



수송/저장용 수소 생산 확대를 위한 암모니아의 안전 위험 관리 표준 동향

주형국^{a,b}, 이혁주^{a,b}, 이창현^{a,b}, 봉성울^{c,*}

^a 단국대학교 과학기술대학 에너지공학과, ^b 단국대학교 청정 수소 및 암모니아 혁신연구센터, ^c 공주대학교 화학교육과

Safety risk management of ammonia to scale-up hydrogen production for transport and storage

HyungKuk Ju^{a,b}, Hyeokjoo Lee^{a,b}, Chang Hyun Lee^{a,b}, Sungyool Bong^{c,*}

^a Department of Energy Engineering, Dankook University, Cheonan 31116, South Korea

^b Clean Hydrogen and Ammonia Innovation Research Center, Dankook University, Cheonan 31116, South Korea

^c Department of Chemistry Education, Kongju National University, Kongju, Chungcheongnam-do 32588, Republic of Korea

(Received 27 November, 2023 ; revised 06 December, 2023 ; accepted 08 December, 2023)

Abstract

Ammonia, which is closely related to our lives, has a significant impact on our lives as a representative substance for crop cultivation. Recently, it has gained attention as an efficient and productive hydrogen/storing substance that can replace fossil fuels. Efforts are being made to utilize it as a renewable energy source through thermochemical and electrochemical reactions. However, the use of ammonia, which encompasses the era, carries inherent toxicity, so a comprehensive understanding of ammonia safety is necessary. To ensure safety in the transportation and storage of ammonia and chemical substances domestically and internationally, national and organizational standards are being developed and provided through documents and simple symbols to help people understand. This review explores the chemical characteristics of ammonia, its impact on human health, and the global trends in safety standards related to ammonia. Through this examination, the paper aims to contribute to the discourse on the safety and risk management of ammonia transport and storage, crucial for achieving carbon neutrality and expanding the hydrogen economy.

Keywords : Ammonia; Ammonia Certification; Hydrogen Storage; Safety; Risk assessment.

1. 서 론

암모니아는 오랫동안 순수 암모니아로서 사용한 화학물질이다. 수천년 전 인류가 농업을 위한 농작물 재배를 위해 질소화 분자 및 요소, 세척을 위한 물질로서 활용했던 시대부터, 18세기에 이르

러 유기체의 도움 없이 생산할 수 있는 물질로서 우리의 삶을 바꾼 대표적인 화학물질의 하나가 되었다. 암모니아의 발견은 영국 화학자인 Joseph Priestley에 의해 처음 분리 되었으며, 1785년에는 프랑스의 화학자 클로드 루이 베르톨레 (Claude Louis Berthollet)에 의해 확인할 수 있었다.[1] 또 다른 합성으로 코크스 오븐 가스 공정에서 암모니아를 회수할 수 있는 'Mond' 단지의 개발을 통하여 암모니아의 대량 합성을 위한 단초

*Corresponding Author : Sungyool Bong
Department of Chemistry Education, Kongju National University
E-mail: bongsy@kongju.ac.kr

가 마련되었다. 이 기술은 현재 암모니아의 가장 많은 합성 방법으로 활용하고 있는 하버-보슈 공정(Haber-Bosch Process)가 도입됨에 따라 주요 사용 방법에서 제외되었다.[2] 암모니아는 현재 전세계에서 두 번째로 많이 생산되고 있는 대표적인 화학 물질로써 현재 연간 2억3천만 톤이 생산되고 있다. 현재 약 180 Mt의 암모니아는 주로 천연가스를 원료로 이용하는 수증기 메탄 개질(SMR, steam methane reforming)을 통해 생산되며 암모니아의 연간 시장 가치는 미화로 약 700억 달러 수준이다. 현 산업 분야에서 비료 생산이 약 80% 수준으로 대부분을 차지하고 있으며, 폭발물(5%) 및 재료, 화학 제품 제조(15%)에 대한 응용 분야가 나머지를 차지하고 있다.[3]

최근에는 수소 저장물질로써 암모니아의 중요성이 더욱 높아지고 있다. 수소는 전기화학 분야에서 촉매전극표면에서 다양한 산화 및 환원 반응을 통한 기초 연구가 잘 정립되어 있으며, 이를 활용한 수소연료전지 및 수전해 기술은 재생에너지 전력 섹터 커플링(sector coupling)을 위한 중요한 기여 기술이다. 특히, 암모니아 분해(ammonia cracking)를 통한 수소 전환 공정 및 암모니아 전주기(생산, 저장, 이송, 활용 등) 과정에서 발생할 수 있는 다양한 잠재적 문제점에 대한 논의가 활발히 되고 있으며, 이에 따라 그 중요성은 날로 증대되고 있다. 최근 일본 히로시

