), B2 (13.1 m), B3 (40.1 m), B6 (3.5 m)	731,912,605
C	F1 (6.4 m), F2 (3.4 m), F4 (11.1 m), F5 (10.9 m), B4 (9.4 m), B5 (9.3 m), B6 (4.2 m)	727,712,186

이에 사례 연구 대상인 A사에서는 피해가 가장 작게 예상되는 A 후보지를 수소충전소 설치 위치로 선정하였다.

피해 정도는 후보지 A가 가장 피해 금액이 최소화될 것으로 예상하지만, 여전히 누출 원에서 나오는 과압으로 인한 충전을 위해 방문한 고객과 고객의 차량 그리고 충전소에서 근무하는 근로자 등을 보호하기 위해 그림20과 같이 방호벽을 추가 적으로 설치하였고, 주변 건물에는 과압으로 인한 유리창 파손 시 파편이 튀지 않게 완화 필름을 부착하였다.

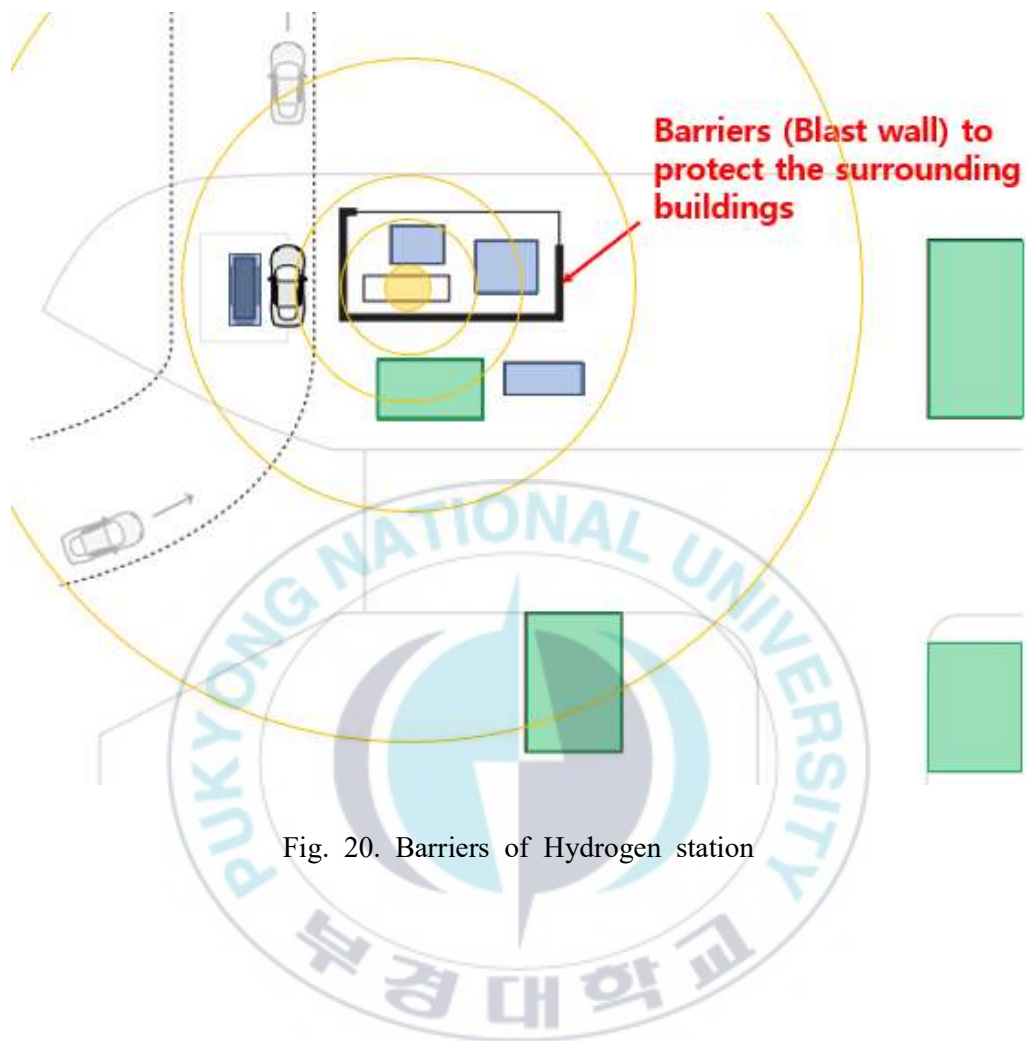


Fig. 20. Barriers of Hydrogen station

5. 결 론

본 연구에서는 수소충전소 부지 결정 시 TNT 모델을 활용하여 후보지 중에 피해를 최소화하는 후보지를 결정하는 방법을 제안하였다. 먼저 수소충전소 폭발에서 발생할 수 있는 과압을 TNT 모델을 활용하여 과압을 산정하고, 산정된 과압에 따른 피해를 수소충전소 배치에 활용되는 주요설비와 수소충전소 주변에 둘러쌓고 있는 건물에 대한 피해를 산정하는 방법론을 제안하였다.

