

염소 누출 사고사례연구를 통한 Flexible hose 설계 및 관리 방안 고찰

박수율 · 임지표[†]

한국산업안전보건공단 울산지역본부 화학사고예방센터
44988 울산광역시 울주군 청량읍 처용산업4길 51
(2019년 3월 15일 접수, 2019년 4월 8일 수정본 접수, 2019년 4월 28일 채택)

Consideration on Design and Management of Flexible Hose through the Case Study of Chlorine Leak

Suyoul Park and Ji-pyo Yim[†]

Chemical Accident Prevention Center, Ulsan Regional Office, KOSHA
51, Cheoyongsaneop 4-gil, Cheongnyang-eup, Ulju-gun, Ulsan, 44988, Korea
(Received 28 March 2019; Received in revised form 8 April 2019; accepted 28 April 2019)

요 약

2018년 울산에서 Flexible hose의 파단으로 발생한 염소 누출사고를 분석하여 국내 설계 및 관리 기준을 제시하기 위한 연구를 수행하였다. 누출 사고가 발생전에는 다양한 원인이 있지만, 본 논문에서는 직접적 원인인 Flexible hose의 파단을 분석하는데 초점을 맞추었다. 분석 결과, 사고가 발생한 사업장에서 염소 이송에 사용하는 Flexible hose는 재질 및 사용 두께 측면에서 부적절 했고, 사용 전 압력 테스트도 운전압력 이하에서 하는 등 문제가 있었다. 설문조사를 통하여 염소를 취급하는 울산지역의 다섯 곳의 사업장을 확인한 결과, 한 곳을 제외하고 염소 이송에 부적절한 Flexible hose를 사용하고 있었다. 현재 염소 이송용 Flexible hose의 설계에 대한 국내 기준이 없어 사용하는 Flexible hose의 적정성을 검토하는데 어려움이 있다. 본 연구를 통하여 국내에 적용할 수 있는 염소 이송용 Flexible hose의 설계 기준을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 기준을 설계 및 검토에 적용한다면 염소 이송 시 발생할 수 있는 Flexible hose 파단의 위험성을 경감시키는데 기여할 것이다.

Abstract – This research was performed to propose domestic standard for design and management of flexible hose by analyzing chlorine leak caused by breakage of the hose in Ulsan, 2018. The leak had multiple causes but this paper focuses on analyzing the cause of breakage of flexible hose, the direct cause. According to the analysis, flexible hose that the company of the accident used for chlorine transfer was inappropriate in several aspects including material and wall thickness. And even pressure test had been conducted below operating pressure. Upon investigation on five companies that handle chlorine in Ulsan, four companies were using inappropriate flexible hose for chlorine transfer. Since there is no domestic standard for the design of flexible hose for chlorine transfer at present, it is hard to examine its design adequacy. Design standard of flexible hose used in chlorine transfer that is applicable domestically is proposed based on this research. It will contribute to the reduction in risk of breakage of the hose if the proposed standard could be applied in design and examination of flexible hose.

Key words: Chlorine, Leak, Flexible hose, PTFE, Burst pressure, MAWP

1. 서 론

화학 산업의 고도화로 다양한 형태의 화학사고가 발생하고 있다. 특히 화학물질에 의한 화재·폭발 및 독성물질의 누출은 사업장 외부로까지 피해가 확산되어 대형 재난으로 발전될 수 있으며, 이러

한 사례가 증가하고 있다. 2010년부터 2016년까지 국내 화학 사고를 분석한 결과 화재·폭발이 66%, 독성물질의 누출이 24%를 차지하고 있다[1]. 일단 화학사고가 발생하게 되면 대형 사고로 이어질 가능성이 높아 예방의 중요성이 강조되고 있다.

2012년 구미에서 발생한 불산 사고는 화학 사고에 대한 국민들의 경각심을 고취시켰다. 불산 사고사례에서 알 수 있듯이 독성물질이 누출되면 피해영향범위가 넓어 재난 수준의 사고가 발생할 수 있다 [2]. 2018년 울산에서 2건의 염소 누출사고가 발생하였다. 염소의 Threshold Limit Value-Time Weighted Average (TLV-TWA)는 0.5로 산

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jpyim@kosha.or.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

업안전보건법상 급성독성물질, 화학물질관리법 상 염소 및 이를 25% 이상 함유한 혼합물을 사고대비물질로 규정하고 있다.

2018년 2월 울산시 소재 A 업체에서 염소를 하역 작업 중 차량의 출발로 Flexible hose가 파단 되어 염소가 누출되는 사고가 발생하였다. 2018년 5월 울산시 소재 B공장에서 염소를 하역하는 도중 내압에 의해 Flexible hose가 파단 되어 염소가 누출되는 사고가 발생하였다. 이 사고로 28명이 호흡계통에 불편을 느껴 병원 진료를 받았다. Flexible hose의 파단으로 염소가 누출되는 사고가 연이어 발생하면서 염소의 이송에 사용하는 Flexible hose 관리 필요성이 대두되고 있다.

