

## 고압 수소설비용 비금속부품 소재의 FMEA 평가를 통한 실험적 연구

안정진 · 김완진\* · 김래현\*\*†

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 신에너지공학과, \*한국가스안전공사,

\*\*서울과학기술대학교 에너지환경대학원

(2019년 7월 25일 접수, 2019년 8월 14일 수정, 2019년 8월 16일 채택)

### An Experimental Study on the FMEA Evaluation of Non-metallic Materials in High-Pressure Hydrogen Facility

Jeongjin Ahn · Wanjin Kim\* · Laehyun Kim\*\*†

Department of New Energy Engineering, Graduate School of Energy and Environment,  
Seoul National University of Science and Technology, \*Korea Gas Safety Corporation,

\*\*Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and  
Technology

(Received 25 July 2019, Revised 14 August 2019, Accepted 16 August 2019)

#### 요 약

국내 친환경 수소차 보급 정책에 따라 수소차와 수소충전소 인프라 개발에 대한 관련 업계의 연구는 활발하게 진행 중이다. 반면에 수소차와 수소충전소의 내구성 및 신뢰성에 직접적인 영향을 주는 기밀용 비금속 소재(라이너, 씬, 개스킷 등)의 위험성 평가 및 재료에 관한 실증 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 FMEA를 활용하여 고압 수소 설비에 사용되는 비금속 부품의 라이너와 씬에 대한 위험요소를 도출한 후 심각도, 발생빈도, 검출도 등급을 점수로 환산하여 RPN값을 산정하였다. RPN의 최대값 600, 최소값 63, 평균값이 278.5로 산출되었으며, 라이너와 씬에 대한 주기적인 관리가 중요함을 확인하였다. 더불어 비금속 고무제품에 대한 수소침지와 산소노화시험을 통해 기초 자료로 활용 가능한 물리적 실험값을 제시하고자 하였다.

**주요어 :** 고장모드영향분석, 위험우선순위, 수소침지시험, 산소노화도시험

**Abstract -** According to South Korea's policy of supplying eco-friendly hydrogen vehicles, related industries are actively conducting research on the development of hydrogen cars and hydrogen charging station infrastructure. On the other hand, there is a lack of empirical research and assessment of the risk of non-metallic materials (such as liners, seals, gaskets) for classified materials that directly affect the durability and reliability of hydrogen vehicles and hydrogen charging stations. In this study, the risk factors for liners and seals of non-metallic parts used in high-pressure hydrogen installations were derived using FMEA, and the RPN values were calculated by converting the severity, frequency of occurrence and degree of detection into scores. The maximum value of the RPN 600, minimum value 63, average value 278.5 was calculated and periodic control of the liner and seal was identified as important. In addition, through hydrogen soakage and oxygen aging tests for non-metallic rubber products, physical test values that can be used as basic data were presented.

**Key words :** FMEA(Failure Mode Effect and Analysis), RPN(Risk Priority Number), Hydrogen Soakage Test, Oxidative Aging Test

†To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-2-970-6620 E-mail: lhkim@seoultech.ac.kr

### 1. 서론

국내 친환경 수소차 보급 정책에 따라 수소차 설계 및 충전소 인프라 개발에 대한 관련 업계의

연구가 활발하지만, 수소차와 수소충전소의 내구성 및 신뢰성에 직접적인 영향을 주는 기밀용 비금속 소재(라이너, 씰 등)에 대한 위험성 및 성능 평가에 관한 연구개발은 매우 부족한 실정이다.

