



## 수소자동차충전소의 수소압축장치 성능평가를 위한 분류체계 및 RCM 전략수립 연구

배성준 · 임하늘 · 나서연 · †채충근 · 최진혁\* · 이진우\* · 신상봉\*  
(주)미래기준연구소, \*한국가스기술공사  
(2022년 10월 28일 접수, 2023년 1월 27일 수정, 2023년 2월 10일 채택)

### A Study on Taxonomy and RCM Strategy Establishment for Performance Evaluation of Hydrogen Compression System at Hydrogen Vehicle Refueling Stations

Seong-jun Bae · Ha-neul Yim · Seo-yeon Na · †Chung-keun Chae  
Jin-hyeok Choi\* · Jin-woo Lee\* · Sang-bong Shin\*

Mirae EHS-Code Research Institute, Gwangmyeong, 14353, Korea

\*Korea Gas Technology Corporation, Daejeon, 34007, Korea

(Received October 28, 2022; Revised January 27, 2023; Accepted February 10, 2023)

#### 요약

현재 국내 수소자동차충전소의 수소압축장치는 사업자의 자체 안전관리규정에 의한 유지관리가 되고 있으나 이는 기술기준이나 공학적 근거에 의한 것이 아니어서 신뢰성에 기반한 수소압축장치 유지관리 기준 수립이 필요하다. 본 고에서는 한국가스기술공사의 수소자동차충전소에서 운영하는 수소압축장치를 대상으로 ISO 14224 표준에 따른 수소압축기 분류체계를 검토하여 9단계의 분류체계를 확립하였고, 이에 대한 FMEA를 실시하여 SAE JA1011 및 SAE JA1012에 규정된 신뢰성중심 유지관리(RCM) 전략을 수립하였다. 수소압축장치 유지관리 분류체계 확립 및 전략수립 결과가 운영중 압축장치 성능검증기준 개발을 위한 기초자료 및 수소압축장치 유지관리기준 수립에 활용될 것으로 기대된다.

**Abstract** - Currently, Hydrogen compressor is maintained and managed according to the safety management regulations of the operator. But it is not based on technical standards, so it is necessary to establish based on reliability. In this paper, hydrogen compressor taxonomy by ISO 14224 standard reviewed for hydrogen compressor operated by KOGAS-Tech hydrogen vehicle refueling station to establish 9-stage taxonomy, and FMEA was conducted to establish RCM strategy specified in SAE JA1011, and 1012. It is expected that results of taxonomy and RCM strategy will be used as basic data for development of standards for verifying the performance of compressors.

**Key words** : RCM, taxonomy, hydrogen compressor, FMEA

#### 1. 서론

2005년 7월에 현대자동차(주) 환경기술연구소에 수소자동차 충전소가 최초로 설립되었고, 여기에 독

일 Hofer사의 왕복동식(piston type) 수소압축장치가 설치된 이후 2022년 8월말 까지 142개소의 수소자동차 충전소에 220여기의 수소압축장치가 설치되어 운영되고 있다. 2021년 11월 26일에 개최된 제4차 수소경제위원회에서는 2025년까지 전국 226개 시·군·구에 원칙적으로 1기 이상의 수소충전소를 구축하고, 2030년에는 주요 도시에서 20분 이내, 2040년에는 15분 이

†Corresponding author: chae@meri.co.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

내에 수소충전소 이용이 가능하도록 할 계획이라는 환경부의 수소충전소 전략적 배치계획을 의결하였다. 이 계획이 순조롭게 이행된다면, 2040년경에는 1200여 개소의 수소자동차충전소가 설치되어 운영되고, 여기에는 최소한 1200기 이상의 수소압축장치가 설치될 것이다.

최초 수소자동차충전소용 압축기가 설치된 지 17년이 지난 현재의 시점에서 이들 수소압축장치에 대한 안전성과 경제성을 기반으로 한 유지관리, 즉 신뢰성 중심의 유지관리(RCM, Reliability Centered Maintenance) 기준을 정립하여 향후 지속적으로 증가할 수소자동차충전소 압축장치에 대한 효과적이고 효율적인 운영을 지원할 필요가 있다. 현재는 고압가스안전관리법령과 KGS Code라고 하는 상세기준에 의해 수소자동차충전소의 유지보수가 이루어지고 있다. 구체적으로는 고압가스안전관리법 제11조에 의한 안전관리규정에서 가스설비의 점검과 유지보수에 대한 관리규정을 수소자동차충전사업자가 수립하여 시행하도록 하고 있다. 그러나 고압가스안전관리법 시행규칙 등 세부 법령에서는 가스설비에서 가스누출 여부 등 일반적인 사항에 대한 가이드만 할 뿐 수소압축장치에 관한 구체적인 유지관리기준이나 지침은 없는 실정이다.

세계적으로도 수소자동차충전소용 수소압축장치에 대한 RCM 기준이나 지침은 아직 구축되지 않았다. 따라서, 자동차산업분야에서 적용하고 있는 RCM 구축 가이드와 수소압축장치가 사용되고 있는 석유화학분야에 적용하는 국제기준들을 분석하여 신뢰성에 기반한 수소압축장치 성능평가와 유지보수기준 개발을 위한 기초연구자료를 확보하고자 한다.