Flexible hose의 관리에 대한 국내 기준으로는 고압가스안전관리법의 가스용 금속플렉시블호스 제조의 시설 기술 검사 기준[3], 안전보건공단의 유해·위험물 취급용 플렉시블 호스의 사용안전에 관한 기술지침[4]이 있다. 그러나 염소 이송용 Flexible hose에 대하여 관련 기준을 적용하기에는 어려움이 있다. 고압가스안전관리법은 사용압력이 3.3 kPa 이하인 액화석유가스 또는 도시가스용 Stainless steel 재질의 Flexible hose에 대한 기술기준을 제정한다. 이는 염소 하역에 사용하는 질소 압력 및 염소의 부식성으로 인한 재질을 고려하였을 시 적합하지 않다. 안전보건공단의 기술지침은 Flexible hose의 구성 및 사양, 설치, 점검 시 주의사항 등 일반적 관리사항을 기술하고 있어 염소 하역용 Flexible hose의 설계 및 적정성 검토에 적용할 수 없다.

염소는 소량의 누출만으로도 사람에게 치명적인 물질이다. 피해를 예방하기 위하여, 염소를 사용하는 설비는 근원적으로 누출을 방지할 수 있도록 설계하여야 한다. 염소 이송에 탱크로리를 사용할 경우 탱크로리와 저장 설비 간 연결을 위하여 Articulated Arms, Flexible Hoses, Flexible Steel Coil 등 다양한 방법이 있다[5]. 국내기업에서는 그 중에서도 취급과 관리가 용이한 Flexible hose를 일반적으로 사용한다. Flexible hose는 설비로부터 자주 탈부착 되어 누출의 위험성이 높은 설비다. 위험성을 고려하였을 때, 염소 이송용 Flexible hose에 배관 분류 코드를 부여하고 설계 기준을 확립하여 주기적인 점검과 교체가 이루어져야 한다. 그러나 염소를 취급하는 국내 업체에서는 염소 하역용 Flexible hose를 배관으로 관리하지 않아 점검 및 교체가 작업자의 주관적 판단에 의해 이루어지고 있다.

사고가 발생한 사업장을 포함하여 울산지역에서 염소를 생산 또는 사용하기 위하여 입·출하 설비를 갖춘 업체 다섯 곳의 실태를 확인하였다. 다섯 업체의 염소 이송 방식 및 Flexible hose 사용 실태를 Table 1에 나타내었다. 실태조사 결과 한 개의 업체만 유럽의 염소 이송 시 권고하는 기준을 적용한 Loading Arm을 설치하여 사용하고 있었다. 나머지 네 개의 업체에서는 염소 이송에 소요되는 시간을 기준으로 사업장 자체적으로 설계하였다. 조사 결과 네 개의 업체에서 사용하는 Flexible hose는 2018년 5월 파단이 발생한 설비와 유사한 사양의 Flexible hose를 사용하고 있었다.

사고를 통해 습득한 기술이 사고가 발생한 사업장만의 노하우로 국한 된다면, 같은 사고가 반복적으로 발생할 위험이 있다[6]. 명확한 사고 원인 분석을 통하여 같은 사고의 발생을 예방하기 위해 연구를 시작했다. 본 연구에서는 2018년 5월 울산에서 하역작업 중 Flexible hose 파단으로 발생한 염소 누출 사고사례 분석을 통하여 기존에 사용되어온 염소 이송용 Flexible hose의 적정성을 검토하고, 염소 이송용 Flexible hose에 대한 국외 기준을 분석하고 이를 바탕으로 국내에 적용할 수 있는 설계 기준을 제시하였다.

Table 1. Specification of flexible hose that companies used for chlorine transfer in Ulsan

Case	Do (mm)	t (mm)	Material	
			Inner pipe	Braid
1	26	1.5	PTFE	SUS316
2	22	1.5	PTFE	SUS304
3	25	1.5	PTFE	SUS304
4	28.5	1.5	PTFE	SUS304
5	Loading arm			

2. 사고사례분석

2-1. 사고개요[7]

- 사고일시: 2018년 5월
- 발생장소: 울산 소재 염소를 하역하는 하역장(Unloading house)
- 인명피해: 없음(28명이 호흡계통에 불편을 느껴 병원진료)
- Process Description: 탱크로리에 질소 배관을 연결 한 후 질소 압력을 이용하여 차량의 염소를 저장시설로 이송(Fig. 1)
- 질소공급 압력: 9.5 bar,g
- 염소하역 압력: 6~7.5 bar,g
- 하역속도: 5~5.5 ton/hr
- 사고원인: Flexible hose 파단
- 누출량: 약 12 kg (과류방지밸브부터 차단밸브 까지 잔류 염소량을 통한 추정)

2-2. 파단 된 Flexible hose 사양

염소 이송 중 Flexible hose의 파단이 염소누출 사고의 직접적인 원인이 되었다. 염소를 이송하는데 사용하는 Flexible hose의 일반적인 형태를 Fig. 2에 나타내었다. 염소의 내화확성을 가지는 재질의 내관과, 내관을 강화하기 위한 Braid, 외부 충격을 흡수하기 위한 Guard로 구성되어 있다[8,9].