마 대학의 Y. Kojima교수의 보고된 내용에 따르면[4], 암모니아, 액화 수소, 수소 가스 총 세 가지의 수소 에너지 저장체의 특성을 각각 표기하였다. 암모니아(H_2 밀도: 0.1 MPa 및 240 K에서 12.1 kg H_2 /100L)와 액체 수소(0.1 MPa 및 20 K에서 7.08 kg H_2 /100L)는 압력과 온도에 따라서 액체 보관이 가능하며, 수소 가스(1 MPa 및 298 K에서 0.0809 kg H_2 /100L)의 경우 상온에서 기체이기 때문에 부피 대비 수소 저장용량이 낮은 특징을 가지고 있다. 이 중 암모니아는 240 K에서 12.1kg H_2 /100L의 가장 높은 수소저장밀도를 가지고 있다. 암모니아 저장 탱크는 동일한 부피 에너지 밀도에서 수소 탱크의 값보다 두 배의 높은 가격을 형성하고 있으나, 중량 에너지 밀도는 수소 탱크와 유사하며, 상대적으로 높은 끓는점(0.1 MPa, 240 K)으로 암모니아의 장기 안정성 저장이 가능하다. 또한 수소 가스에서 암모니아 전환 비용은 수소의 액화 및 MCH(methylcyclohexane) 전환 비용 대비 저렴하므로 수소 에너지 저장체로서 그 활용도가 매우 적합할 것으로 보인다. 표1에서는 압축 및 액화 수소, 메탄올, 암모니아의 저장 특성을 타낸다.

암모니아 전기화학적 산화 반응인 암모니아 산화반응(Ammonia oxidation reaction, AOR)은 연료전지에 활용하는데 용이한 기술일 뿐만 아니라 효율성 높으면서도 다양한 활용처가 가능한 수

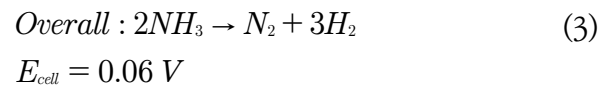
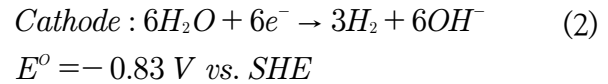
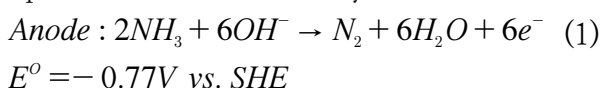
Table 1. Storage properties of compressed and liquefied hydrogen, methanol and ammonia.[5]

Properties	Compressed Hydrogen	Liquid Hydrogen	Methanol	Liquid Ammonia
Storage method	compression	Liquefaction	Ambient	Liquefaction
Temperature, °C	25	-253	25	25
Storage pressure, Mpa	69	0.1	0.1	0.99
Density, kg/m ³	39	70.8	792	600
Explosive limit in air, %vol.	4 - 75	4 - 75	6.7 - 36	15 - 28
Gravimetric energy density (LHV), MJ/kg	120	120	20.1	18.6
Volumetric energy density (LHV), MJ/L	4.5	8.49	15.8	12.7
Volumetric hydrogen content, kg H_2 /m ³	42.2	70.8	99	121
Gravimetric hydrogen content, wt%	100	100	12.5	17.8
Hydrogen release	Pressure release	Evaporation	Catalytic decomposition (T > 200°C)	Catalytic decomposition (T > 400°C)
Energy to extract hydrogen, KJ/mol- H_2	-	0.907	16.3	30.6

소 생성 방법이다. 물 전기분해는 이론적으로 매우 안정적인 물 분자를 전기분해하기 위해서 1.23 V 이상의 높은 과전압을 적용해야 하기 때문에 열역학적으로 선호되는 반응이 아닌데 반해 AOR 반응은 암모니아 산화를 통해 수소를 얻는데 상대적으로 용이하므로 미래 수소 생산 공정으로 활용 가능한 강력한 잠재력을 갖고 있다[6]. 한편으로는 폐수에서 암모니아를 처리하기 위해 전기분해를 사용하는 것은 다양한 관점에서 좋은 장점들을 가지고 있다. 기존의 박테리아 분해 방법보다 에너지 소비가 훨씬 적은 비용 효과적인 공정이며, 또한, 암모니아의 직접 산화가 일어나는 알칼리성 조건에서 가장 잘 작동한다는 것이다[7]. 산성 조건에서 평형은 암모늄 이온을 선호하나 전기 분해의 경우 염소화 반응과 비슷한 경로를 통해 암모늄 이온을 산화 시키는 산화제를 형성한다.[8] 알칼리성 조건의 AOR은 상대적으로 반응이 일어나기 쉽고 불활성이며 유해하지 않은 부산물을 만든다. 이 공정에서 생산된 수소는 공정을 수행하는데 필요한 에너지를 보충하기 위한 연료로도 활용 가능하다.[9]