미국 SAE(Society of Automotive Engineers)의 표준인 SAE JA1011(Evaluation Criteria for Reliability Centered Maintenance(RCM) Pro -cesses)과 SAE JA1012(A Guide to the Reliability Centered Maintenance(RCM) Standard)는 RCM 프로세스 구축을 위한 최소 기준을 지정하여 RCM 프로세스 평가를 지원하는 목적으로 제정하여 운영되고 있다.

또한, 석유, 석유화학 및 천연가스 산업 설비의 신뢰성 및 유지보수 데이터 수집 및 교환을 위한 국제 표준인 ISO 14224:2016(Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment)에서는 설비의 유지관리 및 신뢰성 데이터를 수집하는 데 필요한 지침과 산업계 동류(同類) 벤치마킹에 대한 지침을 제공하고 있다. 이 표준에서는 자산에 대한 RCM 구축을 위해서는 우선 자산의 관리 분류체계(taxonomy)를 확립하고, FMEA(Failure Mode and Effects Analy-

sis)를 수행하여 자산을 구성하는 설비의 오류확률(고장확율)을 정의하는 것이 선결과제라고 규정하고 있다. 이후 RCM전략을 수립하여 시행하고 성과측정과 변경관리를 하는 것이다.

따라서, 본 연구는 ISO 14224: 2016 등의 국제 표준을 검토하여 수소압축장치에 대해 유지관리를 위한 분류체계(taxonomy)를 확립하고, 한국가스기술공사 수소충전소에서 운영하고 있는 수소압축장치를 대상으로 FMEA를 수행하여 각 설비 구성품의 오류확률(고장확율)을 특정하여 RCM전략을 수립하는 것이다. 이를 향후 수소압축장치의 운영중 성능평가기준 확립을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

## II. 수소압축장치 유지관리 관련 국제 기준 현황 및 분석

### 2.1. 신뢰성 기반 유지관리(RCM) 기준

RCM(신뢰성 중심 유지관리)은 설비점검 및 정비의 효율성을 극대화하기 위한 분석학적 프로세스로서 기존 예방보수 프로그램 최적화를 통해 새로운 예방적 유지보수 방법을 개발하고, 신뢰도 평가에 최적화된 기법이라 할 수 있다.

기업들이 설비 유지관리 비용은 줄이고 안전이나 환경에 영향을 최소화하는 방향으로 더 많은 관심을 기울이면서 RCM을 활용하는 산업분야나 기업이 점점 더 증가하고 있다. 일반적인 설비의 유지관리 프로세스는 고장정비(Breakdown maintenance), 예방정비(Preventive Maintenance), 상태 기반 정비(Condition based maintenance)로 나눌 수 있는데 RCM은 위 세가지 정비방법을 적절한 프로세스와 실행 프로그램에 의해 최적화하는 설비 유지관리 방법이다. RCM은 1960년대 항공산업분야에서 시작된 설비나 장비의 유지관리 프로세스로 현재는 전 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 그 이유는 RCM은 안전성과 신뢰성을 보장하면서도 정기 유지보수 작업량을 40~60% 감소시킬 수 있기 때문이다. 1990년대 들어 RCM 표준화를 위한 연구가 활발히 진행되어 자동차 산업분야인 미국 SEA(Society of Automotive Engineers)에서 1998년 JA1011(Evaluation Criteria for Reliability Centered Maintenance(RCM) Processes)가 발간되었고, 2002년에는 JA1012 (A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard)가 발간되었다. 그 후 수차례 개정을 거쳐 현재에 이르고 있다.

JA1011은 RCM 프로세스를 수립하기 위해 프로세스에 있어야 하는 최소 기준을 지정하는 표준이다. 이 표준에서는 RCM 프로세스 수행절차를 다음과 같이 규정하고 있다.(제5항 RELIABILITY CENTERED

MAINTENANCE(RCM) )

- a. 자산의 운영 상황과 기능 및 관련되는 요구 성능 표준을 결정한다(운영 상황 및 기능).
- b. 자산이 기능을 수행하는데 있어 어떤 방식으로 고장이 발생하는지 결정한다(기능적 고장).
- c. 각 기능 고장(고장 모드) 원인을 결정한다.
- d. 각 고장이 발생할 때 어떤 일이 일어나는지 결정한다.(고장 영향).
- e. 고장의 결과를 분류한다(고장 결과).
- f. 각 고장(작업 및 작업 간격)을 예측하거나 방지하기 위해 수행해야 하는 작업을 결정한다.
- g. 다른 고장 관리 전략이 더 효과적일 수 있는지 결정한다(일회성 변경).

JA1012는 RCM 프로세스를 구축할 때 JA1011에서 요구하는 요건에 대한 구체적인 가이드를 제공하고 있다. 예를 들면 JA1011 5항 a.에서 규정한 성능표준에 대해 JA1012의 6.4 성능표준에서는 열화에 따른 성능표준에 대해 다음 표 1과 같이 안내하고 있다.

