17CTAP-C129846-01

100만 명 도시형 복합 수소 네트워크 설계 및 안전성 평가, 관리기술 개발

최종보고서

2019

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

Infrastructure R&D Report

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )

국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

R&D / 17CTAP-C129846-01

100만 명 규모 도시형 복합 수소 네트워크 설계 및 안전성 평가, 관리기술 개발 최종보고서

2019. 02. 14.

주관연구기관 / 중앙대학교 산학협력단
공동연구기관 / ㈜리스크 씨에스피

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘100만 명 규모 도시형 복합 수소 네트워크 설계 및 안전성 평가, 관리기술 개발’(연구개발 기간 : 2017.04.01~ 2018.12.31) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2019. 02. 14.

주관연구기관명 : 중앙대학교 산학협력단 (대표자) 김 원 용 (인)

공동연구기관명 : ㈜리스크 씨에스피 (대표자) 박 용 민 (인)

주관연구기관책임자: 이 철 진
공동연구기관책임자: 장 창 봉

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>17CTAP-C129846-01</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2017.04.01.~
2018.12.31</td><td>단계구분</td><td>2차년도 /
총 2차년도</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">창의도전과제 기초원천</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">100만 명 규모 도시형 복합 수소 네트워크 설계 및 안전성 평가, 관리기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">100만 명 규모 도시형 복합 수소 네트워크 설계 및 안전성 평가, 관리기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">이 철 진</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 12명
내부: 8명
외부: 4명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부:198,000천원
기업:66,000천원
정부 외: 천원
계:264,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 13명
내부: 9명
외부: 4명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:370,000천원
기업:124,000천원
정부 외: 천원
계:494,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">중앙대학교 산학협력단 / 화학신소재공학부</td><td colspan="2">참여기업명
㈜ 리스크 씨에스피</td></tr>
<tr><td colspan="4">5만 명 규모 도시의 연간 사용 에너지 계산 후 부생수소 인근 지역 및 일반 주거지역으로 나누어 수소 네트워크 설계를 수행. 운송방법(파이프라인/트레일러) 및 이송 주기에 따른 수소 수송량 산정. 그 이후 수소 충전소 내 저장 탱크 용량 산정. 사고 시나리오 작성 후 안전성 평가를 통한 최종 부지 선정. 공정 시뮬레이션으로 발전용 수소 공급 모델 도출. 수학적 모델링으로 수소 네트워크 최적설계 및 OPEX, CAPEX 계산.
100만 명 규모 도시의 연간 사용 에너지 계산 후 도시 내 수소 공급을 위한 중앙 허브 수소 충전소 설치 검토. 차량/발전용 수소 이송량 및 운송방법(파이프라인/트레일러)에 따른 주기 계산 후 저장 탱크의 용량 산정. 허브 수소 충전소 및 서브 수소 충전소 각각 사고 시나리오 작성 후 2D/3D 안전성 평가를 통한 최종 부지 선정. 차량/발전용 감압 및 가압 공정 시뮬레이션을 통해 복합 수소 공급 모델 도출. 수학적 모델링으로 복합 수소 네트워크 최적설계 및 경제성 평가. 안전성 평가 기법 및 유지관리 기법 체계화.</td><td colspan="2">보고서 면수
p.</td></tr>
</table>

〈 요약서 〉

연구의 목적 및 내용	5만 명 규모 도시의 연간 사용 에너지 계산 후 부생수소 인근 지역 및 일반 주거지역으로 나누어 수소 네트워크 설계를 수행. 운송방법(파이프라인/트레일러) 및 이송 주기에 따른 수소 수송량 산정. 그 이후 수소 충전소 내 저장 탱크 용량 산정. 사고 시나리오 작성 후 안전성 평가를 통한 최종 부지 선정. 공정 시뮬레이션으로 발전용 수소 공급 모델 도출. 수학적 모델링으로 수소 네트워크 최적설계 및 OPEX, CAPEX 계산. 100만 명 규모 도시의 연간 사용 에너지 계산 후 도시 내 수소 공급을 위한 중앙 허브 수소 충전소 설치 검토. 차량/발전용 수소 이송량 및 운송방법(파이프라인/트레일러)에 따른 주기 계산 후 저장 탱크의 용량 산정. 허브 수소 충전소 및 서브 수소 충전소 각각 사고 시나리오 작성 후 2D/3D 안전성 평가를 통한 최종 부지 선정. 차량/발전용 감압 및 가압 공정 시뮬레이션을 통해 복합 수소 공급 모델 도출. 수학적 모델링으로 복합 수소 네트워크 최적설계 및 경제성 평가. 안전성 평가 기법 및 유지관리 기법 체계화.				
연구개발성과	안전성 평가를 마친 100만 명 규모 도시의 복합(차량/발전용) 수소 네트워크 설계 및 경제성 평가를 통한 합리적인 수소 네트워크 도출 및 안전성 평가 기법 및 유지관리 기술 기법 체계화				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	5만 명 규모 도시의 발전용 및 100만 명 규모 도시의 복합(차량 및 발전용) 수소 네트워크 공정 모델 및 경제성 평가 모델과 안전성 평가, 유지관리 기법 체계를 도출. 인구 규모에 따른 수소 에너지양 산정법 및 수소 네트워크 구축 시 필요 설비 및 공정설계 소요 비용 산정 예측 가능, 안전성 평가 및 유지관리 체계화.				
핵심어 (5개 이내)	수소 네트워크	최적 설계	경제성	안전성	유지관리

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	First year, we carry out hydrogen network design for 50 thousands population to devide by-product hydrogen area and normal area after calculating annual energy consumption for power. According to transport(pipeline/trailer) and transfer cycle, we calculate hydrogen transported volume. And then, A tank capacity is calculated in hydrogen station. Also, A final location of the hydrogen station is chosen through safety assessment by researchers. Hydrogen supply model for power is carried out using process simulation. We will make mathematics modeling for optimal design about hydrogen network. Finally, A profitability is carried out calculating CAPEX and OPEX. Second year, we calculate annual hydrogen energy consumption about 1 million population. And then we should check to install the center hub hydrogen station for hydrogen providing in the city. A transfer cycle is calculated following transport(pipeline/trailer) and hydrogen transfer. Also, the tank capacity is considered by the hydrogen transfer. We can do risk assessment for decision the location of center hub hydrogen station and sub hydrogen station. The complex hydrogen network for car fuel and power is carried out using reduced pressure and pressurization process modeling. We will make a optimal complex hydrogen network for car fuel and power using the mathematic modeling. In addition, We carry out a profitability from the network. Finally, We systematize the safety assessment and management to the hydrogen network.				
Results	1. The complex hydrogen network process model for 1 million population to consider risk assessment. 2. The systematized safety assessment and management.				
Expected Contribution	The user can predict amount of hydrogen energy, necessary equipment and expenses to making hydrogen network process design according to the population size. Also the user can check risk assessment and management.				
Keywords	Hydrogen network	Optimal design	Profitability	Safety	Management

〈 Contents 〉

1. Outline of Research and Development ····· 1
2. Current Status of R&D in Domestic and Overseas ····· 6
3. Contents of Research and its Outcome ····· 16
4. Achievements and Expected Contributions ····· 170
5. Application Planning of Research Results ····· 174
6. Scientific and Technical Information Obtained during Research ····· 175
7. Security Degree of Research Results ····· 185
8. Registered Research Facilities and Equipments in the National Science and Technology Information System ····· 186
9. Records of Safety Treatment at the Lab. in the Course of Research ····· 187
10. Representing Research Results ····· 188
11. Miscellaneous Items ····· 189
12. References ····· 190

〈 목 차 〉

제 1장. 연구개발과제의 개요 ····· 1
제 1절. 연구개발 목적 ····· 1
1. 기술개발 목표 요약 ····· 1
2. 온실가스 증가에 따른 지구온난화 규제강화 ····· 1
3. 신재생에너지로서의 수소의 장단점 ····· 2
제 2절. 연구개발 필요성 ····· 4
1. 수소 네트워크의 정의 및 필요성 ····· 4
2. 수소 네트워크 보급의 한계 ····· 4
제 3절. 연구개발 범위 ····· 5
1. 안전성과 경제성을 고려한 5만 명 수소 네트워크 설계기술 요구 ····· 5
2. 대규모 100만 명 복합 수소 네트워크 설계 목표 ····· 5

제 2장. 국내외 기술 개발 현황 ····· 6
제 1절. 국내 기술 현황 ····· 6
제 2절. 국외 기술 현황 ····· 8
1. 미국 ····· 9
2. 유럽 ····· 10
3. 일본 ····· 11

제 3장. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 16
제 1절. 세부 추진 내용 ····· 16
1. 연구개발 흐름도 ····· 16
2. 연구개발 단계에 따른 세부 연구 내용 ····· 17
제 2절. 5만 명 규모 도시의 발전용 수소 네트워크 ····· 17
1. 도시 선정 및 연간 수소 소모량 계산 ····· 17
2. 도시 내 수소저장소의 설계 조건 및 비용 추산 ····· 20
3. 도시 내 수소 네트워크의 수학적 최적화 모델 ····· 33
4. 수소 네트워크 내 배관망 공정 모델 시뮬레이션 ····· 41
5. 5만 명 규모 도시의 수소 네트워크 최적화 결과 ····· 55
제 3절. 100만 명 규모 도시 간 발전용 및 차량용 수소 네트워크 ····· 59
1. 도시 선정 및 연간 수소 소모량 계산 ····· 59
2. 수소 네트워크 설계 조건 및 비용 추산 ····· 60
3. 100만 명 규모 도시 간 수소 네트워크의 수학적 최적화 모델 ····· 84
4. 발전 및 차량용 수소 공급 공정 모델 시뮬레이션 ····· 99
5. 100만 명 규모 도시의 수소 네트워크 최적화 결과 ····· 109
제 4절. 수소 네트워크의 안전성 평가 및 유지관리 기법 ····· 113
1. 수소 에너지 시설 안전성 평가 ····· 113
2. 5만 명 규모 발전용 수소 에너지 시설의 정량적 위험성 평가 ····· 116
3. 100만 명 규모 복합 수소 에너지 시설의 정량적 위험성 평가 ····· 130
4. 수소 네트워크 설계 조건 및 비용 추산 ····· 168
제 4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 170

제 5장. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 174

제 6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 175

제 7장. 연구개발성과의 보안등급 ····· 185

제 8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 186

제 9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 187

제 10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 188

제 11장. 기타 사항 ····· 189

제 12장. 참고 문헌 ····· 190

제1장. 연구개발과제의 개요

제 1절. 연구개발 목적

1. 기술개발 목표 요약

○ 본 연구 개발을 위한 목표와 이에 따른 세부 성과 모식도는 <그림 1.1>과 같음

<그림 1.1. 기술 개발 총괄 목표>

○ 본 연구개발의 목표는 100만 명 인구 규모에서 차량 및 발전용 수소 사용을 고려한 네트워크 설계를 수행하고, 이를 수행할 때 안전성 평가와 경제성 평가를 모두 고려하는 것을 목표로 함.

○ 일반적인 연구는 수소의 생산 혹은 이송 등의 전체 가치사슬 중 한 부분에 대해서만 최적 설계를 수행해옴. 그러나 가치사슬은 생산, 저장, 이송, 분배를 모두 고려해야해야 함.

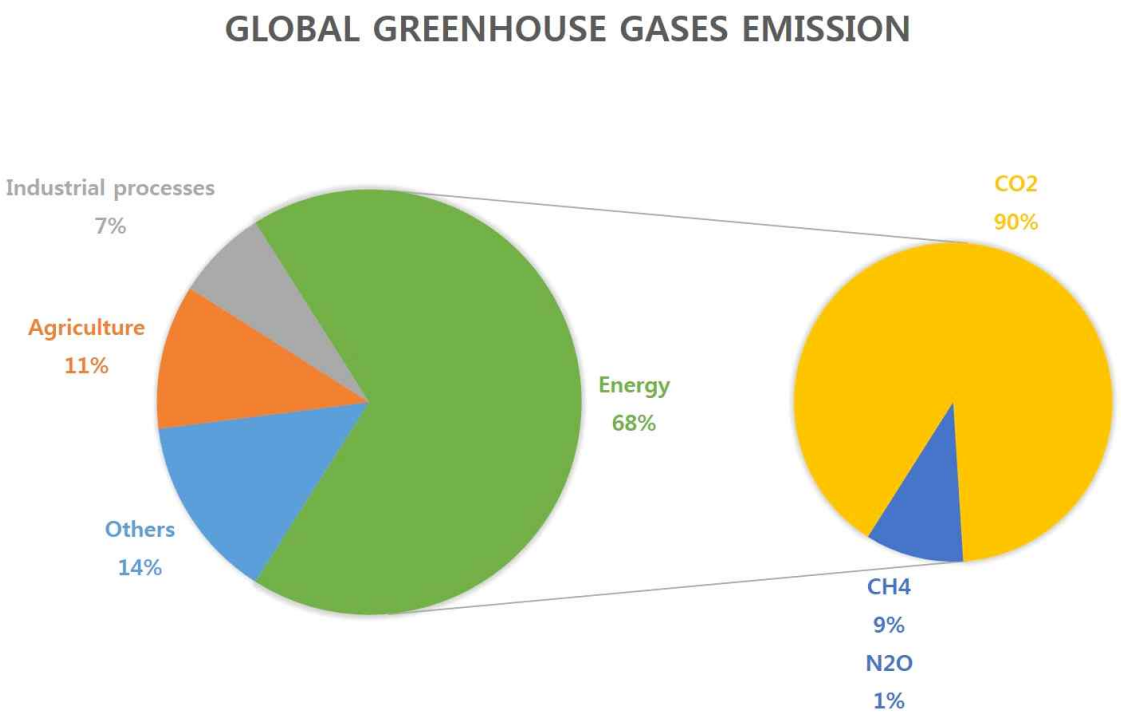
○ 국토교통부에서 중장기 연구 목표로 5만 명 인구 규모의 수소 네트워크 설계를 목표로 함, 본 과제에서는 해당 목표를 토대로 1차 년도에 5만 명 인구규모의 전력 공급에 필요한 수소 네트워크 설계를 수행하고자 함. 2차 년도에서는 인구규모를 광역시 수준(통상 100만 명 상회 후 면적, 지리적 여건, 잔여지역에 미치는 영향, 재정자립도 등을 종합적으로 검토하여 설치, 행정구역 실무편람(2011) 참고)인 100만 명을 기준으로 발전뿐 만 아니라 차량용 연료로서 수소를 고려한 복합 수소 네트워크 설계를 수행하고자 함. 이 때 안전성을 함께 고려하였으며, 해당 설비의 관리기술 또한 개발을 목표로 함.

2. 온실가스 증가에 따른 지구온난화 규제강화

○ 온실가스는 인간 활동에 의해 배출이 증가하는 추세이며, 특히 연료연소에 의한 이산화탄소 배출증가로 지구의 대기 이산화탄소 농도가 급증하고 있음. 대기 중 이산화탄소 농도는 최근 10년 동안 매년 2ppm의 속도로 빠르게 상승했으며 메탄과 아산화질소의 농도도 크게 상승함.

○ 이산화탄소 농도 급증에는 에너지 사용이 주요 요인으로 작용했으며 농업부문의 가축과 벼 재배에서 발생하는 메탄과 아산화질소, 산업공정부문의 불화가스 및 아산화질소 배출도 요인으로 작용함. 2010년 세계 온실가스 배출(CO_2, CH_4, N_2O)에서 에너지부문(연료연

소, 탈루배출)이 68%, 산업공정이 7%, 농업부문이 11% 기타부문이 14%를 차지했음.



<그림 1.2. 인위적인 시계 온실가스 매출량 급증(2010)>

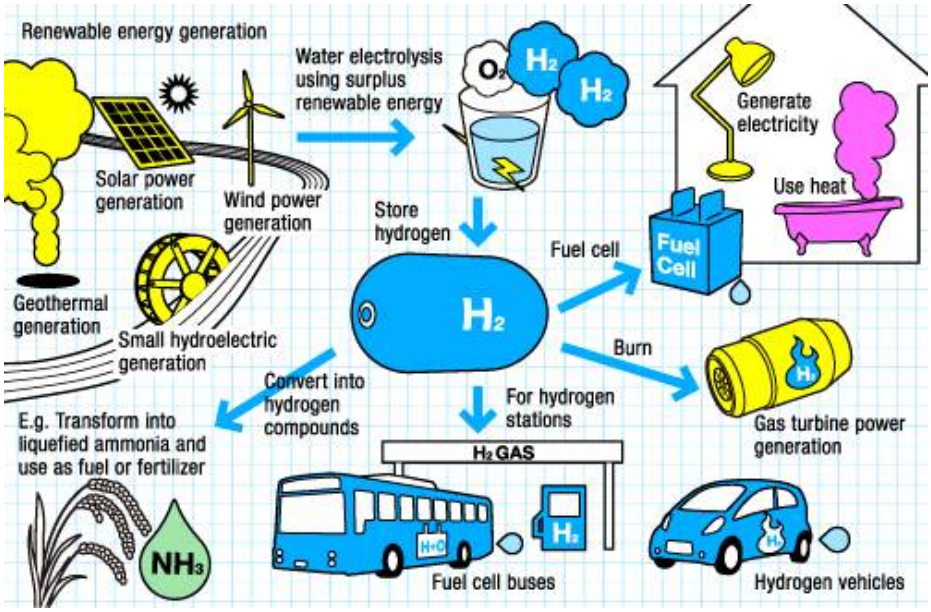
○ 1997년 지구온난화 규제 및 방지를 위해 선진국의 온실가스 감축 목표치를 규정한 것이 교토의정서임. 그러나 교토의정서의 경우 참여 선진국에 대해서만 감축의무를 추진해왔으며 개도국에게는 감축의무가 부여되지 않아 온실가스 감축체제의 한계점이 노정되어옴.

○ 2015년 파리기후변화협약을 통해 신 기후체제의 출범이 선포됨. 감축의무 대상국가가 37개 선진국에서 개도국을 포함하여 195개국으로 확대되었음. 이에 따라 각 국은 국가기여방안(INDC)을 제출 하였으나 예상대로 이행된다 할지라도 지구온도의 2도 이내 상승에는 역부족일 것으로 예상됨.

3. 신재생에너지로서의 수소의 장단점

○ 기존 화석연료의 대체로 신재생에너지가 떠오르고 있음. 신재생에너지에는 태양광, 태양열, 풍력, 연료전지, 수소, 바이오메스 등이 있으며 기후에 관계없이 가장 친환경적으로 쓸 수 있는 수소를 바탕으로 한 에너지가 떠오르고 있음. 수소는 에너지를 발생시키기 위해 산소만 필요로 하며 연소 후 물만 부산물로 발생되는 장점이 있음.

○ 수소를 생산하는 방법은 크게 태양광이나 풍력을 이용한 수전해 방법, 생물학적으로 광합성 박테리아를 이용한 수소생산 방법, 화학단지에서의 부생수소생산방법, 천연가스 개질 및 열역학적 사이클을 이용한 방법들이 존재함. 이렇게 생산한 수소를 바탕으로 에너지원으로 사용할 수 있는데 대표적으로 사용되는 수소연료전지는 가정용 및 건설용 에너지원, 차량용 에너지원으로 사용될 수 있음. 또한 수소차나 가스터빈을 구동시키기 위한 연소에너지원으로도 이용됨.



<그림 1.3. 수소에너지 시스템 개요>

○ 안전보건공단의 MSDS(Material Safety Data Sheet) 따르면 수소는 극인화성가스로 분류되며 가열시 폭발할 수 있는 위험성을 내포하고 있음. 누출 시 무색무취로 인해 사람이 인지하기 힘드며, LFL(Lower Flammable Limit, 폭발하한범위) & UFL(Upper Flammable Limit,폭발상한범위)가 4%~76%로 상당히 큰 범위를 가지고 있음. 이와 같은 이유로 인해 신재생에너지원으로의 수소에 대한 사회적 인식은 아직 부정적인 상황임.

MSDS 요약정보

품명	수소

1. 일반정보

CAS No.	1333-74-0	KE No.	KE-20137
물질상태 :	기체	분자량 :	2
끓는점 :	-253 ℃	녹는점 :	-259 ℃
인화점 :	자료없음		
주요용도 :	자료없음		

2. 물질정보

물질명	CAS No.	함유량(%)
수소	1333-74-0	100%

3. 그림문자

4. 유해위험 문구

극인화성 가스
고압가스 포함 ; 가열하면 폭발할 수 있음
흡입하면 유해함

5. 응급조치요령

눈에 들어갔을	긴급 의료조치를 받으시오
피부에 접촉했을 때	긴급 의료조치를 받으시오 피부에 얼어붙은 옷은 제거하기전 해동하시오 화상의 경우 즉시 찬물로 가능한 오래 해당부위를 식히고, 피부에 얼어붙은 옷은 제거하지 마시오 액화가스에 접촉한 경우 미지근한 물로 해당 부위를 헹이시오 가스 또는 액화 가스와 접촉 시 화상, 심각한 상해, 동상을 유발할 수 있음 불편함을 느끼면 의료기관(의사)의 진찰을 받으시오
흡입했을 때	과량의 먼지 또는 흄에 노출된 경우 깨끗한 공기로 제거하고 기침이나 다른 증상이 있을 경우 의료 조치를 취하시오. 긴급 의료조치를 받으시오 호흡하지 않는 경우 인공호흡을 실시하시오 호흡이 힘들 경우 산소를 공급하시오
먹었을 때	긴급 의료조치를 받으시오

6. 저장방법

밀폐하여 보관하시오.
빈 드럼통은 완전히 배수하고 적절히 막아 즉시 드럼 조절기에 되돌려 놓거나 적절히 배치하시오.
열 스파크 화염 고열로부터 멀리하시오 - 금연
용기는 열에 노출되었을 경우 압력이 올라갈 수 있으므로 열에 폭로되지 않도록 하시오
직사광선을 피하고 환기가 잘 되는 곳에 보관하시오.
피해야할 물질 및 조건에 유의하시오

7. 피해야 할 조건 및 물질

피해야 할 조건	열 스파크 화염 고열로부터 멀리하시오 - 금연
피해야 할 물질	자료없음

8. 누출 및 폭발·화재 사고시 대처방법

누출	(분진 흄 가스 미스트 증기 스프레이)의 흡입을 피하시오. 가능하다면 누출용기를 돌려 액체보다는 가스로 방출되도록 하시오 가스가 완전히 확산되어 희석될 때까지 오염지역을 격리하시오 냉동액체와의 접촉 물질은 쉽게 깨질 수 있음 노출물을 만지거나 걸어다니지 마시오 누출성 가스 화재 시 누출을 안전하게 막을 수 없다면 불을 끄려하지 마시오. 누출원에 직접주수하지 마시오 매우 미세한 입자는 화재나 폭발을 일으킬 수 있으므로 모든 점화원을 제거하시오. 모든 점화원을 제거하시오 물분무를 이용하여 증기를 줄이거나 증기구름을 흩으러서 물이 누출물과 접촉되지 않도록 하시오 물질 취급시 모든 장비를 반드시 접지하시오 얼질러진 것을 즉시 닦아내고, 보호구 항의 예방조치를 따르시오. 위험하지 않다면 누출을 멈추시오 피해야할 물질 및 조건에 유의하시오

9.법적규제현황

노출기준	자료없음
특수건강진단주기	자료없음
작업환경측정주기	자료없음
산업안전보건법	공정안전보고서(PSM) 제출 대상 물질
화학물질관리법에 의한 규제	자료없음
위험물안전관리법에 의한 규제	자료없음

10. 취급시 주의사항

개인 보호구 착용	배기설비 가동 / 통기밸브	금연 화기엄금

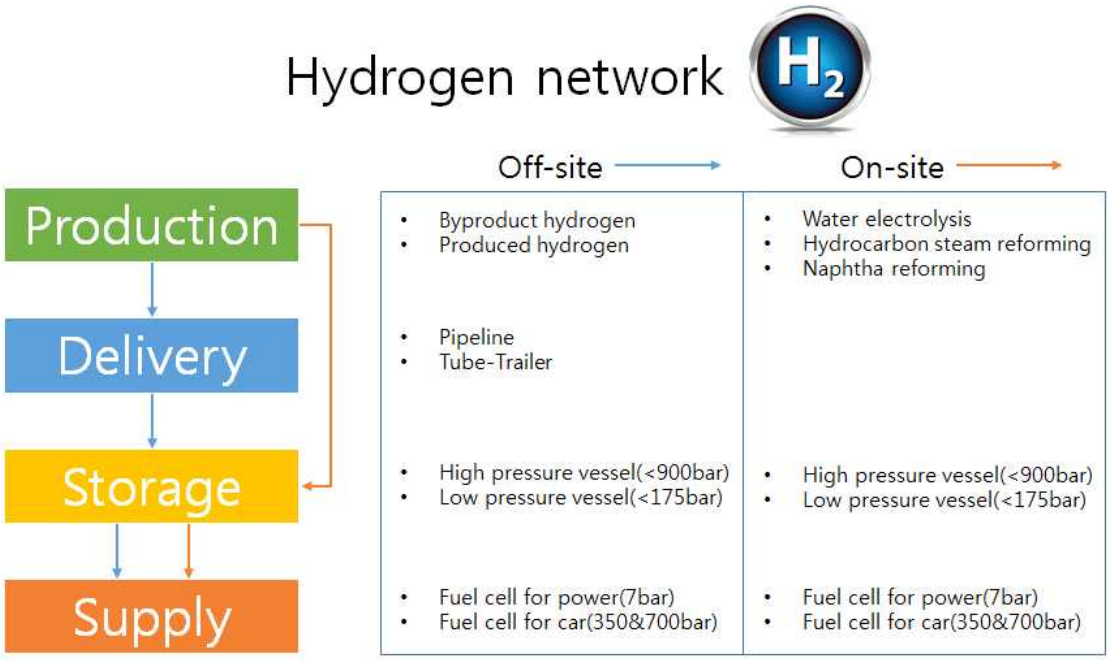
밀폐공간에서는 공기공급식 송기 마스크 착용
면 마스크, 일반방진 방독 마스크 착용 금지

기타 중독사례

<그림 1.4. 수소 MSDS>

제 2절. 연구개발 필요성

1. 수소 네트워크의 정의 및 필요성



<그림 1.5. 수소 네트워크의 개요>

○ 수소 네트워크란 수소의 생산, 이송, 저장 및 공급 이렇게 네 가지 단계로 나눈 것을 뜻하여 수소를 제조하여 소비자에게 공급하기까지의 시스템을 뜻함. 수소 네트워크 설계 시 생산에서부터 공급까지 선택하는 방식과 순서에 따라 고려해야 하는 변수의 수가 기하급수적으로 증가함.

○ 수소 네트워크의 설계는 생산, 이송, 저장, 공급의 단계의 부품을 각각 설계하는 것이 아닌 공급처에서 사용처까지 각 방법에 따른 설계로 인한 수소 공급 단가를 추산하는 것을 목표로 함.

○ 각 분야의 기술개발도 중요하지만 유기적으로 수소를 사용자에게 보급할 수 있는 최적의 설계기술을 보유해야함. 생산기술, 이송기술, 저장기술, 공급기술 각각 연구가 활발하게 이루어지고 있으나 이 네 가지 기술을 잇는 설계기술은 따로 보유하고 있지 않음. 국내에서는 각 지자체별로 수소에 대한 기술을 개발하려는 기획을 하고 있으나, 수소의 사용처에 따른 최적의 수소 네트워크 설계에 대한 내용은 아직 전무한 상태임.

2. 수소 네트워크 보급의 한계

○ 수소의 경우 저장하는 방식에 따라서 고압가스로의 수소저장, 저온액체로의 수소저장, 합금을 통한 저장으로 나뉠 수 있음. 세계적으로 각각 수소를 저장하는 방식에 따라 필요한 기술을 개발하고 있는 상황이며, 고압가스의 수소저장이 수소연료전지차량 및 수소저장소에서 관리하기 쉬우므로 많이 사용하는 추세임.

○ 수소 네트워크 보급 장애요인은 수소는 고압가스로 분류되기 때문에 고압가스안전관리법 시행규칙을 따라야함. 학교, 유치원, 학원, 의원을 포함한 병원 등 1종 보호시설 근처

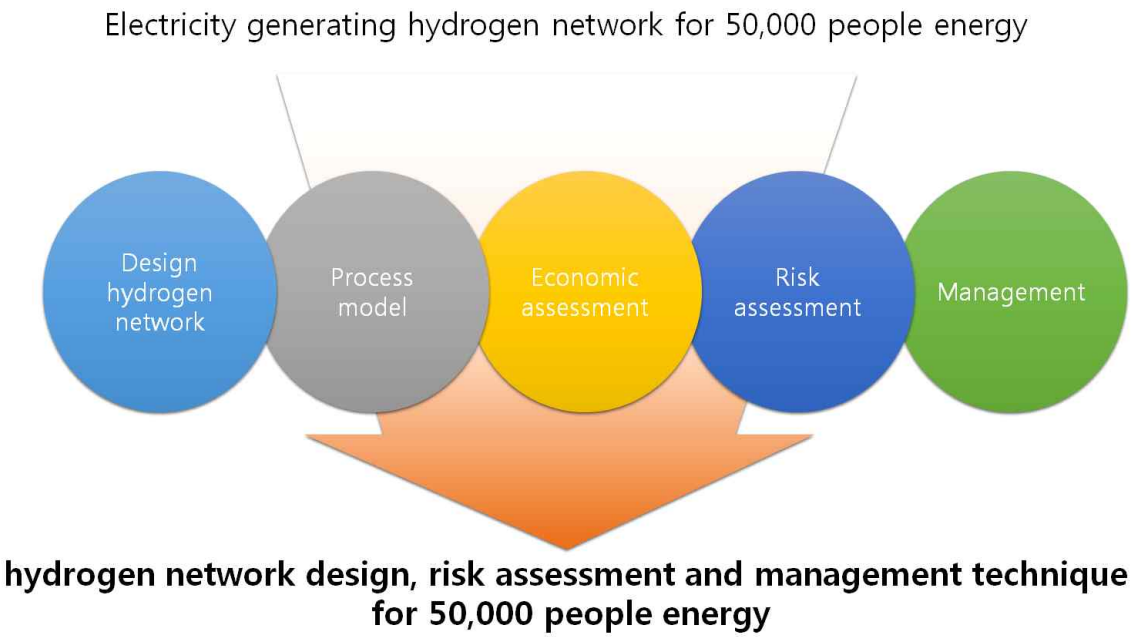
에 구축하기 위해선 보호시설 17m, 도로경계 5m, 사업소경계 1m 등의 안전거리를 유지해야함. 또한 처리시설 및 압축가스설비로부터 30m이내에 보호시설이 있는 경우 가스폭발에 따른 충격을 견딜 수 있는 철근콘크리트 방호벽 설치를 필요로 함. 이는 수소 네트워크 중 일부를 담당하는 수소 충전소 구축에 드는 비용이 30억 정도로 고가에 해당함.

제 3절. 연구개발 범위

1. 안전성과 경제성을 고려한 5만 명 수소 네트워크 설계기술 요구

○ 2014년 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원에서 작성한 국토교통 R&D 중장기 전략 국토분야 중 수소 네트워크가 한 분야를 차지하고 있음. 이 보고서에는 장기 연구분야로 '5만 명 규모 수소 네트워크 구축기술 개발'을 목표로 함. 또한 추진방향을 '수소인프라 구축을 위한 도시형 수소 네트워크 설계관리기술 추진'으로 명시하고 있음

○ 수소 네트워크 구축기술의 연구는 에너지 자족률 및 온실가스 감소에 기여할 것으로 기대됨. 본 연구에서는 국내에 있는 도시에서 5만 명이 사용 가능한 발전용 수소 네트워크를 설계하고 수소 네트워크 설계 시 정량적 사고 분석을 통해 사고 시 위험에 대한 해석과 방재 및 방폭 등의 적정성을 정량화하여 해석을 수행함. 또한 각 수소 네트워크 설계 시 사용용도에 따라 필요한 최소의 수소 요구량을 파악하고, 네트워크 구성에 필요한 비용과 기타 제약조건으로 최적화 문제를 구성하여 최적의 수소 네트워크를 설계하고 이를 유지하기 위한 관리기술을 도출하고자 함.



<그림 1.6. 5만 명 규모 도시형 발전용 수소 네트워크 설계 방법>

2. 대규모 100만 명 복합 수소 네트워크 설계 목표

○ 100만 명이 친환경 에너지인 수소 에너지를 이용하여 발전 및 차량에 소요되는 에너지를 수소에너지로 대체하기 위한 수소 네트워크 설계를 목표하고자 함. 이는 발전용 수소 네트워크 설계보다 고려해야할 사항이 많음. 부생수소 발생지역에서부터 100만 명 규모의 도시까지 수소 이송 시 비용이 고가로 산정될 경우가 있으므로, 중앙 집중형 수소저장소가 위치할 장소 선정의 필요가 있으며, 발전용 에너지와 차량용 에너지의 산정 규모에 따라 발전용 및 차량용 분산형 수소저장소의 수용 용량 및 설치 개수 등 산정해야함. 5만

명 규모보다 인구 규모가 상승 시 수소 네트워크 설계 변수를 더 고려하여 최적의 수소 네트워크 설계를 이루고자 함.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

제 1절. 국내 기술 현황

국내 수소충전인프라 구축 현황

	위치	운영	설치시기	방식	충전압력
1	화성	현대차	2001	부생수소	70MPa
2	용인	현대차	2005	부생수소	35/70MPa
3	대전	에기연	2006	NG개질	35MP
4	서울(신촌)	GS칼텍스	2007	납사개질	35MP
5	인천	가스공사	2007	NG개질	35MP
6	대전	SK에너지	2007	LPG개질	35MP
7	서울(홍릉)	KIST	2008	부생수소	35MP
8	화성	현대차	2008	부생수소	70MPa
9	울산	동덕가스	2009	부생수소	35MP
10	여수	SPG산업	2009	부생수소	35MP
11	제주	현대차	2010	수전해	35MP
12	서울(양재)	현대차	2010	부생수소	35MP
13	서울(상암)	서울시	2010	매립가스 개질	35MP
14	부안	KIER	2011	수전해	35MP
15	울산	동덕가스	2012	부생수소	70MPa
16	대구	이엠코리아	2013	수전해	70MPa

☞ 5개소는 운영 중지 상태(1,4,6,10,14), 일반인 사용가능 2개소(15,16)

<그림 2.1. 국내 수소충전 인프라 구축 현황>

○ 국내 수소 충전소 보급계획 및 설치비용을 근거로 하여 내수 및 수출시장을 산출하였음. 내수시장은 2030년까지 5,540억 정도로 예상됨. 국내 수소 충전소 건설 현황은 2005년 한국에너지기술연구원을 필두로 정부의 수소 충전소 실증과제를 통해 3곳에서 시범적으로 수소 충전소를 설립 운영하였으며, 전국적으로 연재의 수소인프라 구축 현황은 2013년 12월을 기준으로 국내의 경우 수소 충전소 16개소가 완공되어 14개소가 운영이 가능한 곳이며 실증 중인 수소 충전소는 현재 일부분으로 한국가스공사에서 인천공항 셔틀버스로 수소연료전지버스에 충전중임. 그러나 이러한 수소 충전소의 현황은 수소연료전지 자동차의 보급 측면에서 미흡한 상황임. 실제로 상용 수소 충전소는 거의 없는 상황이며 수소연로전지 자동차 보급을 위해서 이용할 수 있는 수소 충전소는 2~3개소에 불과한 실정임.

○ 국내에서 현재까지 수소인프라 관련 실증 및 모니터링 사업 현황을 살펴보면 실증이나 모니터링 사업에 참여한 관련 수소 충전소들은 항상 같지 않으며, 한 번도 참여하지 않은 수소 충전소도 많아 건설만 하고 운영에는 문제가 많다고 할 수 있음.

◆ 수소스테이션 실증 (2004. 9~2009. 8)
- 참여기업 : 현대차, KOGAS, SK, GS칼텍스 등
- 목표 : 수소스테이션 건설 및 운용

◆ 수소연료전지차 모니터링 (2006. 8~2010. 12)
- 참여기업 : 현대차, KOGAS, GS칼텍스, 동덕산업가스, SPG화학
- 목표 : 수소스테이션 4기 건설, 연료전지차 30대와 버스 4대 실증

◆ 수소연료전지차 사회적 실증 (2009. 12~2011. 11)
- 참여기업 : 현대차, GS칼텍스, 동덕산업가스
- 목표 : 수소연료전지차 100대 실증 및 수소스테이션 운전

◆ 수소연료전지버스 실증 (2011. 12~2013. 12)
- 참여기업 : 현대차, KOGAS

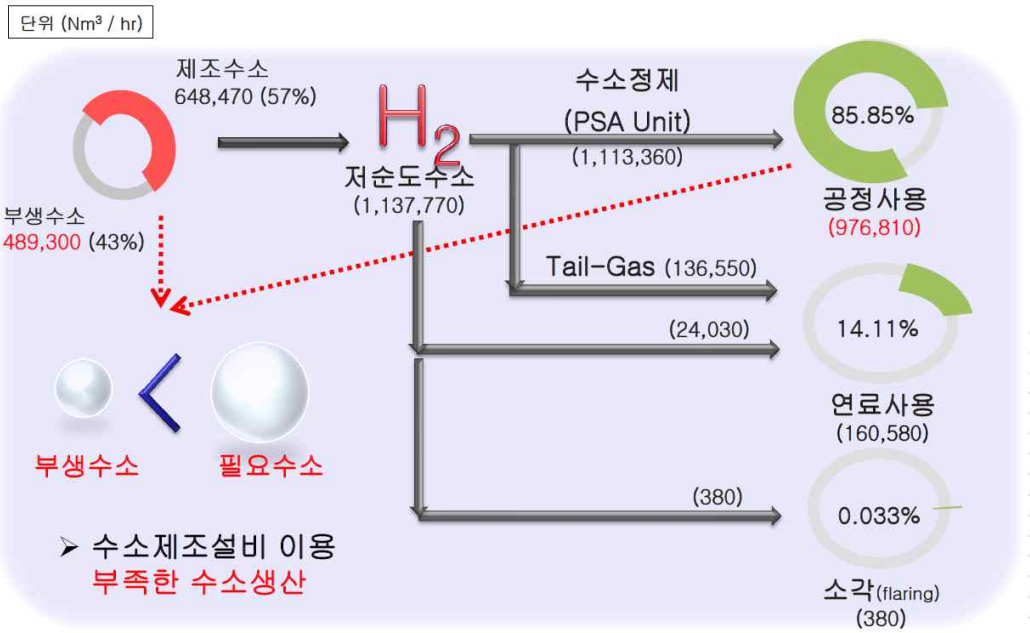
<그림 2.2. 국내 수소 충전소 관련 실증사업현황>

○ 2015년 관계부처 합동 '제3차 환경 친화적 자동차 개발 및 보급 기본계획'발표로 보다 명시적이고 구체적인 수소연료전지차 보급 및 수소 충전소 구축 로드맵을 갖게 되었으며 향후 탄력적이고 적극적인 수소인프라 구축 사업을 추진 중인 실정임. 2017년까지 총 27기의 수소 충전소가 국내에 구축될 계획이며 환경부는 수소 충전소 10기와 수소연료전지차량 130개의 보급을 목표로 예상을 확정한 실정임. 산업부 역시 수소연료전지버스 충전소 모니터링 사업을 추진하고 있으며, 국토부는 고속도로 수소충전을 위한 수소하이웨이 구축사업을 기획중임.

구분	2015	2020	2025	2030	2050
FCEV 대수 누계(대)	71	9,000	100,000	630,000	7,000,000
수소충전소누계(대)	12	80	210	520	1,500

<그림 2.3. FCEV & 수소 충전소 보급계획>

○ 한편 수소 네트워크의 핵심기술인 생산, 이송, 저장, 공급의 기술개발을 보면 생산의 경우 대표적인 석유화학도시인 울산은 온산국가산업단지 및 울산석유화학공단, 용연/용잠단지에서 부생수소 및 제조수소를 약 43%, 57%의 비율로 생산함. 국내에서는 생산에는 부생수소가 대부분을 이루고 있는 실정임. 이송기술은 파이프라인과 튜브트레일러 모두가 이용되고 있는 가운데 울산은 각 산업단지 및 석유화학공단에서 유기적인 파이프라인을 보유하고 있는 상황임. 저장방식은 고압기체 수소를 저장하고 있으며 현재 규제에는 Type 1의 형태만 고려되고 있으나 점차 고압을 견딜 수 있는 Type 3, 4로 기술개발이 이루어지고 있음. 마지막으로 공급의 경우는 현재 수소 충전소의 형태로만 이루어져 있음.



<그림 2.4. 울산 내 수소 총괄물질수지>

제 2절. 국외 기술 현황

○ 세계 각국은 2014년 11월 수소인프라로서 수소 충전소를 전 세계적으로 보급하였으며 현재까지 건설된 수소 충전소는 미국이 71개소, 유럽 87개소, 일본 36개소, 한국 11개소를 운영 중임. 각 지역별 건설되고 운영 중인 수소 충전소 현황을 나타낸 것으로 초기에 실증용으로 건설된 수소 충전소들은 폐기된 것으로 발표되고 있으며, 건 설중인 수소 충전소도 133개소로 이름.

지역	2014.11	2015[1]	2025[2]
북미	71	81	1,837
유럽	87	187	769
일본	36	100	760
한국	11	9	325

<그림 2.5. 세계 지역별 수소 충전소 현황(2014년도 기준)>

○ 수소연료전지 자동차의 보급을 위한 수소 충전소 구축도 미국, 일본 및 유럽 등이 앞서 있음. 특히 미국은 캘리포니아 지역을 중심으로 많은 수소 충전소를 건설하였으며, 일본에서도 지속적인 실증을 통해 상용화에 근접한 기술개발을 이루고 있으며, 정부를 중심으로 자동차업계와 인프라 업계 간의 협력 체계를 유지하여 인프라 구축에 나서고 있음.

1. 미국

<그림 2.6. 미국 내 수소 충전소 현황(2013년도 기준)>

○ 미국의 수소 생산방식은 태양광을 이용한 수소생산, 생물학적 수소생산, 천연가스 개질 및 물의 전기분해 등이 연구과제로 진행되고 있음. Center for Chemical Innovation은 Solar Fuel(CCI Solar) Program을 통해 태양광으로부터 수소를 생산함. National Renewable Energy Lab, Oak Ridge National Lab, Hawaii 대학 등에서는 수소 생산에 대한 연구를 진행하고 있으며, 캘리포니아 텍사스 주 같은 경우는 셰일가스 생산을 통해 수소생산량을 증가시키고 있음. 미국에서 사용되는 수소의 95%는 천연가스 스팀개질 방식의 생산으로 미국은 풍부한 자원을 바탕으로 한 수소생산이 주로 활용되고 있음. 물의 전기분해의 경우 Wind2H2 Project를 구상하여 대규모 풍력단지의 잉여 전력을 이용하여 수소 생산을 진행하고 있음.

○ 미국의 경우, 미국 DOE 및 CaFCP(California Fuel Cell Partnership)에서는 캘리포니아 지역에만 현재 수소 충전소 26개소를 실증 중에 있음. 그리고 DOE에서는 수소 충전소 설치에 관한 안전성 검증에 중점을 두고 있고, 수소 충전소 건설 및 생산업체에 대해서는 30%의 세제감면 정책을 펼치고 있음. 현재까지 미국 전체에 119개소 수소 충전소를 건설하여 67개소가 운영 중에 있음.

○ 미국 동해안 지역과 서해안 일부지역, 그리고 미시간 주와 플로리다 주에서 실시한 수소 충전소 실증에 참여한 수소 충전소의 경우 DOE의 경우 2006년에 수소 충전소 상용화 선결 조건으로 2017년도 예상 수소가격을 동일 발열량 가솔린 대비 2배이하의 가격이 가능한지를 기술 목표로 설정한 바 있음. 특히 제조방법과 무관하게 $3/kg-H2 이하를 요구하였으며 천연가스 개질에 의한 제조기술의 경우 목표치 달성이 가능한 것으로 알려짐. 미국의 경우 천연가스 스팀개질 방식을 통해 수소를 발생하는 방식이 90% 이상이기 때문에 충분히 달성이 가능할 것으로 예측.

<그림 2.7. 캘리포니아 First Element 사 13개의 충전소>

2. 유럽

○ 유럽의 수소생산기술은 개발은 벨기에, 네덜란드, 독일, 노르웨이, 영국, 북해 연안에서 100GW급 풍력, 60GW급 태양광 설비를 이용하여 물의 수전해로 수소를 대량생산하고 있음. 또한 독일의 경우 미생물 생물학적, 유전공학적 연구를 이용하여 생물학적 수소생산을 연구하고 있으며 ISA TEC에서는 광합성 박테리아를 이용한 수소 생산에 대한 연구가 진행되고 있음. 또한 열화학적 사이클을 이용한 연구도 진행되고 있는데 HYDROSOL Project는 실험실 규모의 산화철을 기반으로 하여 산화환원 사이클 내구성에 연구를 수행 중에 있음.

○ 이송에 관한 연구는 신재생에너지원의 잉여자원을 이용한 P2G(Power to Gas)를 추진하고 있음. 메탄화공정을 소형화하고 효율을 향상하여 가격저감을 추진하고 실정임. 생물학적 메탄화 기술 개발을 통해 다양한 P2G 플랜트 개발을 꾀하고 있으며, 유럽의 독일, 영국, 프랑스가 주도적으로 연구를 진행함.

○ 인프라의 경우 영국에서는 정부가 수소인프라구축에 110억을 투자하여 런던을 시작한 총 12곳에 수소 네트워크를 확대하고 있음. 수소인프라 확충을 위한 대표적인 지원 정책은 Clean Energy Partnership과 H2Moves가 있음. HyFIVE 프로젝트가 유럽 전반적으로 이루어지고 있는데 이는 유럽 수소연료전지차 보급 확대사업으로 유럽은 내륙이 모두 연결되어 있기 때문에 유럽 남부 클러스터에 5개 수소 충전소 개소를 완료했으며(슈투트가르트-뮌헨-인스부르크-볼차노) 독일 뷔르츠부르크와 뉘른베르크에 추가적으로 개소가 이루어지고 있음.

<그림 2.8. HyFIVE 프로젝트의 수소 충전소 현황>

3. 일본

○ 일본의 수소생산기술의 현황은 태양광을 이용한 수소생산과 생물학적 수소생산방식, 부생수소생산과 열화학적 사이클을 이용한 수소생산으로 나뉘고 있음. 태양광을 이용한 수소생산방식의 경우 수소 제조와 산업 부문 배출 CO2의 수소화를 위해 광촉매를 이용하는 연구가 진행되고 있음. 생물학적 수소생산의 경우 광합성 박테리아를 이용하여 유기폐기물 수소 생산연구를 진행하고 있음. 국내와 비슷한 부생수소생산방식의 경우 부생수소를 활용하여 자체 전력생산을 수행하며 부생수소를 혼합한 천연가스를 연료로 하는 가스복합발전소를 건설 예정에 있음. 열화학적 사이클을 이용한 방식은 요오드-황 사이클에 분리막을 조합하여 저온에서도 가능한 프로세스를 개발 중에 있음.

○ 장기적인 수소 네트워크 구성을 위해 WE-NET 프로그램을 1993년부터 2020년까지 장기연구과제로 선정하여 진행 중에 있음. R&D의 구성을 Phase 1,2,3로 나누어 각 Phase별로 단계적인 수소 네트워크를 기획하고 연구하는 단계임. 기초단계인 Phase 1은 수소의 생산량과 액화, 보관, 이송, 공급 등의 수소 네트워크의 수치적인 목표를 정하고 개념을 확립하는 단계로 이미 20여 년 전에 연구가 끝난 상황임.

1. Term
From 1993 to 2020 (28 years)

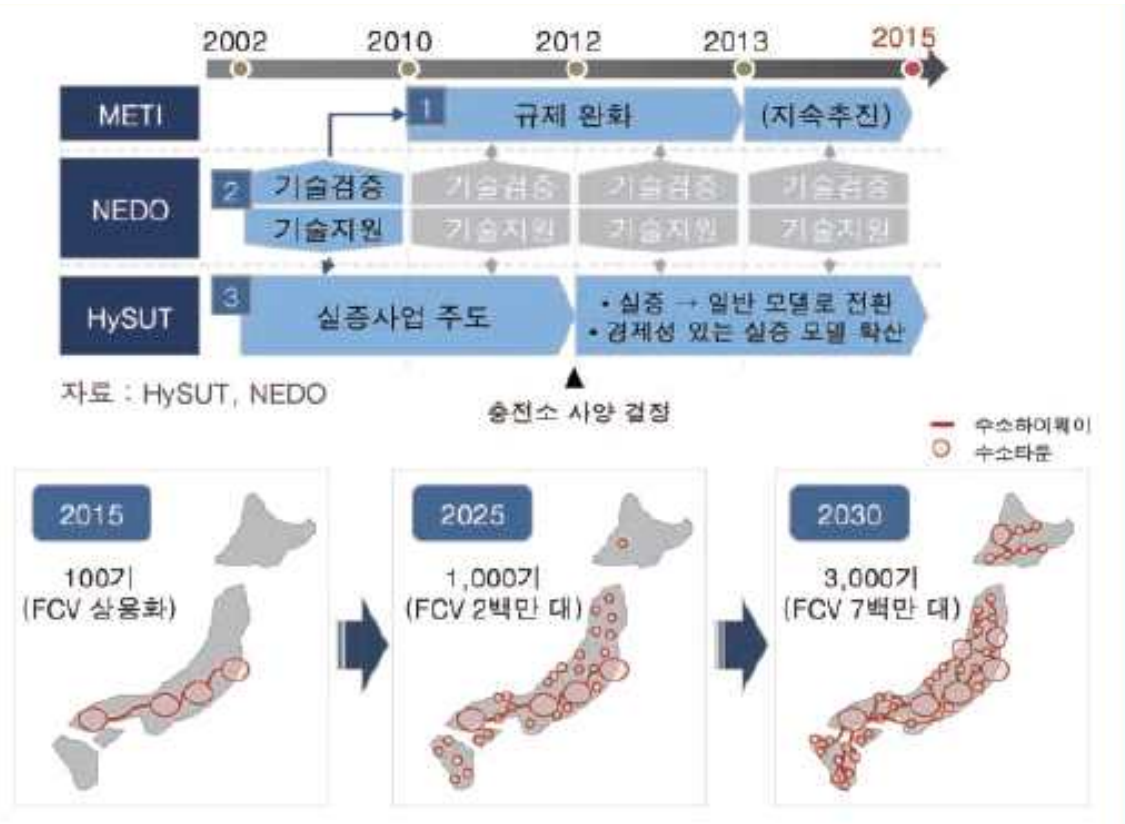
2. R & D method
The project divided into three phases

Phase Ⅰ	1993	~	1998
Phase Ⅱ	1999	~	2005
Phase Ⅲ	2006	~	2020

<그림 2.9. WE-NET Project의 기본계획>

Item	Target
1. Hydrogen production (PEM water electrolysis)	Electrode area: 2500 cm^2 Current density: 1 ~ 3A/cm^2 Energy efficiency: ~ 90%
2. Liquefaction	Conceptual design of 300 t/day plant
3. Storage	Conceptual design of 50 000 m^3 liquid hydrogen storage
4. Transportation	Conceptual design of 200 000 m^3 liquid hydrogen tanker
5. Hydrogen absorbing alloy	3% of weight (effective) at 100°C
6. Hydrogen utilization · Hydrogen combustion turbine	Turbine inlet temperature: 1700°C Energy efficiency: > 60% (HHV)

<그림 2.10. Phase 1 단계의 목표치>



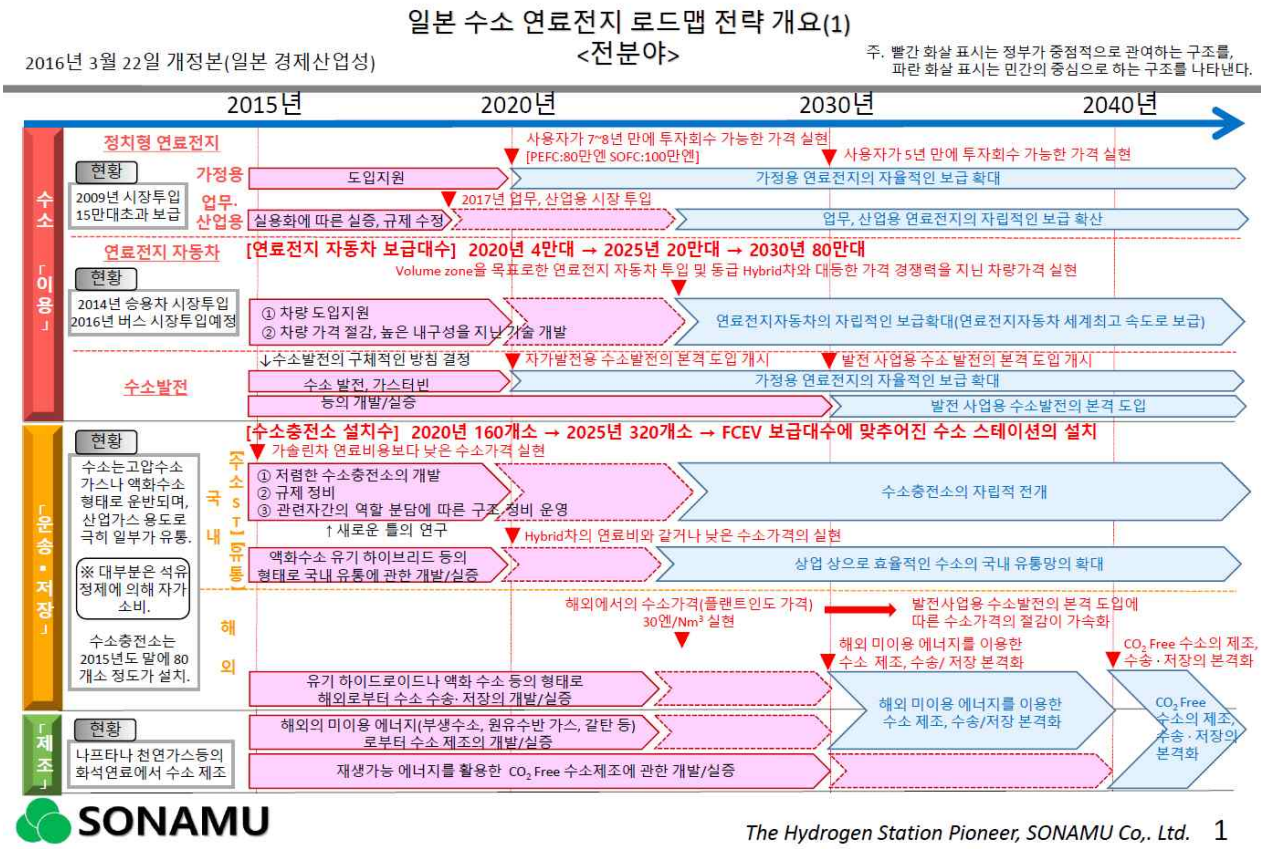
<그림 2.11. 일본 단기적 수소인프라 구축 및 자동차 보급 계획>

○ 일본의 경우 2002년부터 2005년까지 JHFC 1단계 사업에서는 2002년 도쿄가스에 첫 번째 수소 충전소를 건설하고 이후 2003년에 6개소, 2004년에 3개소, 2005년에 2개소 등 총 12개의 수소 충전소를 건설해 실증을 수행함. 이어 2006년부터 2010년까지 진행된 JHFC 2단계 사업에서는 2006년에 2개소, 2007년에 2개소,2009년에 3개소 등 총 7개소의 수소 충전소를 건설해 실증에 나섬.

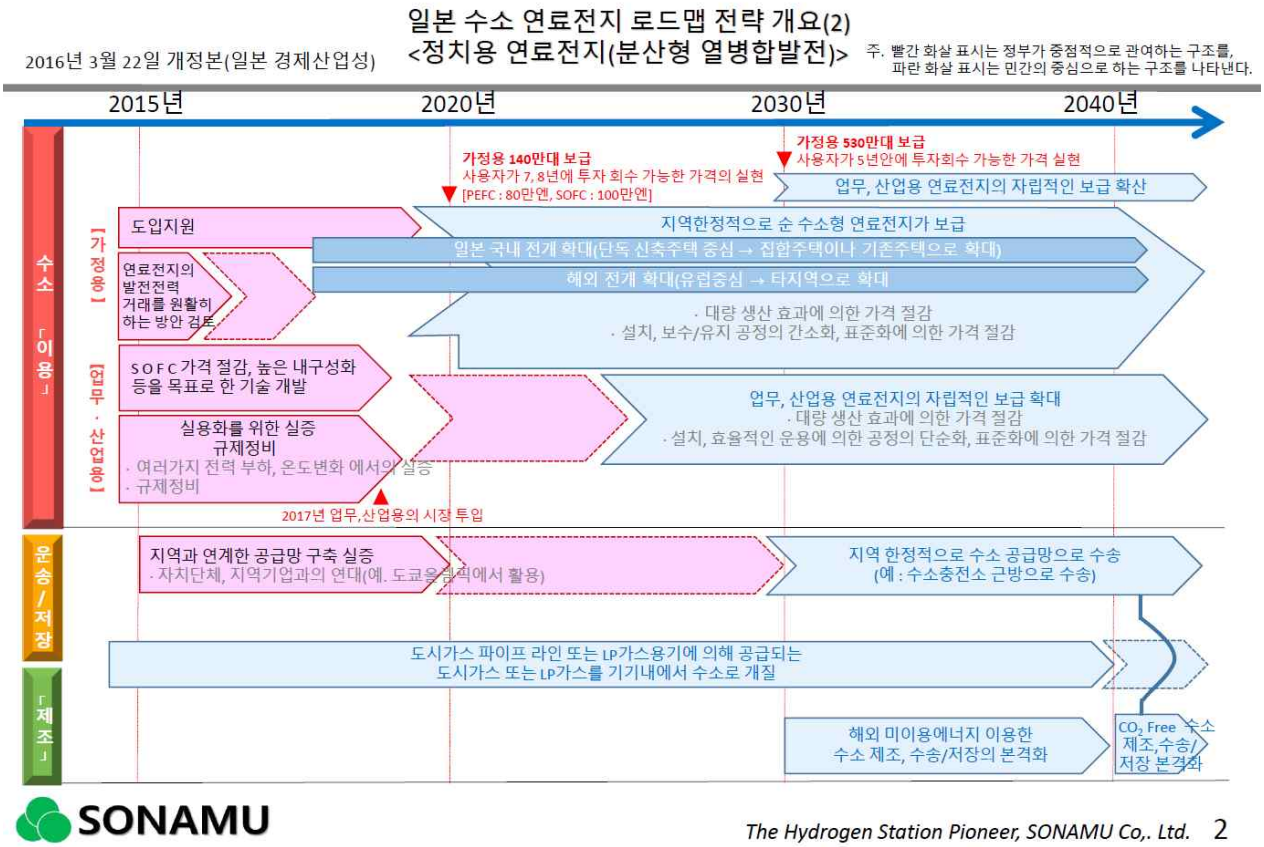
○ 일본 수소 충전소 실증의 특징을 보면 JHFC 2단계 사업을 실시할 때 1단계 사업에서 건설된 총 12개의 수소 충전소 중 4개소를 제외한 8개소의 수소 충전소가 2단계 사업에서 건설된 수소 충전소와 공동으로 실증이 진행되었으며, 일본 내 수소 충전소는 현재까지 총 35개소가 건설돼 9개소가 폐기됐으며 약 26개소의 수소 충전소가 운영 중임. 특히 이 중 14개소 수소 충전소에서는 2010년 12월까지 수소연료전지 자동차에 충전이 이뤄짐. 수소연료전지 자동차에 충전된 총 수소양은 5만 2447㎏이며 충전 횟수는 2만 1039회에 이름.

○ 일본의 수소인프라의 경우 수소차량의 수소충전 인프라 확산을 추진하여 수소경제시대를 꾀하고 있음. 정부의 보조금 지원, 입지, 안전, 운영관련 규제를 대폭 완화하여 충전소의 설치부담을 낮추는 정책을 시행하고 있음. 도쿄의 수소 충전소 설비 도입 지원 사업을 보면 2020년 수소 충전소 35개소 도입을 목표로 예산총액 21억 엔을 배정하였음. 보조금 지원방식은 정치식은 정부와 지자체에서 80%를 부담해주며 중소기업이 지원할 경우 전액을 지원하며 이동식의 경우는 지자체의 경우 1.2억 엔을 상한으로 40%를 부담하며 정부는 1.8억 엔을 상한으로 60%를 부담하는 정책을 내세우고 있음. 일본의 경우는 정부의 노력과 별개로 자동차 3사가 수소 충전소 보급을 위한 지원을 합의하여 약 55억 엔을 충전소 운영비용의 30%를 지원함.

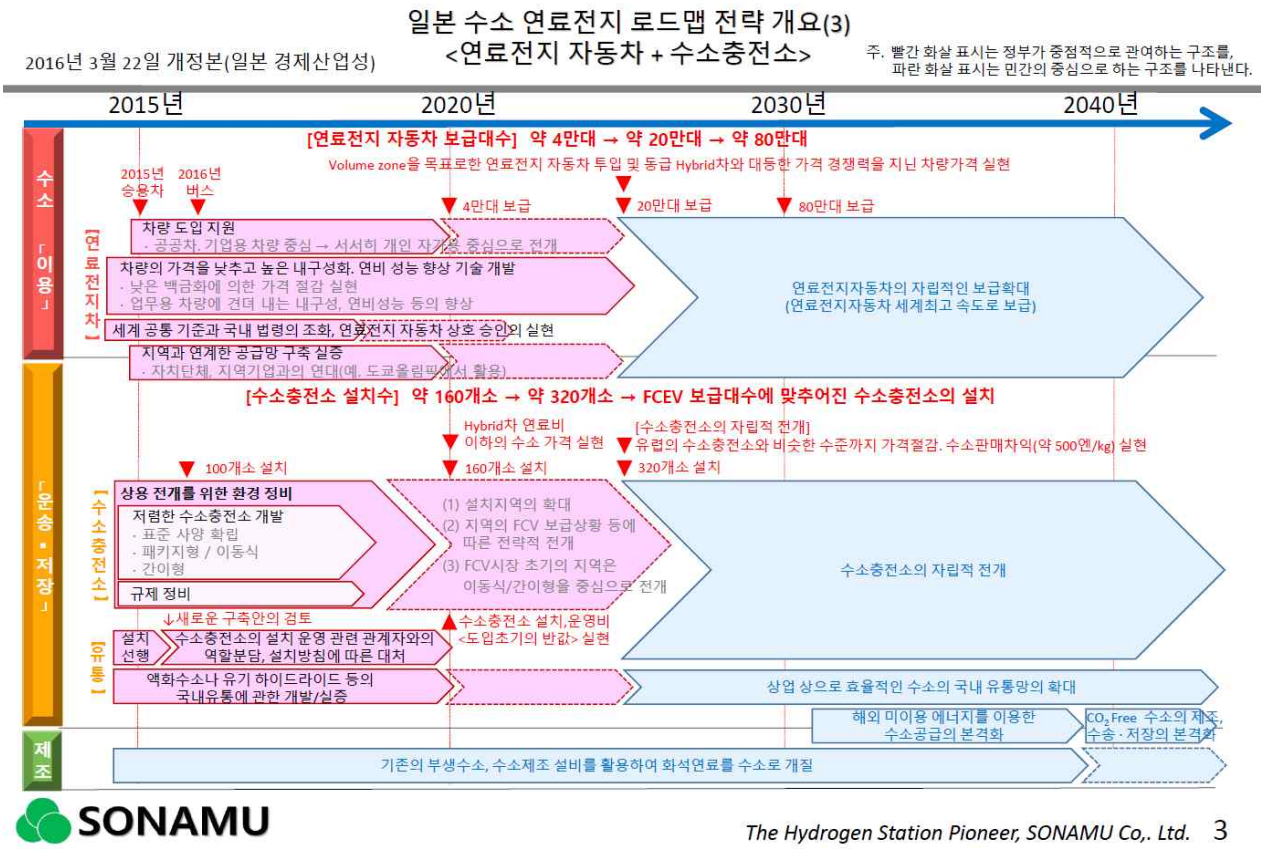
○ 추가로 수소 연료전지를 정치형 연료전지와 연료전지 자동차 분야로 나누어 2015년부터 2040년까지 전 분야에 걸쳐 이용현황과 도입방법, 보급확대 방법, OPEX 및 CAPEX 분석을 수행하였음. 또한 운송 및 저장 방식과 제조현황을 파악한 후 장기적으로 CO2 Free 제조방법 개발, 수소 충전소 설치를 위한 규제완화 등 기술개발과 더불어 정책적인 분야에서도 장기적인 기획을 하고 있음.



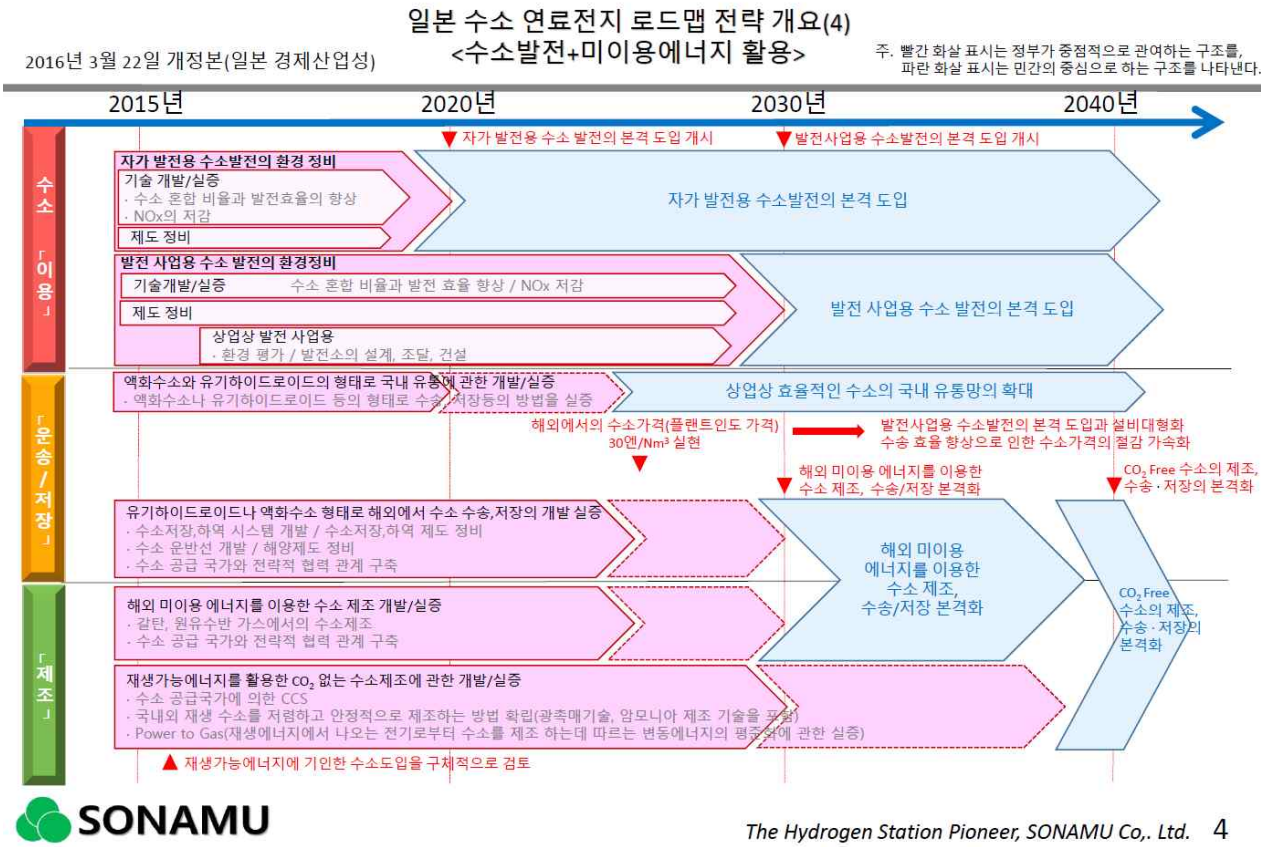
<그림 2.12. 일본 수소 연료전지 로드맵 전략 개요(전분야)>



<그림 2.13. 일본 수소 연료전지 로드맵 전략 개요 2(정치용 연료전지)>



<그림 2.14. 일본 수소 연료전지 로드맵 전략 개요 3(연료전지 자동차+수소 충전소)>



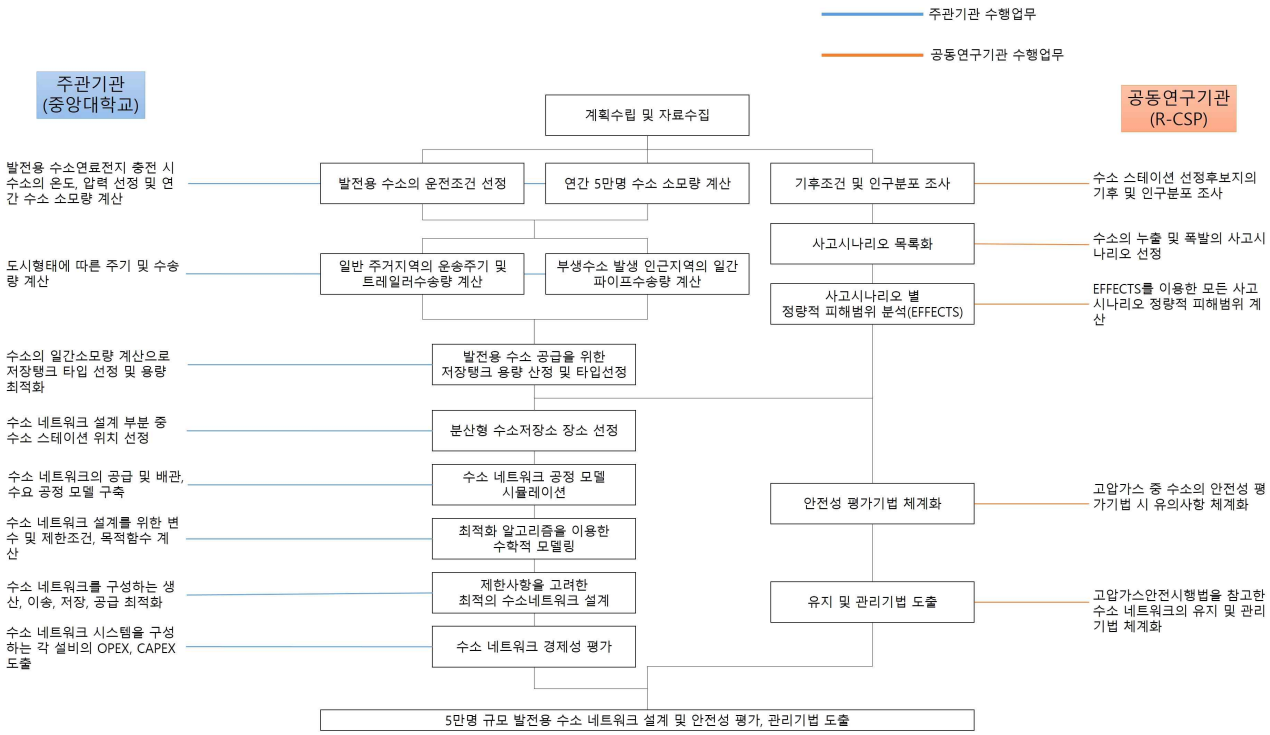
<그림 2.15. 일본 수소 연료전지 로드맵 전략 개요 4(수소발전+미이용에너지 활용)>

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

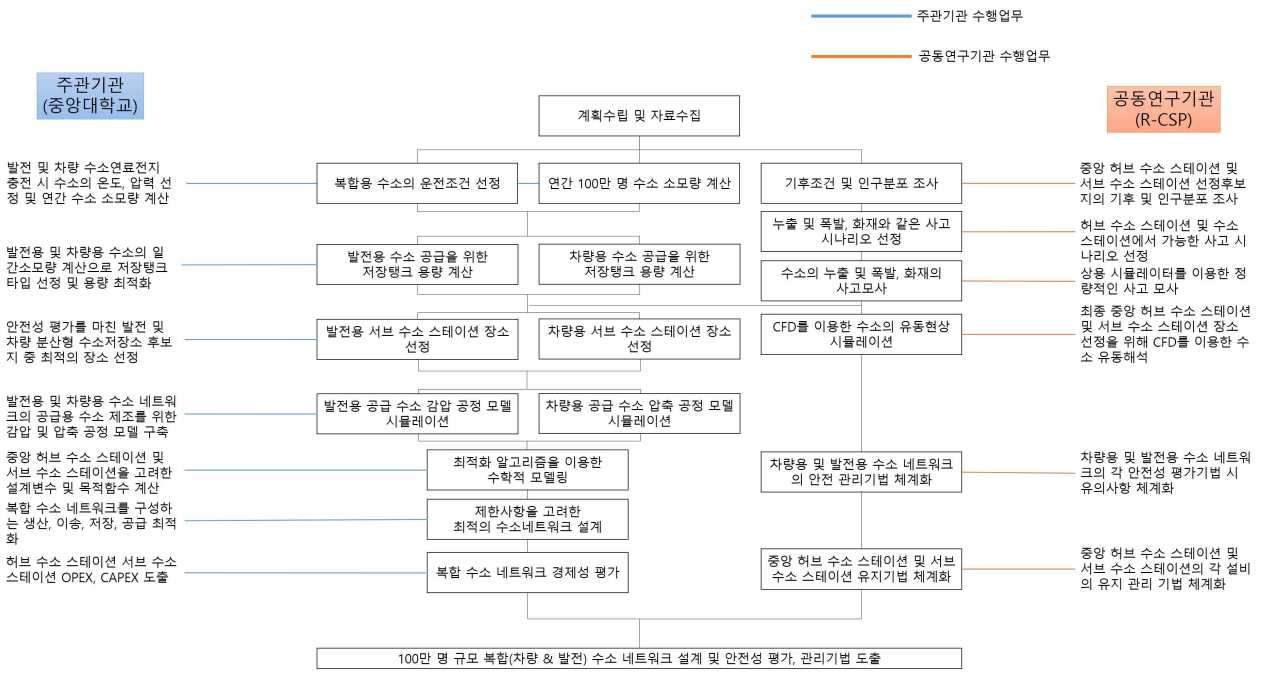
제 1절. 세부 추진 내용

1. 연구개발 흐름도

○ 연차별 연구개발 흐름도는 <그림 3.1.>, <그림 3.2.>과 같음



<그림 3.1. 1차년도 연구개발 흐름도>



<그림 3.2. 2차년도 연구개발 흐름도>

2. 연구개발 단계에 따른 세부 연구내용

○ 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형1)	연구기관	해당 연차	TRL
1	5만 명 규모 발전용 수소 네트워크	5만 명 규모의 발전용 수소 네트워크의 각 도시 형태에 따른 공정 모델 도출 및 경제성 평가 모델 도출	⑤	주관	1차 연도	3
2	100만 명 규모 복합 수소 네트워크	100만 명 규모의 중앙 허브충전소의 공정 모델과 발전용 및 차량용 수소 네트워크의 공정 모델 도출 및 경제성 평가 모델 도출	⑤	주관	2차 연도	3
3	5만 명 및 100만 명 규모 수소 네트워크 안전성 평가 및 유지관리 기법	5만 명 및 100만 명 규모의 각 수소 네트워크에서 합리적인 사고시나리오를 도출 및 안전성 평가 기법과 수소 네트워크에 따른 설비의 유지 관리 기법 도출	⑦	공동	1차 연도 및 2차 연도	3

제 2절. 5만 명 규모 도시의 발전용 수소 네트워크

1. 도시 선정 및 연간 수소 소모량 계산

○ 부생수소 발생지역(서산, 울산, 여수 등의 대규모 석유화학 단지)으로부터 멀리 떨어져 있으며, 인구밀도가 높아 수소저장소의 안전성평가가 필수적인 서울시내 동 단위 행정지역 중 하나를 일반주거지역 도시로 결정함

○ 서울시내 25개 자치구 및 424개 행정동 중 5만 명 규모의 인구(49,661명, 면적 13.34km^2)와 수소충전소가 위치한 서초구 양재동을 수소 네트워크 개발 도시로 선정함

○ 부생수소 발생 인근 주거지역은 울산광역시 남구 달동 및 신정동(50,332명, 면적 3.02km^2)을 선정함

○ 분산형 전력발전과 경제정 타당성을 위해 발전용 연료전지는 각 도시의 대형건물에 배치하고, 대형건물은 기준은 연면적 33,000m^2 로 정의함[1]

○ 양재동과 달동 및 신정동 내 대형건물의 월평균 사용 전력 및 수소 소비량은 <표 3.1>, <표 3.2>와 같으며 연료전지 사양은 <표 3.3>, <표 3.4>를 참고함

<표 3.1. 서울특별시 양재동내 대형건물의 발전용 연료전지 수소 소비량 계산>

건물번호	월평균 전력 사용량	월평균 수소 소비량	시간당 수소 소비량	연간 수소 소비량
	(kWh)	(kgH_2)	(kgH_2/hr)	(tonneH_2/yr)
1	824,981	51,534	71.6	627
2	1,907,420	119,149	165.5	1,450

3	546,572	34,142	47.4	415
4	762,605	47,637	66.2	580
5	1,593,023	99,510	138.2	1,211
6	1,443,986	90,200	125.3	1,097
7	1,292,332	80,727	112.1	982
8	769,010	48,037	66.7	584
9	212,426	13,269	18.4	161
10	256,044	15,994	22.2	195
11	253,439	15,831	22.0	193
12	217,958	13,615	18.9	166
합계	10,079,796	629,648	874.5	7,661

<표 3.2. 울산광역시 달동 및 신정동내 대형건물의 발전용 연료전지 수소 소비량 계산>

건물번호	월평균 전력 사용량	월평균 수소 소비량	시간당 수소 소비량	연간 수소 소비량
	(kWh)	(kgH_2)	(kgH_2/hr)	($tonneH_2$/yr)
1	208,013	12,994	18.0	158.1
2	302,432	18,892	26.2	229.9
3	136,790	8,545	11.9	104.0
4	327,770	20,475	28.4	249.1
5	190,389	11,893	16.5	144.7
합계	1,165,394	72,799	101.0	885.8

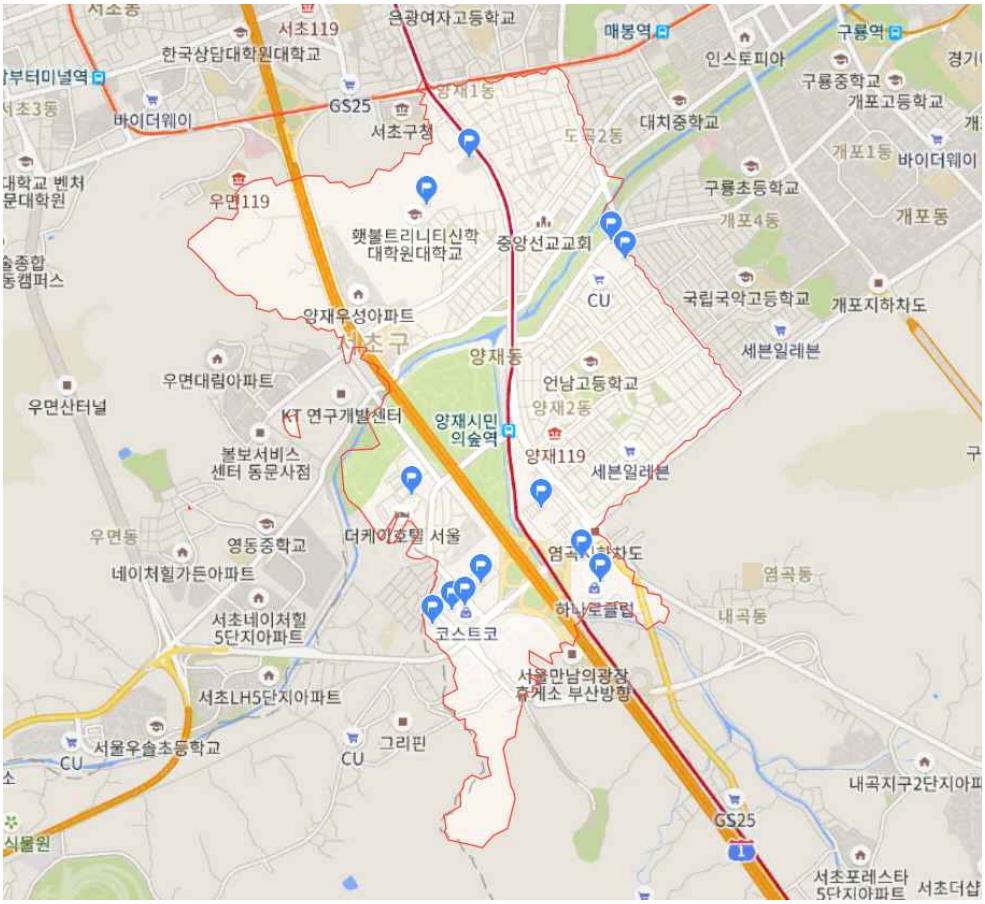
<표 3.3. 1kW 급 수소 연료전지>

	A사(PEMFC)	B사(PEMFC)
구분	Specifications	
발전용량	1 kW(220 V, 단상 60 Hz)(온수 약 60 ℃)	1kW (220V 단상 60Hz)(온수 약 60℃)
구성	스택모듈, 열저장 모듈	-
사용 연료	H2	H2
연료 소비량	0.695m3/kWh_H2	0.75m3/hr/kW_H2
효 율 (LHV)	전기효율 48%	전기효율 50%
운전방식	자동운전, Web기반 운전, 부하추종 운전	자동운전, 부하운전 (50, 75, 100%)
크기	400 x 600 x 1,000 mm	용량에 따라 상이
소음	60 dB이하	저소음(45dB 이하)
사용자입력	룸 컨트롤러방식	-

<표 3.4 대형 수소 연료전지>

	C사(PAFC)	D사(PAFC)
구분	Specifications	
연료	H2	천연가스
정격출력	AC 105kW / 113kW	AC 480V , 3상 3선식

(전기/열)		
출력전압/주파수	210V 또는 220V(교류) / 50Hz 또는 60Hz	최대 440kW, 정격 400kW급
전기효율 (LHV)	48%	42%
종합효율 (LHV)	99%	92%
배출가스	NOx, SOx, dust 무배출	-
연료소비량	74Nm3/h	95.1Nm3
작동방법	전자동 / 계통연계	계통연계 운전 / 독립운전 가능
크기	2.2m x 5.6m x 3.4m	8.74m x 3.35m x 3.02m
무게	14 tons	27.2 tons