암모니아 전기산화 반응 역학 및 메커니즘으로 수용액 전해질에서 암모니아의 전기화학적 산화는 암모니아가 전극에 흡착된 후 알칼리 조건에서 OH⁻ 이온에 의한 산화 또는 산성 조건에서 HOCl과 같은 산화제에 의한 간접 산화에 의한 암모늄 이온의 산화를 통해 진행되는 반응이다[10]. 알칼리성 조건에서는 평형상태에서 암모니아를 형성하는 것을, 산성 조건에서는 암모니아가 암모늄 이온으로 이온화하는 것을 선호한다. 전기부식은 산성 전해질에서 더 두드러지며, 간접 산화 경로도 효율을 낮출 수 있고,[11] 산성 전해질의 암모니아 산화반응(AOR)도 느린 것으로 나타났다.[12] 반면, 비수계 전해질의 AOR은 비수계 전해질보다 액체 암모니아의 에너지 밀도가 더 높고 물 산화와 관련된 문제가 없기 때문에 많은 잠재력을 갖고 있으나 아직까지 연구가 좀 더 필요한 실정이다.[13] 일반적으로 연구된 전해질 유형은 크게 세 가지 유형으로 나눌 수 있다: (i) 수성 알칼리성 전해질; (ii) 수성 산성 전해질, 및 (iii) 비수계 액체 암모니아 전해질. 이 중 수성 알칼리성 전해질에 대한 반응은 다음과 같다.

Aqueous Alkaline Electrolyte:



AOR 셀에서 알칼리 전해질의 양극 및 음극 반응은 암모니아와 수산화 이온(OH⁻)을 소비하여 질소, 물 및 전자를 생성하고(식 1), 물을 환원하여 수소 형성 및 OH⁻ 이온을 생성한다(식 2). 이는 0.06 V의 최소 셀 전압 요구 사항을 갖는 열역학적으로 유리한 반응이며, 수전해 전체 반응에 필요한 이론적 전압인 1.23 V보다 훨씬 낮으므로(식 3), 열역학적으로는 알칼리성 전해질을 사용하는 암모니아 전해반응은 수전해 반응에 비해 약 95% 낮은 에너지 소비량으로 작동 가능하다.[13,14]

앞에서 언급한 내용들로 인해 암모니아의 활용 중요성 및 수소에너지에 대한 집중은 날로 커져가고 있는 상황이다. 본 총설에서는 수소의 이동 수단으로 사용하고 있는 암모니아의 안전성 검토를 통해 산업에서 많은 비율을 차지하고 있는 암모니아의 활용성을 더욱 높일 수 있도록 알아보하고자 한다.

2. 본 론

2.1 암모니아 안전 관리

최근 암모니아 안전에 관한 관심은 지속적으로 커져가고 있으며, 안전한 화학물질 관리를 위해 현장에서는 라벨을 통한 관리가 이루어지고 있다. 관심에 따른 변화를 대응하기 위해 가장 대표적인 미국 시스템인 NFPA와 OSHA에서는 표2와 같이 관리를 하고 있으며, 규정에 따른 차이점을 나타낸다. 그림1은 미국화재예방협회에서 제시한 NFPA 704 Fire Diamond를 나타낸 그림이다.

형식의 4가지 요소인 NFPA 704는 1960년 미국 화재 예방 협회(National Fire Protection Association)에서 긴급 상황에서 최초 대응자를 돕는다는 목표로 만들어졌으며, 표지판 형식은 밝은 색상과 단순한 디자인을 사용하므로 NFPA 704 표지판을 쉽게 발견하고 읽을 수 있다. 그러나, 이는 매우 한정된 정보만을 제공하며, 이 표준은 그 자체로 법률이 아니기 때문에 일부 법적 당

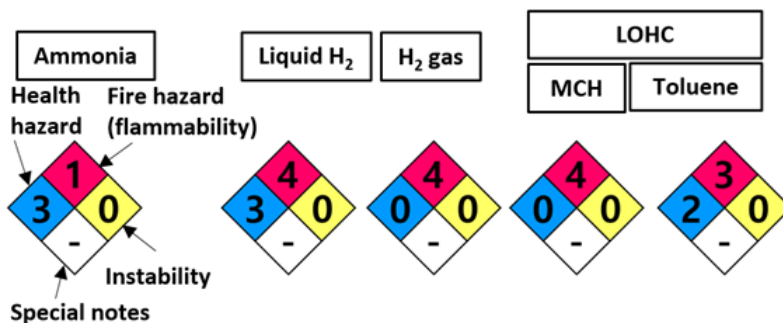




Fig. 1. Fire Diamond created for emergency situations by the National Fire Protection Association NFPA 704 standard. Blue means “level of health hazard,” red means “flammability,” yellow means “(chemical) reactivity,” and white means a code that provides information about other hazards. Each category ranges from 0 (not dangerous) to 4 Divided into 4 levels (very dangerous)

국이 이를 요구하기로 선택한 경우에만 필수이다. 또한, 미국에서는 OSHA가 작업장 안전을 규제한다. 그러나, 시간이 지남에 따라 기관은 작업자가 노출된 화학적 위험에 대해 단순히 모르기 때문에 많은 안전 문제가 발생하고 있음을 인식하게 되었고, 1994년에 OSHA는 이러한 위험에 대해 소통하기 위한 일련의 규칙을 만들었다. 이 규칙은 각