**Table 1.** Performance standard guidelines for JA 1011 and JA1012

JA 1011 5. a.	자산의 운영 상황과 기능 및 관련되는 요구 성능 표준을 결정한다(운영 상황 및 기능)
JA 1012 6.4.	<p>&lt;중략&gt; 열화는 불가피하므로 허용해야 한다. 이는 자산이 서비스에 투입될 때 사용자가 원하는 최소 성능 표준 이상을 제공할 수 있어야 함을 의미한다. 이 시점에서 자산이 제공할 수 있는 것을 초기 능력이라고 한다.</p> <p>다음 그림은 이 기능과 원하는 성능 사이의 올바른 관계를 보여준다. 이는 성능을 두 가지 방식으로 정의할 수 있음을 의미한다.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 원하는 성능(사용자가 자산이 수행하기를 원하는 것)</li> <li>b. 내장 기능(무엇을 할 수 있는지)</li> </ul> <div style="text-align: center;"> </div> <p>열화에 대한 허용</p>

**2.2. 설비의 신뢰성 및 유지관리 데이터 수집 및 처리 표준**

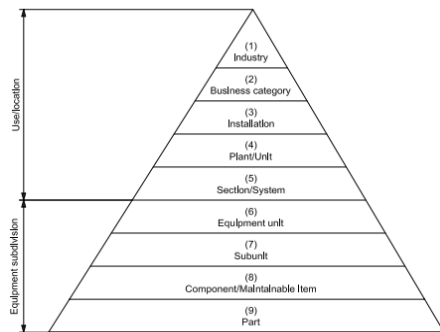
설비의 유지관리를 위한 데이터 수집 및 처리 관련 표준 중 수소압축기와 관련된 표준은 ISO 14224: 2016(Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment)이 있다. 이 표준은 설비의 작동기간 동안의 석유, 천연가스, 석유화학 산업 내의 모든 설비와 운용에 대해서 기준 형식의 장비의 신뢰성과 유지보수 데이터의 수집에 관한 포괄적인 기초를 제공한다. 이 산업 범주에 수소분야가 포함되어 있고, 이에 대한 사례도 제공하고 있으며, 특히 압축장치에 관한 분류체계(taxonomy)를 제공하고 있다.

이 표준에서 데이터를 수집하여 처리하기 위한 다음과 같은 6가지 핵심 단계를 규정하고 있다.

- a. 자산 계층 구조 표준을 개발하고 표준을 구현
- b. 설비 등급 및 관련 설비 특성을 정의
- c. 유지관리 작업 범주 정의
- d. 유지관리 가능 항목 코드, 오류 코드 및 원인 코드 정의,
- e. 통합된 유지관리 및 신뢰성 비즈니스 프로세스 개발,
- f. 거버넌스 시행, 변경 관리 및 성과 측정

ISO 14224 표준의 8.2항에서 분류체계(taxonomy)는 여러 항목(위치, 용도, 장비 세분화 등)에 공통적인 요인에 근거하여 항목을 일반 그룹으로 체계화하여 분류하는 것으로 규정하고 있고, 다음 그림 1과 같이 수집되는 관련 자료의 분류를 계층구조로 나타내고 있다.

또한, 이 표준에서는 그림 1의 계층구조에 대하여



**Fig. 1.** Taxonomy classification with taxonomic levels.

## 수소자동차충전소의 수소압축장치 성능평가를 위한 분류체계 및 RCM 전략수립 연구

주요 카테고리	분류 수준	분류 체계	정의	예
사용/위치 데이터	1	산업	주요 산업 종류	석유, 천연가스, 석유화학
	2	업종	비즈니스 유형 또는 처리 흐름	인스트림(및 P), 미드스트림, 다운스트림(정제), 석유화학
	3	설치 범주	시설 종류	석유/가스 생산, 운송, 시추, LNG, 정유, 석유화학(표 A.1 참조)
	4	공장/단위 범주	공장/단위 종류	플랫폼, 반잠수식, 하이드로 크래커, 에틸렌 크래커, 폴리에틸렌, 아세트산 플랜트, 메탄올 플랜트(표 A.2 참조)
	5	섹션/시스템	공장의 주요 섹션/시스템	인입, 천연가스, 액화, 정공가스, 메탄올 재생, 신화 부분, 반응계통, 증류 부분, 유조선 적재계통(표 A.3 참조)
장비 구분	6	장비 등급/단위	유사한 장비 유닛의 등급, 각 장비 클래스에는 비교 가능한 장비 유닛(예: 압축기)이 포함	열교환기, 압축기, 배관, 펌프, 가스터빈, 해저 유물 및 다목적 제어 밸브 더미, 구경보트, 압출기, 해저 BOP(표 A.4 참조)
	7	스단위	장비 장치가 작동하는데 필요한 하위 시스템	운할 서브 유닛, 냉각 서브 유닛, 제어 및 모니터링, 난방 서브 유닛, 펄렛 서브 유닛, 급냉 서브 유닛, 냉동 서브 유닛, 환류 서브 유닛, 분산 제어 서브 유닛
	8	구성품/유지관리자가 수리/복원되는 장비 장	치외 부품 그룹	클러, 커풀링, 변속기, 운할용 펌프, 계기판, 모터, 밸브, 필터, 압력 센서, 온도 센서, 전기 회로
	9	부품	단일 장비	셀, 튜브, 엘, 임펠러, 게스킷, 여판, 볼트, 너트 등

a 일부 장비 유형의 경우 MG가 없을 수 있음. 예를 들어 장비 등급이 배관일 경우 MG가 없을 수 있지만 부품은 '열보'일 수 있음.  
b 이 수준은 경우에 따라 유용할 수 있지만, 이 국제 표준에서는 선택사항으로 간주 됨.