**Table 1.** Potential Failure Mode for Liner & Seal

구분	잠재적 고장 모드
Liner	보스연결부 불량에 의한 가스누출, 폭발
	보스연결부 불량에 의한 단순 가스누출
	보스연결부 불량에 의한 보스부 이탈, 가스누출
	보스부 노화에 의한 가스누출, 폭발
	보스부 노화에 의한 단순 가스누출
	보스부 노화에 의한 보스부 이탈, 가스누출
	라이너 찢김으로 가스누출, 폭발
	라이너 찢김으로 단순 가스누출
	라이너 찢김 발생 사고 미발생
	라이너 가스투과에 의한 가스누출, 폭발
	라이너 가스투과에 의한 가스누출, 폭발 미발생
	라이너 가스투과에 의한 라인 들뜸, 사고 미발생
	라이너와 수소가스의 결합에 부피팽창 라이너 약화, 폭발
	라이너와 수소가스의 결합에 부피팽창 라이너 약화, 가스누출
	라이너와 수소가스의 결합에 부피팽창 라이너 약화, 사고 미발생
	라이너와 수소가스와의 추출에 의한 라이너 약화, 폭발
	라이너와 수소가스와의 추출에 의한 라이너 약화, 가스누출
	라이너와 수소가스와의 추출에 의한 라이너 약화, 사고 미발생
Seal	씰의 고압 반복마모에 의한 씰 손상, 가스누출 폭발
	씰의 고압 반복마모에 의한 씰 손상, 단순 가스누출
	씰의 고압 반복마모에 의한 씰 손상, 사고 미발생
	씰의 고압 하중에 의한 씰손상, 가스누출 폭발
	씰의 고압 하중에 의한 씰손상, 단순 가스누출
	씰의 고압 하중에 의한 씰손상, 가스누출 사고 미발생
	씰과 수소가스 결합에 의한 부피팽창에 의한 폭발
	씰과 수소가스 결합에 의한 부피팽창에 의한 가스누출
	씰과 수소가스 결합에 의한 부피팽창에 의한 사고 미발생
	씰과 수소가스와의 추출에 의한 씰 약화, 폭발
	씰과 수소가스와의 추출에 의한 씰 약화, 가스누출
	씰과 수소가스와의 추출에 의한 씰 약화, 사고 미발생
	씰내 이물질에 의한 기밀성능 저하, 가스폭발
	씰내 이물질에 의한 기밀성능 저하, 가스누출
	씰내 이물질에 의한 기밀성능 저하, 사고 미발생
	씰 이탈에 의한 씰손상, 가스누출 폭발
	씰 이탈에 의한 씰손상, 단순 가스누출
	씰 이탈에 의한 씰손상, 사고 미발생
	씰 경화에 의한 씰손상, 가스누출 폭발
	씰 경화에 의한 씰손상, 단순 가스누출
씰 경화에 의한 씰손상, 사고 미발생	

각종 고압가스관련 설비 내부에 사용되는 씰링용 비금속제품은 가스의 누출을 차단하고 안전 확보를 위해 필수적인 부속품이지만 아직 해외 수입제품에 많은 부분을 의존하고 있다. 특히 70 MPa 이상의 고압의 조건에서 잦은 충방전시 수축·팽창 및 가혹한 온도변화(-45~85℃)로 고무부품의 기밀 유지 기능이 상실되어 가스 누출이 발생할 수 있다.[1] 이는 최근 국내외에서 발생한 강릉 수소탱크 및 노르웨이 수소충전소 폭발과 같은 대형 인명 사고가 발생할 수 있어 구체적인 위험성 평가와 관리 노력이 필요하다. 따라서, 이번 연구는 최근 5년간 발생한 가스제품의 누출 사고원인을 분석한 결과 비금속 재료인 고무제품(라이너, 씰, 가스켓 등)의 결합에 의한 사고가 발생할 수 있다고 판단되어 연구를 수행하게 되었다. 이에 초기 부품의 설치와 관리에 적합한 위험성 평가 방법인 FMEA(고장모드 영향분석)를 실시하고 수소 시설에 사용되는 비금속 고무제품에 대한 수소 침지 시험을 통한 질량 및 부피의 변화율, 산소노화시험을 통한 인장강도, 연신율, 경도 등 물리적 실험값을 제시하고자 하였다.

## 2. FMEA 평가 수행

### 2-1. FMEA 수행을 위한 잠재적 고장 모드 및 원인 분석

한국가스안전공사의 최근 5년간의 가스사고연감 통계 현황을 분석한 결과 전체사고 102건중 33건의 사고가 가스 누출에 의한 사고로 나타났으며, 가스

**Table 2.** Potential Causes of Failure for Liner & Seal

구분	잠재적 고장 원인
Liner	용기, 보스간 장착시 손상
	불량제품 사용
	중고수소용기 재사용(노후)
	제품 노후
	용기 라이너 불량
	설치시 라이너 손상
	라이너 재료 불량
Seal	씰 재료 및 가공불량
	씰 노후
	제품 토크 부족 등 설치 불량
	중고부품 재사용
	유분 등 불순물 유입