<그림 3.3. 서울특별시 양재동 내 대형건물 위치>

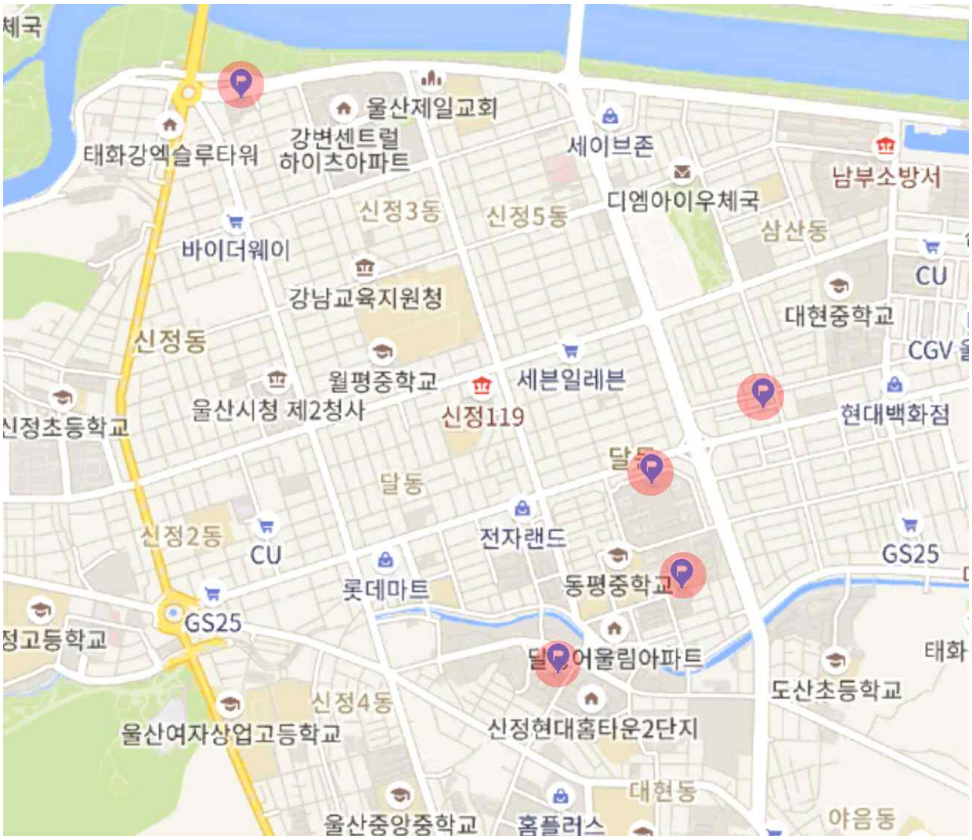
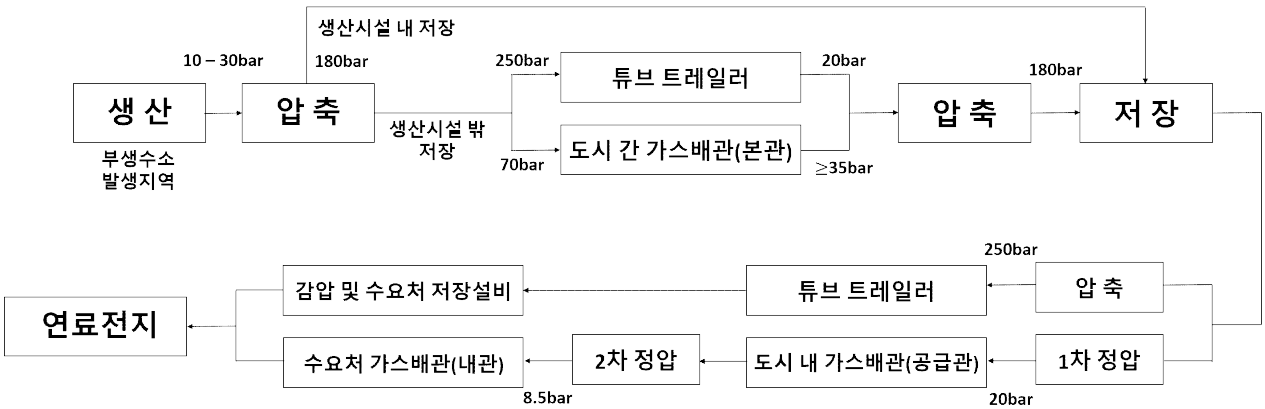


그림 3.4. 울산광역시 달동 및 신정동 내 대형건물 위치

2. 도시 내 수소공급 네트워크의 설계 조건 및 비용 추산

○ 수요 도시까지 가스형태 수소의 공급은 생산, 압축, 이송, 저장 단계를 거치며 이송단계는 도시 간 장거리 운송과 도시 내 각 수요처까지의 단거리 운송으로 나뉨. 본 연구에서 다루는 수소 공급의 개요도를 <그림 3.5>에 나타냄

○ 가 - 다 절에 생산, 압축, 이송, 저장 각 단계의 설계조건을 제시하고 이에 따른 비용을 추산하였으며 계산된 비용 및 설계조건을 활용하여 수학적 최적화 모델을 도출함



<그림 3.5. 5만 명 규모 도시의 발전용 연료전지 수요를 위한 부생수소 공급 개요도>

가. 생산 및 압축단계

○ 수소의 공급원은 석유화학단지 내 나프타분해(NCC), 천연가스개질 또는 Chloro-Alkali 공정을 통해 발생되는 부생수소임. 국내의 수소 생산량은 연간 190만 톤으로 추산되며 이 중 약 23만 톤이 외부유통 가능한 양임[16]. 국내의 각 도시에서 실제로 생산되는 수소(총 약 235,000톤/년)를 <표 3.5>에 도시하였으며 이 중 본 연구에서 활용되는 부생수소 발생지역은 울산, 여수, 서산으로 선정함

○ 부생수소의 가격은 석유화학단지 내 배관망 이송시 kg당 2,000원 - 3,000원 선으로 알려져 있으나[17], 본 연구에서는 국내 수소 판매가격인 $3.5/kg$H_2$[18]를 기준으로 함

○ 압축과정은 생산 기술별 배출되는 수소의 압력과 배관 또는 튜브트레일러 이송 방법에 따라 입/출구 압력이 달라짐

○ 압축과정에서 사용되는 동력을 기준으로 왕복동식 압축기의 구매 및 설치비용을 추산함. 기타 비용은 참고문헌[8],[9]을 토대로 <표 3.6>의 기준으로 추산함

○ 압축과정의 일률(Power)을 구하기 위해 아래의 단열 공정용 식을 사용하였으며 주요 설계조건 및 비용추산 결과는 <표 3.7>과 같음

$$\dot{W} = Z \times \dot{m} \times R \times T \times \frac{n}{\eta} \times \frac{k}{k-1} \times \left(\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{n \times k}} - 1 \right)$$

Z: 압축인자 R: 기체상수 P_o: 출구 압력
W: 압축기 일률 (kW) n: 압축단수 P_i: 입구 압력
m: 압축기 유량 (kmol/s) η: 단열압축 효율
T: 압축기 입구 온도 (K) k: 정압비열/정적비열 (Cp/Cv)

<표 3.5. 국내 수소 생산 현황[16]>

생산기업	원료공급처	지역	제조방식	생산능력 (Nm^3/hr) (2014)
덕양	한화석유화학	여수	소금물분해	35,000
	SK	울산	나프타분해	10,000
	삼성정밀화학	울산	소금물분해	15,000
	삼성토탈	서산	나프타분해	9,000
	태광화학	울산	프로판탈수소	14,000
	LG화학	여수	소금물분해	11,000
	백광화학	군산	소금물분해	5,000
		여수	소금물분해	1,500
	롯데케미칼	서산	나프타분해	3,000

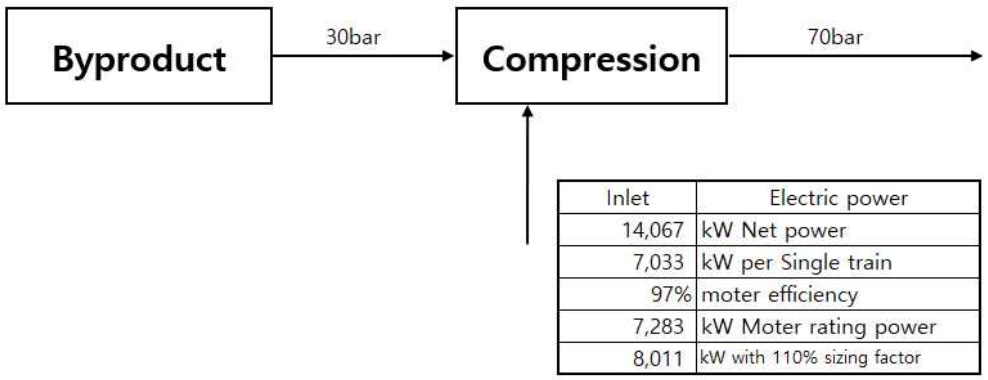
생산기업	원료공급처	지역	제조방식	생산능력 (Nm^3/hr) (2014)
		여수	나프타분해	3,000
	삼성BP화학	울산	나프타분해	2,500
	덕양	울산	NG분해	50,000
소 계				159,000
SPG케미칼	SPG케미칼	안산	메탄올개질	2,000
	롯데케미칼, LG화학	여수	나프타분해	45,000
		대산	나프타분해	10,000
	삼성토탈	대산	나프타분해	-
	삼성BP화학	울산	나프타분해	3,000
	이수화학	울산	프로판탈수소	-
	효성	울산	나프타분해	-
소 계				60,000
에어리퀴드	에어리퀴드1	여수	나프타분해	15,000
	에어리퀴드2	여수	나프타분해	38,000
소 계				53,000
린데	LG화학	대산	나프타분해	9,000
	삼성	기흥	CNG개질	1,600
	린데	포항	나프타분해	1,200
	포스코	포항	코크스	300
소 계				12,100
SDG	대한유화	울산	나프타분해	5,000
	태광산업	울산	나프타분해	3,000
	효성	울산	나프타분해	2,000
소 계				10,000
대성산업가스	대성산업가스	파주	메탄올	2,000
창신화학	롯데케미칼,LG화학	서산	나프타분해	3,200
총 계				299,300

<표 3.6. 간접비용 추산 방법>

구분	비용 항목	추산
설비투자 간접비용	토목공사	초기투자비용의 4%
	설계 및 엔지니어링	초기투자비용의 10%
	일반 부대 시설물	초기투자비용의 20%
	운전자본	초기투자비용의 7%
	건설 부대비용	초기투자비용의 10%
	라이선스 비용	초기투자비용의 0%
	인·허가비용	초기투자비용의 3%
	총소유비용	압축기 초기투자비용의 12%
	부지구매비용	$298/m^2 (국내 공장용지 평균지가)[3-19]
조업 간접비용	보험	연간 총 투자비용의 1%
	세금	연간 총 투자비용의 1.5%
	라이선스 및 인·허가	연간 총 투자비용의 1%
	일반관리비(G&A)	인건비의 50%
	유지관리비(압축기)	연간 압축기 초기투자비용의 4%
	유지관리비(기타시설)	연간 기타시설 초기투자비용의 1%
	탄소세(배출권거래)	탄소(Carbon) 1톤당 $50
조업 간접비용	보험	연간 총 투자비용의 1%
	세금	연간 총 투자비용의 1.5%
	라이선스 및 인·허가	연간 총 투자비용의 1%
	일반관리비(G&A)	인건비의 50%
	유지관리비(압축기)	연간 압축기 초기투자비용의 4%
	유지관리비(기타시설)	연간 기타시설 초기투자비용의 1%
	탄소세(배출권거래액)	탄소(Carbon) 1톤당 $50

<표 3.7. 수소 압축공정의 설계조건>

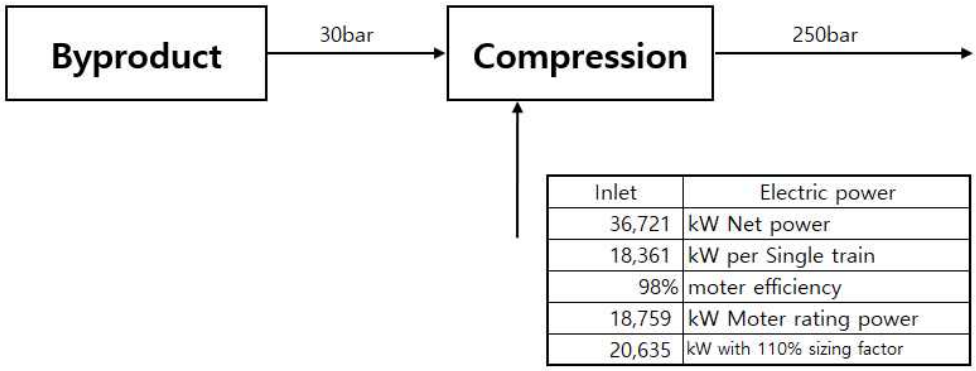
구분	압축공정		
연간 공정가동률(%)	90		
입구압력(bar)	30		
출구압력(bar)	배관이송용	튜브트레일러용	
	70	250	
단열효율	88%	압축온도	288K
Cp/Cv비	1.41	기체상수	8.3144kJ/kmol·K
압축인자	1.03198	수소 손실률	0.50%
비용추산결과	배관이송용		
규모	대	중	소
최대 압축량	960tonneH_2/d	150tonneH_2/d	10tonneH_2/d
압축단수	2		
압축기 트레인 수	3	3	2
압축기 운영 트레인 수	2	2	1
총 투자비용($)	44,943,229	14,605,178	2,899,338
일일환산 총 투자비용($/d)	12,678	4,120	818
일일 조업비용($/d)	48,304	23,955	17,554
일일환산 총 비용($/d)	60,982	28,075	18,372
단위환산 총 투자비용 (Levelized Capital Cost,$/kg$H_2$)	0.015	0.031	0.091
단위환산 일일 조업비용 (Levelized Operating Cost,$/kg$H_2$)	0.056	0.178	1.960
단위환산 총 비용 (Levelized Total Cost,$/kg$H_2$)	0.071	0.209	2.052
배관이송용 압축 계통도(대규모)			



비용추산결과	튜브트레일러용		
규모	대	중	소
최대 압축량	960tonneH_2/d	150tonneH_2/d	10tonneH_2/d
압축단수	3		

압축기 트레인 수	3	3	2
압축기 운영 트레인 수	2	2	1
총 투자비용($)	95,951,651	31,346,010	6,180,085
일일환산 총 투자비용($/d)	27,067	8,842	1,743
일일 조업비용($/d)	93,723	33,278	18,761
일일환산 총 비용($/d)	120,790	42,121	20,504
단위환산 총 투자비용 (Levelized Capital Cost,$/kgH$_2$)	0.031	0.066	0.195
단위환산 일일 조업비용 (Levelized Operating Cost,$/kgH$_2$)	0.108	0.248	2.095
단위환산 총 비용 (Levelized Total Cost,$/kgH$_2$)	0.140	0.314	2.290

튜브트레일러용 압축 계통도(대규모)



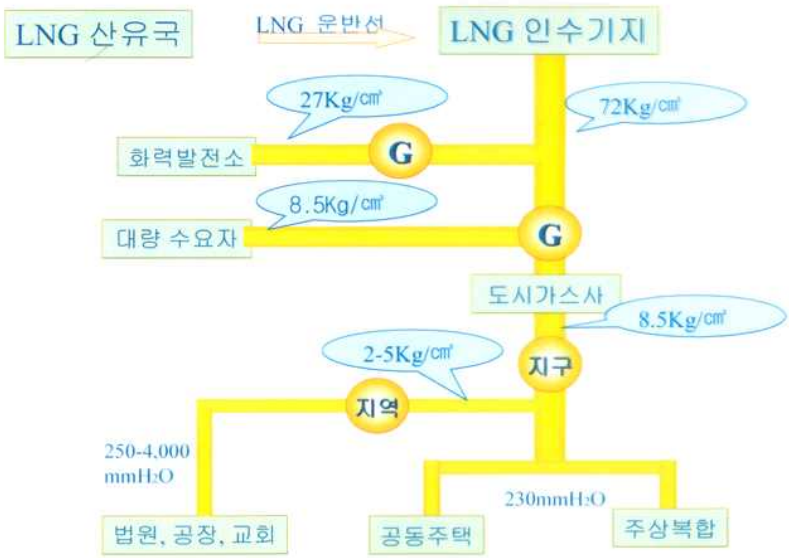
나. 이송단계

<표 3.8. 트럭 이송방식의 수소네트워크 설계 조건 >

구분	설계값
운전압력/온도	250bar
튜브/탱크 개수	11
튜브/탱크 길이	10.98m
부피용량	24,640m^3
이송용량	614kgH$_2$/대
적재/하역시간[3-11)]	2시간
평균주행속도[3-11)]	55km/hr
시내 평균주행속도[3-11)]	25km/hr
평균가동률[3-11)]	18hr/d
시내 평균가동률[3-11)]	15hr/d

○ 튜브 트레일러의 튜브압력은 국내에서 상용화된 CNG(Compressed Natural Gas) 트레일러의 250bar[10]로 결정함

○ 배관망 압력은 <그림 3.6>와 같이 국내 도시가스 공급망의 운전압력을 참고함. 부생수소 발생지역으로부터 저장소 및 도시별 1차 정압기까지의 이송압력은 도시가스의 본관(LNG 인수기지-지역 도시가스사 기지, Transmission Pipeline) 압력인 70bar, 도시 내 배관의 이송압력은 주요 대형 수요자까지의 공급관(Distribution Pipeline) 압력인 20bar, 발전용 연료전지까지의 최종 이송압력은 8.5bar로 결정함



<그림 3.6. 국내 도시가스 공급 체계도>

○ 배관 내 압력손실 크기는 배관길이 및 유량에 따른 배관내경을 결정하는 주요인자이며 다음의 식을 이용하여 배관의 최대유량을 계산함[3-20]. 최대 허용 압력손실은 배관 입구 압력의 50% 압력으로 결정함[21]

$$\dot{Q} = K(D) \times \sqrt{p_i^2 - p_o^2}$$

$$K(D) = 0.0129 \times \sqrt{\frac{D^5}{\lambda \times Z_m \times T_m \times L \times d}}$$

Q: 유량 (m^3/hr)	D: 배관 내경 (mm)	λ: 무차원 마찰계수
Z_m: 평균 유체압축인자	T_m: 평균 유체온도 (K)	L_i: 배관길이 (km)
d: 유체의 공기에 대한 상대밀도	P_i: 입구 압력 (bar)	P_o: 출구 압력 (bar)

○ 배관의 소음 및 침식을 방지하기 위해 최대 유속은 30m/s으로 제한하며 배관 내 유속을 구하기 위하여 다음의 식을 사용함

$$V = 1.273 \times \dot{Q} / D^2$$

Q: 유량 (m^3/hr)　　D: 배관 내경 (mm)　　V: 배관 내 유속

○ 가스배관망 설치비용은 천연가스 배관의 설치사례를 회귀분석하여 배관직경(5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100, 150cm)과 길이의 함수로 나타낸 모델[3-9]을 사용하였으며(<표 3.9>), 각각 재료, 매립 인건비, 기타 부대비용 및 부지비용 항목으로 이루어짐. 수소배관은 천연가스 배관 비용의 110%로, 연간 유지관리 비용은 설치비용의 2%로 가정함[3-12]

<표 3.9. 가스배관 비용추산식>

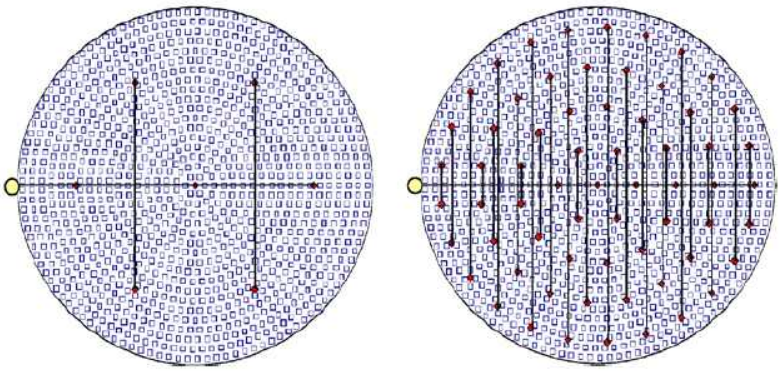
구분		비용추산식 (D=in, L=mile)
본관	재료비($)	$1.1\times 63{,}027\times \exp(0.0697\times D)\times L$
	인건비($)	$1.1\times(-51.393\times D^2+43{,}523\times D+16{,}171)\times L$
	기타비용($)	$1.1\times(303.13\times D^2+12{,}908\times D+123{,}245)\times L$
	부지비용($)	$(-9\times 10^{-13}\times D^2+4{,}417.1\times D+164{,}241)\times L$
공급관	재료비(D<200mm,$)	$1.1\times 63{,}027\times \exp(0.0697\times D)\times L$
	재료비(D≥200mm,$)	$1.1\times 31{,}513.5\times \exp(0.0697\times D)\times L$
	인건비($)	$1.1\times(-51.393\times D^2+43{,}523\times D+16{,}171)\times L+70{,}000\times L$
	기타비용($)	$1.1\times(303.13\times D^2+12{,}908\times D+123{,}245)\times L$
	부지비용($)	$(-9\times 10^{-13}\times D^2+4{,}417.1\times D+164{,}241)\times L$
내관		생 략

○ 도시 내 튜브 트레일러의 평균 이송거리 및 가스배관망 설치길이는 도시의 크기와 수요처의 숫자에 관한 함수로 표현할 수 있음[12]. 아래의 식은 수요처가 도시 내에 균일하게 분포하고 도시의 면적이 원형을 이룬다는 가정 하에 트레일러 및 배관망의 설치길이를 추산하는 식임. 도시 내 트레일러 평균 이송거리와 배관설치의 예시를 각각 <그림 3.7>, <그림 3.8>에 나타냄. 이에 따라 도시 내 트레일러의 평균 이송거리는 도시의 크기에 비례하고, 배관 설치길이는 도시의 직경과 수요처의 수에 비례함

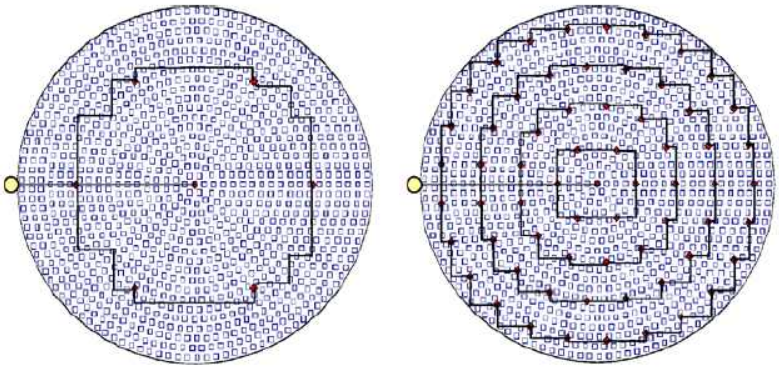
$$L_{truck} = 1.44\times N\times \frac{D}{3.06}$$

$$L_{pipeline} = 2.43\times N^{0.4909}$$

L_{truck}: 트레일러 평균 이송거리(km)　　$L_{pipeline}$: 배관길이(km)
N: 수요처의 수　　D: 도시 직경(km)



<그림 37.수요처가 균일분포한 원형도시의 튜브 트레일러의 이송거리>



<그림 3.8. 수요처가 균일분포한 원형도시의 배관망 설치길이>

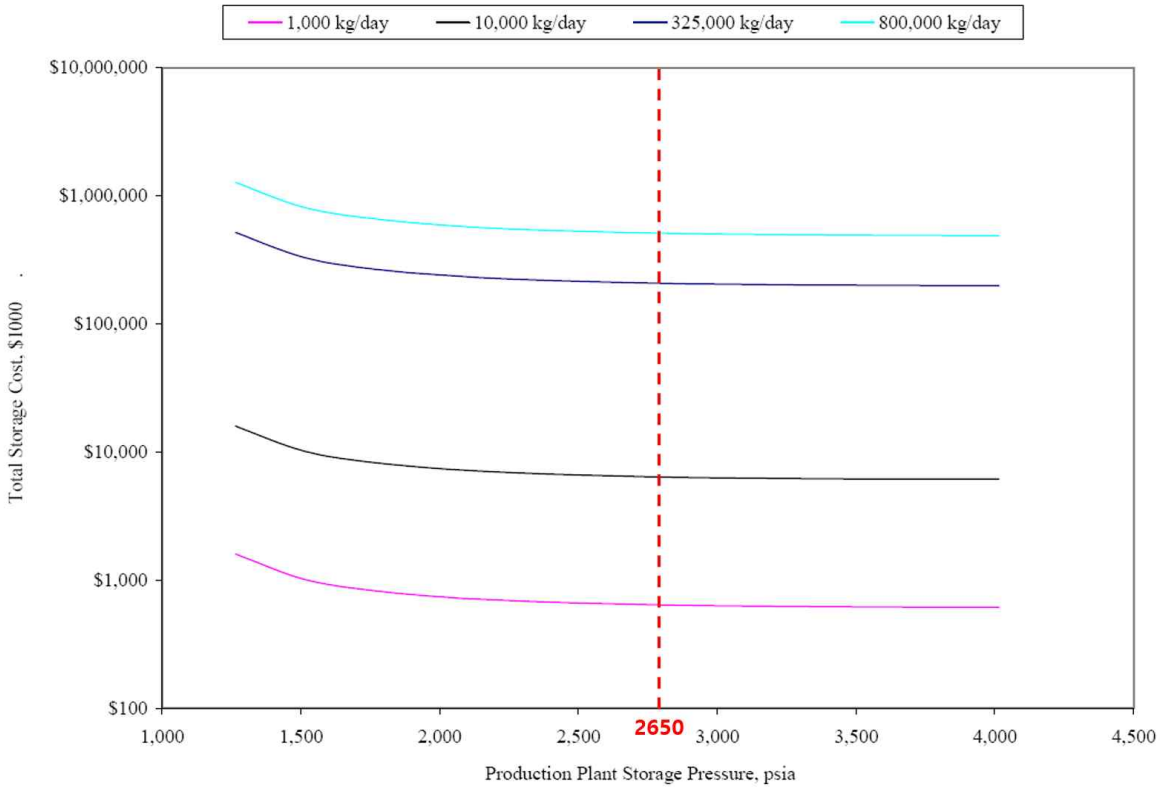
○ 튜브 트레일러의 비용계산 상수는 <표 3.10>을 이용하여 계산함

<표 3.10. 튜브 트레일러 이송비용[11] >

구분	값
인건비	$23/hr
시외연비(디젤)	2.55km/L
시내연비(디젤)	2.30km/L
연료가격(디젤)	$1.16/L
대당 일반관리비용	$8.22/day
대당 유지관리비용	$0.097/km
대당 가격	$250,000

다. 저장단계

○ 일반적으로 가스형태 수소의 저장압력이 클수록 단일용기에 더 많은 양의 수소를 저장할 수 있으나, 저장용기의 두께 증가 및 재질, 제작비용 증가로 비용 Trade-off가 있음. 저장압력을 올리기 위한 압축과정의 비용 상승을 감안한 기존 연구결과(<그림 3.9>)를 참고로 가스형태 수소의 저장용기의 최적압력은 180bar로 결정[3-9)]



<그림 3.9. 고압 수소저장 용기의 최적 보관압력 선정[3-9] (2,650psi, 약 180bar)>

○ 고압 수소저장소는 <그림 3.10>와 같은 실린더 형태의 Type2 용기에 담아 보관하며 실린더를 여러 개 적층한 스택을 모아서 전체 저장소를 구성함. 수소저장용기의 Type 별 특성을 <표 3.11>에, 튜브 트레일러 및 배관이송용 수소저장소의 설계조건과 비용 추산 결과를 <표 3.12> - <표 3.15>에 나타냄

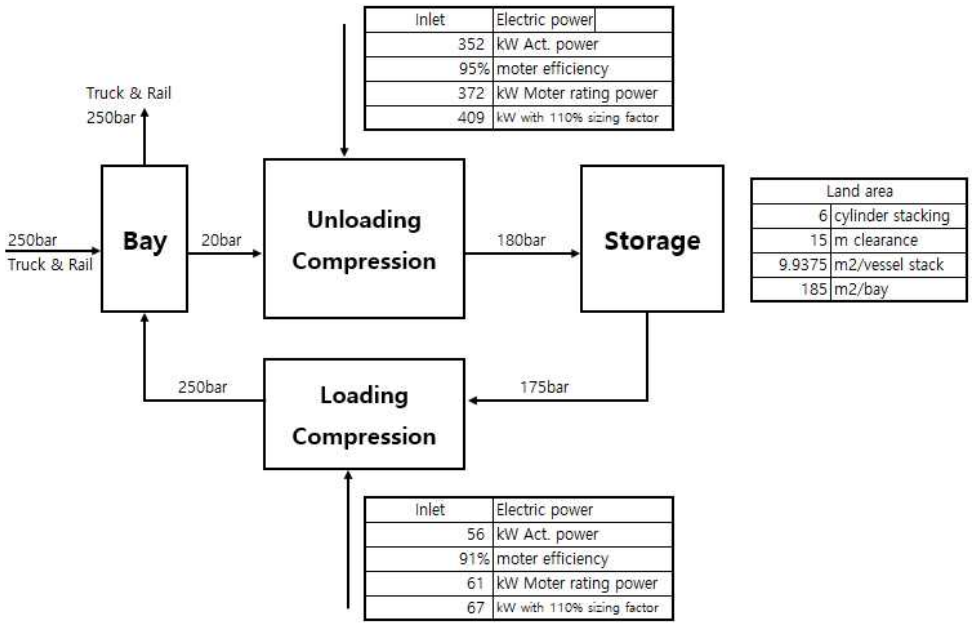
<그림 3.10. 수소충전소 내 실린더 형태 고압 수소저장용기>

<표 3.11. 수소 고압용기의 분류>

구분	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
재료	Metal (Steel/Aluminum)	Metal tank에 필라멘트와인딩 기법으로 유리섬유, 아라미드 또는 탄소섬유 보강	복합재료(Composite) tank에 유리섬유, 아라미드 또는 탄소섬유 보강, Metal liner 사용	복합재료(Composite) tank에 탄소섬유 보강, Polymer liner 사용
압력	175bar - 200bar	-299bar	305bar - 700bar	-700bar
경제성	++	+	-	-
무게	-	0	+	+

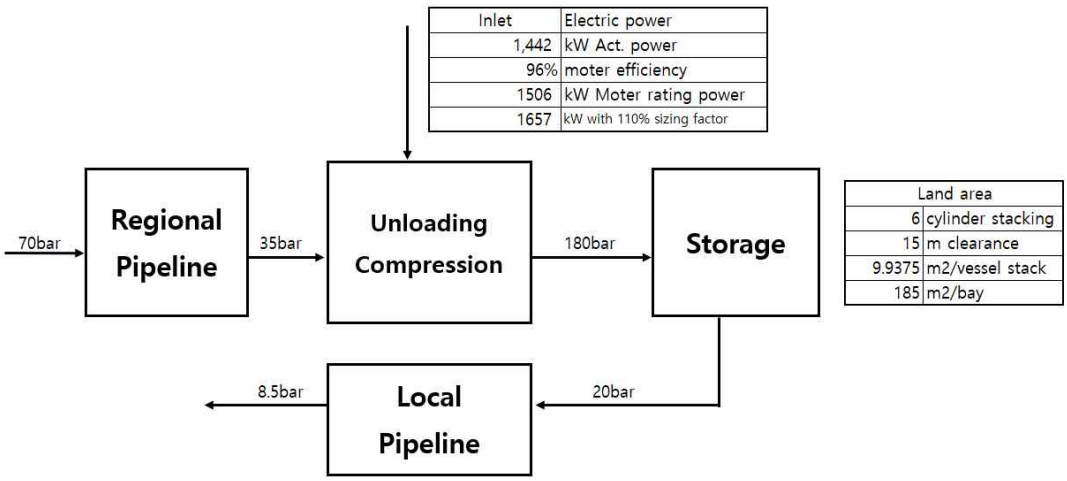
<표 3.12. 튜브 트레일러용 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		하역용 압축기 단수	4	(-)
총 저장용량	1,000	tonneH_2	적재용 압축기 단수	1	(-)
비축일수	10	일	적재/하역 속도	85	kgH_2/hr
연간가동률	90	%	적재/하역 시간	7.5	hr
일일 이송량	100	tonneH_2/d	단일 저장탱크 직경	1.25	m
튜브 적재 압력	250	bar	단일 저장탱크 길이	7.95	m
저장탱크 압력	180	bar	저장탱크 적층수	6	(-)
저장탱크 가동률	80	%	수소 손실률	1.0	%
계통도					



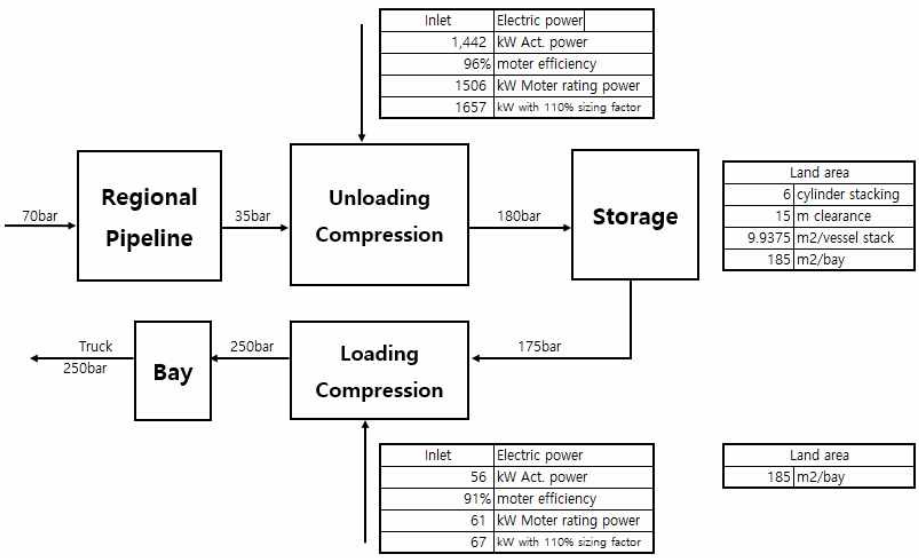
<표 3.13. 배관이송용 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		저장탱크 가동률	80	%
총 저장용량	1,000	tonneH_2	하역용 압축기 단수	3	(-)
비축일수	10	일	단일 저장탱크 직경	1.25	m
연간가동률	90	%	단일 저장탱크 길이	7.95	m
일일 이송량	100	tonneH_2/d	저장탱크 적층수	6	(-)
저장탱크 압력	180	bar	수소 손실률	1.0	%
계통도					



<표 3.14. 도시 간 배관이송-도시 내 튜브트레일러용 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		하역용 압축기 단수	3	(-)
총 저장용량	1,000	tonneH_2	적재용 압축기 단수	1	(-)
비축일수	10	일	적재/하역 속도	85	kgH_2/hr
연간가동률	90	%	적재/하역 시간	7.5	hr
일일 이송량	100	tonneH_2/d	단일 저장탱크 직경	1.25	m
튜브 적재 압력	250	bar	단일 저장탱크 길이	7.95	m
저장탱크 압력	180	bar	저장탱크 적층수	6	(-)
저장탱크 가동률	80	%	수소 손실률	1.0	%
계통도					



<표 3.15. 가스 형태 수소저장소의 비용추산 결과>

구 분	튜브 트레일러용		
비축분량	일일 적재/하역량의 10일분		
규모	대	중	소
최대보관량	1,000tonneH_2	150tonneH_2	10tonneH_2/d
일일 적재/하역량(kgH_2/d)	100,000	15,000	1,000
총 투자비용($)	534,221,588	293,032,258	74,803,726
일일환산 총 투자비용($/d)	150,698	82,661	21,101
일일 조업비용($/d)	80,308	52,597	26,734
일일환산 총 비용($/d)	231,007	135,259	47,836
단위환산 총 투자비용 (Levelized Capital Cost,$/kg$H_2$)	1.691	1.855	2.368
단위환산 일일 조업비용 (Levelized Operating Cost,$/kg$H_2$)	0.901	1.181	3.000
단위환산 총 비용 (Levelized Total Cost,$/kg$H_2$)	2.593	3.036	5.369
구 분	배관이송용		
비축분량	일일 적재/하역량의 10일분		
규모	대	중	소
최대보관량	1,000tonneH_2	150tonneH_2	10tonneH_2/d
일일 적재/하역량(kgH_2/d)	100,000	15,000	1,000
총 투자비용($)	515,845,976	286,273,521	74,544,604
일일환산 총 투자비용($/d)	145,515	80,755	21,028
일일 조업비용($/d)	64,250	44,496	25,349
일일환산 총 비용($/d)	209,765	125,251	46,377
단위환산 총 투자비용 (Levelized Capital Cost,$/kg$H_2$)	1.625	1.804	2.348
단위환산 일일 조업비용 (Levelized Operating Cost,$/kg$H_2$)	0.717	0.994	2.831
단위환산 총 비용 (Levelized Total Cost,$/kg$H_2$)	2.342	2.797	5.179
구 분	도시 간 배관이송-도시 내 튜브 트레일러용		
비축분량	일일 적재/하역량의 10일분		
규모	대	중	소
최대보관량	1,000tonneH_2	150tonneH_2	10tonneH_2/d
일일 적재/하역량(kgH_2/d)	100,000	15,000	1,000
총 투자비용($)	524,053,804	290,549,143	75,661,927
일일환산 총 투자비용($/d)	147,830	81,961	21,343
일일 조업비용($/d)	69,276	47,244	26,178
일일환산 총 비용($/d)	217,106	129,205	47,522
단위환산 총 투자비용 (Levelized Capital Cost,$/kg$H_2$)	1.659	1.840	2.395
단위환산 일일 조업비용 (Levelized Operating Cost,$/kg$H_2$)	0.778	1.060	2.938
단위환산 총 비용 (Levelized Total Cost,$/kg$H_2$)	2.437	2.900	5.334

3. 5만 명 규모 도시 내 수소 네트워크의 수학적 최적화 모델

○ 5만 명 규모 도시(서울특별시 양재동, 울산광역시 달동 및 신정동)에 부생수소를 공급하기 위한 수소네트워크의 형태 중 경제적으로 가장 저렴한 형태를 선택하기 위해 수학적 최적화 모델을 구성함

○ 최적화 모델의 목적함수(Objective Function)는 수소네트워크 내 수소의 압축, 이송, 저장 단계의 일일 총 비용이며 제안된 물리적, 논리적 제약조건(Constraint)을 모두 만족하는 전역 최적해(Global Optimal Solution)를 구하는 것을 목표로 함

○ 최적화 모델을 통해 결정되는 주요 변수는 울산, 서산, 여수 중 부생수소를 제공할 위치, 수소저장소의 위치, 압축시설의 위치 및 크기, 부생수소 발생지-저장소까지의 이송방식(튜브 트레일러 또는 배관) 및 일일 이송량(이송주기), 저장소-수요도시까지의 이송방식(튜브 트레일러 또는 배관) 및 일일 이송량, 수요도시 내 이송방식(튜브 트레일러 또는 배관) 등이 있음

○ 수학적 모델 내 사용되는 문자 및 부호에 대한 정의를 '가'절, 결정변수를 '나'절, 비용에 관한 계산식을 '다'절, 제약조건을 '라'절에 제시함

○ 수학적 모델을 이용하여 수소 네트워크 설계를 진행 하였으며, 목표는 분산형 수소저장소와 중앙집중형 수소저장소의 비용 비교를 통한 최적의 수소저장소 형태 선정, 수소 수요량 증가에 따른 수소 네트워크 설계 시 비용이 가장 많이 드는 요소 확인임.

가. 문자 및 부호의 정의

<표 3.16. 5만 명 규모 도시 내 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 집합 정의>

구분	설명	구성요소
d	이송 배관의 내경(mm)	{50, 100, 150, 200, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 6000}
n	부생수소 공급 및 수요도시 노드	{N1(양재), N2(울산), N3(여수), N4(서산)}
g, g'	부생수소 공급 및 수요도시 노드의 출발지(g)-도착지(g') 조합	{(N1-N1), (N1-N2), (N1-N3) (N1-N4), ... , (N4-N4)}
i	수소 이송방식 조합	{i_1(튜브트레일러), i_2(가스배관), i_3(도시간 가스배관-도시내 튜브트레일러)}
j	생산·압축시설, 저장시설의 규모	{Small, Medium, Large}
l	수소 이송방식	{튜브트레일러, 가스배관}

<표 3.17. 5만 명 규모 도시 내 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 연속 파라미터의 정의>

파라미터	설명	단위
$CCap_{j,i}^{\max}$	이송방식 조합 및 압축시설 규모에 따른 압축시설의 최대 처리량	kg/day
$CCap_{j,i}^{\min}$	이송방식 조합 및 압축시설 규모에 따른 압축시설의 최소 처리량	kg/day
$CCC_{j,i}$	이송방식 조합 및 압축시설 규모에 따른 압축시설의 총 투자비용	$
CRF	자본회수계수 (프로젝트 기간 15년, 6% 이자율 반영)	-
D_n^T	노드(도시)의 발전용 연료전지 수요량	kg/day
DW	Driver wage of transportation mode m	$/hr
FE^L	튜브 트레일러의 도시 내 운행 연비	L/km
FE^R	튜브 트레일러의 도시 밖 운행 연비	L/km
FP	튜브 트레일러의 연료 가격	$/L
GE	튜브 트레일러의 일반관리비용	$/day/대
$L_{l,g,g'}^S$	이송방법에 따른 부생수소 발생지-저장시설 간 이송거리	km
$L_{l,g,g'}^R$	이송방법에 따른 각 도시 간 이송거리	km
$L_{l,n}^L$	이송방법에 따른 각 도시별 도시 내 이송거리	km
LUT	튜브 트레일러의 수소 적재/하역 시간	hr
ME	튜브 트레일러의 유지관리 비용	$/km/대
$PCap_j^{\max}$	부생수소 생산시설의 규모에 따른 최대 생산량	kg/day
$PCap_j^{\min}$	부생수소 생산시설의 규모에 따른 최소 생산량	kg/day
$PLCC_{d,g,g'}^S$	내경에 따른 부생수소 발생지-저장시설 간 이송배관 설치비용	$
$PLCC_{d,g,g'}^R$	내경에 따른 수소저장시설-수요도시 간 이송배관 설치비용	$
$PLCC_{d,g}^L$	내경에 따른 도시 내 수소 이송배관 설치비용	$
POM	배관망 설치비용 대비 운영 및 유지관리비용의 비율	%
$\overline{Q}_d$	배관 내 유속 제한에 따른 유량 제한	kg/day
$\hat{Q}_{d,g,g'}^S$	부생수소 발생지-저장시설 배관 내 최대 압력손실에 따른 유량 제한	kg/day
$\hat{Q}_{d,g,g'}^R$	저장시설-수요도시 배관 내 최대 압력손실에 따른 유량 제한	kg/day
$\hat{Q}_{d,g}^L$	도시 내 이송배관의 최대 압력손실에 따른 유량 제한	kg/day
$Q_{i,l}^{\max}$	각 이송방식에 대한 최대 허용 유량	kg/day
$Q_{i,l}^{\min}$	각 이송방식에 대한 최소 허용 유량	kg/day
$SCap_{j,i}^{\max}$	수소 저장소의 종류 및 규모에 따른 최대 저장량	kg
$SCap_{j,i}^{\min}$	수소 저장소의 종류 및 규모에 따른 최소 저장량	kg
$SCC_{j,i}$	수소 저장소의 종류 및 규모에 따른 총 투자비용	$
SP^L	도시 내 튜브 트레일러의 운행 속도	km/hr
SP^R	도시 밖 튜브 트레일러의 운행 속도	km/hr
$TCap$	튜브 트레일러 1대의 수소 이송량	kg/대
TMA^L	도시 내 튜브 트레일러의 일일 운행률	hr/day

파라미터	설명	단위
TMA^R	도시 밖 튜브 트레일러의 일일 운행률	hr/day
TMC	튜브 트레일러의 대당 구매 비용	$/대
$UCC_{j,i}$	이송방식 조합 및 압축시설 규모에 따른 압축시설의 조업비용	$/kgH$_2$
UPC_j	규모에 따른 부생수소의 생산비용	$/kgH$_2$
$USC_{j,i}$	이송방식 조합 및 저장시설 규모에 따른 저장시설의 조업비용	$/kgH$_2$
α	연중 수소네트워크 내 시설 운영 일수	day/yr
β	일일 수소 필요량에 대한 수소 비축일수	day

<표 3.18. 5만 명 규모 도시 내 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 정수 파라미터의 정의>

구분	설명	단위
$NC^0_{j,i,n}$	각 노드, 규모, 종류별 초기 압축시설 수	-
$NP^0_{j,n}$	각 노드, 규모, 종류별 초기 생산시설 수	-
$NS^0_{j,i,n}$	각 노드, 규모, 종류별 초기 저장시설 수	-

나. 결정변수

<표 3.19. 5만 명 규모 도시 내 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 연속 결정변수>

변수	설명	단위
$C_{j,i,n}$	각 노드(도시) 내 종류별 압축시설의 처리량	kg/day
$D_{i,n}$	각 노드의 이송방식 조합별 수소 소비량	kg/day
$P_{j,n}$	발전용 연료전지를 위한 부생수소 소비량	kg/day
$QS_{i,l,g,g'}$	부생수소 발생지-저장시설까지의 각 이송방식에 대한 수소 이송량	kg/day
$QR_{i,l,g,g'}$	저장시설-수요도시까지의 각 이송방식에 대한 수소 이송량	kg/day
$S_{j,i,n}$	각 도시의 저장시설 종류 및 규모별 수소저장량	kg/day
$S^T_{i,n}$	각 도시의 저장시설 종류별 수소저장량	kg/day

<표 3.20. 5만 명 규모 도시 내 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 정수 결정변수>

변수	설명	단위
$IC_{j,i,n}$	각 노드, 규모, 종류별 신규도입 압축시설 수	-
$IP_{j,n}$	각 노드, 규모별 신규도입 부생수소 생산시설 수	-
$IS_{j,i,n}$	각 노드, 규모, 종류별 신규도입 저장시설 수	-
$NC_{j,i,n}$	각 노드, 규모, 종류별 총 압축시설 수	-
$NP_{j,n}$	각 노드, 규모별 총 부생수소 생산시설 수	-
$NS_{j,i,n}$	각 노드, 규모, 종류별 총 수소 저장시설 수	-
$NP_{j,n}^{SD}$	각 노드, 규모별 사용하지 않는 부생수소 생산시설 수	-

<표 3.21. 5만 명 규모 도시 내 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 이진 결정변수>

변수	설명	단위
$V_{i,n}$	각 노드(도시) 내 배관이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$W_{i,d,g,g'}^{S}$	각 노드 간 부생수소 발생지-수소저장소 내경 d 배관이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$W_{i,d,g,g'}^{R}$	각 노드 간 내경 d 배관이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$W_{i,d,n}^{L}$	각 노드 내 내경 d 배관이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$X_{i,l,g,g'}^{S}$	각 노드 간 이송방식 l 로 부생수소 발생지-수소저장소 이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$X_{i,l,g,g'}^{R}$	각 노드 간 이송방식 l 로 수소 이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-

다. 비용 목적함수

<표 3.22. 5만 명 규모 도시 내 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 비용변수>

변수	설명	변수	설명
$CCCT$	전체 압축시설 총 투자비용($)	MCS	부생수소 발생지-수소저장소 간 튜브트레일러 유지보수비용($/d)
$SCCT$	전체 저장시설 총 투자비용($)	MCR	수소저장소-수요도시 간 튜브트레일러 유지보수비용($/d)
FCC	전체 압축·저장시설 총 투자비용($)	MCL	수요도시 내 이송 튜브트레일러 유지보수비용($/d)
$TCCS$	부생수소 발생지-수소저장소 간 튜브트레일러 총 투자비용($)	MC	전체 튜브트레일러 유지보수 비용($/d)
$TCCR$	수소저장소-수요도시 간 튜브트레일러 총 투자비용($)	GCS	부생수소 발생지-수소저장소 간 튜브트레일러 일반관리비용($/d)
$TCCL$	수요도시 내 이송 튜브트레일러 총 투자비용($)	GCR	수소저장소-수요도시 간 튜브트레일러 일반관리비용($/d)
TCC	튜브트레일러 총 투자비용($)	GCL	수요도시 내 이송 튜브트레일러 일반관리비용($/d)
$POCT$	전체 부생수소 구매비용($/d)	GC	전체 튜브트레일러 일반 관리비용($/d)
$COCT$	전체 압축시설 조업비용($/d)	$TOCS$	부생수소 발생지-수소저장소 간 튜브트레일러 운영비용($/d)
$SOCT$	전체 저장시설 조업비용($/d)	$TOCR$	수소저장소-수요도시 간 튜브트레일러 운영비용($/d)
FOC	전체 압축·저장시설 조업비용($/d)	$TOCL$	수요도시 내 이송 튜브트레일러 운영비용($/d)
FCS	부생수소 발생지-수소저장소 간 튜브트레일러 연료비용($/d)	TOC	전체 튜브트레일러 운영비용($/d)
FCR	수소저장소-수요도시 간 튜브트레일러 연료비용($/d)	$PLCCTS$	부생수소 발생지-수소저장소 간 배관망 설치비용($)
FCL	수요도시 내 이송 튜브트레일러 연료비용($/d)	$PLCCTR$	수소저장소-수요도시 간 배관망 설치비용($)
FC	전체 튜브트레일러 연료비용($/d)	$PLCCTL$	수요도시 내 이송 배관망 설치비용($)
LCS	부생수소 발생지-수소저장소 간 튜브트레일러 인건비용($/d)	$PLCCT$	전체 배관망 설치비용($)
LCR	수소저장소-수요도시 간 튜브트레일러 인건비용($/d)	$PLOCTS$	부생수소 발생지-수소저장소 간 배관망 운영비용($/d)
LCL	수요도시 내 이송 튜브트레일러 인건비용($/d)	$PLOCTR$	수소저장소-수요도시 간 배관망 운영비용($/d)
LC	전체 튜브트레일러 인건비용($/d)	$PLOCTL$	수요도시 내 이송 배관망 운영비용($/d)
TDC	전체 수소네트워크 일일 총 비용($/d)	$PLOCT$	전체 배관망 운영비용($/d)

○ 압축 및 저장시설의 총 투자비용

$$CCCT = \sum_{j}\sum_{i}\sum_{n}(CCC_{j,i} \times IC_{j,i,n})$$

$$SCCT = \sum_{j}\sum_{i}\sum_{n}(SCC_{j,i} \times IS_{j,i,n})$$

$$FCC = CCCT + SCCT$$

○ 튜브트레일러의 총 투자비용

$$TCCS = \sum_{i_1}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{TMC \times QS_{i,l,g,g'}}{TMA^R \times TCap}\left(\frac{2 \times L^S_{l,g,g'}}{SP^R} + LUT\right)\right) \qquad (l = truck)$$

$$TCCR = \sum_{i_1}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{TMC \times QR_{i,l,g,g'}}{TMA^R \times TCap}\left(\frac{2 \times L^R_{l,g,g'}}{SP^R} + LUT\right)\right) \qquad (l = truck)$$

$$TCCL = \sum_{i \in i_1, i_3}\sum_{n}\left(\frac{TMC_m \times D_{i,g}}{TMA^L \times TCap}\left(\frac{2 \times L^L_{l,n}}{SP^L} + LUT\right)\right) \qquad (l = truck)$$

$$TCC = TCCS + TCCR + TCCL$$

○ 부생수소 구매비용 및 압축·저장시설의 조업비용

$$COCT = \sum_{j}\sum_{i}\sum_{n}(UCC_{j,i} \times C_{j,i,n}) \qquad POCT = \sum_{j}\sum_{n}(UPC_j \times P_{j,n})$$

$$SOCT = \sum_{j}\sum_{i}\sum_{n}\left(USC_{j,i} \times \frac{S_{j,i,n}}{\beta}\right) \qquad FOC = COCT + POCT + SOCT$$

○ 튜브트레일러 연료비용

$$FCS = \sum_{i_1}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{FP \times QS_{i,l,g,g'} \times 2 \times L^S_{l,g,g'}}{FE^R \times TCap}\right) \qquad (l = truck)$$

$$FCR = \sum_{i_1}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{FP \times QR_{i,l,g,g'} \times 2 \times L^R_{l,g,g'}}{FE^R \times TCap}\right) \qquad (l = truck)$$

$$FCL = \sum_{i \in i_1, i_3}\sum_{n}\left(\frac{FP \times D_{i,n} \times 2 \times L^L_{l,n}}{FE^L \times TCap}\right) \qquad (l = truck)$$

$$FC = FCS + FCR + FCL$$

○ 튜브트레일러 인건비용

$$LCS = \sum_{i_1}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{DW \times QS_{i,l,g,g'}}{TCap}\left(\frac{2 \times L^S_{l,g,g'}}{SP^L} + LUT\right)\right) \qquad (l = truck)$$

$$LCR = \sum_{i_1}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{DW \times QR_{i,l,g,g'}}{TCap}\left(\frac{2 \times L^R_{l,g,g'}}{SP^L} + LUT\right)\right) \qquad (l = truck)$$

$$LCL = \sum_{i \in i_1, i_3}\sum_{n}\left(\frac{DW \times D_{i,n}}{TCap}\left(\frac{2 \times L^L_{l,n}}{SP^L} + LUT\right)\right) \qquad (l = truck)$$

$$LC = LCS + LCR + LCL$$

○ 튜브트레일러 유지보수비용

$$MCS = \sum_{i_1}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{ME \times QS_{i,l,g,g'} \times 2 \times L^S_{l,g,g'}}{TCap}\right) \qquad (l = truck)$$

$$MCR = \sum_{i_1}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{ME \times QR_{i,l,g,g'} \times 2 \times L^R_{l,g,g'}}{TCap}\right) \qquad (l = truck)$$

$$MCL = \sum_{i \in i_1, i_3} \sum_{n} \left(\frac{ME \times D_{i,n} \times 2 \times L_{l,n}^{L}}{TCap} \right) \qquad (l = truck)$$

$$MC = MCS + MCR + MCL$$

○ 튜브트레일러 일반관리비용

$$GCS = \sum_{i_1} \sum_{g} \sum_{g'} \left(\frac{GE \ \times QS_{i,l,g,g'}}{TMA^{R} \times TCap} \left(\frac{2 \times L_{l,g,g'}^{S}}{SP^{R}} + LUT \right) \right) \qquad (l = truck)$$

$$GCR = \sum_{i_1} \sum_{g} \sum_{g'} \left(\frac{GE \ \times QR_{i,l,g,g'}}{TMA^{R} \times TCap} \left(\frac{2 \times L_{l,g,g'}^{R}}{SP^{R}} + LUT \right) \right) \qquad (l = truck)$$

$$GCL = \sum_{i \in i_1, i_3} \sum_{n} \left(\frac{GE \times D_{i,n}}{TMA^{L} \times TCap} \left(\frac{2 \times L_{l,n}^{L}}{SP^{L}} + LUT \right) \right) \qquad (l = truck)$$

$$GC = GCS + GCR + GCL$$

○ 전체 튜브트레일러 운영비용

$$TOC = FC + LC + MC + GC$$

○ 배관망 총 투자 및 운영비용

$$PLCCTS = \sum_{i \in i_1, i_3} \sum_{d} \sum_{g} \sum_{g'} \left(PLCC_{d,g,g'}^{S} \times W_{i,d,g,g'}^{S} \right)$$

$$PLCCTR = \sum_{i \in i_1, i_3} \sum_{d} \sum_{g} \sum_{g'} \left(PLCC_{d,g,g'}^{R} \times W_{i,d,g,g'}^{R} \right)$$

$$PLCCTL = \sum_{d} \sum_{n} \left(PLCC_{d,n}^{L} \times W_{i_2,d,n}^{L} \right)$$

$$PLCCT = PLCCTS + PLCCTR + PLCCTL$$

$$PLOCTS = POM \times PLCCTS$$

$$PLOCTR = POM \times PLCCTR$$

$$PLOCTL = POM \times PLCCTL$$

$$PLOCT = PLOCTS + PLOCTR + PLOCTL$$

라. 제약조건

○ 노드 내 수소 수요 제약조건

$$D_{n}^{T} = \sum_{i} D_{i,g} \qquad \forall n$$

$$D_{i,n} = \sum_{l} \sum_{g'} QR_{i,l,g',g} \qquad \forall i, g$$

○ 부생수소 생산 제약조건

$$\sum_{j \in medium, large} P_{j,n} = \sum_{i} \sum_{j} C_{j,i,n} \qquad \forall n$$

$$P_{j,n} = 0 \qquad \forall j, n : j = small$$

$$PCap_{j}^{\min} \times NP_{j,n} \le P_{p,j,g} \le PCap_{j}^{\max} \times NP_{j,n} \qquad \forall j, n$$

$$IP_{j,n} = 0 \qquad \forall j, n$$

○ 압축시설 제약조건

$$\sum_{j} C_{j,i,n} = \sum_{l}\sum_{g'} QS_{i,l,g,g'} \qquad \forall i,n : n = g$$

$$CCap_{j,i}^{\min} \times NC_{j,i,n} \le C_{j,i,n} \le CCap_{j,i}^{\max} \times NC_{j,i,n} \qquad \forall j,i,n$$

○ 수소이송 제약조건

$$Q_{i,l}^{\min} \times XS_{i,l,g,g'} \le QS_{i,l,g,g'} \le Q_{i,l}^{\max} \times XS_{i,l,g,g'} \qquad \forall i,l,g,g'$$

$$Q_{i,l}^{\min} \times XR_{i,l,g,g'} \le QR_{i,l,g,g'} \le Q_{i,l}^{\max} \times XR_{i,l,g,g'} \qquad \forall i,l,g,g'$$

$$\sum_{l}\sum_{g'} QR_{i,l,g,g'} = \sum_{l}\sum_{g'} QS_{i,l,g',g} \qquad \forall i,n : n = g$$

$$XS_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_1, l = pipeline$$

$$XR_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_1, l = pipeline$$

$$XS_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3, l = truck$$

$$XR_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3, l = truck$$

○ 저장시설 제약조건

$$S_{i,n}^{T} = \beta \times \sum_{l}\sum_{g'} QR_{i,l,g,g'} \qquad \forall i,n : n = g$$

$$S_{i,n}^{T} = \sum_{j} S_{j,i,n} \qquad \forall i,n$$

$$SCap_{j,i}^{\min} \times NS_{j,i,n} \le S_{j,i,n} \le SCap_{j,i}^{\max} \times NS_{j,i,n} \qquad \forall j,i,n$$

$$\sum_{j}(SCap_{j,i}^{\min} \times NS_{j,i,n}) \le S_{i,n}^{T} \le \sum_{j}(SCap_{j,i}^{\max} \times NS_{j,i,n}) \qquad \forall i,n$$

○ 초기 생산 및 압축·저장시설 제약조건

$$NC_{p,j,i,g} = NC_{p,j,i,g}^{0} + IC_{p,j,i,g} \qquad \forall p,j,i,g$$

$$NP_{p,j,g} = NP_{p,j,g}^{0} + IP_{p,j,g} - SDP_{p,j,g} \qquad \forall p,j,g$$

$$NS_{j,i,g} = NS_{j,i,g}^{0} + IS_{j,i,g} \qquad \forall j,i,g$$

$$0 \le SDP_{p,j,g} \le NP_{p,j,p}^{0} \qquad \forall p,j,g$$

○ 배관망 제약조건

$$XS_{i,l,g,g'} = \sum_{d} W_{i,d,g,g'}^{S} \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3,\ l = pipeline$$

$$XR_{i,l,g,g'} = \sum_{d} W_{i,d,g,g'}^{R} \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3,\ l = pipeline$$

$$\sum_{d} W_{i,dr,g,g'}^{S} \le 1 \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3,\ l = pipeline$$

$$\sum_{d} W_{i,dr,g,g'}^{R} \le 1 \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3,\ l = pipeline$$

$$V_{i,n} = \sum_{d} W_{i,d,n}^{L} \qquad \forall i,n$$

$$Q_{i,l}^{\min} \times V_{i,n} \le D_{i,n} \le Q_{i,l}^{\max} \times V_{i,n} \qquad \forall i,l,n : l = pipeline$$

$$V_{i,g} = 0 \qquad \forall i,g : i = i_1$$

○ 배관망 Hydraulics

$$QS_{i,l,g,g'} \le \sum_d (\hat{Q}^S_{d,g,g'} \times W^S_{i,d,g,g'}) \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3,\ l = pipeline$$

$$QR_{i,l,g,g'} \le \sum_d (\hat{Q}^R_{d,g,g'} \times W^R_{i,d,g,g'}) \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3,\ l = pipeline$$

$$QS_{i,l,g,g'} \le \sum_d (\overline{Q_d} \times W^S_{i,d,g,g'}) \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3,\ l = pipeline$$

$$QR_{i,l,g,g'} \le \sum_d (\overline{Q_d} \times W^R_{i,d,g,g'}) \qquad \forall i,l,g,g' : i \in i_2, i_3,\ l = pipeline$$

$$D_{i,n} \le \sum_d (\hat{Q}^L_{d,n} \times W^L_{i,d,n}) \qquad \forall i,l,n : i = i_2$$

$$D_{i,n} \le \sum_d (\overline{Q_d} \times W^L_{i,d,n}) \qquad \forall i,l,n : i = i_2$$

4. 5만 명 규모 도시의 수소 네트워크 최적화 결과

○ 주어진 수소 네트워크 최적화 문제는 목적함수와 제약조건이 선형이고 연속 변수와 정수 변수가 혼합된 형태인 Mixed-Integer Linear Programming(MILP)임

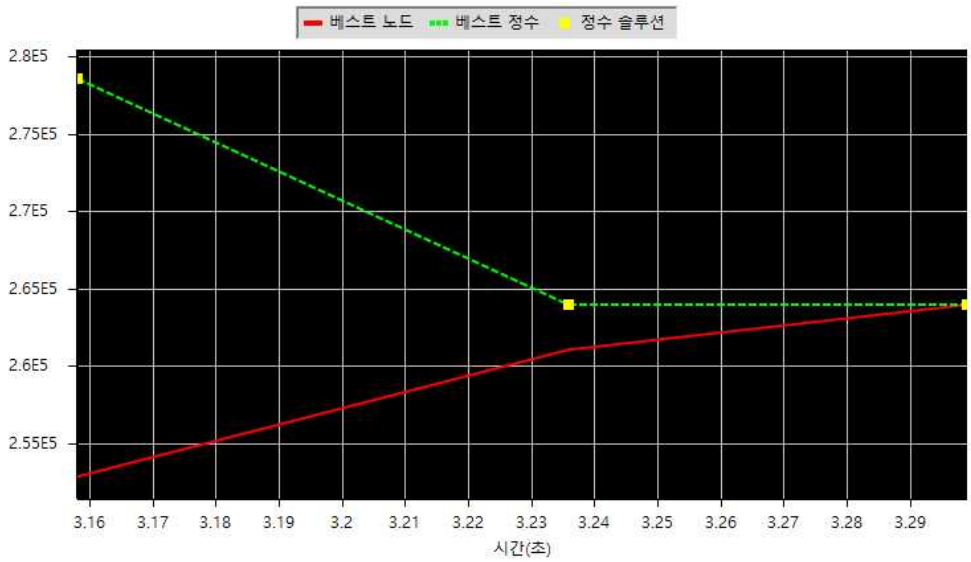
○ LP(Linear Programming)와 MILP의 최적화 Solver로 알려진 CPLEX로 해당 네트워크 최적화 문제를 풀었으며, CPLEX가 내장된 상용 소프트웨어로 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.8을 사용함

○ CPLEX로 정의한 해당 네트워크 문제의 제약조건 및 변수 개수, 수렴조건을 <표 3.23>, 그래프화한 수렴결과를 <그림 3.11>에 나타냄

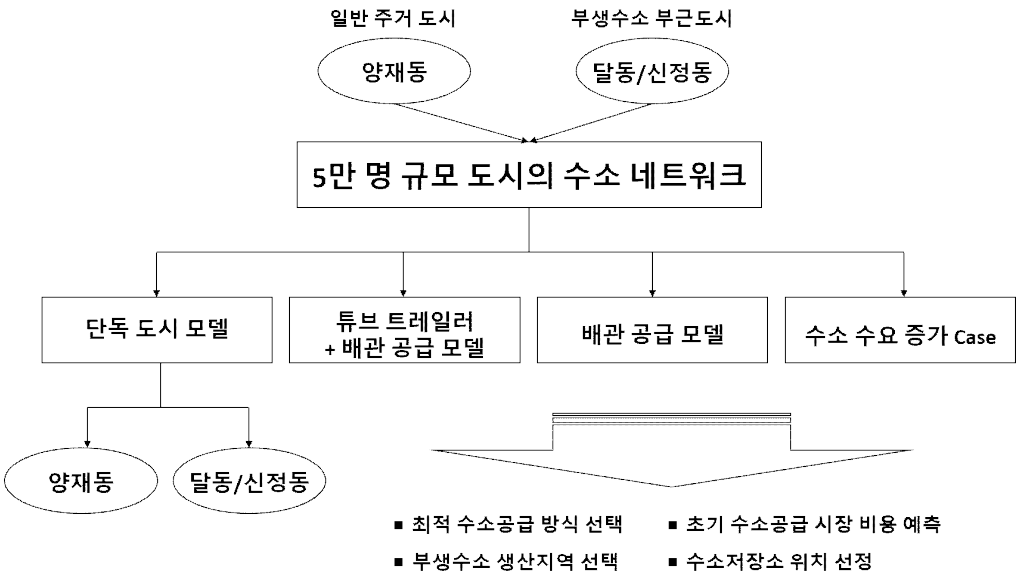
○ 최적의 수소 공급모델, 배관망 공급방식의 비용, 수요량 증감에 따른 공급모델 변화, 개별 도시의 최적 공급모델을 알아보기 위해 <그림 3.12>과 같은 Case로 문제를 나누어 최적화 결과를 도출함

<표 3.23. 5만 명 규모 도시 수소네트워크 최적화 문제의 제약조건 및 변수 통계>

제약조건	변수			계수	반복계산	Optimal Gap
	이진수	정수	연속변수			
1,184	952	180	300	5,008	76	≤0.01%



<그림 3.11. 5만 명 규모 도시 수소네트워크 최적화 문제의 최적화 수렴 결과>



<그림 3.12. 5만 명 규모 도시 수소네트워크 최적화 문제 Case 분류>

가. 단독 도시 모델

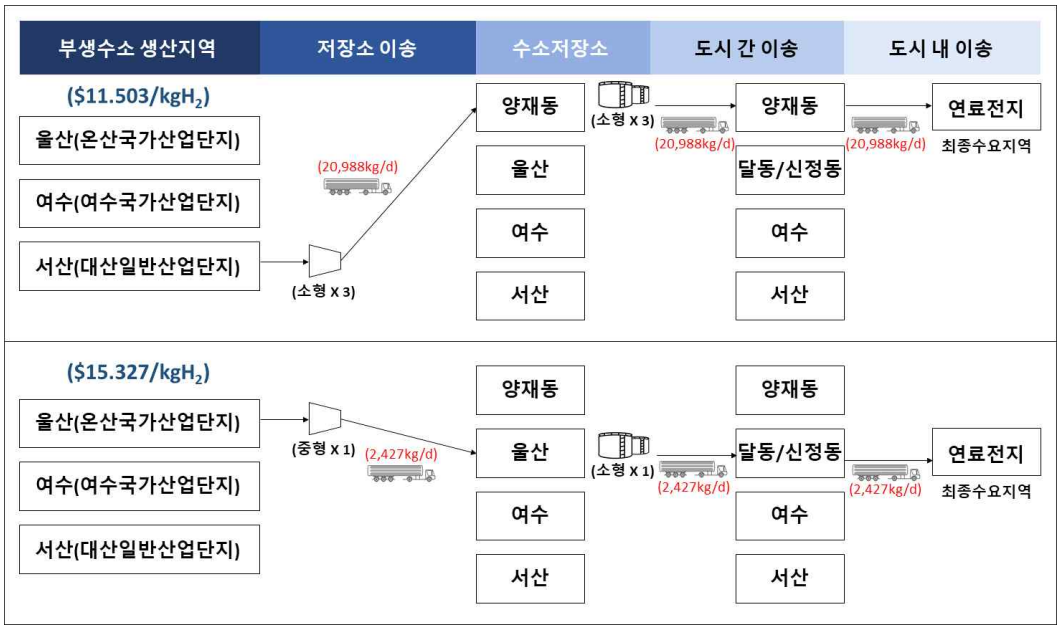
○ <표 3.24>는 양재동과 울산시 달동·신정동 지역에 각각 부생수소를 튜브트레일러 및 배관망을 혼합한 공급방식으로 비용최적화한 결과, 수소 네트워크의 각 단계별 비용과 전체 비용에서 차지하는 비율을 보여줌

○ <그림 3.13>에 단독 도시 모델에서 최소비용을 갖는 최적해를 요약함. 이송거리를 최소화하기 위해 양재동 지역은 서산에서, 달동/신정동 지역은 울산 산업단지에서 부생수소를 공급받음. 그러나 수소저장소의 위치는 양재동 부근으로 결정되었는데 부생수소 생산지역 내에 저장소 부지를 선정한다면 양재동 인근이 아닌 서산 지역에 저장소를 설치 할 수 있음

○ 단독 도시 모델의 계산 결과는 다음 두 가지 예측 가능한 결과를 도출함. ①수요도시는 가장 가까운 지역의 부생수소를 활용함. ②소규모 수요에서는 튜브트레일러를 이용한 수소 이송이 유리함. 두 결과를 통해 개발한 최적화 모델이 비용에 합리적인 최적해를 도출한다는 것을 알 수 있음

<표 3.24. 단독 도시 공급 모델의 비용 최적화 결과>

구분		비용	일일 비용	단위비용	비율		비고
		($) 또는 ($/d)	($/d)	($/kgH$_2$)	(%)		
양재동	총 일일 비용	241,434	241,434	11.503	100.00		-
	부생수소 구매비용	73,459	73,459	3.500	30.43		-
	압축시설 투자비	18,540,256	5,080	0.242	2.10	20.32	-
	압축시설 조업비	43,970	43,970	2.095	18.21		-
	저장시설 투자비	224,411,179	61,483	2.929	25.47	51.55	10일 분량 비축
	저장시설 조업비	62,975	62,975	3.000	26.08		저장시설 압축비용 포함
	튜브트레일러 투자비	5,363,339	1,469	0.070	0.61	6.16	-
	튜브트레일러 운영비	13,408	13,408	0.639	5.55		-
	배관망 투자비	0	0	0.000	0.00	0.00	-
	배관망 유지보수비	0	0	0.000	0.00		-
달동·신정동	총 일일 비용	37,193	37,193	15.327	100.00		-
	부생수소 구매비용	8,493	8,493	3.500	22.84		-
	압축시설 투자비	6,180,085	1,693	0.698	4.55%	18.22	-
	압축시설 조업비	5,084	5,084	2.095	13.67		-
	저장시설 투자비	74,803,726	20,494	8.446	55.10	74.68	10일 분량 비축
	저장시설 조업비	7,281	7,281	3.000	19.58		저장시설 압축비용 포함
	튜브트레일러 투자비	401,169	110	0.045	0.30	2.25	-
	튜브트레일러 운영비	727	727	0.300	1.95		-
	배관망 투자비	0	0	0.000	0.00	0.00	-
	배관망 유지보수비	0	0	0.000	0.00		-



<그림 3.12. 단독 도시(양재동, 달동·신정동) 공급모델의 비용 최적해>

나. 튜브트레일러 및 배관망 혼합 공급모델

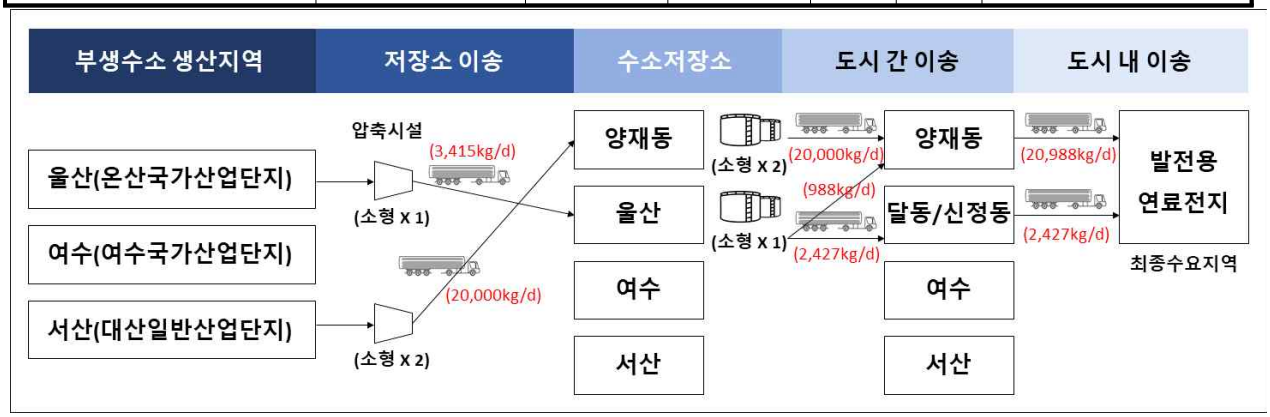
○ <표 3.25>는 튜브트레일러 및 배관망을 혼합한 비용최적화 결과, 수소 네트워크의 각 단계별 비용과 전체 비용에서 차지하는 비율을 보여줌

○ <그림 3.14>에 튜브트레일러 및 배관망을 모두 고려한 모델에서 최소비용을 갖는 최적해를 요약함. 양재동 지역은 서산에서, 달동/신정동 지역은 울산 산업단지에서 부생수소를 공급받는 것이 이송거리를 최소화 할 수 있으나, 울산의 부생수소 중 일부를 양재동으로 이송하는 것이 서산에 추가적인 압축시설을 설치하는 것보다 전체 비용 측면에서 유리한 것으로 나타남

○ 모든 이송방식은 튜브트레일러를 통해 이루어지며, 5만 명 규모 도시 2 곳, 총 17 곳의 대형건물에 발전용 연료전지 수요가 있을시, 배관망 설치를 고려할 수 없는 작은 규모의 수요로 판단됨

<표 3.25. 튜브트레일러 및 배관망 혼합 공급모델의 비용 최적화 결과>

구분	비용	일일 비용	단위비용	비율		비고
	($) 또는 ($/d)	($/d)	($/kgH$_2$)	(%)		
총 일일 비용	263,946	263,946	11.273	100.00		-
부생수소 구매비용	81,952	81,952	3.500	31.05		-
압축시설 투자비	18,540,256	5,080	0.217	1.92	20.51	-
압축시설 조업비	49,054	49,054	2.095	18.58		-
저장시설 투자비	224,411,179	61,483	2.626	23.29	49.91	10일 분량 비축
저장시설 조업비	70,256	70,256	3.000	26.62		저장시설 압축비용 포함
튜브트레일러 투자비	5,973,470	1,637	0.070	0.62	6.28	-
튜브트레일러 운영비	14,945	14,945	0.638	5.66		-
배관망 투자비	0	0	0.000	0.00	0.00	-
배관망 유지보수비	0	0	0.000	0.00		-



<그림 3.14. 튜브트레일러 및 배관망 혼합 공급모델의 비용 최적해>

다. 배관망 단독 공급모델

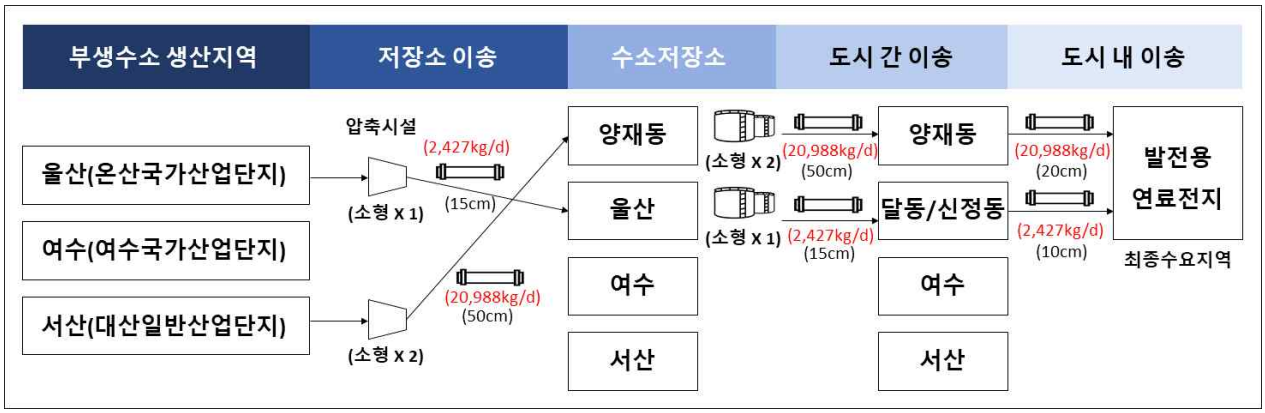
○ <표 3.26>는 배관망 단독 공급모델의 비용최적화 결과, 수소 네트워크의 각 단계별 비용과 전체 비용에서 차지하는 비율을 보여줌

○ <그림 3.15>에 튜브트레일러를 배제한 배관망 단독 공급 모델에서 최소비용을 갖는 최적해를 요약함. 배관망 길이를 최소화하기 위해 양재동 지역은 서산에서, 달동/신정동 지역은 울산 산업단지에서 부생수소를 공급받으며, 저장소 위치는 수요 지역 부근에 위치함

○ 튜브트레일러 및 배관망 혼합 공급 모델($11.273/kgH$_2$)과 비교시 단위비용이 $12.727/kgH$_2$로 비용 차이가 크지 않으며, 두 공급 모델 모두 10일 분량의 수소 비축 때문에 저장소 비용이 전체 비용의 절반에 달함. 저장비용 외에 두 번째로 큰 비용요소는 부생수소의 구매비용으로 두 모델 모두 전체 비용의 약 30%를 차지함

표 3.26. 배관망 단독 공급모델의 비용 최적화 결과

구분	비용	일일 비용	단위비용	비율		비고
	($) 또는 ($/d)	($/d)	($/kgH$_2$)	(%)		
총 일일 비용	298,006	298,006	12.727	100.00		-
부생수소 구매비용	81,952	81,952	3.500	27.50		-
압축시설 투자비	11,597,354	3,177	0.136	1.07	16.47	-
압축시설 조업비	45,899	45,899	1.960	15.40		-
저장시설 투자비	298,178,416	81,693	3.489	27.41	49.65	10일 분량 비축
저장시설 조업비	66,280	66,280	2.831	22.24		저장시설 압축비용 포함
튜브트레일러 투자비	0	0	0.000	0.00	0.00	-
튜브트레일러 운영비	0	0	0.000	0.00		-
배관망 투자비	180,334,182	49,407	2.110	16.58	19.89	-
배관망 유지보수비	9,881	9,881	0.422	3.32		-



<그림 3.15. 배관망 단독 공급모델의 비용 최적해>

라. 수소 수요증가 Cases

○ 양재동, 달동·신정동 도시 2 곳의 총 17 곳 대형건물의 발전용 연료전지 수소 수요를 Base case로 정함. 수소 수요량 및 대형건물 수가 선형적으로 증가한다고 가정하였을 때, 2배, 3배, 5배, 10배, 15배, 20배의 수소 수요증가에 대한 비용 최적해 결과를 <그림

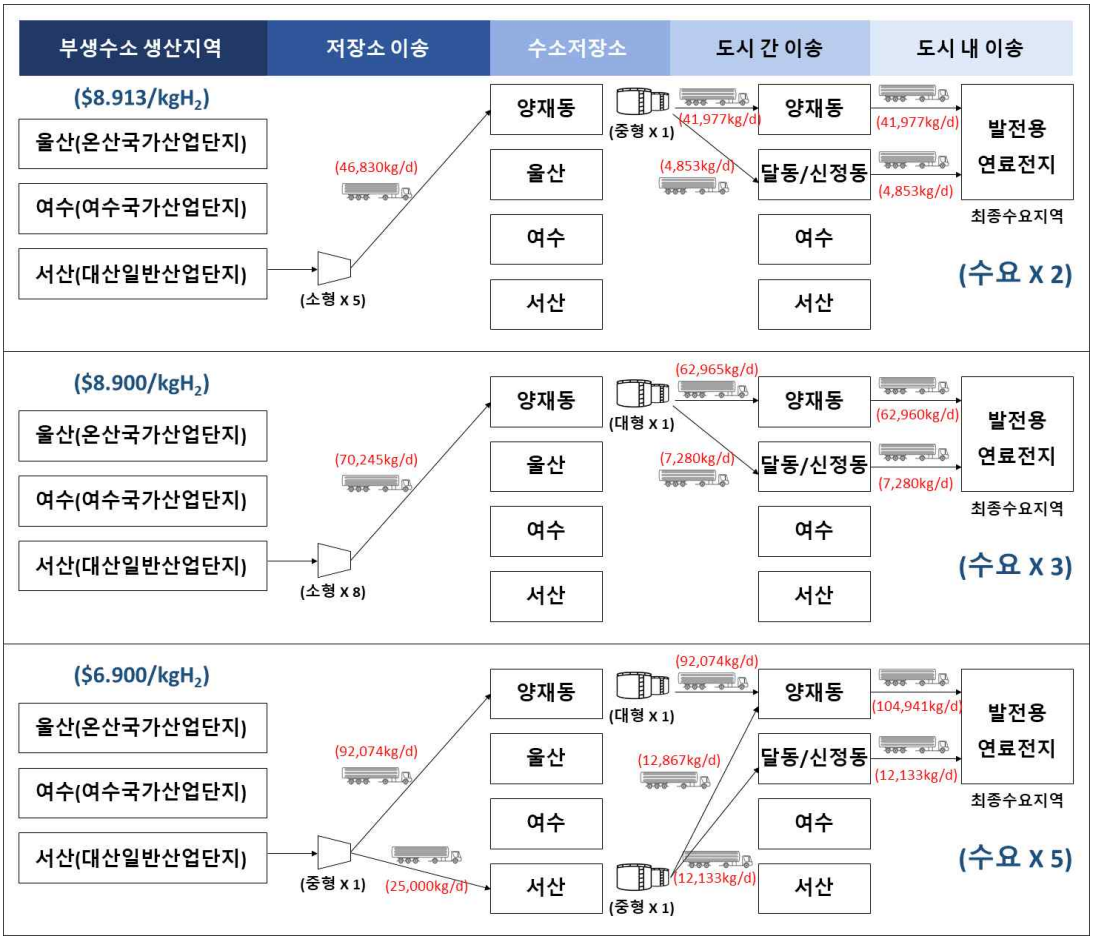
3.16>, <그림 3.17>에 도시함

○ 수소 수요 증가에 따라 변화하는 수소의 단위공급비용 그래프를 <그림 3.18>에 나타냄. 수요량이 증가함에 따라 규모의 경제가 적용되어 단위공급비용이 줄어드는 추세를 확인할 수 있음