사고가 발생한 하역 작업에서 염소를 이송하는데 사용된 Flexible hose의 사양을 Table 2에 나타내었다. Polytetrafluoroethylene (PTFE)의 내관에 SUS304 재질의 Braid를 사용하였으며, Braid를 보호하기 위한 Guard는 없었다. Flexible hose 제작사로부터 제공받은 제품 사양서를 확인한 결과 사용 전 7 bar,g의 압력(운전압력: 9.5 bar,g)으로 내압테스트를 실시한 후 현장에 설치되었다.

PTFE는 생산하는 업체별로 다양한 값의 Tensile strength를 가진다. 사고가 발생한 Flexible hose 제작업체에서 사용한 PTFE의 재질 자료를 확인한 결과, 원료를 중국에서 수입하여 사용하고 있으며 재료의 주요 사양은 Table 3과 같다.

2-3. 사고원인 분석

사고의 원인은 질소 Purge용 배관의 파단이 염소의 누출로 이어진 관리적인 측면과, 사용된 Flexible hose의 염소 배관으로의 적정성에 대한 기술적인 측면이 있다. 본 연구에서는 기술적인 원인에 초점을 두어 사고 분석을 실시하였다. 분석한 결과 Flexible hose의 파단의 원인은 크게 두 가지다.

- 내압을 충분히 견딜 수 없는 설계
 - 잘 못된 재질의 선정
- 첫 번째, 설계적인 측면에서 Flexible hose의 파단을 보면, 운전 시

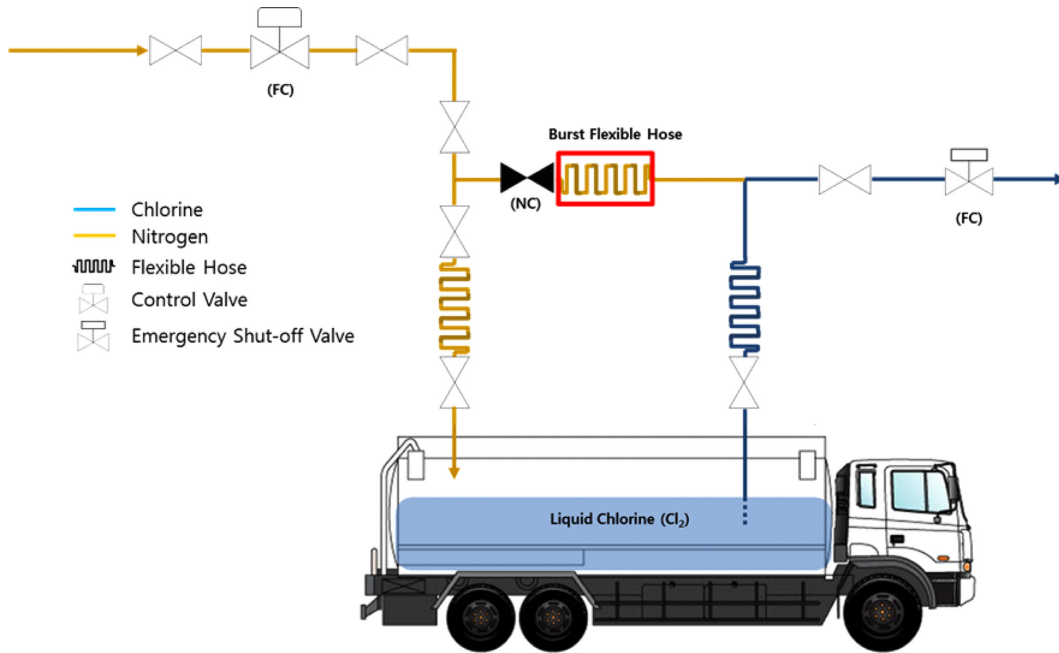


Fig. 1. Overview of the accident.

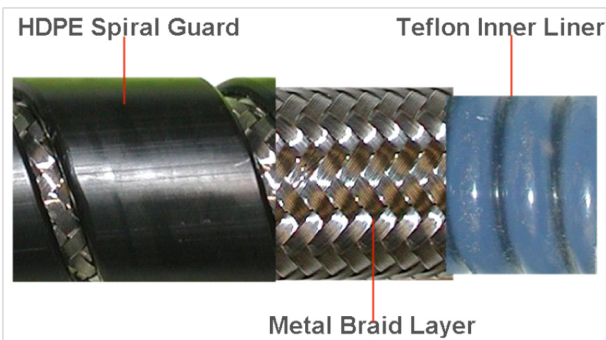


Fig. 2. Flexible hose for chlorine transfer.