근로자가 작업장의 위험에 대해 알 권리가 있다는 생각을 반영하였으므로, 종종 "알 권리" 또는 RTK라고 한다. 2012년에 OSHA는 이러한 RTK 규칙을 세계 조화 시스템(GHS)이라는 국제 표준 요소를 통합하는 새로운 요구 사항 세트에 대체하였으며, 위험 소통(Hazard Communication)에 대한 이러한 업데이트된 규칙은 HazCom 2012라고

Table 2. Table between NFPA 704 and HazCom 2012 (<https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3678>, ¹⁾ OSHA New Quick Card)

	 NFPA 704	 HazCom 2012 ¹⁾
Purpose	Provides basic information for emergency personnel responding to a fire or spill and those planning for emergency response.	Informs workers about the hazards of chemicals in workplace under normal conditions of use and foreseeable emergencies.
Number System: NFPA Rating and OSHA's Classification System	0-4 0-least hazardous 4-most hazardous	1-4 1-most severe hazard 4-least severe hazard • The Hazard category numbers are NOT required to be on labels but are required on SDSs in Section 2. • Numbers are used to CLADDDIFY hazards to determine what label information is required.
Information Provided on Label	<ul style="list-style-type: none"> • Health-Blue • Flammability-Red • Instability-Yellow • Special Hazard*-White *OX Oxidizers W Water Reactives SA Simple Asphyxiants 	<ul style="list-style-type: none"> • Product Identifier • Signal Word • Hazard Statement(s) • Pictogram(s) • Precautionary statement(s); and • Name address and phone number of responsible party.
Health Hazards on label	Acute (short term) health hazards ONLY. Acute hazards are more typical for emergency response applications. Chronic health effects are not covered by NFPA 704.	Acute (short term) and chronic (long term) health hazards. Both acute and chronic health effects are relevant for employees working with chemicals day after day. Health hazards include acute hazards such as eye irritants, simple asphyxiants and skin corrosives as well as chronic hazards such as carcinogens.
Flammability Physical Hazards on Label	NFPA divides flammability and instability hazards into two separate numbers on the label. Flammability in red section Instability in yellow section	A broad range of physical hazard classes are listed on the label including explosives, flammables, oxidizers, reactives, pyrophroics, combustible dusts and corrosives.
Where to get information to place on label	Rating system found in NFPA Fire Protection Guide to Hazardous Materials OR NFPA 704 Standard System for Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response 2012 Edition. Tables 5.2, 6.2, 7.2 and Chapter 8 of NFPA 704	OSHA Hazard Communication Standard 29 CFR 1910.1200 (2012). 1) Classify using Appendix A (Health Hazards) and Appendix B (Physical Hazards) 2) Label using Appendix C
Other	The hazard category numbers found in section 2 of the HC2012 compliant SDSs are NOT to be used to fill in the NFPA 704 diamond.	Supplemental information may also appear on the label such as any hazards not otherwise classified, and directions for use.
website	www.nfpa.org/704	www.osha.gov OR www.osha.gov/dsg/hazcom/index.html

명명하였다.

2.2 암모니아의 위험성

암모니아의 방사선, 화학 및 기술 경제적 과제에 대한 PHE(Protection Health England) 센터의 일부 핵심 사항에 따르면 암모니아는 다음과 같은 특성을 나타낸다.[15]

1. 건강

- 흡입할 경우 자극(눈, 코, 목)을 유발하여 기침, 가슴 답답함, 두통, 발열, 어지러움을 유발 할 수 있다. 또한, 폐부종 발생도 가능하다.
- 섭취하면 즉시 입과 소화기관에 화상을 입힐 수 있으며, 복통, 구토, 토혈 및 호흡곤란이 발생한다. 심한 경우 쇼크와 기도 폐쇄 현상이 나타날 수 있다.
- 피부에 노출되면 심부 전체에 화상을 입을 수 있다.
- 눈에 노출되면 시력을 잃을 수도 있는 회복 불가능한 손상이 발생할 수 있다.

2. 화재

- 가연성이며 대부분의 유기 및 무기 화합물과 반

응한다.

- 가열하여 분해되면 암모니아와 질소산화물 등의 독성 연기를 방출하여 위험을 야기한다.

암모니아의 노출은 각 농도에 따라 특성을 나타낸다. 5 ppm 이상의 농도에서 쉽게 검출되는 암모니아는 소금 냄새처럼 자극적이고 질식하는 냄새가 난다. 냄새는 50 ppm 이상일 때 인체에 해를 가할 가능성이 높다. 암모니아의 인체 노출 한계는 표준화되어 있으며 그 값은 법률 및 노출 시간에 따라 달라진다. 미국 산업위생협회, 미국 환경보호청, 영국 보건안전청(HSE, UK) 및 PHE의 지침이 표 3~6 및 그림 2에 나열되어 있다. 일부는 비상 대응용이고 일부는 직업 현장에서 활용 가능한 표준이다. 흥미로운 점은 각 표준 및 조건에 따라 기준점 및 한계가 다양하므로 상황에 맞는 조건 선택이 중요하다. 따라서, 암모니아가 사용되는 장소의 법률에 따라 해당 조건을 판단해야 하며 각 나라별 조건에 대하여 유심히 살펴보는 것이 중요하다. 그러나, 15분 이후 30 ppm을 초과하여 노출되면 건강에 장기적인 문제가 발생하기 시작한다는 점을 알아두는 것이 중요하며, 암모니아 안전을 위한 세심한 주의가 필요하다.