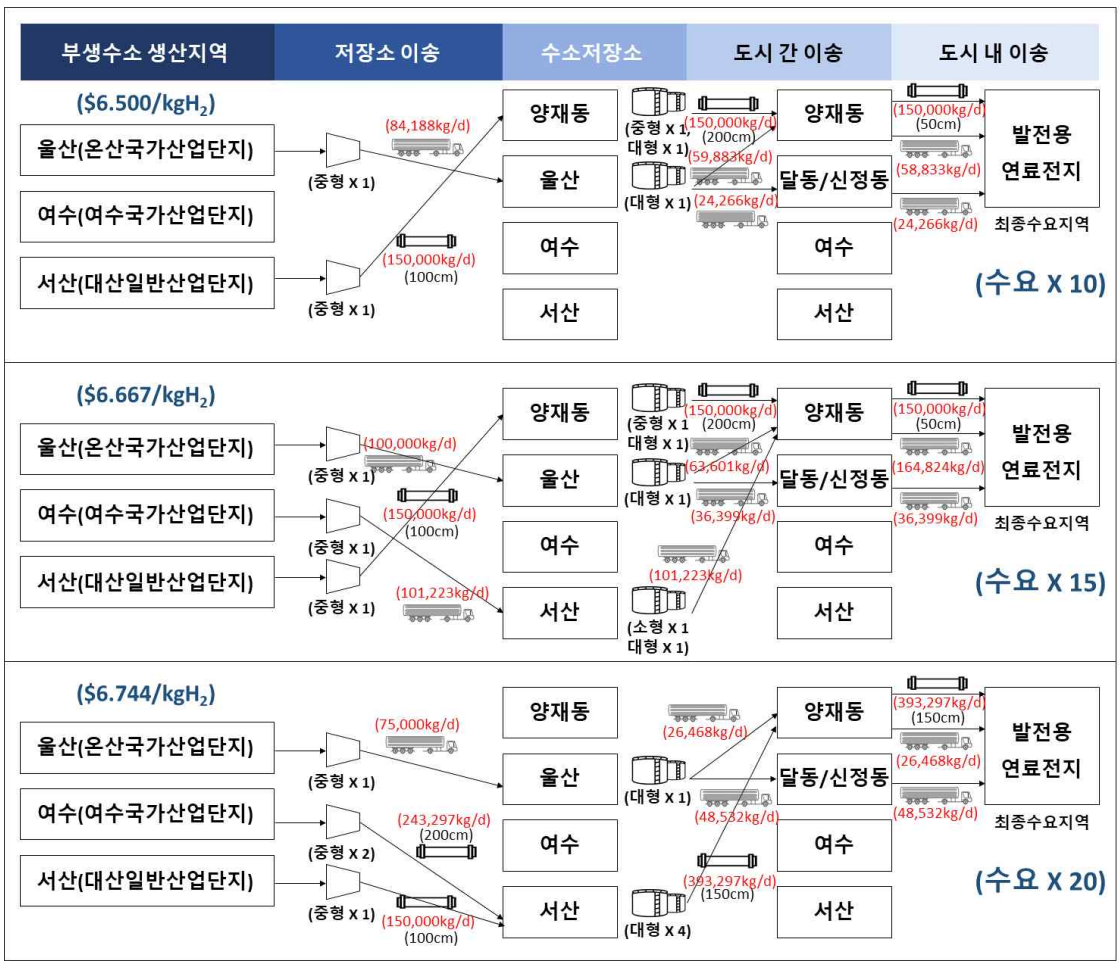
○ 수요가 적은 초기에는 중복되는 기반시설을 줄이기 위해 수요가 더 많은 지역인 양재동에 저장소를 위치시키고, 울산 산업단지 보다 먼 거리인 서산의 부생수소를 울산지역에 보급함(2배Case). 수요가 증가할수록 저장소의 위치는 양재동 부근에서 서산으로 옮겨지고, 울산 달동·신정동의 수요가 충분해질 때 울산에서 생산되는 부생수소를 활용하는 것을 볼 수 있음

○ <그림 3.18>은 수요의 증가에 따라 수소네트워크에 영향을 미치는 비용요소의 변화를 보여줌. 5배Case(117.1tonneH_2/d)에서 중형 압축시설을 사용하며 압축에 따른 단위비용 절감이 이뤄짐. 압축시설의 크기를 3개(소형, 중형, 대형)로 나눈 모델이기 때문에 급격한 비용 변화로 보이나 실제로는 압축량 증가에 따라 압축시설의 비용대비 효율이 좋아져 압축비용이 서서히 줄어들 것으로 전망됨

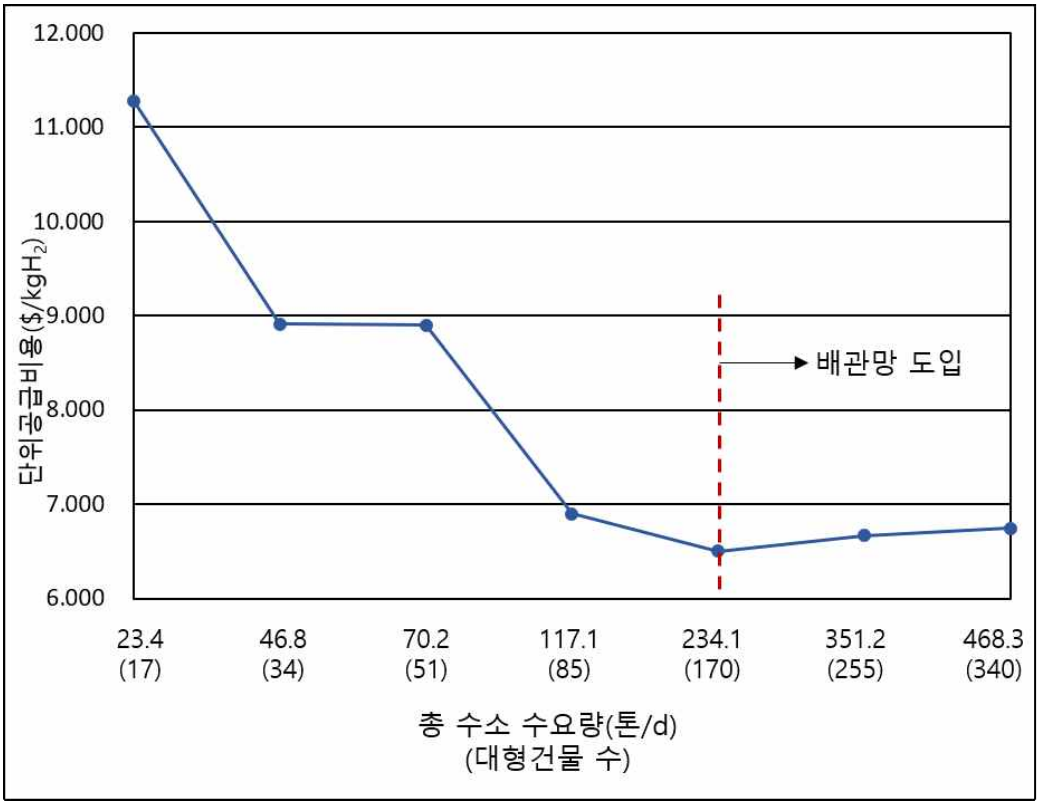
○ 튜브트레일러-배관망 전환기(10배Case-20배Case)에는 배관망 투자비용의 증가로 단위공급비용이 일시적으로 상승할 것으로 예측됨



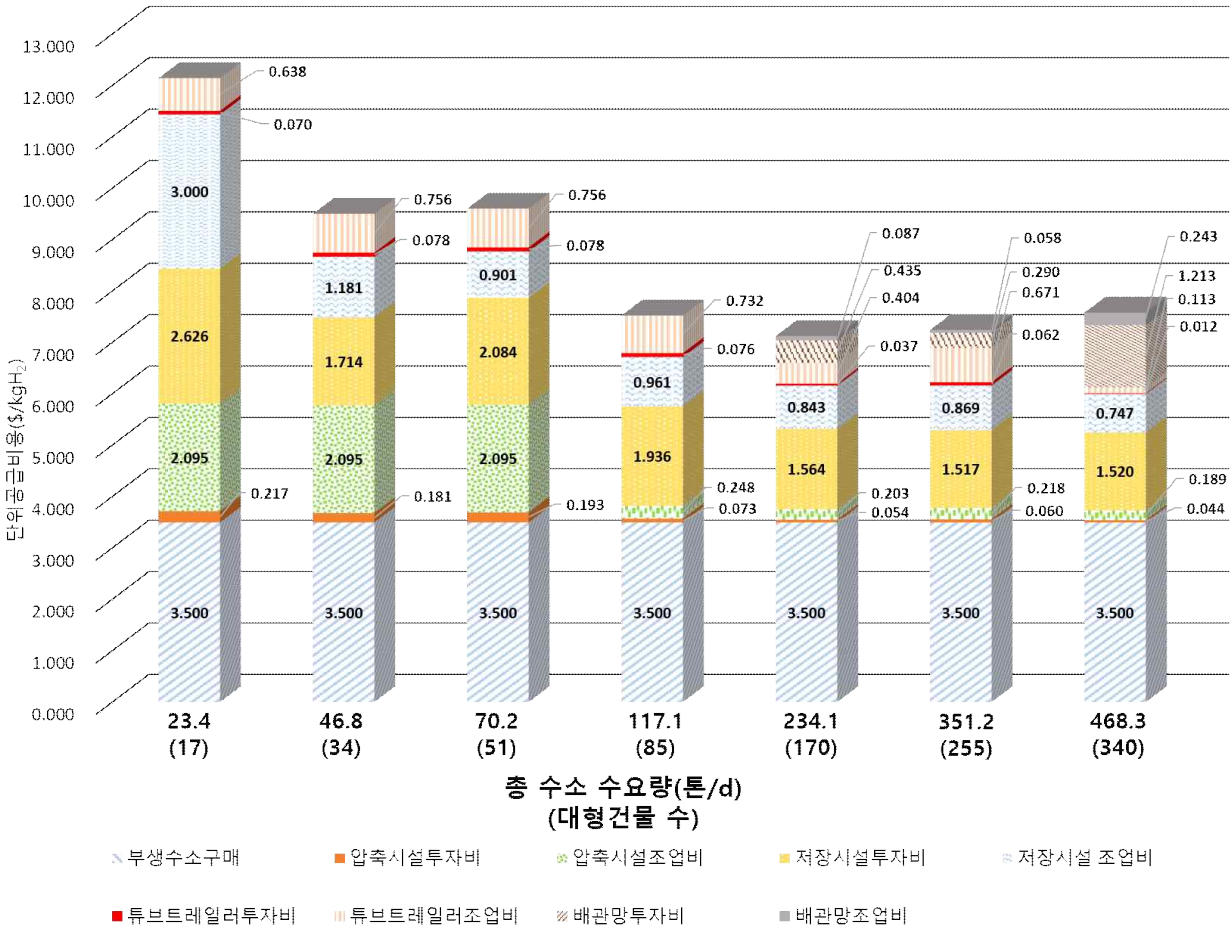
<그림 3.16. 수요의 증가에 따른 튜브트레일러 및 배관망 혼합 공급모델의 비용 최적해(1)>



<그림 3.16. 수요의 증가에 따른 튜브트레일러 및 배관망 혼합 공급모델의 비용 최적해(2)>



<그림 3.17. 수요의 증가에 따른 수소 단위공급비용의 변화>



<그림 3.18. 수요의 증가에 따른 수소 단위공급비용 구성비 변화>

마. 5만 명 규모 도시 내 수소저장소의 위치선정

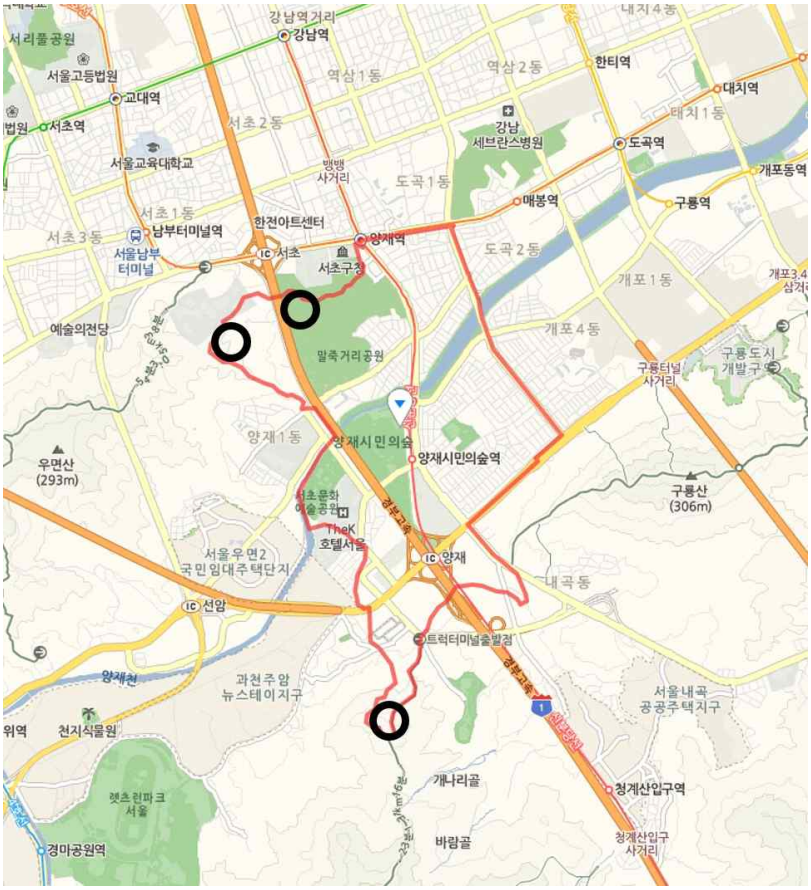
○ 5만 명 규모의 도시 내에서 발전에 필요한 수소를 저장하기 위해서는 위치를 선정하여야 함. 수소의 경우 180barg의 압축고압가스의 형태로 저장됨. 이 물질의 경우 4~76%라는 넓은 가연범위를 가지며, 또한 폭발성을 가짐. 대용량의 수소저장소에서 사고가 발생할 경우 대규모의 인구 및 재산상의 피해를 야기할 수 있으므로 위험성 평가를 통한 수소저장소의 위치선정이 필수로 요구됨.

○ 위험성 평가(Risk Assessment)란 사고가 발생할 빈도와 사고 발생 시 피해 규모를 조합하여 위험(Risk)를 평가하는 방법을 뜻함. 국내에서는 화학물질을 취급하는 취급시설에서 장외위험평가 등을 수행하나, 위험에 대한 값을 정량적 혹은 정성적으로 평가하지 않음. 그러나 해외에서는 조선이나 플랜트 등 다양한 분야에서 위험성 평가를 필수적으로 수행하고 있음.

○ 본 연구에서는 5만 명의 인구규모 도시인 양재동의 발전용 수소를 저장할 수 있는 수소 저장소의 위치선정을 위해 정량적 위험성 평가(Quantitative Risk Assessment, QRA)를 수행하였음.

○ QRA를 수행하기 위해서 우선 양재동을 <그림 3.19> 나타내었으며, 양재동에 수소를 저장할 수 있을 만한 부지의 후보지를 <그림 3.20>과 같이 선정하였음. 선정 기준은 양재동 지형을 확인하였을 때 주변에 인구분포가 적고 양재동 외곽 부분에 해당하는 부분을 주요한 후보지로 선정하였음.

<그림 3.19. 양재동 지도>



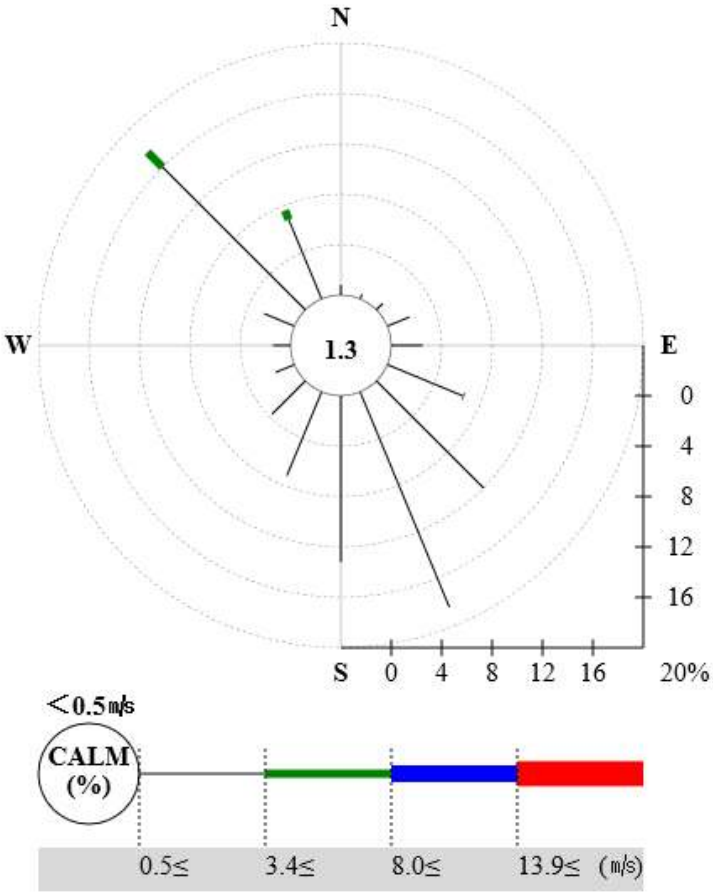
<그림 3.20. 5만 명 규모 도시 내 수소 저장소 후보지>

○ QRA를 수행하기 위해서 각 저장소의 시나리오를 선정하고 해당 시나리오에 따른 피해영향을 평가한 후 수소저장소에서 사고가 발생할 빈도를 확보하여야 함. 사고 시나리오의 경우 TNO의 Purple book을 참조하여 시나리오를 수립하였음. 수소 저장소 내의 고압수소저장용기의 사고 발생 빈도의 경우 Sandia National Laboratories의 HyRAM(Hydrogen Risk Assessment Model)내에 있는 빈도를 참조하여 저장용기의 사고 빈도를 확보함.

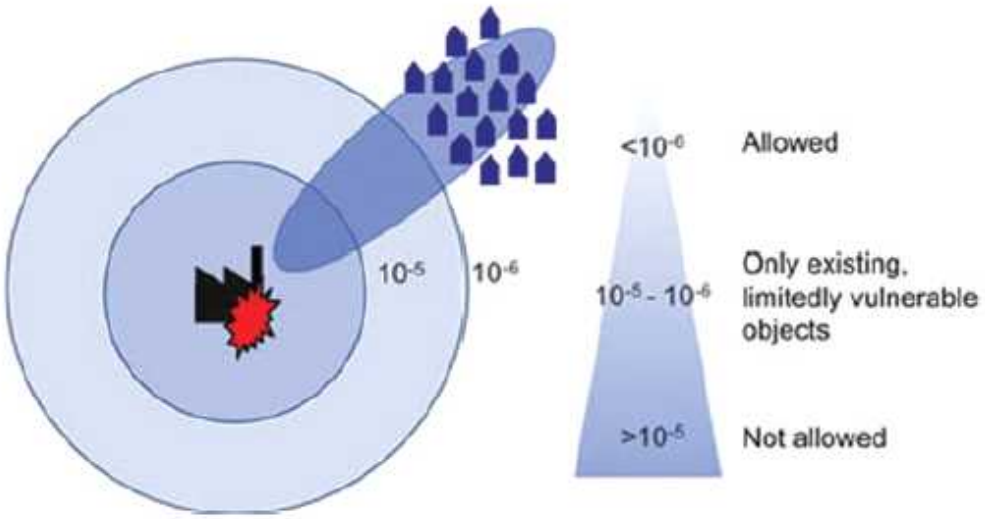
○ 수소 저장소의 수소저장용기에서 누출 등의 사고가 발생할 경우 주변 기상 조건에 따라 피해영향범위가 다르게 확인됨. 기상현상의 경우 바람장미(Windrose)를 이용하여 연평균 풍향 및 풍속의 빈도를 확인하여 QRA를 수행하게 됨. 양재동의 경우 <그림 3.21>처럼 기상청의 2018년도 바람장미 데이터를 이용하여 QRA를 수행함.

○ 기상, 기기, 사고가 일어날 각 빈도와 사고 발생 시 야기되는 피해영향범위를 모두 조합하여 IR(Individual Risk)과 SR(Societal Risk)을 도출하게 됨. IR은 어떤 지점에서 인명이 피해입을 정도를 연간 사망자 수로 환산하여 결과를 도출하게 됨. IR 값은 기준에 따라서 안전함, 허용 가능한 범위, 위험함 정도로 나뉠 수 있으며 해당 기준은 <그림 3.22>와 같음. SR은 사회적인 위험을 평가하는 것으로 F-N curve의 기준선 내에 들어와야 안전하다고 평가할 수 있음. 이를 나타내는 것은 <그림 3.23>과 같음

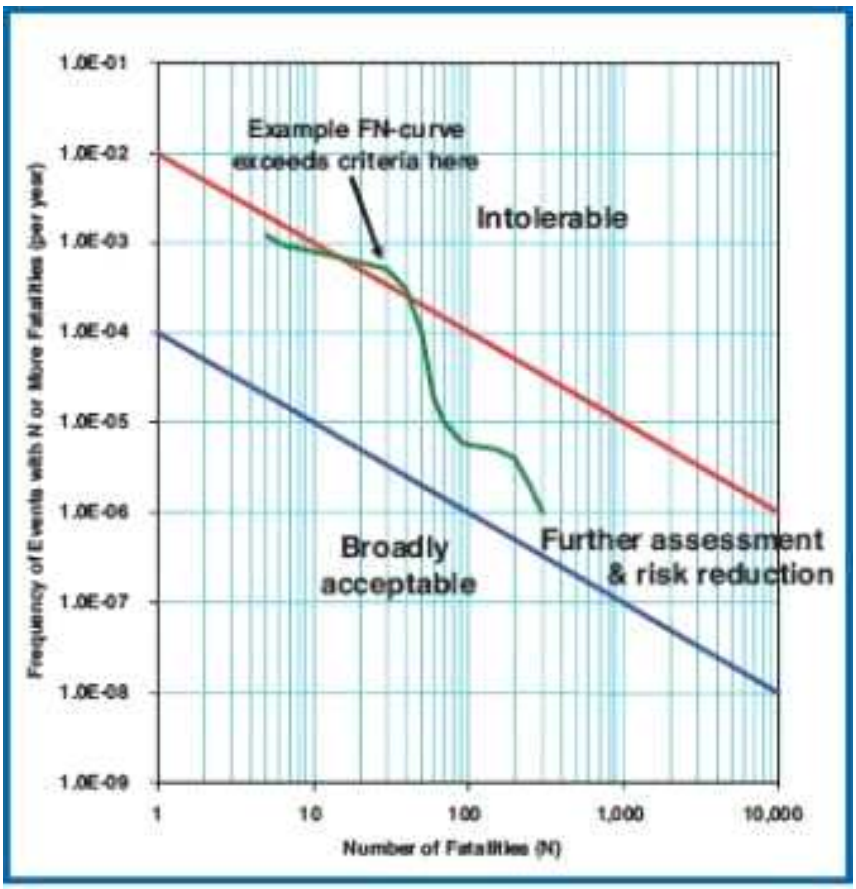
○ SR의 기준을 따로 명시하고 있지 않으나, 유럽이나 미국의 경우 <그림 3.24>의 참조하여 SR을 평가하게 됨. 엄격한 기준은 네덜란드나 독일과 같은 국가들이 보유하고 있으며, 일반적으로 영국의 기준을 보편적으로 사용함.



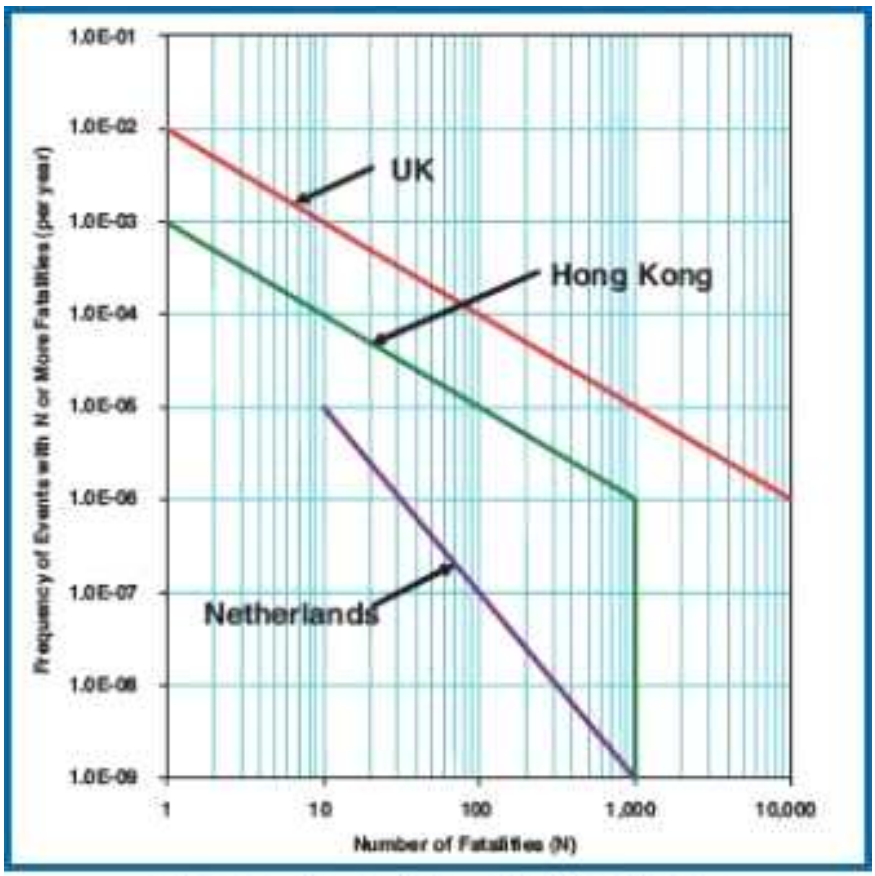
<그림 3.21. 양재동 바람장비(2018년)>



<그림 3.22. Individual risk contour>



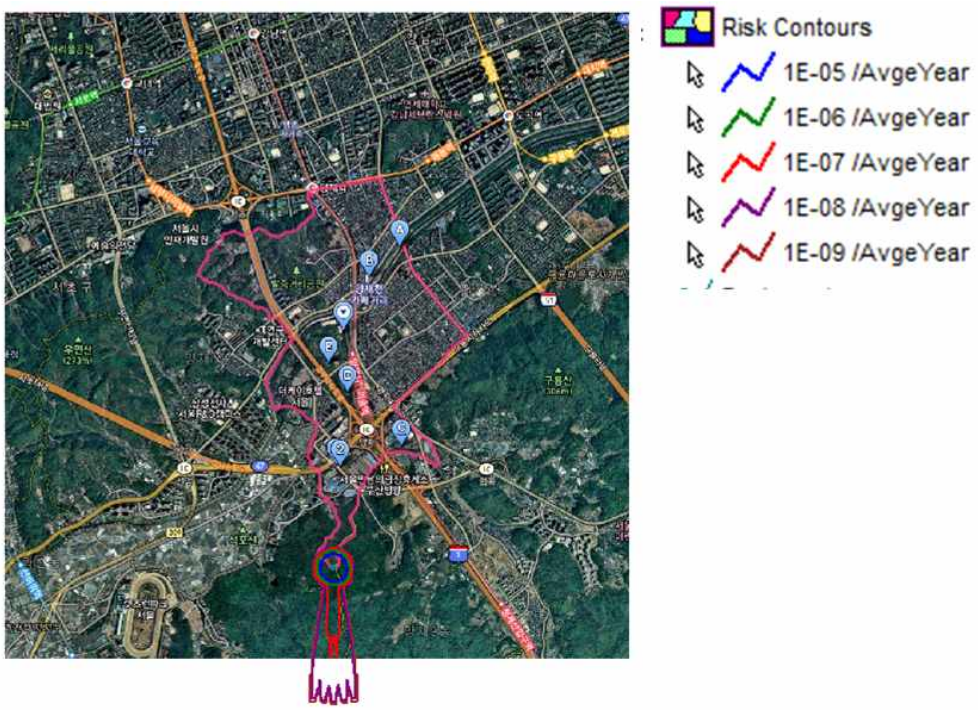
<그림 3.23. F-N Criteria>



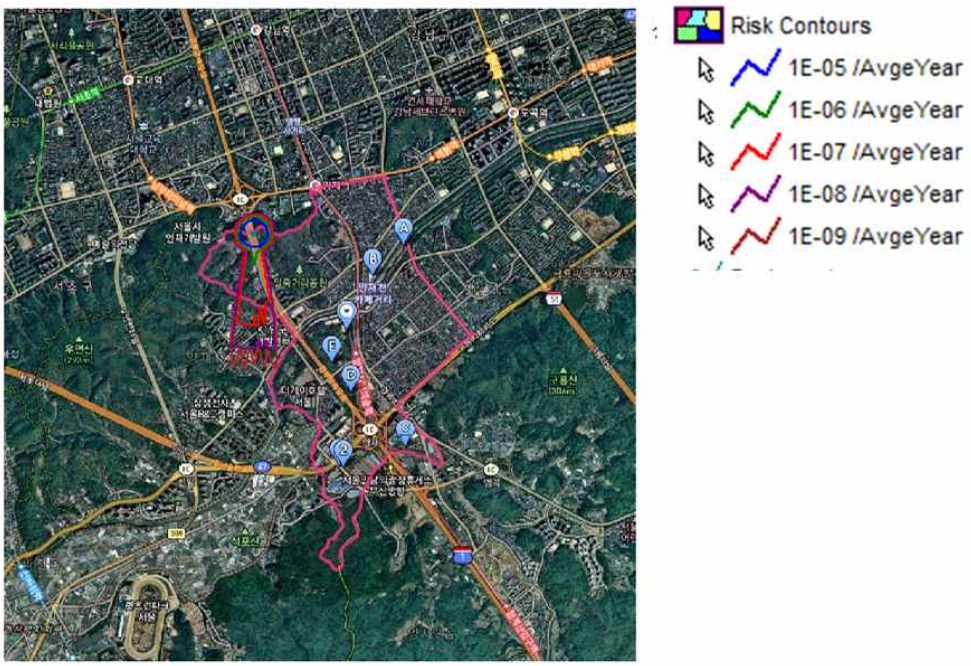
<그림 3.24. Regulartory FN-Criteria>

○ 양재동의 수소 저장소 후보지의 위험성 평가 결과는 <그림 3.25, 26, 27>과 같음. 모두 같은 용량의 수소를 저장하고 있으므로 IR의 Contour는 동일한 모양을 가짐. 그러나 이럴 경우 Risk의 비교가 어렵기 때문에, SR 그래프를 <그림 3.28>과 같이 도시하였음.

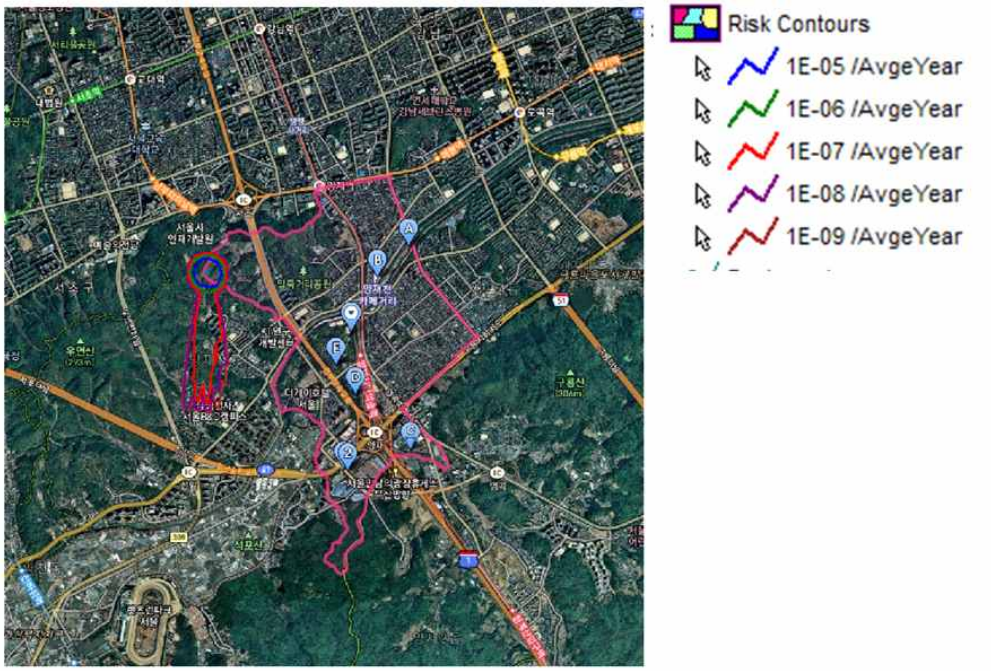
○ SR 그래프에서 후보지 1곳의 경우 주변의 인구에 아무런 영향을 미치지 않기 때문에 그래프에 도시되지 않음. 이는 즉 가장 안전한 장소라고 할 수 있음. SR 그래프에서 가장 위험한 부분은 양재동의 말죽거리 공원 내 수소 저장소 후보지이며, 그 다음은 양재동 내 우면산 근처 수소 저장소 후보지, 마지막으로 청계산 인근 수소 저장소 후보지로 확인됨.



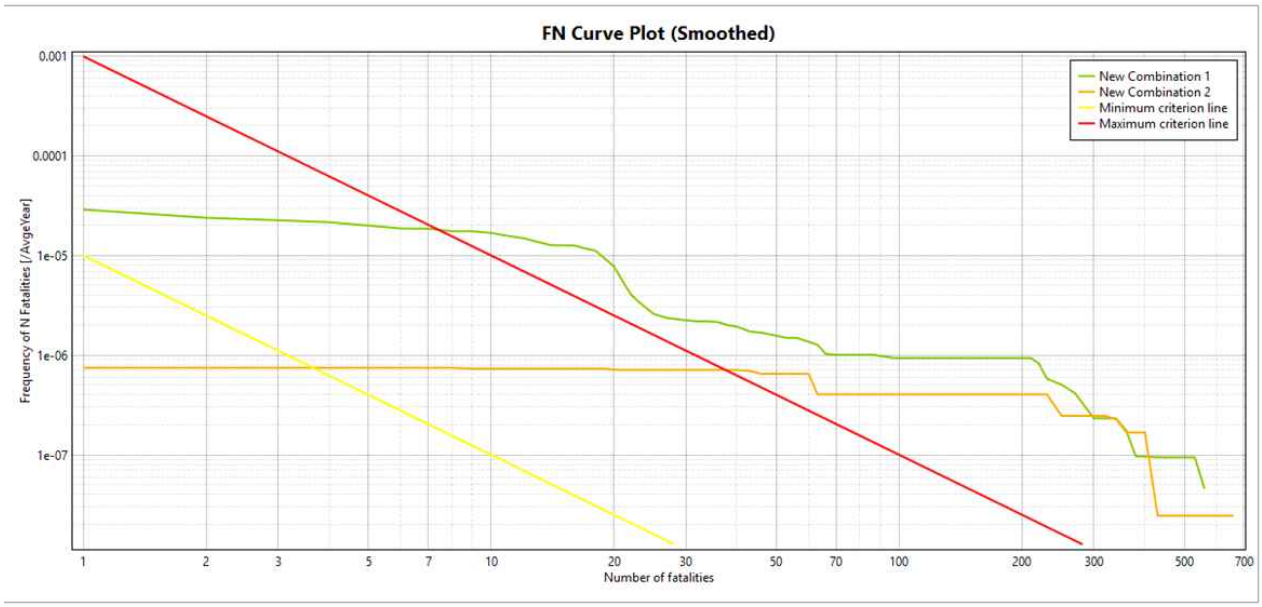
<그림 3.25. 후보지 1의 IR contour>



<그림 3.26. 후보지 2의 IR contour>



<그림 3.27. 후보지 3의 IR contour>



<그림 3.28. 5만 명 규모 수소 저장소 SR>

5. 수소 네트워크 내 배관망 공정 모델 시뮬레이션

○ 배관망을 이용한 양재동 내 발전용 연료전지의 부생수소 공급 네트워크를 구성하기 위해 상용 공정모사 소프트웨어인 HYSYS를 이용하여 배관망 공정모델을 시뮬레이션 함

○ <표 3.27>에 공정모사를 진행한 배관망의 범위와 운전압력 조건을 나타내고, <그림 3.29>에 실제 양재동의 대형건물까지 배관망 설치안을 도시함

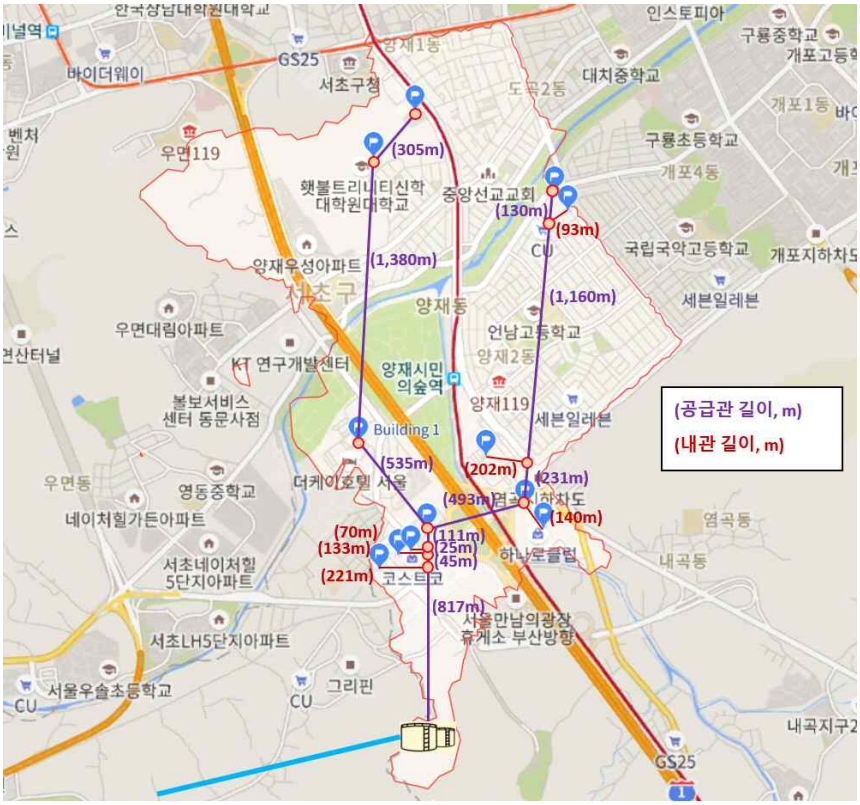
○ 수소저장소의 위치는 3.4절의 정량적 위험성평가 기법을 활용한 위치선정 결과로 결정하였으며, 저장시설의 운전조건은 3.2절의 설계조건을 사용함

○ 본관 및 공급관의 내경은 3.4절의 배관망 단독
○ 공급 모델의 최적화결과를 통해 얻은 값을 사용함(본관 50cm, 공급관 20cm). 내관의 내경은 최대허용압력손실을 벗어나지 않는 선에서 각 대형건물의 수요량에 맞는 내경을 사용함

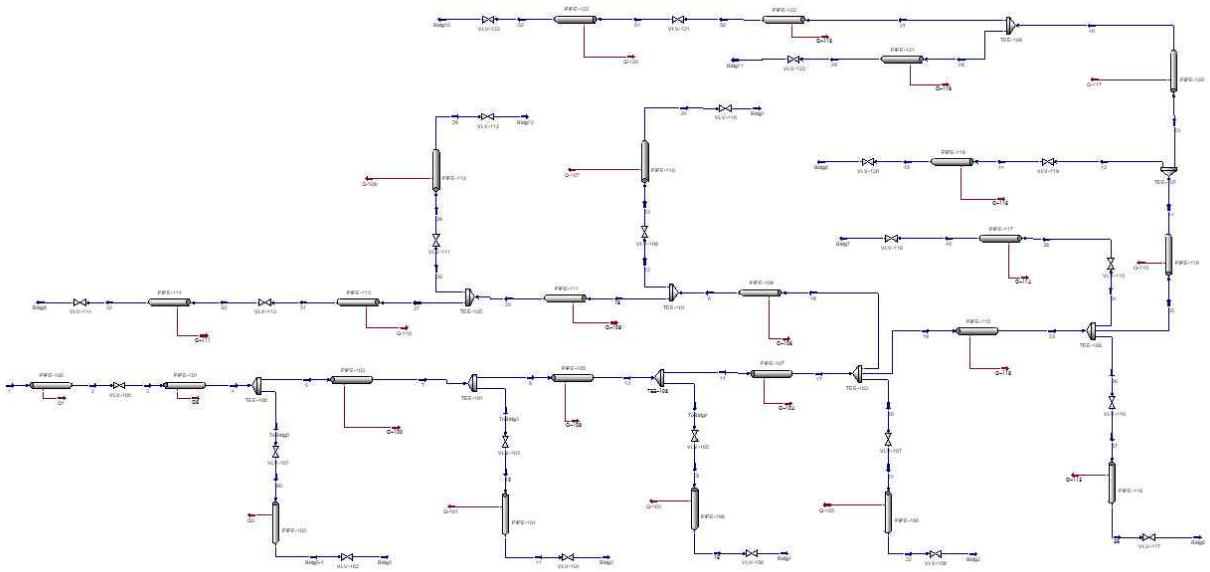
○ <표 3.27>의 범위를 토대로 HYSYS로 모사한 공정흐름도를 <그림 3.20>에 나타냄. 최적화 모델을 통해 설계한 배관망의 최대허용압력손실(100kPa 미만), 허용유속범위(0.3m/s 이상, 30m/s 미만)에 해당하는지 확인하여 허용치를 벗어난 Segment의 수로 모델의 정확도를 산출함(<표 3.28>). <표 3.29>은 허용온도하강 범위를 벗어나지 않는 감압밸브의 수를 구하여 모델의 정확도를 산출함

<표 3.27. 5만 명 규모 도시의 수소배관망 네트워크의 공정모사 범위>

주요장치	설명 및 범위	압력
본관	부생수소 생산지역의 압축시설로부터 수요도시 인근 수소 저장시설 또는 1차 정압시설까지 수소배관	70bar (최대허용압력손실 35bar)
수소저장시설	부생수소 생산지역 또는 수요도시 인근에 위치, 자체 압축기를 통해 출입수소의 압축 가능	180bar 저장
1차 정압기	본관 또는 인근 수소 저장시설로부터 나오는 수소의 압력을 도시 내 공급관 압력으로 낮춰주는 감압밸브 등으로 구성	20bar까지 감압
도시 내 공급관	수요도시 내부에 매설된 가스배관	20bar (최대허용압력손실 10bar)
2차 정압기	도시 내 공급관으로부터 수요시설 부근의 내관으로 수소를 공급하기 위해 압력을 낮춰주는 감압밸브 등으로 구성	8.5bar까지 감압
수요시설 부근 내관	연료전지 스택의 공급압력과 비슷한 압력범위로 운전하며 대형 수요자 자산에 해당	8.5bar (최대허용압력손실 1.5bar)
발전용 연료전지	연료전지는 모사하지 않음	7bar



<그림 3.29. 양재동 대형건물 발전용 연료전지의 수소배관망 설치안>



<그림 3.30. 양재동 대형건물 발전용 연료전지 수소배관망의 HYSYS 모사 공정흐름도>

<표 3.28. 5만 명 규모 도시의 수소배관망 공정모델의 Hydraulics>

Pipe Segment	배관내경 (mm)	배관길이 (m)	압력손실 (kPa)	배관 내 유속 (m/s)	허용치 초과
PIPE-100	500	109000	0.563	0.213	O
PIPE-101	200	817	1.221	4.409	X
PIPE-102	50	221	23.312	25.116	X
PIPE-103	200	45	0.049	3.712	X
PIPE-104	50	133	1.861	8.423	X
PIPE-105	200	25	0.024	3.473	X
PIPE-106	50	70	1.817	11.753	X
PIPE-107	200	111	0.088	3.139	X
PIPE-108	50	20	2.947	29.432	X
PIPE-109	200	535	0.018	0.549	X
PIPE-110	50	20	0.601	12.699	X
PIPE-111	100	1380	0.196	0.753	X
PIPE-112	50	20	0.053	3.354	X
PIPE-113	100	305	0.013	0.371	X
PIPE-114	50	20	0.050	3.265	X
PIPE-115	200	493	0.135	1.756	X
PIPE-116	50	140	12.177	22.500	X
PIPE-117	50	20	1.401	19.908	X
PIPE-118	200	231	0.008	0.559	X
PIPE-119	50	20	0.527	11.833	X
PIPE-120	100	1160	0.222	0.892	X
PIPE-121	50	93	0.146	1.775	X
PIPE-122	100	130	0.007	0.448	X
PIPE-123	50	20	0.070	3.938	X
정확도 [=1 - (압력손실 및 유속 허용범위 초과 Segment 수)/(전체 Segment 수)]					96%

<표 3.28. 5만 명 규모 도시의 수소배관망 공정모델의 감압밸브>

Valve	압력강하 (kPa)	질량유량 (kg/hr)	유속 (m/s)	입구온도 (°C)	출구온도 (°C)	온도하강 (°C)	허용치 초과
VLV-101	1,149	138	11.15	15.004	14.955	0.048	X
VLV-102	127	138	25.12	14.954	14.948	0.007	X
VLV-103	1,149	47	3.82	15.004	14.955	0.048	X
VLV-104	148	47	8.42	14.955	14.948	0.008	X
VLV-105	1,149	66	5.34	15.004	14.955	0.048	X
VLV-106	148	66	11.75	14.955	14.948	0.008	X
VLV-107	1,149	166	13.35	15.004	14.955	0.048	X
VLV-108	147	166	29.43	14.955	14.948	0.008	X
VLV-109	1,149	72	5.77	15.004	14.955	0.048	X
VLV-110	149	72	12.70	14.955	14.948	0.008	X
VLV-111	1,148	19	1.53	15.004	14.955	0.048	X
VLV-112	150	19	3.35	14.955	14.948	0.008	X
VLV-113	1,148	18	1.49	15.004	14.955	0.048	X
VLV-114	150	18	3.27	14.955	14.948	0.008	X
VLV-115	1,148	112	9.04	15.004	14.955	0.048	X
VLV-116	1,148	125	10.11	15.004	14.955	0.048	X
VLV-117	138	125	22.50	14.955	14.948	0.007	X
VLV-118	149	112	19.91	14.955	14.948	0.008	X
VLV-119	1,148	67	5.38	15.004	14.955	0.048	X
VLV-120	149	67	11.83	14.955	14.948	0.008	X
VLV-121	1,148	22	1.79	15.004	14.955	0.048	X
VLV-122	150	22	3.94	14.955	14.948	0.008	X
VLV-123	1,298	22	1.77	15.004	14.948	0.056	X
정확도 [=1 - (허용치 초과 온도하강 Valve 수)/(전체 Valve 수)]							100%

제 3절. 100만 명 규모 도시 간 발전용 및 차량용 수소 네트워크

1. 도시 선정 및 연간 수소 소모량 계산

○ 도시 간 수소 네트워크를 구성할 대상 도시로 우리나라의 100만 명 이상 광역 도시와 부생수소 생산지역인 여수, 서산 등을 포함한 총 10개 도시를 선정함

○ 연간 수소 소모량 계산 시점은 수소연료전지차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)의 점유율이 10%를 넘어서 도시 간 수소 네트워크 구성에 경제성을 가질 것으로 예상되는 2030년을 기준으로 함[2]

○ 발전용 연료전지 수소 소비량은 각 도시별 일반전력 사용량과 정부의 2030년 신재생에너지 비중 목표치인 20% 및 분산전원 보급목표 15% 달성목표를 참고로 계산함[3]

○ 차량용 연료전지 수소 소비량은 각 도시별 자동차 등록대수와 FCEV의 연비 및 일평균주행거리[3-4], 예상 시장점유율(10%)을 이용하여 계산함

○ 각 도시별 차량등록 및 일반전력 사용량은 <표 3.29>와 같으며 산출된 2030년 수소사용 예측량은 <표 3.30>에 도시함

<표 3.29. 수소네트워크 대상 도시의 인구, 차량등록수, 일반전력 사용량>

색인	도시	인구[3-5]	차량등록대수[3-6]	연간 일반전력 사용량(kWh)[7]
G1	서울특별시	9,741,871	3,123,702	1,778,141,633
G2	부산광역시	3,416,918	1,369,410	476,056,239
G3	인천광역시	2,925,967	1,569,602	430,162,803
G4	대구광역시	2,453,041	1,176,887	320,054,326
G5	대전광역시	1,525,849	669,668	243,401,771
G6	광주광역시	1,496,172	663,799	208,328,969
G7	울산광역시	1,157,077	558,034	151,674,462
G8	전라남도 여수시	271,741	131,380	42,631,444
G9	충청남도 서산시	171,364	92,288	29,219,433
G10	경기도 수원시	1,216,996	503,349	202,402,483
합계		24,376,996	9,858,119	3,882,073,563

<표 3.30. 수소네트워크 대상 도시의 2030년 수소소비 예측량>

색인	도시	연간 발전용 수소소비량	연간 차량용 수소소비량	연간 총 수소소비량	일평균 수소소비량
		(tonneH_2/yr)			(kgH_2/d)
G1	서울특별시	3,332	42,984	46,316	126,893
G2	부산광역시	892	18,844	19,736	54,071
G3	인천광역시	806	21,598	22,404	61,382
G4	대구광역시	600	16,195	16,795	46,012
G5	대전광역시	456	9,215	9,671	26,496
G6	광주광역시	390	9,134	9,524	26,095
G7	울산광역시	284	7,679	7,963	21,817
G8	전라남도 여수시	80	1,808	1,888	5,172
G9	충청남도 서산시	55	1,270	1,325	3,629
G10	경기도 수원시	379	6,926	7,305	20,015
합계		7,274	135,653	142,927	371,651

2. 수소 네트워크 설계 조건 및 비용 추산

가. 도시 간 수소 네트워크 구성요소

○ 수소의 생산(Production)부터 압축 또는 액화(Conditioning), 저장(Storage), 이송(Transportation), 분배(Distribution) 방식을 결정하여 하나의 연결고리 시스템으로 구현하는 것을 수소공급사슬(Hydrogen Supply Chain, HSC)이라 하며, 상업적 가치를 판단하는 데 중점을 둔 모델을 별도로 수소가치사슬(Hydrogen Value Chain)이라 칭함

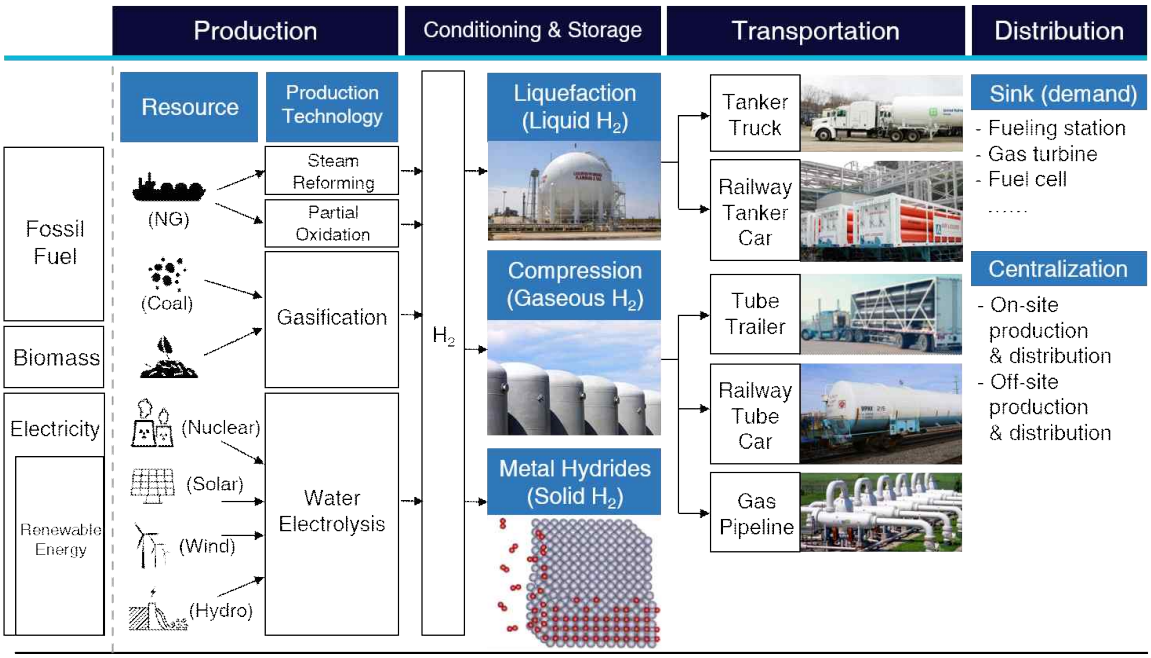
○ 도시 간 수소 네트워크의 설계는 다른 도시에서 생산되는 석유화학단지 부생수소 또는 신규 수소생산 플랜트로부터 수요 도시까지의 수소 공급 방식을 결정하는 것을 의미하며 수소공급사슬 내 수소 흐름의 개념도를 <그림 3.31>에 나타냄

○ 본 연구에서 개발한 도시 간 수소 네트워크에서는 생산 방식으로 수증기 개질공정, 석탄 가스화공정, 바이오매스 가스화공정, 태양광·풍력발전 기반 수전해 공정을 고려함

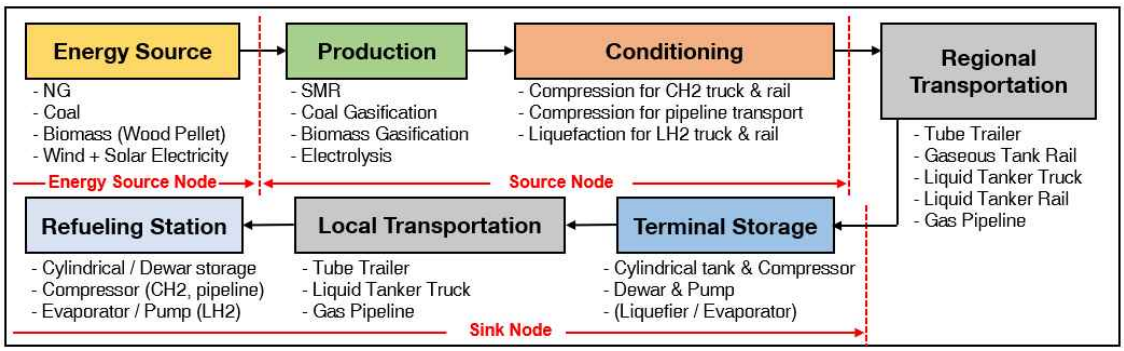
○ 분배 단계에서의 수소 수요는 발전용 연료전지 수요와 수소충전소에서 공급되는 차량용 연료전지 수요로 나뉘며, 수소충전소는 충전소 내에서 수소가 생산되는 On-site 생산 방식과 충전소 외부에서 생산된 수소가 공급사슬을 거쳐 보급되는 Off-site 생산 방식으로 분류됨

○ 수소 생산을 위한 에너지원의 공급은 생산 도시 내에 존재하는 자원을 활용하거나 타 도시로부터의 수입, 또는 외국으로부터 수입할 수 있으며, 생산된 수소의 이송은 도시 간 이송(Regional Transportation or Inter-city Transport)과 도시 내 이송(Local

Transportation or Intra-city Transport)으로 구분됨



<그림 3.31. 수소공급사슬의 개념도>



<그림 3.32. 도시 간 이송 및 도시 내 이송을 고려한 수소공급사슬의 개념도>

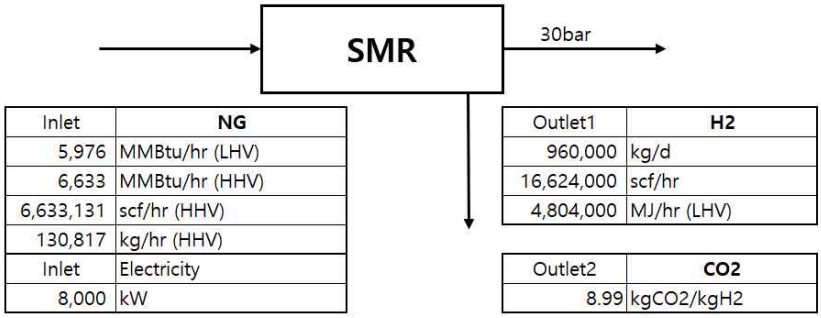
나. 도시 간 수소 네트워크 설계조건

(1) 생산단계

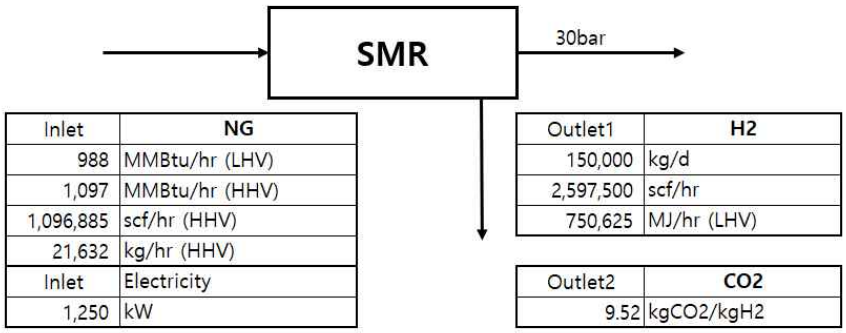
○ Off-site 생산방식(발전용 연료전지와 일부 수소충전소용)은 960tonneH_2/d(Large), 150tonneH_2/d(Medium)의 생산량을 갖는 생산시설로 구분되며, 참고문헌[8]을 토대로 간략한 Heat & Mass Balance(HMB)를 계산함

<표 3.31. 중·대규모(Off-site 생산방식) 수증기 개질 수소 생산 공정의 설계조건>

규모	일일 생산량 (tonneH_2/d)	연간가동률 (%)	개질기 효율 (%, H_2 LHV/NG LHV)	NG HHV/LHV비
Large	960	90	76.2	1.11
계통도				



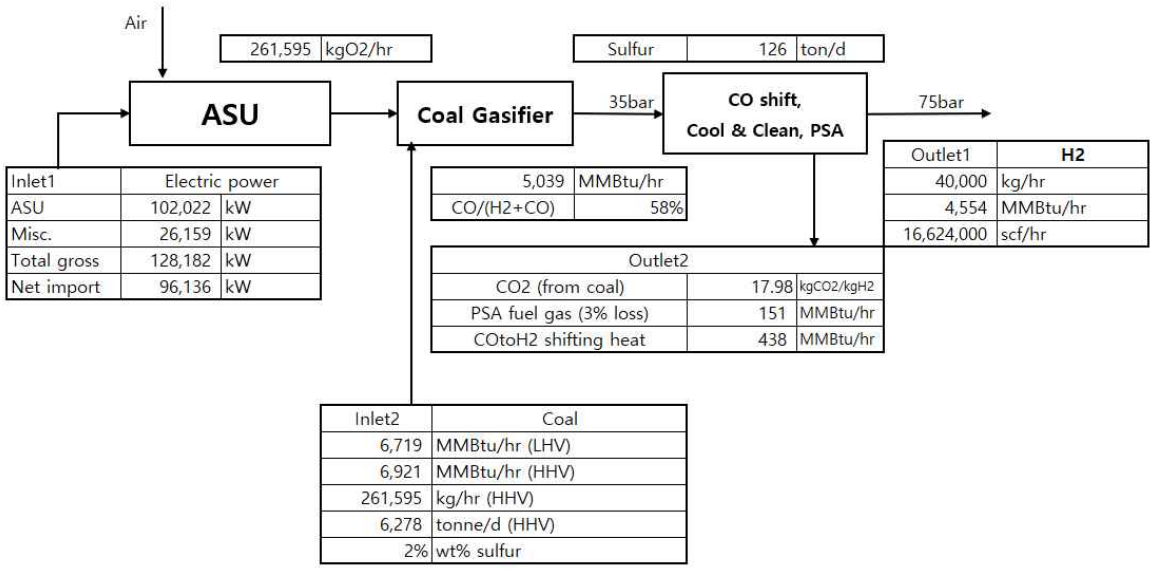
규모	일일 생산량 (tonneH_2/d)	연간가동률 (%)	개질기 효율 (%, H_2 LHV/NG LHV)	NG HHV/LHV비
Medium	150	90	72.0	1.11
계통도				



<표 3.32. 중·대규모(Off-site 생산방식) 석탄 가스화 수소 생산 공정의 설계조건>

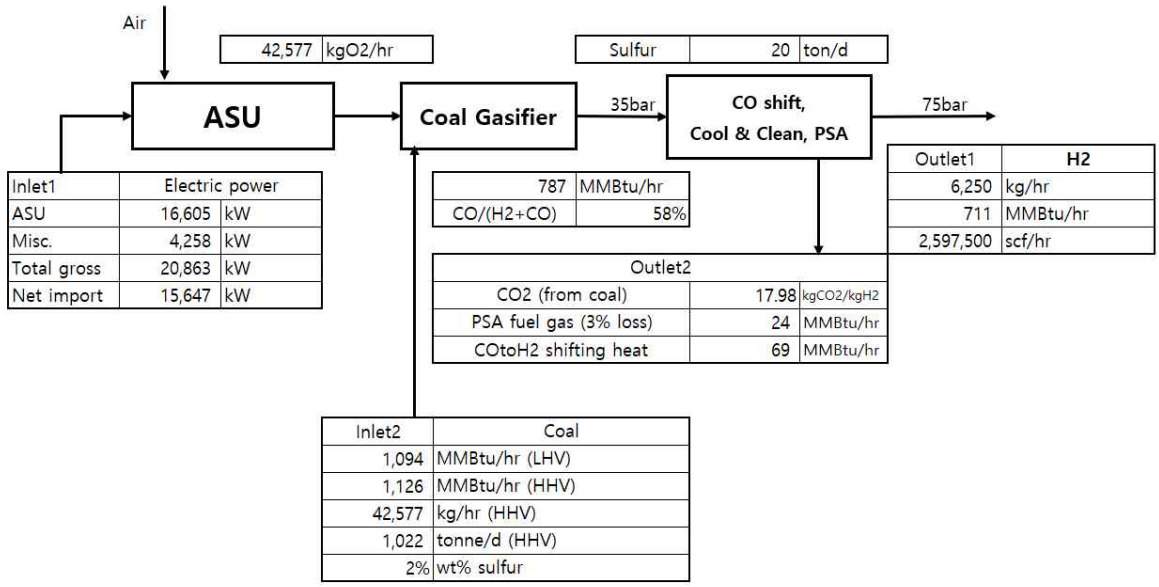
규모	일일 생산량 (tonneH_2/d)	연간가동률 (%)	가스화 반응기 효율 (%, H_2 LHV/NG LHV)	석탄 HHV/LHV비
	석탄열량 (Btu HHV/dry lb)	Air Separation Unit(ASU) 전기효율(kWh/kgO_2)	ASU 산소 생산속도 (tonsO_2/tons dry feed)	
Large	960	90	75.0	1.03
	12,000	0.39	1.00	

계통도



규모	일일 생산량 (tonneH_2/d)	연간가동률 (%)	가스화 반응기 효율 (%, H_2 LHV/NG LHV)	석탄 HHV/LHV비
	석탄열량 (Btu HHV/dry lb)	Air Separation Unit(ASU) 전기효율(kWh/kgO_2)	ASU 산소 생산속도 (tonsO_2/tons dry feed)	
Medium	150	90	72.0	1.03
	12,000	0.39	1.00	

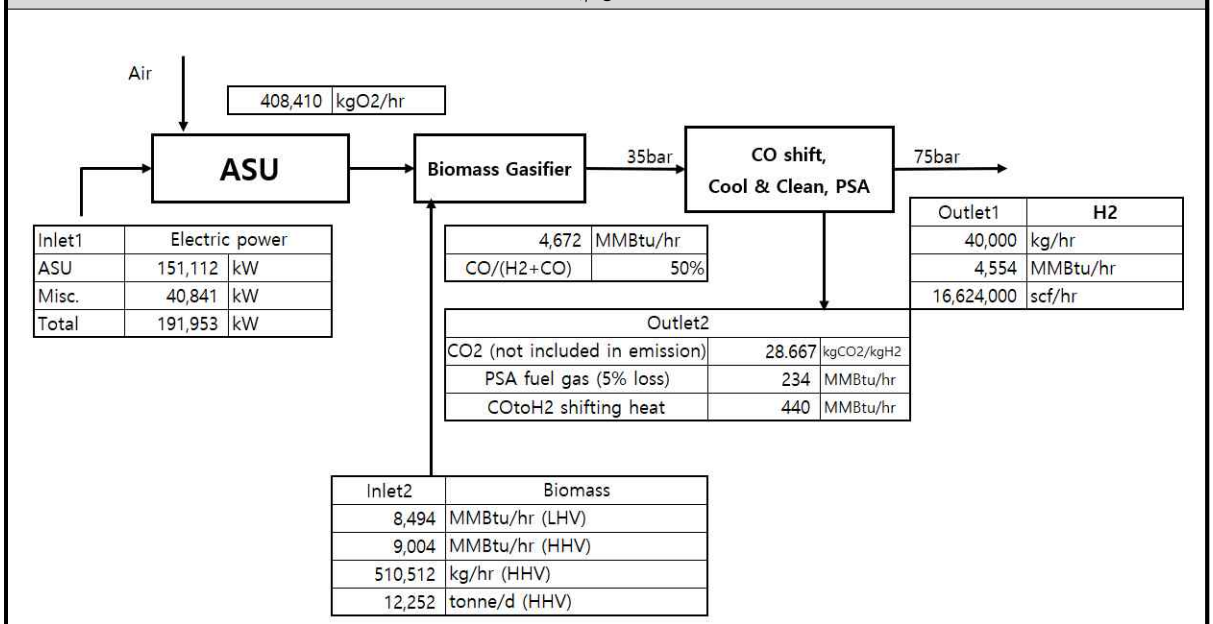
계통도



<표 3.33. 중·대규모(Off-site 생산방식) 바이오매스 가스화 수소 생산 공정의 설계조건>

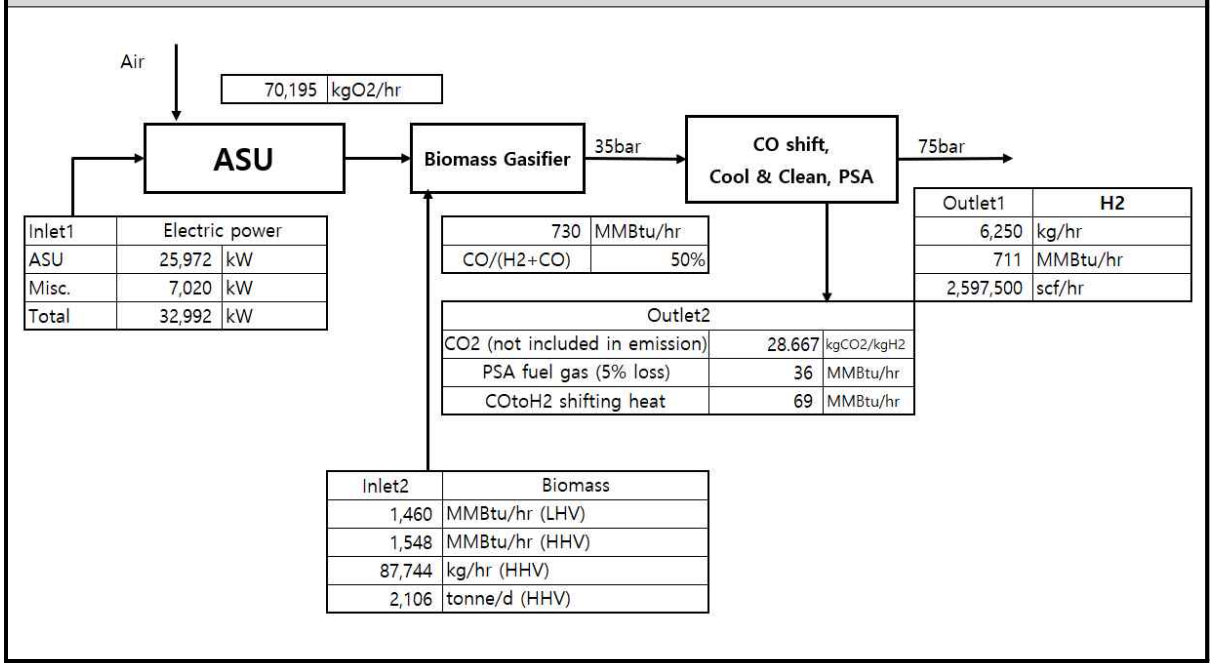
규모	일일 생산량 ($tonneH_2/d$)	연간가동률 (%)	가스화 반응기 효율 (%, H_2 LHV/NG LHV)	바이오매스 HHV/LHV비
	바이오매스열량 (Btu HHV/dry bonne lb)	Air Separation Unit(ASU) 전기효율(kWh/kgO_2)	ASU 산소 생산속도 ($tonsO_2$/tons dry feed)	
Large	960	90	55.0	1.06
	8,000	0.37	0.80	

계통도



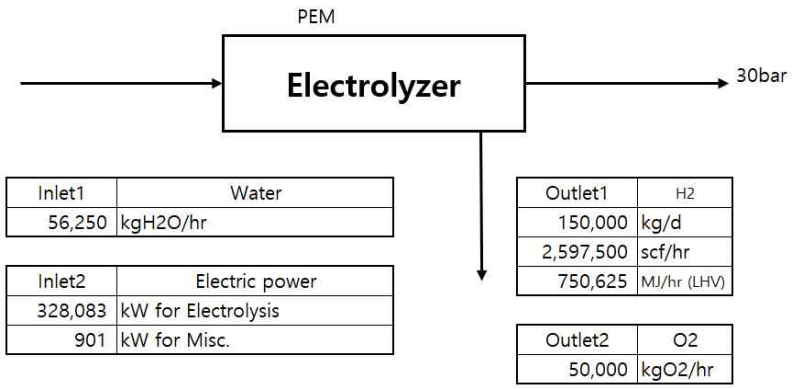
규모	일일 생산량 ($tonneH_2/d$)	연간가동률 (%)	가스화 반응기 효율 (%, H_2 LHV/NG LHV)	바이오매스 HHV/LHV비
	바이오매스열량 (Btu HHV/dry bonne lb)	Air Separation Unit(ASU) 전기효율(kWh/kgO_2)	ASU 산소 생산속도 ($tonsO_2$/tons dry feed)	
Medium	150	90	50.0	1.03
	8,000	0.37	0.80	

계통도



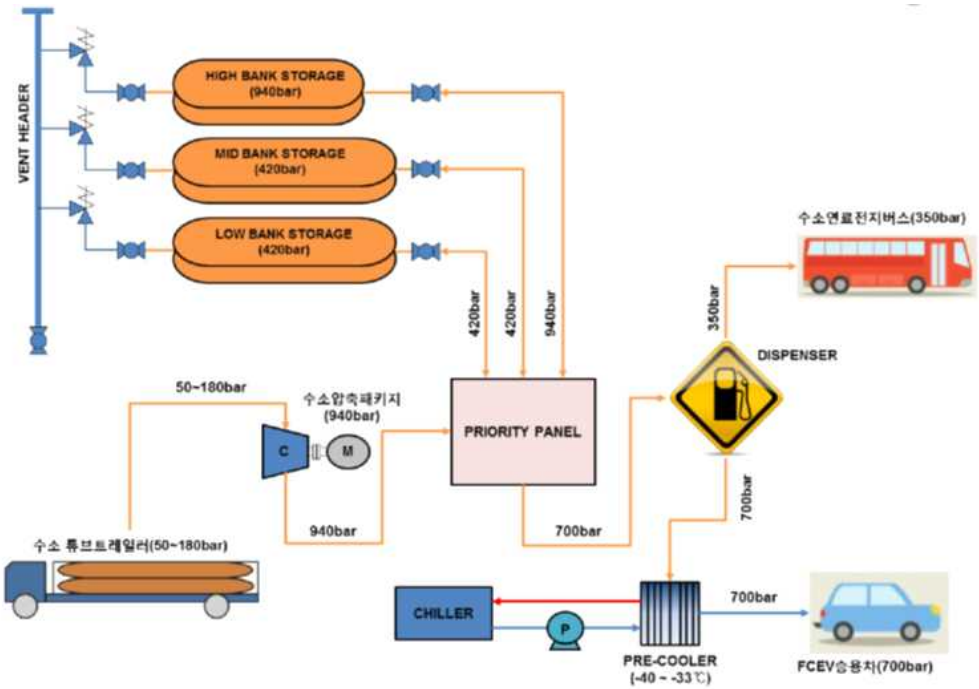
<표 3.34. 중규모(Off-site 생산방식) 수전해 수소 생산 공정의 설계조건>

규모	일일 생산량 (tonneH_2/d)	연간가동률 (%)	Electrolyzer 전기효율 (39.37kWh/kgH_2=100%)	Electrolyzer 종류
Large	150	90	76.2	Polymer Eletrolyte Membrane(PEM)
계통도				



○ On-site 생산방식(일부 수소충전소용)은 500kgH_2/d(Small)의 생산량을 가지며, 10일 비축 분량의 5톤 규모 가스저장시설과 왕복동식 다단압축기, 고압 수소의 차량 공급을 위한 Cascade 저장시설 및 냉각장치, Dispenser 등으로 구성됨

○ 차량용 수소충전소의 공정흐름도는 <그림 3.33>과 같으며, 본 연구에서는 승용차(700bar)를 기준으로 <표 3.35>, <표 3.36>의 On-site 공급방식 수소충전소 설계조건을 결정하였음

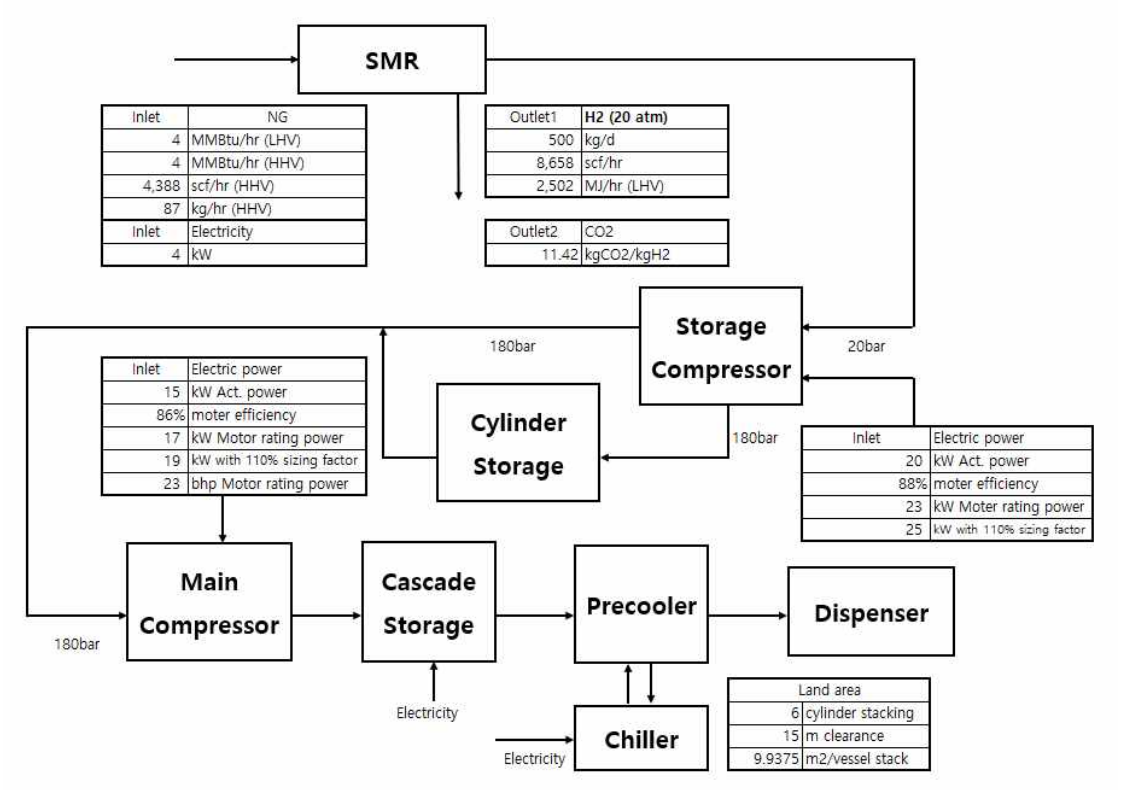


<그림 3.23. 차량용 수소충전소 공정흐름도>

<표 3.35. 소규모(On-site 생산방식) 수증기 개질형 수소 생산 공정의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Small (on-site)		Main 압축기 단수	3	(-)
일일 생산량	500	kgH_2/d	Cascade 저장용량	134	kgH_2
연간가동률	100	%	Dispenser 개수	2	(-)
개질기 효율	60.0	%	냉각기 용량	3.4	ton/hose
NG HHV/LHV비	1.11	(%, H_2 HHV/NG LHV)	냉각기 전력효율	0.325	kWh/kgH_2
저장탱크 압력	180	bar	Precooler 전력효율	0.305	$kWh/(kgH_2/d)$
저장탱크 가동률	80	%	충전소 공급전압	480	V
저장탱크 압축단수	3	(-)	수소 손실률	0.50	%

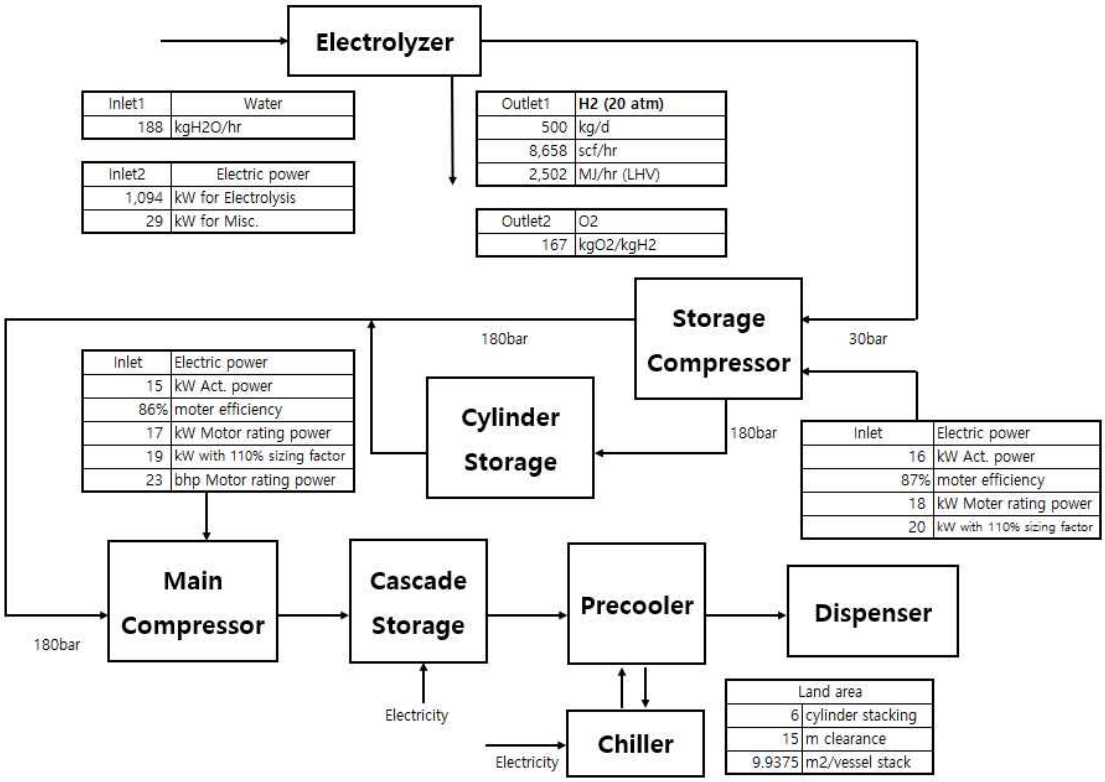
계통도



<표 3.36. 소규모(On-site 생산방식) 수전해형 수소 생산 공정의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Small (on-site)		Main 압축기 단수	3	(-)
일일 생산량	500	kgH_2/d	Cascade 저장용량	134	kgH_2
연간가동률	100	%	Dispenser 개수	2	(-)
Electrolyzer 전기효율	75.0	%	냉각기 용량	3.4	ton/hose
Electrolyzer 종류	PEM	(-)	냉각기 전력효율	0.325	kWh/kgH_2
저장탱크 압력	180	bar	Precooler 전력효율	0.305	$kWh/(kgH_2/d)$
저장탱크 가동률	80	%	충전소 공급전압	480	V
저장탱크 압축단수	3	(-)	수소 손실률	0.50	%

계통도



(2) 압축 및 액화단계

○ 압축과정은 생산 기술별 배출되는 수소의 압력과 배관 또는 튜브트레일러 이송 방법에 따라 입/출구 압력이 달라짐

○ 압축과정의 일률(Power)을 구하기 위해 다음의 단열 공정용 식을 사용하였으며 주요 설계조건은 <표 3.37>과 같음

$$\dot{W} = Z \times \dot{m} \times R \times T \times \frac{n}{\eta} \times \frac{k}{k-1} \times \left(\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{n \times k}} - 1 \right)$$

Z: 압축인자 R: 기체상수 P_o: 출구 압력
W: 압축기 일률 (kW) n: 압축단수 P_i: 입구 압력
m: 압축기 유량 (kmol/s) η: 단열압축 효율
T: 압축기 입구 온도 (K) k: 정압비열/정적비열 (Cp/Cv)

○ 수소액화공정은 다중 흐름 열교환기(Multi-stream Heat Exchanger)의 용량 제한으로 인해 최대 200tonne/d의 처리량을 가지며 이보다 큰 용량은 여러 액화공정을 병렬화 하여 구현할 수 있음[8]

○ 수소액화공정은 용량에 따라 에너지 효율이 증가[8]하며 <표 3.37>에 중·대규모 액화공정에 대한 용량 및 에너지 효율 등의 설계조건을 나타냄

<표 3.37. 수소 압축 및 냉각 공정의 설계조건>

구분	압축공정		
입구압력 (bar)	수증기개질	석탄/바이오매스가스화반응	PEM 수전해
	30	75	30
출구압력 (bar)	배관이송용	튜브트레일러용	
	70	250	
단열효율	88%	압축온도	288K
Cp/Cv비	1.41	기체상수	8.3144kJ/kmol·K
압축인자	1.03198	수소 손실률	0.50%
구분	액화공정		
규모	Large	Medium	
일일 액화량	960tonneH_2/d	150tonneH_2/d	
전기에너지 효율	8.0kWh/kgH_2	9.0kWh/kgH_2	
LH_2 기화손실률	0.50% (of daily throughput)		

(3) 저장단계

○ 도시 간 수소네트워크에서 CH2 저장용기의 최적압력은 2절 내용과 같은 180bar로 결정

○ 수소는 도시 간 이송 후 도시 외곽 지역에 위치한 수소저장소에 저장되며 이후 저장소에서 각 발전용 연료전지 또는 차량용 수소충전소로 도시 내 이송, 이 과정에서 수소저장소를 기점으로 이송방식과 저장방식의 종류에 따라 총 7가지 수소 이송 및 저장방식의 조합이 가능하며 이를 <표 3.38>에 나타냄