Table 2. Specification of burst flexible hose

Size	D	28.5 mm
	L	2 m
	t	1.5 mm
Material	Inner pipe	PTFE
	Braid	SUS304 LAP-JOINT
Design pressure		21 bar.g / F.V
Design temperature		-35 °C/55 °C
Test pressure		7 bar.g

Table 3. Property of PTFE used in burst flexible hose

Tensile strength	240 bar.g
Relative density	2.15~2.2
Melting point	327±5 °C

사용하는 최대 압력은 질소의 공급 압력인 9.5 bar.g 이고, Flexible hose의 설계압력은 21 bar.g 이다. 염소 하역에 사용된 Flexible hose의 두께(1.5 mm)는 외경(28.5 mm)의 약 5% 정도로 Thin wall로 볼 수 있다. Thin wall의 경우 비금속 재질 배관의 Burst pressure는 Barlow's equation (식 (1))으로 추정할 수 있으며, Maximum Allowable

Operating Pressure (MAWP) (식 (2))는 배관의 Burst pressure에 안전율(20%)을 적용하여 추정할 수 있다[10,11].

$$P_b = \frac{2Sk_{wall}t}{D_o} \tag{1}$$

$$P_{MAWP} = \frac{0.4Sk_{wall}t}{D_o} \tag{2}$$

사고가 발생하기 전 설비에 두 번의 변화가 있었다. 첫 번째는 염소 하역 시간을 단축하기 위해 같은 두께(1.5 mm)의 Flexible hose의 외경을 21.0 mm에서 28.5 mm로 변경, 두 번째는 염소 하역 중 내압에 의한 두께의 감소 및 외경의 증가다. 외경의 증가에 따른 Burst pressure 및 MAWP의 경향을 Fig. 3에 나타내었다. Barlow's equation을 이용하여 계산하면, 외경이 21.0 mm에서 두께의 증가 없이 28.5 mm로 증가시키면 Burst pressure 및 MAWP를 약 26% 감소시키는 결과를 가져온다. 사용하는 Flexible hose의 두께의 변

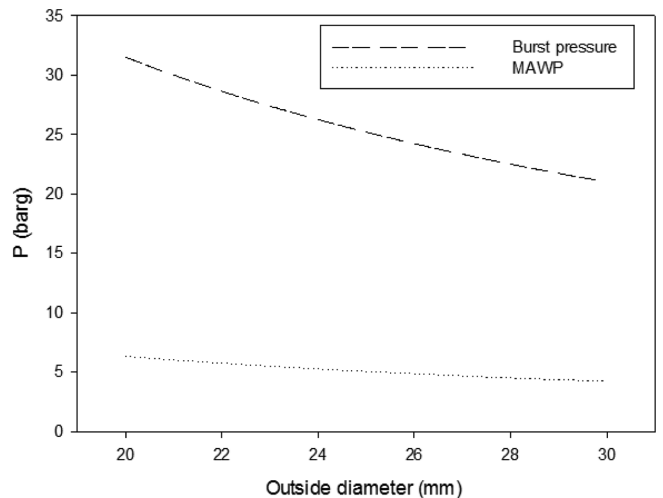


Fig. 3. Burst pressure and MAWP by outside diameter.



Fig. 4. Flexible hose after deformation.

Table 4. Flexible hose before/after deformation

	Before	After
Do (mm)	28.5	28.5
t (mm)	1.5	1.0
P _b (bar,g)	22.11	14.74
P _{MAWP} (bar,g)	4.42	2.95

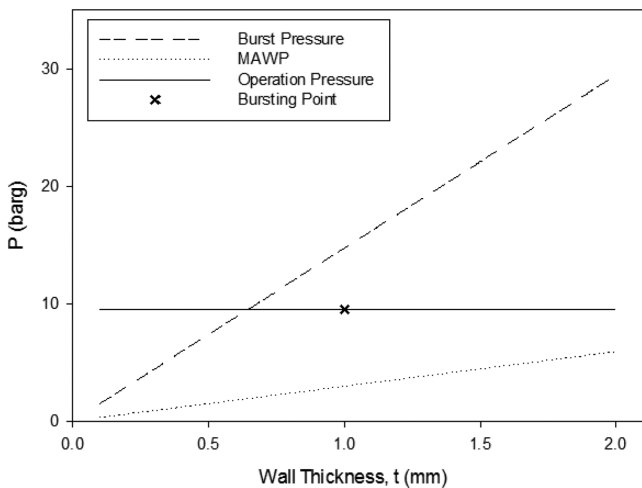


Fig. 5. Burst pressure by wall thickness of flexible hose.

화 없이 외경만 증가할 경우 Flexible hose의 건전성을 저하시킨다.

사고가 발생한 후 파단된 Flexible hose 단면의 두께를 측정할 결과(Fig. 4), 변형이 발생하여 두께가 1.5 mm에서 1.0 mm로 감소하였다. 두께가 감소됨과 동시에 외경의 증가가 발생하였으나, 본 연구에서는 두께의 변화만 고려하였다. Barlow's equation을 적용하여 변형이 발생하기 전·후의 Burst pressure과 최대사용압력을 계산하면 Table 4 및 Fig. 5와 같다.

변형이 발생하기 전에는 운전압력(9.5 bar,g)이 최대사용압력(4.4 bar,g)의 2배 이상으로 운전하였다. 변형 후에는 최대사용압력(3 bar,g)의 3배 이상이 되었다. 최대사용압력 이상에서의 운전으로 재질의 변형이 지속적으로 발생하였을 것으로 추정된다. Flexible hose의 지속적인 변형으로 재질의 응력에 변화를 주었으며 그 결과 파단이 발생하였다.