누출 예방을 위한 각종 가스관련 설비 내부에 사용되는 비금속 씰 및 라이너에 대한 중요성이 부각되었다. 이에 제품 개발의 초기 단계에서부터 제품에서 발생할 수 있는 잠재적 고장 모드를 선별하고 고장모드의 영향과 원인을 분석하여 제품에 치명적인 영향을 미치는 고장 모드를 선별하기 위해 위험성 평가 방법인 FMEA를 사용하였다.[2] 고압의 수소 설비에 사용되는 비금속 부품중 Table 1과 같이 라이너(Liner)와 씰(Seal)에 대한 잠재적 고장 모드(Potential Failure Mode)에 대해 다음과 같이 도출하였다.

Table 2는 사고 사례와 현장 경험을 바탕으로 라이너와 씰에 대한 잠재적 고장원인을 도출하였다.

### 2-2. FMEA 수행을 위한 위험등급 산정

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)기법은 귀납적 분석방법으로 대표적인 정성적인 위험성 분석기법으로 알려져 있다. 특히 결합과 다음 상위 수준의 기능적 제품에 미치는 영향과 메커니즘을 연구하는데 적합한 기법이다. 분석방법으로는 대상 시스템의 분석을 통하여 의미 있는 부품들로 나누어 고장 형태를 예측하고 고장원인 및 영향에 대하여 검토하여 심각도, 발생빈도, 검출도를 각각 분석하고 위험우선순위(RPN:Risk Priority Number)를 결정한다. RPN 값을 결정하기 위하여 본 연구에서는 10등급을 사용하였다.[3]

Table 3과 같이 심각도(Severity)는 물적·인적 피해 정도를 고려하여 10등급을 부여하였다.

Table 4와 같이 발생빈도(Occurrence)는 국내법규에서 적용중인 자동차 용기 및 부품 설계주기인 15년을 동일하게 적용하여 10등급을 부여하였다.

**Table 3.** Severity Rating for FMEA

등급	S (Severity rating)
1	물적, 인적 피해 전혀 없음
2	물적, 인적 피해 없으나 민원 발생
3	경미한 물적피해, 피해자 없음
4	경미한 물적피해, 탑승자 피해 경미
5	중간 물적피해, 탑승자 피해 경미
6	심각한 물적피해, 탑승자 피해 경미
7	심각한 물적피해, 탑승자 중상
8	심각한 물적피해, 탑승자 및 주변인 중상
9	심각한 물적피해, 탑승자 사망 및 주변인 사상
10	심각한 물적피해, 탑승자 및 주변인 사망

**Table 4.** Occurrence Rating for FMEA

등급	O (Occurrence rating)
1	설계수명내 발생가능성 없음(15년)
2	설계수명 전후 발생(15년 내외), 제품노후
3	보증기간을 초과할 경우 발생(5년~15년), 중고제품 사용(용기)
4	5년내 1회 이상 발생, 불량제품(비인증품) 사용, 부품용 쉴 노후
5	3년내 1회 이상 발생, 사용자 및 설치자 작업 미숙
6	년 1회이상 발생, 노후제품 재사용
7	6개월내 1회 이상 발생
8	3개월내 1회 이상 발생
9	단기간내 자주 발생(1개월 전후)
10	수명과 관계없이 운행동안 수차례 발생

**Table 5.** Detection Rating for FMEA

등급	D (Dectection rating)
1	고장후 즉시 감지
2	고장후 단기간내 감지(0~1시간)
3	고장후 1일내 감지
4	고장후 1주일내 감지
5	고장후 장기간 감지 불가(1개월 전후)
6	고장후 장기간 감지불가(3개월 전후)
7	고장후 장기간 감지 불가(6개월 전후)
8	고장후 장기간 감지 불가(1년 전후)
9	고장후 용기검사전까지 감지 불가(5년)
10	고장후 사고전까지 감지 불가