Fig. 2. Example of Equipment by ISO 14224.

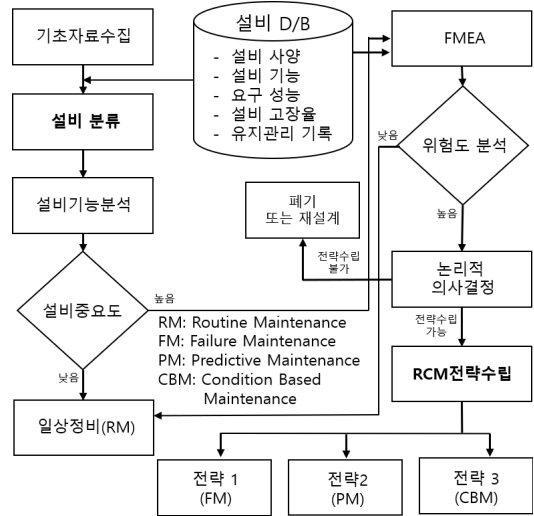


Fig. 4. RCM Strategy Establishment Framework.

장비 단위	압축장치					
	동력 전달	압축기	제어 및 모니터링	운할 시스템	소프트 셀 시스템	기타 하위 유닛
유지관리 항목	기어 박스 / 가변 구성 베어링 벨트/시브 드라이브 연결 장치 구동 장치 연결 장치 운할 셀	케이싱 임펠러가 있는 로터 펄스 미스톤 인터스테이지 질 레이디얼 베어링 스트러스트 베어링 센서* 소프트 셀 내부 배관 밸브 배선 서지 방지 시스템* 미스톤 실린더 라이너 포장	작동 장치 제어 장치 펄스 및 정속 박선할 모터 내부 전원 공급 장치 모니터링	기열장치를 갖춘 온 오일 탱크 펄스 모터 체크 밸브 클러 제어 밸브 펄터 밸브 운할유	가열식 오일 탱크 저수지(저장소) 펄스 모터 밸브 셀 오일 드라이브 가스 셀 기계식 셀 스크러버	베이스 프레임 배관, 배관 지지대 및 벨로우즈 제어 밸브 격리 밸브 체크 밸브 클러 운할용 소용기 위치 에어 자기 베어링 제어 시스템 플랜지 조인트

a 센서 유형 지정(예시: 압력, 온도, 레벨 등).  
b 라이너를 벨브 및 컨트롤러 포함.

Fig. 3. Example of Compressor Segmentation by ISO 14224.

그림 2와 같이 다양한 비즈니스 흐름과 장비 유형의 예로써 각 부분의 정의를 제공한다.

이 표준의 부록 A에서는 앞서 살펴본 설비 등급 속성을 알 수 있게 분야별로 자료를 제공하고 있고, 다음 그림 3과 같이 압축기에 대한 자료를 제공한다.

### III. 수소압축장치 RCM 전략 수립을 위한 분류체계 연구

#### 3.1 RCM 전략수립 프레임워크(Framework)

RCM 전략 추진 프로세스의 예는 다음 그림 4와 같다. 여기서 첫 단추는 설비를 분류하고 그 기능을 분석

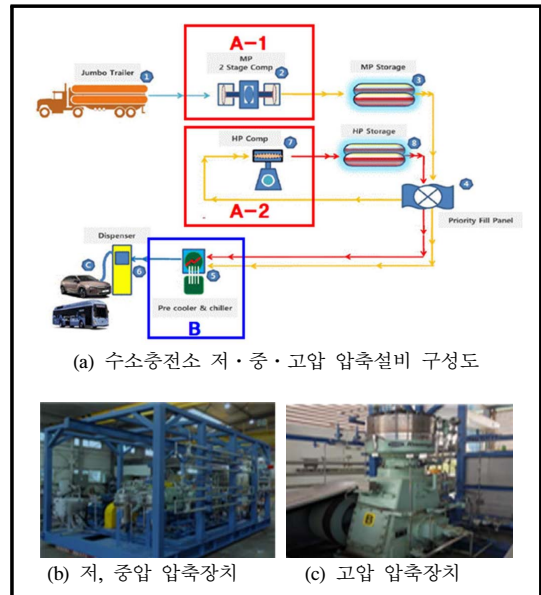


Fig. 5. Current Status of hydrogen Compressor at hydrogen vehicle refueling station.

하는 것이다. 그 이후 분석과정과 FMEA 등을 수행한 후 최종적으로 RCM 전략을 수립한다.