두 번째, 재질 선정 측면에서 파단의 원인을 보면, 내관을 비금속 재질을 사용할 경우 염소의 침투성(Permeability)을 고려하여 염소

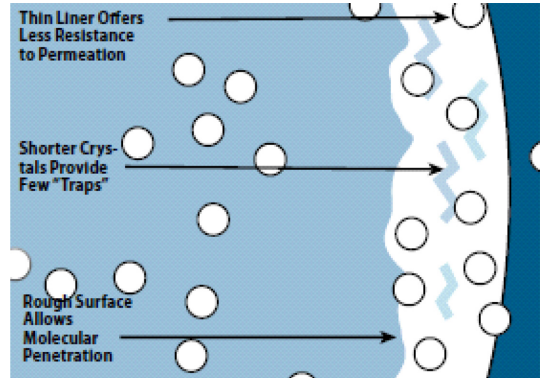


Fig. 6. Permeability of nonmetallic material [16].



Fig. 7. Corroded flexible hose.

에 의한 부식에 저항력이 있는 재질의 Braid를 사용하여야 한다. 특히, PTFE 등 Fluoropolymer를 원료로 하는 배관에서 물질 이송 중 침투로 인하여 발생한 문제로 침투특성에 대한 많은 연구들이 수행되었다[12-15].

사고가 발생한 Flexible hose의 Braid는 SUS 재질로 Dry 염소(수분함량 100ppm)에 대해서는 부식성이 없지만 외부로 침투(Permeability)되어 염소가 대기 중의 습기와 만나면 반응(식 (3))을 하게 된다. 반응을 통해 생성된 HOCl, HCl에 의하여 SUS 재질의 Braid의 부식이 진행된다. 실제 파단된 Flexible hose의 부식된 Braid 사진을 Fig. 7에 나타내었다.



2002년 8월 14일 미국 Missouri에서도 유사한 사고가 발생하였다[17]. 염소 하역 중 Flexible hose가 파단 되어 누출이 발생하였다. 염소가 누출된 사고의 원인을 분석한 결과, SUS 재질의 Braid가 부식되어 제 기능을 하지 못하였다. 그 결과 Flexible hose의 파단으로 염소가 누출되었다.

두 가지의 주요 원인을 분석한 결과를 요약하면 Flexible hose의 파단은 내관을 강화해 주는 역할을 하는 Braid가 염소에 의한 부식으로 역할을 하지 못하였으며, Flexible hose의 최대사용압력(MAWP) 이상에서의 운전으로 변형이 발생하였다. Braid 이상 및 압력 관리 실패로 염소 하역 작업 중 내압으로 부풀어 올라 직경이 증가하고, 두께가 감소하였다. 그 결과 내압에 의해 Flexible hose의 파단이 발생하였다.

3. 국외 기준

염소 이송에 사용하였던 Flexible hose의 잘못된 선정이 대형사고로 이어졌다. 염소 이송용 Flexible hose에 대한 국내 기준 및 규격은 없으며 미국, 캐나다의 'The Chlorine Institute'와 유럽의 'Euro Chlor'에서 염소 이송용 Flexible hose에 대해 권고하고 있다.

Euro Chlor는 염소 하역용 Flexible hose에 대해 The Chlorine Institute 보다 엄격한 기준을 제시한다. 탱크로리 등을 이용하여 액체 및 가스 염소를 하역할 때에는 Articulated Arm, Flexible Hoses, Flexible Steel Coils를 이용할 것을 권고하며, Flexible hose를 사용할 경우 염소의 부식성(Wet Chlorine, Dry Chlorine)을 고려하여 재질을 선정되되 금속 재질을 사용해야 한다고 권고한다. PTFE를 사용할 경우 침투성(Permeability)을 고려하여 Stainless steel 재질의 Braid는 사용하지해서는 안 되며, Monel 400 또는 Hastelloy C4로 사용되 추가적으로 Monel 400으로 Braid를 보호 할 수 있도록 Guard를 구성하여야 한다. PTFE의 침투성(Permeability)으로 인한 재질의 건전성의 문제로 운전 시간과 운전 횟수를 엄격하게 제한하여야 하며, 이러한 문제로 인하여 Euro Chlor에서는 PTFE 재질의 Flexible hose는 추천을 하지 않는다[5,18].

The Chlorine Institute에서는 염소 이송용 PTFE 재질의 Flexible hose에 대한 설계기준을 제시하였다[19].

MAWP:

- 375 psig (nominal diameter > 1/2")
- 500 psig (nominal diameter ≤ 1/2")

Burst Pressure: MAWP의 5배

- 1875 psig (nominal diameter > 1/2")
- 2500 psig (nominal diameter ≤ 1/2")

Braid

- 재질: PVDF 또는 Hastelloy C-276
- Guard: CPE, HDPE, PVDF

4. 염소 이송용 Flexible hose 설계 기준 제안

본 연구를 통해서 Euro Chlor, The Chlorine Institute의 권고사항을 토대로 국내 실정에 맞는 Flexible hose의 설계 기준을 제안 한다.

4-1. 설계온도

설계온도는 액체염소의 저장설비의 설계온도(-35 °C)와 여름철 최대 온도를 기준으로 하며, Euro Chlor, The Chlorine Institute에서 제안하는 설계온도를 준용한다[18,19].