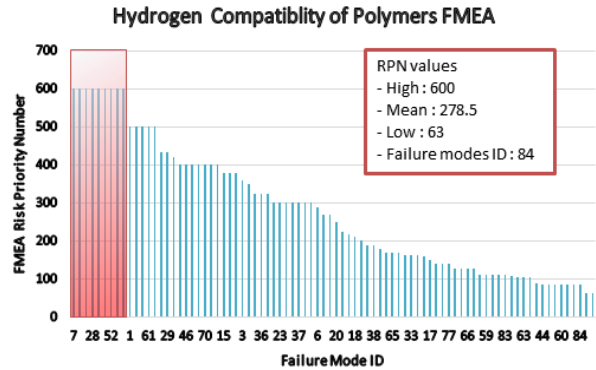
Table 5에서 검출도(Detection)는 고장 후 단기간내(1시간) 감지 여부를 고려하여 등급을 부여하였다.

고장영향모드분석은 위에서 제시한 변수별 등급표를 활용하여 심각도, 발생빈도, 검출도 등급을 점수로 환산하여 RPN값을 산정하였다.

RPN(Risk Priority Number)은 심각도, 발생빈도, 검출도 값의 곱으로 표현된다.[4]

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection$$

- Severity:심각도
- Occurrence:발생도
- Detection:검출도



**Fig. 1.** FMEA Risk Priority Number

Fig. 1의 비금속 부품의 라이너와 쉴에 대한 FMEA 위험성 평가는 잠재적 고장 모드는 84개로 분류하였으며 RPN 최대값은 600, 최소값은 63, 평균값은 278.5로 나타났다. 평균값이 의미하는 수치는 쉴 재료 및 가공 불량으로 폭발에 의한 심각한 물적피해 및 사망자를 발생시킬 수 있으며, 사고 발생 전까지 검출이 불가능한 수치를 의미한다.

### 3. 실험 방법

#### 3-1. 시험편 제작

##### 3-1-1 질량 및 부피 변화율 시험편

시험편은 질량, 부피 변화 시험 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 Table 6과 같이 수소 설비에 사용되고 있는 수소제품의 비금속 재료를 통하여 질량 및 부피 변화를 관찰하였다.

##### 3-1-2 인장강도 및 연신율, 경도변화 시험편

인장강도 및 연신율, 경도 변화를 관찰하기 위해 『KS M 6518:2018 가황 고무 물리 시험방법』에서 규정한 아령형 2호 시험편을 사용하였다.

시험에 사용된 시험편의 형상은 Table 7과 같이 제작하였다.

#### 3-2. 비금속재료의 수소 침지 시험

고압의 수소 시설에 내가스성 비금속제품이 다방면으로 사용됨에 실제 사용 환경에서의 각종 고무 부품의 변화는 가스 누출에 매우 큰 영향을 미친다. 이에 고압(70 MPa)의 수소에 72시간 노출시킨 후 노출전 상태와의 물리적인 변화값을 측정하여 내구성 등을 비교하는 시험으로 『KS M 6518:2018 가황 고무 물리 시험방법』중 13 침지시험방법에 따라 질량 변화율, 부피 변화율, 인장강도 변화율, 연신율 및 경도 변화율 측정하였다. 각각의 시험

**Table 6.** Rubber Specimen used in Hydrogen Facilities

No.	재질	사용-용도
1	PTFE (polytetrafluoroethylene)	Guide
2	EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer)	O-Ring
3	PTFE (polytetrafluoroethylene)	Seal
4	PEEK (Poly Ether Ether Ketone)	Gasket
5	EPDM	O-Ring
6	PAI (Polyamideimide)	Seal
7	TEFLON	Filter
8	EPDM	line seal
9	T-ECOPUR	Seal
10	EPDM	O-Ring
11	EPDM	O-Ring
12	EPDM	O-Ring
13	EPDM	O-Ring
14	PAI	Seal
15	POM (Polyoxymethylen)	Nozzle, Receptacle

**Table 7.** Dumbbell-Shaped Specimens



은 3개 시험편을 측정하여 평균값으로 결과를 처리하였다. Fig. 2의 시험장비는 질량·부피변화율을 측정하기 위해 고성능저울과 수소충전용 시험장치, 항온·항습 챔버를 사용하였고, 시험 전 공인교정기관의 교정을 받았다.[5][6][7]