#### 3.2 압축장치 계통 분류 및 기능 식별

설비 분류 및 기능 식별은 압축장치를 트리(tree)구

**Table 2.** Specification of hydrogen compressor for RCM

설비종류	사양	수량	형식	비고
고압압축기(HP)	90MPa	Iset	다이아프램	-
저,중압 압축기	45MPa			다단

**Table 3.** Classification constitution of hydrogen compressor for RCM

ISO 14224 Taxonomy	ISO 적용 예시	수정한 예시	비고
(1) Industry	NG	KOGAS-Tech	가장 높은 Level : 회사명
(2) Business category	Petrochemical	부천	설치 지역
(3) Installation	Terminal	부천 H2충전소	충전소명
(4) Plant/Unit	H2 Gas	Compressor	시스템단위 분류
(5) Section /System	H2 Gas Station	MP Compressor (MPC-101)	세부 시스템 단위
(6) Equipment unit	MP Compressor	MPC-101	설비명
(7) Subunit	1st Stage Comp.	LO Injection Sys.	서브 시스템
(8) Component/Maintainable item	-	IP-202, OP-202	서브 설비명
(9) Part	-	세부 부품	서브 설비 부품

조의 계통으로 분류한 FMEA 이전의 RCM 분석의 첫 번째 단계이다. 보통 압축장치는 운동 메커니즘, 작업 메커니즘 및 동체의 세 가지 주요 구성요소를 포함한다. 또한 압축장치에는 윤활 시스템, 냉각 시스템 및 제어 시스템을 포함한 3개의 보조 시스템이 장착되어 있다.

그림 5는 한국가스기술공사 부천 수소자동차 충전소의 구성도와 그 곳에 설치되어 있는 압축장치를 나타낸 것이고, 다음 표 2는 수소압축장치 사양이다.

위와 같은 한국가스기술공사 부천수소충전소에

**Table 4.** Functional Analysis of Individual Facilities

Sort ID	Taxonomy Classification			DESCRIPTION	FUNCTION
	(6) Equipment Unit	(7) Subunit	(8) Component (Tag No.)		
22	MPC-101			MP Compressor	tube trailer 에서 받은 H2 을 1st & 2nd stage 에 걸쳐 2회 압축하여 MP storage tank 로 이송
23	MPC-101	1st stage	VS-201	LMP COMP FRAME VIBRATION.	MPC-101 의 본체의 허용진동을 측정하고 DCS 로 전달. 진동이 허용치를 넘으면 경보를 보냄
25	MPC-101	1st stage	TT-203	LMP LUBE OIL TEMP.	TE-203 에 측정된 온도를 DCS 로 전달 하여 온도가 HH & HL 일때 경보를 주며, DCS 에 측정된 온도를 나타냄
26	MPC-101	1st stage	LG-301	Level Gauge for MP Lube Oil	MP Compressor Crank case 의 lubricant oil 의 level 을 측정 (Local)
27	MPC-101	1st Leak Detection System	PI-204	LMP COMP 1st CYL LEAK PRESS.	MP Compressor 1st stage Cylinder 내 누출이 일어날 경우 누출 압력을 확인 (Local)

설치된 수소압축장치에 대한 분류(taxonomy)를 ISO 14224의 예시(그림 2 및 그림3)대로 적용할 경우 기존에 운영하고 있던 설비 데이터와 차이가 발생하고, ISO 14224 는 데이터의 운용을 효율적으로 관리하기 위한 목표에서 개발되었기 때문에 반드시 따라야 하는 것은 아니다. 따라서 기존 데이터를 활용하고, 효율적인 데이터 관리를 위해 다음 표 3과 같은 분류구조를 채택하였다.

해당 수소충전소의 FMEA 분석을 위해 7 개 시스템/16 개 서브시스템으로 부터 183 개의 설비에 대하여 정보를 수집하였다. 데이터 분석결과 최종 적용된 설비의 형태는 14 개로 분석하였다. 분석된 14 개의 설비 형태는 ISO 14224의 분류 기준에 따랐다. 또한, 수소충전소의 시스템과 설비형태를 고려하여 개발된 계층구조에 근거하여 개별 설비에 대한 기능을 분석하였다. 압축기의 기능은 제공되는 유체를 원하는 압력으로 압축하는 것이고, 밸브류는 닫힘 또는 열림을 통해 유체의 차단 또는 공급을, 그리고 펌프는 유체의 이송을, 공정센서(Pressure, Temperature, Flow, Level, Vibration)는 공정 값을 측정하여 결과를 전달하는 기능을 가지고 있다. 기능분석에서는 2 개 이상의 기능을 가지고 있을 때는 모두 고려하여 정의를 하였다. 다음 표 4는 개별 설비의 기능을 분석한 사례이다.

### 3.3 고장 모드 및 고장 원인 분석

수소충전소 압축장치 시스템의 FMEA 분석을 위해 고장모드(failure mode)는 OREDA(Offshore and Onshore Reliability Data)를 인용하였다.

OREDA 데이터는 「고압가스제조사업의 양도·양수 및 지위 승계 관련 기준 적용에 관한 특례고시 (산업통상자원부 고시 제2018-226호)」의 별표 (안전진단, 안전성평가 및 안전관리체계평가 방법 등에 관한 기준)

**Table 5.** Definition and example of failure mode

분류	고장 모드	해당 설비	정의	예시
기능적 고장	Erratic output	Comp. Detector Control Logic unit	출력 값이 일정하지 않고 주기적으로 증가후 감소를 반복적으로 나타내는 경우. Comp.는 출력용량, 검지기는 민감도 값, control logic unit은 시그널이 일정하지 않고 반복적으로 출력되는 경우	-압축기:출력이 일정하지 않음 -검지기:민감도 값이 일정하지 않음 -control logic unit: 작동이 불규칙

에서 고압가스제조시설의 안전성평가 시 신뢰도 자료로써 OREDA(Offshore Reliability Data Handbook) 데이터를 이용할 수 있도록 규정하고 있다. OREDA는 과거의 사고데이터를 축적하여 현재 가장 신뢰성 있는 데이터로 알려져 있으며, 신뢰성 분석에서 가장 효율적으로 활용되고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 설비 형태는 14 개로 분류되었고, 따라서 14 개의 설비 형태에 대하여 각각의 고장모드를 작성하였다.