<표 3.38. 수소 형태 및 이송방식 조합에 따른 공급경로의 종류>

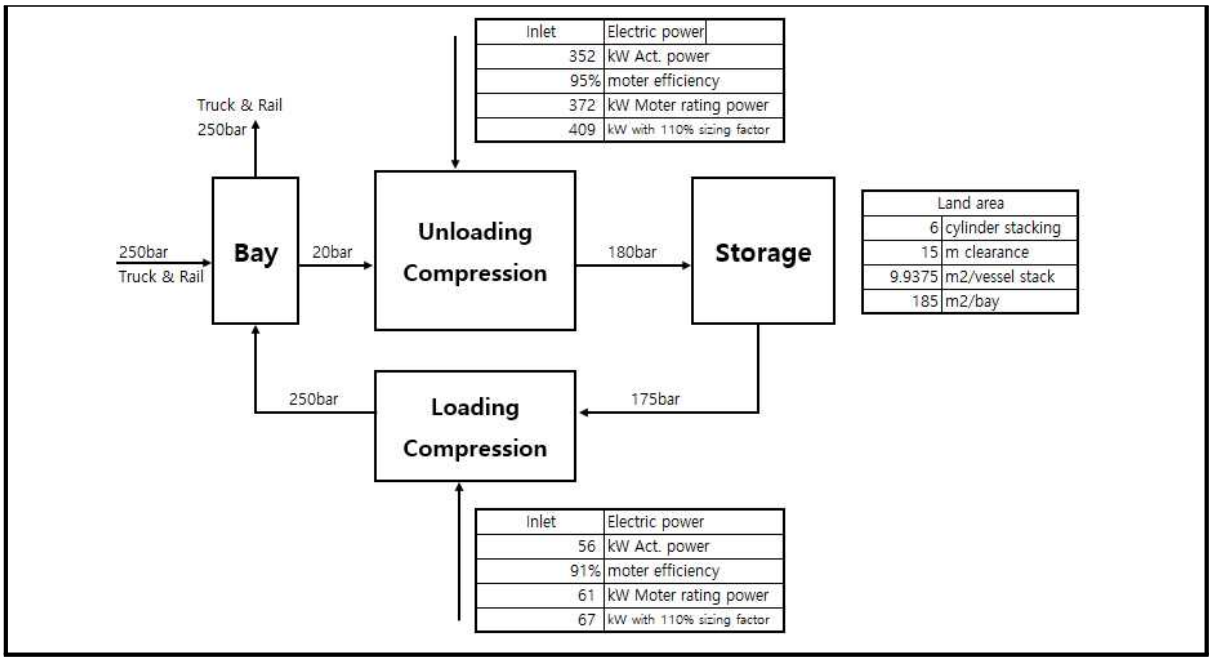
색인	도시 간 이송방법	수소저장소 내 저장방식	도시 내 이송방법
Pathway1	Tube Trailer/Rail Car	CH2	Tube Trailer
Pathway2	Pipeline	CH2	Pipeline
Pathway3	Pipeline	CH2	Tube Trailer
Pathway4	Tanker Truck/Rail Car	LH2	Tanker Truck
Pathway5	Tanker Truck/Rail Car	LH2	Pipeline
Pathway6	Pipeline	LH2	Tanker Truck
Pathway7	Pipeline	LH2	Pipeline

○ <표 3.38>에 표기된 7가지 대규모(Large size)저장방식에 대한 설계조건 및 계통도를 <표 3.39> - <표 3.45>에 도시함

○ CH2 Type 저장소의 저장규모는 각각 1,000tonneH_2(Large), 500tonneH_2(Medium), 100tonneH_2(Small), LH2 Type 저장소의 저장규모는 각각 4,500tonneH_2(Large), 1,000tonneH_2(Medium), 100tonneH_2(Small)로 선정함

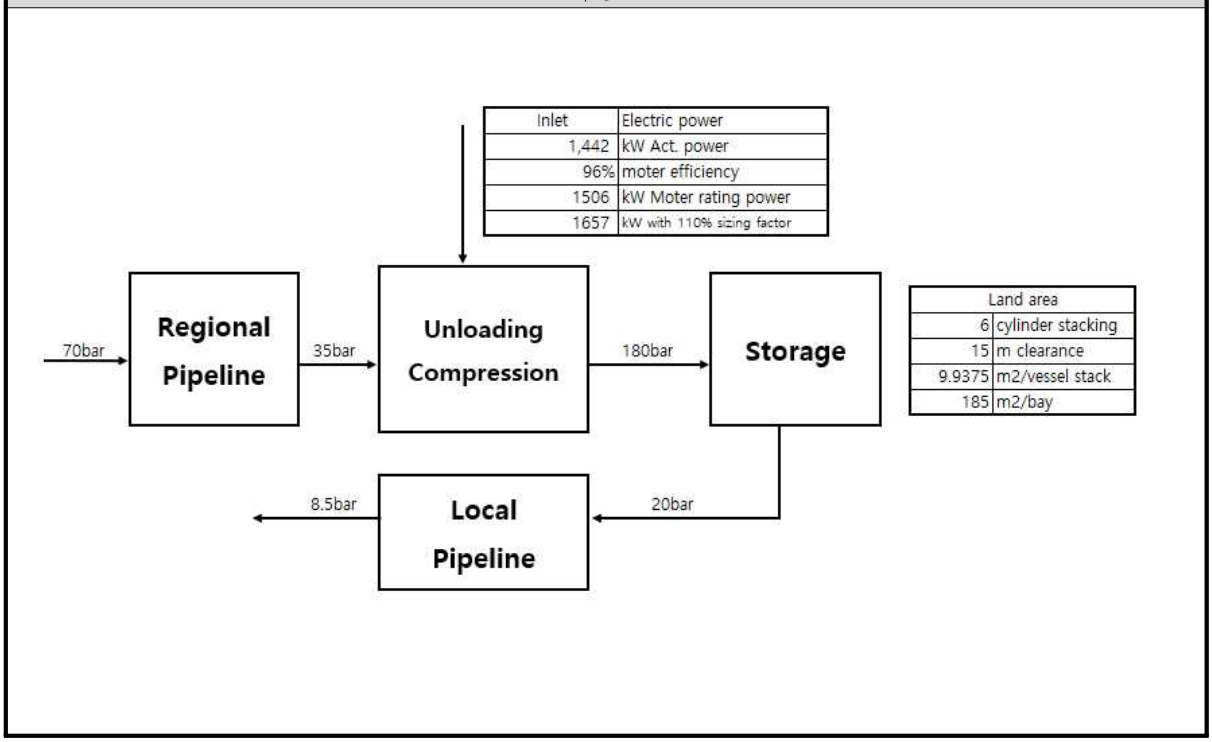
<표 3.39. Pathway1 Type 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		하역용 압축기 단수	4	(-)
총 저장용량	1,000	tonneH_2	적재용 압축기 단수	1	(-)
비축일수	10	일	적재/하역 속도	85	kgH_2/hr
연간가동률	90	%	적재/하역 시간	7.5	hr
일일 이송량	100	tonneH_2/d	단일 저장탱크 직경	1.25	m
튜브 적재 압력	250	bar	단일 저장탱크 길이	7.95	m
저장탱크 압력	180	bar	저장탱크 적층수	6	(-)
저장탱크 가동률	80	%	수소 손실률	1.0	%
계통도					



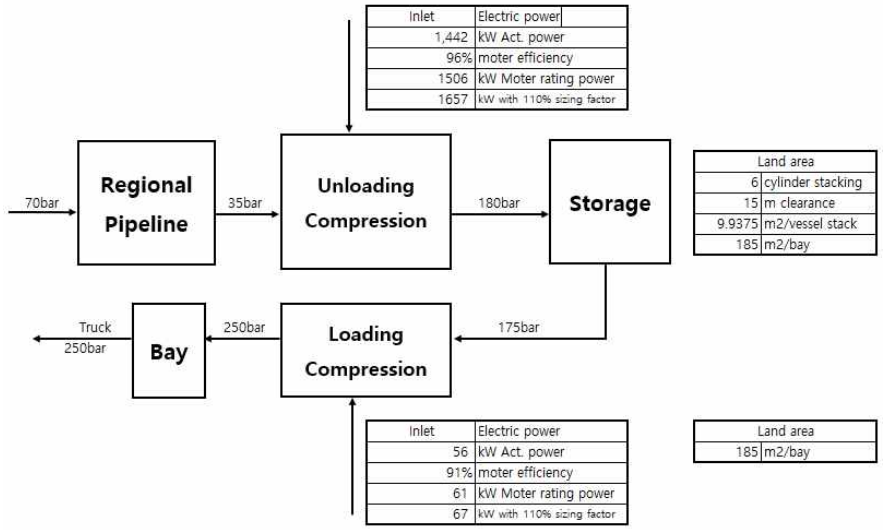
<표 3.40. Pathway2 Type 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		저장탱크 가동률	80	%
총 저장용량	1,000	tonneH_2	하역용 압축기 단수	3	(-)
비축일수	10	일	단일 저장탱크 직경	1.25	m
연간가동률	90	%	단일 저장탱크 길이	7.95	m
일일 이송량	100	tonneH_2/d	저장탱크 적층수	6	(-)
저장탱크 압력	180	bar	수소 손실률	1.0	%
계통도					



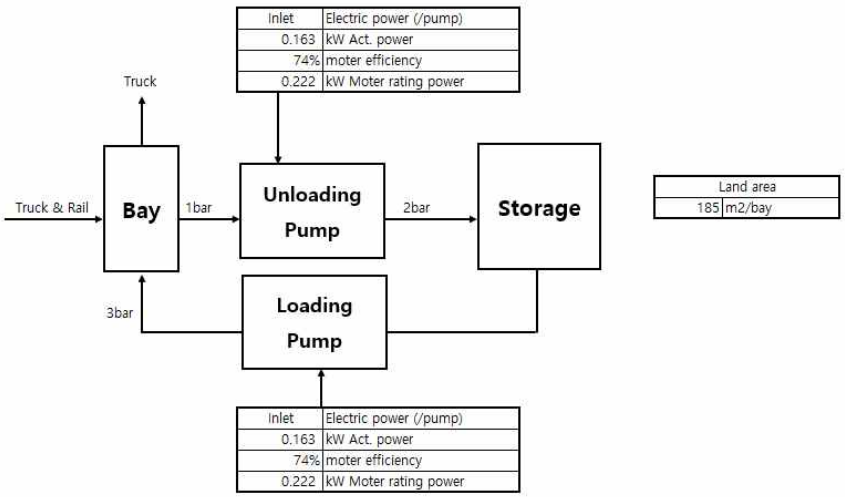
<표 3.41. Pathway3 Type 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		하역용 압축기 단수	3	(-)
총 저장용량	1,000	tonneH_2	적재용 압축기 단수	1	(-)
비축일수	10	일	적재/하역 속도	85	kgH_2/hr
연간가동률	90	%	적재/하역 시간	7.5	hr
일일 이송량	100	tonneH_2/d	단일 저장탱크 직경	1.25	m
튜브 적재 압력	250	bar	단일 저장탱크 길이	7.95	m
저장탱크 압력	180	bar	저장탱크 적층수	6	(-)
저장탱크 가동률	80	%	수소 손실률	1.0	%
계통도					



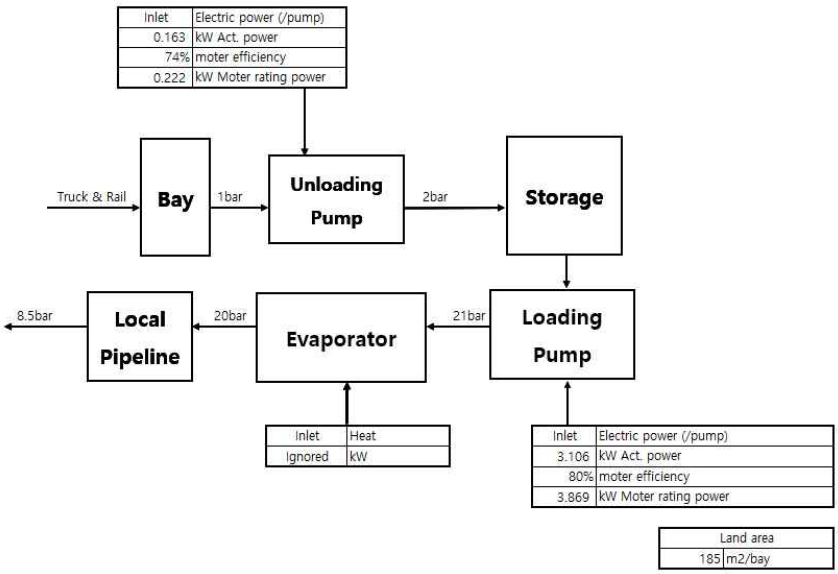
<표 3.42. Pathway4 Type 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		단일 펌프 용량	250	kg/hr
총 저장용량	4,500	tonneH_2	펌프 효율	60	%
	63,559	m^3LH_2	단일 저장탱크 용량	11,000	m^3LH_2
비축일수	10	일	저장탱크 가동률	95	%
연간가동률	90	%	LH_2 기화손실률	0.25	%/day
일일 이송량	450	tonneH_2	-	-	-
계통도					



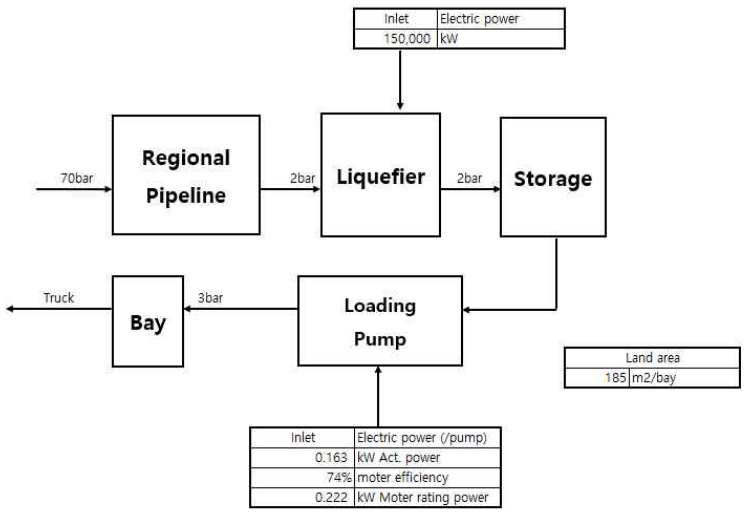
<표 3.43. Pathway5 Type 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		단일 펌프 용량	250	kg/hr
총 저장용량	4,500	tonneH_2	펌프 효율	60	%
	63,559	m^3LH_2	단일 저장탱크 용량	11,000	m^3LH_2
비축일수	10	일	저장탱크 가동률	95	%
연간가동률	90	%	단일 증발기 용량	8,000	kg/hr
일일 이송량	450	tonneH_2	LH_2 기화손실률	0.25	%/day
계통도					



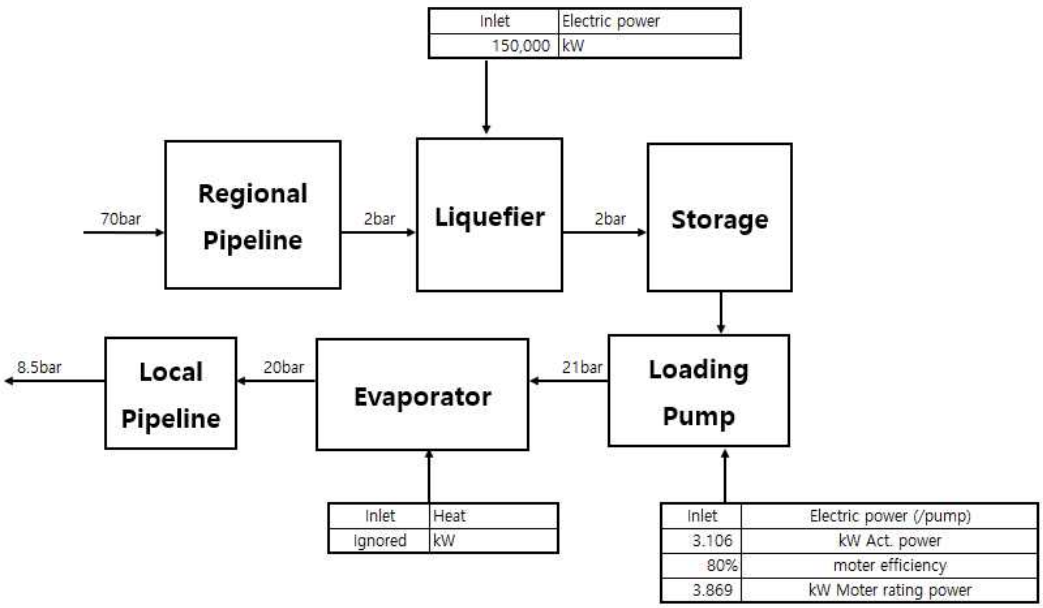
<표 3.44. Pathway6 Type 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		트럭 적재 시간	3.5	hr
총 저장용량	4,500	tonneH_2	단일 펌프 용량	250	kg/hr
	63,559	m^3LH_2	펌프 효율	60	%
비축일수	10	일	단일 저장탱크 용량	11,000	m^3LH_2
연간가동률	90	%	저장탱크 가동률	95	%
일일 이송량	450	tonneH_2	LH_2 기화손실률	0.25	%/day
계통도					



<표 3.45. Pathway7 Type 수소저장소의 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
규모	Large		펌프 효율	60	%
총 저장용량	4,500	tonneH_2	단일 저장탱크 용량	11,000	m^3LH_2
	63,559	m^3LH_2	저장탱크 가동률	95	%
비축일수	10	일	단일 증발기 용량	8,000	kg/hr
연간가동률	90	%	LH_2 기화손실률	0.25	%/day
일일 이송량	450	tonneH_2	수소 손실률(압축기)	0.50	%
단일 펌프 용량	250	kg/hr	-	-	-
계통도					



(4) 이송단계

○ 튜브 트레일러의 튜브압력은 국내에서 상용화된 CNG(Compressed Natural Gas) 트레일러의 250bar[10]로 결정하였으며, 액화 탱커트럭 및 철도차량은 상용화된 사례가 없으므로 문헌자료를 참고함[11]

○ 배관망 압력은 2절 내용과 같이 도시 간 이송배관인 본관의 압력은 70bar, 도시 내 대형 발전용 연료전지, 수소충전소까지의 이송배관인 공급관 압력은 20bar, 수요자까지의 최종 배관인 내관에서는 8.5bar로 결정함

<표 3.46. 트럭/철도 이송방식의 수소네트워크 설계 조건>

구분	CH_2 트럭[3-10)]	LH_2 트럭	CH_2 철도	LH_2 철도
운전압력/온도	250bar	20K	250bar	20K
튜브/탱크 개수	11	1	-	-
튜브/탱크 길이	10.98m	-	-	-
부피용량	24,640m^3	-	61,600m^3	-
이송용량	614kgH_2/대	4,000kgH_2/대[3-11)]	1,535kgH_2/량	10,000kgH_2/량
적재/하역시간[3-11)]	2시간		12시간	
평균주행속도[3-11)]	55km/hr		45km/hr	
시내 평균주행속도[3-11)]	25km/hr		-	
평균가동률[3-11)]	18hr/d		12hr/d	
시내 평균가동률[3-11)]	15hr/d		8hr/d	

(5) 분배단계

○ 도시 내 수소에너지 수요처는 대형건물 발전용 연료전지와 차량용 수소충전소로 나뉨

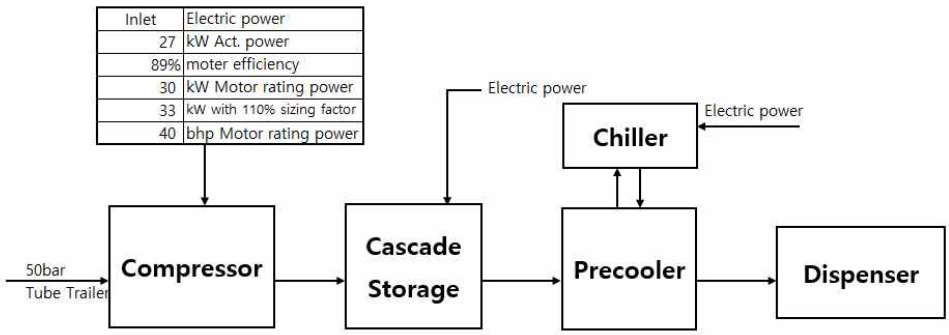
○ 분배단계에서 고려되어야 할 요소는 전체 수소 네트워크 비용에 영향을 줄 수 있는 결정변수이며 발전용 연료전지는 분배 단계에서 전체 네트워크 비용에 변화를 줄 기술적 결정변수가 없음

○ 차량용 수소충전소는 On/off-site 생산방식의 선택 여부와 튜브 트레일러, 액화 탱커트럭, 가스배관망 방식의 수소 공급 형태에 따라 전체 네트워크 비용에 영향을 미침

○ Off-site 생산시 분배 단계에서 각 수소 공급방식에 대한 차량용 수소충전소의 설계조건을 <표 3.47> - <3.49>에 나타냄

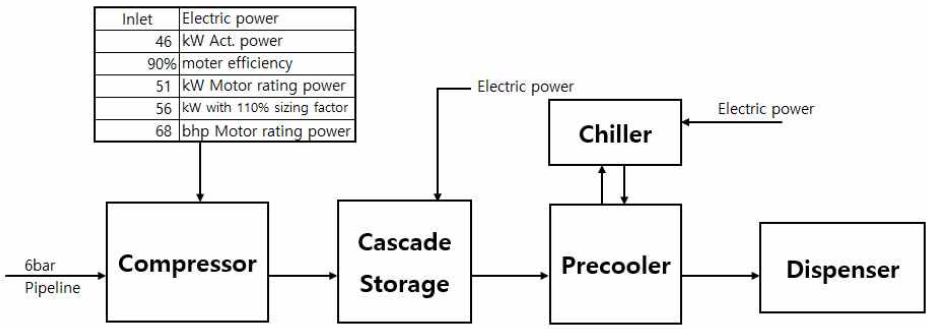
<표 3.47 튜브 트레일러 공급방식의 수소충전소 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
일일 생산량	500	kgH_2/d	Dispenser 개수	2	(-)
연간가동률	100	%	냉각기 용량	3.4	ton/hose
공급압력	50	bar	냉각기 전력효율	0.325	kWh/kgH_2
배출압력	950	bar	Precooler 전력효율	0.305	$kWh/(kgH_2/d)$
Main 압축기 단수	4	(-)	충전소 공급전압	480	V
Cascade 저장용량	134	kgH_2	수소 손실률	0.50	%
계통도					



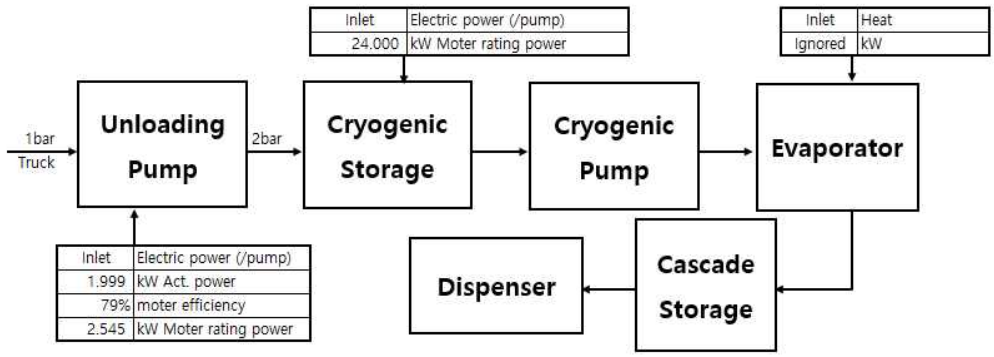
<표 3.48. 가스배관망 공급방식의 수소충전소 설계조건 >

구분	값	단위	구분	값	단위
일일 생산량	500	kgH_2/d	Dispenser 개수	2	(-)
연간가동률	100	%	냉각기 용량	3.4	ton/hose
공급압력	6	bar	냉각기 전력효율	0.325	kWh/kgH_2
배출압력	950	bar	Precooler 전력효율	0.305	$kWh/(kgH_2/d)$
Main 압축기 단수	7	(-)	충전소 공급전압	480	V
Cascade 저장용량	134	kgH_2	수소 손실률	0.50	%
계통도					



<표 3.49. 액화 탱커트럭 공급방식의 수소충전소 설계조건>

구분	값	단위	구분	값	단위
일일 생산량	500	kgH_2/d	극저온탱크 저장용량	2,412	kgH_2
연간가동률	100	%	Dispenser 개수	2	(-)
공급압력	1	bar	냉각기 용량	3.4	ton/hose
배출압력	950	bar	냉각기 전력효율	0.325	kWh/kgH_2
펌프 용량	21	kg/hr	Precooler 전력효율	0.305	$kWh/(kgH_2/d)$
펌프 효율	60	%	충전소 공급전압	480	V
Cascade 저장용량	134	kgH_2	LH_2 기화손실률	0.25	%/day
계통도					



다. 수소 네트워크 각 단계별 비용추산

○ 도시 간 수소 네트워크의 생산, 저장, 이송, 분배 단계별 설계 조건과 계통도의 HMB를 토대로 각 단계별 비용 추산 결과 및 비용계산 시 필요한 데이터를 <표 3.50> - <표 3.51>에 제시함

(1) 수소 생산 에너지원 분포 및 비용

<표 3.50. 국내 수소 생산 에너지원 분포>

색인	도시	부생수소	천연가스	석탄	바이오매스 (목재펠렛)	태양광 발전량 (사업용)	풍력 발전량 (사업용)
		(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(MWh/yr)	(MWh/yr)
G1	서울특별시	0	0	0	466	32,413	0
G2	부산광역시	0	0	0	679	78,672	444
G3	인천광역시	0	0	0	430	32,602	48,642
G4	대구광역시	0	0	0	389	40,559	0
G5	대전광역시	0	0	0	8,759	16,864	0
G6	광주광역시	0	0	0	1,641	80,588	0
G7	울산광역시	225,419	0	0	1,030	11,455	2,596
G8	전남 여수시	320,332	0	0	9,353	1,214,806	233,740

G9	충남 서산시	40,986	0	0	15,953	171,949	0
G10	경기 수원시	0	0	0	9,171	201,688	5,324
합 계		586,737	0	0	47,871	1,881,596	290,746

<표 3.51. 수소 생산 에너지원 공급 비용[11]>

구분	부생수소	천연가스	석탄	바이오매스 (목재펠렛)	태양광 발전량 (사업용)	풍력 발전량 (사업용)
(Unit)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kW)	(kW)
도시 간 이송비용 ($/unit/km)	10,000	0.0000122	0.000004076	0.000004076	0.0000509	0.0000509
도시 간 구매비용 ($/unit)	0	0	0	0.15	0.085	0.085
해외수입비용 ($/unit)	10,000	0.59	0.1115	0.221	0.085	0.085

○ 수소 생산 에너지원의 공급은 도시 간 거래와 해외 수입의 두 가지 방법이 있으며, 산업현장 부생수소는 이미 수소로 생산된 자원이므로 생산도시 이외 지역으로 공급 또는 수입이 불가능하여 임의의 높은 단위비용($10,000/kg/km)을 적용함

○ 사업용 신재생에너지 발전량은 전력그리드에 통합되어 있음을 가정하였으나, 해외에서의 수입은 원천적으로 불가능함. 그러나 해외수입을 신규 발전시설 건설로 가정하여 해외수입비용을 재생에너지 전력판매단가($0.085/kWh)와 동일하게 설정함

○ 천연가스의 수입은 LNG터미널이 위치한 인천광역시(G3)에서만 가능하며, 석탄과 바이오매스의 수입은 대형화물 하역이 가능한 항구도시인 부산광역시(G2), 인천광역시(G3), 울산광역시(G7), 전라남도 여수시(G8)에서만 가능함을 가정

(2) 생산 단계 비용추산

<표 3.52. 수소 생산 기술별 비용추산 결과>

규모	생산기술	총 투자비용	조업비용	총 일일 비용	단위생산비용
		(k$)	(k$/d)	(k$/d)	($/kgH$_2$)
대규모 (960tonne/d)	부생수소	-	-	-	3.5
	천연가스개질	958,754	245	516	0.597
	석탄가스화	2,220,122	774	1,400	1.621
	바이오매스가스화	3,307,321	784	1,717	1.988
	PEM수전해				
중규모 (150tonne/d)	부생수소	-	-	-	2.214
	천연가스개질	184,655	59	111	0.824
	석탄가스화	521,397	235	382	2.831
	바이오매스가스화	862,942	259	502	3.724
	PEM수전해	772,382	93	311	2.305

소규모	천연가스개질	12,640	1.5	5.1	10.275
(0.5tonne/d)	PEM수전해	13,007	1.0	4.7	9.535

(3) 압축·액화 단계 비용추산

❍ 도시 간 수소 이송방식, 도시 내 수소 이송방식, 저장방식에 따라 7가지 저장 및 이송 조합이 가능하며 각 단계별 설계조건을 만족하는 공정의 비용을 추산함

❍ 국내 발생 부생수소는 천연가스 개질공정에서 생산되는 수소와 동일한 온도·압력 조건을 가진다고 가정하여 두 생산기술의 압축·액화공정을 동일하게 계산

❍ 압축·액화공정은 수소 생산 플랜트 단지 내에 건설되며 규모는 생산시설의 생산량을 처리할 수 있도록 각 생산규모와 동일하게 계산 (Large 960tonne/d, Medium 150tonne/d)

<표 3.53. 수소 저장·이송 조합방식별 부생수소 및 천연가스개질 공정의 압축·액화 비용추산 결과>

규모	저장·이송 조합	총 투자비용	조업비용	총 일일 비용	단위생산비용
		(k$)	(k$/d)	(k$/d)	($/kgH$_2$)
생산기술	부생수소/천연가스 개질공정				
대규모 (960tonne/d)	Pathway1	95,951	93	120	0.140
	Pathway2	44,943	48	60	0.071
	Pathway3	44,943	48	60	0.071
	Pathway4	2,054,336	870	1,450	1.687
	Pathway5	2,054,336	870	1,450	1.687
	Pathway6	44,943	48	60	0.071
	Pathway7	44,943	48	60	0.071
중규모 (150tonne/d)	Pathway1	31,346	33	42	0.314
	Pathway2	14,605	23	28	0.209
	Pathway3	14,605	23	28	0.209
	Pathway4	341,552	164	260	1.942
	Pathway5	341,552	164	260	1.942
	Pathway6	14,605	23	28	0.209
	Pathway7	14,605	23	28	0.209

<표 3.54. 수소 저장·이송 조합방식별 가스화 공정의 압축·액화 비용추산 결과>

규모	저장·이송 조합	총 투자비용 (k$)	조업비용 (k$/d)	총 일일 비용 (k$/d)	단위생산비용 ($/kgH$_2$)
생산기술	석탄/바이오매스 가스화				
대규모 (960tonne/d)	Pathway1	56,434	60	76	0.089
	Pathway2	0	0	0	0
	Pathway3	0	0	0	0
	Pathway4	2,054,336	870	1,450	1.687
	Pathway5	2,054,336	870	1,450	1.687
	Pathway6	0	0	0	0
	Pathway7	0	0	0	0
중규모 (150tonne/d)	Pathway1	18,361	26	31	0.234
	Pathway2	0	0	0	0
	Pathway3	0	0	0	0
	Pathway4	341,552	164	260	1.942
	Pathway5	341,552	164	260	1.942
	Pathway6	0	0	0	0
	Pathway7	0	0	0	0

<표 3.55. 수소 저장·이송 조합방식별 수전해 공정의 압축·액화 비용추산 결과>

규모	저장·이송 조합	총 투자비용 (k$)	조업비용 (k$/d)	총 일일 비용 (k$/d)	단위생산비용 ($/kgH$_2$)
생산기술	태양광/풍력 발전 전력을 이용한 수전해				
중규모 (150tonne/d)	Pathway1	31,346	33	42	0.314
	Pathway2	14,605	23	28	0.209
	Pathway3	14,605	23	28	0.209
	Pathway4	341,552	164	260	1.942
	Pathway5	341,552	164	260	1.942
	Pathway6	14,605	23	28	0.209
	Pathway7	14,605	23	28	0.209

(4) 저장 단계 비용추산

<표 3.56. 수소 저장·이송 조합방식별 저장시설 비용추산 결과>

규모	저장규모	저장·이송 조합	총 투자비용 (k$)	조업비용 (k$/d)	총 일일 비용 (k$/d)	단위생산비용 ($/kgH$_2$)
대	1,000tonne CH_2	Pathway1	534,221	80	231	2.593
		Pathway2	515,845	64	209	2.342
		Pathway3	524,053	69	217	2.437
	4,500tonne LH_2	Pathway4	293,594	99	182	0.450
		Pathway5	313,544	102	190	0.473
		Pathway6	2,062,330	636	1,218	3.024
		Pathway7	2,073,926	636	1,221	3.032
중	500tonne CH_2	Pathway1	293,032	52	135	3.036
		Pathway2	286,273	44	125	2.797
		Pathway3	290,549	47	129	2.900
	1,000tonne LH_2	Pathway4	102,205	39	68	0.760
		Pathway5	108,514	49	79	0.892
		Pathway6	441,300	157	282	3.151
		Pathway7	444,519	167	292	3.269
소	100tonne CH_2	Pathway1	74,803	26	47	5.369
		Pathway2	74,544	25	46	5.179
		Pathway3	75,661	26	47	5.334
	100tonne LH_2	Pathway4	24,607	20	27	3.091
		Pathway5	26,100	32	40	4.471
		Pathway6	78,433	42	64	7.178
		Pathway7	78,704	52	74	8.340

(5) 이송 단계 비용추산

○ 트럭 및 철도를 이용한 이송비용 계산은 <표 3.57>을 기반으로 함

○ 가스배관망 설치비용은 도시가스 배관의 설치사례를 회귀분석하여 배관직경(5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100, 150cm)과 길이의 함수로 나타낸 모델[3-9]을 사용하였으며, 각각 재료, 매립 인건비, 기타 부대비용 및 부지비용 항목으로 이루어짐. 연간 유지관리 비용은 설치비용의 2%로 가정함[3-12]. 도시 간 이송배관 중 대형배관(200, 300, 600cm)은 150cm 이하 배관의 다발로 구성하여 비용을 추산함

○ 각각 도시 간 100km 이송거리, 도시 내 20km 이송거리에서 배관직경별 단위길이당 가격을 가스배관망을 이용한 이송비용은 <표 3.58>에 나타냈고, <그림 3.34>에 이송거리에 따른 단위길이당 설치비용의 변화를 도시함

○ 일반적으로 가스배관망은 이송거리가 짧고 수소 수요가 많은 구간에 설치하는 것이 유리함

<표 3.57. 트럭/철도 이송비용[11] >

구분	단위	CH_2 트럭	LH_2 트럭	CH_2 철도	LH_2 철도
인건비	$/hr	23			
시외연비(디젤)	km/L	2.55		4.25	
시내연비(디젤)	km/L	2.30		-	
연료가격(디젤)	$/L	1.16		0.28	
대당 일반관리비용	$/day	8.22		6.85	
대당 유지관리비용	$/km	0.0976		0.0621	
대당 가격	$	250,000	500,000	300,000	500,000

<표 3.58. 100km 구간 가스배관 비용추산 결과>

직경	재료비용	인건비용	부대비용	부지비용	총 설치비용	유지보수비용
(cm)	(k$)	(k$)	(k$)	(k$)	(k$)	(k$/yr)
5	12,795	17,990	26,518	27,825	85,128	1,702
10	14,677	33,048	31,639	29,224	108,588	2,171
15	116,835	48,035	37,175	30,623	232,668	2,653
20	19,311	62,952	43,128	32,022	157,413	3,148
25	22,151	77,799	49,496	33,421	182,867	3,657
50	43,989	150,973	87,575	40,416	322,953	6,459
75	87,354	222,386	136,048	47,411	493,199	9,864
100	173,468	292,036	194,916	54,407	714,827	14,296

(6) 분배 단계 비용추산

○ 발전용 연료전지 관련 시설의 도입 및 운영비용은 수소 네트워크에 포함되지 않으며 수소네트워크 형태에 따라 비용변화를 갖는 수소충전소를 분배단계의 비용으로 반영함

<표 3.59. Off-site 수소충전소 비용추산 결과>

구분	수소공급방식	총 투자비용	조업비용	총 일일 비용	단위생산비용
		(k$)	(k$/d)	(k$/d)	($/kg$H_2$)
On-site 생산	천연가스개질	12,640	1.5	5.1	10.275
	PEM수전해	13,007	1.0	4.7	9.535
Off-site 생산	튜브 트레일러	3,868	0.8	1.9	3.830
	가스배관망	5,012	1.0	2.4	4.836
	액화 탱커트럭	5,144	0.5	2.0	3.918

<그림 3.34. 이송거리에 따른 수소가스배관의 단위길이당 설치비용>

(7) 비용추산 결과비교

○ 생산단계의 비용추산 결과를 문헌자료와 비교하여 <표 3.60>에 나타냄

○ 생산된 수소의 저장·이송, 수소충전소로 분배하는 비용추산 결과는 미국 에너지부에서 개발한 Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model(HDSAM v3.1)의 시나리오 모델링 결과와 비교함 (<표 3.61>)

<표 3.60. 수소 생산 기술별 비용추산 결과 비교>

구분		비용추산결과				Reference[3-14]			
생산기술	규모	생산량	총 투자 비용	조업 비용	단위 생산 비용	생산량	총 투자 비용	조업 비용	단위 생산 비용
		(tonneH_2/d)	(k$)	($/kg$H_2$)	($/kg$H_2$)	(tonneH_2/d)	(k$)	($/kg$H_2$)	($/kg$H_2$)
천연가스 개질	대	960	958,754	0.284	0.597	1,100	523,260	1.379	1.520
	중	150	184,655	0.438	0.824	150	118,560	1.402	1.619
	On-site	0.5	12,640	3.108	10.275	1.5	3,420	2.474	3.098
석탄 가스화	대	960	2,220,122	0.896	1.621	1,100	1,415,880	1.083	1.436
	중	150	521,397	1.741	2.831	-	-	-	-
바이오매스 가스화	대	960	3,307,321	0.908	1.988	1,100	870,960	1.710	1.927
	중	150	862,942	1.920	3.724	150	263,340	2.075	2.556
수전해	중	150	772,382	0.691	2.305	100	118,560	4.549	4.873
	On-site	0.5	13,007	2.160	9.535	1.5	2,280	5.187	5.603

○ 생산비용 중 설비투자비용은 물가상승으로 인해 문헌자료보다 대부분 높게 산정됨. 또한 본 연구의 비용추산에서는 원료(천연가스, 석탄, 바이오매스, 전기)가격과 생산 후의 압축 및 액화 비용을 제외하였기 때문에 조업비용이 문헌자료보다 낮게 산출됨. 그러나, 최적화 모델링을 위한 대략적인 자릿수(Order-of-Magnitude) 비용추세에서 크게 벗어나지 않음

○ 바이오매스 가스화 공정은 국내 생산 수입 바이오매스 보다 비싼 목재펠렛을 원료로 하여 문헌자료 보다 높은 생산비용을 형성하며, 소규모 On-site 생산비용 추산결과는 수소충전소 비용과 별도의 대형 저장설비(생산량의 10일 비축분)를 반영하였기 때문에 문헌자료 보다 높은 생산비용을 가짐

<표 3.61. 도시 간 수소네트워크 비용추산 모델과 해외선진 소프트웨어의 결과비교>

저장·이송조합	Pathway1 ($/kgH$_2$)		Pathway2 ($/kgH$_2$)		Pathway4 ($/kgH$_2$)	
단계 / 모델	비용추산결과	HDSAM	비용추산결과	HDSAM	비용추산결과	HDSAM
압축·액화	0.31	-	0.21	0.08	1.94	2.62
저장	3.04	1.19	2.80	0.10	0.76	0.35
이송	1.74	1.11	5.73	3.14	0.27	0.28
분배	3.83	2.74	4.84	3.75	3.92	3.19
합 계	8.92	5.04	13.57	7.07	6.89	6.44
오차	43%		48%		7%	

○ 압축 및 액화·저장·이송, 수소충전소로 분배하는 과정의 비용추산 결과는 CH_2 형태의 수소 공급에서 43-48% 오차가 있었으며, LH_2 형태의 수소 공급은 7%의 오차를 보임

○ Pathway1, 2의 압축·저장·이송단계에서의 주된 차이점은 HDSAM이 대규모 GH_2 저장소로 Geologic storage를 사용하기 때문으로 모델의 가정에 근본적 차이가 있음

○ 분배 단계 및 기타 차이점은 HDSAM의 수소 비축량이 수소충전소의 Peak demand를 충족할 수 있는 정도만 요구되는 낮은 저장량(일일 수요량의 약 0.5-3일 분량)으로 계산되고, 여러 설계인자들의 값이 다르기 때문으로 판단됨

○ 일반적으로 사업의 타당성 검토 또는 최적화 모델을 위한 개념설계 단계의 비용추산결과는 실제 비용과 ±300% 이내의 오차[15]가 허용될 수 있으므로 본 연구의 비용추산 결과를 최적화 모델에 적용할 수 있음

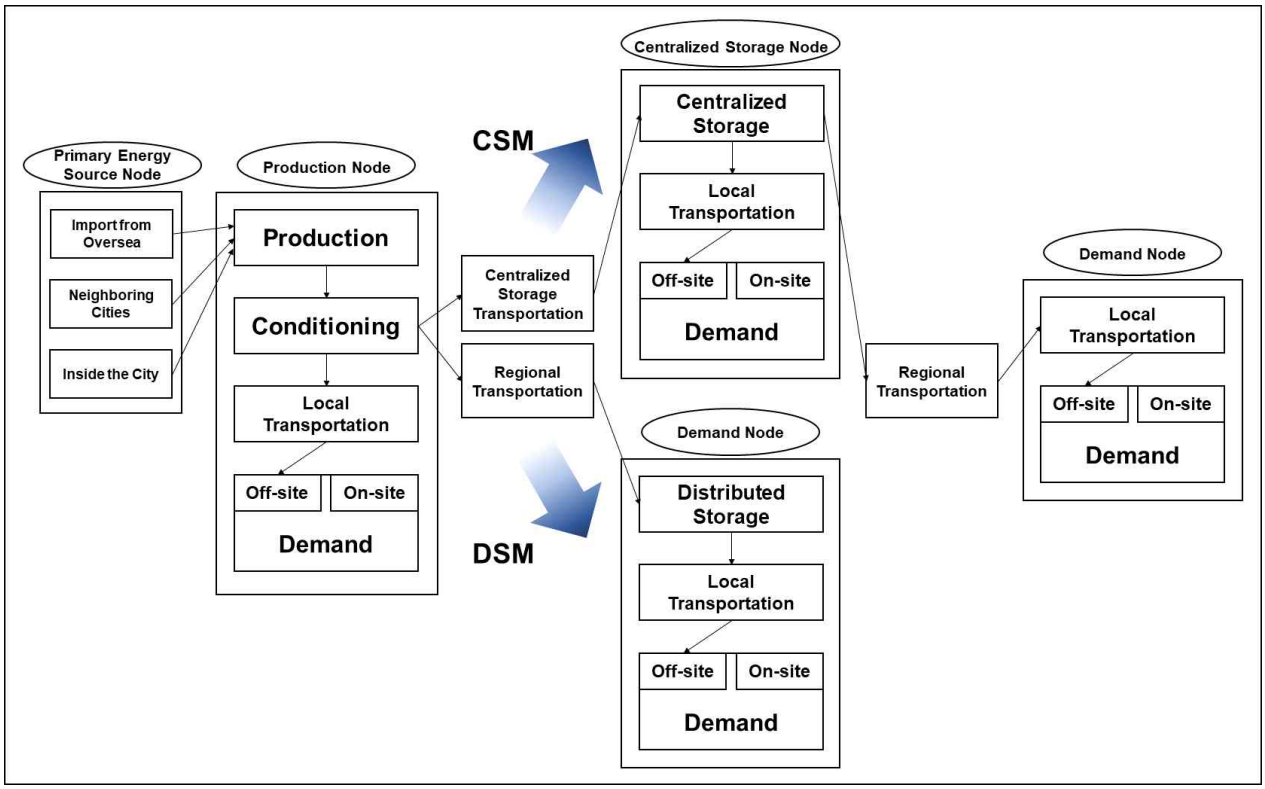
3. 100만 명 규모 도시 내 수소 네트워크의 수학적 최적화 모델

가. 모델의 구조 및 Superstructure

○ 수소의 생산, 압축·액화, 저장, 도시 간 이송, 도시 내 이송 및 수소충전소 각 단계에서 필요한 비용을 합산한 총 비용을 최소화하는 비용 최적화 모델을 구성함. 본 연구의 수학적 모델을 통해 국내 100만 명 규모 대도시들에 수소 공급을 할 때 가장 적은 비용이 드는 전역 최적해를 찾고자 함

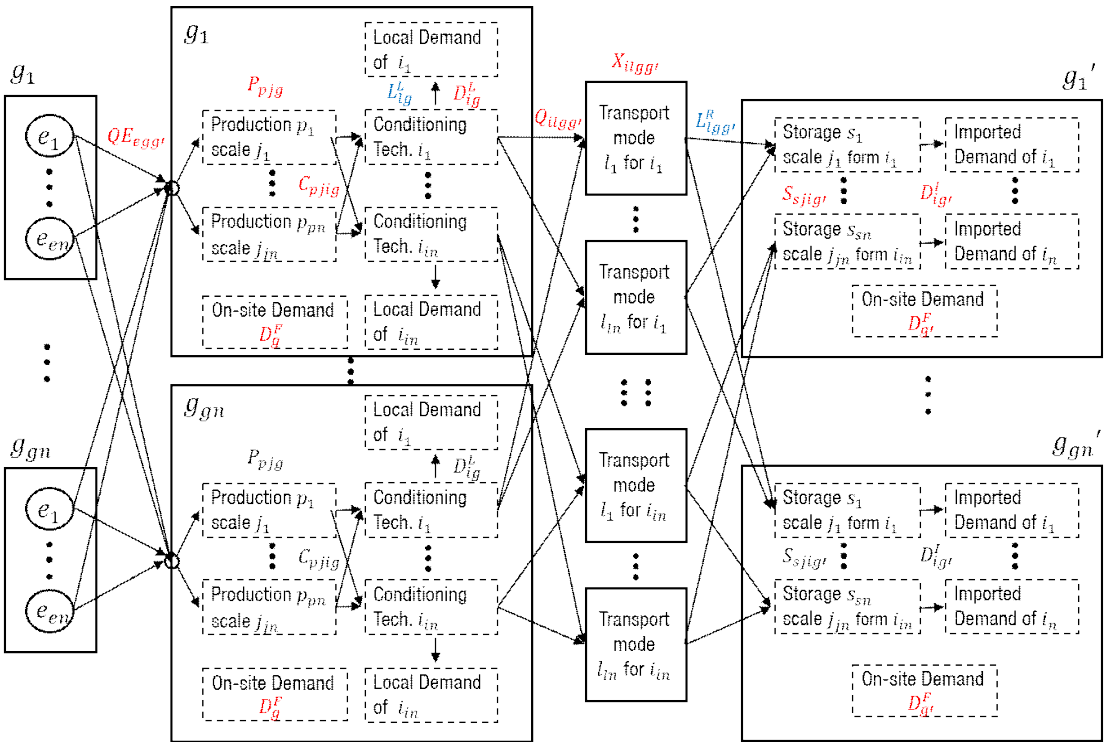
○ 수소의 저장비용은 비축 기준을 어떻게 결정하는지에 따라 비용이 크게 바뀜. 일반적인 CNG 충전소는 도시가스 배관을 통해 공급받는 천연가스를 압축하여 소비자에게 제공하므로 대규모 저장시설이 필요하지 않음. 그러나 본 연구에서는 수소 공급사슬 최적화 연구에서 자주 사용되는 일일 수소 소비량의 10일 분량을 비축 기준으로 결정함 [21]

○ 수소의 저장비용이 50%에 이르는 2절의 연구결과를 참고할 때, 수소저장소를 중앙집중화하여 특정 도시 부근에 대규모로 건설할지, 또는 이를 분산화하여 각 도시마다 중간 규모로 설치할지는 전체 공급사슬에 영향을 미치는 중요한 결정변수가 됨. <그림 3.35>는 중앙집중형 수소저장소(Centralized Hydrogen Storage Model, CSM)와 분산형 수소저장소(Decentralized Hydrogen Storage Model, DSM)를 고려하여 수소 공급 사슬을 구성하는 방안을 보여줌

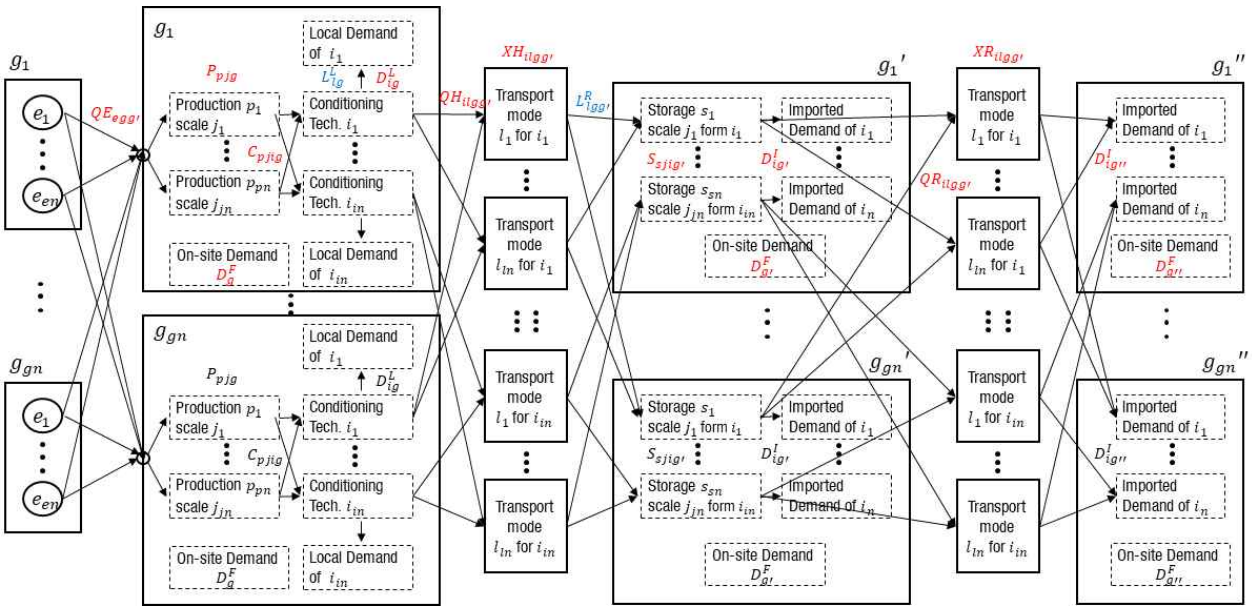


<그림 3.35. 중앙집중형 저장소 모델과 분산형 저장소 모델에 따른 수소공습사슬의 구조>

○ <그림 3.36>은 분산형 수소저장소 모델(DSM), <그림 3.37>은 중앙집중형 수소저장소 모델(CSM)을 기반으로 한 도시 간 수소네트워크 최적화 모델의 Superstructure임.



<그림 3.36. DSM 기반 도시 간 수소네트워크 최적화 문제의 Superstructure>



<그림 3.37. CSM 기반 도시 간 수소네트워크 최적화 문제의 Superstructure>

○ CSM 기반 수학적 모델 내 사용되는 문자 및 부호에 대한 정의를 '가'절, 결정변수를 '나'절, 비용에 관한 계산식을 '다'절, 제약조건을 '라'절에 제시함

가. 문자 및 부호의 정의

<표 3.62. 100만 명 규모 도시 간 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 집합 정의>

구분	설명	구성요소
e	수소 생산 에너지원의 종류	{천연가스, 석탄, 바이오매스, 태양광·풍력 발전 전력}
d	이송 배관의 내경(mm)	{50, 100, 150, 200, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 6000}
h	중앙집중형 수소저장소(허브) 노드	{G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, G10}
g	수소 공급 및 수요도시 노드	{G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, G10}
g, g'	도시 노드의 출발지(g)-도착지(g') 조합	{(G1-G2), (G1-N3), (G1-G4) (G1-G5), ... , (G10-G9)}
i	모든 수소 이송방식 조합	{Pathway1, Pathway2, Pathway3, Pathway4, Pathway5, Pathway6, Pathway7}
i_1	도시 간 CH2truck/rail 이송하는 수소 이송방식 조합	{Pathway1}
i_2	도시 간 LH2truck/rail 이송하는 수소 이송방식 조합	{Pathway4, Pathway5}
i_3	도시 간 Pipeline 이송하는 수소 이송방식 조합	{Pathway2, Pathway3, Pathway6, Pathway7}
i_4	도시 내 CH2truck 이송하는 수소 이송방식 조합	{Pathway1, Pathway3}
i_5	도시 내 LH2truck 이송하는 수소 이송방식 조합	{Pathway4, Pathway6}
i_6	도시 내 Pipeline 이송하는 수소 이송방식 조합	{Pathway2, Pathway5, Pathway7}
j	생산·압축·액화·저장시설의 규모	{Small, Medium, Large}
p	수소 생산기술	{SMR, Coal Gasification, Biomass Gasification, Electrolysis}
l	수소 이송방식	{CH2truck, CH2rail, LH2truck, LH2rail, Pipeline}
m	도로 및 철도 이용 수소 이송방식	{CH2truck, CH2rail, LH2truck, LH2rail}

<표 3.63. 100만 명 규모 도시 간 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 연속 파라미터의 정의>

파라미터	설명	단위
$A_{e,g}^{0}$	지역 내 존재하는 최초 수소 생산 에너지원 공급가능량	unit/day
$CCap_{p,j,i}^{\max}$	이송방식 조합 및 압축시설 규모에 따른 압축시설의 최대 처리량	kg/day
$CCap_{p,j,i}^{\min}$	이송방식 조합 및 압축시설 규모에 따른 압축시설의 최소 처리량	kg/day
$CCC_{p,j,i}$	이송방식 조합 및 압축시설 규모에 따른 압축시설의 총 투자비용	$
CRF	자본회수계수 (프로젝트 기간 15년, 6% 이자율 반영)	-
D_{g}^{1}	노드(도시)의 차량용 연료전지 수요량	kg/day
D_{g}^{2}	노드(도시)의 발전용 연료전지 수요량	kg/day
DW_{m}	트럭, 철도 이송의 인건비	$/hr
FE_{m}^{L}	트럭, 철도 이송시 도시 내 운행 연비	L/km
FE_{m}^{R}	트럭, 철도 이송시 도시 밖 운행 연비	L/km
FP_{m}	트럭, 철도 이송시 연료 가격	$/L
GE_{m}	트럭, 철도 이송시 일반관리비용	$/day/대
$L_{l,g,g'}^{R}$	이송방법에 따른 각 도시 간 이송거리	km
$L_{l,n}^{L}$	이송방법에 따른 각 도시별 도시 내 이송거리	km
LUT_{m}	트럭, 철도 이송시 수소 적재/하역 시간	hr
ME_{m}	튜브 트레일러의 유지관리 비용	$/km/대
$PCap_{p,j}^{\max}$	생산시설의 종류 및 규모에 따른 최대 생산량	kg/day
$PCap_{p,j}^{\min}$	생산시설의 종류 및 규모에 따른 최소 생산량	kg/day
PCC	생산시설의 종류 및 규모에 따른 총 투자비용	$
$PLCC_{d,g,g'}^{H}$	내경에 따른 수소 생산지-저장시설 간 이송배관 설치비용	$
$PLCC_{d,g,g'}^{R}$	내경에 따른 수소저장시설-수요도시 간 이송배관 설치비용	$
$PLCC_{d,g}^{L}$	내경에 따른 도시 내 수소 이송배관 설치비용	$
POM	배관망 설치비용 대비 운영 및 유지관리비용의 비율	%
$\overline{Q}_{d}$	배관 내 유속 제한에 따른 유량 제한	kg/day
$\widehat{Q}_{d,g,g'}^{H}$	수소 생산지-저장시설 배관 내 최대 압력손실에 따른 유량 제한	kg/day
$\widehat{Q}_{d,g,g'}^{R}$	저장시설-수요도시 배관 내 최대 압력손실에 따른 유량 제한	kg/day
$\widehat{Q}_{d,g}^{L}$	도시 내 이송배관의 최대 압력손실에 따른 유량 제한	kg/day
$Q_{i,l}^{\max}$	각 이송방식에 대한 최대 허용 유량	kg/day
$Q_{i,l}^{\min}$	각 이송방식에 대한 최소 허용 유량	kg/day
$SCap_{j,i}^{\max}$	수소 저장소의 종류 및 규모에 따른 최대 저장량	kg
$SCap_{j,i}^{\min}$	수소 저장소의 종류 및 규모에 따른 최소 저장량	kg
$SCC_{j,i}$	수소 저장소의 종류 및 규모에 따른 총 투자비용	$
SP_{m}^{L}	트럭, 철도 이송시 도시 내 운행 속도	km/hr
SP_{m}^{R}	트럭, 철도 이송시 도시 밖 운행 속도	km/hr
$TCap_{m}$	트럭, 철도 이송시 1대(또는 1량)의 수소 이송량	kg/대

파라미터	설명	단위
TMA_m^L	트럭 이송시 도시 내 일일 운행률	hr/day
TMA_m^R	트럭, 철도 이송시 도시 밖 일일 운행률	hr/day
TMC_m	트럭, 철도 이송시 차량의 대당 구매 비용	$/대
$UCC_{p,j,i}$	이송방식 조합 및 압축시설 규모에 따른 압축시설의 조업비용	$/kgH$_2$
$UDEC_e$	국내 수소 에너지원의 단위 이송비용	$/km/unit
UEC_e	국내 수소 에너지원의 단위 구매비용	$/unit
UEC_e	수소 에너지원의 해외 수입비용 또는 신규 에너지원 생산 비용	$/unit
$UPC_{p,j}$	생산기술 종류 및 규모에 따른 수소의 단위조업비용	$/kgH$_2$
$USC_{j,i}$	이송방식 조합 및 저장시설 규모에 따른 저장시설의 단위조업비용	$/kgH$_2$
α	연중 수소네트워크 내 시설 운영 일수	day/yr
β	일일 수소 필요량에 대한 수소 비축일수	day
$\gamma_{e,p,j}$	수소 생산기술 및 규모에 따른 에너지원 소모 비율	unit/kgH$_2$
$UCO2P_{p,j}$	생산기술 및 규모에 따른 단위수소 당 CO_2 배출량	kgCO$_2$/kgH$_2$
$UCO2C_{p,j,i}$	압축·액화기술 및 규모에 따른 단위수소 당 CO_2 배출량	kgCO$_2$/kgH$_2$
$UCO2S_{j,i}$	수소저장소 종류 및 규모에 따른 단위수소 당 CO_2 배출량	kgCO$_2$/kgH$_2$
$UCO2T_m$	트럭, 철도 이송방식에 따른 단위수소 당 CO_2 배출량	kgCO$_2$/kgH$_2$
UDC_i	이송 및 저장방식 조합에 따른 Off-site 공급 수소충전소의 단위비용	$/kgH$_2$

<표 3.63. 100만 명 규모 도시 간 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 정수 파라미터의 정의>

구분	설명	단위
$NC_{p,j,i,g}^0$	각 노드, 규모, 종류별 초기 압축시설 수	-
$NP_{p,j,g}^0$	각 노드, 규모, 종류별 초기 생산시설 수	-
$NS_{j,i,g}^0$	각 노드, 규모, 종류별 초기 저장시설 수	-
$RW_{g,g'}$	도시 간 철도 이송 가능여부	-

나. 결정변수

<표 3.64. 100만 명 규모 도시 간 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 연속 결정변수>

변수	설명	단위
$AE_{e,g}$	각 노드(도시) 내 초기 에너지원의 수소생산 투입률	%
$C_{p,j,i,g}$	각 노드(도시) 내 종류별 압축·액화시설의 처리량	kg/day

변수	설명	단위
$C_{i,g}^{T}$	각 노드(도시) 내 Pathway i 에 대한 전체 압축·액화시설의 처리량	kg/day
$D_{i,g}^{T}$	각 노드의 Off-site 수소생산의 공급방식 종류에 따른 수소 소비량	kg/day
$D_{i,g}^{T_1}$	각 노드의 Off-site 수소생산의 공급방식 종류에 따른 차량용 연료전지의 수소 소비량	kg/day
$D_{i,g}^{T_2}$	각 노드의 Off-site 수소생산의 공급방식 종류에 따른 발전용 연료전지의 수소 소비량	kg/day
$D_{i,g}^{L}$	각 노드의 도시 내 Off-site 수소생산 설비로부터 공급받고 Pathway i 의 공급방식에 해당하는 수소에 대한 일일 소비량	kg/day
$D_{i,g}^{L_1}$	각 노드의 도시 내 Off-site 수소생산 설비로부터 공급받고 Pathway i 의 공급방식에 해당하는 차량용 연료전지 수소에 대한 일일 소비량	kg/day
$D_{i,g}^{L_2}$	각 노드의 도시 내 Off-site 수소생산 설비로부터 공급받고 Pathway i 의 공급방식에 해당하는 발전용 연료전지 수소에 대한 일일 소비량	kg/day
$D_{i,g}^{I}$	각 노드의 도시 밖 Off-site 수소생산 설비로부터 공급받고 Pathway i 의 공급방식에 해당하는 수소에 대한 일일 소비량	kg/day
$D_{i,g}^{I_1}$	각 노드의 도시 밖 Off-site 수소생산 설비로부터 공급받고 Pathway i 의 공급방식에 해당하는 차량용 연료전지 수소에 대한 일일 소비량	kg/day
$D_{i,g}^{I_2}$	각 노드의 도시 밖 Off-site 수소생산 설비로부터 공급받고 Pathway i 의 공급방식에 해당하는 발전용 연료전지 수소에 대한 일일 소비량	kg/day
D_{g}^{F}	각 노드의 On-site 수소생산 설비로부터 공급받는 차량용 연료전지 수소에 대한 일일 소비량	kg/day
$I_{e,g}$	각 노드의 수소 에너지원 해외 수입량	kg/day
$P_{p,j,g}$	각 노드의 수소생산 기술 및 규모별 수소 생산량	kg/day
P_{g}^{T}	각 노드의 총 수소 생산량	kg/day
$QH_{i,l,g,g'}$	수소 생산지-저장시설까지의 각 이송방식에 대한 수소 이송량	kg/day
$QR_{i,l,g,g'}$	저장시설-수요도시까지의 각 이송방식에 대한 수소 이송량	kg/day
$QEI_{e,g,g'}$	해외 수입된(또는 신규 생산된) 수소 에너지원의 도시 간 이송량	kg/day
$QEN_{e,g,g'}$	국내 생산된 수소 에너지원의 도시 간 이송량	kg/day
$S_{j,i,g}$	각 도시의 저장시설 종류 및 규모별 수소저장량	kg/day
$S_{i,g}^{T}$	각 도시의 저장시설 종류별 수소저장량	kg/day

<표 3.65. 100만 명 규모 도시 간 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 정수 결정변수>

변수	설명	단위
$IC_{p,j,i,g}$	각 노드, 규모, 종류별 신규도입 압축시설 수	-
$IP_{p,j,g}$	각 노드, 생산기술, 규모별 신규도입 수소 생산시설 수	-
$IS_{j,i,g}$	각 노드, 규모, 종류별 신규도입 저장시설 수	-

변수	설명	단위
$NC_{p,j,i,g}$	각 노드, 생산기술, 규모, 종류별 총 압축 또는 액화시설 수	-
$NP_{p,j,g}$	각 노드, 생산기술, 규모별 총 부생수소 생산시설 수	-
$NS_{j,i,g}$	각 노드, 규모, 종류별 총 수소 저장시설 수	-
$NP^{SD}_{p,j,g}$	각 노드, 생산기술, 규모별 사용하지 않는 기존 생산시설 수	-

<표 3.66. 100만 명 규모 도시 간 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 이진 결정변수>

변수	설명	단위
$V_{i,g}$	각 노드(도시) 내 배관이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$W^{H}_{i,d,g,g'}$	각 노드 간 수소 생산지-수소저장소 내경 d 배관이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$W^{R}_{i,d,g,g'}$	각 노드 간 내경 d 배관이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$W^{L}_{i,d,n}$	각 노드 내 내경 d 배관이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$X^{H}_{i,l,g,g'}$	각 노드 간 이송방식 l 로 수소 생산지-수소저장소 이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$X^{R}_{i,l,g,g'}$	각 노드 간 이송방식 l 로 수소 이송을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0	-
$Y_{i,g}$	각 노드에서 Pathway i로 수소를 배출하면 1, 그렇지 않으면 0	-
$Z_{i,g}$	각 노드에서 Pathway i로 수소를 수입하면 1, 그렇지 않으면 0	-

다. 비용 목적함수

<표 3.67. 5만 명 규모 도시 내 수소네트워크 수학적 최적화 모델의 비용변수>

변수	설명	변수	설명
EPC	국내생산 에너지원 구매비용($/d)	MCR	수소저장소-수요도시 간 트럭/철도차량 유지보수비용($/d)
EIC	해외생산 에너지원 수입비용 또는 에너지원 생산설비 비용($/d)	MCL	수요도시 내 이송 트럭 유지보수비용($/d)
EDC	수소 에너지원의 네트워크 내 운송비용($/d)	MCH^{tube}	수소 생산지-수소저장소 간 CH_2 트럭/철도차량 유지보수비용($/d)
ESC	전체 에너지원 구매 및 공급비용($/d)	MCR^{tube}	수소저장소-수요도시 간 CH_2 트럭/철도차량 유지보수비용($/d)
$PCCT$	전체 생산시설 총 투자비용($)	MCL^{tube}	수요도시 내 이송 CH_2 트럭 유지보수비용($/d)
$CCCT$	전체 압축·액화시설 총 투자비용($)	MCH^{tank}	수소 생산지-수소저장소 간 LH_2 트럭/철도차량 유지보수비용($/d)

변수	설명	변수	설명
$SCCT$	전체 저장시설 총 투자비용($)	MCR^{tank}	수소저장소-수요도시 간 LH_2 트럭/철도차량 유지보수비용($/d)
FCC	전체 압축·저장시설 총 투자비용($)	MCL^{tank}	수요도시 내 이송 LH_2 트럭 유지보수비용($/d)
$TCCH$	수소생산지-수소저장소 간 트럭/철도차량 총 투자비용($)	MC	전체 트럭/철도차량 유지보수 비용($/d)
$TCCR$	수소저장소-수요도시 간 트럭/철도차량 총 투자비용($)	GCH	수소 생산지-수소저장소 간 트럭/철도차량 일반관리비용($/d)
$TCCL$	수요도시 내 트럭이송 총 투자비용($)	GCR	수소저장소-수요도시 간 트럭/철도차량 일반관리비용($/d)
$TCCH^{tube}$	수소생산지-수소저장소 간 CH_2 트럭/철도차량 총 투자비용($)	GCL	수요도시 내 이송 트럭 일반관리비용($/d)
$TCCR^{tube}$	수소저장소-수요도시 간 CH_2 트럭/철도차량 총 투자비용($)	GCH^{tube}	수소 생산지-수소저장소 간 CH_2 트럭/철도차량 일반관리비용($/d)
$TCCL^{tube}$	수요도시 내 CH_2 트럭이송 총 투자비용($)	GCR^{tube}	수소저장소-수요도시 간 CH_2 트럭/철도차량 일반관리비용($/d)
$TCCH^{tank}$	수소생산지-수소저장소 간 LH_2 트럭/철도차량 총 투자비용($)	GCL^{tube}	수요도시 내 이송 CH_2 트럭 일반관리비용($/d)
$TCCR^{tank}$	수소저장소-수요도시 간 LH_2 트럭/철도차량 총 투자비용($)	GCH^{tank}	수소 생산지-수소저장소 간 LH_2 트럭/철도차량 일반관리비용($/d)
$TCCL^{tank}$	수요도시 내 LH_2 트럭이송 총 투자비용($)	GCR^{tank}	수소저장소-수요도시 간 LH_2 트럭/철도차량 일반관리비용($/d)
TCC	네트워크 내 트럭/철도차량 총 투자비용($)	GCL^{tank}	수요도시 내 이송 LH_2 트럭 일반관리비용($/d)
$POCT$	전체 부생수소 구매비용($/d)	GC	전체 트럭/철도차량 일반 관리비용($/d)
$COCT$	전체 압축시설 조업비용($/d)	$TOCH$	수소 생산지-수소저장소 간 트럭/철도차량 운영비용($/d)
$SOCT$	전체 저장시설 조업비용($/d)	$TOCR$	수소저장소-수요도시 간 트럭/철도차량 운영비용($/d)
FOC	전체 압축·저장시설 조업비용($/d)	$TOCL$	수요도시 내 이송 트럭 운영비용($/d)
FCH	수소 생산지-수소저장소 간 트럭/철도차량 연료비용($/d)	TOC	전체 트럭/철도차량 운영비용($/d)
FCR	수소저장소-수요도시 간 트럭/철도차량 연료비용($/d)	$PLCCTH$	수소 생산지-수소저장소 간 배관망 설치비용($)
FCL	수요도시 내 이송 트럭 연료비용($/d)	$PLCCTR$	수소저장소-수요도시 간 배관망 설치비용($)
FCH^{tube}	수소 생산지-수소저장소 간 CH_2 트럭/철도차량 연료비용($/d)	$PLCCTL$	수요도시 내 이송 배관망 설치비용($)
FCR^{tube}	수소저장소-수요도시 간 CH_2 트럭/철도차량 연료비용($/d)	$PLCCT$	전체 배관망 설치비용($)
FCL^{tube}	수요도시 내 이송 CH_2 트럭 연료비용($/d)	$PLOCTH$	수소 생산지-수소저장소 간 배관망 운영비용($/d)
FCH^{tank}	수소 생산지-수소저장소 간 LH_2 트럭/철도차량 연료비용($/d)	$PLOCTR$	수소저장소-수요도시 간 배관망 운영비용($/d)
FCR^{tank}	수소저장소-수요도시 간 LH_2 트럭/철도차량 연료비용($/d)	$PLOCTL$	수요도시 내 이송 배관망 운영비용($/d)
FCL^{tank}	수요도시 내 이송 LH_2 트럭 연료비용($/d)	$PLOCT$	전체 배관망 운영비용($/d)
FC	전체 트럭/철도차량 연료비용($/d)	$DCToff$	Off-site 공급 수소충전소 총 일일비용($/d)
LCH	수소 생산지-수소저장소 간 트럭/철도차량 인건비용($/d)	$DCTonC$	On-site 공급 수소충전소 일일환산 총 투자비용($/d)
LCR	수소저장소-수요도시 간 트럭/철도차량 인건비용($/d)	$DCTonO$	Off-site 공급 수소충전소 일일 운영비용($/d)
LCL	수요도시 내 이송 트럭 인건비용($/d)	$DCTon$	Off-site 공급 수소충전소 총 일일비용($/d)

변수	설명	변수	설명
LCH^{tube}	수소 생산지-수소저장소 간 CH_2 트럭/철도차량 인건비용($/d)	TDC	전체 수소네트워크 일일 총 비용($/d)
LCR^{tube}	수소저장소-수요도시 간 CH_2 트럭/철도차량 인건비용($/d)	$CO2P$	수소생산 과정 탄소배출량(kgCO_2/d)
LCL^{tube}	수요도시 내 이송 CH_2 트럭 인건비용($/d)	$CO2C$	수소압축·액화 과정 탄소배출량(kgCO_2/d)
LCH^{tank}	수소 생산지-수소저장소 간 LH_2 트럭/철도차량 인건비용($/d)	$CO2S$	수소저장 과정 탄소배출량(kgCO_2/d)
LCR^{tank}	수소저장소-수요도시 간 LH_2 트럭/철도차량 인건비용($/d)	$CO2T^R$	도시 간 수소이송 과정 탄소배출량(kgCO_2/d)
LCL^{tank}	수요도시 내 이송 LH_2 트럭 인건비용($/d)	$CO2T^L$	도시 내 수소이송 과정 탄소배출량(kgCO_2/d)
LC	전체 트럭/철도차량 인건비용($/d)	$CO2E$	수소네트워크 전체 탄소배출량(kgCO_2/d)
MCH	수소 생산지-수소저장소 간 트럭/철도차량 유지보수비용($/d)	-	-

○ 전체 에너지원 구매 및 공급비용

$$EPC = \sum_e \sum_g (UEC_e \times AE_{e,g}) + \sum_e \sum_g \sum_{g'} (UEC_e \times QEN_{e,g,g'})$$

$$EIC = \sum_e \sum_g (UIC_e \times I_{e,g})$$

$$EDC = \sum_e \sum_l \sum_g \sum_{g'} \left(UDEC_e \times L^R_{l,g,g'} \times (QEI_{e,g,g'} + QEN_{e,g,g'})\right)$$

$$ESC = EPC + EIC + EDC$$

○ 생산·압축·액화·저장시설의 총 투자비용

$$CCCT = \sum_p \sum_j \sum_i \sum_g (CCC_{p,j,i} \times IC_{p,j,i,g})$$

$$PCCT = \sum_p \sum_j \sum_g (PCC_{p,j} \times IP_{p,j,g}) \qquad (j = Medium, Large)$$

$$SCCT = \sum_j \sum_i \sum_g (SCC_{j,i} \times IS_{j,i,g})$$

$$FCC = CCCT + PCCT + SCCT$$

○ 트럭/철도이송 총 투자비용

$$TCC^H_{tube} = \sum_{i_1} \sum_m \sum_g \sum_{g'} \left(\frac{TMC_m \times QH_{i_1,m,g,g'}}{TMA^R_m \times TCap_m} \left(\frac{2 \times L^R_{m,g,g'}}{SP^R_m} + LUT_m \right) \right) \qquad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$TCC^H_{tank} = \sum_{i_2} \sum_m \sum_g \sum_{g'} \left(\frac{TMC_m \times QH_{i_2,m,g,g'}}{TMA^R_m \times TCap_m} \left(\frac{2 \times L^R_{m,g,g'}}{SP^R_m} + LUT_m \right) \right) \qquad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$TCC^R_{tube} = \sum_{i_1} \sum_m \sum_g \sum_{g'} \left(\frac{TMC_m \times QR_{i_1,m,g,g'}}{TMA^R_m \times TCap_m} \left(\frac{2 \times L^R_{m,g,g'}}{SP^R_m} + LUT_m \right) \right) \qquad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$TCC^R_{tank} = \sum_{i_2} \sum_m \sum_g \sum_{g'} \left(\frac{TMC_m \times QR_{i_2,m,g,g'}}{TMA^R_m \times TCap_m} \left(\frac{2 \times L^R_{m,g,g'}}{SP^R_m} + LUT_m \right) \right) \qquad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$TCC_{tube}^{L} = \sum_{i_4}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{TMC_m \times D_{i,g}^{T}}{TMA_m^{L} \times TCap_m}\left(\frac{2 \times L_{m,g}^{L}}{SP_m^{L}} + LUT_m\right)\right) \quad (m = CH2truck)$$

$$TCC_{tank}^{L} = \sum_{i_5}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{TMC_m \times D_{i,g}^{T}}{TMA_m^{L} \times TCap_m}\left(\frac{2 \times L_{m,g}^{L}}{SP_m^{L}} + LUT_m\right)\right) \quad (m = LH2truck)$$

$$TCC = TCC_{tube}^{H} + TCC_{tank}^{H} + TCC_{tube}^{R} + TCC_{tank}^{R} + TCC_{tube}^{L} + TCC_{tank}^{L}$$

○ 생산·압축·액화·저장시설의 총 투자비용

$$COCT = \sum_{p}\sum_{j}\sum_{i}\sum_{g}(UCC_{p,j,i} \times C_{p,j,i,g})$$

$$POCT = \sum_{p}\sum_{j}\sum_{g}(UPC_{p,j} \times P_{p,j,g})$$

$$SOCT = \sum_{j}\sum_{i}\sum_{g}\left(USC_{j,i} \times \frac{S_{j,i,g}}{\beta}\right)$$

$$FOC = COCT + POCT + SOCT$$

○ 트럭/철도이송 총 연료비용

$$FC_{tube}^{H} = \sum_{i_1}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{FP_m \times QH_{i_1,m,g,g'} \times 2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{FE_m^{R} \times TCap_m}\right) \quad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$FC_{tank}^{H} = \sum_{i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{FP_m \times QH_{i_2,m,g,g'} \times 2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{FE_m^{R} \times TCap_m}\right) \quad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$FC_{tube}^{R} = \sum_{i_1}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{FP_m \times QR_{i_1,m,g,g'} \times 2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{FE_m^{R} \times TCap_m}\right) \quad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$FC_{tank}^{R} = \sum_{i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{FP_m \times QR_{i_2,m,g,g'} \times 2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{FE_m^{R} \times TCap_m}\right) \quad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$FC_{tube}^{L} = \sum_{i_4}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{FP_m \times D_{i_4,g}^{T} \times 2 \times L_{m,g}^{L}}{FE_m^{L} \times TCap_m}\right) \quad (m = CH2truck)$$

$$FC_{tank}^{L} = \sum_{i_4}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{FP_m \times D_{i_4,g}^{T} \times 2 \times L_{m,g}^{L}}{FE_m^{L} \times TCap_m}\right) \quad (m = LH2truck)$$

$$FC = FC_{tube}^{H} + FC_{tank}^{H} + FC_{tube}^{R} + FC_{tank}^{R} + FC_{tube}^{L} + FC_{tank}^{L}$$

○ 트럭/철도이송 총 인건비용

$$LC_{tube}^{H} = \sum_{i_1}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{DW_m \times QH_{i_1,m,g,g'}}{TCap_m}\left(\frac{2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{SP_m^{L}} + LUT_m\right)\right) \quad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$LC_{tank}^{H} = \sum_{i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{DW_m \times QH_{i_2,m,g,g'}}{TCap_m}\left(\frac{2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{SP_m^{L}} + LUT_m\right)\right) \quad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$LC_{tube}^{R} = \sum_{i_1}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{DW_m \times QR_{i_1,m,g,g'}}{TCap_m}\left(\frac{2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{SP_m^{L}} + LUT_m\right)\right) \quad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$LC_{tank}^{R} = \sum_{i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{DW_m \times QR_{i_2,m,g,g'}}{TCap_m}\left(\frac{2\times L_{m,g,g'}^{R}}{SP_m^L} + LUT_m\right)\right) \quad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$LC_{tube}^{L} = \sum_{i_4}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{DW_m \times D_{i_4,g}^{T}}{TCap_m}\left(\frac{2\times L_{m,g}^{L}}{SP_m^L} + LUT_m\right)\right) \quad (m = CH2truck)$$

$$LC_{tank}^{L} = \sum_{i_5}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{DW_m \times D_{i_5,g}^{T}}{TCap_m}\left(\frac{2\times L_{m,g}^{L}}{SP_m^L} + LUT_m\right)\right) \quad (m = LH2truck)$$

$$LC = LC_{tube}^{H} + LC_{tank}^{H} + LC_{tube}^{R} + LC_{tank}^{R} + LC_{tube}^{L} + LC_{tank}^{L}$$

○ 트럭/철도이송 총 유지보수비용

$$MC_{tube}^{H} = \sum_{i_1}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{ME_m \times QH_{i_1,m,g,g'} \times 2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{TCap_m}\right) \quad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$MC_{tank}^{H} = \sum_{i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{ME_m \times QH_{i_2,m,g,g'} \times 2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{TCap_m}\right) \quad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$MC_{tube}^{R} = \sum_{i_1}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{ME_m \times QR_{i_1,m,g,g'} \times 2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{TCap_m}\right) \quad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$MC_{tank}^{R} = \sum_{i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{ME_m \times QR_{i_2,m,g,g'} \times 2 \times L_{m,g,g'}^{R}}{TCap_m}\right) \quad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$MC_{tube}^{L} = \sum_{i_4}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{ME_m \times D_{i_4,g}^{T} \times 2 \times L_{m,g}^{L}}{TCap_m}\right) \quad (m = CH2truck)$$

$$MC_{tank}^{L} = \sum_{i_5}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{ME_m \times D_{i_5,g}^{T} \times 2 \times L_{m,g}^{L}}{TCap_m}\right) \quad (m = LH2truck)$$

$$MC = MC_{tube}^{H} + MC_{tank}^{H} + MC_{tube}^{R} + MC_{tank}^{R} + MC_{tube}^{L} + MC_{tank}^{L}$$

○ 트럭/철도이송 총 일반관리비용

$$GC_{tube}^{H} = \sum_{i_1}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{GE_{\ m} \times QH_{i_1,m,g,g'}}{TMA_m^R \times TCap_m}\left(\frac{2\times L_{m,g,g'}^{R}}{SP_m^R} + LUT_m\right)\right) \quad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$GC_{tank}^{H} = \sum_{i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{GE_{\ m} \times QH_{i_2,m,g,g'}}{TMA_m^R \times TCap_m}\left(\frac{2\times L_{m,g,g'}^{R}}{SP_m^R} + LUT_m\right)\right) \quad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$GC_{tube}^{R} = \sum_{i_1}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{GE_{\ m} \times QR_{i_1,m,g,g'}}{TMA_m^R \times TCap_m}\left(\frac{2\times L_{m,g,g'}^{R}}{SP_m^R} + LUT_m\right)\right) \quad (m = CH2truck, CH2rail)$$

$$GC_{tank}^{R} = \sum_{i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(\frac{GE_{\ m} \times QR_{i_2,m,g,g'}}{TMA_m^R \times TCap_m}\left(\frac{2\times L_{m,g,g'}^{R}}{SP_m^R} + LUT_m\right)\right) \quad (m = LH2truck, LH2rail)$$

$$GC_{tube}^{L} = \sum_{i_4}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{GE_{\ m} \times D_{i_4,g}^{T}}{TMA_m^L \times TCap_m}\left(\frac{2\times L_{m,g}^{L}}{SP_m^L} + LUT_m\right)\right) \quad (m = CH2truck)$$

$$GC_{tank}^{L} = \sum_{i_5}\sum_{m}\sum_{g}\left(\frac{GE_{m} \times D_{i_5,g}^{T}}{TMA_{m}^{L} \times TCap_{m}}\left(\frac{2 \times L_{m,g}^{L}}{SP_{m}^{L}} + LUT_{m}\right)\right) \quad (m = LH2truck)$$

$$GC = GC_{tube}^{H} + GC_{tank}^{H} + GC_{tube}^{R} + GC_{tank}^{R} + GC_{tube}^{L} + GC_{tank}^{L}$$