**3-2-1. 수소 침지후 질량변화율 측정**

수소 설비에 사용되는 비금속재료 시편을 공기 중 질량( $W_1$ )을 1 mg까지 측정한다. 시험편 3개를 고압용 실린더에 넣고 70 MPa의 수소가스를 채운 후 72시간 동안 상온의 항온항습 챔버에 보관하여 침지한다. 가스를 퍼지한 후 공기중 질량( $W_3$ )을 측정하여 질량변화율을 계산한다.

$$\Delta V = \frac{(W_3 - W_1)}{W_1} \times 100$$

여기에서,  $\Delta V$ : 질량 변화율(%)  
 $W_1$ : 침지 전의 질량(g)  
 $W_3$ : 침지 후의 질량(g)



**Fig. 2.** Hydrogen Soakage Test

**3-2-2 수소 침지후 부피변화율 측정**

부피변화율의 측정은 비금속재료 시편을 공기 중 질량( $W_1$ )과 수중의 질량( $W_2$ )을 측정한다. 시험편 3개를 고압용 실린더에 넣고 70 MPa의 수소가스를 채운 후 72시간 동안 상온의 항온항습 챔버에 보관하여 침지한다. 가스를 퍼지한 후 공기중 질량( $W_3$ )과 수중의 질량( $W_4$ )을 측정하여 부피변화율을 계산한다.

$$\Delta V = \frac{(W_3 - W_4) - (W_1 - W_2)}{(W_1 - W_2)} \times 100$$

여기에서,  $\Delta V$ : 부피 변화율(%)

$W_1$ : 침지 전의 공기중의 질량(g)

$W_2$ : 침지 전의 수중의 질량(g)

$W_3$ : 침지 후의 공기중의 질량(g)

$W_4$ : 침지 후의 수중의 질량(g)

**3-3. 산소 노화도 시험**

상온에서의 자연노화, 고온에서의 산화현상 등으로 고무가 점착, 경화, 연화, 균열 등으로 물성이 저하하게 되며, 고무에 대한 산소의 작용은 열로 촉진되어 고무 부품의 노화를 가속 시킬 수 있다. 이에 산소에 의한 노화 정도를 관찰하기 위해 Fig. 3과 같이 고무의 산소열화표준인 『ASTM D 572-04 Standard Test Method for Rubber-Deterioration by Heat and Oxygen』 과 수소비금속재료 시험방법인 『EU No. 406』 4.1.2 Ageing Test에 따라 2.0 MPa의 고압의 산소에 85 °C, 96시간을 노출시킨 후 노출전 상태와의 인장강도변화율, 연신율 및 경도변화율을 측정하여 물리적인 변화를 관찰하였다. 인장시험기는 고무만능시험기를 사용하였고, 경도시험기는 ASTM D 2440, KS M ISO 7619에 적합한 쇼어경도기를 사용하였고, 시험전 공인교정기관의 교정을 받았다.[8][9][10]



Fig. 3. Shore Durometer & Universal Testing Machine

**3-3-1. 산소 침지를 통한 인장강도, 인장응력, 경도 변화율**

$$P = [(A - O) / O] \times 100$$

P = percentage change in property

O = original value, and

A = value after aging

**4. 실험결과 및 고찰**

**4-1-1. 수소 침지 후 질량변화율**

Fig. 4는 수소 침지 후 질량변화율은 고무소재인 EPDM이 상대적으로 크게 나타났으며, 플라스틱소재인 PTFE와 PEEK가 비교적 변화율이 작게 나타났다. 유럽 CNG자동차부품 성능기준인 ECE R110의 질량변화율이 5% 이내, 북미 CNG자동차부품 성능기준인 CSA ANSI NGV 3.1의 질량변화율이 -10% ~ +30% 임을 감안할 때 성능이 양호한 것으로 보여진다.