갑작스러운 유출이나 사고가 발생했을 때 대응하

Table 3. Emergency Response Plan Guidelines Values (ERPG)

Classification	Value (ppm)	Calculated Value (mg/m ³)
ERPG-1	25	18
ERPG-2	150	105
ERPG-3	1500	1050

ERPG-1, Airborne concentration at which most individuals could be exposed for up to 1 hour without experiencing other than mild transient adverse effects.

ERPG-2, Airborne concentration at which most individuals could be exposed for up to 1 hour without experiencing or developing irreversible or serious effects that could impair an individual's ability to take protective action.

ERPG-3, Airborne concentration at which most individuals could be exposed for up to 1 hour without experiencing life-threatening health effects.

Table 4. U.S. Environmental Protection Agency guidelines [16]

AMMONIA 7664-41-7 (FINAL) EXPRESSED IN PPM					
	10 min	30 min	60 min	4 hr	8 hr
AEGL-1	30	30	30	30	30
AEGL-2	220	220	160	110	110
AEGL-3	2700	1600	1100	550	390

AEGL-1, Airborne concentration level at which individuals could experience notable discomfort, irritation, or certain asymptomatic, non-sensory effects. However, the effects are not disabling and are transient and reversible.

AEGL-2, Airborne concentration level at which individuals could experience irreversible or other serious, long-lasting adverse health effects or an impaired ability to escape.

AEGL-3, Airborne concentration level at which individuals could experience life-threatening health effects or death.

Table 5. Occupational Standards (UK)

Workplace exposure limit (WEL)	LONG-TERM EXPOSURE LIMIT (LTEL:8HRS)		SHORT-TERM EXPOSURE LIMIT (STEL:15 MINS)	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
	25	18	35	25

Table 6. Public health guidelines (England/Wales)

Drinking water standard	0.5 mg/L (as NH ₄)
Air quality standard	No guideline
Soil and health criteria values	No guideline

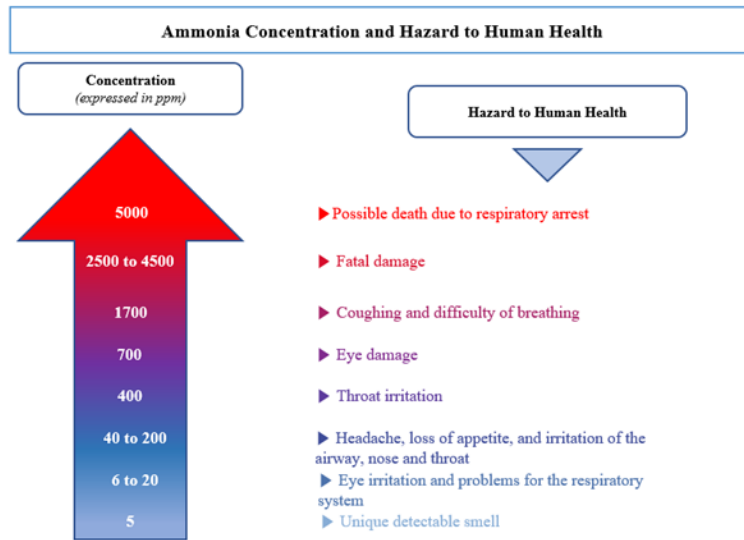


Fig. 2. Health effects of ammonia concentration

기 위한 비상 계획을 적절하게 설계하려면 사고에 대한 임계 상황을 이해하는 것이 무엇보다 중요하다. 암모니아가 사람, 동물 및 인프라에 사고사 영향을 주는 요소에 대한 과거에 발생한 사건의 일부 데이터가 존재하기는 하나, 사고에 대한 검토를 통한 경우 적절한 절차를 따르고 비상 시 계획된 프로그램이 적절하게 확립이 된다면 암모니아가 유사시에도 안전하다는 것을 시사한다. 보고된 논문에 따르면 암모니아는 5000 ~ 10,000 ppm에서 5분 내에 치명적으로 알려져 있으나, 1973년 남아프리카에서 발생한 33,370 ppm의 고농도 암모니아가 유출되었음에도 불구하고 5분 동안에 사망자가 없었던 불행 중 다행인 사고가 있었다.[17] 해당 사고에서 발생한 농도의 암모니아는 인체에 회복 불가능한 손상을 일으킬 수 있었으나, 훌륭한 대처에 따라 더 큰 사고를 방지할 수 있었다. 1999년 Michaels가 보고한 논문에서 [17] 암모니아 흡입에 대한 4가지 인간 치사량(예: 5000~10,000 ppm, 5~10분; 15,000 ppm, 5분; 5000 ppm, 180분, 330,000 ppm, 즉시)의 진행 경로 분석을 위한 내용을 연구하였다. 그 중 한 사례(180분)에서는 직원이 응급처치실에 보고하여 치료를 받으라는 지시를 받았으나 따르지 않고 커피를 마시러 갔으며 6시간 후에 병원에서 사망하였다. 그러나 Michaels는 위험 허용 가능성은 주관적인 판단이며 과학적 근거를 통해 알 수는 있지만 과학적으로 정의할 수는 없다는 점을