OREDA의 고장 모드는 일반적으로 산업에서 통용되는 용어로서 별도의 정의는 지정되어 있지 않아, 이해를 돕기 위하여 표 5와 같이 고장 모드가 적용되는 설비, 고장모드의 정의, 고장모드에 따른 예시를 나타내었다. 또한 설비의 고장으로 인해 유지보수하여야 할 품목(item)을 OREDA에서 제공하고 있고, 이를 확인하고, 고장 모드별로 유지관리해야 할 부품(main-maintainable item)에 대하여 분석하였으며, 고장 모드별로 발생하는 고장 메커니즘도 함께 분석하였다.

### 3.4 수소압축장치에 대한 FMEA 분석 및 RCM 전략수립

#### 3.4.1 FMEA 분석 과정

FMEA 분석은 DNV와 한국가스기술공사가 함께 수행하였다. 이 FMEA 분석에서 고장모드는 OREDA 기준에서 정의하는 압축기에 관한 16개의 고장모드를 참고하여 수소충전소의 설비 형태에 적합하도록 적용하였다.

고장 영향은 고장 원인이 작동하여 고장 모드가 발생할 경우 이에 대한 안전(safety), 환경(environment), 사업중단(production loss), 유지보수 비용(follow cost)의 관점에서 분석을 수행하였다. 예를 들면, 압축기에서 ‘Abnormal Instrument Reading’ 고장모드의 경우

압축기에서 연결된 계장의 상태를 확인할 수 없기 때문에 이로 인한 고장 영향은 시스템이 중단될 것이고, 작업중단의 피해가 발생하게 될 것이다. 나머지 고장 모드에 대해서도 동일한 해석방법으로 적용하였다.

심각도는 하나의 고장 모드에 대하여 안전(safety), 환경(environment), 사업중단(production loss), 유지보수 비용(follow cost)에 대해 각각 평가하고, 이 중 가장 심각한 등급을 심각도 등급으로 결정하였다.

고장 발생 가능성은 OREDA 에서 제공하는 고장율(failure rate, 회/10<sup>6</sup>hr)를 이용하였으며, 설비의 배치 구조가 병렬로 된 경우 고장율이 낮아지기 때문에 설비의 설치 형태(working and spare)를 고려하였다.

위험등급 결정은 두 가지 방법론에 근거하여 위험등급을 결정하였다. 첫 번째는 DNV에서 제공하는 위험도 행렬(Risk Matrix) 방식에 의하여 위험등급을 결정하였고, 두 번째는 RPN(Risk Priority Number) 수에 의한 위험등급을 결정하였다. RPN 방식의 경우 RPN 수는 확인이 가능하지만, 현재 등급의 구간에 대한 정의는 제공되고 있지 않다. 따라서 개별 설비의 위험도 등급은 개별설비에서 각 고장모드의 위험등급을 평가한 후 이중 가장 높은 고장모드의 위험등급을 개별 설비의 위험등급으로 결정한다.

수소충전소의 사고피해크기를 간략하게 확인하기 위해 DNV의 PHAST(Ver. 7.22)를 이용하여 누출시 최악의 경우 피해 범위를 예측해 보았다. 최악의 피해가 발생할 수 있는 중압저장탱크와 고압저장탱크에서의 파열과 저장탱크와 연계된 배관의 파열에 대해 분석하였다.

실제 누출이 가장 빈번히 발생할 수 있는 설비는 압축기(중압 및 고압)이나 저장탱크를 선정한 이유는 최악의 상황으로 인한 피해를 확인하기 위한 것이다. 저장탱크에서 누출이 발생되면, 그 결과로 가스 확산(gas dispersion), 플래쉬 화재(flash fire), 폭발(explosion), 화구(fire ball)가 발생하는 것으로 나타났으며, 가장 영향이 큰 폭발로 인한 피해영향 범위는 중압저장탱크의 경우 반경 161 m, 고압저장탱크의 경우는 반경 170 m로 예측되었다.

#### 3.4.2 FMEA 결과 분석

현재 한국가스기술공사가 운영하고 있는 부천수소충전소에 대하여 7 개 시스템, 16 개 서브시스템 및 하위 183 개의 설비에 대하여 FMEA를 분석하였다. 해당 수소충전소의 수소압축기에 대한 1,048개의 고장모드는 그림 6과 같이 위험도 행렬 방식에 의하여 위험도 등급을 구분하였다.

고위험도(high risk category) 고장모드는 8 개(0.76%), 중위험도(medium risk category) 고장모드는 190

개(18.13%) 및 저위험도(low risk category) 고장모드는 336개(32.06%), 저저위험도(low low risk category) 고장모드는 514개(49.05%)로 나타났다.

그리고 RPN 위험우선 순위에 의한 설비의 위험도 등급은 표 6과 같이 나타났으며, 고위험도 설비는 2 개(1.09%), 중위험도 설비는 58 개(31.69%), 저위험도(low risk category)의 설비는 94 개(51.37%), 그리고 저저위험도(low low risk category)인 설비는 29 개(15.85%)로 나타났다.