- Min. temperature: - 40 °C
- Max. temperature: 50 °C

4-2. 설계압력

Euro Chlor에서는 PTFE에 대한 설계 압력 기준을 제시하지 않았으나, 일반적인 염소 배관 설계 시 ISO 7005-2의 규격에 따라 PN 25 for 20 barg를 최소 MAWP로 설계할 것을 제안하였다[18]. The Chlorine Institute에서는 PTFE의 배관 압력 기준을 ASME Code를 준용하여 적용하고 있으며, 직경에 따른 설계압력을 제시하고 있다. Nominal diameter가 1/2" 이하의 Flexible hose는 소량의 염소를 이송하거나 열교환에 사용하는 Tube에 대한 기준이며,

Nominal diameter가 1/2" 초과하는 경우에는 일반적인 이송에 대한 Flexible hose 기준을 제시한다[19].

Euro Chlor, The Chlorine Institute의 설계 압력 기준을 국내에 적용하기에 어려움이 있다. 국내 염소 이송을 하기 위하여 기존에 설치된 설비가 ISO, ASME 기준으로 설계되어 있지 않고, 사업장 상황에 따라 다르게 설계되어있다. 이러한 국내에 설치된 염소 이송설비의 특성으로 인해 국내 기준을 재정립 할 필요가 있다. 본 연구에서는 탱크로리로부터 상·하역 시 사용하는 Flexible hose에 대한 설계 기준을 제시하는 것으로, The Chlorine Institute의 1/2" 미만 Tube에 대한 설계압력은 제시하지 않는다.

MAWP는 염소 이송 작업 중 발생할 수 있는 최대 압력을 기준으로 하여야 한다. 염소를 하역할 때, 질소 압력을 이용하기 때문에 이송 중 질소 공급 압력을 초과하지 않으나, 배관의 양쪽이 차단 될 경우 배관에 잔류하고 있는 염소는 외기의 온도에 의해 증기압이 상승한다. 그러므로 염소 Flexible hose 설계 시 압력은 운전압력 및 설계 온도에서 염소의 증기압력을 고려하여야 한다.

물의 증기압[20]과 비교하였을 때 염소의 증기압은 온도에 따라 급격하게 증가한다. 배관에 잔류 염소가 존재할 경우 외기의 온도에 의해 증기압이 상승하여 설계압력을 초과할 경우 배관의 파단이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 설계압력은 설계온도에서 온도에 대한 설계마진을 적용하고 그 온도에서의 염소의 증기압을 기준으로 제시하였다.

염소의 증기압은 Antoine equation[21], 실험값[22]을 참고 하였다. 50 °C에서 염소의 증기압은 약 14~15 bar이다. 그러므로 최소설계 압력은 15 bar로 한다. 염소 취급용 Flexible hose는 물질의 위험성으로 인해 충분한 설계 마진이 필요하다. MAWP는 설계온도(50 °C)에서 30 °C의 설계마진을 두어 추산한다. 설계 마진을 고려한 온도(80 °C)에서의 염소의 증기압은 약 25 bar,g 이다. 이를 고려하여 MAWP를 25 bar로 설계한다.

Burst pressure는 MAWP에 안전율을 고려한다. 일반적으로 Burst pressure는 MAWP의 4배~5배를 사용하나, 염소의 독성을 고려하여 염소 하역용 Flexible hose는 5배를 사용한다[19].

- Design Pressure: 15 bar
- MAWP: 25 bar
- Burst pressure: 125 bar

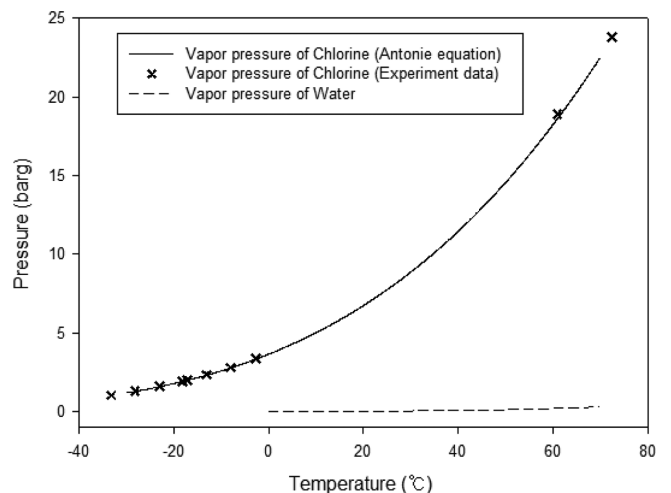


Fig. 8. Vapor pressure of Chlorine.

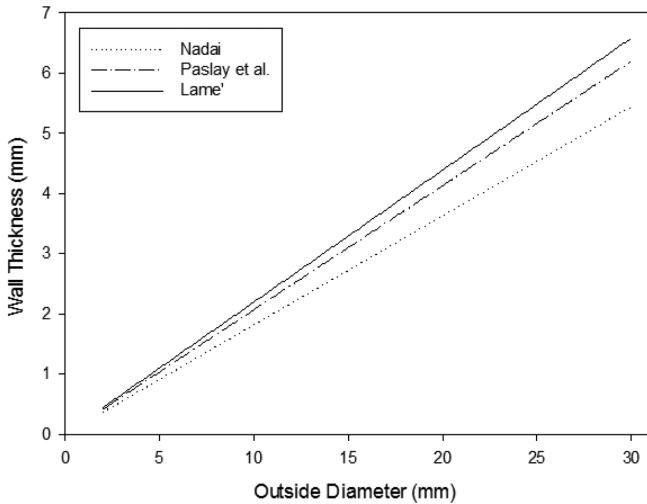


Fig. 9. Optimal thickness by outside diameter.