인식하였다. 예를 들어 표 3의 ERPG-3 값은 노출량과 노출 기간의 곱이 일정하다는 점을 고려하면 5분 값 12,000 ppm과 동일하다($C_n(t) \frac{1}{4}$ 상수, 하버의 법칙[18]). 이를 Berge adjustment analysis을 사용하면 3464 ppm 값을 나타냈다 [19]. 사고에서 노출된 값은 인간에게 치명적이라도 임계값은 정량화되지 않은 안전 계수로 설정할 수 있으나, 앞서 언급한대로 치명도는 각자의 위험 노출 상황에 따라 달라질 수 있다. 따라서 현행 법에 정의된 노출 수준이 안전한 취급 및 대피를 보장하기 위해 부상 및 사망을 유발하는 데 필요한 수준보다 낮더라도 각 개인이 서로 다른 허용 오차를 나타낼 수 있다는 점을 염두에 두고 암모니아에 대해 이해하면서 취급해야 한다.

암모니아의 밀도는 약 $0.7 \text{ kgm}^{-3}@20^\circ\text{C}$ 이며, 공기의 밀도인 $1.20 \text{ kgm}^{-3}@20^\circ\text{C}$ 보다 약 0.6배 가볍기 때문에 대기중에 확산 시 농도는 낮아지면서 누출량은 빠르게 증가한다. 이러한 특성은 가스 확산에서 발생하는 상호 작용을 줄이는 효과가 있으나, 예측하기 어려운 분산 모델로 나타난다. 더 큰 문제는 암모니아가 액체 형태로 유출될 때 매우 급격하게 기화되면서 850배 이상의 부피 팽창이 발생하므로 가스에 대한 위험과 함께 에어로졸 구름의 형태를 통해 나타나는 섬광 현상을 유발하기도 한다. 이 현상은 에어로졸이 증발하면서 온도 감소로 인해 발생하며, 기체 흐름과 반응하는 차가운 물방울로 인해 위험도가 증가한다[20].

에어로졸 구름의 문제는 공기의 이동을 통해 이 구름을 인구 밀집 지역으로 나날 수 있고 건물 사이사이에 발생하는 크고 작은 규모의 공기 이동으로 인해 암모니아가 더 쉽게 퍼질 수 있다는 데 그 문제가 있다[21]. 특히, 외부 작업장에서 날씨 상황에 따라, 위험도가 결정되기도 하는데 건조하고 바람이 많이 부는 따뜻한 날씨는 습하고 시원하며 바람이 약한 조건보다 더 빠르게 암모니아를 대기 중으로 확산시킬 수 있다[22]. 다양한 형태의 식물과 나무는 난류 생성으로 인해 시뮬레이션 분산 모델에서 중요한 매개변수가 될 수 있으므로 암모니아 누출 연구와 복잡한 경로에 걸친 분포에 매우 중요한 역할을 담당한다[23]. 이 효과는 암모니아 구름과 그 분산 패턴을 이해하는 것뿐만 아니라 난류와 복잡한 장애물이 폭발 시나리오의 가능성을 증가시킬 수 있으므로 암모니아수소 혼합물에서 고려해야 할 매개변수로서 특히 중요하다[24]. 또한, 사고 중에 방출된 액체 암모니아는 또 다른 위험을 초래한다. 위에서 서술하였듯이 특히 액화 암모니아가 기화될 경우는 약 850:1의 팽창 비율을 가지므로 넓은 지역을 빠르게 덮는다[25]. 이러한 방출에는 에어로졸 단계(작은 물방울 포함)도 예외가 될 수 없다. 이러한 조건에서 암모니아는 매우 차갑기 때문에 처음에는 액체 방울이 있는 밀도가 높은 가스로 작용하여 수직 혼합을 억제하고 가스가 따뜻해지기 전에 지면에서 이동할 수 있게 한다. 더욱이 암모니아는 공기 중 수분을 흡수하기 시작하여 촉촉하고 눈에 보이는 흰색 구름을 생성하므로 암모니아 사용의 위험성을 완전히 이해하려면 이러한 고려 사항도 고려해야 한다.