**3.4.3 RCM 전략 수립**

신뢰성기반 유지관리(RCM) 전략은 FMEA 분석을 통하여 해당 고장모드가 위험도(risk)에 중요한 영향을 미치는지, 일선 유지보수가 필요한지, 설비의 수명과 관련된 것인지, 상태기반 유지관리를 할 것인지, 기능 검사를 통해 점검 여부 등을 고려하여 수립된다.

한국가스기술공사 수소충전소의 경상정비는 계획정비와 고장정비로 구분하고 있다. 고장정비는 설비 운전 중 이상 상태 발생 시 정비 절차에 의해 즉시 시

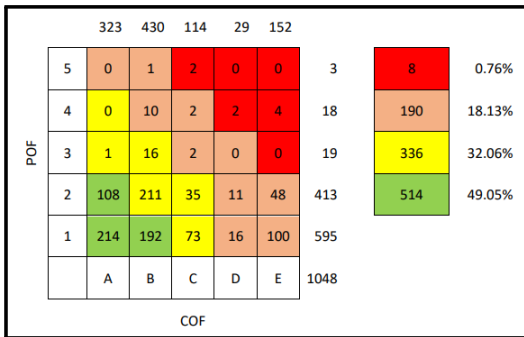
행할 수 있는 정비로 정의하고 있다. 계획정비는 예방 점검정비 및 정기점검정비로 구분하고 있으며, 예방 점검정비는 주간, 월간, 분기, 반기, 년간 등으로 구분하여 기기의 상태를 주기적으로 이상유무에 대한 점검 및 정비를 수행하도록 하고 있으며, 정기점검정비는 장비의 가동시간 및 상태에 따라 정기적으로 완전 분해정비(overhaul)를 하도록 하고 있다.

고장정비 대상은 설비의 고장 모드를 기준으로 평가하였으며, 각 고장 모드가 발생할 경우 어떤 현상이 설비에서 발생하는지를 정의하였고, 이때 설비 및 연결된 계장의 상태가 어떤지를 정의하였다. 또한 모니터링 시스템에서 어떤 값이 어떠한 변화가 있는지를 정의하였다. 그리고 고장(이상) 문제가 발생할 경우 점검해야 할 대상 설비와 점검해야 할 부분이 어느 부위인지 명시하였으며, 이때 점검을 어떤 방식으로 진행할지에 대하여 정의하였다.

계획정비는 FMEA 분석에서 해당 고장모드가 위험도(risk)에 중요한 영향을 미치는지, 일선유지보수가 필요한지, 설비의 수명과 관련된 것인지, 상태기반 유지관리를 할 것인지, 기능 검사를 통해 점검이 가능한 지 등을 고려하여 기능 시험(Function Test), 정기정비(Periodical Maintenance), 상태기준 정비(Condition Base Maintenance), 일선유지보수(First Line Maintenance), 사후관리(Run to Fail)로 구분하였다. 특히 고장모드의 위험도 등급이 저저위험도(low low risk category)인 경우 고장이 발생하더라도 영향이 크지 않기 때문에 사후관리유지보수 전략을 적용하였다.

**Table 6.** RPN Risk Priority Distribution for Facilities

Start	End	설비 수	Risk Category	분포
1	9	29	Low Low	15.85%
10	19	71	Low	51.37%
20	29	23		
30	39	21	Medium	31.69%
40	49	37		
50	-	2	High	1.09%



**Fig. 6.** Risk Distribution for FMEA by Failure Mode.

**Table 7.** Maintenance strategy by failure mode

Applied Failure Mode	Maint. Strategy	Frequency			Maint. Task
		Low	Medium	High	
Abnormal instrument reading	Function Test	24M	12M	6M	Anti Surge Test, Compressor Performance Test & Routine Maintenance
Breakdown	PM/Overhaul	48M	36M	24M	Overhaul
Erratic output	Function Test	24M	12M	6M	Anti Surge Test, Compressor Performance Test & Routine Maintenance
External leakage - Process medium	FLM	2W	1W	1D	Routine inspection & equipment basic care
External leakage - Utility medium	FLM	2W	1W	1D	Routine inspection & equipment basic care
Fail to start on demand	Function Test	24M	12M	6M	Anti Surge Test, Compressor Performance Test & Routine Maintenance
Fail to stop on demand	Function Test	24M	12M	6M	Anti Surge Test, Compressor Performance Test & Routine Maintenance
Low output	Function Test	24M	12M	6M	Anti Surge Test, Compressor Performance Test & Routine Maintenance
Noise	Function Test	24M	12M	6M	Anti Surge Test, Compressor Performance Test & Routine Maintenance
Overheating	PDM	6M	3M	2M	Lube Oil Sampling
Parameter deviation	PD	12M	6M	3M	Suction screen cleaning & routine maintenance
Spurious stop	Function Test	24M	12M	6M	Anti Surge Test, Compressor Performance Test & Routine Maintenance
Structural deficiency	PM/Overhaul	48M	36M	24M	Overhaul

설비의 고장모드별 위험도 등급은 DNV Risk Matrix 방법과 RPN 방법이 적용되었으며, 두 방법을 모두 고려하여, 즉 Risk Matrix 방법과 RPN 에서 모두 저위험도(low low risk)인 경우 저위험도 등급으로 최종 결정하였고, 어느 한쪽이 높은 경우 높은 위험도 등급을 따라가도록 결정하였다. 이와 같이 최종 결정된 등급을 이용하여 유지보수 전략을 적용하도록 하였다.