○ 트럭/철도이송 총 운영비용

$$TOC = FC + LC + MC + GC$$

○ 가스배관망 설치비용

$$PLCCT^{H} = \sum_{i_3}\sum_{d}\sum_{g}\sum_{g'}\left(PLCC_{d,g,g'}^{H} \times W_{i_3,d,g,g'}^{H}\right)$$

$$PLCCT^{R} = \sum_{i_3}\sum_{d}\sum_{g}\sum_{g'}\left(PLCC_{d,g,g'}^{R} \times W_{i_3,d,g,g'}^{R}\right)$$

$$PLCCT^{L} = \sum_{i_6}\sum_{d}\sum_{g}\left(PLCC_{d,g}^{L} \times W_{i_6,d,g}^{L}\right)$$

$$PLCCT = PLCCT^{H} + PLCCT^{R} + PLCCT^{L}$$

○ 가스배관망 운영 및 유지보수비용

$$PLOCT^{H} = POM \times PLCCT^{H}$$

$$PLOCT^{R} = POM \times PLCCT^{R}$$

$$PLOCT^{L} = POM \times PLCCT^{L}$$

$$PLOCT = PLOCT^{H} + PLOCT^{R} + PLOCT^{L}$$

○ 수소충전소 투자 및 운영비용

$$DCToff = \sum_{i}\sum_{g}\left(UDC_{i} \times DT_{i,g}\right)$$

$$DCTonC = \sum_{p}\sum_{j}\sum_{g}\left(PCC_{p,j} \times IP_{p,j,g}\right) \quad (j = Small)$$

$$DCTonO = \sum_{p}\sum_{j}\sum_{g}\left(UPC_{p,j} \times P_{p,j,g}\right) \quad (j = Small)$$

$$DCTon = DCTonC + DCTonO$$

$$DCT = DCTon + DCToff$$

○ 전체 네트워크의 일일 탄소배출량 계산

$$CO2C = \sum_{p}\sum_{j}\sum_{i}\sum_{g}\left(UCO2_{p,j,i}^{C} \times C_{p,j,i,g}\right)$$

$$CO2P = \sum_{p}\sum_{j}\sum_{g}\left(UCO2_{p,j}^{P} \times P_{p,j,g}\right)$$

$$CO2S = \sum_{j}\sum_{i}\sum_{g}\left(UCO2_{j,i}^{S} \times S_{j,i,g}\right)$$

$$CO2T^L = \sum_{i_4}\sum_{m_1}\sum_{g}\left(UCO2_m^T \times \frac{2\times L_{m,g}^L \times D_{i_4,g}^T}{TCap_m}\right) \quad (m_1 = CH2truck)$$
$$+ \sum_{i_5}\sum_{m_2}\sum_{g}\left(UCO2_m^T \times \frac{2\times L_{m,g}^L \times D_{i_5,g}^T}{TCap_m}\right) \quad (m_2 = LH2trunk)$$
$$CO2T^R = \sum_{i\in i_1,i_2}\sum_{m}\sum_{g}\sum_{g'}\left(UCO2_m^T \times \frac{2\times L_{m,g,g'}^R \times (QH_{i,m,g,g'} + QR_{i,m,g,g'})}{TCap_m}\right)$$
$$CO2E = CO2C + CO2P + CO2S + CO2T^L + CO2T^R$$

라. 제약조건

○ 각 노드 수소 에너지원의 물질수지

$$A_{e,g}^0 \times AE_{e,g} + \sum_{g'}(QEN_{e,g',g} - QEN_{e,g,g'}) + \sum_{g'}(QEI_{e,g',g} - QEI_{e,g,g'})$$
$$= \sum_{p}\sum_{j}(\gamma_{e,p,j} \times P_{p,j,g}) \qquad \forall e,g$$
$$\sum_{g'} QEN_{e,g,g'} \le A_{e,g}^0 \times AE_{e,g} + \sum_{g'} QEN_{e,g',g} \qquad \forall e,g$$
$$\sum_{g'} QEI_{e,g,g'} \le I_{e,g} + \sum_{g'} QEI_{e,g',g} \qquad \forall e,g$$
$$AE_{e,g} \le 1 \qquad \forall e,g$$

○ 각 노드의 수소수요량 물질수지

$$D_g^1 = \sum_i D_{i,g}^{T_1} + D_g^F \qquad \forall g \qquad\qquad D_g^2 = \sum_i D_{i,g}^{T_2} \qquad \forall g$$
$$D_{i,g}^L \le C_{i,g}^T \qquad \forall i,g \qquad\qquad D_{i,g}^T = D_{i,g}^L + D_{i,g}^I \qquad \forall i,g$$
$$D_{i,g}^{T_1} = D_{i,g}^{L_1} + D_{i,g}^{I_1} \qquad \forall i,g \qquad\qquad D_{i,g}^{T_2} = D_{i,g}^{L_2} + D_{i,g}^{I_2} \qquad \forall i,g$$
$$D_{i,g}^T = D_{i,g}^{T_1} + D_{i,g}^{T_2} \qquad \forall i,g \qquad\qquad D_{i,g}^I = D_{i,g}^{I_1} + D_{i,g}^{I_2} \qquad \forall i,g$$
$$D_{i,g}^T = D_{i,g}^L + D_{i,g}^I \qquad \forall i,g$$

○ 수소생산 제약조건

$$P_g^T = \sum_p\sum_j P_{p,j,g} \qquad \forall g : j = Medium, Large$$
$$P_g^T = \sum_i C_{i,g}^T \qquad \forall g$$
$$\sum_p P_{p,j,g} = D_g^F \qquad \forall p,j : j = Small$$
$$PCap_{p,j}^{\min} \times NP_{p,j,g} \le P_{p,j,g} \le PCap_{p,j}^{\max} \times NP_{p,j,g} \qquad \forall g,p,j$$
$$\sum_j P_{p,j,g} = \sum_i\sum_{jj} C_{p,jj,i,g} \qquad \forall p,g : j = Medium, Large,\ jj = Small, Medium, Large$$
$$NP_{p,j,g} = 0 \qquad \forall p,j,g : p = (Coal\ Gasification, Biomass\ Gasification), j = (small)$$
$$NC_{p,j,i,g} = 0 \qquad \forall p,j,i,g : p = (Coal\ Gasification, Biomass\ Gasification), j = (small)$$

$$NP_{p,j,g} = 0 \qquad \forall p,j,g : p = (Electrolysis), j = (large)$$
$$NC_{p,j,i,g} = 0 \qquad \forall p,j,i,g : p = (Electolysis), j = (large)$$
$$IP_{p,j,g} = 0 \qquad \forall p,j,g : p = (Byproduct)$$

○ 수소 압축·액화과정 제약조건

$$C_{i,g}^{T} = \sum_{l}\sum_{g'} QH_{i,l,g',g} \qquad \forall i,g$$
$$C_{i,g}^{T} = \sum_{p}\sum_{j} C_{p,j,i,g} \qquad \forall i,g$$
$$CCap_{p,j,i}^{\min} \times NC_{p,j,i,g} \le C_{p,j,i,g} \le CCap_{p,j,i}^{\max} \times NC_{p,j,i,g} \qquad \forall p,j,i,g$$

○ 중앙집중형 수소저장소 제약조건

$$\sum_{l}\sum_{g'} QH_{i,l,g',h} = \sum_{l}\sum_{g'} QH_{i,l,h,g'} + D_{i,h}^{L} \qquad \forall i,h$$
$$QH_{i,l}^{\min} \times XH_{i,l,h,g'} \le QH_{i,l,h,g'} \le Q_{i,l}^{\max} \times XH_{i,l,h,g'} \qquad \forall i,l,h,g'$$
$$S_{i,h}^{T} = \beta \times \sum_{l}\sum_{g'} QH_{j,i,g',h} \qquad \forall i,h$$
$$S_{i,h}^{T} = \sum_{j} S_{j,i,h} \qquad \forall i,h$$
$$SCap_{j,i}^{\min} \times NS_{j,i,h} \le S_{j,i,h} \le SCap_{j,i}^{\max} \times NS_{j,i,h} \qquad \forall j,i,g$$
$$SCap_{j,i}^{\min} \times NS_{j,i,h} \le S_{i,h}^{T} \le SCap_{j,i}^{\max} \times NS_{j,i,h} \qquad \forall j,i,h$$

○ 도시 간 수소이송 제약조건

$$Q_{i,l}^{\min} \times XR_{i,l,g,g'} \le QR_{i,l,g,g'} \le Q_{i,l}^{\max} \times XR_{i,l,g,g'} \qquad \forall i,l,g,g'$$
$$X_{i,l,g,g'} \le Y_{i,g} \qquad \forall i,l,g,g'$$
$$X_{i,l,g',g} \le Z_{i,g} \qquad \forall i,l,g,g'$$
$$Y_{i,g} + Z_{i,g} \le 1 \qquad \forall i,g$$

○ 초기 설비 제약조건

$$NC_{p,j,i,g} = NC_{p,j,i,g}^{0} + IC_{p,j,i,g} \qquad \forall p,j,i,g$$
$$NP_{p,j,g} = NP_{p,j,g}^{0} + IP_{p,j,g} - SDP_{p,j,g} \qquad \forall p,j,g$$
$$NS_{j,i,g} = NS_{j,i,g}^{0} + IS_{j,i,g} \qquad \forall j,i,g$$
$$0 \le SDP_{p,j,g} \le NP_{p,j,p}^{0} \qquad \forall p,j,g$$

○ 수소 에너지원 수입 제약조건

$$I_{e,g} = 0 \qquad \forall e,g : e = (NG), g = 'No\ LNG\ therminal'$$
$$I_{e,g} = 0 \qquad \forall e,g : e = (Coal, Biomass), g = 'No\ port'$$
$$I_{e,g} = 0 \qquad \forall e,g : e = (Elect)$$

○ 철도 수송 제약조건

$$XH_{i,l,g,g'} \le RW_{g,g'} \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_1 \cup i_2, l = (CH2rail, LH2rail)$$

$$XR_{i,l,g,g'} \le RW_{g,g'} \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_1 \cup i_2, l = (CH2rail, LH2rail)$$

○ 수소 저장 및 이송방식 조합의 제약조건

$$XH_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_1,\ l = (LH2truck, LH2rail, pipeline)$$

$$XR_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_1,\ l = (LH2truck, LH2rail, pipeline)$$

$$XH_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (CH2truck, CH2rail, LH2truck, LH2rail)$$

$$XR_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (CH2truck, CH2rail, LH2truck, LH2rail)$$

$$XH_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_2,\ l = (CH2truck, CH2rail, pipeline)$$

$$XR_{i,l,g,g'} = 0 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_2,\ l = (CH2truck, CH2rail, pipeline)$$

○ 배관망 연결 제약조건

$$XH_{i,l,g,g'} = \sum_d W^H_{i,d,g,g'} \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (pipeline)$$

$$XR_{i,l,g,g'} = \sum_d W^R_{i,d,g,g'} \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (pipeline)$$

$$\sum_d W^H_{i,d,g,g'} \le 1 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (pipeline)$$

$$\sum_d W^R_{i,d,g,g'} \le 1 \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (pipeline)$$

$$V_{i,g} = \sum_d W^L_{i,d,g} \qquad \forall i,l,g : i = i_6, l = (pipeline)$$

$$V_{i,g} = 0 \qquad \forall i,g : i = i_4 \cup i_5$$

$$Q^{\min}_{i,l} \times V_{i,g} \le D^T_{i,g} \le Q^{\max}_{i,l} \times V_{i,g} \qquad \forall i,l,g : i = i_6$$

○ 배관 내 Hydraulics 관련 제약조건

$$QH_{i,l,g,g'} \le \sum_d (\widehat{QH}_{d,g,g'} \times W^H_{i,d,g,g'}) \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (pipeline)$$

$$QR_{i,l,g,g'} \le \sum_d (\widehat{QR}_{d,g,g'} \times W^R_{i,d,g,g'}) \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (pipeline)$$

$$QH_{i,l,g,g'} \le \sum_d (\overline{Q_d} \times W^H_{i,d,g,g'}) \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (pipeline)$$

$$QR_{i,l,g,g'} \le \sum_d (\overline{Q_d} \times W^R_{i,d,g,g'}) \qquad \forall i,l,g,g' : i = i_3,\ l = (pipeline)$$

$$D^T_{i,g} \le \sum_d (\hat{Q}^L_d \times W^L_{i,d,g}) \qquad \forall i,l,g : i = i_6$$

$$D^T_{i,g} \le \sum_d (\overline{Q_d} \times W^L_{i,d,g}) \qquad \forall i,l,g : i = i_6$$

○ 탄소배출 제약조건 (필요시)

$$CO2E \le (specific\ value, kgCO_2/day)$$

4. 100만 명 규모 도시의 수소 네트워크 최적화 결과

○ 주어진 수소 네트워크 최적화 문제는 목적함수와 제약조건이 선형이고 연속 변수와 정수 변수가 혼합된 형태인 Mixed-Integer Linear Programming(MILP)임

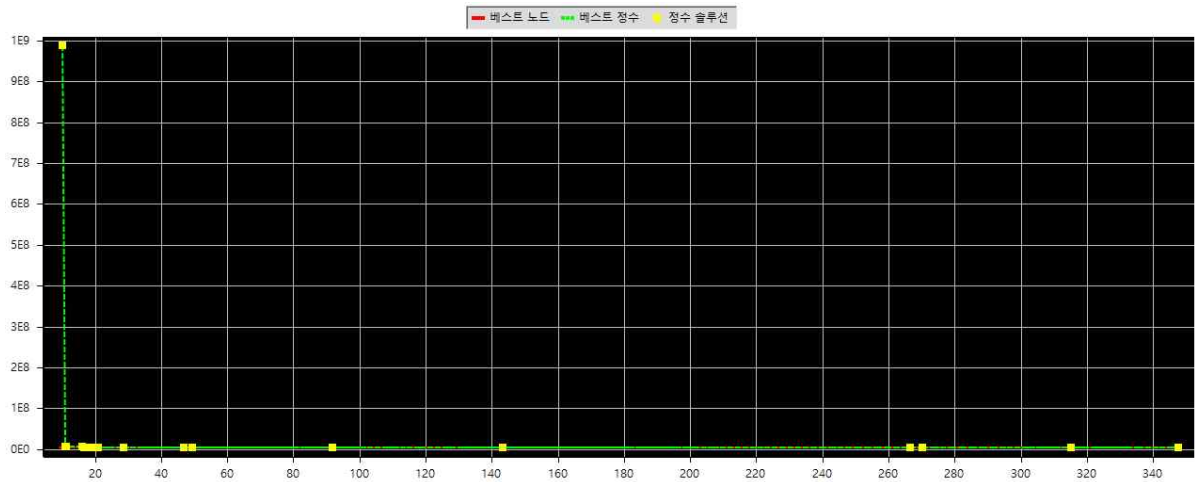
○ LP(Linear Programming)와 MILP의 최적해를 찾는 최적화 Solver로 알려진 CPLEX로 해당 네트워크 최적화 문제를 풀었으며, CPLEX가 내장된 상용 소프트웨어로 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.8을 사용함

○ CPLEX로 정의한 해당 네트워크 문제의 제약조건 및 변수 개수, 수렴조건을 <표 3.68>, 그래프화한 수렴결과를 <그림 3.38>에 나타냄

<표 3.68. 도시 간 수소네트워크 최적화 문제의 제약조건 및 변수 통계>

제약조건	변수			계수	반복계산	계산노드	Optimal Gap
	이진수	정수	연속변수				
36,901	15,550	2,970	9,850	118,817	6,507,990	143,898	0.07%

○ 2030년 수소 수요량 시나리오에 대한 중앙집중형 수소저장 수소네트워크 최적화의 공급 방식 결과를 <표 3.69>, 비용 결과 요약을 <표 3.70>, 최적해를 <표 3.71> - <표 3.73> 에 제시함



<그림 3.38. 도시 간 수소 네트워크 문제(LH_2 도입 모델)의 최적해 수렴결과>

<표 3.69. 중앙집중형 수소 저장소 모델 수소 네트워크의 최적 수소 공급방식 결과>

도시		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	합계
발전용 수요	(kgH_2/d)	9,129	2,444	2,209	1,643	1,250	1,070	779	219	150	1,039	19,932
차량용 수요		117,764	51,627	59,174	44,369	25,246	25,025	21,038	4,953	3,479	18,976	371,651
On-site	(kgH_2/d)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

수소충전소 수요												
Off-site 생산 수요 (kg/d)	Pathway1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway3	76,355	0	0	0	0	0	0	0	3,629	20,015	100,000
	Pathway4	50,537	54,071	61,382	46,012	26,496	26,095	21,817	5,172	0	0	291,582
	Pathway5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
도시 내 Off-site 생산 수요 (kg/d)	Pathway1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway3	76,355	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76,355
	Pathway4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
타 도시 Off-site 생산 수요 (kg/d)	Pathway1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway3	0	0	0	0	0	0	0	0	3,629	20,015	23,645
	Pathway4	50,537	54,071	61,382	46,012	26,496	26,095	21,817	5,172	0	0	291,582
	Pathway5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<표 3.70. 중앙집중형 수소 저장소 모델 수소 네트워크 최적화 비용 결과 요약>

구분	비용	일일 비용	단위비용	비율		비고
	($) 또는 ($/d)	($/d)	($/kgH$_2$)	(%)		
총 일일 비용	3,724,842	3,724,842	9.512	100.00		-
에너지원 구매/운송비용	888,736	888,736	2.270	23.86	23.86	수입가격 및 국내운송비 포함
생산시설 투자비	553,966,276	151,772	0.388	4.07	8.68	On-site 수소충전소 비용 포함
생산시설 조업비	171,434	171,434	0.438	4.60		On-site 수소충전소 비용 포함
압축·냉각시설 투자비	697,710,640	191,154	0.488	5.13	15.19	-
압축·냉각시설 조업비	374,696	374,696	0.957	10.06		-
저장시설 투자비	817,648,452	224,013	0.572	6.01	10.02	Off-site 공급수소
저장시설 조업비	149,269	149,269	0.381	4.01		Off-site 공급수소
트럭/철도이송 투자비	55,739,714	15,271	0.039	0.41	2.23	배관망 비용 제외
트럭/철도이송 조업비	67,801	67,801	0.173	1.82		배관망 비용 제외
배관망 투자비	131,805,328	36,111	0.092	0.97	1.16	-
배관망 유지보수비	7,222	7,222	0.018	0.19		-
수소충전소 총 비용	1,447,364	1,447,364	3.696	38.86	38.86	발전용 연료전지 비용 제외

<표 3.71. 중앙집중형 수소 저장소 모델 수소 네트워크의 생산·압축·액화·저장단계 최적해>

생산단계				
생산기술	규모	도시	시설수	생산량(kgH$_2$/d)

천연가스개질	중규모	서울특별시	1	100,000	
천연가스개질	중규모	인천광역시	2	291,582	
압축 및 액화단계					
Conditioning	규모	도시	시설수	처리량(kgH_2/d)	이송
압축	중규모	서울특별시	1	100,000	가스배관
액화	중규모	서울특별시	2	291,582	탱커트럭
저장단계					
도시 간 이송	도시 내 이송	규모	도시	시설수	저장량(kg)
(도시 내 생산)	150cm내경배관	대규모	서울특별시	1	1,000,000 CH_2
액화탱커트럭	액화탱커트럭	대규모	(인천->) 수원	1	2,915,819 LH_2
합 계					3,915,819

<표 3.72. 중앙집중형 수소 저장소 모델 수소 네트워크의 이송단계 최적해>

생산지-저장시설 이송			
생산시설 도시	저장시설 도시	이송수단	이송량(kgH_2/d)
서울특별시	서울특별시	150cm내경배관	100,000
인천광역시	경기도 수원시	액화탱커트럭	291,582
합 계			391,582
도시 간 이송			
공급도시	수요도시	이송수단	이송량(kgH_2/d)
서울특별시	충청남도 서산시	15cm내경배관	3,629
	경기도 수원시	50cm내경배관	20,015
경기도 수원시	서울특별시	액화탱커트럭	50,537
	인천광역시	액화탱커트럭	61,382
	울산광역시	액화탱커트럭	21,817
	전라남도 여수시	액화탱커트럭	5,172
	부산광역시	액화탱커철도	54,071
	대구광역시	액화탱커철도	46,012
	대전광역시	액화탱커철도	26,496
	광주광역시	액화탱커철도	26,095
합 계			315,226

<표 3.73. 중앙집중형 수소 저장소 모델 수소 네트워크의 에너지원 공급 최적해>

해외 에너지원 수입			
에너지원	수입도시		수입량(kg/d)
천연가스	인천광역시		1,506,024
도시 간 에너지원 이송			
에너지원	공급도시	수요도시	이송량(kg/d)
천연가스	인천광역시	서울특별시	384,600

○ 2030년 수소 수요량 시나리오에 대한 분산형 수소저장 수소네트워크 최적화의 공급 방식 결과를 <표 3.74>, 비용 결과 요약을 <표 3.75>, 최적해를 <표 3.76> - <표 3.78>에 제시함

<표 3.74. 분산형 수소 저장소 모델 수소 네트워크의 최적 수소 공급방식 결과>

도시		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	합계
발전용 수요	(kgH_2/d)	9,129	2,444	2,209	1,643	1,250	1,070	779	219	150	1,039	19,931
차량용 수요		117,764	51,627	59,174	44,369	25,246	25,025	21,038	4,953	3,479	18,976	371,651
On-site 수소충전소 수요	(kgH_2/d)	0	0	0	0	0	0	2,000	0	0	500	2,500
Off-site 생산 수요 (kg/d)	Pathway1	0	0	0	46,012	26,496	26,095	0	0	0	0	98,603
	Pathway2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway4	126,893	54,071	61,382	0	0	0	19,817	5,172	3,629	19,515	290,479
	Pathway5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
도시 내 Off-site 생산 수요 (kg/d)	Pathway1	0	0	0	0	26,496	0	0	0	0	0	26,496
	Pathway2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway4	126,893	0	0	0	0	0	0	0	3,629	0	130,522
	Pathway5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
타 도시 Off-site 생산 수요 (kg/d)	Pathway1	0	0	0	46,012	0	26,095	0	0	0	0	72,107
	Pathway2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway4	0	54,071	61,382	0	0	0	19,817	5,172	0	19,515	159,957
	Pathway5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pathway7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<표 3.75. 분산형 수소 저장소 모델 수소 네트워크 최적화 비용 결과 요약>

구분	비용	일일 비용	단위비용	비율		비고
	($) 또는 ($/d)	($/d)	($/$kgH_2$)	(%)		
총 일일 비용	4,078,938	4,078,938	10.417	100.00		-
에너지원 구매/운송비용	890,846	890,846	2.275	21.84	21.84	수입가격 및 국내운송비 포함
생산시설 투자비	553,966,276	151,772	0.388	3.72	7.90	On-site 수소충전소 비용 포함
생산시설 조업비	170,339	170,339	0.435	4.18		On-site 수소충전소 비용 포함
압축·냉각시설 투자비	714,451,472	195,740	0.500	4.80	14.11	-
압축·냉각시설 조업비	380,000	380,000	0.970	9.32		-
저장시설 투자비	1,435,561,549	393,305	1.004	9.64	17.85	Off-site 공급수소
저장시설 조업비	334,603	334,603	0.854	8.20		Off-site 공급수소
트럭/철도이송 투자비	62,303,487	17,069	0.044	0.42	2.43	배관망 비용 제외
트럭/철도이송 조업비	82,240	82,240	0.210	2.02		배관망 비용 제외
배관망 투자비	0	0	0.000	0.00	0	-
배관망 유지보수비	0	0	0.000	0.00		-
수소충전소 총 비용	1,463,024	1,463,024	3.736	35.87	35.87	발전용 연료전지 비용 제외

<표 3.76. 분산형 수소 저장소 모델 수소 네트워크의 생산·압축·액화·저장단계 최적해>

생산단계					
생산기술	규모	도시	시설수	생산량(kgH_2/d)	
천연가스개질	소규모	울산광역시	4	2,000	
천연가스개질	소규모	경기도 수원시	1	500	
천연가스개질	중규모	서울특별시	1	150,000	
천연가스개질	중규모	대전광역시	1	98,603	
천연가스개질	중규모	충청남도 서산시	1	140,479	
압축 및 액화단계					
Conditioning	규모	도시	시설수	처리량(kgH_2/d)	이송
압축	중규모	대전광역시	1	98,603	튜브트레일러
액화	중규모	서울특별시	1	150,000	탱커트럭
액화	중규모	충청남도 서산시	1	140,479	탱커트럭

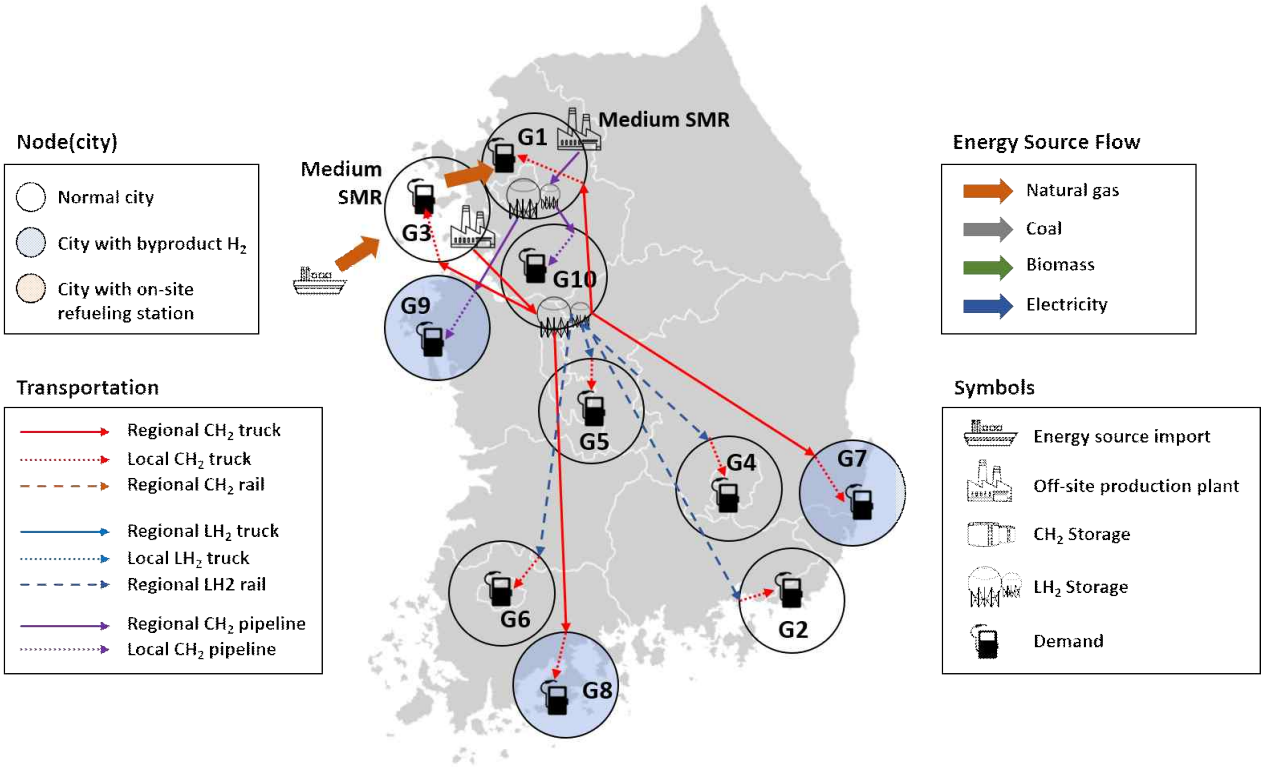
저장단계					
도시 간 이송	도시 내 이송	규모	도시	시설수	저장량(kg)
액화탱커트럭	액화탱커트럭	소규모	울산광역시	2	198,165 LH_2
액화탱커트럭	액화탱커트럭	소규모	전라남도 여수시	1	51,719 LH_2
액화탱커트럭	액화탱커트럭	소규모	충청남도 서산시	1	36,292 LH_2
액화탱커트럭	액화탱커트럭	소규모	경기도 수원시	2	195,154 LH_2
튜브철도차량	튜브트레일러	중규모	대구광역시	1	460,118 CH_2
(도신 내 생산)	튜브트레일러	중규모	대전광역시	1	264,961 CH_2
튜브철도차량	튜브트레일러	중규모	광주광역시	1	260,948 CH_2
액화탱커트럭	액화탱커트럭	중규모	서울특별시	2	1,268,929 LH_2
액화탱커트럭	액화탱커트럭	중규모	부산광역시	1	540,709 LH_2
액화탱커트럭	액화탱커트럭	중규모	인천광역시	1	613,824 LH_2
합 계					3,890,819

<표 3.77. 분산형 수소 저장소 모델 수소 네트워크의 이송단계 최적해>

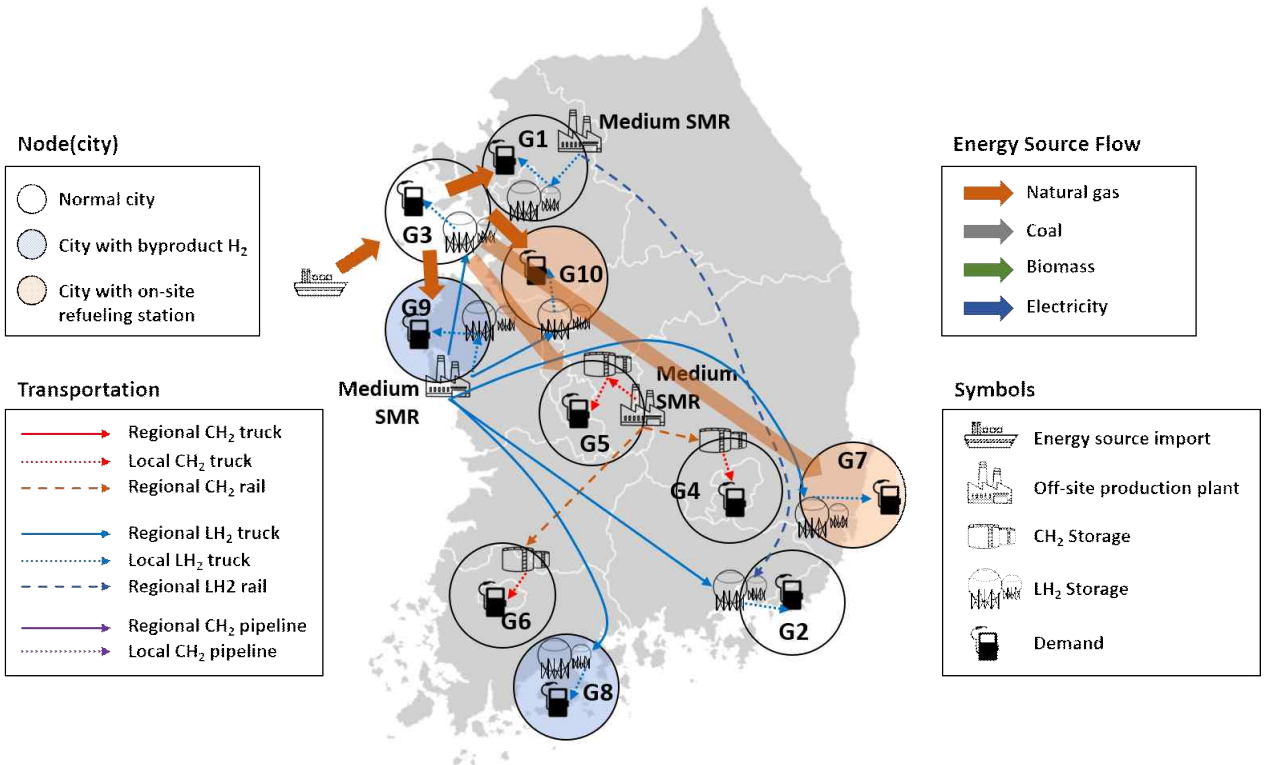
도시 간 이송			
공급도시	수요도시	이송수단	이송량(kgH_2/d)
대전광역시	대구광역시	튜브철도차량	46,012
	광주광역시	튜브철도차량	26,095
충청남도 서산시	부산광역시	액화탱커트럭	30,964
	인천광역시	액화탱커트럭	61,382
	울산광역시	액화탱커트럭	19,817
	전라남도 여수시	액화탱커트럭	5,172
	경기도 수원시	액화탱커트럭	19,515
서울특별시	부산광역시	액화탱커철도	23,107
합 계			232,064

<표 3.78. 분산형 수소 저장소 모델 수소 네트워크의 에너지원 공급 최적해>

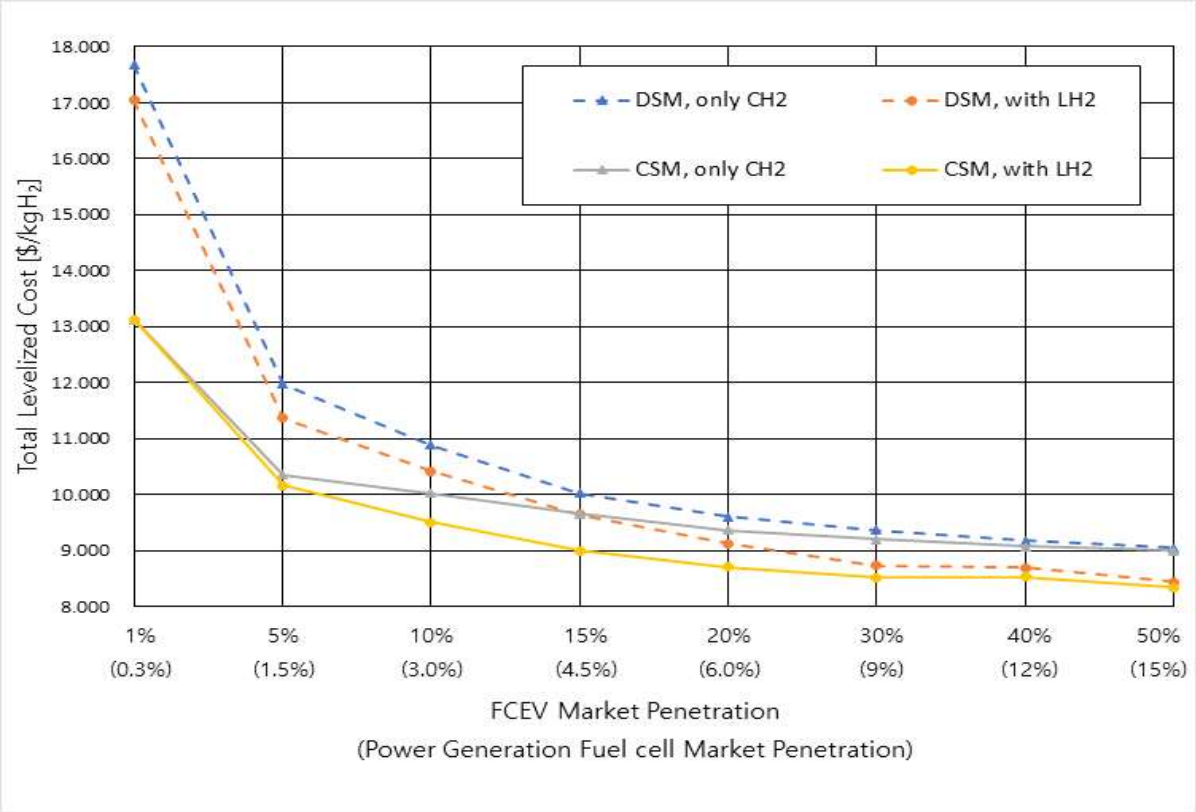
해외 에너지원 수입			
에너지원	수입도시		수입량(kg/d)
천연가스	인천광역시		1,506,792
도시 간 에너지원 이송			
에너지원	공급도시	수요도시	이송량(kg/d)
천연가스	인천광역시	서울특별시	576,900
천연가스	인천광역시	대전광역시	379,226
천연가스	인천광역시	울산광역시	8,306
천연가스	인천광역시	충청남도 서산시	540,283
천연가스	인천광역시	경기도 수원시	2,076



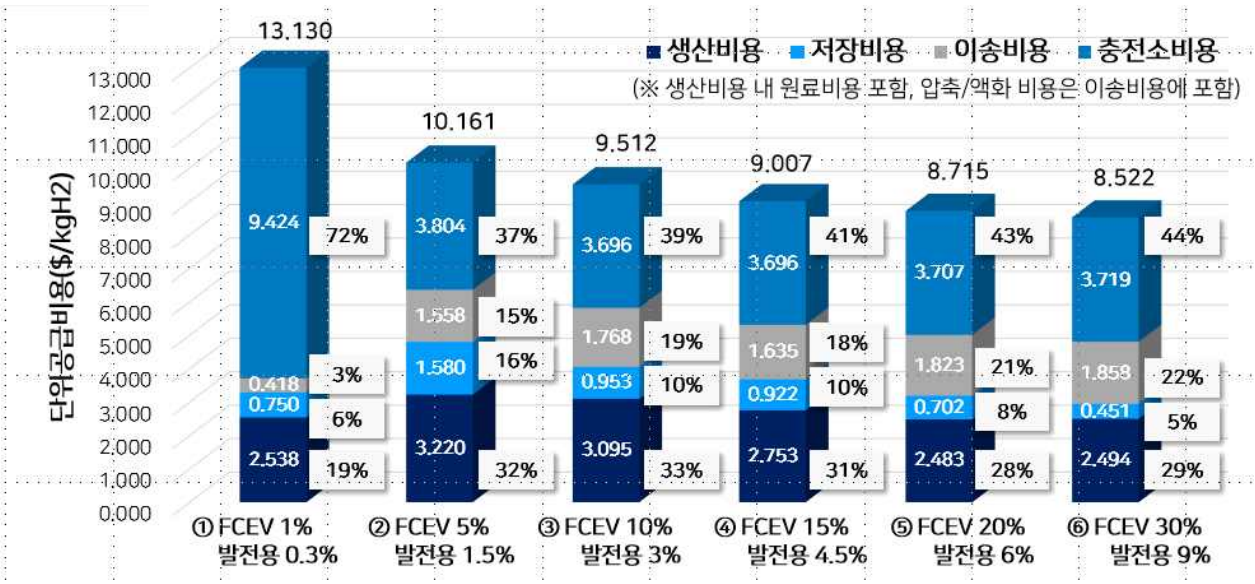
<그림 3.39. 2030년 시나리오에서 중앙집중형 저장소 모델의 수소네트워크 최적해 요약도>



<그림 3.40. 2030년 시나리오에서 분산형 저장소 모델의 수소네트워크 최적해 요약도>



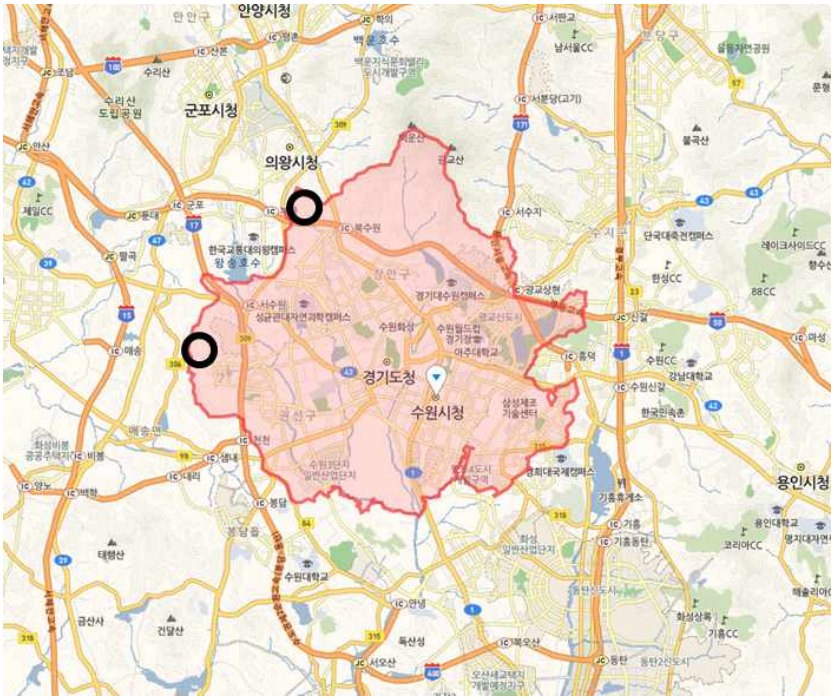
<그림 3.41. CSM(CH_2/LH_2), DSM(CH_2/LH_2) 네트워크 모델의 수요증가에 대한 단위공급비용 변화>



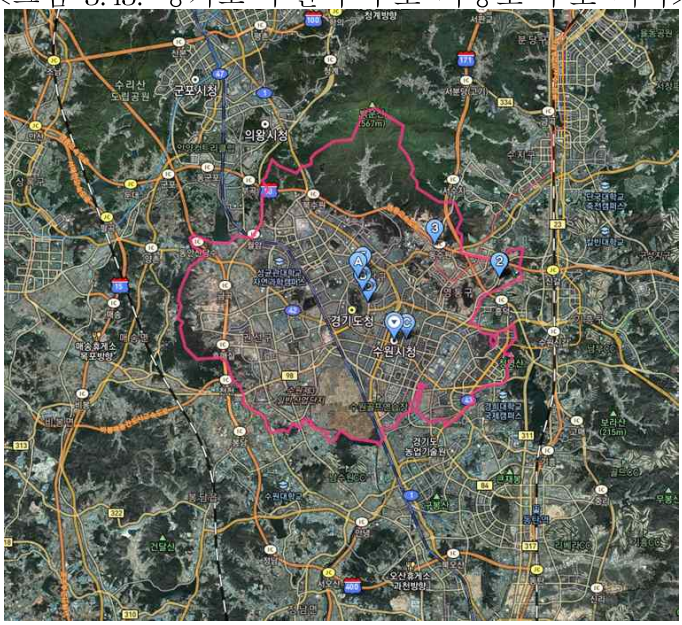
<그림 3.42. 수소 네트워크 모델의 수요증가에 대한 단위공급비용 변화 민감도 분석>

다. 100만 명 규모 도시 내 수소저장소의 위치선정

○ 100만 명 규모 도시 중 서울특별시와 경기도 수원시의 경우 분산형 수소 저장소의 후보지임. 그러나 서울특별시의 경우 인구밀도가 너무 높고 대규모의 수소 저장을 할 수 있는 충분한 공간이 확보되지 않으므로 후보지에서 제외하고자 함. 경기도 수원시의 모습은 <그림 3.42>와 같음. 경기도 수원시 수소 저장소 후보지는 <그림 3.43>와 같음.



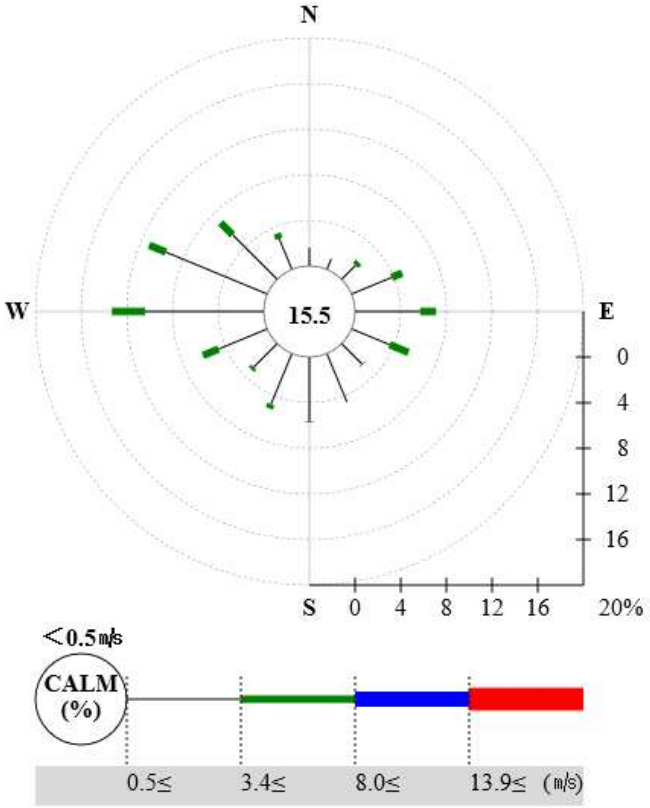
<그림 3.43. 경기도 수원시 수소 저장소 후보 지역>



<그림 3.42. 경기도 수원시 지도>

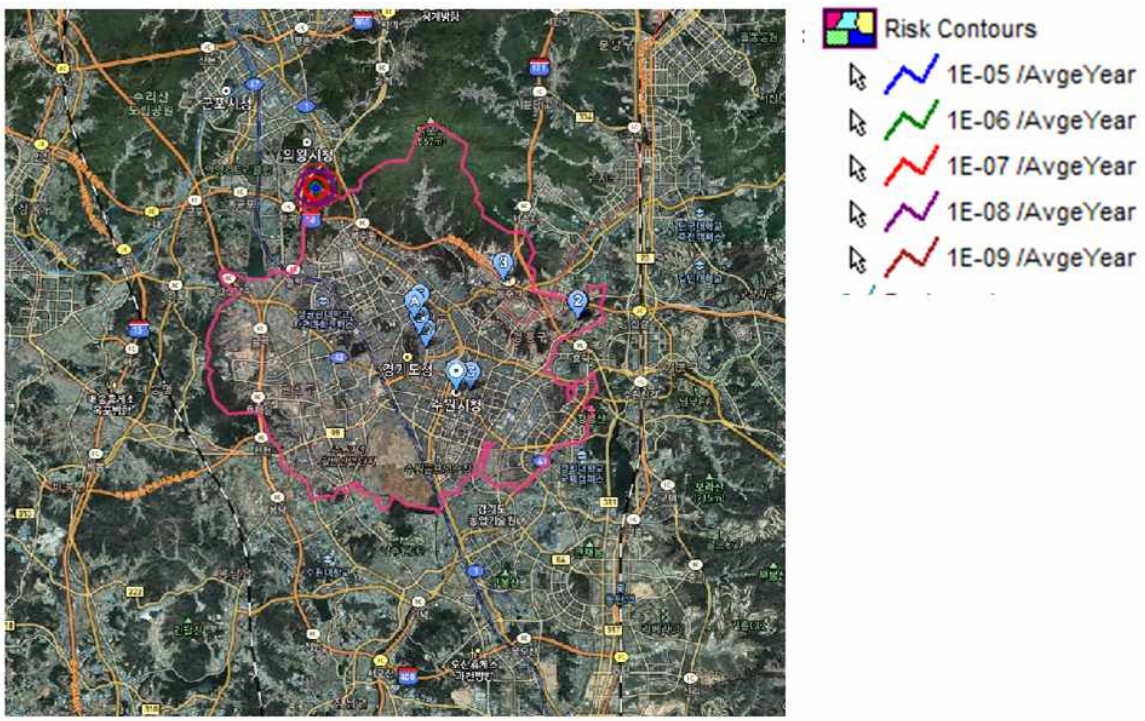
○ 5만 명 규모의 도시의 수소 저장소 위치 선정과 마찬가지로 100만 명 규모의 경기도 수원시 풍속 및 풍향의 빈도를 나타내는 바람장미의 그림을 <그림 3.44>과 같이 나타냄

○ <그림 3.45>은 후보지 1의 IR 결과를 나타낸 것임. 후보지 1의 결과를 확인하였을 때 수원시 자체에는 위험도가 높지 않으나 해당 지역 인근에 의왕시에 피해 정도가 나타남을 확인할 수 있었음

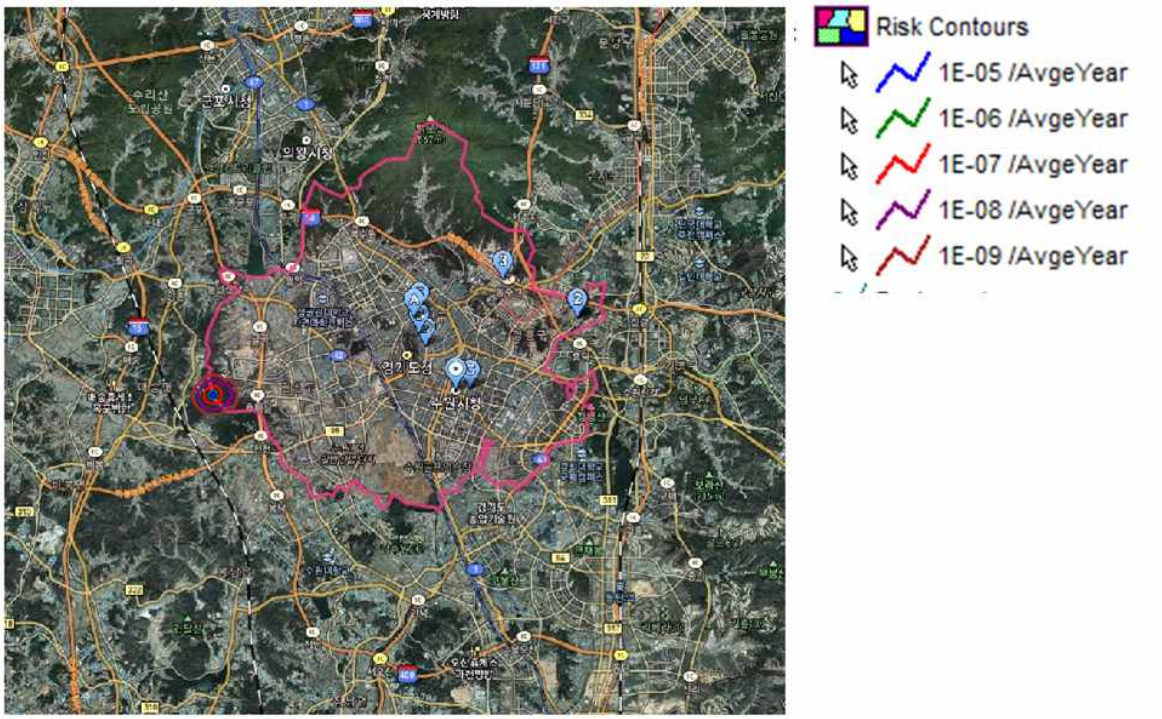


<그림 3.44. 경기도 수원시 바람장미(2018년)>

○ <그림 3.46>는 후보지 2의 IR 결과를 나타낸 것으로 인근 지역에 수소 저장소를 설치하였을 때 IR의 연간 인구사망률이 가장 높은 곳이 10^{-5}명/year로 나타남. 이 때 인근 지역에 인구가 상주하는 부분이 없는 것으로 확인됨

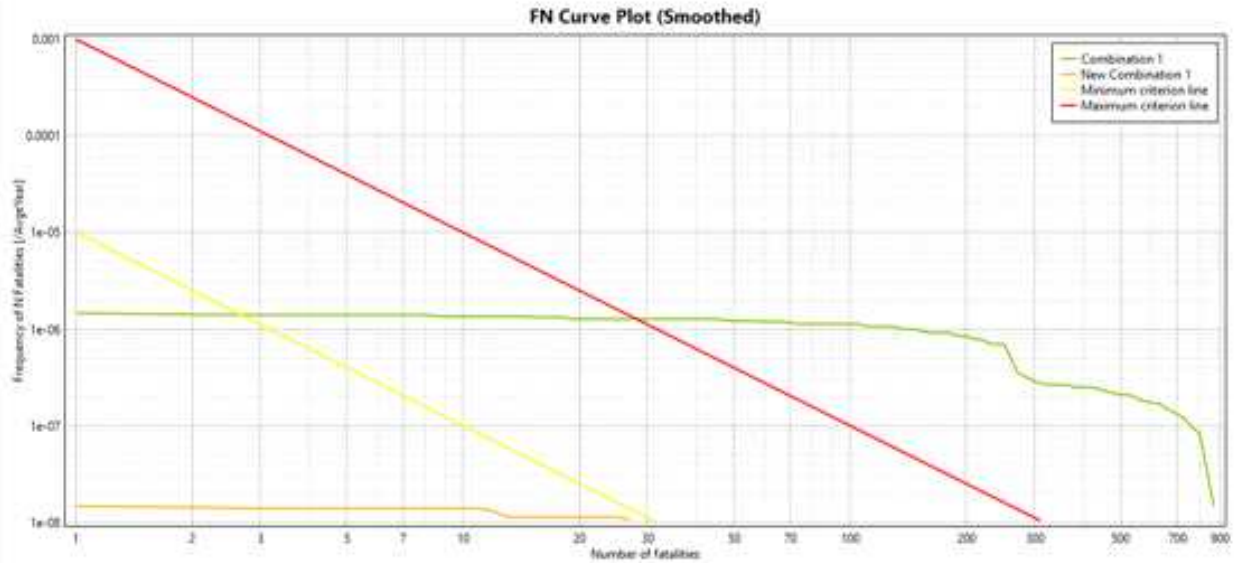


<그림 3.45. 경기도 수원시 수소 저장소 후보지 1의 IR 결과>



<그림 3.46. 경기도 수원시 수소 저장소 후보지 1의 IR 결과>

○ <그림 3.47>는 경기도 수원시의 수소 저장소 후보지 두 곳의 SR의 정도를 그래프로 나타냄. 후보지 1의 위험성이 후보지 2의 위험성보다 100배 정도 위험한 것으로 확인됨. 위험성 평가 결과 경기도 수원시에는 후보지 2에 수소 저장소를 설치하는 것이 보다 안전한 것으로 확인됨.



<그림 3.47. 경기도 수원시 수소 저장소의 SR 결과>

5. 발전 및 차량용 수소 공급 공정 모델 시뮬레이션

○ 발전용 수소 공정 모델의 경우 저압으로 작동하는 수소 이송 공정 모델임. 본 모델의 경우는 수소를 별도로 냉각시키는 장치나 설비는 존재하지 않고, 오직 정압기에서 1차 감압 및 2차 감압이 이루어지며, 특징적인 것은 정제된 고순도의 수소가 유입됨. 수소를 이송시킬 때를 제외하고 별도의 에너지가 빠져나가는 부분은 발생하지 않음. 답사와 자료조사 결과 발전용 수소 충전소의 경우 아래와 같은 조건을 만족하며, 이 조건을 가지고 발전용 수소 충전소의 공정 모델링을 수행함.

■ 배관압력 : 평균 15bar(석유화학단지발)
■ 1차 조정기 공급압력 : 15bar
■ 2차 조정기 공급압력 : 7bar
■ 밸브 2개 존재
■ 배관 정보

○ 고압, 저압배관 : KSD 3562 50A-SCH40(A106-PLP)
○ 조정기 내부 배관 : body SUS 316L / Diaphragm SUS 316L

그림 3.48. 개략도

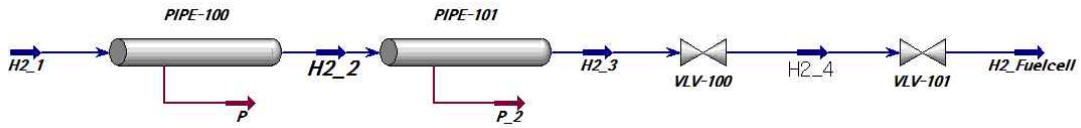


그림 3.49. 차량용 수소 충전소의 공정 모델링

Material Streams						
		H2_1	H2_2	H2_3	H2_4	H2_Fuelcell
Vapour Fraction		1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Temperature	C	20.00	20.00	20.00	19.97	19.94
Pressure	bar	15.00	14.72	14.72	7.000	0.5004
Molar Flow	kgmole/h	12.40	12.40	12.40	12.40	12.40
Mass Flow	kg/h	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Liquid Volume Flow	m3/h	0.3579	0.3579	0.3579	0.3579	0.3579
Heat Flow	kW	-0.4954	-0.4954	-0.4954	-0.4954	-0.4954

그림 3.50. 발전용 수소 충전소의 HMB

○ 답사와 자료조사 결과 차량용 단독 수소 충전소의 경우 아래와 같은 조건을 만족함. 이 조건을 가지고 차량용 수소 충전소의 공정 모델링을 수행함.

■ 튜브 트레일러 압력 : 평균 100bar
■ 충전 디스펜서 압력 : 700bar(일반차량)
■ 충전 디스펜서 내 온도 : 15℃
■ 파이프 내 수소의 선속도 : < 20m/s
■ 압축기 1개, Brine Cooler system 1개

○ Tube trailer 와 High Pressure Storage 로부터의 수소는 700 bar 용 차량 충전에 사용됨. 현재 350bar 버스는 국내에서 운영되지 않으므로 실질적으로 Mid/Low Pressure Storage 로부터의 흐름은 존재하지 않음.

○ 각 파이프의 크기는 수소의 선속도를 20m/s 이하를 기준으로 결정되었으며, 이는 파이프 내 소음과 부식을 방지하기 위함임.

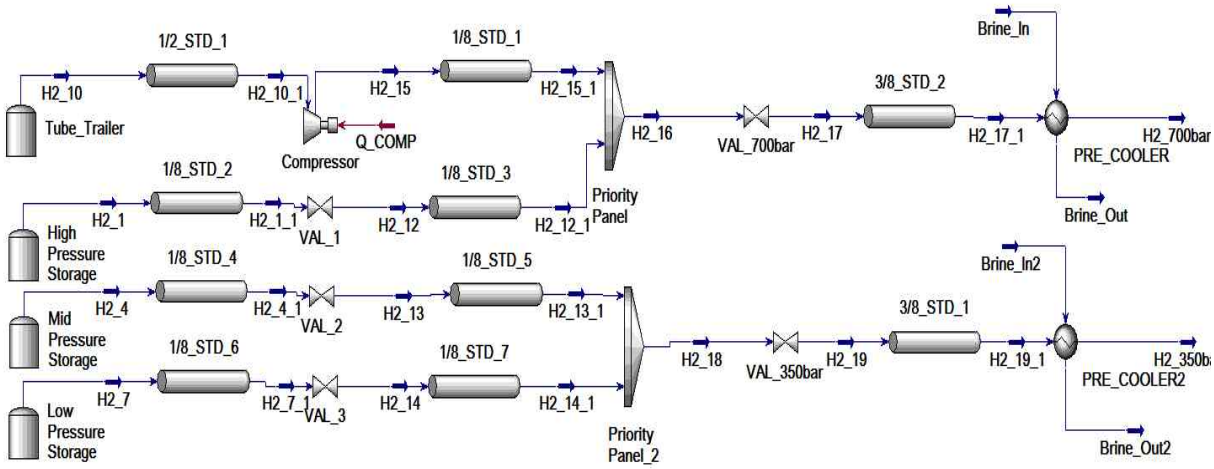


그림 3.51. 차량용 수소 충전소의 공정 모델링

○ 수소 충전소에서 작동하는 유체인 수소의 경우 HMB(Heat and Material Balance)는 아래 그림과 같음. 분석 결과 압축기 내에서 압력이 상승하는 만큼 내부 온도가 상승하게 된음. 이 때 온도 상승은 수소가 자연발화할 수 있는 상태에 근접해지고, 또한 충전을 시키기 위한 조건 700bar, 15℃를 만족해야 하므로 냉각시스템인 칠러를 사용하여 고온고압 상태의 수소를 냉각시킴. 수소의 자연발화 온도의 경우는 다음과 같음.

	Unit	H2_1	H2_4	H2_7	H2_10	H2_12	H2_13	H2_14	H2_15	H2_16
Vapour Fraction		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Temperature	C	122.2	25.0	25.0	25.0	122.3	25.0	25.0	389.8	255.9
Pressure	bar	940.0	420.0	420.0	100.0	938.8	419.3	419.3	939.9	938.1
Molar Flow	kgmole/h	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	24.8

	Unit	H2_17	H2_18	H2_19	Brine_In	Brine_Out	Brine_In2	Brine_Out2	H2_350 bar	H2_700 bar
Vapour Fraction		1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
Temperature	C	270.7	25.1	28.9	-40.0	-15.0	-40.0	-15.0	15.9	15.2
Pressure	bar	700.0	419.1	350.0	700.0	699.5	700.0	699.5	349.2	699.3
Molar Flow	kgmole/h	24.8	24.8	24.8	90.4	90.4	5.0	5.0	24.8	24.8

	Unit	H2_1_1	H2_4_1	H2_7_1	H2_10_1	H2_12_1	H2_13_1	H2_14_1	H2_15_1	H2_17_1	H2_19_1
Vapour Fraction		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Temperature	C	122.2	25.0	25.0	25.0	122.3	25.1	25.1	389.9	270.7	28.9
Pressure	bar	939.3	419.8	419.8	99.9	938.1	419.1	419.1	938.9	699.8	349.7
Molar Flow	kgmole/h	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	24.8	24.8

표 3.79. 차량용 수소충전소의 HMB

Table 5.1 Explosion properties of flammable gases and vapours in air at atmospheric conditions

gas or vapour	flammability limits[1)] (vol.%)	auto-ignition temperature (C)	maximum laminar burning velocity (m/s)	heat of combustion[2)] (MJ/m^3)
methane	5.0-(9.5)-15.0	595	0.448	3.23
ethane	3.0-(5.6)-15.5	515	0.476	3.39
propane	2.1-(4.0)- 9.5	470	0.464	3.46
ethene	2.8-(6.5)-28.6	425	0.735	3.64
butane	1.3-(3.1)- 8.5	365	0.449	3.48
propene	2.0-(4.4)-11.0	455	0.512	3.59
hydrogen	4.0-(29.5)-75.6	560	3.25	3.01
cyclohexane	1.2-(2.3)- 8.3	260	0.440	3.85

그림 3.52. 수소와 탄화수소 물질의 특성

○ 배관망을 이용한 차량용 수소충전소의 공급 모델을 구성하기 위해 상용 공정모사 소프트웨어인 HYSYS를 이용하여 압축/감압/배관/냉각 등의 공정모델을 시뮬레이션 함

○ <표 3.80>은 설계한 배관망의 최대허용압력손실(100kPa 미만), 허용유속범위(0.3m/s 이상, 30m/s 미만)에 해당하는지 확인하여 허용치를 벗어난 Segment의 수로 모델으 정확도를 산출함

○ <표 3.81>는 감압밸브의 허용온도하강 범위를 벗어나지 않는 감압밸브의 수를 구하여 모델의 정확도를 산출함.

○ <표 3.82>은 압축기와 냉각기의 온도변화를 나타냄. 압축 일 계산결과는 최적화모델에 사용한 압축공정 모델과 비교하고 냉각기는 최종 공급온도와의 비교를 통해 모델의 정확도를 산출함

표 3.80. 수소충전소 공정모델의 Hydraulics

Pipe Segment	배관내경 (mm)	배관길이 (m)	압력손실 (kPa)	배관 내 유속 (m/s)	허용치 초과
1/2_STD_1	18.57	100	6.43	3.365	X
1/8_STD_1	8.56	100	92.20	4.431	X
1/8_STD_2	8.56	100	70.17	3.072	X
1/8_STD_4	11.48	100	22.04	2.512	X
1/8_STD_6	11.48	100	22.04	2.512	X
1/8_STD_3	8.56	100	70.24	3.075	X
1/8_STD_5	11.48	100	22.08	2.516	X
1/8_STD_7	11.48	100	22.08	2.516	X
3/8_STD_2	14.83	100	24.47	3.202	X
3/8_STD_1	14.83	100	26.34	3.518	X
정확도 [=1 - (압력손실 및 유속 허용범위 초과 Segment 수)/(전체 Segment 수)]					100%

표 3.81. 수소충전소 공정모델의 감압밸브

Valve	압력강하 (kPa)	질량유량 (kg/hr)	유속 (m/s)	입구온도 (°C)	출구온도 (°C)	온도하강 (°C)	허용치 초과
VAL_1	50.00	25	0.090	122.22	122.25	0.03	X
VAL_2	50.00	25	0.132	25.01	25.04	0.03	X
VAL_3	50.00	25	0.132	25.01	25.04	0.03	X
VAL_700bar	23809.59	50	0.220	255.95	270.69	14.74	X
VAL_350bar	6905.88	50	0.265	25.05	28.90	3.84	X
정확도 [=1 - (허용치 초과 온도하강 Valve 수)/(전체 Valve 수)]							100%

표 3.82. 수소충전소 공정모델의 압축기 일 및 냉각기 온도변화

장치	단열압축 일 (kW)	HYSYS 공정모델 일 (kW)	냉각기 최종배출온도 (°C)	HYSYS 공정모델 배출온도(°C)	정확도 (%)
압축기	38.40	41.83	-	-	84.6
냉각기 (700bar)	-	-	15.00	15.20	98.7
냉각기 (350bar)	-	-		15.87	94.5
평균 오차율					95%

제 4절. 수소 네트워크의 안전성 평가 및 유지관리 기법

1. 수소 에너지 시설 안전성 평가

○ 모든 원소 중에서 가장 간단한 구조를 갖고 있는 수소는 미래의 탄화수소 연료를 대체할 수 있는 청정 에너지원으로써 관심을 받으며 현재 많은 연구와 투자가 이루어지고 있음. 수소의 경우, 자연 상태에서는 대부분이 혼합물로 존재하는 반응성이 높은 물질이나 저온상태에서는 반응성이 낮고 촉매가 없으면 상온에서 안정된 상태로 존재함. 특히, 수소는 발열량이 석유보다 약 3배가량 높기 때문에 적절한 조건으로 통제하면서 수소를 연소시키면 일반 가정에서도 에너지원으로 이용할 수 있음. 그러나 수소는 금속을 녹이는 성질을 갖고 있으며 폭발범위가 넓고 화염의 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스이기 때문에 수소가스의 제조, 저장, 이송 등의 작업시 누출사고로 인한 화재나 폭발사고가 발생 할 수 있는 높은 위험성을 갖고 있음. 이러한 수소의 위험성은 취급시설이나 공정의 안전을 확보하는데 있어서 아주 중요하며 위험성을 확인할 수 있는 대표적인 특성치는 폭발한계(Explosive limit), 인화점(Flash point), 최소자연발화점(Auto Ignition Point, AIT), 최소산소농도(Minimum Oxygen Concentration, MOC), 최소발화에너지(Minimum Ignition Energy, MIE), 연소열(Heat of Combustion) 등으로

확인 할 수 있음.

○ 화석연료 에너지의 사용비중은 아직까지 국내뿐만 아니라 국제적으로도 높은 사용 비중을 차지하고 있음. 특히, 수소는 높은 증기압으로 인해 저장 및 운반 시 고압상태로 취급됨에 따라 관련설비의 제작 및 설치에 있어서 고난위도의 기술 적용에 따른 높은 비용이 소요됨. 이러한 주요 이유로 인해 국내에서는 수소를 석유 화학플랜트에서 반응 등을 위해 일부 사용하는 용도 외에는 현재, 크게 사용하지 않고 있으며 일반 에너지원으로 사용하기 위해서 국내 에너지 관련기관과 기업이 수소관련 연구와 실증을 진행 중에 있음.

<표 4.1. 수소, 메탄 그리고 가솔린의 위험성 비교>

Properties	Hydrogen	Methane	Petrol
Ignition limits in air (vol%)	4-75	5.3-15	1.0-7.6
Detonation limits in air (vol%)	13-65	6.3-13.5	1.1-3.3
Minimum ignition energy in air(mJ)	0.02	0.29	0.24
Heat of combustion (kJ/g)	120	50	44.5
Self-ignition temperature (℃)	585	540	228-501
Flame temperature (℃)	2,045	1,875	2,200
Theoretical explosion energy (kgTNT/㎥)	2.02	7.03	44.22
Diffusion coefficient in air (㎠/s)	0.61	0.16	0.05

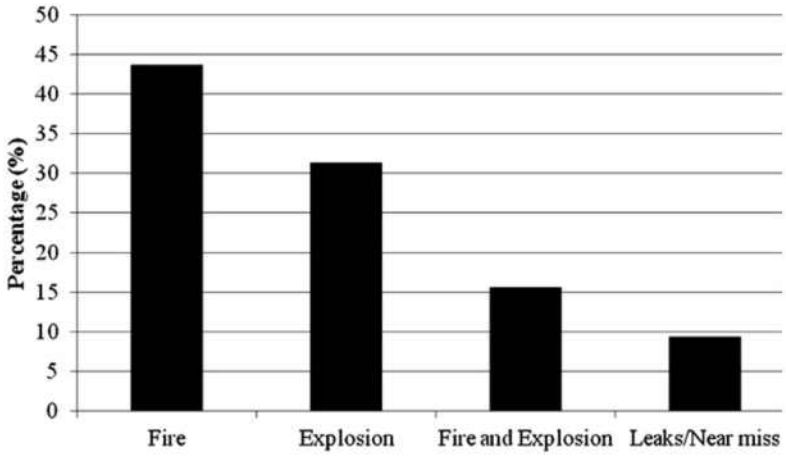
○ 이러 상황들로 인해, 국내에서 발생된 수소 사고는 실효적으로 조사 및 분석되어 데이터베이스화 되지 않고 있음. 이에 Pacific Northwest National Laboratory(미국)에서 운영하고 있는 수소 저장 및 이송관련 설비 등에서 발생된 사고 데이터베이스인 Hydrogen Incident Reporting Database(HIRD)를 통해 주요 수소 사고사례를 조사・분석 함.

○ 과거에 발생된 사고를 기반으로 사고원인과 예방대책에 대해 학습하는 것은 누구나 인정하는 아주 효과적인 접근 방법임. HIRD는 이를 위해 구축된 수소사고 관련 데이터베이스로 194건(2011.5.16.일 기준).의 사고에 대해 기록하고 있으며 다음과 같은 장점들이 존재함.

■ 순수한 수소와 관련된 사고기록을 다룸
■ 사고의 기술적 정보가 정밀하게 잘 정리되어 전문가의 사고이해가 잘됨.
■ 사고 시나리오에 따른 여러 원인이 정리되어 있음.
■ 사고결과를 사망, 재해 그리고 재산피해로 구분하여 나타냄
■ 사고 인해 얻을 수 있는 교훈에 대해 제시함.
■ 사고를 밸브, 배관, 저장용기 등과 같은 장치류로 분류하고 있어 쉽게 확인이 가능하며 공정에서 가장 취약한 점에 대해 예측할 수 있도록 도움을 줌.
■ 사고 날짜를 제시함에 따라 사고의 빈도를 쉽게 예측할 수 있도록 함.
■ 데이터베이스는 규칙적으로 갱신됨.

○ 여기서는 총 194건의 수소 사고 중 주요 사고를 구분하여 32건을 선정하고 이에 대해

분석함. 그 결과 수소누출 사고 발생시 사고의 43.7%가 화재이고 31.3%가 폭발 그리고 15.6%가 화재 및 폭발이었으며 단순히 누출로 끝나는 경우는 9.4% 밖에 되지 않음.



<그림 4.1. HIRD의 주요 사고 32건에 대한 사고유형>

○ 앞에서 수소 누출사고에 따른 사고유형 중 화재사고가 가장 많이 발생하는 이유는 표8에서 나타낸 바와 같이 넓은 폭발범위와 낮은 점화에너지에 따른 것으로 분석됨. 또한, 사고의 원인은 다음과 같이 5가지 분류됨.

A. 관리적 원인(Management) : 플랜트 책임자의 잘못된 결정이나 조치 또는 태만

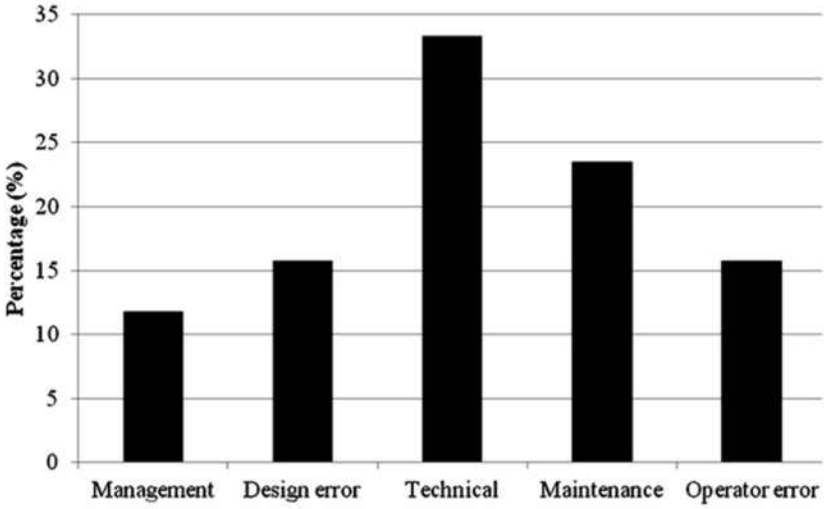
B. 설계오류(Design error) 원인 : 플랜트 시운전 또는 그 이후 사고로 전이된 모든 설계적 결함

C 기술적 원인(Technical) : 플랜트 가동중 기술부서 직원의 잘못된 장치설치나 결정으로 인해 발생된 사고의 모든 원인

D. 유지보수 원인(Maintenance) : 유지보수 작업 중 나타나는 모든 원인

E. 운전원 실수(Operator error) 원인 : 사고를 발생시킨 운전원의 잘못된 조치

○ 사고원인에 대해 위의 5가지로 분류하여 분석한 결과, 가장 근본적인 원인은 기술적 원인으로 33.3%에 해당되었으며 이는 작업현장에서 이루어지는 잘못된 판단에 대해 제어나 수정이 되지 않는다는 것으로 이해할 수 있음. 그리고 유지보수 원인은 23.5%, 설계오류와 운전원 실수는 각각 15.7%, 마지막으로 관리적 원인은 11.8%에 불과한 것으로 나타남



<그림 4.2. HIRD의 주요 사고 32건에 대한 사고원인 분석>

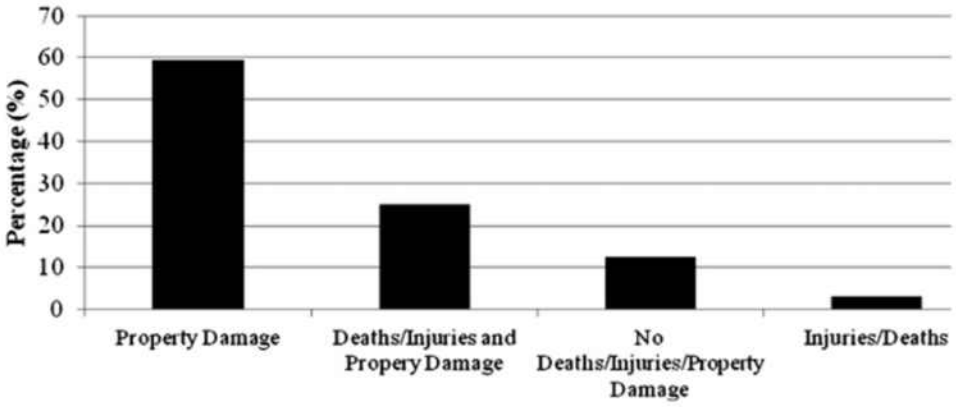
○ 앞에서 제시한 내용을 기반으로 사고원인을 1차적 원인과 2차적 원인으로 구분하여 더욱더 정밀하게 분석한 결과 <표 4.2> 와 같이 나타남

<표 4.2. 수소 사고의 1차 및 2차적 원인 분석>

사고원인	1차적 원인 (%)	2차적 원인 (%)	전체 기여도
기술적	23.5	9.8	33.3
유지보수	9.8	13.7	23.5
설계 결함	13.7	2.0	15.7
운전원 실수	13.7	2.0	15.7
관리	2.0	9.8	11.8

○ 위 표을 통해 가장 심각한 1차 사고원인은 기술적, 설계결함, 운전원 실수임을 알 수 있으며 유지보수의 원인은 1차와 2차 원인으로 유사하게 나타나는 반면 관리적 원인은 2차적 원인이 1차 원인보다 높은 것으로 나타남.

○ 마지막으로 수소사고로 인한 사고결과에 대해 분석하였으며 결과는 그림. 78 에 제시함. 수소누출 사고 발생한 경우 59.4%가 재산상의 피해를 입었고 25%는 사망이나 재해와 같은 인명 및 재산상의 피해를 입었음. 그리고 그 어떤 피해도 발생하지 않은 사고는 12.5%였으며 플랜트 근로자가 사망하거나 재해만 입은 사고는 3.1%에 해당되었음.



<그림 4.3. 수소 사고의 피해결과 분석>

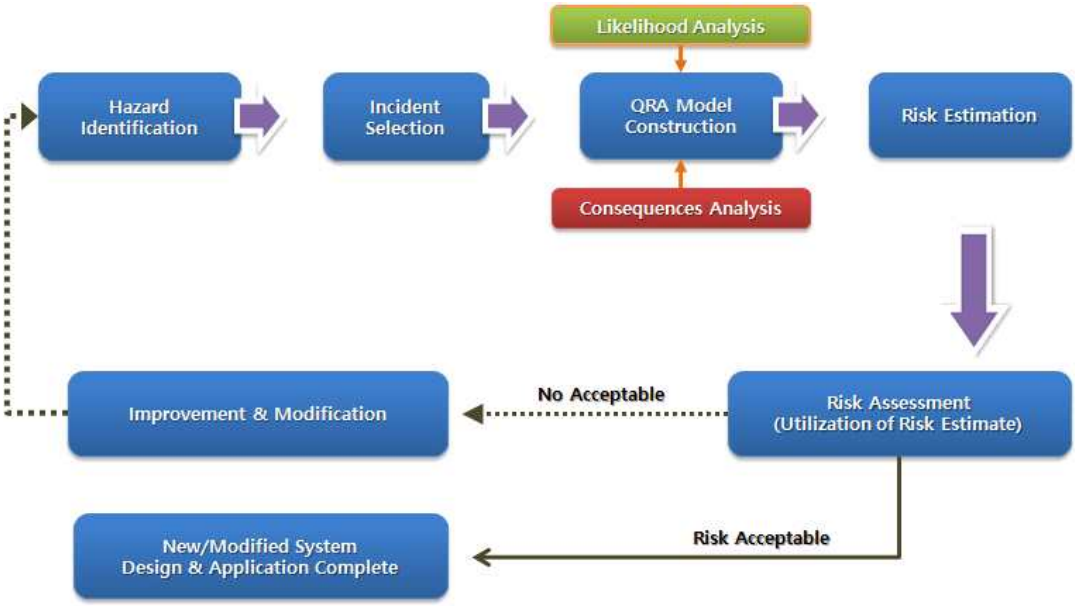
○ 수소는 현재 국내에서 고압가스안전관리법에 따라 고압가스로 분류되어 규제 받고 있으며 일반적으로 수소 충전용기의 압력은 최고 70MPa의 초고압으로 밀폐공간에서 가스가 누출될 경우, 대형 화재나 폭발사고가 발생 할 수 있어 수소를 생산, 수송, 저장하기 위한 네트워크 설계 시 안전이 무엇보다 중요하며 이를 위해서는 안전성 평가를 수행하여야 함.

2. 5만 명 규모 발전용 수소 에너지 시설 정량적 위험성 평가(Quantitative Risk Assessment)

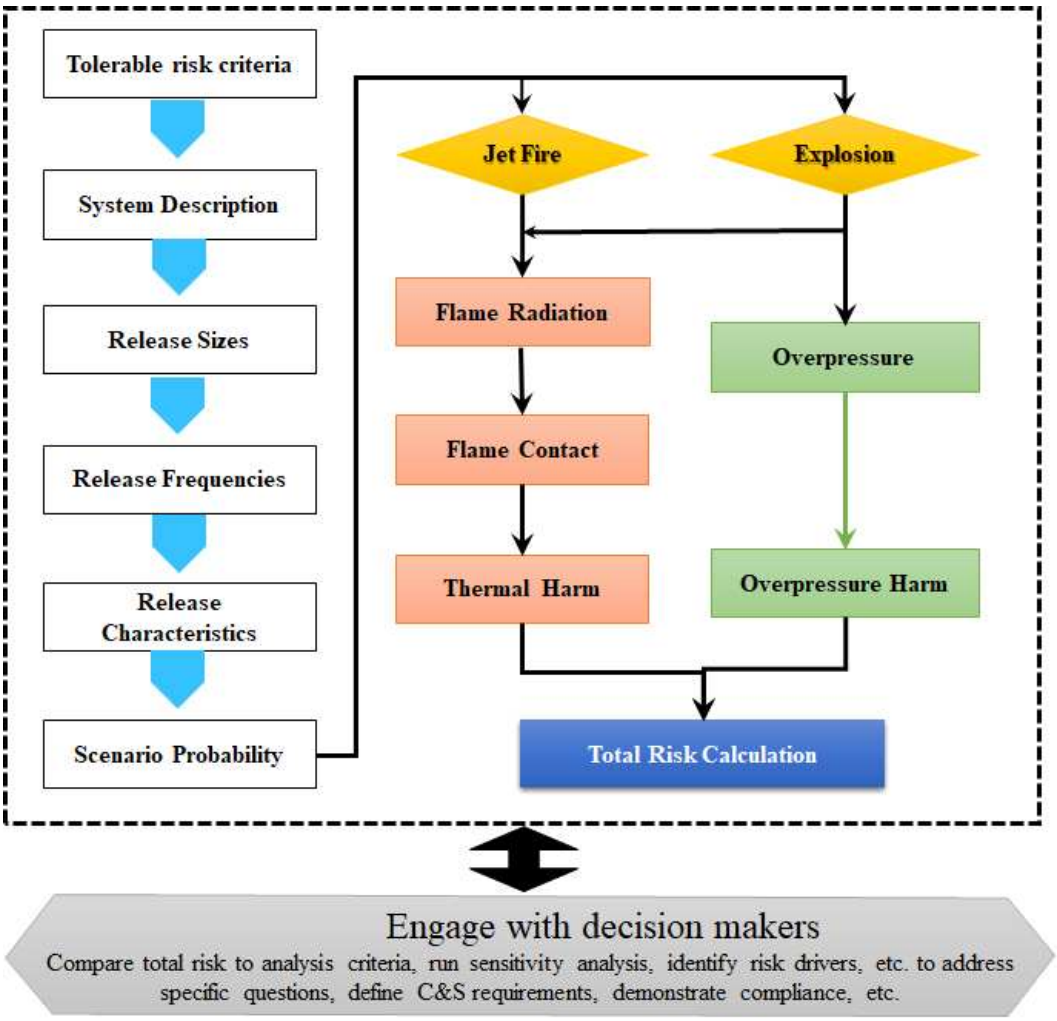
○ 수소수소연료 사용 시 얻을 수 있는 많은 장점들로 인해 최근 수소 공급기지 건설에 많은 관심과 연구가 이루어지고 있음. 그러나 수소를 일반 에너지원으로 사용하기 위해서는 일정규모 이상의 에너지 기반시설들이 요구되는데 이러한 시설들에는 수소의 위험성이 상존함에 따라 허용 가능한 수준의 안전성이 확보되어야 실질적인 에너지원으로써 활용할 수 있음.

○ 수소 에너지 기반시설들과 같은 위험시설에 대한 안전은 안전성 평가를 통해 위험도를 분석함으로써 확보될 수 있음. 이를 위해 제안된 방법이 정량적 위험성평가(Quantitative Risk Assessment, QRA) 즉, QRA로 이 방법은 위험시설에 대한 토지이용 계획과 위험도 감소대책 그리고 안전거리를 결정하는데 수치적으로 계산된 위험도를 기반으로 결정 내릴 수 있도록 하는 도구임. 추가적으로, 이 방법은 정상적인 생산활동 중에 예기치 않게 발생되는 사고의 비상대응조치와 환경허가 기준을 평가하는데도 활용 할 수 있음.