**4-1-2. 수소 침지 후 부피변화율**

Fig. 5는 비금속소재의 부피변화율은 질량변화율에 비해 변화율이 높았다. 또한, EPDM이 다른 비금속재료에 비해 부피변화율의 증가가 상대적으로

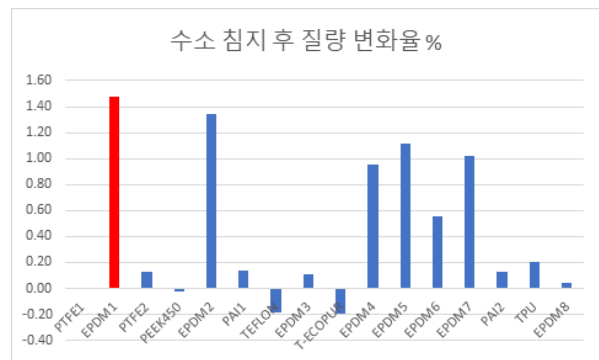


Fig. 4. Rate of Mass Variation of Rubber material

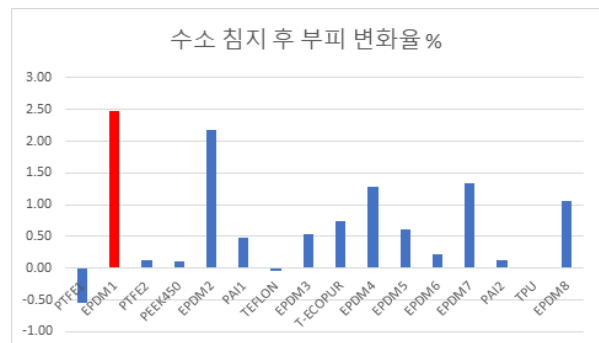


Fig. 5. Rate of Volume Variation of Rubber Material

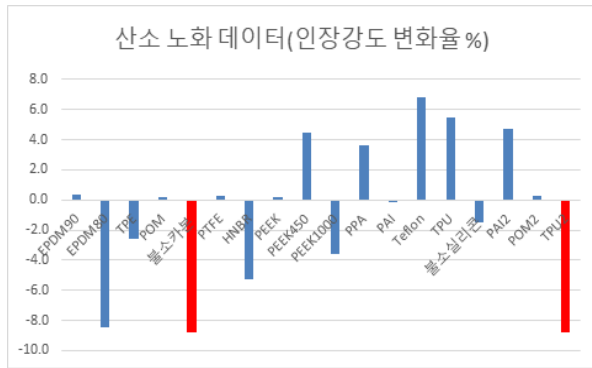


Fig. 6. Rate of Variation Tensile Strength of Rubber Material

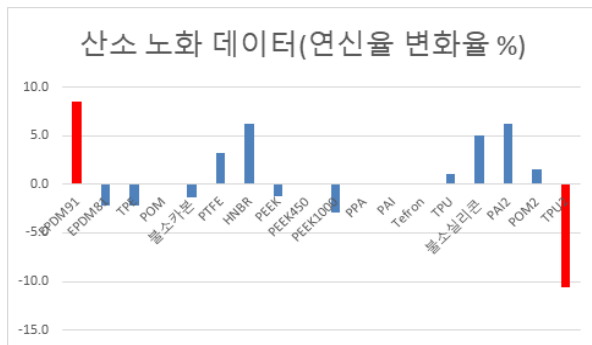


Fig. 7. Rate of Variation Elongation Rate of Rubber Material

로 크게 나타났다. TEFLON과 PEEK가 상대적으로 부피 변화율이 작아 수소에 안정적으로 나타났다. 유럽 CNG자동차부품 성능기준인 ECE R110의 부피변화율이 20% 이내, 북미 CNG자동차부품 성능기준인 CSA ANSI NGV 3.1의 부피변화율이 -15% ~ +35%임을 감안할 때 성능이 양호한 것으로 보여진다.

4-1-3. 산소 노화도 시험 후 인장강도 변화율

Fig. 6에서 산소 노화에 의한 인장강도의 변화율은 불소카본과 TPU(Thermo Poly Urethane:열가소성 폴리우레탄)에서 다른 비금속재료에 비해 강도저하가 상대적으로 높게 나타났다. 또한 각 시료는 산소 노화후 균열 등의 흠이 나타나지 않았다.

북미 수소자동차 성능기준인 CSA ANSI HG V 3.1의 산소노화 성능기준과 유럽 수소자동차 성능인증기준인 EU No. 406에 따른 흠집 및 균열은 보이지 않았다.