나아가 피해를 산정하는 방법론을 실제 수소충전소를 짓고자 하는 A사의 사례 연구를 통해 제안한 방법론을 적용하여 실제 후보지 3곳 중 동일한 사고 시나리오의 사고 발생 영향에 따른 가장 피해가 적게 예상되는 후보지를 선정하는데 기여하였다. 이 과정에서 예상되는 피해 금액을 산정하여 비교하였으며, 금액적으로 가장 작은 후보지 A 위치를 결정할 수 있도록 기여하였다.

본 연구를 통해 수소충전소의 적합한 부지 선정 및 설비 배치 위치 선정에 피해가 최소화하는 방법론에 기여하였고, 향후 본 방법론이 수소충전소 설치 및 설비 배치 선정에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

추가로 향후 연구에서 주변 건물과 사람을 보호하기 위한 방호벽에 대한
건설비용도 피해 금액으로 산정하는 연구가 진행된다면, 피해 금액을 산정
하고, 충전소 및 설비 배치 위치를 선정하는 데 도움이 될 것으로 생각된
다.



참고 문헌

- 1) S. K. Ryi, J. Y. Han, C. H. Kim, H. K. Lim, H. Y. Jung "Comparing total cost of each layouts", Clean Technol., Vol. 23, No. 2, pp. 121-132, 2017
- 2) Ministry of Trade, Industry and Energy, "Hydrogen Economy Roadmap, 2019
- 3) Ministry of Environment, Hydrogen station strategic placement plan, 2022
- 4) H. L. Kim, S. K. Kang, Y. S. Huh, J. S. Moon, "Guidelines for Design and Operation of Overseas Hydrogen fuel station", Korean Society for New and Renewable Energy 191 - 191 (1page), 2017
- 5) Korea Environment Corporation, "finding hydrogen station designate site", 2021
- 6) Ministry of Environment, "Guidelines for Hydrogen Vehicle Supply and Charging Station Installation Project", 2022
- 7) Daniel A. Crawl, Joseph F.Louvar, "Chemical Process Safety", 2011
- 8) I. Sochet, "Blast effects of external explosions", HAL open science, 2010
- 9) E. Lopez, R. Rengel, G. W. Mair, F. Isorna, "Analysis of high-pressure hydrogen and natural gas cylinders explosions through TNT equivalent method", Vlberian Symposium on Hydrogen, Fuel Cells and Advanced Batteries, 2015
- 10) J. R. Kim, S. M. Hwang, M. O. Yoon, "A Study of Damage Assessment Caused by Hydrogen Gas Leak in Tube Trailer Storage Facilities", J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. Vol. 25, No. 6, 2011
- 11) J. Sakamoto, R. Sato, J. Nakayama, N. Kasai, T. Shibutani, A. Miyake, "Leakage-type-based analysis of accidents involving hydrogen fueling stations in Japan and USA, International Journal of hydrogen energy

41, 2016

- 12) H. H. Lee, H. G. Kim, J. O. Yoo, H. Y. Lee, O. S. Kwon, "A basic study for explosion pressure prediction of hydrogen fuel vehicle hydrogen tanks in underground parking lot", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2021
- 13) H. L. Kim, S. K. Kang, Y. S. Huh, "Accidents Analysis of Domestic and Overseas Refueling Stations and Assessment of Dangerous Distance by Gas Leak", Journal of Energy Engineering, Vol. 26, No. 4, pp.7~13, 2017
- 14) K. Y. Kim, "Accident damage prediction techniques Technical instructions", KOSHA, 2021
- 15) S. H. Leem, J. R. Lee, Y. J. Huh, "A Study on Estimation of Structure Damage caused by VCE", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 22, No. 5, pp. 65-70, 2007
- 16) B. G. Jung, "Plant layout and blast wall optimization with the consideration of operating conditions and potential explosions", 2021
- 17) J. W. Park, Y. S. Huh, S. K. Kang, "A Study on Site to Build Hydrogen Multi Energy Filling Station in Domestic LPG Station", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 6, pp. 642-648, 2017
- 18) C.J. Oswald, Q.A. Baker, "Vulnerability Model for the Occupants of Blast Damaged Buildings", 1999
- 19) Zalosh. R, "Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test", 2005
- 20) Korea Real Estate Agency, "Average value by purpose of building new construction unit price table", 2021
- 21) <http://www.newstomato.com/>