○ 수소 에너지 시설의 QRA 방법론은 EIHP2(European Integrated Hydrogen Project Phase 2)에서 제시하여 국제적으로 적용되고 있으며 이 방법론은 일반적인 QRA 방법론과는 차이가 있음. <그림 4.4>와 <그림 4.5> 이에 대한 각각의 알고리즘을 나타낸 그림으로 <그림 4.4>는 일반적으로 적용되는 QRA 알고리즘이며 <그림 4.5>는 본 연구에서 적용되는 수소 에너지 설비에 적합하게 제안된 알고리즘임.



<그림 4.4. 일반적인 정량적 위험성 평가(QRA) 알고리즘>



<그림 4.5. 수소에 대한 정량적 위험성평가(QRA) 알고리즘>

○ QRA에서는 는 일반적으로 고려해야 주요 위험요소가 있음. 이는 3가지 형태의 위험요소로써 다음과 같음.

가. 1차 대상군(First Party) : 작업장에서의 위험도

나. 2차 대상군(Second Party) : 에너지 시설 사용 고객

다. 3차 대상군(Third Party) : 에너지 주변의 거주자/이동자/작업자

○ 일반 대중에게 있어서 수소 에너지 시설의 주요 관심사는 사람들에게 얼마만큼의 위험을 미칠 수 있는지에 대한 우려를 나타내는 위험도라 할 수 있음. 이러한 위험도는 사고에 의해 노출 될 수 있는 사람을 기준으로 표현되는데 EIHP2 (European Integrated Hydrogen Project Phase 2)는 이러한 각각의 유형에 대해 개인적 위험(IR, individual risk)과 사회적 위험(SR, societal risk)로 구분하여 위험도의 기준을 제시함. 개인적 위험은 일반적으로 수소 에너지시설 주변의 위험도 등고선(contour)으로 표시되어 지리적 위험 (Geographical risk)이라고도 하며 사회적 위험은 사고 (F-N 곡선)의 결과로 인해 한 번에 여러 사망자 (N)가 발생하는 확률 (F)을 나타냄.

○ 수소 에너지 시설의 사고 시나리오는 국내 정부기관에서 제시하고 있는 최악의 경우(KOSHA Guide P-107-2015)에 대한 폭발조건을 기반으로 다음과 같이 작성함.

○ 수소 가스와 관련한 사고 시나리오는 수소가스 정압시설로써 전국에 4개의 위치를 선정하였으며 각각 선정된 위치는 <그림 4.6, 7>과 같음.

가. 선정지역 - 1 : 전남 여수시 소호동 680번지
나. 선정지역 - 2 : 전남 여수시 학용동 361번지
다. 선정지역 - 3 : 울산광역시 동구 방어동 산 16-1번지
라. 선정지역 - 4 : 울산광역시 동구 방어동 18번지

<그림 4.6. 전남 여수지역 수소가스 정압시설 위치>

<그림 4.7. 울산지역 수소가스 정압시설 위치>

○ 수소 에너지 시설의 정압설비는 선정된 4개의 지역 모두 동일하게 설계됨에 따라 정압 시설에서의 수소누출에 따른 사고 시나리오 입력 조건은 다음과 같음.

■ 누출물질 : 수소가스
■ 누출형태 : 누출
■ 누출상태 : 기체
■ 누출직경 : 1차 정압기의 플랜지 이음부 파열(5cm)
■ 운전온도 : 25 ℃
■ 운전압력 : 7 barg
■ 풍속 : 1.5 m/sec
■ 평균온도 : 20 ℃
■ 평균습도 : 70 %
■ 지면의 상태(Roughness) : 시골 지형
■ 대기안정도 : F 등급

<표 4.3. 대기안정도 등급표>

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

A : 매우 불안정함 / B : 약간 불안정함 / C : 약간 불안정함 / D : 중간 / E : 약간

안정함
F : 안정함 / G : 매우 안정함

○ 수소 에너지 시설에서 수소가스가 누출될 경우, 발생될 수 있는 가장 큰 피해는 폭발 피해로 수소가스는 아래 <표 4.4>에서와 같이 연소열이 일반 가스보다 월등히 높기 때문에 폭발 발생 시 다른 가스에 비해 큰 폭발압력을 발생시킨다. 아래 <그림 4.8>은 수소가스 누출 시 발생될 수 있는 피해영향의 결과를 나타낸 Event Sequece Diagram(ESD) 임.

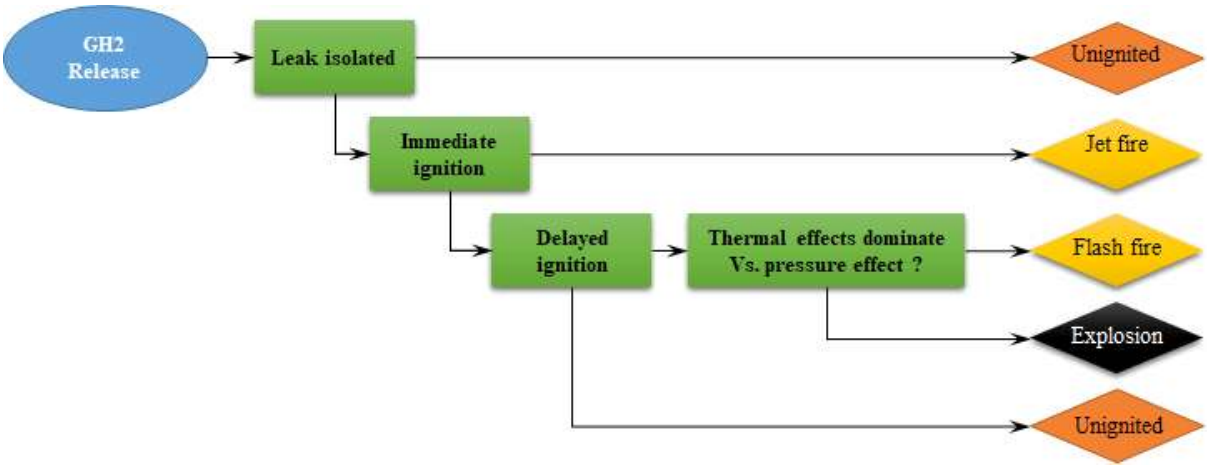
<표 4.4. H2/LNG/LPG의 연소특성>

Item	Hydrogen	LNG	LPG
Heat of Combustion(kJ/kg)	144,000	56,000	50,000

○ 수소 가스의 누출시나리오는 수소에너지 시설 중 1차 정압기에서 2차 정압기로 연결되는 플랜지 이음부의 파열로 누출 빈도는 1.55×10-5(HYRAM, SANDIA National Laboratories)에 해당됨. 또한, 누출로 인해 폭발로 전이될 수 있는 폭발사고 누출빈도는 1.62×10-6으로 계산되었음. <표 4.5>는 폭발사고 누출빈도를 계산하기 위한 점화확률의 값을 나타냄.

<표 4.5. 누출률에 따른 점화확률>

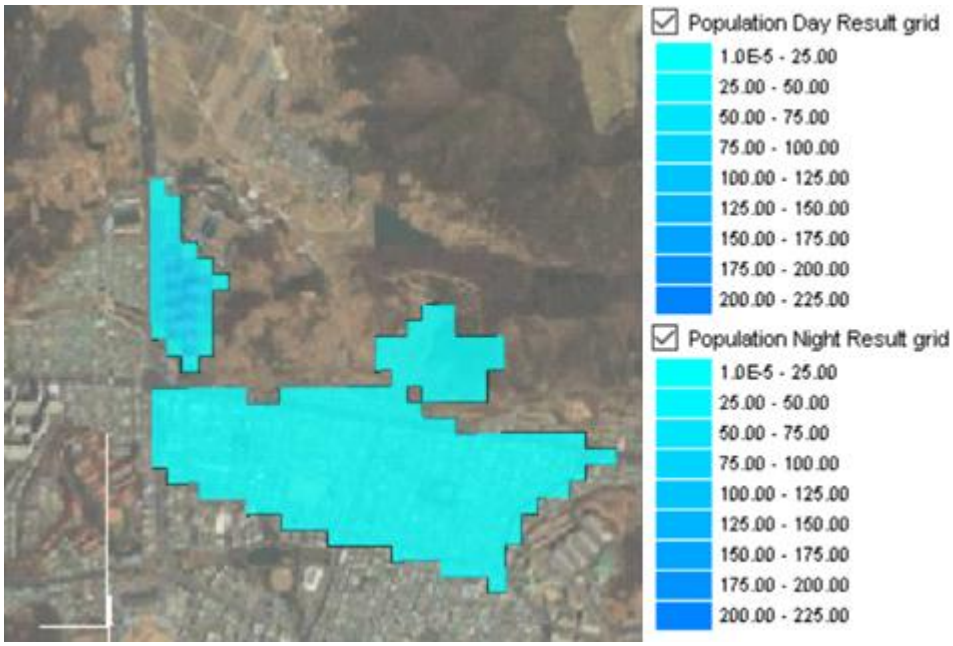
Hydrogen Release Rate(kg/s)	Immediate Ignition Probability	Delay Ignition Probability
< 0.125	0.008	0.004
0.125 - 6.25	0.053	0.027
< 6.25	0.230	0.120



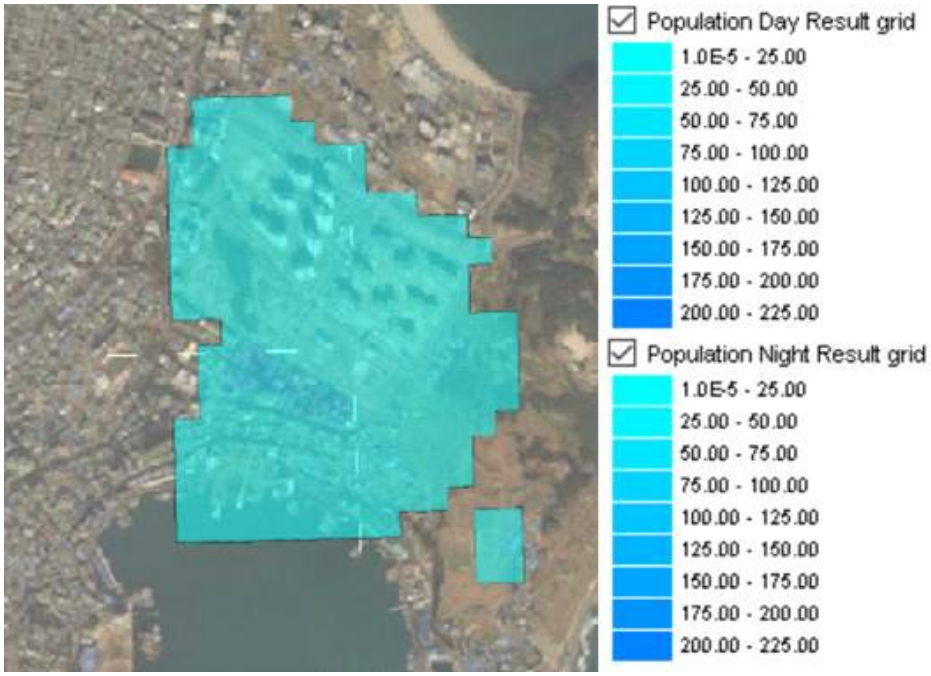
<그림 4.8. 수소누출에 따른 발생 가능한 사고시나리오 ESD(Event Sequence Diagram)>

○ 지역별로 선정된 4개의 정압시설 주변에 거주하는 인구밀도를 각각 분석함. 인구밀도는 지역특성에 따라 주간과 야간의 상주인구가 다르며 하루 중 주간은 06:00 ~ 18:00 그리고 야간은 18:00 ~ 06:00분으로 구분됨. 또한, 사고 발생 시 실내와 실외에 위치한 사람의 피해결과가 다르게 나타남으로 이에 대해서는 국외기준(TNO Purple Book)에 따라 낮에 사람이 실내에 거주 할 확률은 0.93으로 그리고 밤에 실내 거주확률은 0.99로 적용함. 그림. 84~86는 울산지역에 설치되는 정압시설로 설치위치가 근거리에 있어 인구밀도 분포는 동일함.

<그림 4.9. 선정지역 - 1 주변의 인구분포>



<그림 4.10. 선정지역 - 2 주변의 인구분포>



<그림 4.11. 선정지역 - 3, 4 주변의 인구분포>

○ 수소가스 누출로 인한 폭발사고 발생 시 사망자가 발생하지 않는 안전거리는 130m로 수치계산 되었으며 각 선정 위치별 안전거리는 다음과 같음.

가. 선정지역 - 1

<그림 4.12. 선정지역 - 1 지점에서의 안전거리>

나. 선정지역 - 2

<그림 4.13. 선정지역 - 2 지점에서의 안전거리>

다. 선정지역 - 3

<그림 4.14. 선정지역 - 3 지점에서의 안전거리>

라. 선정지역 - 4

<그림 4.15. 선정지역 - 4 지점에서의 안전거리>

○ 수소위험시설을 설치하거나 변경 또는 이전 할 경우, 해당 시설의 사고발생 시 주변에 미치는 피해영향을 리스크로 표현하여 안전성 수준을 평가하고 일정 수준 이상의 안전이 확보될 때 시설을 가동할 수 있도록 의사결정 하는 것이 정량적 위험성평가의 목적임.

○ 정량적 위험성평가의 리스크는 개인적 위험(Individual risk)과 사회적 위험(Societal risk)로 구분하여 표현되며 개인적 위험은 위험원 근처에 있는 사람에 대한 위험성으로 사건 빈도 또는 중상의 빈도로 표현함. 여기서 중요한 사항은 개인적 위험은 사람과 장소를 특정화한다는 것으로 사고가 발생할 때, 전체적인 개인적 위험성은 각 개인이 사고로부터 갖게 되는 개인적 위험을 더하여 계산함. 그리고 사회적 위험은 사고로 인해 피해를 입을 수 있는 사람의 수로 위험시설의 위치와 관련된 리스크 표현방법이라 정의할 수 있음. 사회적 위험의 표현 방법은 F-N곡선(누적된 빈도와 사망자수)으로 나타내며 여기서 강도는 사망자수를 말함. 사회적 위험을 나타내는 F-N 곡선은 각 시나리오 별로 계산된 위험도가 F-N 곡선에 제시된 기준 안에 들어오게 되면 허용 가능한 위험에 해당됨을 나타냄.

○ 사회적 위험의 계산을 위해서는 기후조건과 풍향 그리고 누출원의 종류 등에 따른 세분화된 계산이 필요함. 현실적으로는 실제 조건에 가장 근접한 값을 갖는 대표적인 기후조건, 풍향 그리고 인구 형태를 이용함. 따라서, 피해 지역내 모든 지점 x, y에서 Pf,i(피해 구역 내에서의 사망 확률)는 일정하며, 피해 지역 외에서는 “0”라고 가정하면 사고결과 변수 i 로부터 발생된 사망자수는 식(1)과 같이 표현됨.

$N_i = P_i P_{f,i}$ ----------(1)

N_i = 사고 결과 조건 i에 의해 발생된 사망자 수

P_i = 사고 결과 조건 i에 의해 영향을 받는 지역내 총 사람 수

$P_{f,i}$ = 사고 결과 조건 i에 의해 영향을 받는 지역내에서 사망할 확률

다음으로 식 (2)를 이용해 F-N 곡선을 그릴 수 있도록 누적빈도를 구함.

$F_N = \sum_i F_i$ Ni≥N 인 경우의 모든 사고결과변수 i ----------(2)

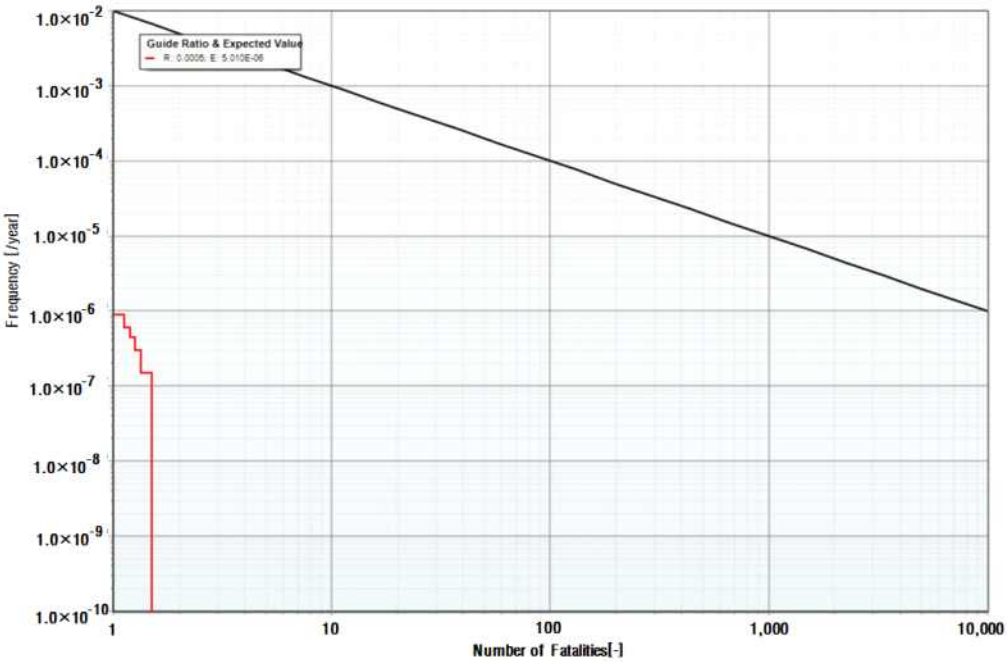
FN = N 또는 그 이상의 사람에게 영향을 미치는 모든 사고결과변수의 빈도

Fi = 사고결과변수 i의 빈도

Ni = 사고결과변수 i의 영향을 받는 사람 수

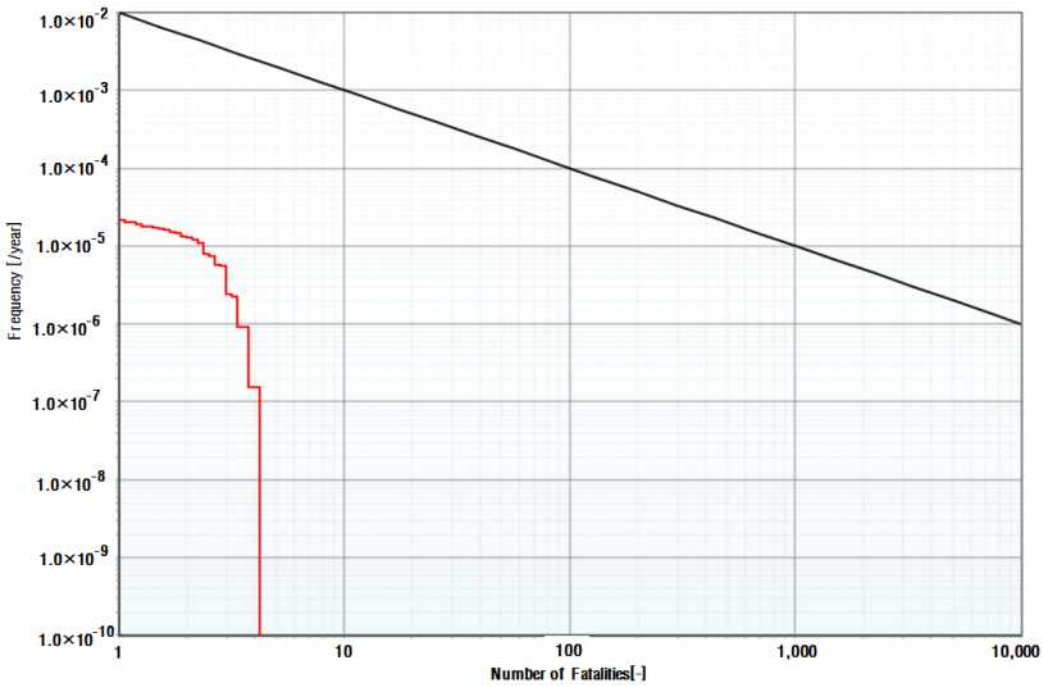
○ 수소사회적 위험 계산 절차는 모든 위험이 산정 될 때까지 계속 반복하여 수행함. 수소사회적 위험의 F-N 곡선 기준은 현재 국내에 제정되어 있지 않음에 따라 국제적으로 활용되는 영국의 기준을 적용하였으며 계산된 각 지역별 사회적 위험 결과는 다음과 같음.

가. 선정지역 - 1



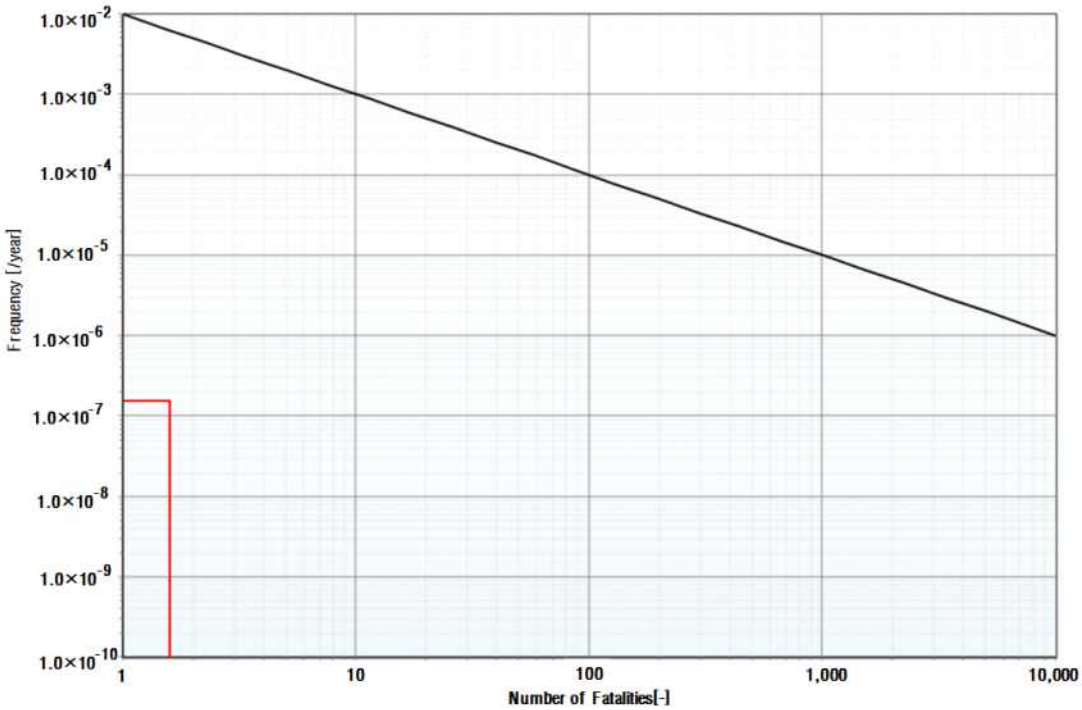
<그림 4.16. 선정지역 - 1의 사회적 위험>

나. 선정지역 - 2



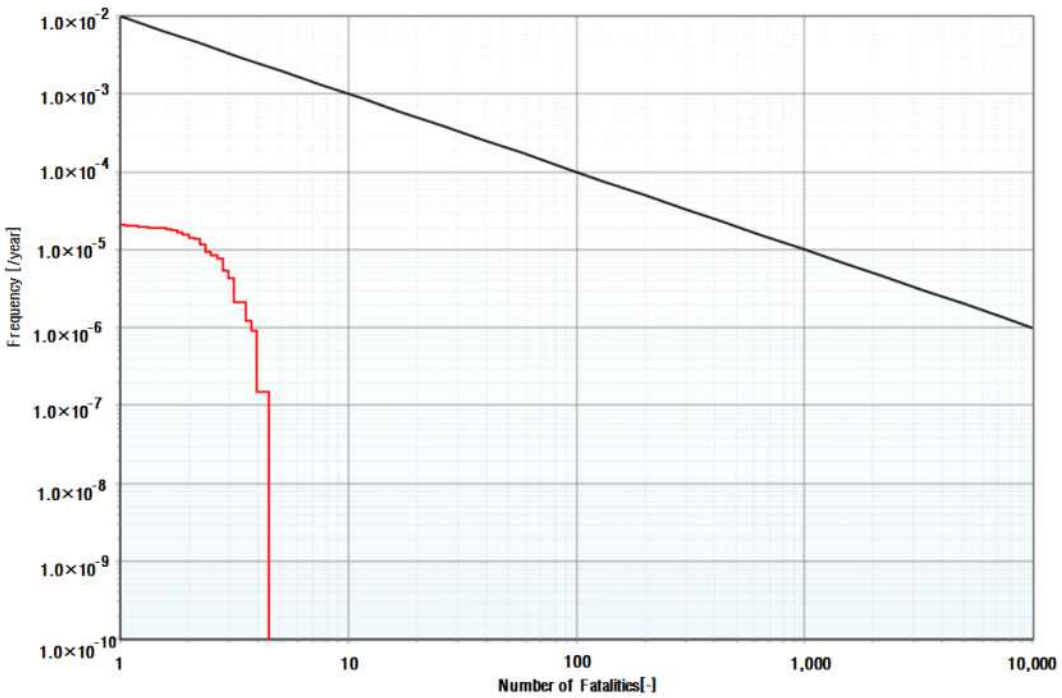
<그림 4.17. 선정지역 - 2의 사회적 위험>

다. 선정지역 - 3



<그림 4.18. 선정지역 - 3의 사회적 위험>

라. 선정지역 - 4



<그림 4.19. 선정지역 - 4의 사회적 위험>

○ 결론적으로 각 지역별 수소저장시설에 대한 정량적 위험성 평가를 수행한 4개의 지점 모두 설계된 정압시설에서 발생할 수 있는 최악의 사고시나리오를 적용한 결과 정압시설의 설치가 가능한 허용가능 수준의 리스크를 갖는 것으로 계산되었음.

○ 수소정압시설에 대한 최악의 시나리오에 추가로 수소배관직경의 50% 크기의 누출공(2.5 cm)에서 발생할 수 있는 수소의 누출 확산을 추가로 계산하였으며, 추가로 최악의 시나리오와 수소배관직경 50% 크기의 누출공 시나리오 조건에 대한 화재 및 폭발 분석을 수행함.

○ 수소화재 및 폭발에 의한 인체 및 시설물들이 받는 영향기준은 CCPS의 Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis 에서 제시하는 기준을 사용하였으며 아래 <그림 4.20, 21>과 같음.

TABLE 2.35. Effects of Thermal Radiation (World Bank, 1985)

Radiation intensity (kW/m^2)	Observed effect
37.5	Sufficient to cause damage to process equipment
25	Minimum energy required to ignite wood at indefinitely long exposures (nonpiloted)
12.5	Minimum energy required for piloted ignition of wood, melting of plastic tubing
9.5	Pain threshold reached after 8 sec; second degree burns after 20 sec
4	Sufficient to cause pain to personnel if unable to reach cover within 20 s. however blistering of the skin (second degree burns) is likely; 0% lethality
1.6	Will cause no discomfort for long exposure

<그림 4.20. 화재에 의한 복사열 피해영향 기준 >

TABLE 2.18a. Damage estimates for common structures based on overpressure (Clancey, 1972). These values should only be used for approximate estimates.

Pressure		Damage
psig	kPa	
0.02	0.14	Annoying noise (137 dB if of low frequency 10–15 Hz)
0.03	0.21	Occasional breaking of large glass windows already under strain
0.04	0.28	Loud noise (143 dB), sonic boom, glass failure
0.1	0.69	Breakage of small windows under strain
0.15	1.03	Typical pressure for glass breakage
0.3	2.07	"Safe distance" (probability 0.95 of no serious damage below this value); projectile limit; some damage to house ceilings; 10% window glass broken
0.4	2.76	Limited minor structural damage
0.5–1.0	3.4–6.9	Large and small windows usually shattered; occasional damage to window frames
0.7	4.8	Minor damage to house structures
1.0	6.9	Partial demolition of houses, made uninhabitable
1–2	6.9–13.8	Corrugated asbestos shattered; corrugated steel or aluminum panels, fastenings fail, followed by buckling; wood panels (standard housing) fastenings fail, panels blown in
1.3	9.0	Steel frame of clad building slightly distorted
2	13.8	Partial collapse of walls and roofs of houses
2–3	13.8–20.7	Concrete or cinder block walls, not reinforced, shattered
2.3	15.8	Lower limit of serious structural damage
2.5	17.2	50% destruction of brickwork of houses
3	20.7	Heavy machines (3000 lb) in industrial building suffered little damage; steel frame building distorted and pulled away from foundations
3–4	20.7–27.6	Frameless, self-framing steel panel building demolished; rupture of oil storage tanks
4	27.6	Cladding of light industrial buildings ruptured
5	34.5	Wooden utility poles snapped; tall hydraulic press (40,000 lb) in building slightly damaged
5–7	34.5–48.2	Nearly complete destruction of houses
7	48.2	Loaded train wagons overturned
7–8	48.2–55.1	Brick panels, 8–12 inches thick, not reinforced,fail by shearing or flexure
9	62.0	Loaded train boxcars completely demolished
10	68.9	Probable total destruction of buildings; heavy machine tools (7000 lb) moved and badly damaged; very heavy machine tools (12,000 lb) survive
300	2068	Limit of crater lip

<그림 4.21. 폭발에 의한 폭발과압 피해영향 기준>

○ 상온 고압의 운전조건을 갖고있는 수소의 경우 누출시 고압으로 인한 제트누출이 발생하여, 누출 즉시 미상의 점화원에 의하여 점화가 이루어질 경우 제트화재가 발생할 수 있음. 최악의 사고시나리오 조건으로 제트화재를 분석한 결과, 20초 이상 노출될 경우 충분한 고통을 느낄 수 있는 복사열수준인 4 kW/m2 의 복사열은 최대 15.98 m 까지 발생하는 것으로 계산되었으며, 목재의 점화에 필요한 최소에너지 및 플라스틱 튜브를

녹일 수 있는 복사열인 12.5 kW/m2 의 복사열은 최대 11.74m 까지 발생하는 것으로 계산되었음. 공정장비들에 충분한 피해를 줄 수 있는 37.5 kW/m2 의 복사열은 발생하지 않는 것으로 계산되었음.

○ 수소의 물리화학적인 특성 중 기체상태의 비중이 매우 낮기 때문에 누출됨과 동시에 대기 중으로 흩어져 폭발분위기를 조성할 수 있는 증기운을 충분히 형성하지 못할 수 있다, 하지만, 순간적인 파열에 의한 누출 및 누출원 주변의 시설 및 장치들에 의한 밀폐정도를 고려할 경우 폭발할 수 있는 증기운이 형성될 가능성이 있음.

○ 증기운폭발 분석을 수행한 결과, 폭발로부터 안전할 수 있는 안전거리의 기준이 되는 0.02 bar의 압력은 폭발원점으로부터 59.3 m 까지 발생하였으며, 구조물의 벽이나 지붕이 부분적으로 붕괴될 수 있는 압력인 0.138 bar의 압력은 30.18 m 까지 발생하는 것으로 계산되었으며, 마지막으로 철제 프레임으로 구성된 구조물에 심각한 피해를 줄 수 있는 압력인 0.207 bar의 압력은 최대 27.87 m 까지 영향을 미치는 것으로 분석되었음.

○ 앞서 분석하였던 최악의 시나리오에서 누출공의 크기를 2.5 cm 로 변경하여 분석을 수행하였으며, 20초 이상 노출될 경우 충분한 고통을 느낄 수 있는 4 kW/m2 의 복사열은 최대 7.24 m 까지 발생하는 것으로 계산되었으며, 12.5 kW/m2, 37.5 kW/m2 의 복사열은 발생하지 않는 것으로 계산되었음.

○ 증기운폭발 분석을 수행한 결과, 폭발로부터 안전할 수 있는 안전거리의 기준이 되는 0.02 bar의 압력은 폭발원점으로부터 30.1 m 까지 발생하였으며, 구조물의 벽이나 지붕이 부분적으로 붕괴될 수 있는 압력인 0.138 bar의 압력은 15.2 m 까지 발생하는 것으로 계산되었으며, 마지막으로 철제 프레임으로 구성된 구조물에 심각한 피해를 줄 수 있는 압력인 0.207 bar의 압력은 최대 14.02 m 까지 영향을 미치는 것으로 분석되었음.

○ 최악의 사고시나리오와 대안 사고시나리오 두 가지 시나리오 조건을 사용하여 화재 및 폭발 분석을 수행한 결과, 배관의 완전파열에 의한 누출로 발생하는 최악의 사고시나리오가 상대적으로 큰 피해영향 범위를 갖고 있는 것으로 분석되었음. 그러나 화재 및 폭발 각각의 복사열 및 폭발과압에 의한 피해영향범위는 대부분 60m를 벗어나지 않는 결과가 발생하였으며, 이는 수소정압시설과 가장 인접한 주거지의 거리보다도 짧아 정압시설에서 사고가 발생할 경우 주거지가 받는 피해영향은 미비할 것으로 분석됨.

3. 100만 명 규모 복합(차량 및 발전) 수소 에너지 시설 정량적 위험성 평가 (Quantitative Risk Assessment)

○ 차량용 수소 충전소의 사고 시나리오의 경우, 수소를 가장 많이 보유하고 있는 수소 저장 탱크와 디스펜서에서 누출, 화재 및 폭발이 일어나는 시나리오을 기반으로 다음과 같이 작성함.

○ 시나리오 1은 아래와 같음.

■ 누출물질 : 수소가스
■ 누출형태 : 누출
■ 누출상태 : 기체
■ 누출직경 : 수소 저장 탱크 파열(5mm, 25mm, 100mm, Rupture)
■ 운전온도 : 15 ℃
■ 운전압력 : 100 barg
■ 풍속 : 1.0 m/sec
■ 평균온도 : 15 ℃
■ 평균습도 : 70 %
■ 지면의 상태(Roughness) : 도시 지형
■ 대기안정도 : F 등급

○ 시나리오 2는 아래와 같음.

■ 누출물질 : 수소가스
■ 누출형태 : 누출
■ 누출상태 : 기체
■ 누출직경 : 수소 충전 디스펜서 누출(14.5mm)
■ 운전온도 : 15 ℃
■ 운전압력 : 700 barg
■ 풍속 : 1.5 m/sec
■ 평균온도 : 15 ℃
■ 평균습도 : 70 %
■ 지면의 상태(Roughness) : 도시 지형
■ 대기안정도 : D 등급

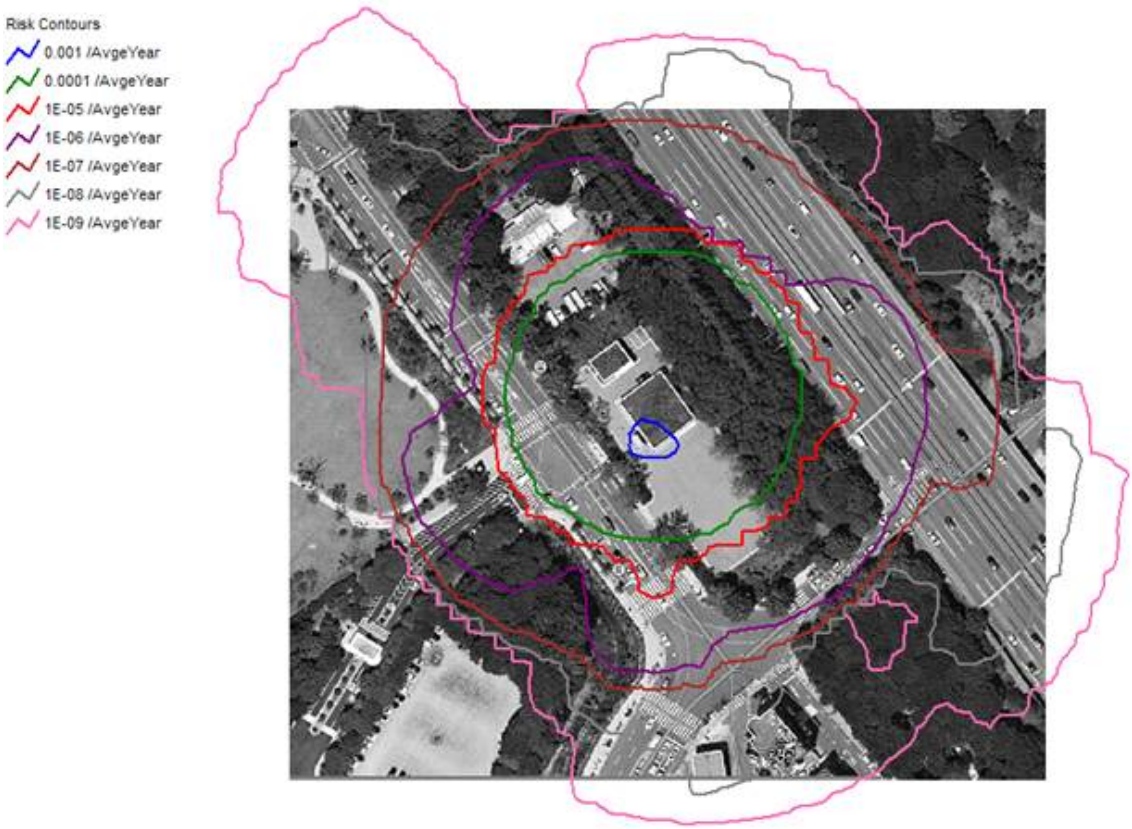
○ 발전용과 마찬가지로 인구밀도는 지역특성에 따라 주간과 야간의 상주인구가 다르며 하루 중 주간은 06:00 ~ 18:00 그리고 야간은 18:00 ~ 06:00분으로 구분됨. 또한, 사고 발생 시 실내와 실외에 위치한 사람의 피해결과가 다르게 나타남으로 충전소를 기준으로 각 지역적 특성을 고려하여 인구밀도를 입력함.

<그림 4.22. 인구분포(차량용)>

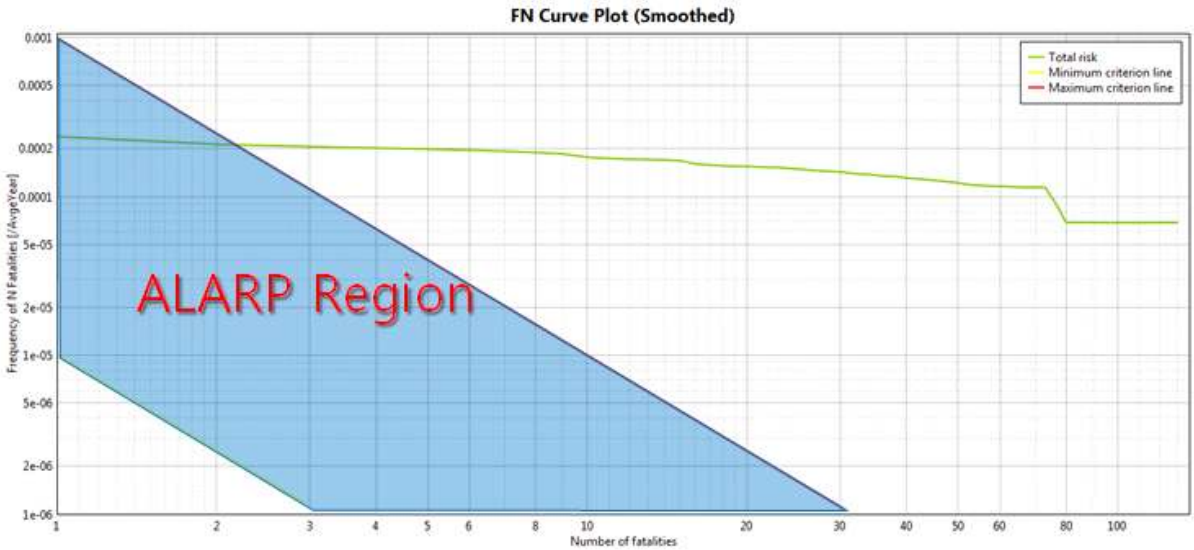
<표 4.5. 각 지역에 따른 인구분포(차량용)>

	Daytime data		Nighttime data	
	Population	Fraction Indoors	Population	Fraction Indoors
Road1 (expressway)	500	1	700	1
Road 2	235	0.6	350	0.9
Town	30	0.5	30	0.8
Operating room	1	1	1	0

○ 발전용과 마찬가지로 리스크를 분석한 결과 개인적 위험의 경우 허용 가능한 수준으로 발생 하였으며, 위험이 높아 방지대책이 필요한 부분은 디스펜서 주위로 확인됨.



<그림 4.23. 개인적 위험(차량용)>



<그림 4.24. 사회적 위험(차량용)>

○ 그러나 사회적 위험의 경우 빈도가 일정 수준 이상으로 발생할 경우 허용가능하지 못한 사고의 위험성이 나타날 수 있음이 확인됨. 이 경우 대안을 찾아 분석 후 방지대책을 강구해야함.

○ 피해영향분석 (제트화재; Jet Fires)의 경우 상온 고압의 운전조건을 갖고 있는 수소의 경우 누출시 고압으로 인한 제트누출이 발생하여, 누출 즉시 미상의 점화원에 의하여 점화가 이루어질 경우 제트화재가 발생할 수 있음. 최악의 사고시나리오 조건으로 제트화재를 분석한 결과, 20초 이상 노출될 경우 충분한 고통을 느낄 수 있는 복사열수준인 4 kW/m2 의 복사열은 최대 15.98 m 까지 발생하는 것으로 계산되었으며, 목재의 점화에 필요한 최소에너지 및 플라스틱 튜브를 녹일 수 있는 복사열인 12.5 kW/m2 의 복사열은 최대 11.74m 까지 발생하는 것으로 계산됨. 공정장비들에 충분한 피해를 줄 수 있는 37.5 kW/m2 의 복사열은 발생하지 않는 것으로 계산됨.

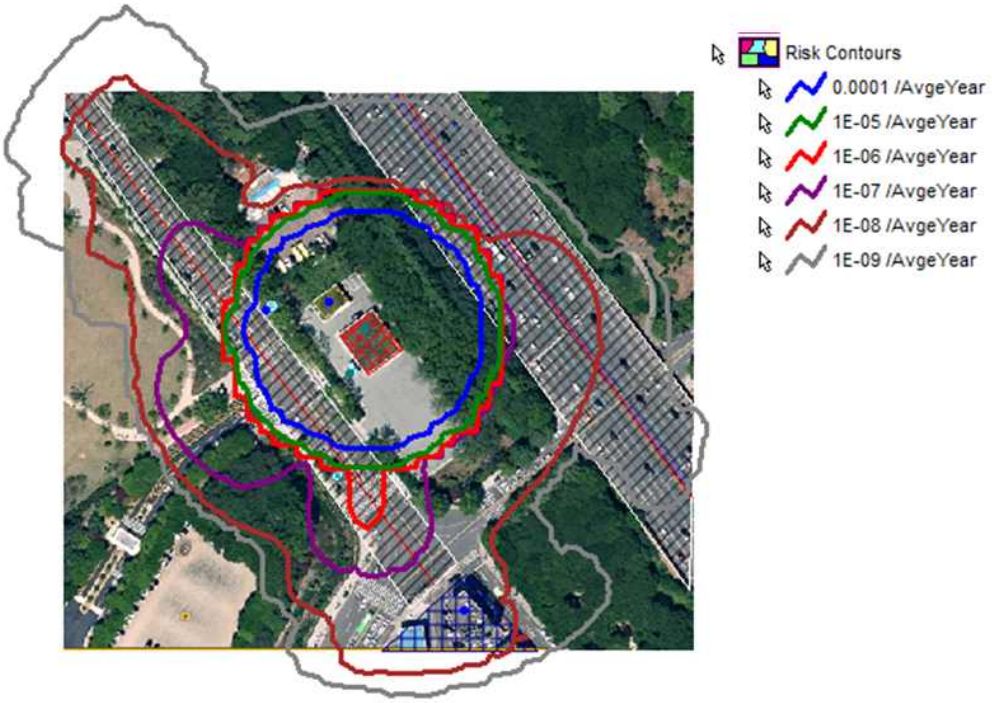
○ 폭발영향분석 (증기운폭발; Vapor Cloud Explosion, VCE)의 경우 수소의 물리화학적인 특성 중 기체상태의 비중이 매우 낮기 때문에 누출됨과 동시에 대기 중으로 흩어져 폭발분위기를 조성할 수 있는 증기운을 충분히 형성하지 못할 수 있음, 하지만, 순간적인 파열에 의한 누출 및 누출원 주변의 시설 및 장치들에 의한 밀폐정도를 고려할 경우 폭발할 수 있는 증기운이 형성될 가능성이 있음.

○ 증기운폭발 분석을 수행한 결과, 폭발로부터 안전할 수 있는 안전거리의 기준이 되는 0.02 bar의 압력은 폭발원점으로부터 59.3 m 까지 발생하였으며, 구조물의 벽이나 지붕이 부분적으로 붕괴될 수 있는 압력인 0.138 bar의 압력은 30.18 m 까지 발생하는 것으로 계산되었으며, 마지막으로 철제 프레임으로 구성된 구조물에 심각한 피해를 줄 수 있는 압력인 0.207 bar의 압력은 최대 27.87 m 까지 영향을 미치는 것으로 분석됨.

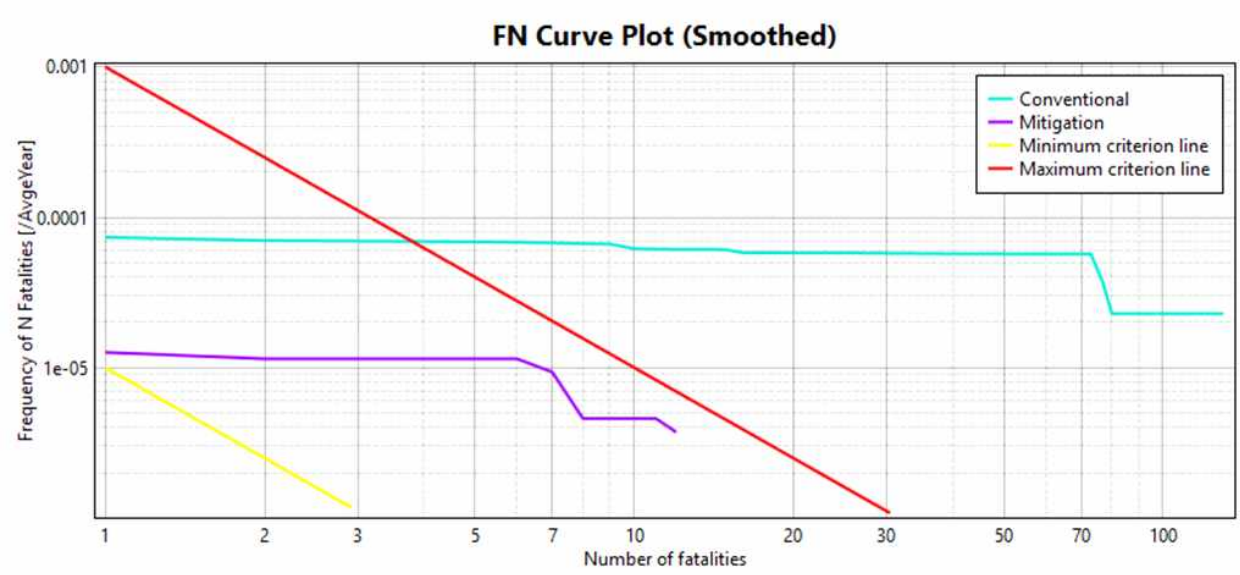
○ 화재피해영향분석 (제트화재; Jet Fires)의 경우 앞서 분석하였던 최악의 시나리오에서 누출공의 크기를 2.5 cm 로 변경하여 분석을 수행하였으며, 20초 이상 노출될 경우 충분한 고통을 느낄 수 있는 4 kW/m2 의 복사열은 최대 7.24 m 까지 발생하는 것으로 계산되었으며, 12.5 kW/m2, 37.5 kW/m2 의 복사열은 발생하지 않는 것으로 계산.

○ 증기운폭발 영향 분석 (증기운폭발; Vapor Cloud Explosion, VCE)의 경우 수행한 결과, 폭발로부터 안전할 수 있는 안전거리의 기준이 되는 0.02 bar의 압력은 폭발원점으로부터 30.1 m 까지 발생하였으며, 구조물의 벽이나 지붕이 부분적으로 붕괴될 수 있는 압력인 0.138 bar의 압력은 15.2 m 까지 발생하는 것으로 계산되었으며, 마지막으로 철제 프레임으로 구성된 구조물에 심각한 피해를 줄 수 있는 압력인 0.207 bar의 압력은 최대 14.02 m 까지 영향을 미치는 것으로 분석됨.

○ 방지대책으로 safety barrier를 설치하여 빈도 및 영향범위를 낮추는 것을 추진하였음.



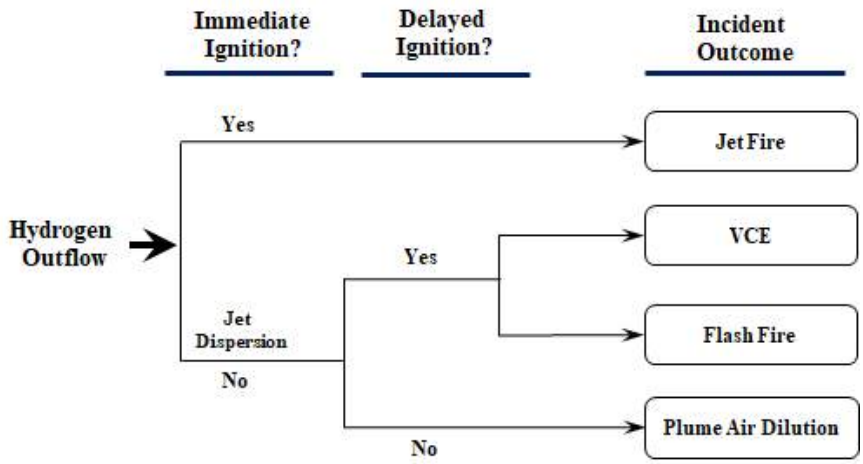
<그림 4.25. 대안 시나리오 적용한 사회적 위험(차량용)>



<그림 4.26. 대안 시나리오 적용한 사회적 위험(차량용)>

○ 개인적 위험은 모든 시나리오에서 허용가능한 수준의 빈도로 감소하였으며, 사회적 위험의 시나리오도 모두 허용 가능한 수준으로 변경되었음. Safety barrier는 International Journal of Hydrogen Energy에 2010년에 게재된 “Quantitative Risk Assessment on 2010 Expo Hydrogen Station”에서 빈도에 대한 내용을 확인할 수 있으며, 이를 활용하여 수소 충전소 충전소 안전 설계에 필요한 결과를 도출할 수 있었음.

○ 수소는 비독성의 가연성 물질로써 누출에 따른 사고 피해 결과를 ETA(event tree analysis)를 통해 분석하면 그림 1.3과 같이 사고결과가 발생됨을 알 수 있음. 수소가 누출되고 외부의 점화원에 의해 즉시 점화가 될 경우 제트화재(Jet fire)가 발생되는 과정을 논리적으로 나타내고 있으며 지연점화가 발생될 경우, 증기운 폭발(VCE) 또는 플래쉬 화재(Flash fire)로 전이될 수 있음을 말해주고 있음. 여기서 증기운 폭발(VCE)과 플래쉬 화재(Flash fire)는 수소의 농도에 의해 일반적으로 결정되지만 이에 대해 과학적으로 명확하게 발생 조건이 구분되어 제시되지는 않고 있음. 플래쉬 화재(Flash fire)는 일반적으로 수소의 폭발하한농도(LFL) 이하에서 점화될 경우 발생되는 것으로 보고 있음. 마지막으로 수소가 누출되고 다행히 외부의 점화원에 의해 점화되지 않을 경우에는 대기 중으로 희석되어 아무런 사고가 발생되지 않게됨[3].



<그림 4.27. 수소 누출에 대한 ETA 분석 및 사고결과 형태>

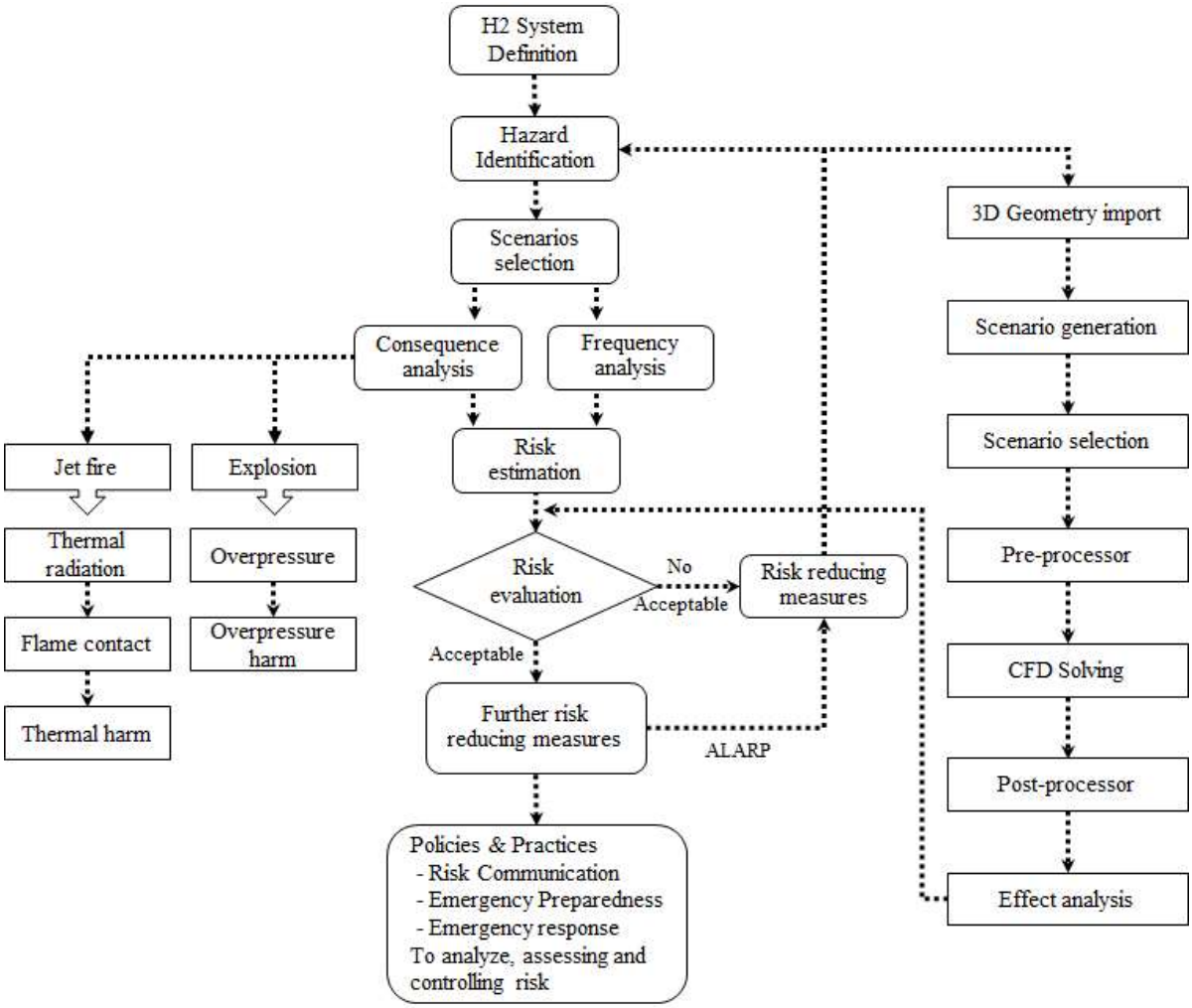
○ 수소는 최소점화에너지(MIE)가 0.018mJ로 아주 작은 에너지에 의해서 점화가 가능함에 따라 수소 누출사고가 발생할 경우, 대부분이 점화되어 화재나 폭발로 전이되는 결과가 발생하고 있음. 이러한 사고결과는 1차 년도 연구에서 제시한 HIRD(Hydrogen Incident Reporting Database) 사고사례 분석 결과를 통해서 알 수 있음. 제시된 HIRD의 사고 사례 분석에서 총 194건의 수소 누출 사고 중 주요 사고를 구분하여 32건을 선정하였고 이를 분석한 결과 수소누출 사고 발생 시 사고의 43.7%가 화재였으며 31.3%가 폭발 그리고 15.6%가 화재 및 폭발이었음. 반면 단순 누출로 끝난 사고는 9.4% 밖에 되지 않음. 이는 다시 말해, 32건의 사고 중 29건은 외부의 점화원에 의해 점화되어 화재나 폭발 또는 화재 및 폭발이 발생하였으며 외부의 점화원에 의해 점화 되지 않아 누출된 수소가 대기 중에서 자연적으로 희석된 사건은 3건 밖에 되지 않았다는 것임.

○ <그림 4.27>에 제시된 ETA를 통해, 분석된 사고결과에 대해 위험성을 정량적으로 평가하기 위해서는 복잡한 수치해석 접근 방법이 필요함. 일반적으로 화재와 폭발로 인한 피해결과를 예측하는 방법은 크게 경험기반의 모델과 현상학적 기반의 모델 그리고 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics) 기반의 모델로 구분됨. 이중 경험기반의 모델은 누출된 물질을 일정량을 TNT와 유사한 양으로 가정하여 계산하는 방법이며 현상학적 기반 모델은 폭발 또는 연소 과정을 수치로 계산하기 위해 요구되는 물리학적 개념을 모델로 표현하여 프로그램화 시킨 것을 말함. 이러한 대표적인 것이 EFFTCTS(TNO), PHAST(DNV) 프로그램임.

○ 수소마지막으로 전산유체역학 기반의 모델은 폭발과 연소과정을 지배하는 편미분 방정식의 수치해석 과정으로 사고발생 공간의 설비와 장치 형태 그리고 밀집도를 수치해석에 고려하고 추가적으로 난류와 대기상태 그리고 바람의 영향 등과 같은 여러 변수에 대해서도 고려하여 사고 예측 결과가 실제와 매우 유사하게 분석되는 가장 정밀화된 방법을 말함. 하지만, 전산유체역학 기반의 모델을 적용하기 위해서는 깊이 있는 전문지식과 시간 그리고 많은 비용이 요구됨에 따라 모든 사고 시나리오에 적용하는데 한계가 있음.

○ 정량적 위험성평가에 있어서 사고 피해결과는 현상학적 기반 모델이 적용된 전용 프로그램을 이용해 피해결과를 예측하는 것이 국제적으로 공통된 방법임. 이는 수치해석에 필요한 입력 값을 전문가가 입력하고 일부 변수 값을 지정하면 자동적으로 위험성을 계산하여 결과로 표출할 수 있으며 수치해석 모델은 문헌을 통해 증명되어 있음. 그러나 이 방법에 따른 피해결과는 주변의 설비와 장치들에 대한 고려가 되지 않기 때문에 피해결과가 보수적으로 해석됨.

○ 높은 연소열과 낮은 최소점화에너지 그리고 넓은 폭발범위로 인해 고위험성이 내재되어 있는 수소 물질을 저장 및 공급하는 시설은 화학공정 플랜트와 같이 대규모 시설이 아닌 소규모의 공정으로 설치 운영됨. 때문에 현상학적 기반의 모델을 적용하여 위험성을 정량화할 경우, 피해영향 범위가 넓게 계산되어 제대로 된 위험성평가가 적용되기 어려울 수 있음. 이에 소규모로 운영되는 수소의 저장 및 공급시설에 대해서는 현상학적 기반의 모델과 전산유체역학 기반의 모델을 병행하여 정량적 위험성 평가가 적용되는 알고리즘을 개발하고 이를 적용하는 것이 가장 최적화된 방법으로 분석되었음.



<그림 4.28. 수소의 저장 및 공급 시설에 최적화된 QRA 알고리즘>

○ <그림 4.28>는 수소관련 저장 및 공급 시설의 QRA를 위해 최적화된 알고리즘으로 현상학적 기반의 모델과 전산유체역학(CFD) 모델을 연계함으로써 소규모의 수소 저장 및 공급 시설에 적용 할 수 있음. 또한, 전산유체역학(CFD) 이외의 알고리즘은 현상학적 기반의 모델을 활용 할 수 있어 전문가의 판단에 따라 피해결과가 보수적으로 너무 크게 계산된 시나리오에 대해서는 정밀한 전산유체역학(CFD) 방법을 선별적으로 적용할 수 있음. 따라서, 이러한 알고리즘은 기존의 QRA에 대한 신뢰성을 유지할 수 있는 동시에 가장 최신화된 과학적 기법을 적용한 정밀한 QRA 결과를 도출할 수 있음.

○ 수소저장 시설의 위험도를 수치화 하는 방법에는 크게 위험지수(Risk Index)와 개인적 위험(Individual Risk) 그리고 사회적 위험(Societal Risk) 형태로 구분할 수 있음. 위험지수(Risk Index)는 단순한 표시(Presentation)를 산출하는 하나의 숫자 또는 도표이며, 개인적 위험(Individual Risk)은 사고의 영향권 내에 있는 개인의 위험성을 고려하고 사회적 위험(Societal Risk)에서는 사고의 영향권 내에 있는 인구에 미치는 위험성을 고려함.

○ 위험도 표현 방법을 상세하게 구분하면 12가지 방법이 있으며 아래에 열거한 12가지의 방법들 중에 현재 널리 이용되고 있는 위험도 수치화 방법은 개인적 위험곡선(Individual Risk Contour)과 사회적 위험곡선(Societal Risk Curve) 즉 F-N Curve가 있다[1)3)].

■ 위험지수(Risk Indices)

- Fatal Accident Rate
- Individual Hazard Index
- Average Rate of Death
- Mortality Index or Number
- Equivalent Social Cost Index or Loss Index

■ 개인적 위험성(Individual Risk)

- Individual Risk Contour
- Individual Risk Profile
- Maximum Individual Risk
- Average Individual Risk (Based on Exposed Population)
- Average Individual Risk (Based on Total Population)

■ 사회적 위험성(Societal Risk)

- Societal Risk Curve (F-N Curve)
- Average Societal Risk

○ 개인적 위험성(Individual Risk, 이하 IR로 표현함)은 위험시설 인근에 있는 개인에게 미칠 수 있는 위험성으로 정의할 수 있으며 피해의 성격과 피해발생 가능성 그리고 피해가 발생될 수 있는 시간 등이 함수로 포함됨.

○ IR은 가장 많이 노출된 사람과 특정장소에 있는 사람이나 집단 또는 피해 영향권에 있는 사람과 같이 인구정보와 관련하여 다양한 결과 값을 가져올 수 있음. IR을 표현하는 방법은 인구분포 형태와 실제 작업시간 등을 고려하여 아래와 같이 다양한 형태로 표현할 수 있음.

○ 개인적 위험곡선(Individual Risk Contour)은 개인적 위험성의 지리적 분포를 표시함. 즉, Contour는 개인이 해를 당할 수 있는 위치에 있는 여부에 관계없이 특정 위치에서 특정 수준의 피해를 받을 수 있는 사고의 예상 빈도를 표시함.

○ 최대 개인적 위험성(Maximum Individual Risk)은 노출된 사람 중에서 가장 높은 위험성에 노출된 개인의 IR을 의미함. 일반적으로 Maximum Risk를 받는 사람은 위험시설물에서 작업하는 조업자가 되는 경우 많으나, 특정 사고의 경우 인근지역의 일반 주민이 Maximum Risk를 받을 수가 있음.

○ 위험에 노출된 인구를 기반으로 한 개인적 위험성의 평균(Average Individual Risk (Based on Exposed Population))은 위험성에 노출된 인구(예, 건물 내에 있는 운전자, Maximum Risk Zone에 있는 일반인)의 평균을 계산한 위험성임. 이러한 위험성은 인구분포 양상이 골고루 퍼져있을 경우, 적정한 결과 값을 산출하지만 비균일한 인구분포를 갖는 지역에 대하여 예측할 때는 많은 오차를 가져올 수 있음.

○ 위험에 노출된 전체인구를 기반으로 한 개인적 위험성의 평균(Average Individual

Risk(Based on Total Population)은 위의 세 번째와는 달리 단순히 인구밀도에 의한 평균 위험성을 예측하기 때문에 같은 규모의 사고가 발생한다 하더라도 낮과 밤의 위험수치가 크게 차이가 날 수 있음.

○ 공정의 가동시간 및 노출시간에 따른 개인적 위험성의 평균(Average Individual Risk(Exposed time/Operating time))은 실제 위험범위 내에서의 활동시간을 토대로 계산된 위험성임. 예를 들어, 조업자가 위험시설물에서 1시간을 작업하고 안전지대에서 7시간을 작업한다면 앞서 위험시설물 주변에서의 위험성은 평균 위험성의 8배가 됨.

○ 수소 관련시설 주변에 있는 개인적 위험성의 계산에서는 모든 사고결과 사례의 원인이 부가적이라고 가정함. 따라서 각 지점의 총 개인적 위험성은 수소시설과 관련된 모든 사고결과 사례에서 그 지점에 있는 개인적 위험성의 합계와 같음.

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^{n} IR_{x,y,i}$$

----------식 1.1

$IR_{x,y}$ = 지리적 위치 x, y에서 사망에 대한 총 개인적 위험성(연당 사망 기회 또는 yr^{-1})

$IR_{x,y,i}$ = 사고 결과 사례 i의 지리적 위치 x, y 사망에서 대한 개인적 위험 (연당 사망 기회 또는 yr^{-1})

n = 분석에서 고려한 총 사고 결과 사례 수

위 식에 대한 입력은 다음과 같이 구함.

$$IR_{x,y,i} = f_i P_{f,i}$$

----------식 1.2

f_i = 빈도 분석에서 사고 결과 사례 i의 빈도 (yr^{-1})

$P_{f,i}$ = 사고 결과 사례 i가 피해 결과 및 영향 모델의 위치 x, y에서 사망을 야기할 확률

입력 변수는 다음과 같이 구함.

$$f_i = F_I P_{o,i} P_{oc,i}$$

----------식 1.3

F_I = 사고 결과 사례 i를 사고 결과 사례의 하나로 가지고 있는 사고 I의 빈도 (yr^{-1})

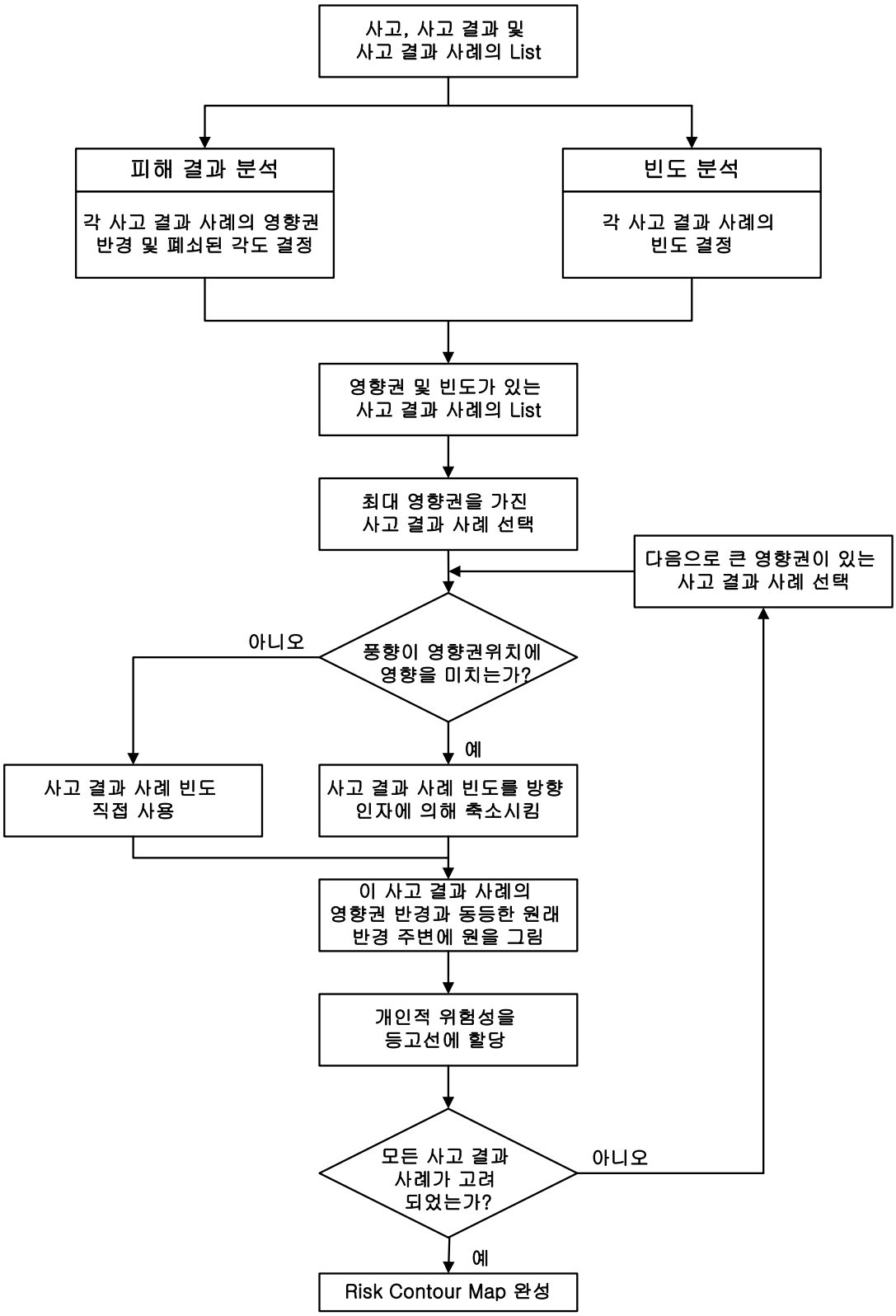
$P_{o,i}$ = 사고 I가 발생될 때 i를 그 사고 결과 사례의 하나로 가지고 있는 사고 결과가 발생할 확률

$P_{oc,i}$ = 선행 사고 I가 발생되고 사고 결과가 결과 사례 i에 해당될 때 사고 사례 i가 발생할 확률

○ f_I를 계산할 경우, 사고 I가 발생될 때 사고 결과와 사고결과 사례 확률($P_{o,i}$, $P_{oc,i}$)을 평가해야 함. 예를 들어 독성 가연성 물질 배출(사고)은 제트 화재, 풀 화재, BLEVE, 플래시 화재, 개방계 증기운 폭발 또는 점화되지 않은 경우(사고결과)에, 안전한 확산을 야기할 수 있음. 이러한 각 결과는 그와 관련된 확률($P_{o,i}$)을 나타냄. 이러한 사고결과는 점화원 위치와 기후 조건에 따라 사고결과 사례로 다시 분류됨. 이러한 각 사고결과 사례는 발생 확률($P_{oc,i}$)을 나타냄. 사건 수목은 보통 이러한 관계를 평가하는데 사용함. 모든 개인적 위험성 계산 방법은 이러한 관계를 기준으로 함. 일반적으로 이러한 방정식은 개인적 위험성이 계산되는 모든 위치에 적용 되어야 함.

○ 수소시설 주변의 여러 지리적 위치의 개인적 위험을 예측하고 Risk Contour를 생성하기 위하여 계산 및 표현방법은 다음과 같음. 해당 위치에 대한 개인적 위험 예상 수치는 다음의 가정 하에서 각 위치에서 동일하게 계산 및 표현됨. <그림 4.29>는 개인적 위험의 계산 절차를 나타냄.

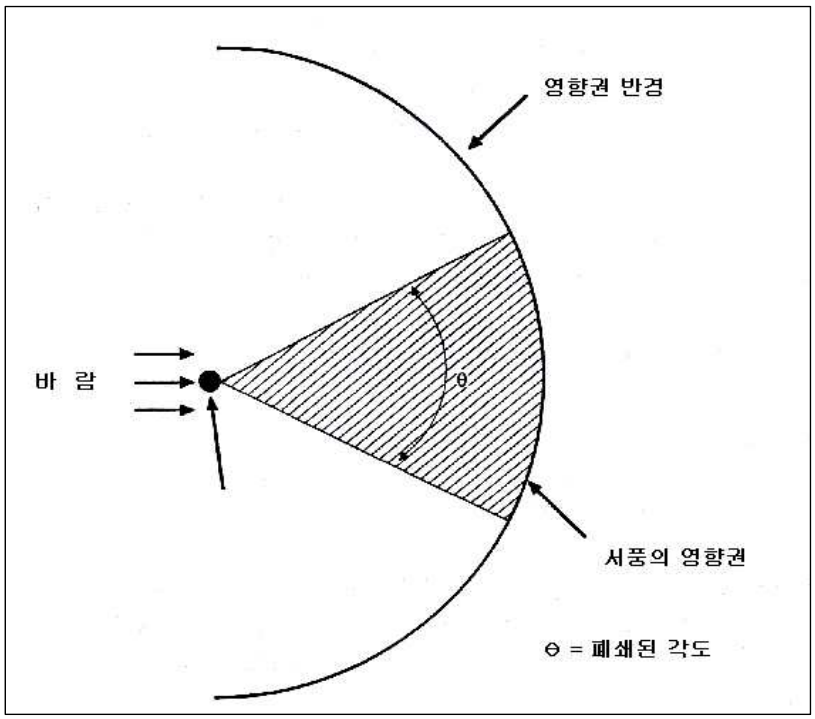
- 모든 위험은 포인트 누출원에서 비롯됨.
- 단일 풍속 및 대기 안정도 분류를 사용할 수 있음.
- 완화 인자를 고려하지 않음
- 점화원이 균일하게 분포함(즉, 점화 확률이 방향에 의존하지 않음).
- 피해 결과의 영향을 따로 처리할 수 있음. 특정 영향권 내에 발생되는 효력 수준이 일정함(예, 100% 사망).



<그림 4.29. 개인적 위험의 계산 알고리즘>

○ 이 절차는 시나리오에서 고려한 모든 사고, 사고결과 및 사고결과 사례에 대한 목록을 필요로 하며 모든 사고에 대한 피해 결과(영향권)와 빈도를 결정해야 함. 영향권이 불연속적인 것으로 가정(위의 최종 가정 참조)되기 때문에 고려된 영향(예, 일부 독성 노출, 피해, 사망)의 발생권 내에서 누출원에서 떨어진 반경 거리에 대해서만 영향권을 정의할 수 있음. 풍향의 영향을 받는 사고결과 사례의 경우에는 <그림 4.30>에서 표시한 것처럼 폐쇄된 각도와 관련된 영향권의 넓이(즉, 영향권을 원의 파이형으로 다룸)도 예측해야 함. 이에 대한 결과는 각각 관련된 빈도, 영향권 반경 및 폐쇄된 각도

(Enclosed Angle)(필요한 경우)가 있는 시나리오에 대한 모든 사고결과 사례임.



<그림 4.30. 바람의 방향을 고려한 Effect Zone>

○ Risk Contour Map을 만들려면 최대 영향권 반경이 있는 사고결과 사례를 선택하고 영향권 반경과 동등한 반경의 적절한 원(위험 등고선)을 지도 위에 그려야 함. 그런 다음 사고결과 사례가 풍향의 영향을 받는지 결정해야 함.(예를 들어 가연성 또는 독성 가스 운은 순풍으로 이동하지만 응축상 폭발은 풍향과 관계없이 모든 방향에 똑같은 영향을 미침). 사고 결과 사례가 풍향의 영향을 받는 경우, 빈도는 바람이 사고결과 사례 발생 부분에 대해서만 특정한 방향으로 분다는 사실을 고려하여 방향 인자로 줄여야 함.

○ 바람이 모든 방향에서 똑같이 분다고 간주되기 때문에 방향 인자를 $\Theta_i/360$과 같다고 표시할 수 있음. 여기에서 Θ_i는 사고결과 사례 영향권에 의해 폐쇄된 각도를 말함. 특정 방향의 특정 위치에 영향을 미치는 사고결과 사례의 빈도는 다음과 같음.

$$f_{i,d} = f_i(\theta_i/360)$$

---------- 식 1.4

$f_{i,d}$ = 풍향 분포를 균일하다고 가정하는 특정 방향의 포인트에 사고 결과 사례 i가 영향을 미치는 빈도(yr^{-1})

f_i = 사고 결과 사례 i의 예상 발생 빈도(yr^{-1})

Θ_i = 사고 결과 사례 i에 대한 영향권으로 폐쇄된 각도(도)

○ 다음 단계는 개인적 위험 값을 Contour에 할당하는 것임. 이것은 추후의 Risk Contour의 개인적 위험에 추가된 사고결과 사례 i의 빈도와 동일함.

$$IRC_i = f_i(\text{또는} f_{i,d}) + IRC_{i-1}$$

---------- 식 1.5

IRC_i = 고려 중인 사고 결과 사례에서 등고선의 개인적 위험 값(yr^{-1})
IRC_{i-1} = 추후 위험 등고선의 개인적 위험 값(yr^{-1})
f_i와 $f_{i,d}$는 방정식 (4)에서 정의됨.

○ 그려진 일차 Contour(최대 영향권 반경을 가진 사고 결과 사례)에서 IRC_{i-1}은 0임. 이 절차는 모든 사고 결과 사례가 고려될 때까지 계속됨.

<표 4.6. Presentation of Risk>

위 험 도	표 현 형 식
지 수	
사고 사망률	사망 예측 지점/10^8 노출 시간
개인적 위험 지수	피크 개인적 위험 또는 FAR의 예측
평균 사망률	시간 단위당 예측되는 평균 사망자 수
사망 지수	피해 결과에 대한 단일 값 표시
등가 사회적 비용 지수	단일 숫자 지수 값 표시
개인적 위험	
개인적 위험 등고선	현지 지도 위에 동등한 위험 값의 폐쇄 곡선(Closed curve)을 첨가함
개인적 위험 프로파일	명시된 방향의 플랜트에서 거리의 함수로 나타나는 개인적 위험의 그래프
최대 개인적 위험	최대 위험에 처한 사람에 해당되는 개인적 위험의 단일 숫자 값
평균 개인적 위험 (노출된 인구)	노출된 인구에서 사람과 평균 위험을 예측하는 단일 숫자 값
평균 개인적 위험 (전체 인구)	모든 사람의 위험 노출 여부에 관계없이 사전에 결정된 인구에서 개인과 평균 위험을 예측하는 단일 숫자 값
사회적 위험	
사회적 위험 곡선 (F-N 곡선)	N 또는 더 많은 사망, 피해나 노출 대 N, 사망 수, 피해나 노출을 야기하는 사건의 축적 확률 또는 빈도의 그래프
평균 사회적 위험	평균 사망률에 대한 또 다른 용어

○ 화학 플랜트 및 에너지 공급 시설은 위험물질을 다량으로 생산, 취급하기 때문에 사고 발생시 많은 사람에게 피해를 가져올 수 있음. 이와 같이 대규모 인구 집단이 피해를 입을 수 있는 위험성을 나타내는 것이 사회적 위험성(Societal Risk, 이하 SR료 표현함) 표현 방법임. SR을 표현하기 위해서는 앞서 서술한 IR과 같은 피해예측 결과와 사고발생 가능성에 대한 자료뿐만 아니라 주변지역의 인구분포 및 낮과 밤에 따른 인구의 이동형태와 같은 Social Data가 필요함.

○ 일반적으로 IR이 피해 범위 내에 있는 인구수와는 독립적인 수치인데 반해, SR은 피해 범위 내 존재하는 사람 수에 따라 그 수치가 바뀔 수 있음. 예를 들어, 피해 가능지역에 낮 근무자가 10명이고 밤 근무자가 2명이라고 할 때, 이 지역에서는 SR은 사고가 낮에 발생할 때가 밤에 발생할 때 보다 5배가 높게 계산됨.

○ 수소시설 주변의 인구에 관한 Data는 물론 개인적 위험성 계산에 필요한 모든 Data도 사회적 위험성을 계산하는데 필요함.

- 완화 인자를 평가하기 위한 인구 유형 (예, 주거지, 사무실, 공장, 학교, 병원)에 관한 정보
- 시간/일(Time-of-day)의 영향에 관한 정보(예, 학교)
- 일/주(Day-of-week)의 영향에 관한 정보(예, 산업, 교육, 여가 시설물)

○ <그림 4.31>은 사회적 위험성을 표현하는 F-N 곡선을 계산하기 위한 절차를 나타낸 것임. 단계는 피해 결과(영향권) 및 빈도의 예측을 통한 개인적 위험 계산과 동일함. 따라서 각 사고 결과 사례의 영향을 받는 사람의 수를 예측하려면 이 정보를 인구 자료와 결합해야 함. 각 사고 결과 사례의 영향을 받는 사람의 수는 다음과 같이 주어짐.