4-3. 최소사용 두께

사고원인분석 시 Flexible hose의 내압에 따른 두께의 설계를 검토하기 위하여 Barlow Equation을 사용하였다. Barlow Equation은 한 방향(1D, for plane)만을 가정하여 Burst pressure를 추산 한 것으로, 얇은 벽($t/D_o < 0.05$)에 대해서는 합리적인 결과를 주지만, 두꺼운 벽($t/D_o > 0.05$)에 적용하기에는 한계가 있다[23].

끝단을 막은 상태에서의 Burst pressure는 Nadai Equation (1931) (식 (4)), Paslay et al. Equation (1998) (식 (5)) 등을 통해 추산할 수 있으며, 일반적인 형태의 두꺼운 Flexible hose의 연성 파괴는 Lame' Equation (식 (6))을 통해 추산할 수 있다[11,23]. 본 연구에서는 세 가지의 식을 모두 적용하여 가장 보수적인 값을 설계에 적용한다.

Nadai Equation (1931)

$$P_b = \frac{2S}{\sqrt{3}} \ln \left[\frac{D_o}{D_o - 2t} \right] \quad (4)$$

Paslay et al. Equation (1998)

$$P_b = \frac{2St}{D_o - t} \quad (5)$$

Lame' Equation

$$P_b = \frac{S(D_o^2 - D_i^2)}{(D_o^2 + D_i^2)} \quad (6)$$

세 개의 식을 검토한 결과, Lame' Equation이 Burst pressure (125 bar,g)를 기준으로 외경에 따른 두께를 가장 보수적으로 제안하였다. 파단으로 염소 누출 사고가 발생한 Flexible hose를 같은 Tensile strength를 가지는 PTFE를 사용하여 제작할 경우, Lame' Equation을 통해 적정 두께를 추산하면 약 6.3 mm로 설계하여야 한다.

염소의 이송 속도도 설계시 고려되어야 한다. 염소 이송 시간을 단축하기 위하여 외경을 증가시키고, 그에 따른 두께를 증가시켜 Flexible hose를 설계할 수 있다. 그러나 Erosion을 고려한 액체 염소의 최대 이송속도는 2 m/s를 초과하지 않도록 설계하여야 한다 [18].

4-4. Braid 재질

Braid의 재질은 Wet condition에 대한 부식성을 고려하여야 한다. 사용하는 염소가 Dry condition 이라도 외기로 침투되면 Wet condition이 되기 때문이다. 염소에 대한 부식성을 고려하여 재질을 선정하여야 하며 본 연구에서는 설계에 Euro Chlor, The Chlorine Institute의 권고 사항을 적용 한다[5,19].

- Monel 400
- Hastelloy C4
- Hastelloy C-276
- PVDF

Braid는 외부의 충격으로부터 보호하기 위하여 Guard를 설치하여야 하며, Guard는 CPE, HDPE, PVDF 재질을 사용한다.

4-5. Test

Flexible hose를 현장에 적용하기 전에 Leak 및 내압에 대한 건전성 Test를 실시하여야 한다. 압력 Test는 MAWP의 2배의 압력에서 10분 동안 실시하여야 한다. 염소는 수분 및 Hydrocarbon에 반응할 수 있으므로 이송에 사용하기 위하여 Test 한 후에는 Flexible hose를 충분히 세척하고 건조시켜야 한다[19].

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 Flexible hose의 파단으로 발생한 염소 누출 사고에 대하여 Flexible hose의 파단이 발생한 원인을 중심으로 분석하였다. 분석 결과 염소 이송에 사용하였던 Flexible hose는 설계 및 재질 측면에서 부적절 했다. Flexible hose의 운전압력(9.5 bar,g)은 본 연구를 통해 추정된 최대사용압력(4.4 bar,g) 이상에서 사용되고 있었다. Braid 재질은 염소가 침투되었을 시 부식에 취약한 SUS304를 사용하였다.

사고가 발생한 사업장 외에, 앞서 조사하였던 울산에 소재한 염소 이송용 Flexible hose 사용 사업장 중, 염소 이송에 적절한 Flexible hose를 사용하고 있는 업체는 없었다. 염소 하역용 Flexible hose에 대한 국내 기준이 없어, 관련 사업장에는 The Chlorine Institute의 Pamphlet 6의 권고대로 만들어진 제품을 사용할 것을 권고 하였다.

염소의 독성을 고려하였을 때, 염소가 누출될 가능성이 있는 설비는 적절한 기준을 바탕으로 설계 및 검토되고 관리되어야 하나, 국내에 관련 기준이 없어 본 연구를 통하여 국내 실정에 맞도록 설계 및 검토 기준을 제시하였다.