2.3 암모니아 국내 관리

국내에서는 수소 안전관리 로드맵 2.0에 따르면, 수소 승용차 및 연료전지 중심의 수소산업 육성을 위해 수소 산업 초기 핵심설비인 수소차충전소 및 연료전지 안전관리 강화를 목표로 발표하였다 (2023.05.09 산업통상자원부). 내용에 따르면 암모니아 (열분해·촉매·광분해) 기반 수소 추출설비는 안전기준 기술 개발 및 운송을 위한 발전용 대용량 및 선박충전 안전기준 마련을 정책에 포함하

여 대용량, 장거리 암모니아 운송/충전에 대한 안전성 검증 및 안전 기준 마련에 대하여 정책을 수립하고 있다. 이에 앞서 2022년에는 ‘수소기술 미래 전략’ 관계부처 합동 정책보고서를 통해 수소 및 암모니아의 저장, 운송 기술 고도화를 위한 목표를 발표하였다. 2028년경에는 대륙간 수소 교역이 본격적으로 진행될 것으로 예상되며, 고밀도로 운반할 수 있는 수소 저장 및 운송기술을 개발하여 해외 수소 도입 시 경제성 확보를 목표로 하고 있으므로, 암모니아의 역할뿐만 아니라 위험성을 관리하는 것은 무엇보다 중요하다. 암모니아는 물질안전보건자료를 각 공급업체가 산업안전보건법 제41조에 의거, 제공하게 된다. 제공된 자료에는 표7과 같은 다음 정보들을 포함하고 있다.

이중 8번 (노출방지 및 개인보호구 항목에서 암모니아 (Anhydrous)의 국내 규정은 TWA(가중평균시간): 25 ppm, 18 mg/m³, STEL(단기간 노출제한): 35 ppm, 27 mg/m³으로 나타내고 있다. 허용 기준 준수를 위해 일반 배수환기시설이나 국소 배출환기 시설 설치 및 분진, 증기의 폭발농도가 존재하면 환기시설은 방폭구조를 갖춰야 한다고 설명하고 있다. 이를 통한 암모니아의 위험도 및 안전에 관한 관리가 무엇보다 필수적이다.

암모니아는 하버-보슈 공정이 정립된 이후 인류가 100여년 이상 상업적으로 안정적이며, 효과적으로 다루어 온 화학물질이다. 하지만, 최근 암모니아의 활용처가 재생에너지 수소 저장물질부터 암모니아를 활용한 수소 전환/생산 그리고 암모니아를 직접 활용한 직접 암모니아 연료전지 그리고 연소 및 가스터빈 등의 적용 연구개발이 다각도로 진행되고 있다.[26] 이러한 관점에서 미국과 호주 주도의 ‘암모니아 에너지 협회(AEA; ammonia energy association)’는 2004년 설립되어 지속 가능한 에너지 경제에서의 적절한 암모니아 사용을 촉진하기 위해서 암모니아 전주기 관련 국제 인증제 제정을 위해서 프로젝트를 추진하고 있다. 또한, 일본의 ‘청정 연료 암모니아 협회(CFAA; clean fuel ammonia association)’는 암모니아는 재생 에너지를 저장하고 운송하는데 가장 효과적인 에너지 운반체로 확정하고 공공-민간 협의회를 설립하였다. 국내에서도 산업통상자원부 설립허가를 통해서 한국에너지기술연구원 주도의

Table 7. Material safety data sheet (MSDS)

1. 화학제품과 회사에 관한 정보	2. 유해 위험성	3. 구성성분의 명칭 및 함유량
4. 응급조치 요령	5. 폭발 및 화재시 대처 방법	6. 누출사고시 대처방법
7. 취급 및 저장방법	8. 노출방지 및 개인 보호구	9. 물리·화학적 특성
10. 안정성 및 반응성	11. 독성에 관한 정보	12. 환경에 미치는 영향
13. 폐기시 주의 사항	14. 운송에 필요한 정보	15. 법적 규제현황

‘청정 암모니아 협의회(CAA; clean ammonia association)’가 암모니아 기반 해외 수소도입 및 저탄소 사회를 위한 무탄소 연료 활용의 성공적인 추진을 위해 출범하였다. 따라서 미래 청정 에너지 암모니아 활용을 통한 탄소중립 수소경제의 매개체 혹은 친환경 암모니아 연료 시대로 도래하기 위해서는 국제적으로 인정받을 수 있는 암모니아 표준 안정성 및 관리에 대한 법 체계화가 긴밀하게 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

3. 결 론

본 총설에서는 수소의 효율적인 저장 및 이송을 위한 암모니아의 위험성에 관한 내용들을 정리하였다. 암모니아는 수소의 저장 및 이동 수단으로 효과적인 화학 물질이지만, 유독성 물질이므로 취급 및 안전이 무엇보다 중요하다. 암모니아 화학적 특성에 따라 에어로졸의 형태로 누출되어 공기 중 수분과 접촉하여 에어로졸 구름을 형성하며, 그 농도에 따라 인체에 해를 줄 수 있다. 또한, 액화 암모니아는 850배의 팽창력을 갖고 있으므로, 고농도 암모니아에 유출되기 쉬운 특성을 갖고 있으므로 각별한 유의가 필요하다. 국내외에 제/개정을 통해 준수하고 있는 각 표준들을 적극 검토하여 사고 및 예방에 만전을 기해야 할 것이다.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (RS-2023-00241035, 1415188062, Clean Hydrogen and Ammonia Innovation Research Center).