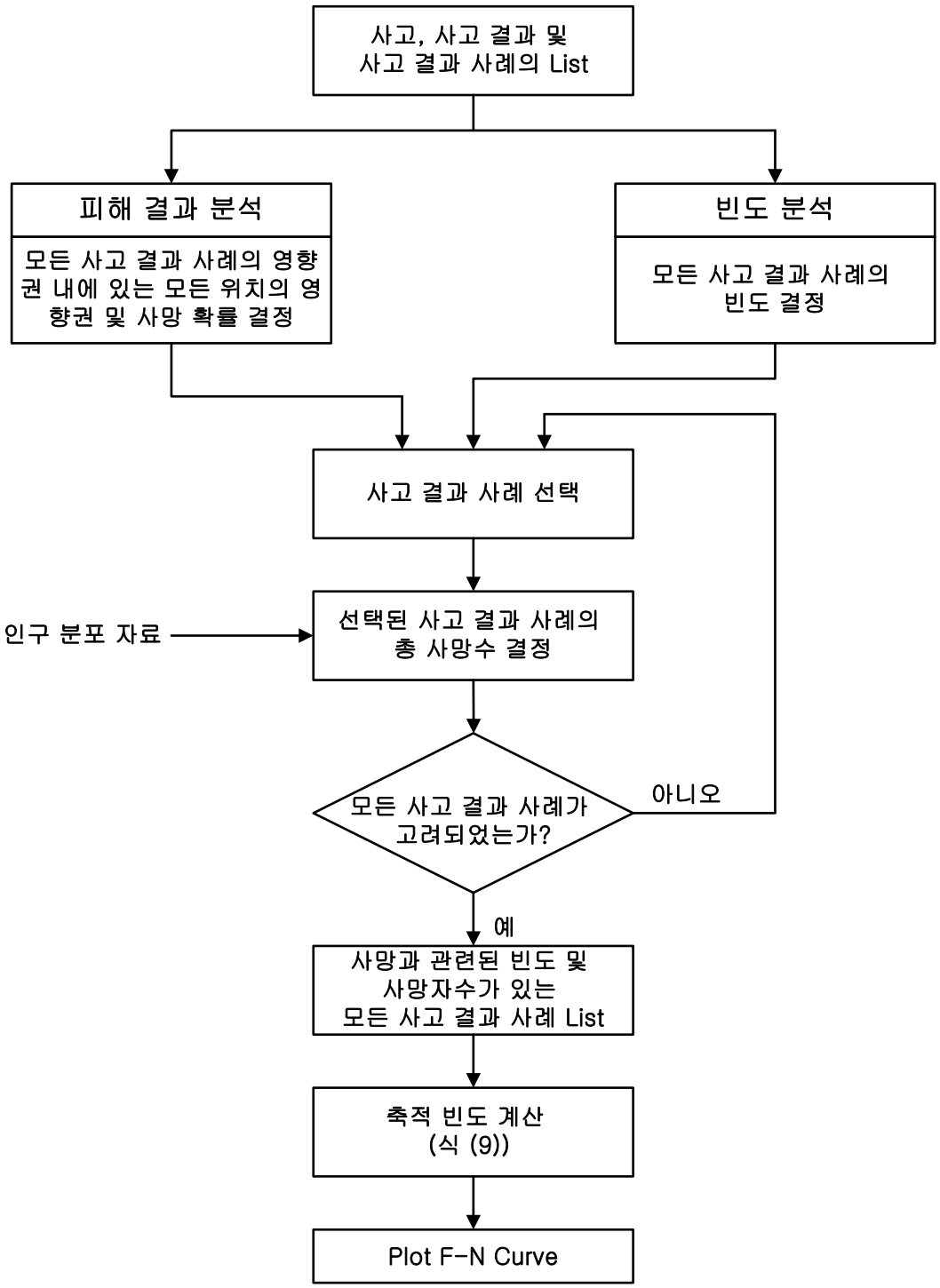
$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} P_{f,i}$$

----------식 1.6

N_i = 사고 결과 사례 i에서 야기된 사망 수

$P_{x,y}$ = 위치 x, y에 있는 사람 수

$P_{f,i}$ = 사고 결과 사례 i가 피해 결과 및 영향 모델의 위치 x, y에서 사망을 야기할 확률



<그림 4.31. 사회적 위험성 계산 알고리즘>

❍ 모든 사고결과의 목록을 산출하는 사고결과 사례의 영향을 받는 사람의 수를 각각 빈도(빈도 분석을 통해)와 영향을 받는 사람 수와 함께 결정해야 함. 이 정보를 누적 빈도 형식으로 배치하여 F-N 곡선을 그릴 수 있도록 해야 함.

$$F_N = \sum_i F_i$$

----- 식 1.7

$N_i \geq N$인 경우의 모든 사고 결과 사례 i에 대하여

F_N = N 이상의 사람에게 영향을 미치는 모든 사고 결과 사례의 빈도

F_i = 사고 결과 사례 i의 빈도
N_i = 사고 결과 사례 i의 영향을 받는 사람의 수

○ 결과는 F_N을 N의 함수로 F-N 곡선을 제공하기 위해 그려지며 완화 인자(대피, 대피호로 탈출 및 피난)를 사회적 위험 계산에 통합시킬 수 있음. 위 식에서 두 개의 값만 가질 수 있는 사망 확률 $P_{f,i}$가 영향권 내에 있는 모든 위치 x, y에서 일정하고 영향권 내에 있지 않은 모든 위치 x, y에서 0이라고 가정하면 계산 절차가 간단해 짐. 가정된 사망 확률이 적절한 값이 될 수 있지만 영향권 전역에서 일정하게 취해야 함. 각 사고결과 사례의 사망자 수는 모든 위치에서 그래프로 결정할 수 있음. 사고결과 사례 i로 인한 사망자 수는 다음에 의해 결정됨.

- 사고결과 사례 i에 대한 영향권 지도를 인구 분포 지도 위에 첨가하기
- 영향권 내에 있는 사람 수 세기
- 영향권 내의 사망 확률 곱하기

$$N_i = P_i P_{f,i}$$

식 1.8

P_i = 사고 결과 사례 i의 불연속적인 영향권 내에 있는 총 사람 수
$P_{f,i}$ = 사고 결과 사례 i의 영향권 내의 사망 확률 $P_{f,i}$의 분리값

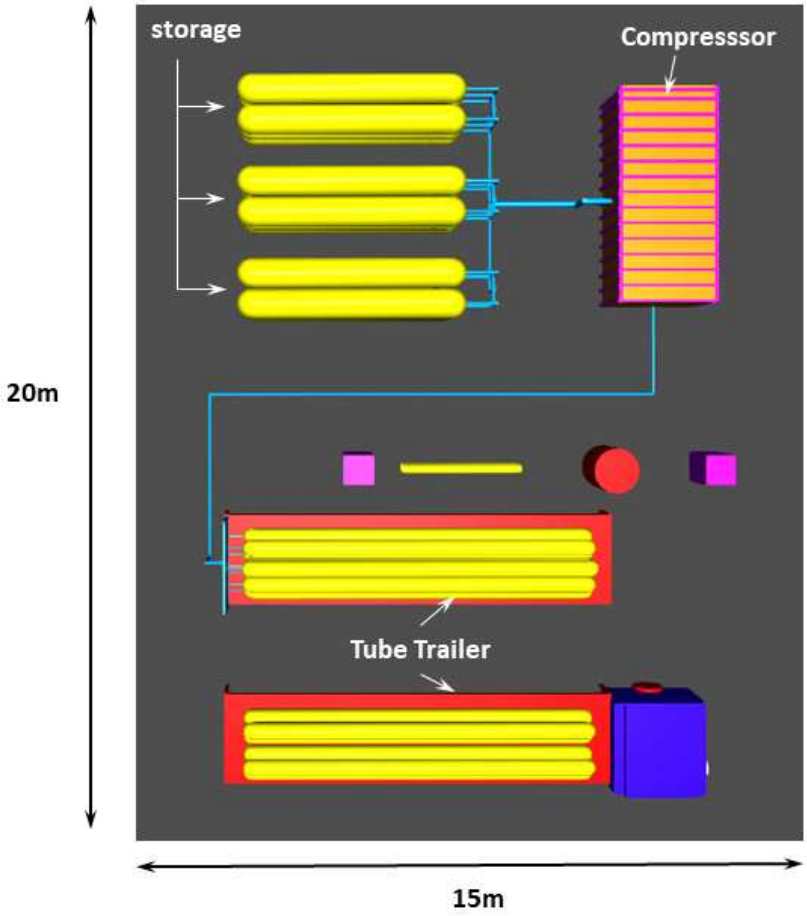
○ 수소의 저장 및 공급시설과 관련된 리스크 허용기준은 EIHP2 문서에서 정한 허용기준으로 근로자의 리스크는 수소시설과 관련된 사건에 의해 발생되는 사고로 개인별 사망확률이 1×10^{-4}을 초과해서는 안되며 수소충전소 외부의 기타 작업시설 또는 공공지역의 중대사고 확률이 1×10^{-6} 보다 높은 사망위험 노출수준을 가질 경우 거주지역이 될 수 없음. 또한, 주거지역이 아닌 일반인의 작업구역이나 공공지역은 중대사고에 의해 사망할 수 있는 빈도가 10^{-6}보다 높아야 하며 이는 네덜란드 VROM 기준의 ref.2에서 제시한 기준[4] 임.

○ 본 연구는 앞에서 제시한 수소의 저장 및 공급시설과 관련된 위험 즉, 개인적 위험과 사회적 위험을 기준으로 안전성 평가를 수행함. 그리고 사회적 위험과 관련해서는 1차 년도 연구를 통해 지역별로 결과를 제시하였으며 2차 년도 연구에서는 수소 충전소 설비에 대한 개인적 위험을 분석 함.

○ 본 연구와 관련하여 1차 년도에는 수소 충전소의 위치 선정함에 있어서 사회적 위험을 수치 해석하여 QRA를 진행함. 그리고 본 2차 년도 연구에서는 수소 충전소에 대한 개인적 위험과 위험을 가장 높게 보유하고 있는 사고를 대상으로 사고의 피해크기에 대해 정밀한 QRA를 수행함.

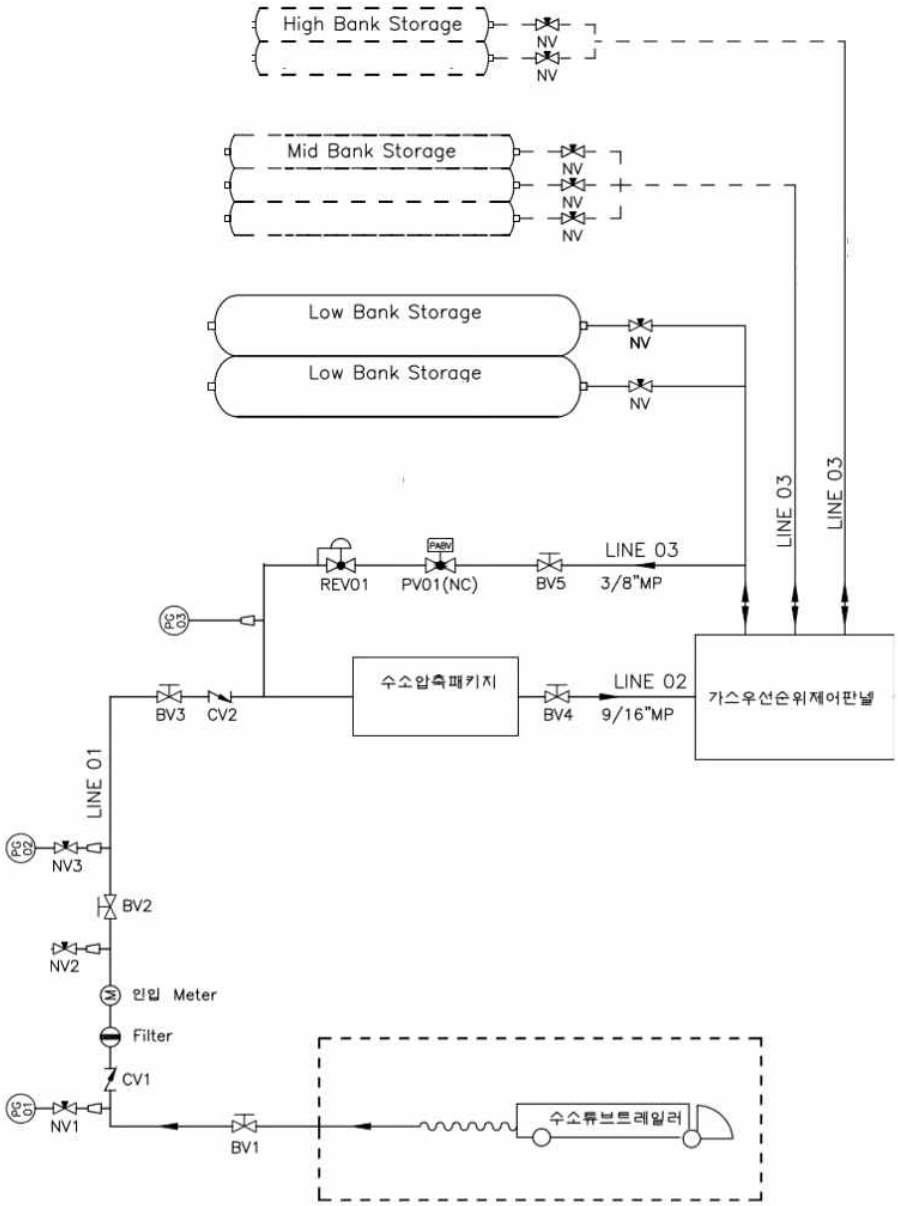
○ 본 연구는 현재 구축되어 있지 않은 가상의 수소 충전소를 대상으로 안전성평가를 수행하는 것으로 설비의 배치형태는 그림 1.9와 같음. 수소 튜브는 트레일러와 지히배관에 의해 이송되며 튜브의 경우 저장압력은 200barg를 초과할 수 없음. 또한, 튜브는 8

개로 이송 완료된 튜브는 연결배관을 통해 압축기로 이송되며 압축기에서는 940barg의 압력으로 상승함.



<그림 4.32. 가상의 수소충전소 설비 형태 및 배치도>

○ 정밀한 QRA를 수행하기 위해서는 우선적으로 수소 충전소에서 발생될 수 있는 사고 시나리오를 발굴하여야 함. 그러나 현재 수소의 저장 및 공급을 위한 충전소가 설계되어 운영되는 사례가 없음에 따라 표준화된 수소의 저장 및 충전설비 정보를 기반으로 그림 1.10과 같이 수소 충전소의 공정흐름도(Process Flow Diagram)를 작성하여 시나리오를 발굴 및 확인 함. 수소가 누출되는 사고가 발생하게 되면 그림 1.3에서 제시한 바와 같이 수소의 누출에 따른 사고결과는 제트화재(Jet fire), 증기운 폭발(VCE), 플래쉬 화재(Flash fire) 그리고 대기 중 확산(Dispersion)의 형태를 가는다. 본 연구에서는 이러한 발생 가능한 모든 사고를 고려하였으며 사고결과에 큰 영향을 미치는 기상 관련정보는 국내 각 지역별 정보를 기반으로 정밀하게 특정지점의 위치에 해당되는 별도 설정 가능하나 보수적 접근방법으로 적용함.



<그림 4.33. 정밀한 QRA를 위한 수소 충전소 공정흐름도>

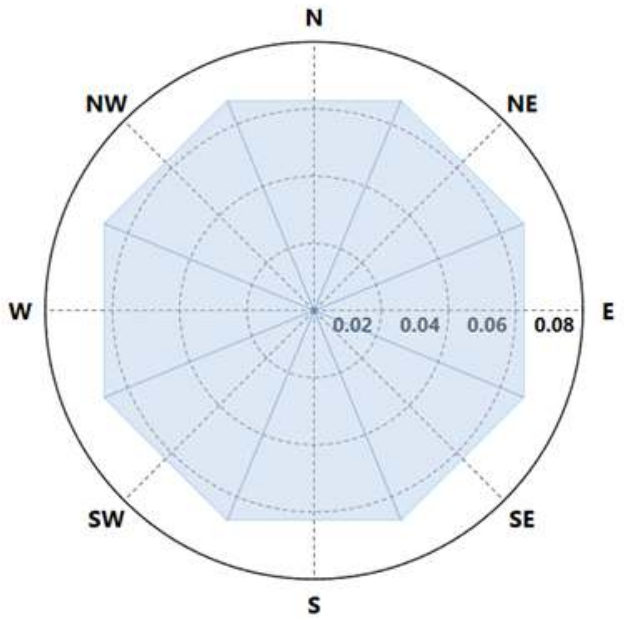
○ 풍속은 바람이 잔잔할 경우와 세계 불 경우의 2가지 조건으로 각각 1.5m/s 와 5.0m/s 를 적용함. 그리고 대기 안정도 등급은 대기가 안정된 상태의 F등급과 중간상태인 D등급을 적용하였으며 이러한 기상정보는 QRA에 있어서 보수적 접근방법으로 폭넓은 위험을 확인할 수 있음. 또한, 풍향은 특정 방향을 적용할 경우 제한된 위험만을 해석함에 따라 모든 방향으로 적용하였으며 360。의 방향으로 8개로 나누어 구분함.

<표 4,7. 기상정보 기반의 대기 안정도 등급>

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

A : 매우 불안정함 / B : 약간 불안정함 / C : 약간 불안정함 / D : 중간 / E : 약간 안정함

F : 안정함 / G : 매우 안정함



<그림 4.34. 시뮬레이션을 위한 8방 기준의 풍향 조건>

○ 수소의 연속 누출에 따른 사고결과는 점화 시간에 달려 있음. 그리고 수소의 누출과 동시에 점화가 이루어지면 제트화재가 발생하고 지연점화 시에는 플래시 화재나 폭발이 발생함. 그러나 이를 위해서는 누출된 수소가 제한된 지역에 축적되거나 누출된 지역에 많은 양의 배관이 존재하여 수소 증기가 체류 할 수 있어야 됨. 일반적으로 보수적 관점에서 수소의 누출에 따른 즉시점화 확률과 지연점화 확률은 관련 기술문헌[5]을 토대로 각각 0.5와 0.45를 적용함.

○ <표 4.8>은 QRA를 위해 작성된 입력 데이터와 사고 시나리오들로 설비는 365일 가동되는 것으로 가정하였고 초기 고장률은 Purple Book[6]에서 발췌함. 여기서 압축기의 고장 빈도를 제외하고는 모든 데이터는 영국의 DB[7]에서 수집하였으며 개인적 위험성에 있어서 중요하게 고려되는 근무 직원의 작업시간은 일주일 중 5일간 하루 8시간 근무

하는 것으로 가정 함. 시뮬레이션을 위해 선정된 사고 시나리오는 1차적으로 3개의 Node로 구분되었으며 이는 각각 튜브 트레일러와 압축기 그리고 수소저장용기임. 또한, 각 Node,에서 발굴된 시나리오는 4가지로 자세한 정보는 <표 4.8>과 같음.

○ <표 4.8>에서 첫 번째 Node인 튜브 트레일러의 경우, 트레일러 연결부에서 200barg의 압력 하에 10mm의 누출구멍이 발생하여 수직방향과 수평방향으로 각각 누출되는 시나리오로 이 사고의 발생빈도는 2.4×10^{-4} 임. 또한, 첫 번째 Node 중 두 번째 사고 시나리오인 튜브연결 배관은 200barg의 압력하에 13mm 배관이 파열되는 사고로 수평방향으로만 누출되며 사고빈도는 7.3×10^{-4} 임.

<표 4.8. 수소 충전소의 시나리오 발굴 및 빈도분석(누출 위치 : 그림 1.34 참조)>

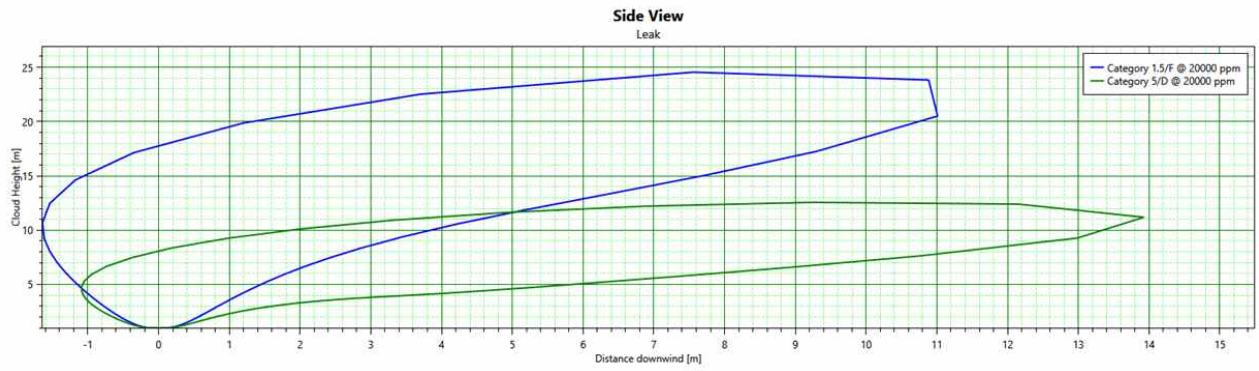
Node		Scenario		Initial Pressure (barg)	Hole Size (mm)	Duration until detection		Fr
No.	Description	No.	Description				Initial Failure(yr^{-1})	Usage Descriptio
1	튜브 트레일러 (8 tubes, 24 fittings)	1	트레일러 연결부 누출	200	10	1min	1×10^{-5}/item/yr (= × 24fittings)	
		2	튜브연결 배관 파열	200	13		4×10^{-6}/hr (= ÷2×365)	
2	압축기 배관 (17m long, 3m height)	3	배관 완전파열	940	21		1×10^{-6}/m/yr (× 17m)	
3	저장용기 (9 tubes, 34 fittings)	4	저장용기 연결부 누출	940	10		1×10^{-5}/item/yr (× 34tubes)	

○ 두 번째 Node인 압축기의 경우, 세 번째 사고 시나리오로 압축기 연결배관에서 940barg의 압력하에 21mm의 배관이 파열되는 사고로 누출방향은 파열임에 따라 수평방향이고 사고의 빈도는 1.7×10^{-5} 임. 끝으로 세 번째 Node인 저장용기의 경우, 네 번째 사고 시나리오로 배관 연결부에서 누출이 발생하며 940barg의 압력 하에 10mm의 누출구멍이 발생하고 누출방향은 수직과 수평이며 사고빈도는 3.4×10^{-4} 임.

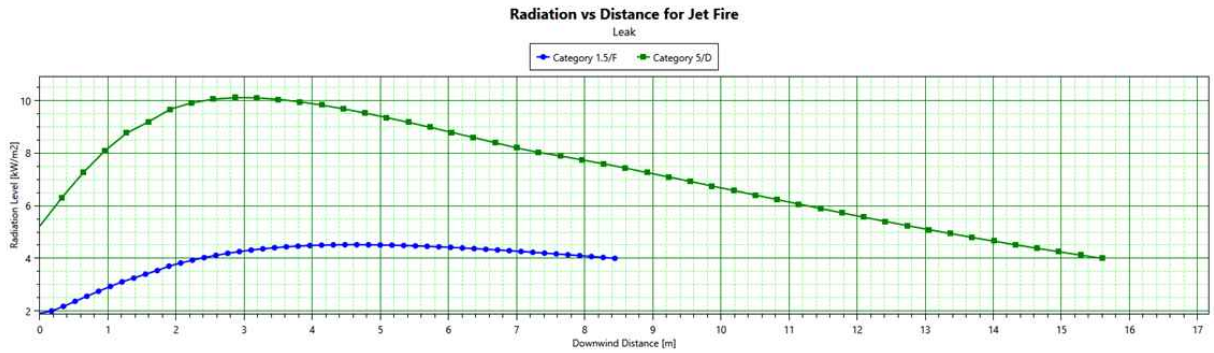
○ 앞에서 제시한 4개의 사고 시나리오 지속시간은 1분으로 수소 설비의 경우, 고위험성 설비들로써 공정운전에 따른 자동운전 조건이 1분 이내에 압력 이상이 발생될 경우, 감지하여 비상차단 할 수 있도록 설계되어 있는 점을 반영함.

○ 본 연구에서는 수소 충전소의 위험을 정량적으로 분석하기 위해 DNVGL 사의 SAFETI를 사용함. SAFETI는 현재 국내외적으로 QRA를 수행하는 데 있어서 가장 폭넓게 사용되는 Software로 오랜 시간동안 QRA의 결과를 도출하도록 설계되었음.

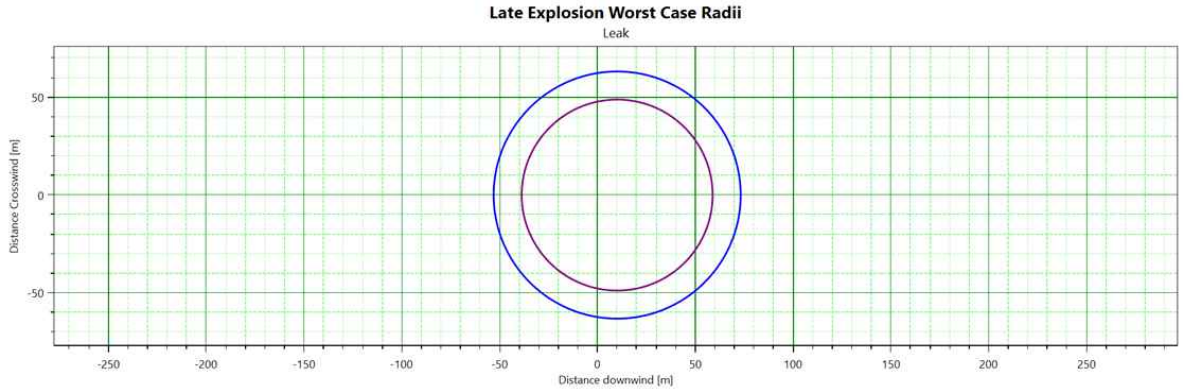
○ <그림 4.35~58>은 앞에서 제시한 시나리오 및 기상정보 등의 여러 정보를 활용하여 시뮬레이션을 수행한 결과로써 각 시나리오 별 사고유형에 따른 피해 영향 모델링 결과임.



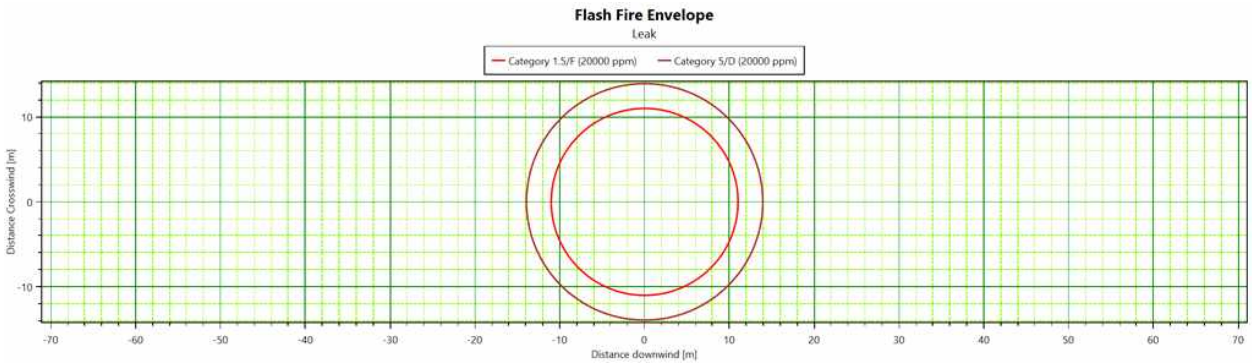
<그림 4.35. Node-1의 시나리오 1-1에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수직방향 누출에 대한 확산 결과>



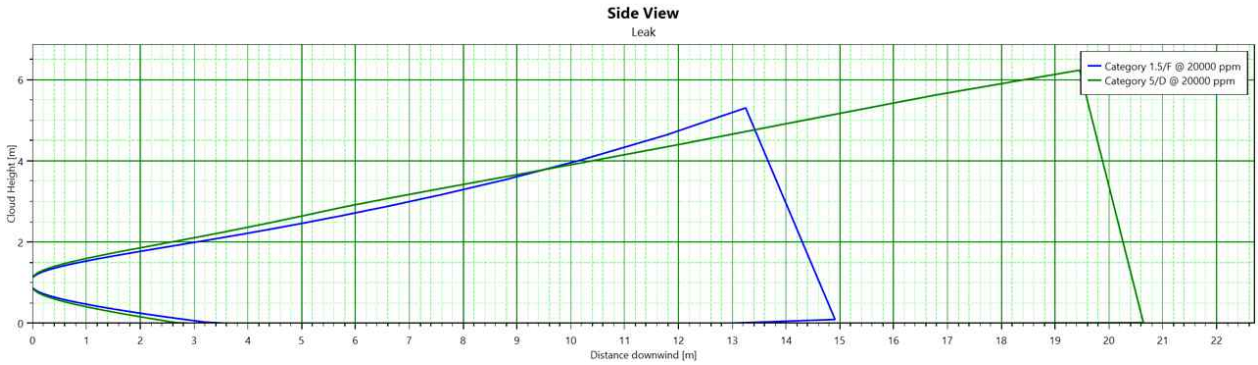
<그림 4.36. Node-1의 시나리오 1-1에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수직방향 누출에 대한 제트화재 결과>



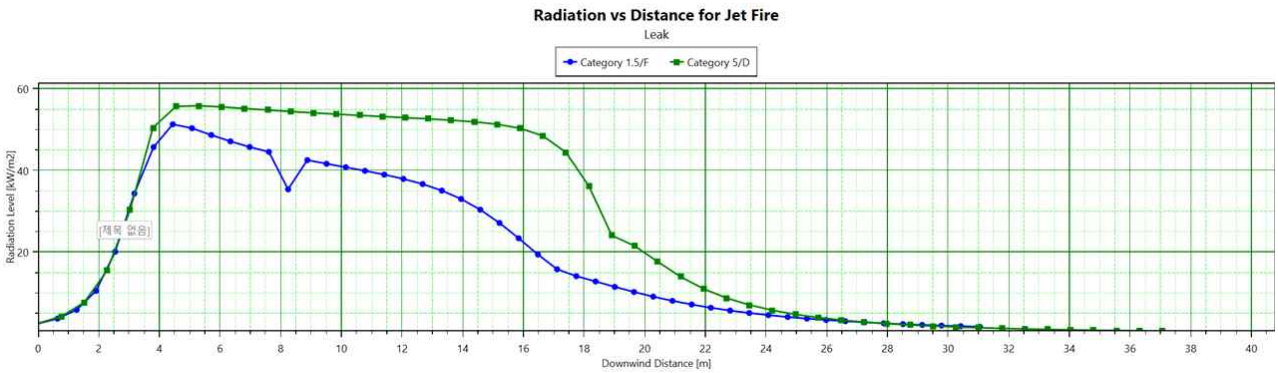
<그림 4.37. Node-1의 시나리오 1에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수직방향 누출에 대한 폭발 결과>



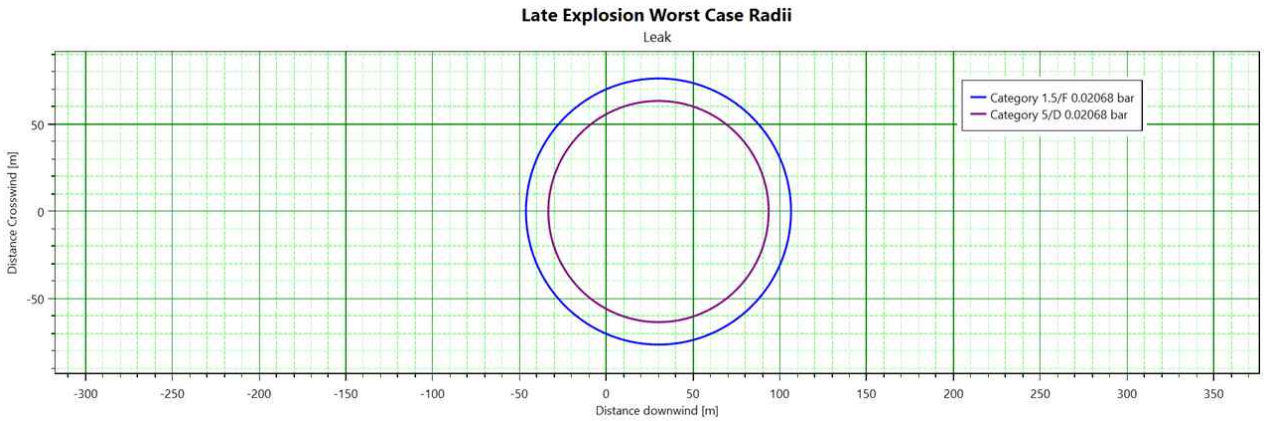
<그림 4.38. Node-1의 시나리오 1-1에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수직방향 누출에 대한 플래쉬 화재 결과>



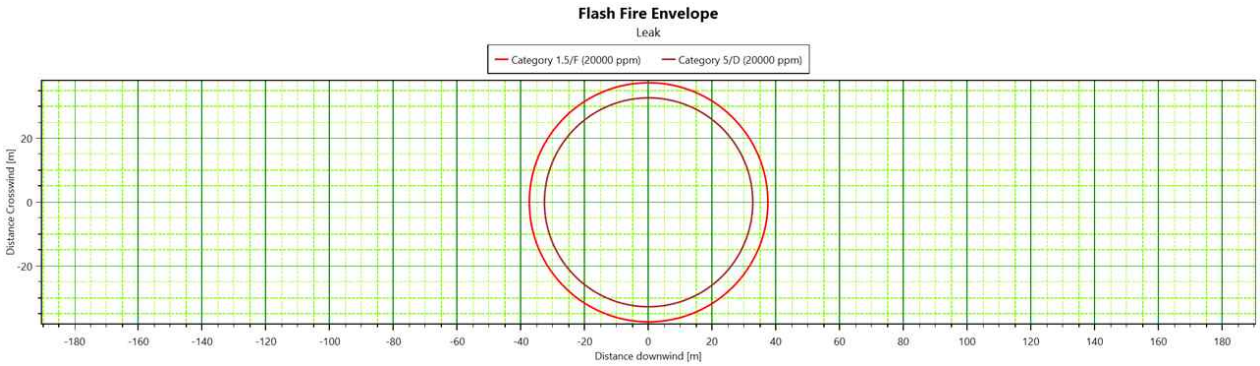
<그림 4,39. Node-1의 시나리오 1-2에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수평누출에 대한 확산 결과>



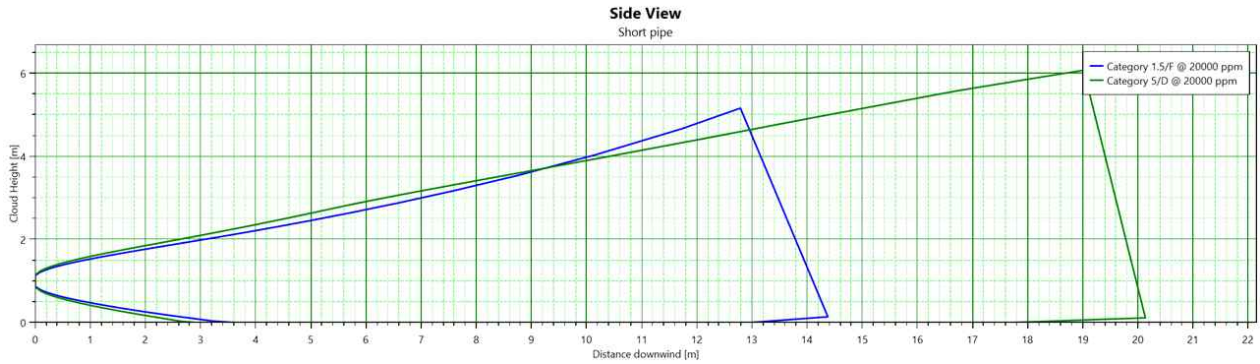
<그림 4.40. Node-1의 시나리오 1-2에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수평누출에 대한 제트화재 결과>



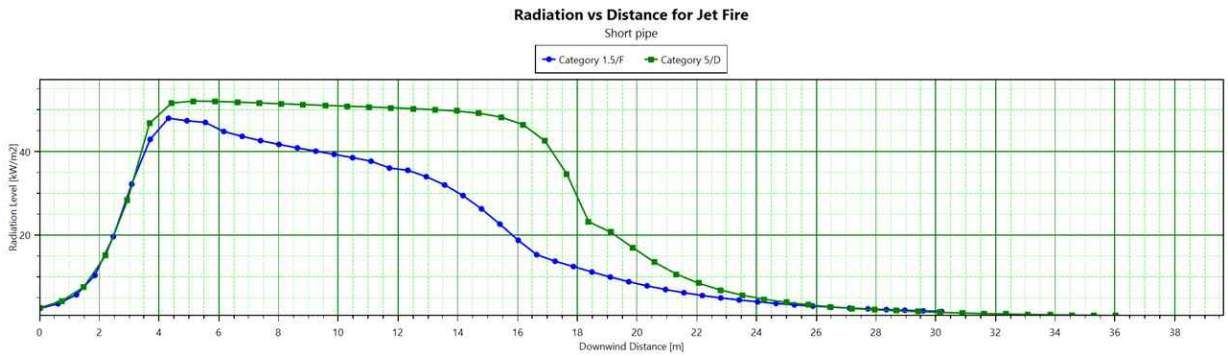
<그림 4.41. Node-1의 시나리오 1-2에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수평누출에 대한 폭발 결과>



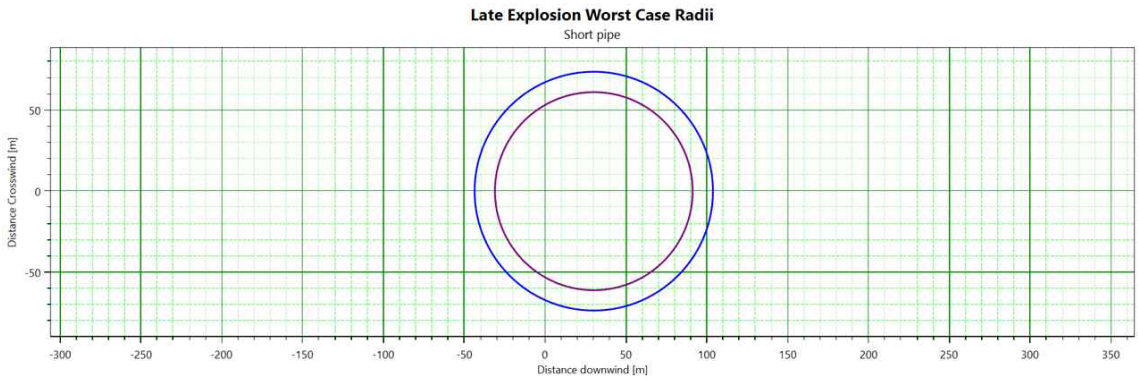
<그림 4.42. Node-1의 시나리오 1-2에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수평누출에 대한 플래쉬 화재 결과>



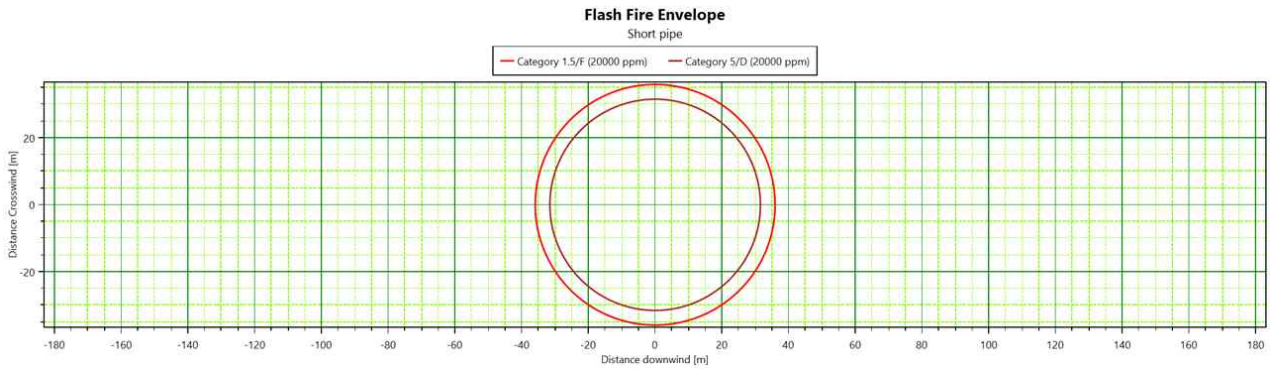
<그림 4.43. Node-2 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 배관 파열에 따른 확산 결과>



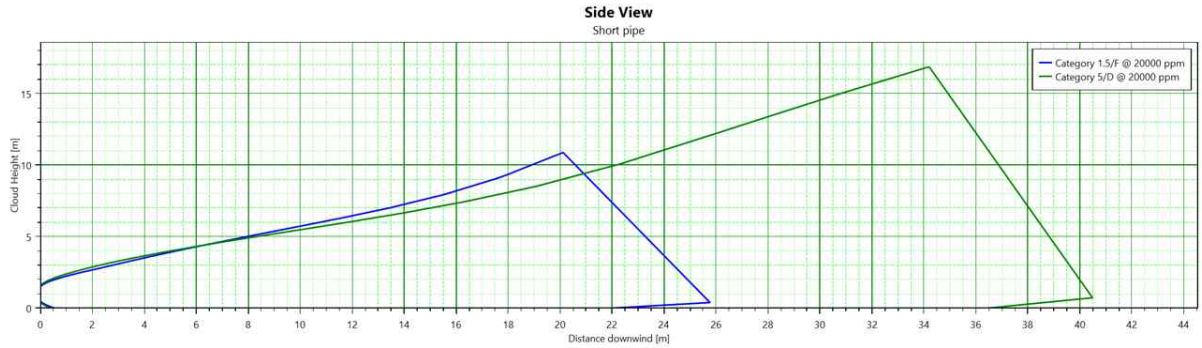
<그림 4.44. Node-2 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 배관 파열에 따른 제트화재 결과>



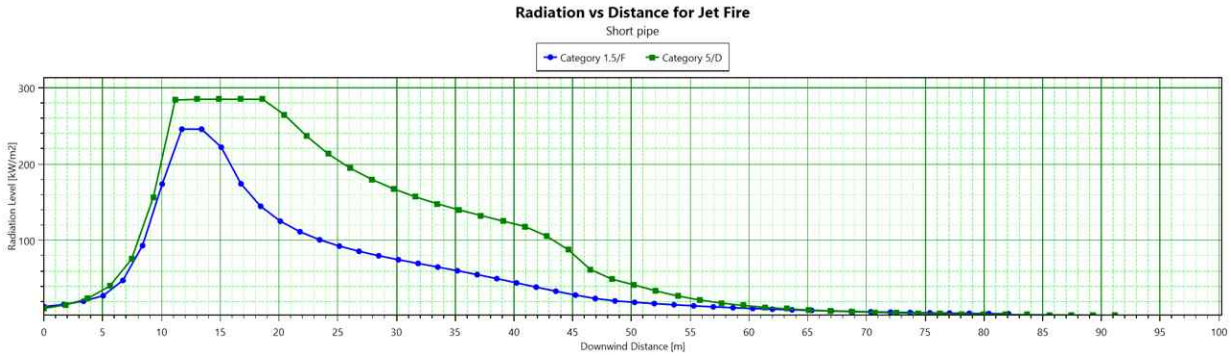
<그림 4.45. Node-2 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 배관 파열에 따른 폭발 결과>



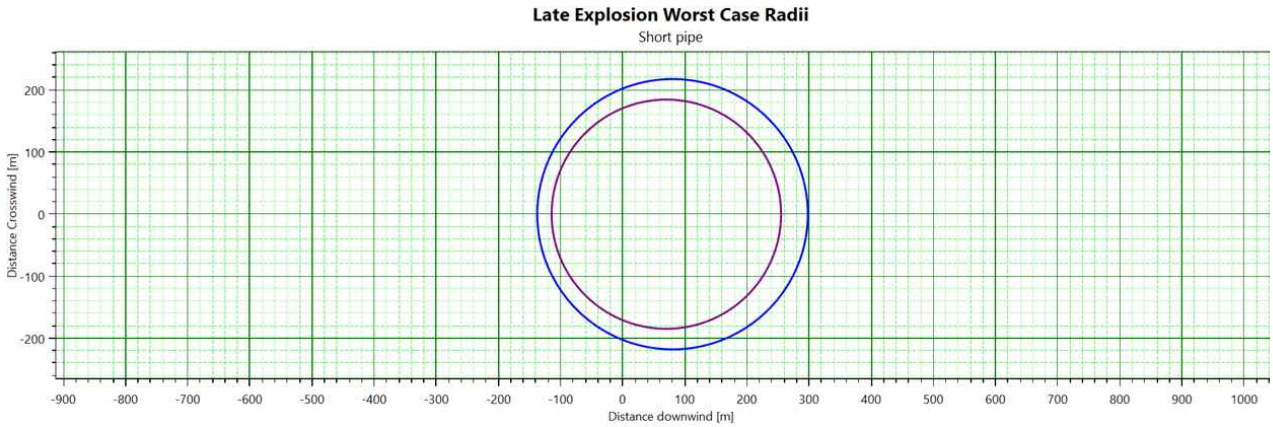
<그림 4.46. Node-2 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 배관 파열에 따른 플래쉬 화재 결과>



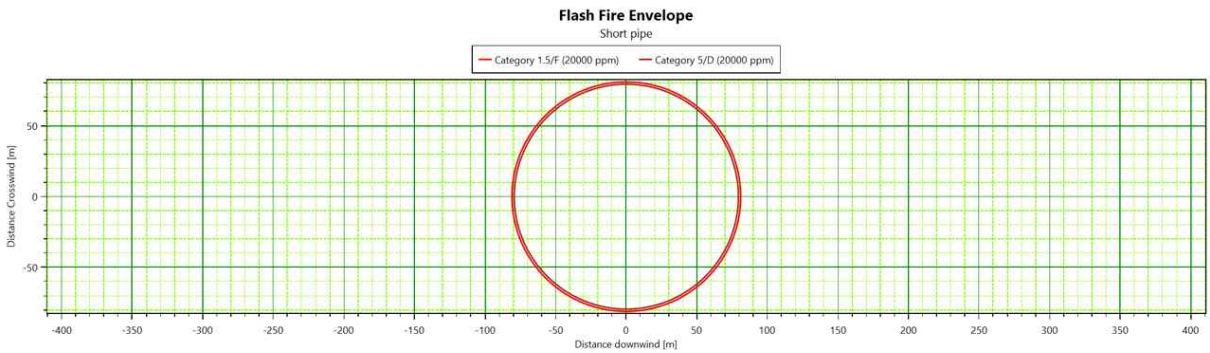
<그림 4.47. Node-3 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 배관 파열에 따른 확산 결과>



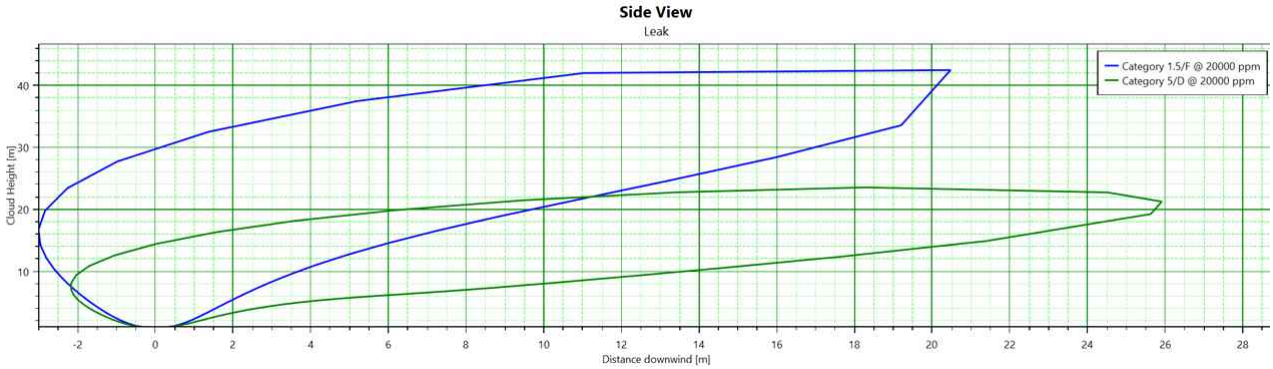
<그림 4.48. Node-3 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 배관 파열에 따른 제트화재 결과>



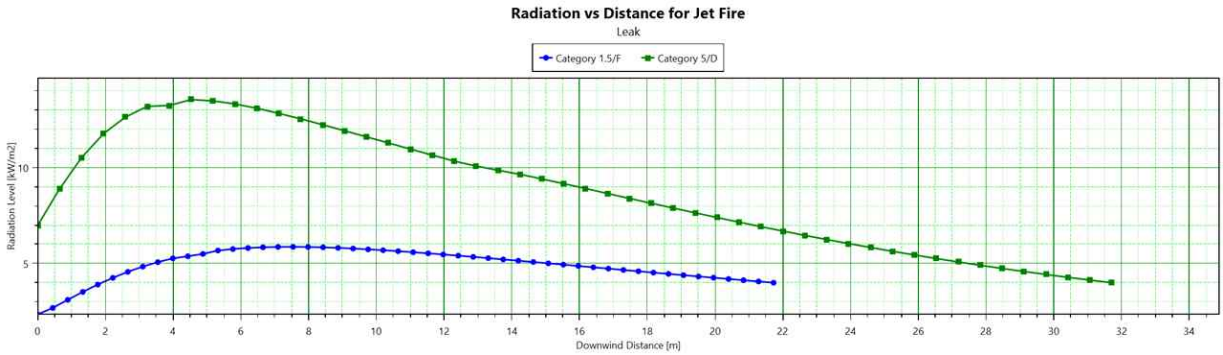
<그림 4.49. Node-3 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 배관 파열에 따른 폭발 결과>



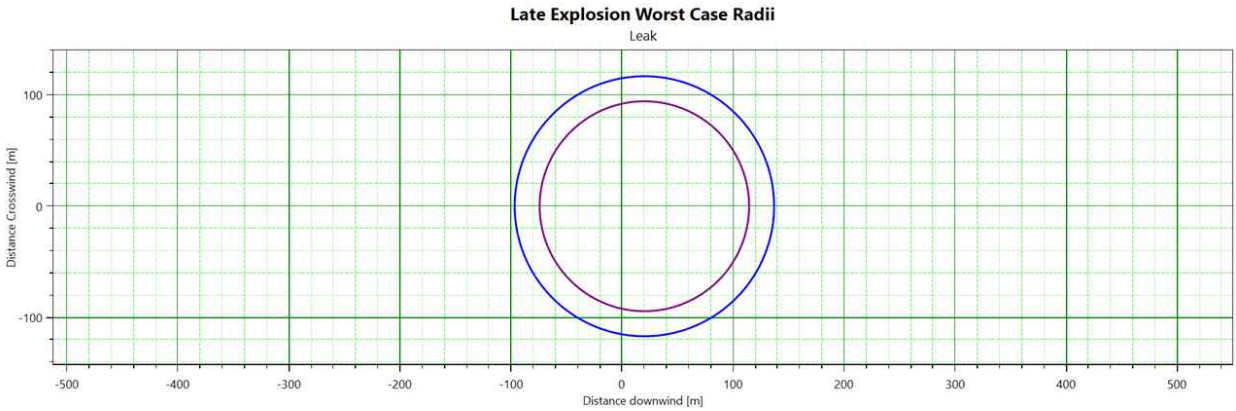
<그림 4.50. Node-3 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 배관 파열에 따른 플래쉬 화재 결과>



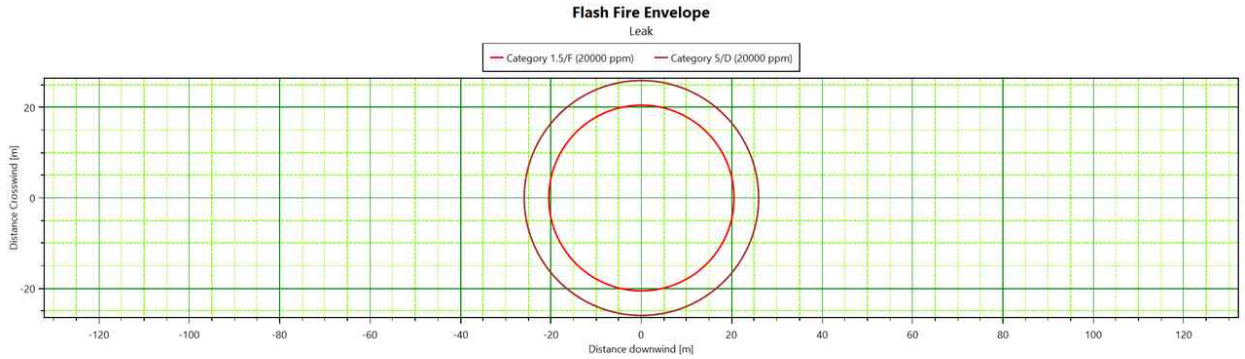
<그림 4.51. Node-4의 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수직방향 누출에 대한 확산 결과>



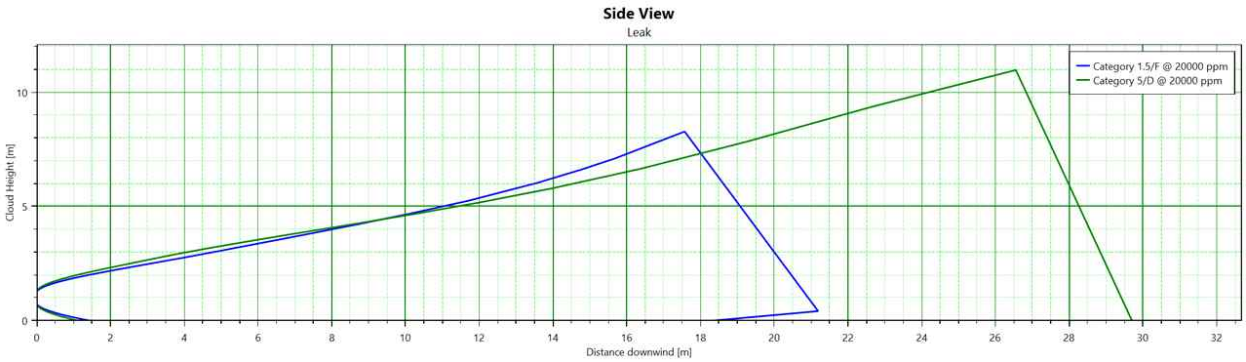
<그림 4.52. Node-4의 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수직방향 누출에 대한 제트화재 결과>



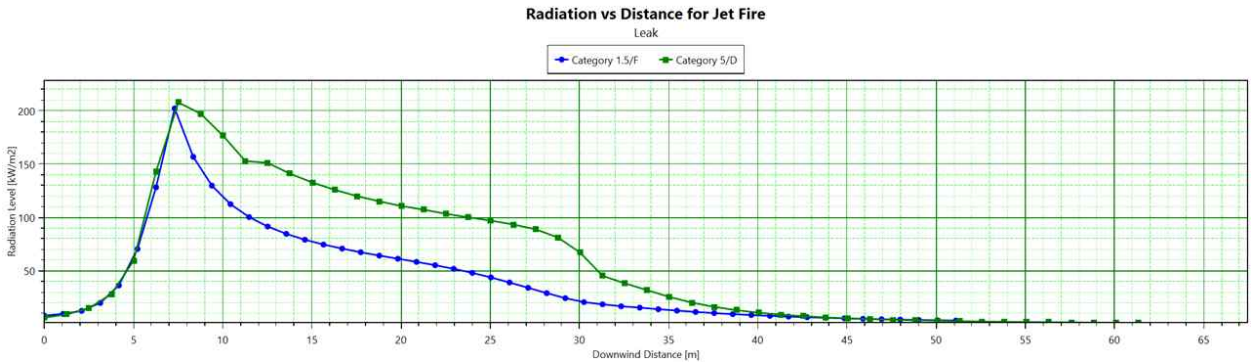
<그림 4.53. Node-4의 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수직방향 누출에 대한 폭발 결과>



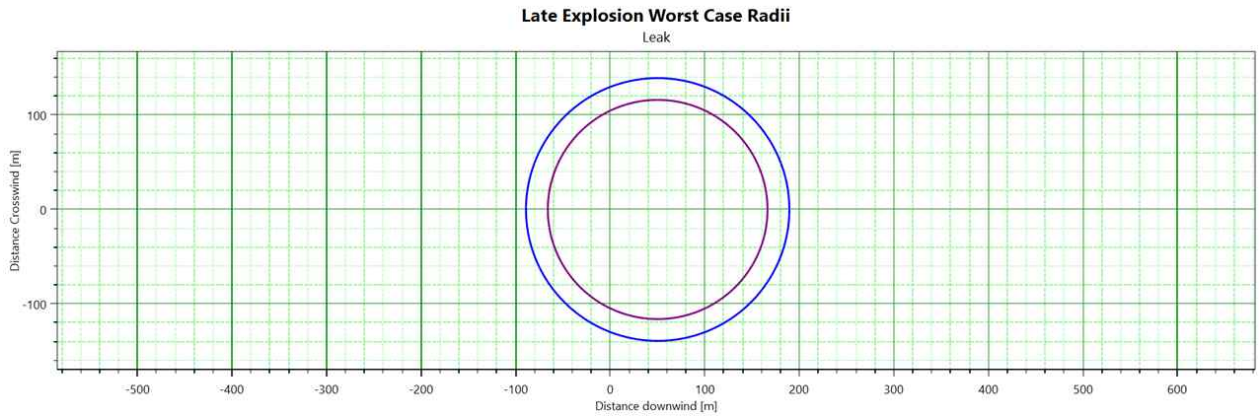
<그림 4.54. Node-4의 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수직방향 누출에 대한 플래쉬 화재 결과>



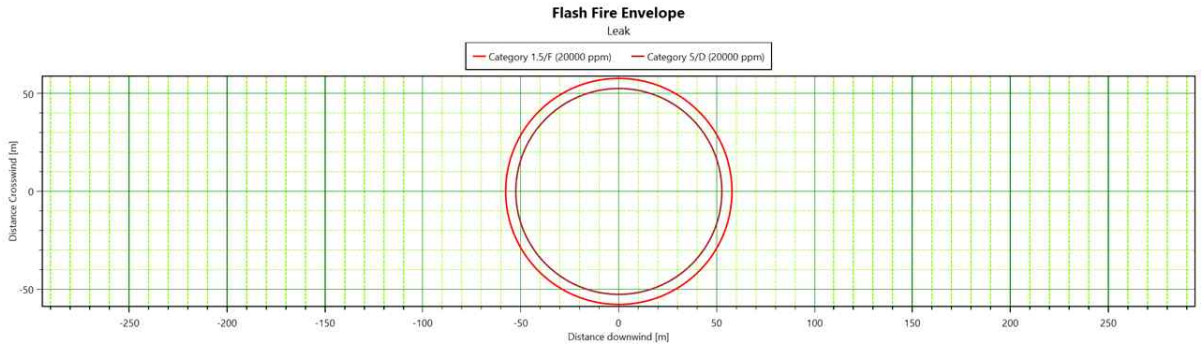
<그림 4.55. Node-4의 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수평방향 누출에 대한 확산 결과>



<그림 4.56. Node-4의 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수평방향 누출에 대한 제트화재 결과>

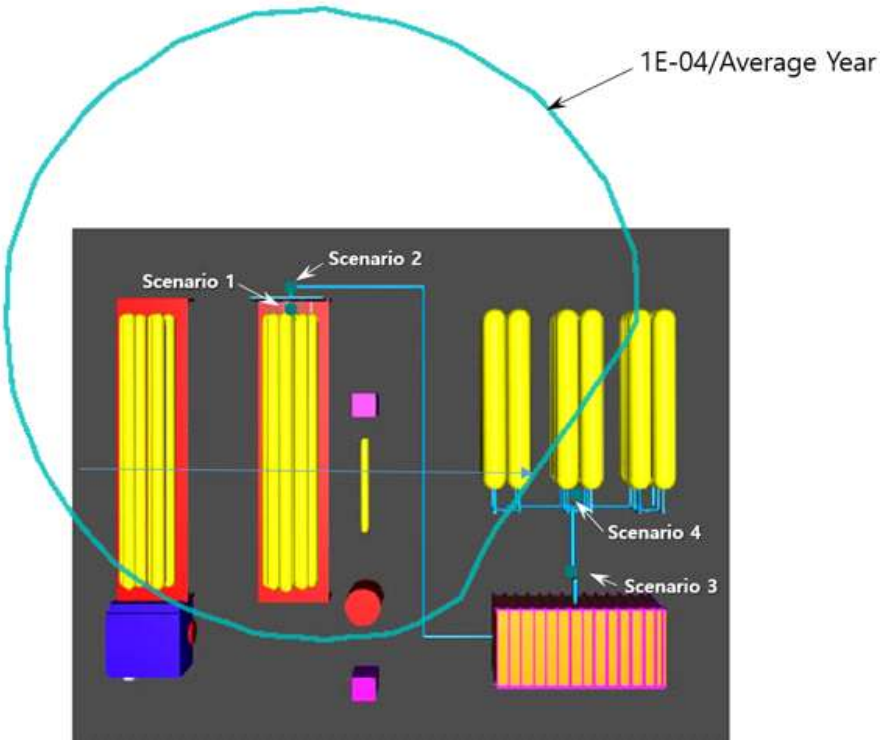


<그림 4.57. Node-4의 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수평방향 누출에 대한 폭발 결과>

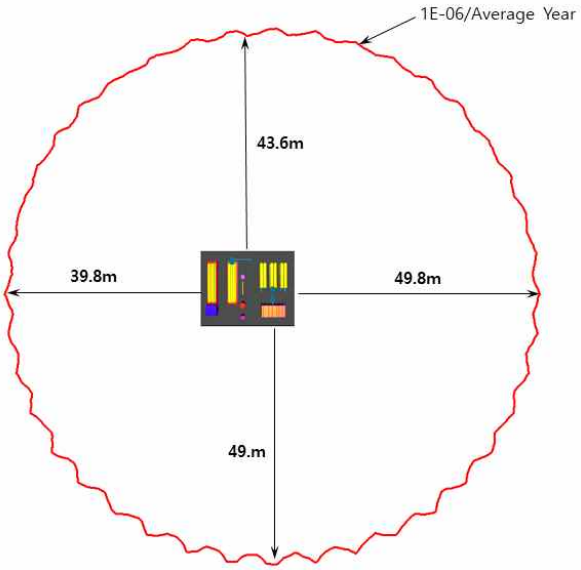


<그림 4.58. Node-4의 시나리오에 대한 현상학적 시뮬레이션 결과 : 수평방향 누출에 대한 플래쉬 화재 결과>

○ 앞에서 제시한 피해영향 모델링 결과와 빈도 등 위험성을 해석하기 위한 모든 정보를 활용하여 수소 충전소 근로자에게 초과해서는 안 될 위험성인 1×10^{-4} /year 곡선과 주변에 사람이 주거할 수 없는 위험성인 1×10^{-6}year 곡선을 각각의 그림 1.34와 1.35에 제시함.



<그림 4.59 시뮬레이션을 통한 1×10^{-4}/year 위험도 곡선>



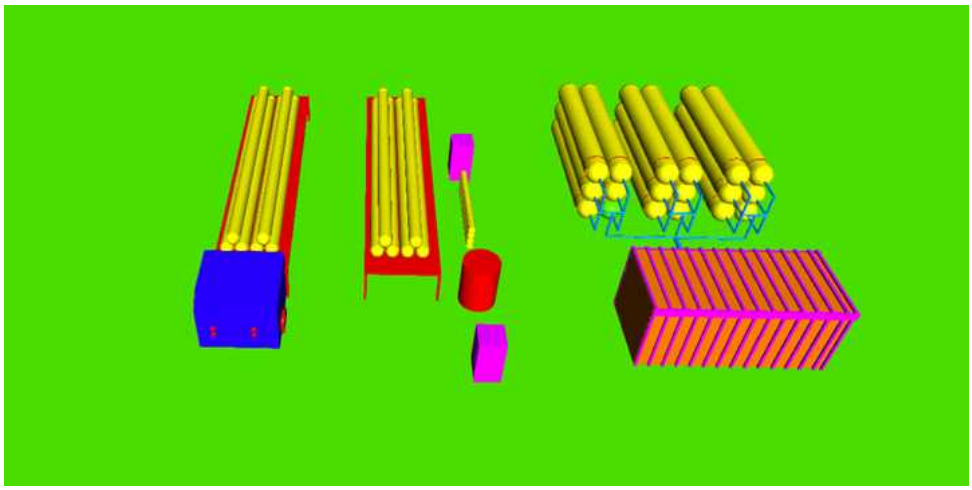
<그림 4.60. 주거가능 위험도(1×10^{-6}/year) 곡선>

○ 개인적 위험성을 나타낸 그림 1.34는 앞에서 제시한 위험 기준과 비교 할 때 수소 충전소의 많은 영역이 초과해서는 안 될 위험성인 1×10^{-4} /year 의 영역에 노출되어 있음을 나타내고 있음. 따라서, 수소 충전소의 운영을 위해서는 이러한 위험을 완화시키기 위한 별도의 안전조치에 대한 연구가 추가로 요구되는 것으로 분석됨. 또한, 그림 1.35는 수소 충전소 주변지역에 있어서 사람의 거주지역으로 허용 될 수 없는 위험성을 나타낸 곡선으로 주거할 수 없는 범위는 각각 우측 49.8m, 좌측 39.8m, 위 43.6m, 아래 49m로 분석되었음.

○ 수소 충전소 위험성 분석결과 4개의 사고 시나리오 중 위험이 가장 높은 것은 튜브 트레일러 배관 파열로 앞에서 제시한 그림 1.4의 QRA 알고리즘에 따라 이 사고에 대한

정밀분석을 CFD 시뮬레이션을 활용하여 수행함. CFD 시뮬레이션은 GEXCON 사에 의해 개발된 FLACS CFD 시뮬레이터를 이용하였으며 이는 가연성 가스나 인화성 증기에 의한 폭발 그리고 불산과 같은 독성물질 누출사고의 전개과정과 피해결과를 과학적으로 정밀하게 분석하고 예측 할 수 있는 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics) Software임. 특히, 가연성 및 독성가스의 확산과 가스의 폭발 해석에 특화되어 있는 FLACS는 화학사고 발생시 피해결과를 예측하기 위한 도구로써 CSB(chemical safety board, 미국화학사고조사국)와 HSE(health and safety executive, 영국보건안전부)에서 공식적으로 사용하고 있음.

○ CFD 시뮬레이션은 가상의 공간에 실제 설비를 3D 형상으로 생성하여 폭발해석을 함에 따라 현상학적 모델링 보다 상당히 정밀한 결과를 얻을 수 있음. 이에 그림 1.8에서 제시한 수소 충전소의 형상을 FLACS에 적용하였으며 이는 그림 1.36과 같음. 또한, CFD 시뮬레이션 시나리오는 앞에서 제시한 현상학적 시뮬레이션 결과, 수소 충전소의 위험성에 가장 큰 영향을 미치는 사고가 튜브 트레일러의 튜브 연결배관 파열사고로 분석됨에 따라 이를 적용함.



<그림 4.61. CFD 시뮬레이션 형상>

○ 튜브 연결배관의 파열 시 누출되는 수소의 양은 1.08kg/s(표 1.3)로 1분 동안 64.8kg이 총 누출됨. 그러나 이를 CFD Simulator로 시뮬레이션 함에 있어서 기술적으로 해결하기 어려운 문제가 있음. 이는 200barg의 초고압 하에 1cm의 아주 작은 누출구멍에서 유체가 방출되는 거동해석을 함에 있어서 유속이 음속의 수배에 달함에 따라 누출현상이 해석되지 않는다. 이에 본 연구에서는 누출된 수소 64.8kg과 동일한 폭발 위력을 가질 수 있는 TNT의 양으로 아래의 식[1)]을 통해 환산하여 CFD 시뮬레이션을 수행함.

$$W = \frac{\mu \times M \times E_c}{E_{TNT}}$$

---------- 식 1

$$W = \frac{0.1 \times 64.8 \times 141{,}790}{4{,}760} = 193.02\,kg$$

W : TNT당량(kg)

μ : 폭발수율계수(0.1)

M : 누출된 물질 양 (kg)

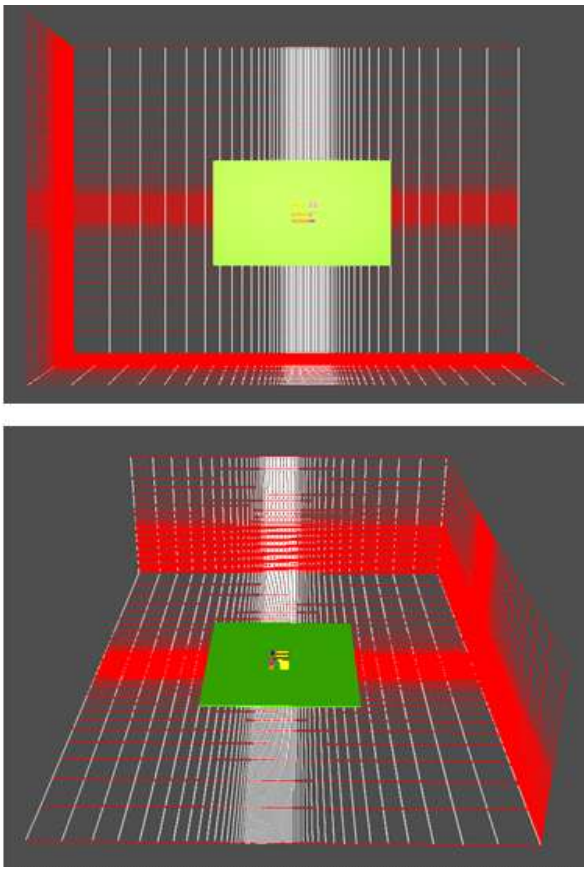
E_c : 물질의 연소열(kJ/kg)
E_{TNT} : TNT 폭발 에너지(4,760kJ/kg)

○ 위 식을 통해 수소 64.8kg과 동일한 폭발위력을 갖는 TNT의 양이 193kg으로 계산되었으며 이 값을 CFD 시뮬레이션의 물성정보로 활용함.

○ 격자는 시뮬레이션 결과 값에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 전체 시뮬레이션 영역에서 정밀한 폭발압력의 해석을 요구하는 관심영역을 폭넓게 설정함. 격자에 대한 생성 정보는 표 1.4에 제시하였으며 시뮬레이터에서 생성한 격자의 형상은 1.37과 같음.

(a)

(b)



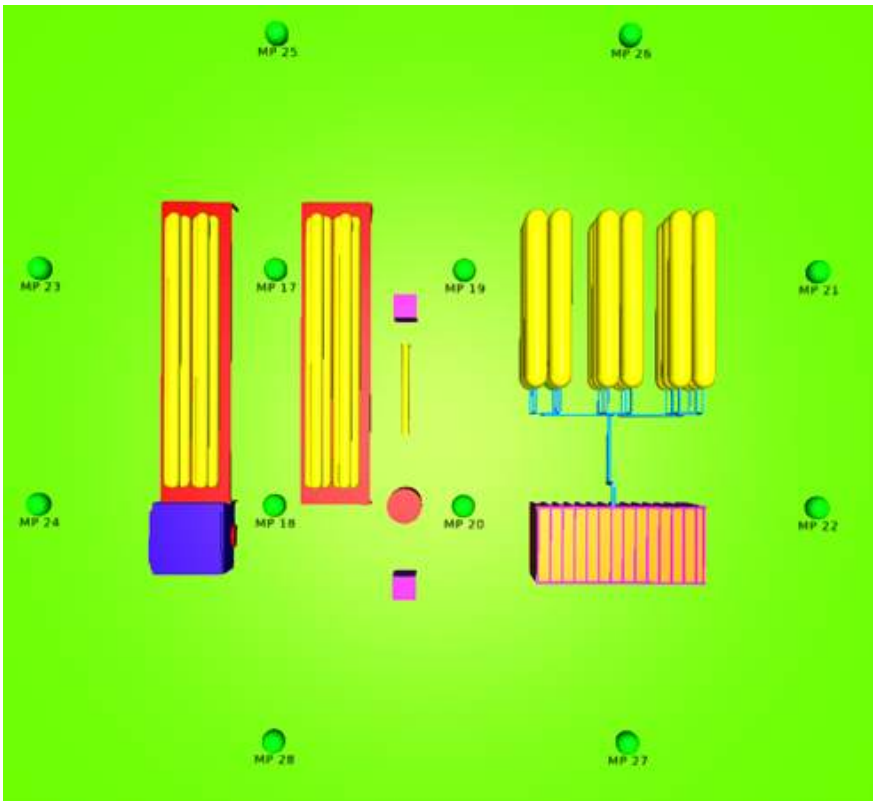
<그림 4.62. CFD 시뮬레이션을 위해 생성한 격자 형상, (a) 평면 형상, (b) ISO 형상>

표 1.4 폭발 시뮬레이션 영역 및 격자 정보

구분	X	Y	Z
전체 시뮬레이션 영역	300m	350m	101m
관심영역 격자 영역	26m	30m	41m
관심영역 격자 간격	1m		
격자 수	243,432개		

○ CFD 시뮬레이션은 현상학적 시뮬레이션 방법보다 정밀한 해석과 함께 특정지점에서 직접적으로 영향을 받는 폭발압력의 정보를 얻을 수 있음. 일반적으로 현상학적 시뮬레이션은 폭발장소의 설비나 장치류에 대해서는 고려하지 않고 평면상에 물리적 피해 예상 결과만을 표현하지만 CFD 시뮬레이션은 모든 설비나 장치류 형상을 표현할 경우 폭발거동의 변수로 고려하여 해석함에 따라 정밀한 결과를 얻을 수 있음. 이러한 해석

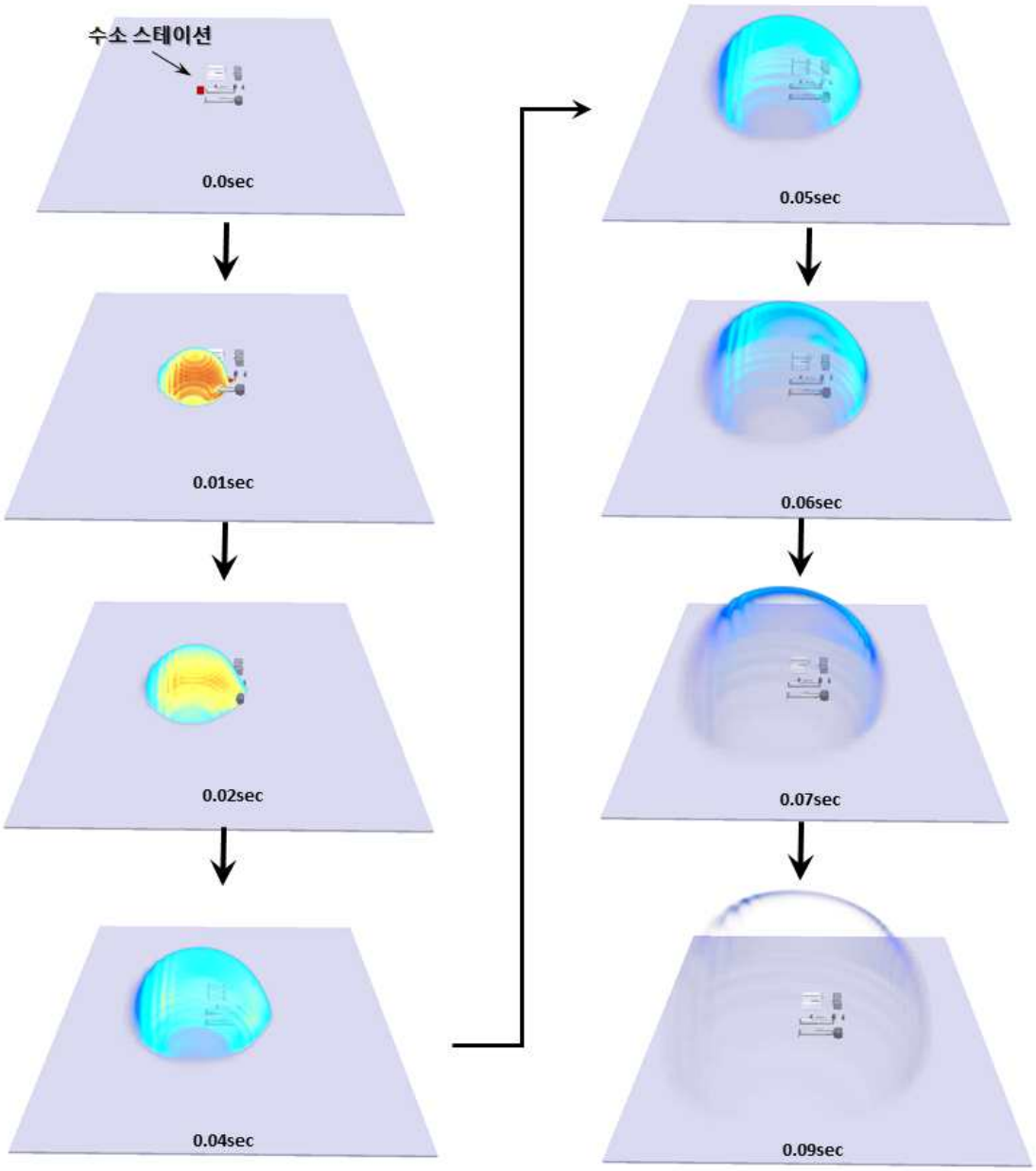
매커니즘의 장점으로 인해 정밀한 폭발해석에 있어서 CFD를 활용하고 있음.



<그림 4.63. 특정 지점별 폭발압력 확인을 위한 모니터 포인트 설정형상>

○ 본 연구에서는 수소 충전소의 폭발로 인해 발생되는 폭발압력을 특정 지점별로 해석하기 위해 그림 1.38과 같이 28개의 모니터 포인트를 설치함. 여기서 설정된 모니터 포인트의 수치해석 결과를 활용해 안전조치를 강구하기 위한 기본 정보로도 유용하게 활용할 수 있음.

○ 수소 충전소의 위험성에 가장 큰 영향을 미치는 튜브 트레일러의 튜브 연결배관 파열로 인한 폭발에 대해 CFD 시뮬레이션을 수행한 결과 폭발전개 과정은 그림 1.39과 같음.



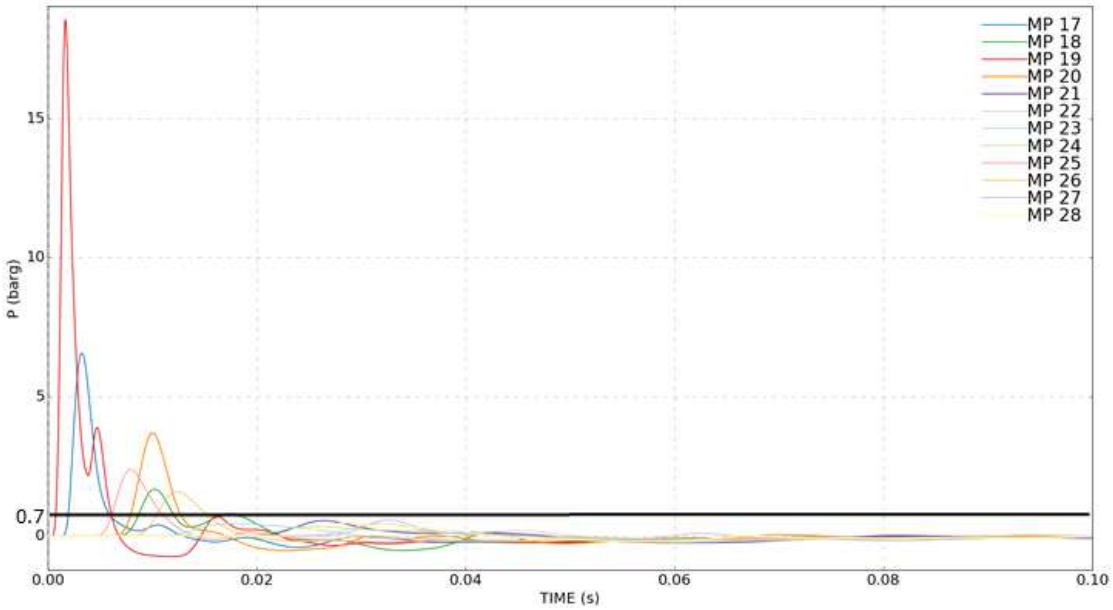
<그림 4.64. 시간에 따른 폭발의 전개 과정 형상>

○ 본그림 1.39를 통해 폭발 지속시간은 폭발시작 후 0.1s 동안 지속되고 폭발압력은 수소 충전소 전체 영역에 영향을 미쳤다. 또한, 설정된 모니터 포인트 별 시간에 따른 폭발 압력은 그림 1.40과 같이 해석되었음.

○ 폭발 발생 시 최대 피해를 초래하는 피해인자는 과압으로 대부분의 건축물을 파괴시킬 수 있는 압력은 0.7barg[1)]에 해당됨. 따라서 수소 충전소 특정지역에 설정한 모니터 포인터 별로 영향을 미치는 폭발압력인 0.7barg의 압력의 기준을 그림 1.40에 병행 표기(검은선) 함. 또한, 각 모니터 포인터 별 최대압력 값은 표 1.5에 제시함.

○ 그림 1.40과 표 1.5를 통해 모니터 포인트에서 발생한 폭발과압을 분석하면 대부분의 건축물을 파괴시킬 수 있는 폭발압력인 0.7barg의 과압은 모니터 포인트 17, 18, 19, 20, 25, 26번에서 발생하였으며 이 지점에서 폭발에 의한 피해가 가장 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다(그림 1.41 참조). 그리고 23, 24번의 모니터 포인트는 0.44barg와 0.34barg의 폭발압력이 발생하였고 이 압력은 주택건물을 완파[1)]시킬 수 있는 과압에

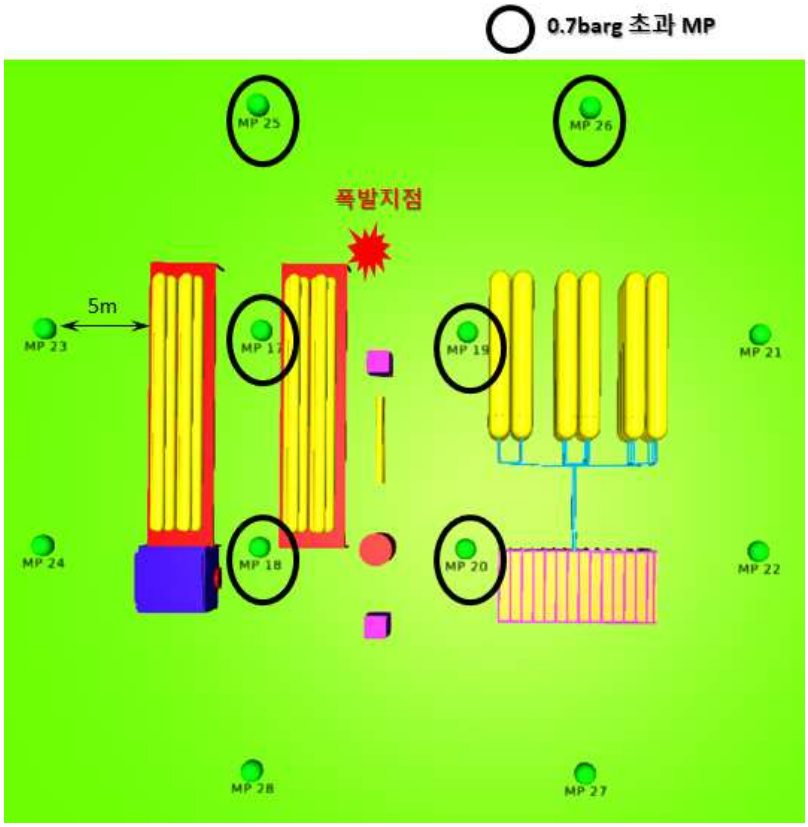
해당됨. 끝으로 모니터 포인트 21, 22, 27, 28에서는 각각 0.55barg, 0.45barg, 0.57barg, 0.46barg의 폭발압력이 발생하였으며 이는 짐을 실은 화물차가 전복가능하고 또한, 두께 20~30cm의 벽돌벽이 붕괴 될 수 있는 결과(0.5-0.55barg 기준)를 초래할 수 있을 정도의 강도[1)]를 나타냄.