- 구성: 내관 + Braid + Guard
- Design Temperature: - 40 °C~50 °C
- Design Pressure: 15 bar,g
- MAWP: 25 bar,g
- Burst pressure: 125 bar,g
- Thickness: Lame' Equation을 통해 추산
- Material: 염소 부식에 대한 저항성이 있는 재질의 내관, Braid, Guard

본 연구를 통해 제시한 설계기준을 실제 현장에서 적용하기 위해서는 설계기준에 의해 제작된 Flexible hose의 Sampling을 통한 Burst pressure에 대한 실험적 검토가 필요하다. 본 논문에서 제시한 설계기준을 바탕으로 현장에서 사용하는 염소 상·하역 설비에 적용한다면 동일 사고 예방에 기여할 뿐만 아니라, 안전밸브 후단,

위험물 이송용 배관 등에 사용되는 Flexible hose의 적정성을 검토하는 기준을 제시할 것이다.

사용기호

D_o	: Outside diameter [mm]
D_i	: Inside diameter [mm]
t	: Wall thickness [mm]
P_b	: Burst pressure [bar,g]
P_{MAWP}	: MAWP [bar,g]
S	: Tensile strength [bar,g]
k_{wall}	: Factor to account for the specified manufacturing tolerance of the pipe wall (0.875 applied to this paper, tolerance of -12.5)

References

- Lee, H.-S. and Yim, J.-P., "A Study on Prevention Measure Establishment through Cause Analysis of Chemical-Accidents," *Kosos* **32**(3), 21-27(2017).
- Kim, J. H., Jeong, C., Kang, S. M., Yong, J.-W., Yoo, B., Seo, J. M., "Comparison Study for Impact Range of Prediction Models Through Case Study about Gumi Hydrogen Fluoride Accident," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(1), 48-53(2017).
- "Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Corrugated Stainless Steel Tubing for Gases," KGS AA535, Korea Gas Safety Code (2018).
- "Technical Guidance on Safety of Flexible Hose for Hazardous Material Handling," KOSHA GUIDE M-119-2012(2012).
- "Design Principles for Installations for Off-Loading of Liquid Chlorine Road and Rail Tankers and Iso-Containers," Euro Chlor Publication, 5th ed., Euro Chlor (1997).
- Kletz, T. A., "Learning from Experience," *Journal of Hazardous Materials*, **115**(1-3), 1-8(2004).
- "Chemical Accident Investigation report," Korea Occupational Safety & Health Agency (2018).
- US Chemical Safety and Hazard Investigation Board (USCSB), Safety Advisory: Chlorine Transfer Hose Failure, November (2002).
- US Chemical Safety and Hazard Investigation Board (USCSB), DPC Incident Investigation Report: Chlorine Release (2003).
- Barlow, P., "On the Force Excited by Hydraulic Pressure in a Bramah Press; the Resisting Power of the Cylinder, and Rules for Computing the Thickness of Metal for Presses of Various Powers and Dimensions," *Transactions of the Institution of Civil Engineers*, **1**(1836), 133-139(1836).
- ISO/TR 10400:2007, "Petroleum and natural gas industries - Equations and calculations for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing, 1st ed. (2008).
- "Materials of Construction for Use in Contact with Chlorine", Euro Chlor Publication, 7th ed., Euro Chlor (1995).
- Sant'Anna, Alex, J.K.Argazinski, R. Tristante, Marcos., "Fluoropolymers for the Chemical Processing Industry Applications," Abraco, Intercorr 2010 (2010).
- Lee, S. and Knaebel, K. S., "Effects of Mechanical and Chemical Properties on Transport in Fluoropolymers. II. Permeation," *Journal of Applied Polymer Science*, **64**, 477-492(1997).
- Monson, L., Moon, S. I. and Extrand, C. W., "Gas Permeation Resistance of Various Grades of Perfluoroalkoxy-Polytetrafluoroethylene Copolymers," *Journal of Applied Polymer Science*, **111**(1), 141-147(2009).
- "PTFE Flexible Hoses Industrial Hose Design Manual", www.cranecpe.com, Crane Chem Phama & Energy.
- Joseph, G., "Chlorine Transfer Hose Failure," *Journal of Hazardous Materials*, **115**(1-3), 119-125(2004).
- "Guidelines for The Safe Handling and Use of Chlorine", Euro Chlor Publication, 2nd ed., Euro Chlor (2002).
- "Piping Systems for Dry Chlorine", Pamphlet 6, 16th ed., The Chlorine Institute Inc., (2013).
- "Perry's Chemical Engineers' Handbook," Choice Reviews Online, **45**(8), 45-4393-45-4393(2008).
- Stull, D. R., "Vapor Pressure of Pure Substances. Organic and Inorganic Compounds," *Industrial & Engineering Chemistry*, **39**(4), 517-540(1947).
- Ambrose, D., Hall, D., Lee, D., Lewis, G. and Mash, C., "The Vapour Pressure of Chlorine," *The Journal of Chemical Thermodynamics*, **11**(11), 1089-1094(1979).
- Adams, A. J., Grundy, K. C., Kelly, C. M., Lin, B. and Moore, P. W., "The Barlow Equation for Burst: A Muddled History," in IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition (2018).