References

- [1] V. Pattabathula, J. Richardson, Introduction to ammonia production, CEP Magazine, (2016) 69-75.
- [2] A. Valera-Medina, A. Roldan, Ammonia from Steelworks, in: Inamuddin, R. Boddula, A.M. Asiri (Eds.), Sustain. Ammon. Prod., Springer International Publishing, Cham, (2020) 69-80.
- [3] S. Chatterjee, R.K. Parsapur, K. W. Huang, Limitations of ammonia as a hydrogen energy carrier for the transportation sector, ACS Energy Letters, 6 (2021) 4390-4394.
- [4] Y. Kojima, Safety of ammonia as a hydrogen energy carrier, International Journal of Hydrogen Energy, (2023) article in press.
- [5] S. Devkota, Storage Potential of Green Hydrogen, (2023)
- [6] N. M. Adli, H. Zhang, S. Mukherjee, G. Wu, Review-ammonia oxidation electrocatalysis for hydrogen generation and fuel cells, Journal of the Electrochemical Society, 165 (2018) J3130.
- [7] L. A. Diaz, G. G. Botte, Electrochemical Deammonification of synthetic swine wastewater, Industrial & Engineering Chemistry Research, 51 (2012) 12167-12172.
- [8] Á. Anglada, A. Urtiaga, I. Ortiz, Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications, Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 84 (2009) 1747-1755.
- [9] P. Cañizares, R. Paz, J. Lobato, C. Sáez, M.A. Rodrigo, Electrochemical treatment of the effluent of a fine chemical manufacturing plant, Journal of Hazardous Materials, 138 (2006) 173-181.
- [10] L. Candido, J.A.C.P. Gomes, Evaluation of anode materials for the electro-oxidation of ammonia and ammonium ions, Materials Chemistry and Physics, 129 (2011) 1146-1151.
- [11] Y. Gendel, O. Lahav, Revealing the mechanism of indirect ammonia electrooxidation, Electrochimica Acta, 63 (2012) 209-219.
- [12] L. A. Diaz, G.G. Botte, Mathematical modeling of ammonia electrooxidation kinetics in a Polycrystalline Pt rotating disk electrode, Electrochimica Acta, 179

- (2015) 519-528.
- [13] B. X. Dong, H. Tian, Y. C. Wu, F. Y. Bu, W.L. Liu, Y.L. Teng, G.W. Diao, Improved electrolysis of liquid ammonia for hydrogen generation via ammonium salt electrolyte and Pt/Rh/Ir electrocatalysts, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (2016) 14507-14518.
- [14] "〈연속기획〉 수소경제 주목되는 기술/제품 56. 에이이에스텍의 '무수 암모니아 전기 분해 기술'", *월간수소경제*, last modified Sep 01. 2023, accessed Nov 13. 2023, <https://www.h2news.kr/news/article.html?no=11243>.
- [15] *Compendium of Chemical Hazards*, Public Health England, 2014790 (2019) 1-20.
- [16] US EPA, *Access Acute Exposure Guideline Levels (AEGs) Values*, last modified Jun 20. 2023, accessed Nov 13. 2023, <https://www.epa.gov/aegl/access-acute-exposure-guideline-levels-aegs-values>.
- [17] Emergency planning and the acute toxic potency of inhaled ammonia, 107 (1999) 617-627.
- [18] F. Pedersen, R. S. Selig, Predicting the consequences of short-term exposure to high concentrations of gaseous ammonia, *Journal of Hazardous Materials*, 21 (1989) 143-159.
- [19] W. F. T. Berge, A. Zwart, L. M. Appelman, Concentration-time mortality response relationship of irritant and systemically acting vapours and gases, *Journal of Hazardous Materials*, 13 (1986) 301-309.
- [20] J. Labovský, L. Jelemenský, Verification of CFD pollution dispersion modelling based on experimental data, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24 (2011) 166-177.
- [21] W. Tan, H. Du, L. Liu, T. Su, X. Liu, Experimental and numerical study of ammonia leakage and dispersion in a food factory, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 47 (2017) 129-139.
- [22] *A Hazard Assessment of Ammonia as a Fuel*, Ammon, Fuel Assoc, last modified Oct 20. 2013, accessed Nov 13. 2023, <https://nh3fuelassociation.org/2013/10/20/a-hazard-assessment-of-ammonia-as-a-fuel/>.
- [23] M.A. Mohamed, D.H. Wood, Computational study of the effect of trees on wind flow over a building, *Sustainable Energy Research*, 2 (2015) 1-8.
- [24] J. R. Bakke, K. van Wingerden, P. Hoorelbeke, B. Brewerton, A study on the effect of trees on gas explosions, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23 (2010) 878-884.
- [25] *Emergency planning for ammonia-based refrigeration systems guide*, (2018) 1-19.
- [26] H. K. Ju, S. Bong, S. Park, C. H. Lee, Understanding thermodynamics of operating voltage and efficiency in PEM water electrolysis system for carbon neutrality and green hydrogen energy transition, *Journal of the Korean Electrochemical Society*, 26 (2023) 56-63.