<그림 4.65. 0.7barg 기준 대비 모니터 포인트 별 폭발압력>

표 1.5 모니터 포인터 별 폭발 압력 결과

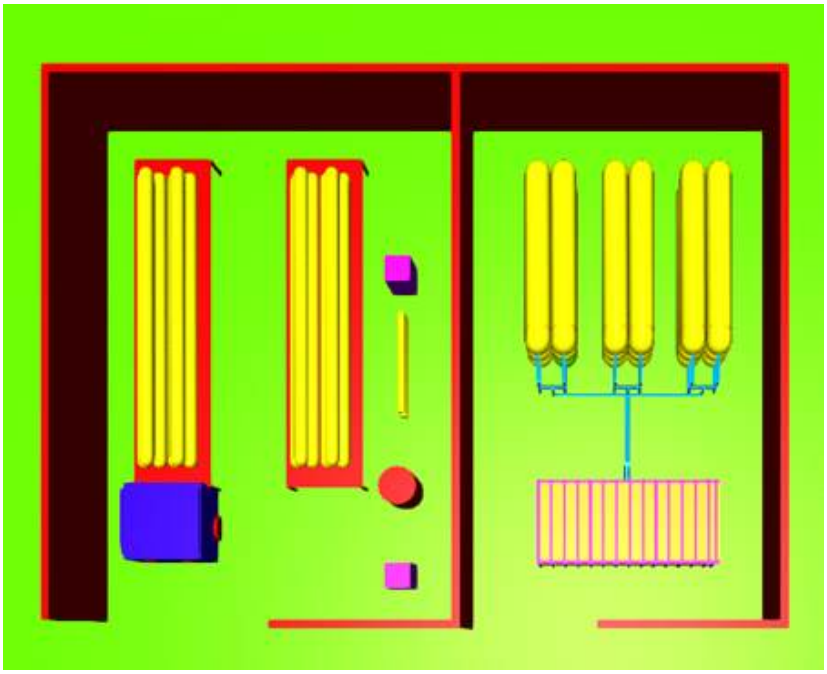
Monitor Point	PMax(barg)	Monitor Point	PMax(barg)
17	6.6	23	0.44
18	1.7	24	0.34
19	18.5	25	2.37
20	3.7	26	1.59
21	0.55	27	0.57
22	0.45	28	0.46



<그림 4.66. 0.7barg 초과 모니터 포인트 위치>

○ 결론적으로 CFD 시뮬레이션을 통한 수소 충전소에서의 폭발 시뮬레이션 결과, 폭발 발생 시 내부에는 치명적인 결과가 발생함과 동시에 대부분의 설미가 파괴될 수 있음을 알 수 있음. 따라서 이러한 폭발을 완화시키기 위한 안전조치가 노력이 필요함.

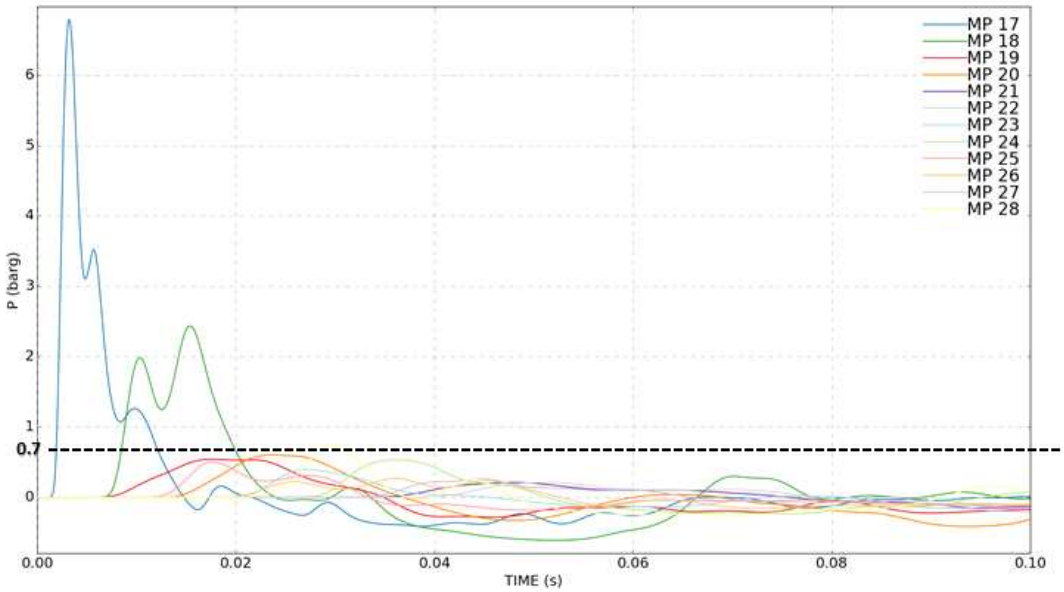
○ 수소 충전소 시뮬레이션 결과를 통해 확인된 위험성을 기반으로 안전조치를 반영함. 이는 기존의 수소 충전소 설비 영역에 방호벽을 설치함으로써 폭발이나 화재사고 발생 시 주변공간 및 설비와의 접촉을 막기 위한 공간적 제약으로 폭발 시 상부와 측면 개구부로 폭발압력을 이동시키고 제트화재 시에는 화염의 주변 설비 접촉(Impinging)을 차단하기 위한 안전조치임. 이러한 안전조치를 반영한 수소 충전소의 형상은 아래 그림 4.67과 같음.



<그림 4.67. 수소 충전소의 안전조치 반영을 통한 구조물 설계>

❍ 그림 4.67에 제시한 구조적 안전방안을 기반으로 폭발 시뮬레이션을 수행함. 시뮬레이션 입력정보는 앞에서 제시한 바와 동일함. 그림 4.68에 제시된 각 지점별 모니터 포인트에서의 폭발압력은 그림 1.43과 표 1.5와 같으며 이를 통해 방호벽 설치 이후 치명적인 폭발 피해를 발생시킬 수 있는 압력은 급격하게 감소하였음을 확인 할 수 있음.

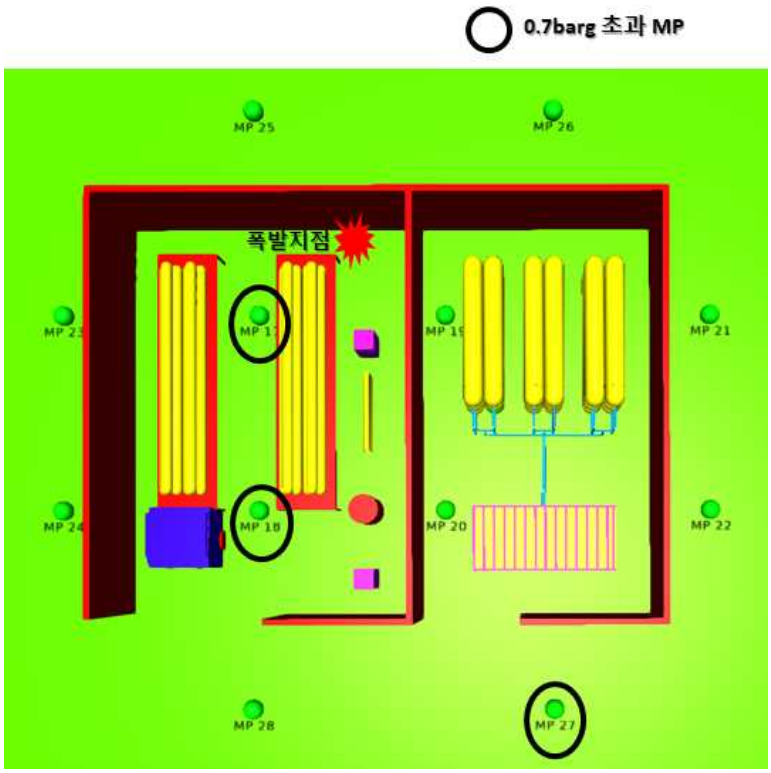
❍ 폭발이 발생한 공간 내부의 모니터 포인트 17번의 경우, 폭발압력은 큰 변화가 발생하지 않음. 이는 폭발이 발생한 공간은 방호벽에 의해 공간이 구분되어 있지 않기 때문으로 방호벽에 의해 구분된 다른 영역의 폭발압력은 크게 감소함. 특히, 치명적인 폭발압력인 0.7barg의 경우, 폭발발생 영역 이외의 다른 영역에서는 발생되지 않음에 따라 방호벽의 공간적 배치는 적정한 것으로 분석됨.



<그림 4.68. 안전조치 적용에 따른 모니터 포인트에서의 폭발압력>

표 1.5 모니터 포인터 별 폭발 압력 결과

Monitor Point	안전조치 전/후 폭발압력 PMax(barg)		△P(barg)
	안전조치 전	안전조치 후	
17	6.60	6.80	+0.20
18	1.70	2.40	-0.70
19	18.50	0.54	-17.96
20	3.70	0.60	-3.10
21	0.55	0.21	-0.34
22	0.45	0.21	-0.24
23	0.44	0.40	-0.04
24	0.34	0.53	+0.19
25	2.37	0.51	-1.86
26	1.59	0.27	-1.32
27	0.57	0.74	+0.17
28	0.46	0.26	-0.20



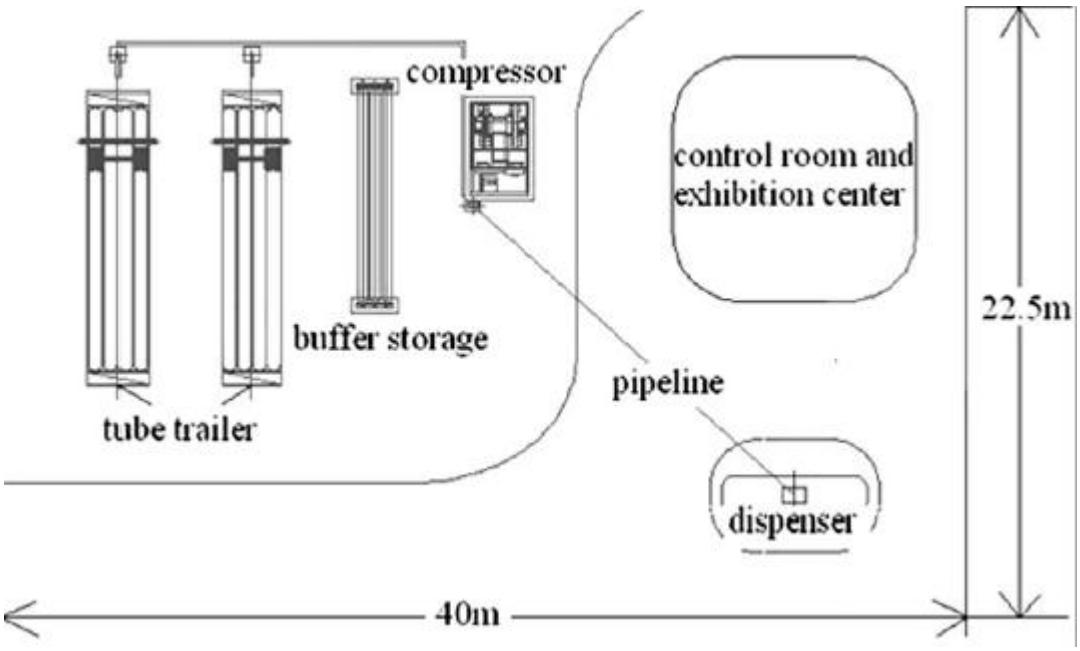
<그림 4.69. 0.7barg 초과 압력 발생 모니터 포인트 지점>

○ 본 연구는 폭발사고로 인한 추가적인 도미노 영향(Domino effects)에 대해서는 고려하지 않음. 이는 대표적인 탄화수소 연료인 메탄, 에탄, 프로판의 경우, 각각의 연소열이 55.50MJ/kg, 51.88MJ/kg, 50.35MJ/kg로 수소의 연소열(141.79MJ/kg)과 비교할 때 메탄보다는 2.6배, 에탄 보다는 2.7배, 프로판 보다는 2.8배 높은 위험성을 갖고 있어 폭발이나 화재 사고 발생 시 주변의 설비나 장치류에 치명적인 사고를 유발할 수 있음. 이에 고위험 물질인 수소를 저장하거나 취급 및 운송하는 설비에 대해서는 도미노 영향에 의한 추가 피해영향을 정밀하게 연구할 필요가 있다고 판단됨.

○ 또한, 200barg 이상의 초고압 하에서 1cm의 작은 누출구멍을 통한 유체거동 해석에 있어서 현존하는 가장 과학적인 방법인 CFD 시뮬레이션은 기술적 한계를 갖고 있음. 이는 누출지점에서의 유속이 음속의 수배에 달함에 따라 해석이 불가한 Super critical 영역이 나타남에 따라 이를 수치로 시뮬레이션 하는데 있어서는 한계가 있는 것임. 이에 추후, 이 문제를 해결 한 시뮬레이션 접근방법을 활용할 경우, 더욱더 정밀한 폭발체적을 수치로 해석하여 폭발시뮬레이션의 정밀도를 높일 수 있을 것으로 분석됨.

○ 수소 충전소 위치선정은 구조물에 파괴영향을 미칠수 있는 0.7barg를 기준으로 그 과압이 미치는 영향범위를 평가하고, 이를 경감시키기 위한 설계 변경을 통해 수소 충전소 위치 선정을 수행함. CFD 의 경우 정밀한 과압 도출이 가능하므로, 수소 충전소 상세 설계시 유용하게 사용될 수 있음.

○ 수소 스테이션의 사례연구로는 Shanghai Anting Hydro Refueling Station을 사례 연구로 사용. Anting Hydrogen Refueling Station은 Tongji University, Shanghai Aerospace Energy Company 및 Shanghai Sunwise Energy System Company가 공동으로 운영. Shell Hydrogen은 Tongji University와 기술 컨설턴트로 협력하여 운영 일부를 담당. Linde와 Shanghai Gas Engineering Design Institute는 스테이션 건설을 위한 엔지니어링 서비스를 제공함. 이 스테이션은 상하이에서 첫 번째 수소 충전소이며 2008 올림픽 게임을 위해 동지 대학교에서 개발 한 FCV 플릿을 성공적으로 서비스했다. 역의 계획안이 그림 4.70에 나와있음.



<그림 4.70. 수소 스테이션 연구 사례 내 계획 안>

○ 이 스테이션은 35MPa 스테이션임. 수소는 대략 2.3 m3의 부피를 가진 8 개의 튜브로 구성되며 200 bar (200 bar는 중국의 운송 법에 의해 제한되는 상한선) 이하의 압축 수소 압력을 포함하는 운송 트레일러에 의해 스테이션으로 운반됨. 트레일러는 압축기에 17m 파이프 작업에 연결되는 유연한 호스로 연결되며, 압축기는 트레일러에서 최대 수소 압력 414 bar까지 수소를 흡입. 완충 저장은 각각 약 0.77 m3의 부피를 갖는 9개의 상호 연결된 원통형 압력 용기임. 연료를 보급 할 때, 수소는 버퍼 저장 장치에서 16m 배관 작업을 통해 디스펜서로, 그리고 자동차는 최대 압력 350bar로 배출됨.

4. 수소 에너지 시설 관리기술

○ 고온, 고압에서 수소와의 반응 또는 수소의 존재에 의하여 강의 기계적 성질이 문제가 될 수 있음. 이는 주로 수소의 침식에 의한 현상으로써 수소가 강중에 침입하고 탄화물을 분해하여 탈탄과 입체 균열을 발생하기 때문으로 다음과 같은 수소의 손상을 방지하여야 함.

○ Hydrogen Blistering

○ 부식/음극 방식에 의해 발생된 수소가 금속내부로 침투되어 발생하는 것으로 분자상태의 수소는 입자 사이의 틈에서 확산하지 못하여 압력이 수십만 기압이 되어 파괴됨. 이를 방지하기 위한 방법은 다음과 같음.

- Rimmed 강 대신에 Killed강등의 Clean강을 사용함.
- Austenite Stainless Steel 이나 Ni 등으로 Cladding 처리를 함.
- 폐쇄 순환계에서는 부식억제재를 사용함.
- 수소원자가 분자로 결합하는 것을 방해하는 독성 원소를 제거함.

○ Hydrogen Embrittlement (Delayed Cracking)

○ 수소가 금속 내부로 침입하여 연성과 인장강도가 감소하는 현상으로서 티타늄과 같이 수소 화합물을 형성하는 성질이 큰 금속에서 용해된 수소나 전위가 Microvoid 주위에 모여서 Slip을 방해하기 때문에 발생함. 이를 방지하기 위한 방법은 소재 대체(Ni, Mo 합금)나 저수소 용접봉을 쓰고, 용접봉을 건조시킴.

○ 수소에너지 시설은 사용자, 직원, 주민 등에 대한 위험을 최소화 할 수 있는 위치에 설치하여야 함.

○ 설치 위치 및 운전에 관련된 잠재적 위험성을 고려하여야 함.

○ 화재/폭발의 위험을 최소화하기 위해 다음 기준을 준수하여야 함.

- 인화성 또는 폭발성 혼합물의 형성을 방지
- 점화원으로 인한 화재/폭발을 방지
- 다수 누출로 인한 화재/폭발 피해영향을 완화 및 억제하여야 함

○ 설비 및 장치 설계 시 연결 부위를 최소화 하여 누출을 방지

○ 화재/폭발 방지를 위해 오작동 및 오용을 고려하여야 함.

○ 수소가스가 누출될 경우, 다른 장치로 화재가 확산되지 않도록 하기 위해 수소 화재감지기를 설치하여야 함.

○ 수소 화재감지기는 자외선 감지센서를 이용하여야 함.

○ 화재가 발생할 경우 고압의 수소 저장장치에 영향을 미칠 수 있으므로 연기 감지기 등을 설치하여야 함.

○ 수소가스를 공급하는 저장탱크에 연격된 배관에는 탱크의 외면으로부터 5m 이상 떨어진

위치에서 조작할 수 있는 긴급차단장치를 설치하여야 함.

- 긴급차단장치에 부속된 밸브 외에 2개 이상의 밸브를 설치하고, 그 중 1개는 그 배관에 속하는 저장탱크의 가장 가까운 부근에 설치하여야 함.
- 이 경우, 그 저장탱크의 가장 가까운 부근에 설치한 밸브는 가스를 송출 또는 주입하는 경우 외에는 잠가 두어야 함.
- 긴급차단장치는 또는 역류방지밸브는 저장탱크 주 밸브 외측으로 가능한 한 저장탱크에 가까운 위치 또는 저장탱크의 내부에 설치하되 저장탱크의 주 밸브와 겸용해서는 안됨.
- 긴급차단장치 또는 역류방지밸브를 설치할 때에는 저장탱크의 침해, 배관의 열팽창 그리고 지진 등 그 밖의 영향을 고려해야 함.
- 수소 누출 등 비상 상황이 발생할 경우 긴급차단장치가 작동하여야 함.
- 긴급차단장치는 위험지역 밖에 위치하여야 하며 화재, 폭발, 누출이 발생할 경우 초기에 작동하여야 함.
- 밀폐된 공간에서 수소를 사용할 경우, 긴급차단장치는 외부에서 작동하여야 함.
- 긴급차단장치에 대한 작동 방법은 안전한 위치에 비치하여야 함.
- 긴급차단장치가 작동할 경우, 모든 펌프 및 압축기의 작동은 중단되어야 함.
- 긴급차단장치는 수소 누출로 인한 영향을 받지 않는 곳에 설치하여야 함.

- 외부 영향으로부터 수소 에너지 시설의 안전을 확보하기 위하여 다음 사항을 준수하여 함.
- 제어장치의 설계 시 안전원칙 적용
- 장비의 신뢰성을 통한 위험노출 제한
- 예방법의 준수
- 장비에 대한 정기적인 유지 및 보수

5. 안전관리기법의 개발

- 우수한 연료는 편리한 수송 연료여야 하며 다목적 (다른 형태의 에너지로 쉽게 전환 가능)이어야 하며 높은 이용 효율, 환경친화적이며 저렴하고 안전해야 함. 이러한 요소들을 염두에 두고, 수소는 현재의 모든 경쟁 연료를 능가하며 현재와 미래의 사용에 가장 적합. 반대로 수소의 높은 에너지 함량, 낮은 점화 에너지, 빠른 연소 속도, 광범위한 탄력성 및 폭발 가능성 범위는 조심스럽게 취급하지 않으면 매우 안전하지 않은 연료. 수소의 상업적 적용을 위한 선결 조건은 요구되는 기반 시설의 안전성을 조사하고 관련 위험이 현존하는 연료 공급품의 위험보다 적어도 현저히 높지 않도록 설계가 되어 있다는 것임.
- 사고 분석 및 조사에서 얻은 지식은 산업이 더 나은 안전관리 시스템을 형성하여 시설에서보다 안전하고 건강한 작업 환경을 제공 할 수 있도록 도와줌. 수소 사고에 대한 데이터는 통합되지 않았기 때문에 연구자들은 원래의 수소 사고데이터를 결합하려고 시도했으며 수소 안전성에 대한 유용한 정보를 추출하기 위해 기존의 통계 분석을 수행했다. 접근법은 여전히 유용하며 향후 연구 노력을 할 방향에 대한 정보를 제공.
- 데이터 분석을 통해 위해성 평가에서 가능한 사고 시나리오를 정의. 잠재적인 시스템 및 외부 영향을 평가함. 포함 된 시나리오가 가상의 위험 분석뿐만 아니라 실제 사건을 기반으로 하는 경우 위험 분석을 향상시킬 수 있음. 실제 사건의 결과 / 결과 계산

의 결과와 비교하여 사용 된 모델의 유효성을 검사 할 수 있다. 또한, 사건 분석은 시작 사건의 빈도 (누출, 파이프 파열) 및 확률 (점화 / 폭발)에 대한 정보를 제공.

- 이전 사건으로부터 배우는 것은 프로세스 산업에서 오래되고 효과적인 기술. 이러한 이유로 여러 가지 데이터베이스가 생성되어 수소와 관련된 사고 수집을 위한 플랫폼으로 활동하기 시작. 이 데이터베이스는 수소 사건에 대한 광범위한 정보를 제공한다. 이 데이터베이스들 중에서 여러 가지 이유로 사고 분석을 위해 HIRD (Hydrogen Incident Reporting Database)을 선정함.
- HIRD는 현재 수백건의 사고데이터를 가지며 미국 북서부 국립 연구소 (PNNL)의 태평양 북서부 연구소 (PNNL)에서 관리. HIRD의 안전 사건 기록을 고려하기 위한 주요 기준은 수소 생산, 저장, 전송 및 사용과 관련하여 "학습 된 교훈"을 확립하기 위한 충분한 정보의 유용성. 이러한 "학습 된 교훈"은 사고 정보를 수집하는 데 사용되는 데이터베이스 소프트웨어의 일부이다. 산업의 프라이버시를 보호하기 위해 일부 데이터는 생략되고 제공된 모든 기술 세부 사항과 함께 나머지 데이터가 서버에서 업데이트.
- 분석을 위해 HIRD에서 수집 한 32 건의 사건은 수소 가공 산업과 가장 관련이 있음. 여기에는 미국 국내선, 연료 보급소, NASA 또는 운송 수단이 포함되지 않으나 밸브, 배관, 화기, 저장 용기, 공정 용기 등과 관련된 사고가 포함.
- 32 개의 수소 기반 연구를 분석 한 결과, 43.7 %가 화재, 31.3 %가 폭발, 15.6 %가 화재 및 폭발로 나타남. 사고는 대부분 수소에 요구되는 낮은 점화 에너지와 넓은 연소 범위로 인한 것. 폭발은 대개 고정 또는 반 고정 영역에서 수소의 축적과 점화에 의해 발생한다. 9.4 %만이 누출 사고가 발생. 분석에서 자연 발화와 지연 발화 사이에는 구별이 이루어질 수 없음.
- 분석 된 원인은 다섯 가지 주요 수업으로 분류. 이들은 '관리', '설계 오류', '기술', '유지 보수' 및 '운영자 오류'. '관리'란 잘못된 결정, 조치 또는 태만이 사고를 초래 한 공장 담당 부서에서 착수 한 것을 의미. '설계 오류'에는 플랜트 커미셔닝 전에 발생하여 나중에 사고로 이어질 수있는 모든 설계상의 오류가 포함. '기술'에는 공장 운영 중 현장 기술자가 잘못된 결정 또는 잘못된 장비를 설치하여 발생 된 모든 원인이 포함. '유지 보수'는 공장의 수리 작업 중에 나타나는 모든 원인을 나타내며 '운영자 오류'범주에는 사고로 이어지는 운영자의 잘못된 조치가 포함.
- 분석 결과 사건의 근본 원인은 대부분 '기술'. 이것은 현장에서 현장에서의 잘못된 결정이 통제되지 않은 상황을 초래한다는 것을 의미. 이는 33.3 %의 수치를 나타내었고, 원인의 23.5 %는 '유지 관리'. '설계 오류'와 '운영자 오류'는 각각 원인의 15.7 %를 차지하고 '관리'는 사고로 인한 영향이 가장 적었고 분석에서 11.8 % 만 기여함. 결과는 수소 취급 분야에서보다 기술적으로 건전한 인력이 필요함을 보여줌.
- 추가로, 원인을 1 차 및 2 차 원인으로 분류한다. '디자인 오류', '기술' 및 '운영자 오류'는 대부분 주된 원인으로 나타나기 때문에 가장 심각한 오류. '유지보수'는 'Primary Cause'와 'Secondary Cause'로 동일하게 나타나고, '관리'는 역방향으로 나타남. 일반적으로 'Secondary Cause'으로 나타나며 'Primary Cause' 이 되지는 않음.
- 다음은 결과에 관한 사건 분포를 보여준다. 사건의 59.4 %는 '재산 피해'로, 25 %는 상해 및 재산 피해로 인한 것으로 나타남. 사건의 12.5 %에서 심각한 피해는 관찰되지 않음. 이는사고의 일부가 공장 직원이나 공장 자체에 심각한 손상을 주지 않는 '사고' 또는 'Near Miss'만을 초래했기 때문. 사건의 3.1 %만이 공장 인력의 '부상 / 사망'을 초래.
- 연구에 따르면 87.5 %의 사건에서 직원이나 공장 자체에 어떤 부작용이 관찰함. 이

통계는 수소 시설의 안전 예방 조치에 대한 높은 요구를 분명하게 강조함.

- 산업 수소 처리 시설에서 발생한 32 건의 수소 기반 사고에 대한 현재 연구에서 43.7 %의 사고가 화재, 31.3 %의 폭발, 15.6 %의 화재 및 폭발로 나타 났으며 9.4 %의 사고는 사고가 거의 없음을 보여줌. 사고의 59.4 %가 재산 피해 또는 공장 피해를 초래했으며, 25 %는 직원과 공장 자체에 악영향을 미침. 분석을 토대로, 이러한 사고의 근본 원인을 현저하게 줄일 수 있는 일반적인 권장 사항이 만들어져야 함. 과거에 저지른 실수에 대한보다 광범위한 연구를 수행하고 미래에 위험 평가의 더 많은 측면이 뒷받침 될 수 있도록 권장 사항을 구현해야 할 필요가 있음.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 질적 성과점검

표 4.1. 질적 성과 목록 및 성과점검

질적 성과		설명 및 범위	목표 달성치	과제 달성치	내용
핵심 성과 (1) 5만 명 규모 도시 수소네트워크 설계	공정모델의 Hydraulic 계산 정확도	1차년도 공정모델의 Hydraulics 허용치 초과한 Pipe Segment 수 (전체 Pipe Segment 중 95% 이상 정확도)	95%	96%	<표 3.28>
	감압밸브의 온도하강 계산 정확도	1차년도 공정모델 내 감압밸브의 온도하강 허용치 초과한 감압밸브 수 (전체 감압밸브 중 95% 이상 정확도)	95%	100%	<표 3.29>
	설비, 인건비, 부지 등 각 요소 반영여부	설비, 인건비, 부지 등 최초 계획대비 비용 요소 반영 여부 (반영된 비용요소 수/반영계획 비용요수 수)	90%	100%	<표 4.2>
	비용측정 지수 정확도	비용요소의 반영시기 3년 이내 (반영된 비용요소 수/반영계획 비용요수 수)	3년이내 비용반영	3년이내 비용반영 (96%)	<표 4.2>
핵심 성과 (2) 100만 명 규모 도시 간 수소네트워크 설계	공정모델의 Hydraulic 계산 정확도	2차년도 공정모델의 Hydraulics 허용치 초과한 Pipe Segment 수 (전체 Pipe Segment 중 95% 이상 정확도)	95%	100%	<표 3.80>
	감압밸브의 온도하강 계산 정확도	2차년도 공정모델 내 감압밸브의 온도하강 허용치를 초과한 감압밸브 수 (전체 감압밸브 중 95% 이상 정확도)	95%	100%	<표 3.81>
	압축기, 냉각기의 온도변화 계산 정확도	압축기에 투입된 일의 계산 정확도와 냉각기 공정의 최종 배출온도의 정확도 값들의 평균	95%	95%	<표 3.82>
	설비, 인건비, 부지 등 각 요소 반영여부	설비, 인건비, 부지 등 최초 계획대비 비용 요소 반영 여부 (반영된 비용요소 수/반영계획 비용요수 수)	90%	100%	<표 4.2>
	비용측정 지수 정확도	비용요소의 반영시기 3년 이내 (반영된 비용요소 수/반영계획 비용요수 수)	3년이내 비용반영	3년이내 비용반영 (95%)	<표 4.2>
핵심 성과 (3) 안전성평가 및 유지관리기법	시나리오 정확도	시나리오의 설정근거	100%	100%	<표 4.8>
	유지관리기법 개수	수소설비의 유지관리기법 개수	15	15	4.4절 (p.168)

○ 비용측정 지수 정확도는 비용요소의 출처시기를 3년 이내로 함. 그러나 아직 상당수의 수소 관련 기술이 상용화 또는 실증단계 이전의 수준에 머물러 있어 최근 3년 이내의 구체적인 비용을 얻는데 애로사항이 있음. 따라서 본 연구에서는 개념설계 단계에서 물가상승률을 반영하여 최신 비용을 추산할 수 있는 CEPCI 지수를 이용하여 최신 비용자료가 없는 요소의 비용을 반영하였으며, CEPCI 반영 여부를 포함해서 비용측정 지수 정확도를 산출함

표 4.2. 1/2차년도 비용 반영 요소

수소네트워크 단계	1차년도	2차년도	설비 또는 가격반영 요소	비용반영 여부	Reference Year	최근 3년이내 비용 여부(2014-2019)	CEPCI 반영여부
생 산		√	SMR Unit	O	2004	X	O
		√	Coal Preprocessing Unit	O	2004	X	O
		√	Coal Gasifier	O	2004	X	O
		√	Air Separation Unit	O	2004	X	O
		√	CO Shift Unit	O	2004	X	O
		√	Sulfur Recovery Unit	O	2004	X	O
		√	Biomass Gasifier	O	2004	X	O
		√	PEM Electrolyzer	O	2017	O	O
압 축 및 액 화	√	√	Multi-Stage Reciprocating Compressor	O	2008	X	O
		√	Liquefier Unit	O	2014	O	O
저 장	√	√	CH_2 Storage	O	2007	X	O
		√	LH_2 Storage	O	2016	O	O
		√	LH_2 Evaporator	O	2005	X	O
		√	Cryogenic LH_2 Pump	O	2014	O	O
수 소 충 전 소		√	Cascade Storage	O	2007	X	O
		√	Refrigeration System	O	2013	X	O
		√	Heat Exchanger System	O	2013	X	O
		√	Dispenser	O	2013	X	O
		√	Electric Service	O	2005	X	O
		√	Control Equipment	O	2013	X	O

이 송	√	√	Pipeline	O	2014	O	O
	√	√	Tube Trailer	O	2006	X	X
		√	Tanker Truck	O	2006	X	X
기타비용	√	√	<표 3.6> 모두 반영 (23개)	O	-	-	O
전체 반영 계획 비용 요소 수				1차년도		27	
				2차년도		46	
반영된 비용 요소 수				1차년도		27	100%
				2차년도		46	100%
최근 3년이내 또는 CEPCI 지수로 최근 물가반영된 비용 요소 수				1차년도		26	96%
				2차년도		44	95%

2. 목표 달성도

○ 본 연구개발은 신재생 에너지로 떠오르고 있는 재료 중 하나인 수소를 다루고 있음. 수소의 경우 연소나 연료전지 내 사용 시 이산화탄소를 배출하지 않는 청정원료이나 수소의 물질 특성 상 폭발 및 가연범위가 넓고 기화가 잘되는 특징을 가짐. 이러한 수소를 일반적으로 사용되는 차량용 에너지가 아닌 발전용 에너지로 네트워크를 구성하는 것은 기존 연구개발과는 다른 창의성을 가짐

○ 수소의 이용 방법 중 보편적으로 연구되는 분야는 고압 차량용 충전소의 연구임. 수소 네트워크의 경우도 차량용 수소 충전소의 효율적인 설치 방안이 주를 이루는 가운데 발전용 수소 네트워크의 설계는 한국이 신에너지 사회로 한발 빠르게 발돋움 할 수 있는 연구주제임. 수소 네트워크 설계 시 최적화를 통해 수소 네트워크 설계 시 필요한 인자를 확인하고, 수소의 운전조건에 따른 안전성을 확인할 수 있음.

○ 본 연구개발에서 개발된 수소 네트워크의 경우, 선진국에서 진행하는 차량용 수소 네트워크와는 다른 발전용 수소 네트워크 연구 내용임. 특히 국내의 울산의 경우 부생수소를 기반으로 한 연료전지로 발전을 대체하려는 가운데 본 연구개발의 내용은 빠르게 활용이 가능한 연구 내용임. 이를 통해 수소 네트워크 구성 시 경제성뿐만 아니라 안전성까지 겸비한 수소 네트워크를 구성할 수 있음.

○ 수소네트워크 유지관리기법의 경우 세부적인 큰 목표와 하단의 부수적인 목표를 구분함. 예를 들어 손상의 경우 손상의 원인에 따라 각 유지관리가 진행되어야 하고, 각 목표에 따른 각 관리방법이 위험성을 낮추고, 안전성을 높이는 유지관리 기법으로 구분됨.

○ 평가 방법은 자체적으로 답사와 자료조사를 기반으로 한 실제 공정의 모사 정확도를 확인하였으며, 위험성 평가의 경우 논리구조를 확인함.

○ 연구결과인 논문의 경우 Process modeling에 필요한 기초적인 equipment에 대한 내용이

므로 연구수행에 필요한 기초 지식 및 스킬 습득을 성실히 수한 결과로 파악됨.

3. 관련 분야 기여도

○ 국내외로 수소 네트워크를 구성하기 위해 고려하는 요소는 수소 충전소 설치 확대 및 수소 연료전지차의 확대 등 에너지원의 대체로만 연구개발 및 정책지원이 수행되고 있음. 구체적인 에너지규모에 따라 용도에 따른 네트워크 설계기술은 전무한 것으로 파악됨.

○ 이는 도시형 수소 네트워크 설계 시 산업기반 도시 뿐만 아니라 일반 도시에도 효율적인 수소 네트워크 구성방식을 제공할 수 있음.

○ 수소 네트워크 설계

- 각 지차 체에서 5만 명 규모의 수소 네트워크 설계 시 에너지 조달 방식에 따른 설계방법을 선택하여 각 상황에 맞는 수소 네트워크 설계의 가이드라인으로 사용될 수 있음.
- 100만 명 규모의 수소 네트워크 설계 시 에너지 소모방법에 따른 설계방법을 선택하여 각 상황에 맞는 수소 네트워크 설계의 가이드라인으로 사용될 수 있음. 설계방법 선택 시 경제성 평가를 바탕으로 예산 측정에도 활용할 수 있으며, 예산 측정의 근거가 될 수 있는 예시가 될 수 있음.

○ 수소 네트워크 안전성 평가기법

- 수소에 관련한 법령이 전무한 상황에서 수소 네트워크 구축 시에 필요한 법령 규제 여부에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상됨.
- 수소 네트워크에 대한 안전성 평가기법의 시나리오 구성방법, 배관 및 저장설비의 누출비, 위험도, 사고피해영향 모델링을 표현하는 데 있어 활용 가능함.

○ 수소 네트워크 관리 기법

- 에너지 소모방법에 따른 수소 네트워크의 유지보수 관리 방법에 대해서 수소 네트워크 관리자가 활용 가능함.

○ 향후 연구 방향성 제시

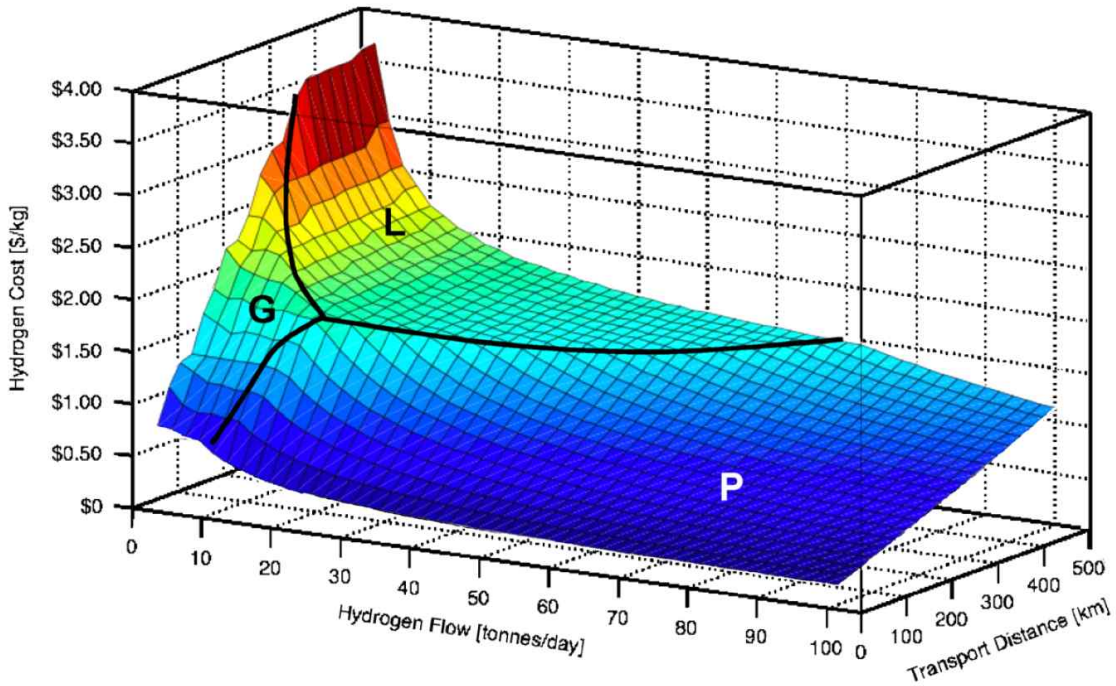
- 본 과제를 토대로 향후 연구방향을 진행할 때 수소 네트워크를 구성하는 생산, 이송, 저장 및 활용에 관한 범위를 넓혀 추가 연구 진행에 활용 가능함.
- 또한 각 지형의 환경에 따른 안전성 도출 방안에 대한 사항을 추가 연구 진행에 활용 가능함.

○ 수소경제 정책 로드랩에 따른 후속 과제 방안 제시

- 정부의 수소경제 정책 로드랩 방향성은 전방산업으로는 차량을 중심으로 한 수송 분야와 전기, 열 등 에너지 분야로의 새로운 미래산업 창출이며, 후방산업으로는 수소의 생산, 저장, 운송, 활용 등의 벨류체인 전반에 걸쳐 다양한 산업과 연계하여 중소 및 중견기업 성장 가능성을 높이는 것임.
- 본 과제의 결과를 토대로 수소시장 발달 시기에 따른 주요 핵심 기술 개발로 연계할 수 있으며, 수소 수요량 증가에 따른 초기 투자 비용을 구성하는 부품의 개발 과제로 추진 활용 가능함.

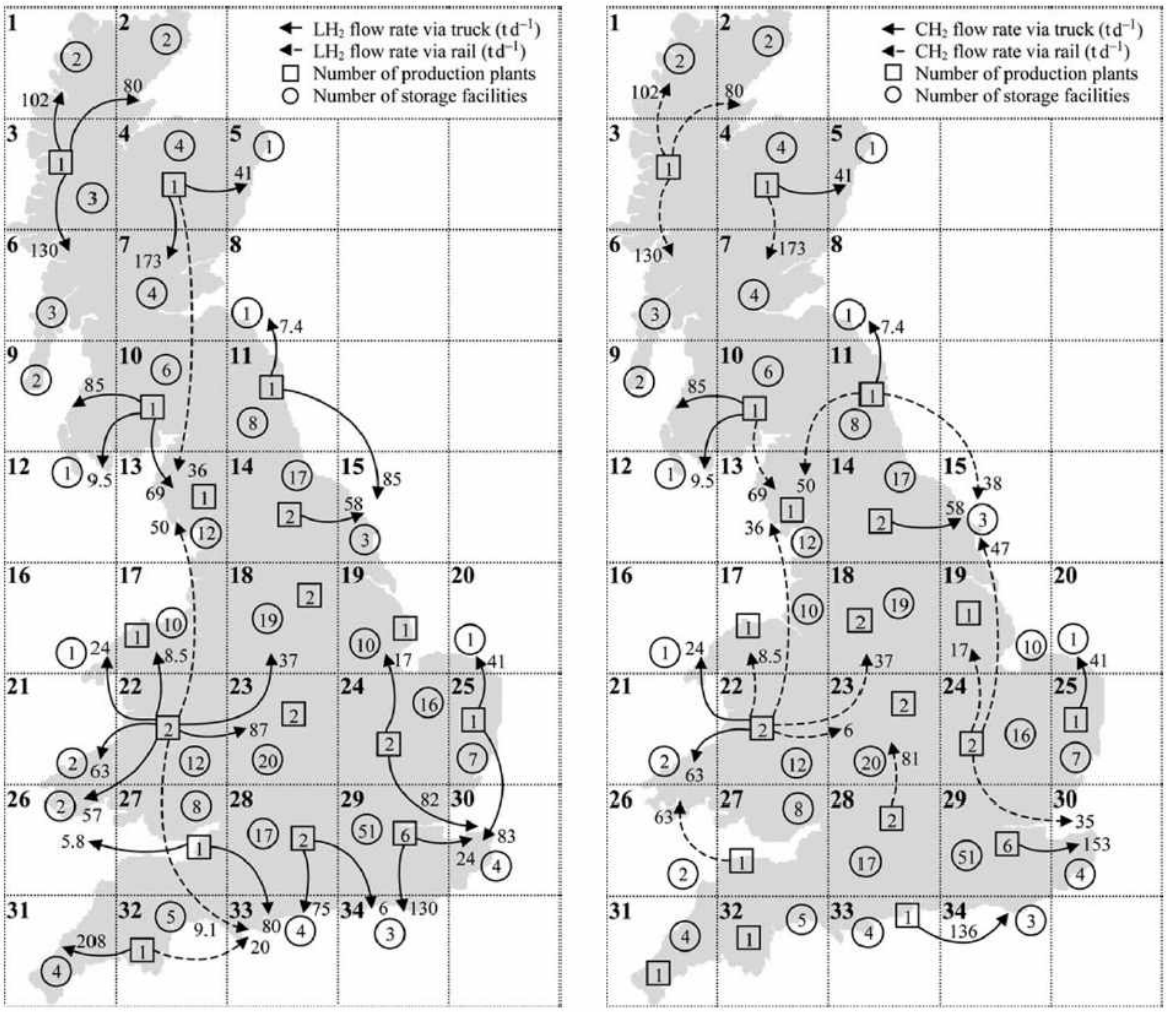
수소에너지의 인프라 구축비용을 낮추고 보다 나은 시스템을 구성하기 위해 많은 수소네트워크 최적화 관련 연구들이 선행되었음. 석유화학단지의 부생수소를 필요로 하는 공정으로 이송하는 수소네트워크(정창현, 2011), 수소 생산과 유틸리티 시스템의 연계 네트워크(S.Hwangbo, 2016) 최적화 등 여러 응용연구가 있으나, 주요도시의 수소공급을 위한 전국단위 규모의 수소 최적화 모델을 다룬 연구사례를 소개함.

C.Yang(2007)은 HSC 각 구성요소별 비용 데이터를 이용해 도시내 수소충전소 수와 도시 크기변화에 따라 가장 낮은 비용을 가지는 수소 공급 경로를 분석함. 이송수단으로 튜브 트레일러, 액화수소 탱커트럭, 가스파이프를 고려하였는데 튜브 트레일러는 짧은 거리의 적은 수소 수요량에 대해 경제성을 가진 반면 액화수소 탱커트럭은 중장거리, 대규모 수소수요에서 유리한 것으로 나타났다. 가스파이프는 비교적 짧은 거리의 대규모 수소수요가 요구될 때 가장 효과적인 것으로 분석되었다(<그림 6.1> 참조). 그러나 고정된 비용과 단일한 도시의 HSC 구성을 시뮬레이션에 밑바탕을 둔 접근법은 특정 시나리오 및 특정 HSC 구성에 의존하기 때문에 여러 도시에 수소를 공급할 때 발생하는 다양한 경우를 고려한 최적점을 찾을 수 없음.



<그림 6.1. 수소수요 및 이송거리에 따른 단위비용($/kg$H_2$) 변화(C.Yang, 2007)>

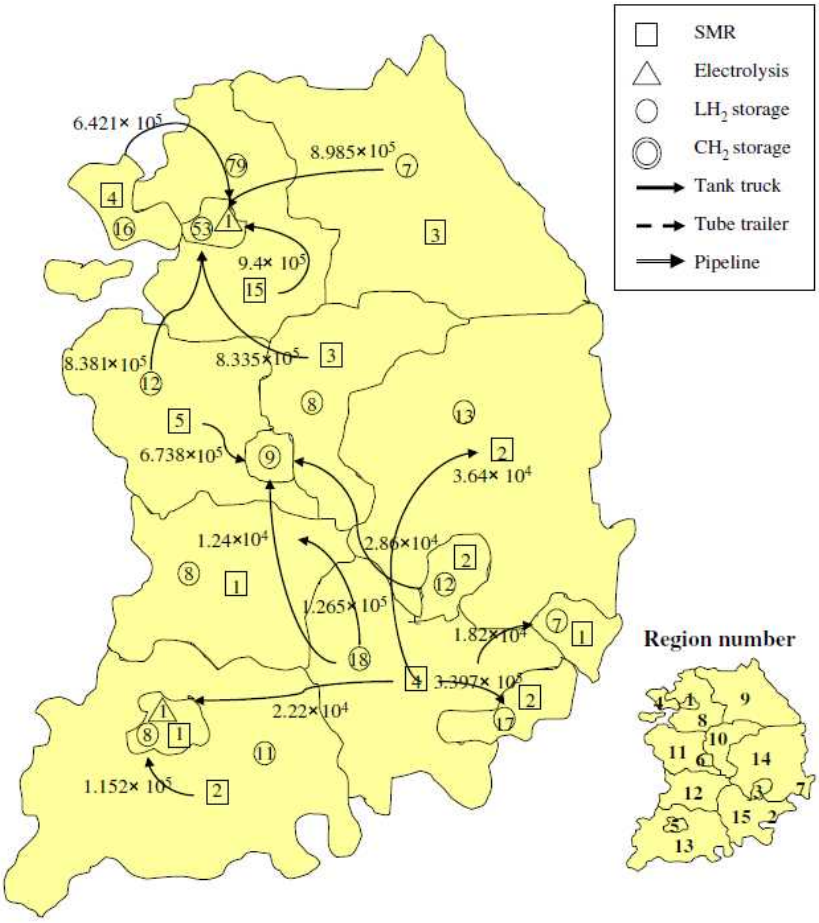
A.Almansoori(2006)는 영국을 34개 구획으로 나누어 FCEV의 수요가 급격히 증가하였을 때 필요한 수소 인프라를 적정 위치에 배치하는 수학적 최적화 알고리즘을 구현함. 최적화 결과는 <그림 6.2>와 같으며 영국 전체의 수소 수요를 충족하기 위해 필요한 대규모 SMR 공장과 수소저장소의 수량 및 위치, 그에 따른 튜브 트레일러 트럭 및 열차, 또는 액화수소 탱커트럭 및 열차의 운송경로가 표시되어 있음.



<그림 6.2. 영국의 수소공급사슬 최적화 연구사례(A.Almansoori, 2006)>

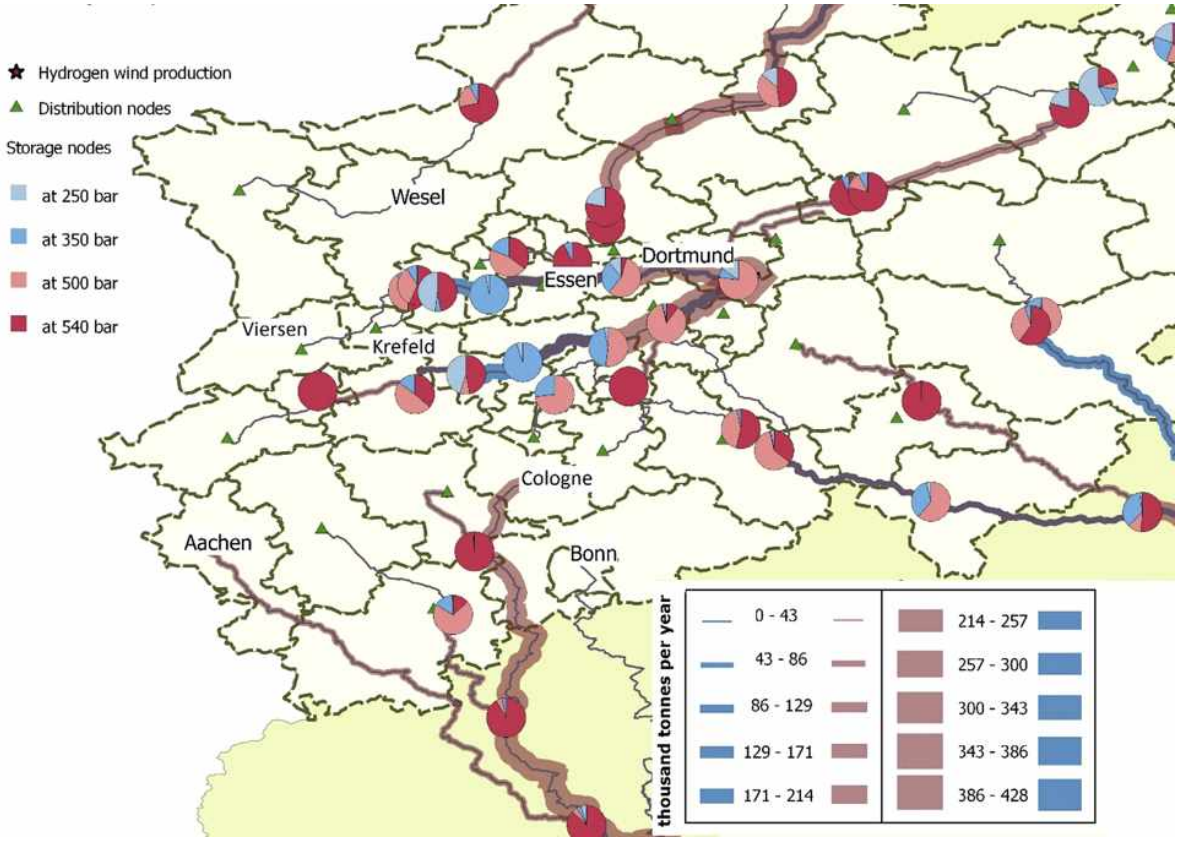
위와 같은 결과에 더해 A.Almansoori(2009)는 연도별로 증가하는 영국의 수소 수요량에 맞게 기존의 인프라 시설에 새로운 생산 및 저장시설을 증설하는 방식의 최적화 기법을 개발함. 또한, 전체 수소공급사슬의 이산화탄소 배출량을 제한한 최적화 모델을 제시하고(A.Almansoori,2016), 수소가격에 붙이는 탄소세가 실질적인 이산화탄소 배출 감축에 효과가 적음을 제안함.

국내 사례연구로는 J.Kim(2008a)이 <그림 6.3>과 같이 수소수요 증가의 불확실성을 고려한 전국 시도별 HSC의 비용최적화 모델을 제시함. 또한, HSC내의 각 설비들이 가지는 상대적 위험성을 반영하여 비용과 위험성을 다목적함수 모델링으로 한국의 수소공급망을 최적화하기도 하였다(J,Kim, 2008b). M.Kim(2016)은 국내의 풍력, 태양열, 바이오매스 등 신재생에너지원만으로 각 시도별 수소공급을 위한 모델을 제시하였으며, 전국 시도를 대상으로 한 것보다 규모가 작은 제주도를 대상으로 제주도내의 풍력에너지를 에너지원으로 한 수소공급사슬을 최적화하여 송전설비 및 수소터미널(저장시설)의 위치를 결정하였다(M.Kim, 2017).



<그림 6.3. 국내 수소공급사슬 최적화 연구사례(J.Kim, 2008a)>

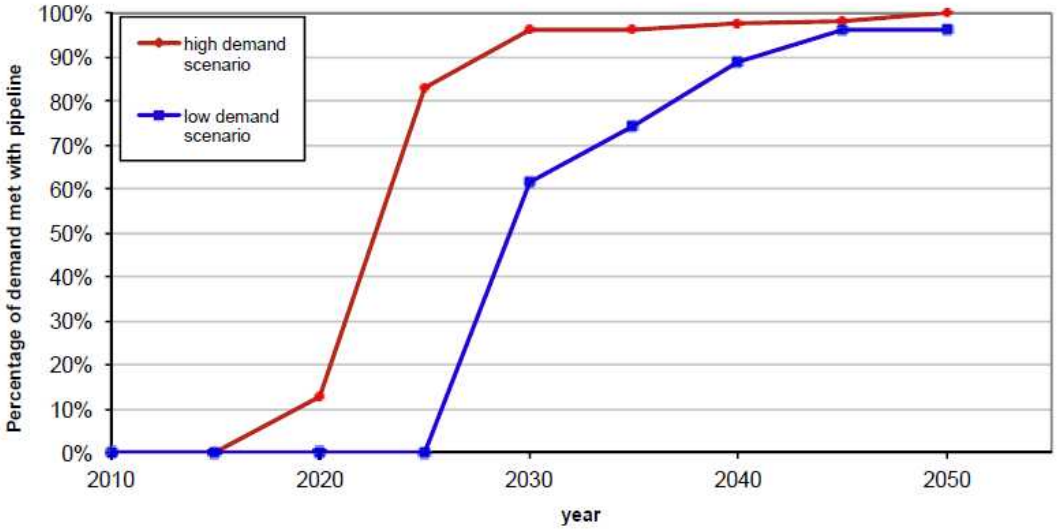
최근에는 에너지원이 아닌 이송방식을 세분화한 연구도 진행되었음. A.Lahnaoui(2018)는 튜브 트레일러의 튜브압력을 250bar, 350bar, 500bar, 540bar로 분류하여 최적화 모델을 통해 각 도시별 공급망에서 필요한 압력을 결정하였다(<그림 6.4> 참고). 결과에 따르면 수소수요가 증가함에 따라 높은 압력의 튜브 트레일러와 저장시설이 필요하며 도시(node)간 거리 및 인구와 생산가능 시설(풍력에너지원)의 위치가 중요한 파라미터로 작용함.



<그림 6.4. 튜브 트레일러의 압력을 세분화한 HSC 최적화 연구사례 (A.Lahnaoui, 2018)>

가스파이프를 HSC 이송수단으로 다룬 기존 연구들은 가스파이프의 운전압력을 일정히 둔 반면 J.Andre(2013)와 A.Weber(2018)는 Hydraulics를 고려하여 가스파이프내 수소 운송량을 계산하고 이를 최적화 모델에 반영함. 비슷한 방법으로 J.Andre(2014)는 가스파이프와 튜브 트레일러를 동시에 고려하여 수소 수요량이 증가할 때 비용상 최적의 이송수단을 결정하는 모델을 제시함. 결과적으로는 C.Yang(2007)의 시뮬레이션 모델과 유사하게 시간이 지남에 따라 수소 이송 방식으로 가스파이프가 더 많이 쓰일 것으로 예측되었다(<그림 6.5> 참고).

수소공급사슬 설계의 선행 연구사례들을 살펴보면 크게 두 가지로 나뉘는데 구성요소별 가격 파라미터와 시나리오를 설정하여 시뮬레이션을 수행하는 방식과 수학적 최적화 모델을 구성하여 최적 솔루션을 얻는 방법임. 첫 번째 방식은 C.Yang(2007)의 연구사례와 같이 동일한 상황에서 보다 나은 공급경로를 제시할 순 있으나 여러 개의 도시가 얽힌 복잡한 네트워크에서의 최적점을 찾는 데는 부적합함. 두 번째, 수학적 최적화 방법은 복잡한 네트워크에서도 최적점을 찾을 수 있으나 어떤 설계목표를 두는지에 따라 구조가 확연히 달라짐. J.Kim(2008b)의 사례와 같이 비용과 함께 위험성을 최소화 하는 다목적 최적화를 할 수 있으며, 비용뿐만 아니라 탄소배출량 저감을 위한 모델(A.Almansoori, 2016) 구성도 가능함. 또한, A.Lahnaoui(2018), J.Andre(2013), A.Weber(2018)와 같이 HSC의 특정 구성요소에 중점을 둔 설계도 가능함. 따라서, 수학적 최적화 방법을 선택하기에 앞서 어떤 점을 목표로 수소공급사슬을 최적화할지 결정하는 것이 중요함.



<그림 6.5. 수소 수요량 증가에 따른 가스파이프라인 도입비율 증가 (J.Andre, 2014)>

* 국내 수소 네트워크 최적화 목표

본 과제의 수소공급사슬 최적화 모델의 목표는 국내의 지역적 특색을 최대한 반영하여 적합한 시스템을 구축하는 것임. 첫 번째로 고려해야할 지역적 특색은 국내에서 생산되는 수소가 대부분 울산, 여수, 서산 등 대규모 석유화학 단지가 있는 지역에 분포하는 부생수소인 점임. 국내의 수소 수요량이 매우 높아져 추가적인 생산시설을 증설하더라도 마찬가지로 울산, 여수, 서산 등 항구와 가까운 석유화학단지가 적합하다고 볼 수 있는데, 천연가스개질 및 석탄 가스화 공정의 원료인 천연가스와 석탄이 대부분 해외에서 수입되기 때문임. 따라서 국내 수소 공급 네트워크는 해안 도시로부터 수도권으로 공급되는 석유공급사슬과 유사한 형태의 HSC 구조를 가질 가능성이 크다. 한편, 도시가스망을 통해 공급받는 천연가스 개질 설비를 수소충전소 인근에 설치하는 On-site 수소 공급 시스템도 고려해 볼 수 있는데, 소규모 SMR 공정의 낮은 효율과 높은 생산단가의 특성상 다량의 수소 수요를 다루는 데 적합하지 않을 수 있다(<그림 6.6> 참고).

두 번째 고려사항은 지역적 특색에 따른 수소 이송거리임. 현재 양재동에 있는 수소충전소를 포함해 실증화 단계에 있는 국내 수소충전소들은 100bar 압력의 튜브 트레일러에 의해 외부에서 수소를 공급받는 방식임. 수소 수요량이 미미한 현재는 튜브 트레일러를 이용해 소량의 부생수소를 운반하여 수소충전소 내에 위치한 저장탱크에 저장하는 방식이 이점을 지닌다. 그러나 선행연구들에서 다루어진 바와 같이 수소 수요량이 증가하였을 때 상대적으로 용량이 적은 튜브 트레일러로 서울-울산 간 장거리 노선을 운행하는 것은 노동비용(drive wage)과 디젤연료비용 상승 등으로 경제적이지 않을 수 있음. 따라서 높은 압력의 튜브 트레일러나 대규모 장거리 운송에 적합한 액화수소 형태의 이송하는 방안을 고려해야 함. 또는 수도권과 가까운 항구도시에서 수소를 생산하고 이를 가스파이프로 공급하는 방식도 고려해 볼 수 있음.

세 번째 지역적 특색은 수도권의 인구밀집도가 매우 높은 점임. 수소 수요의 Peak-load와 공급실패 등에 대비하기 위한 저장시설의 위치는 수학적 최적화를 통해 결정되어야 하는데 높은 인구밀도는 수소 누출로 인한 폭발 사고 등의 잠재적 위험성의 피해범위를 크게 키울 수 있음. 따라서 이러한 위험성을 고려하여 각 도시별로 분산된 수소저장 설비를 위치시킬 것인지, 인구밀도가 낮은 지역에 중앙 집중화된(Centralized) 허브시설을 설치할 것인지 결정해야 함. 또한, 인구밀도가 높은 지역은 많은 수의 수소충전소가 필요하며 각각의 개별 수소충전소로 이송하는 거리(Local distribution)로 인해 실제 이송거리가 길어질 수 있음. 이러한

Local distribution에서는 철도를 이용한 이송은 불가능하며 트럭 또한 도시내 수소충전소 수가 증가할수록 경제성이 떨어질 수 있음. 짧은 거리의 대규모 운송에는 가스파이프가 유리한 만큼 이를 고려하여 전체적인 수소공급사슬의 구조가 바뀔 수 있음.

마지막으로 대부분의 에너지를 수입하는 국내 에너지안보의 특색을 고려하여 수소공급사슬은 공급이 장기간 중단되는 사태를 대비하는 구조가 되어야 함. 이는 저장소의 비축일 수를 늘려 실현시킬 수 있으나, 석유 비축량, 쌀 비축량 등의 개념과는 다르다. 석유, 쌀, LNG 등은 물리적 형태가 일정하기 때문에 비축된 저장시설에서 모든 종류의 수요 시설로 공급이 가능함. 그러나 기액상태 및 압력에 따라 물리적 형태가 다른 수소는 처음 공급받던 물리적 형태와 다른 상태의 수소를 호환할 수 없음. 예를 들어, A 도시는 액화수소, B 도시는 180bar 튜브 트레일러, C 도시는 350bar 튜브 트레일러로 수소를 공급받는 방식이 가장 경제적이고, D 도시에는 액화수소 저장소와 액화수소 탱커 트럭만 존재한다면 B, C 도시는 Vaporizer 및 액화수소 Pump 등의 설비가 없기 때문에 유사시 D 도시로부터 수소를 공급받을 수 없음.

위의 네 가지 특색을 종합하였을 때 국내 수소 네트워크 최적화 모델의 목표 및 특징은 다음과 같음.

■ 기존의 부생수소 생산시설을 계속 사용하고, 새로 도입되는 생산시설의 비용을 최소화 할 것.

■ 도시(Node)내에서만 소비되는 형태의 소규모 On-site 공급 시스템을 포함하며, 종류는 천연가스개질과 전기분해 시설일 것.

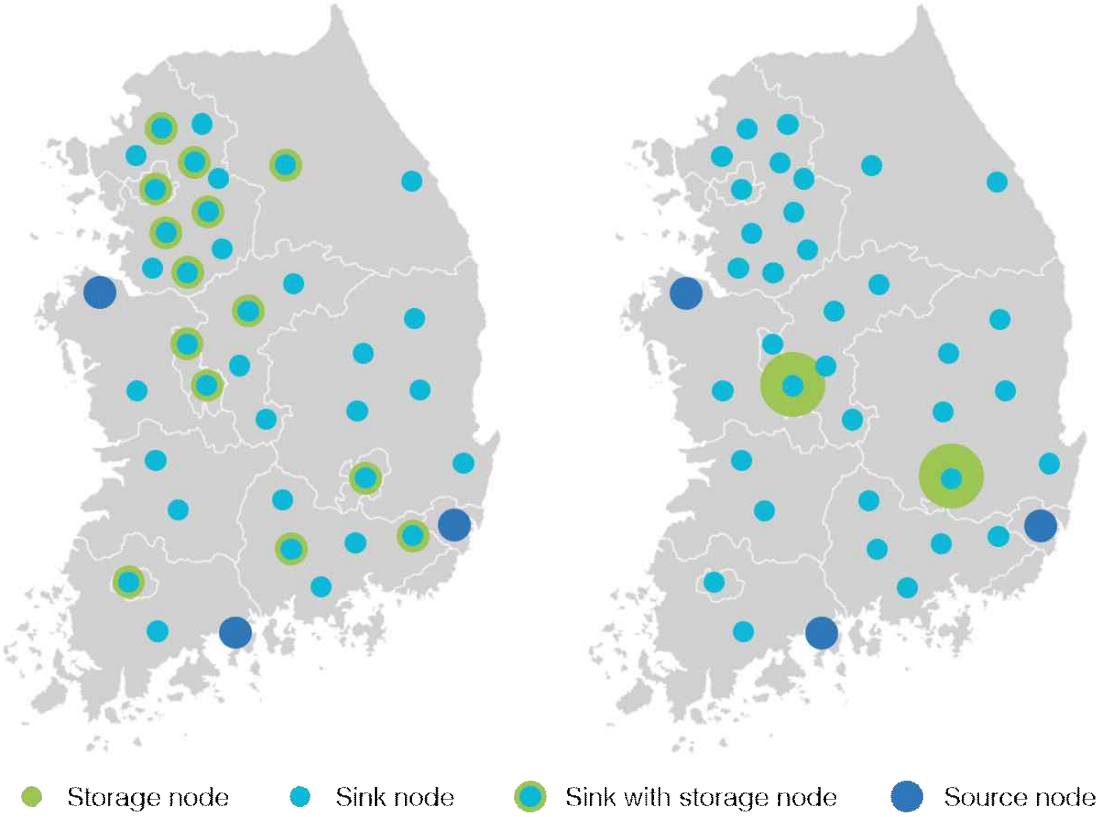
■ 다양한 압력의 튜브와 이송하는 트럭과 열차, 그리고 액화수소를 이송하는 트럭과 열차를 이송수단으로 고려할 것.

■ 기존의 철도노선이 없는 Node사이는 열차 이송방식의 채택을 제한할 것.

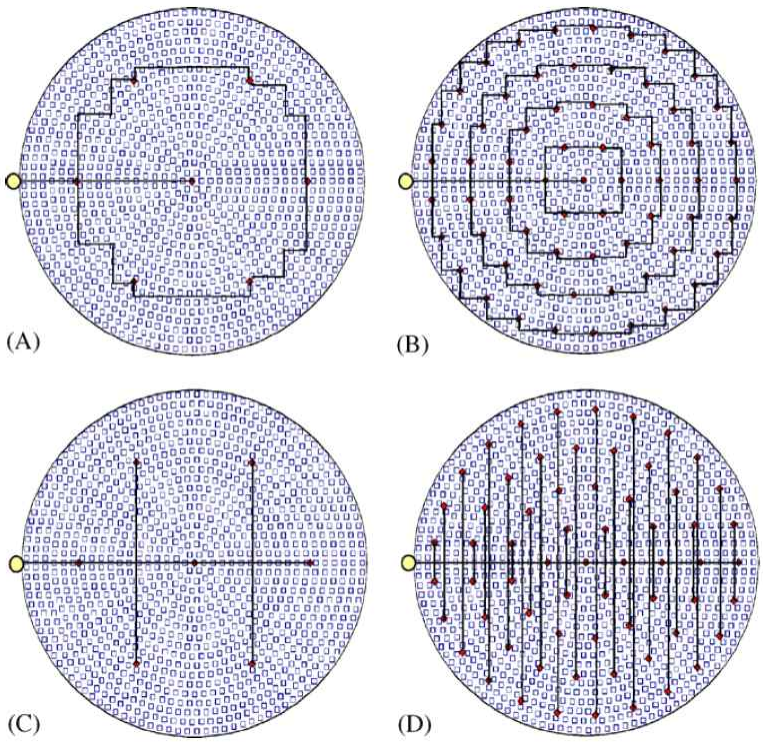
■ 중앙집중형 허브(Centralized hub) 또는 분산저장(Decentralized storage)을 기반으로 하는 수소저장형태를 고려하고 비용과 함께 저장시설의 위험성을 최소화할 것.

■ Node내 수소충전소 수의 증가에 따라 길어지는 Local distribution을 반영하여 전체 수소공급사슬을 설계할 것.

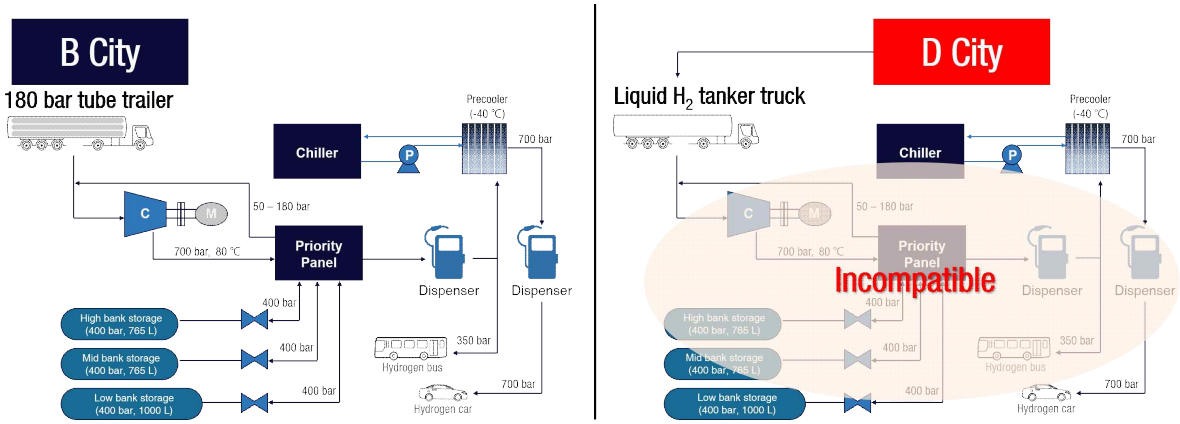
■ 모든 Node내의 수요는 Storage node로부터 수소를 공급받는 형태로 설계하여 유사시 모든 Node가 가진 기존 설비로 호환 가능한 물리적 형태의 수소를 공급할 것.



<그림 6.6. (좌)Decentralized storage (우)Centralized hub>



<그림 6.7. 도시내 수소충전소로 수소분배(Local distribution)의 이송거리 예시도: (A)적은 수소충전소 수, 가스파이프; (B)많은 수소충전소 수, 가스파이프; (C)적은 수소충전소 수, 트럭; (D)많은 수소충전소 수, 트럭 (C.Yang, 2007)>



<그림 6.8. 서로 다른 수소 공급방식을 가진 도시 간의 호환성 예시: (좌)B도시; 180 bar tube trail 공급, (우)B도시에 D도시로부터 액화수소 탱커트럭으로 수소를 공급하는 경우>

일반적으로 HSC 구성을 위해 먼저 결정되어야 할 사항들은 다음과 같음.

- Type of problem: location, allocation, routing, location-allocation, location routing
- Planning level considering the strategic, tactical, or operational aspects
- Temporal dimension (static or dynamic)
- Type of data (deterministic, stochastic)
- Type of approach (optimization, simulation)
- Time horizon (short, medium, or long term)
- Geographic dimension according to the problem definition

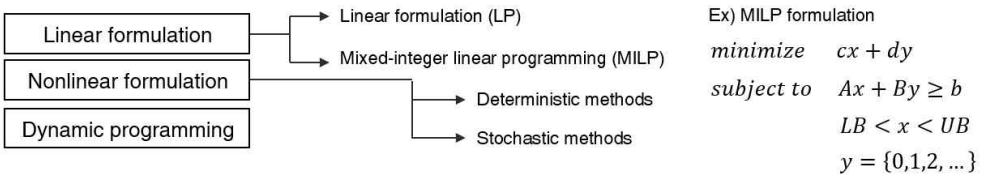
본 과제에서 다루는 HSC의 최적화 목표에 따라 Location-allocation 문제 형태의 수학적 접근법과 시불변 데이터의 사용을 채택하였다(고정된 시점). 또한, 목표 외의 문제를 단순화하기 위해 입력 데이터의 불확실성을 고려하지 않고, 최적화 목표는 전체 수소공급사슬의 연간 비용과 저장시설의 위험성을 동시에 최소화하는 다목적함수로 구성함.

4.5 수소 네트워크 최적화 모델의 구조

수소공급사슬 최적화 문제의 풀이는 보통 Location-allocation 문제 방식의 Superstructure optimization 방법을 따른다. Superstructure는 모델내 존재하는 모든 연결 가능한 루트와 생산, 저장, 이송, 분배 등의 경우의 수를 나타낸 것으로 Superstructure의 구조를 수식화하여 표현한 후 최적화 모델로 구현할 수 있음.

I.Grossmann(2000)은 Superstructure 최적화 방법을 다음과 같은 순서로 제시함.

- Define a superstructure: the set of all possible connections in a network
- Formulate a mathematical model
- Resolution of the model to determine optimal solutions



<그림 6.9. Superstructure 최적화의 수식화 분류>

Superstructure의 구조에 따라서 수학적 모델은 Linear problem(LP), Nonlinear problem(NLP), Mixed-Integer problem(MIP), Mixed-integer nonlinear problem(MINLP) 등 4가지 구조로 나뉜다. 공급사슬 문제에서는 각 설비의 종류 및 크기 등을 선택 및 조합하는 문제가 발생하므로 정수(Integer)가 혼합된 형태의 모델이 필요함. 각 설비의 운전조건식(Governing equation) 또는 비용산출식 등이 비선형이기 때문에 MINLP 모델이 필요하나, 복잡한 네트워크 계산시 솔루션의 정확도가 떨어지고 막대한 계산시간이 필요하다는 단점이 있음. 따라서 모델내 비선형식들은 선형화된 형태로 변환한뒤 MILP 모델을 사용하는 것이 적합함.

제안하는 Superstructure내에서 가능한 수소 에너지원은 천연가스, 석탄, 바이오매스, 풍력 및 태양열임. 생산기술은 각각 수증기개질, 가스화, 전기분해가 있으며 수증기개질은 세 가지 단위의 규모가 가능하다(Small, Medium, Large). 가스화공정은 기술적으로 소규모 생산이 불가능하므로 두 가지 규모가 가능하다(Medium, Large). 전기분해는 생산효율이 생산규모에 독립적이므로 대규모 생산은 불가능하다고 가정한다(Small, Medium).

수소공급사슬 내에서 가능한 수소의 물리적 형태는 기체와 액체이며, 이송수단은 트럭, 열차, 가스파이프로 한정함. 트럭과 열차를 통한 고압가스 수소 이송은 각각 180bar, 250bar, 350bar, 500bar의 운전압력 선택이 가능함. 비슷하게 가스파이프를 통한 이송도 각각 40bar, 70bar, 100bar의 운전압력이 선택 가능함.

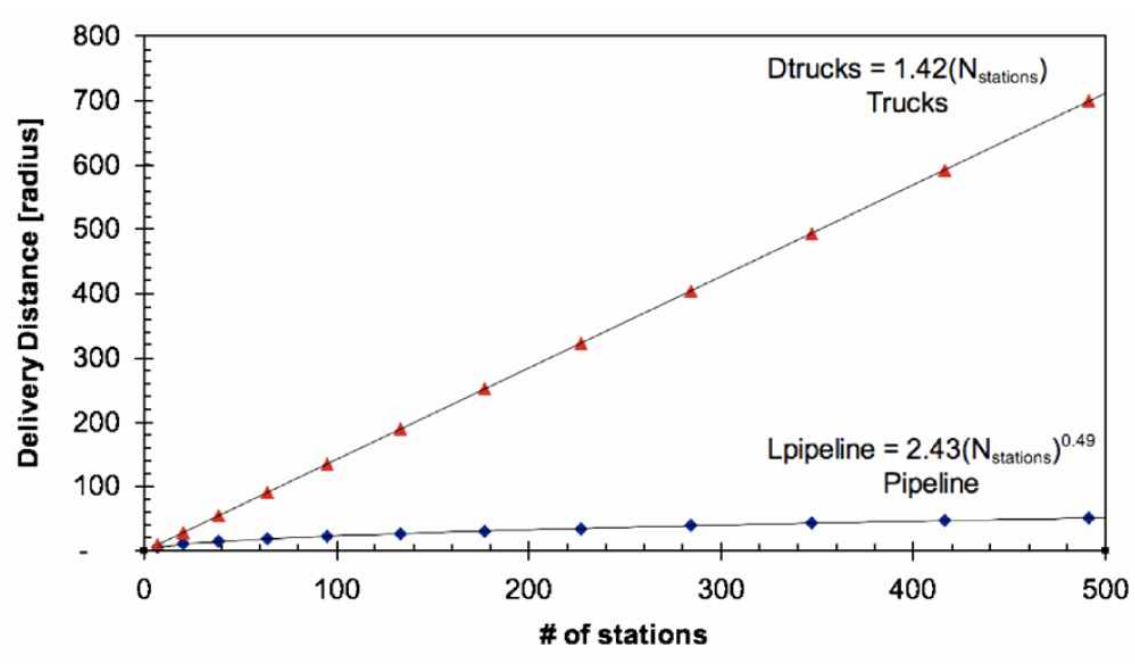
C.Yang(2007)은 수소충전소가 균일하게 분포하는 원형모형의 도시를 이상적인 도시 형상으로 보고, 도시의 직경과 수소충전소 수에 따라 트럭과 가스파이프의 Local distribution distance를 계산하였다(아래 수식 참고).

$$L = 2.43 \cdot N_{stations}^{0.4909} \cdot R_{city}$$

$$D = 1.44 \cdot N_{stations} \cdot R_{city}$$

$$N_{stations} = \frac{Demand}{C_{station}}$$

'L'과 'D'를 각각 가스파이프와 트럭의 Local distance로 표기함. 'R_{city}'는 원형 모형 도시의 직경임. 수소충전소의 수는 도시의 전체 수소수요를 수소충전소의 단위공급능력으로 나눈 값과 같다고 가정함. <그림 6.10>은 수소충전소 수의 증가에 따른 트럭과 파이프라인의 Local distance 증가를 나타냄. 수소의 수요가 많고 면적이 큰 대도시의 경우 트럭보다 가스파이프가 Local distribution에 유리할 수 있음.



<그림 6.10. Node내 수소충전소 수 증가에 따른 트럭과 가스파이프의 이송거리 (C.Yang, 2007)>

요약하면 제안하는 모델에서 저장소를 벗어나는 수소는 다음의 세 가지 공급경로를 가짐.

- Storage to Regional Transportation = (Regional distance) + (Local distance)
- Storage to Storage = (Regional distance)
- Storage to Local distribution = (Local distance)

위의 세 가지 공급경로와 더불어 다양한 물리적 상태의 수소를 수용 및 방출하기 위한 저장소의 Liquefier 및 Compressor (Conditioning unit)의 비용을 반영해야 함. 수소 공급 사슬을 따라 이동하는 수소의 상변화 및 압력변화는 생산시설 - 저장시설, 저장시설 - 이송수단, 이송수단 - 저장시설, 이송수단 - 수소충전소 분배에서 발생함. 수소충전소에서 발생하는 상변화 및 압력변화는 주어진 모델에서 다루지 않는다. 저장시설 - 이송수단의 경우 저장시설 Node내 Local distribution과 외부 Node로 이송하는 경우로 다시 나뉘어 이송수단이 달라지기 때문에 각각 다른 공급 경로로 분류함. 최적화 모델에는 위의 네 가지 경우에서 발생하는 Liquefier 및 Compressor의 도입비용과 운용비용을 반영해야 함.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 : 일반

보안등급 분류	보안	일반
		√

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
해당사항 없음								

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

컴퓨터를 이용한 모델링 및 시뮬레이션 위주의 연구로 연구수행 중 안전에 대한 우려 없음.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station	중앙대학교	저자	International Journal of Hydrogen Energy (44, 1288-1298)	4.229	2018.11.	중복사사	SCI
2	논문	High quality product gas from biomass steam gasfication combined with torrefaction and carbon dioxide capture processes	중앙대학교	저자	JournalInternational Journal of Hydrogen Energy	4.229	2018.11. (Accepted)	중복사사	SCI
3	논문	Process modeling and optimization for torrefaction of forest residues	중앙대학교	저자	ENERGY (138, 348-354)	4.968	2017.11.	중복사사	SCI
4	논문	Conceptual Design for the Recovery of 1,3-Butadiene and Methyl Ethyl Ketone via a 2,3-Butanediol-Dehydration Process	중앙대학교	저자	CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH AND DESIGN (123, 268-276)	2.795	2017.07.	단독사사	SCI
5	특허	수소 에너지 시설 위치 선정을 위한 리스크 분석 시스템 및 방법	㈜리스크씨에스피	저자	대한민국	-	2018.11.20	-	-

제11장. 기타 사항

1. 학술지 게재는 현재 총 2건 진행 중으로 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술촉진연구사업의 지원임을 사사로 표기하고 금년 내로 게재예정임.

2. 연구논문의 경우 주제가 다양함. 이는 수소 네트워크 설계에 필요한 반응이나 공정 설계, 안전성 설계에 필요한 기초연구를 주제로 진행함.

제12장. 참고 문헌

[1] 오진석, 서울시 중형 오피스빌딩의 점유비용 결정요인에 관한 연구, 한국부동산학회, 2016

[2] A. O. Bique, An outlook towards hydrogen supply chain networks in 2050 - Design of novel fuel infrastructure in Germany, Chemical Engineering Resesarch and Design, 2018

[3] 한국에너지기술연구원, 도시에너지 수요대응을 위한 수소기반 신재생에너지 융복합 발전 시스템, 2017

[4] A. Lahnaoui, Optimizing hydrogen transportation system for mobility by minimizing the cost of transportation via compressed gas truck in North Rhine-Westphalia, Applied Energy, 2018

[5] 통계청, 인구총조사 전수부문 통계, 2018

[6] 통계청, 자동차 등록자료 통계, 2018

[7] 전력빅데이터센터, 계약종별 전력사용량, 2018

[8] National Research Council (USA), Hydrogen economy: Opportunities, costs, and R&D needs, 2004

[9] NEXANT, H2A hydrogen delivery infrastructure analysis models and conventional pathway options analysis results, 2008

[10] ㈜엔케이, Jumbo Tube Skid, 제품 카달로그

[11] A. Almansoori, Design and operation of a future hydrogen supply chain: Multi-period model, International Journal of Hydrogen Energy, 2009

[12] C. Yang, Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode, International Journal of Hydrogen Energy, 2007

[13] J. Andre´, Time development of new hydrogen transmission pipeline networks for France, International Journal of Hydrogen Energy, 2014

[14] M. M-Benito, Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development, Computers and Chemical Engineering, 2017

[15] R. Turton, Analysis, synthesis and design of chemical process, 4th Ed., Prentice Hall, 2012

[16] 산업통상자원부, 신재생에너지백서, 2016

[17] 대한석유협회, 수소연료전지차 관련 국내외 동향 및 정책 제안, 2018

[18] S. Hwangbo, Netwrok modeling of future hydrogen production by combining conventional steam methane reforming, Energy Conversion and Management, 2018

[19] 한국은행, 우리나라의 토지자산 장기시계열 추정, 2015

[20] J. Andre, Time development of new hydrogen transmission pipeline networks for France, International Journal of Hydrogen Energy, 2014

[21] J. Kim, Optimization of a hydrogen supply chain under demand uncertainty, International Journal of Hydrogen Energy, 2008

[16] CCPS, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, AIChEM, New York, 1989

[17] SNL, Methodology for assessing the safety of Hydrogen System: HyRAM 1.0 Technical reference manual, Sandia National Laboratories, 2015

[18] Crowl, D.A, and J. F. Louvar, Chemical Process Safety: Fundamental with Application, Prentice-Hall, New Jersey, 1990

[19] Risk acceptance criteria for hydrogen refueling stations. Norsk Hydro ASA and Det Norske Veritas AS for WP5.2 European Integrated Hydrogen Project 2; February 2003.

[20] L.C. Cadwallader, J.S. Herring, safety issues with hydrogen as a vehicle fuel, INEEL/ EXT-99-00522, Lockheed Martin, Odaho, 1999, page 27-28.

[21] CPR 18E (Purple Book). Guidelines for quantitative risk assessment. Committee for the Prevention of Disasters; 1999.

[22] Offshore hydrocarbon releases statistics. HID Statistics Report HSR 2001 002. Health and Safety Executive; 2001

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.