4-1-4. 산소 노화도 시험 후 연신율 변화율

Fig. 7과 같이 EPDM과 TPU 제품에서 연신율의



Fig. 8. Rate of Variation Hardness of Rubber Material

변화가 상대적으로 높게 나타났다.

4-1-5. 산소 노화도 시험 후 경도 변화율

Fig. 8은 비금속 제품의 산소 노화에 의한 경도 변화는 대부분의 비금속재료에서 발생되지 않았다. 다만 EPDM은 경도변화가 -1.1% 감소가 발생하였으나, 이는 전체 경도변화에 비교해 성능에 큰 영향을 없는 정도의 미미한 변화량으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 FMEA를 활용하여 고압의 수소 설비에 사용되는 비금속 부품의 라이너와 씬에 대한 위험요소를 도출한 후 심각도, 발생빈도, 검출도 등급을 점수로 환산하여 RPN값을 산정하였다. RPN의 최대값은 600, 최소값은 63, 평균값은 278.5로 나타났으며, 라이너와 씬의 재료 및 가공 불량시 폭발에 의한 심각한 물적 피해 및 사망자가 발생할 수 있으며, 사고 발생 전까지 검출이 불가능한 것으로 주기적인 관리가 중요함을 확인하였다. 또한, 비금속 고무제품에 대한 수소침지와 산소노화 시험을 통해 기초 자료로 활용 가능한 물리적 실험값을 제시하고자 하였다. 특히, 수소자동차와 수소충전소에 사용되고 있는 비금속재료인 EPDM, T-ECOPUR는 고압의 수소 가스상에서 질량과 부피 변화에 대한 적합성은 크게 변동이 없는 것으로 보여진다. 다만, 각각의 제조사마다 비금속재료의 제조시 사용되는 배합비율, 성형온도 및 성형시간에 따라 품질이 변동될 수 있어 연구에 사용된 모든 재료가 적합하다고 선언할 수는 없다. 이에 FMEA의 잠재적 고장원인 및 결과와 같이 수소차량 및 수소충전소에 사용되는 환경(반복적 동적마모에 대한 열화, 정적환경에 대한 비금속재료의 경화)과 수소의 작은 입자로 인한 비금속재료 투과성, 압축기 오일전이 등 수소가스의 불순물에 의한 물성 변화, 압력에 의한 파열, 반복사

용에 의한 마모 손상 등 다양한 시험방법을 통해 비금속 부품의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위한 지속적인 실증 연구가 필요하다. 더불어 수소산업의 발전을 위해 인프라 구축뿐만 아니라 제품개발에 대한 지원을 강화하고, 국내 인증기준 도입이 체계적으로 진행되어야 할 것이다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비와 국토교통부 교통물류연구사업(No.19TLRP-C152334-01) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. Choi, S. J., 2017, A Study on the Evaluation and Development of Rubber Sealing Materials for High-Pressure Hydrogen Gas, KGS, pp.1
2. Park, J. S., 2016, Failure Mode and Effects Analysis for Risk Management of Energy Storage System, Chungbuk University, Master Dissertation, pp.1
3. Oh, D. S., 2008, Study of the Status and Safety Assessment of Domestic and Foreign Hydrogen Station, Hoseo University, Master Dissertation, pp.22
4. Lee, D. H., 2007, A Study on Consequence Analysis and Safety of Hydrogen Station, Kwangwoon University, Master Dissertation, pp.17~18
5. KS M 6518:2018 Physical testing method for vulcanized rubber
6. Lee, S. W., 2016, A Study on the Life Prediction of EPDM for High-Pressure Hydrogen by the Accelerated Life Test, Seoul National University of Science and Technology, Ph. D. Dissertation, pp.52,57
7. Kim, W. J., 2009, A Study on Reliability Evaluation by Analysis of Deterioration Test and Accelerated Life Test for Gas Products, pp.14~47
8. Yamabe et al, Failure Behavior of Rubber O-ring under Cyclic Exposure to High-Pressure Hydrogen gas, Engineering Failure Analysis 2013.
9. KS M 6641:2006 rubber term
10. ASTM D572 - 04(2015) Standard Test Method for Rubber-Deterioration by Heat and Oxygen, ISO 1431-1:2012(en) Rubber, vulcanized or thermoplastic Resistance to ozone cracking, pp.1~2