고장 모드별 유지관리 전략(maintenance strategy) 수립을 위하여 표 7과 같이 설비의 고장모드별로 적용 가능한 유지관리 전략을 수립하고, 위험도 등급을 기준으로 합리적으로 고려되어야할 유지보수 주기를 설정하였다. 여기에서, 표 7은 부천수소충전소 압축장치의 FMEA결과 중 압축기의 고장모드에 따른 유지보수 전략의 일부를 발췌한 것이다.

#### IV. 결과 및 고찰

수소충전소 압축장치 시스템에 대한 RCM 전략수립을 위해 관련 자료와 국제 표준인 SAE JA1011 (Evaluation Criteria for Reliability Centered Maintenance(RCM) Processes), SAE JA1012(A Guide to the Reliability Centered Maintenance (RCM) Standard) 및 ISO 14224: 2016(Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment)를 분석하고, 한국가스안전공사 운영하고 있는 부천수소충전소의 수소압축장치에 대한 FMEA를 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. SAE JA1011, ISO14224 표준에 의한 수소자동차 충전소의 수소압축장치 RCM 프레임워크 확립
2. ISO 14224 분류 기준에 따른 수소자동차충전소의 수소압축장치 분류 기준 제시
3. OREDA Data 를 이용하여 고장 모드 및 고장 원인 분석 데이터 작성(유지관리 부품 및 고장 메커니즘 포함)
4. 7 개 시스템, 16 개 서브시스템, 183 개 설비에 대하여 FMEA 분석으로 1,048 개의 고장 모드 분석(위험도 행렬 기준)
  - 고위험도(high risk category): 8 개(0.76%)
  - 중위험도(medium risk category): 190 개(18.13%)
  - 저위험도(low risk category): 336 개(32.06%)
  - 저저위험도(low low risk category): 514 개 (49.05%)
5. FMEA 수행결과를 통해 수소자동차충전소의 수소압축장치 RCM 전략수립 모델을 제시

위와 같이 도출된 결과를 바탕으로 수소자동차충전소에 설치되어 운영되고 있는 수소압축장치에 대해 신뢰성에 바탕을 둔 유지관리 기준을 정립하여 이를 표준화할 수 있고, 또한, 운영상태에서 수소압축장치의 성능평가 기준을 표준화하는 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

#### V. 결론

대한민국 정부의 수소자동차 보급확대 정책에 따라 수소자동차 충전소가 지속적으로 증가하고 있으며, 2040년경에는 1200 여개의 충전소가 운영될 예정이다. 현 시점에서 수소자동차 충전소에 설치, 운영되는 수소압축장치의 안전성과 성능유지가 수소자동차 산업의 핵심과제로 등장했다. 따라서, 수소압축장치에 대한 신뢰성에 바탕을 둔 유지관리기준을 정립하고, 효율적인 운영을 위한압축장치 성능확인을 위해서는 압축장치의 분류체계 확립과 RCM 전략 모델제시가 필요한 시점이다.

이번 연구 결과를 향후 수소자동차충전소에 설치, 운영되고 있는 수소압축장치의 성능유지를 위한 성능평가 기준과 유지관리 기준 확립에 적용함으로써 수소자동차충전소의 안전, 환경, 경제성 확보를 위한 초석이 될 수 있을 것을 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원 수소충전소 인프라 안전관리 핵심기술개발 사업(과제번호:20215810100050)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

#### REFERENCES

- [1] *안전관리규정 표준모델(수소자동차 충전 사업자용)*, 한국가스안전공사, (2020)
- [2] Kim, M.B., Kim, T.H., Kim, H.C., Lim, S.Y., "Failure Data Base for Reliability-Based Maintenance for a Power Plant ", *Plant journal*, **12**(2), 31-35, (2016)
- [3] *SAE JA1011: (R) Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*, SAE International, (2009)
- [4] *SAE JA1201: A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard* , SAE International, (2011)
- [5] *BS EN ISO 14224: 2016, Petroleum, petrochemical*



*and natural gas industries- Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*, bsi, (2016)

- [6] Marquesin De Oliveira, N., *Risk Based Maintenance for Compressor Systems*, MASTHER THESIS Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, (2015)
- [7] Liang, W., Pang, L., Zhang, L., Hu, J., "Reliability-Centered Maintenance Study on Key Parts of Reciprocating Compressor", *2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, 414-418, (2012)
- [8] Abdul-Nour, G., Beaudoin, H., Ouellet, P., Rochette, R., Lambert, S., "A reliability based maintenance policy: a case study," *Comput Ind Eng*, **35**, 591-594, (1998)
- [9] Zou, B., Xiang, Y., Zou, R., Liu, H., Xu, C., Zou, Y., Chen, C., "Improved RCM method by AHP-FCE for the maintenance strategy of reciprocating compressor unite of Gas", *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 124-129, (2020)
- [10] DNV, *Offshore and Onshore Reliability Data*, 6th Edition, (2015)