

선형저밀도폴리에틸렌 탱크의 열 변형에 따른 누출 메커니즘 연구

이은석¹, 장현민¹, 홍성철^{2*}

¹호서대학교 안전행정공학과, ²호서대학교 안전공학과

A study on the Leakage mechanism of thermal effects in LLDPE Tank

Eunseok Lee¹, Hyunmin Chang¹, Sungchul Hong^{2*}

¹Department of Safety and Administrative Engineering, Hoseo University

²Department of Safety Engineering, Hoseo University

요약 폴리에틸렌 수지는 범용 플라스틱으로서 우수한 물성 및 가공성으로 다양한 분야에서 광범위하게 사용되는 대표적인 합성수지이다. 특히 선형저밀도폴리에틸렌(LLDPE: Linear Low Density Polyethylene)은 가지형의 분자구조를 가지고 분자사슬 간 공간을 줄임으로써 강도, 밀도, 내열성, 내화학성이 상대적으로 높은 특징이 있고, 주로 화학물질을 취급(보관, 저장, 사용 등)하는 탱크로 많이 사용되고 있다. 일반적으로 산업현장에서 사용하는 탱크의 재질은 PE (Polyethylene), FRP (Fiber Reinforced Plastic), STS (Stainless Steel), STS+PTFE (Polytetrafluoroethylene) Lining, SS (Steel Structure)+PTFE Lining 등이 있다. 이 중 강도와 내화학성이 우수한 STS+PTFE Lining을 가장 추천하고 있다. 그러나 금속재 Lining탱크의 경우 제작 비용이 높아 영세 사업장에서는 가격이 저렴한 PE 재질을 선호하고 있다. 본 연구에서는 LLDPE Tank 균열 메커니즘을 찾아 안전하게 사용할 수 있도록 사용기준을 수립하고자 하였다. 연구 방법으로 재질의 기계적 물성 변화, 수격과 수두압에 따른 응력해석, 온도 영향성(열팽창), 수지 거동 특성, 장기간 사용에 따른 경시 변화 등을 진행하였으며, 연구 결과 Tank 용량별, 사용 기간별, 사용환경에 따라 큰 차이의 균열이 발생함을 확인할 수 있었다.

Abstract Polyethylene resin is a general-purpose plastic and a representative synthetic resin used widely in many fields owing to its excellent physical properties and processability. In particular, linear low-density polyethylene (LLDPE) has a branched molecular structure that is characterized by relatively high strength, density, heat resistance, and chemical resistance by reducing space between molecular chains and is mainly used as a tank for handling (storage, storage, and use) chemicals. In general, the materials of tanks used in industrial sites include polyethylene (PE), fiber-reinforced plastic (FRP), stainless steel (STS), polytetrafluoroethylene (STS+PTFE) lining, and steel structure (SS+PTFE) lining. Among them, the STS+PTFE lining, which has excellent strength and chemical resistance, is most recommended. In the case of metal lining tanks, however, small businesses prefer low-priced LLDPE materials because of the high manufacturing costs. In this study, the LLDPE Tank cracking mechanism was found and used safely. As a research method, changes in mechanical properties of materials, stress analysis according to water and chickenpox, thermal expansion according to temperature environment, resin behavior characteristics, and short-term changes due to long-term use were carried out. Large differences were noted depending on tank capacity, period of use, and environment of use.

Keywords : LLDPE, Chronic Cracks, Thermal Expansion, Water Head Pressure, Temperature Conditions

*Corresponding Author : Sungchul Hong(Hoseo Univ.)

email: chemaster@live.com

Received January 12, 2024

Accepted April 5, 2024

Revised February 22, 2024

Published April 30, 2024

1. 서론

최근 산업현장에서의 화학약품 보관 및 저장 탱크의 누출사고 (2023년 인천 염산, 2022년 군산 메트아크릴산, 2015년 영천 질산 및 불산혼합물)로 인해 화학물질의 위험성이 사회적 이슈가 되었고, 사고근절과 시설안전기준을 강화하기 위한 화학물질관리법이 공포되었음에도 최근 5년간 국내 저장탱크의 화학물질 누출사고는 총 358건, 연평균 71.6건이 발생하였다[1]. Table 1은 5년간 국내에서의 화학약품 누출 사고원인별 분류를 정리하였는데, 이 중 누출사례가 83.5%로 가장 높게 나타났고, 이하 화재, 폭발, 기타 순으로 확인되었다. 누출의 경우 연결부와 탱크하부 누출이 가장 높았다. 그리고, 유해화학물질 누출사고 주요 발생 원인을 살펴보면 안전기준 미준수, 재질 부적합, 시공 불량, 저장시설 환경 부적합, 운영상 오류임을 알 수 있다. 또한, Table 2에서 보는 바와 같이 저장량이 10m³ 이상 이거나, 장기간 사용한 탱크에서 누출사고의 경향이 높은 것을 확인할 수 있어, 대용량 탱크에 대한 안전성 향상 연구가 필요한 실정이다. 이처럼 화학약품을 사용 중인 사업장에서는 화학물질 누출 시 흡에 의한 흡입, 접촉, 환경오염 등 사회적 책임이 크기 때문에 내화화성 재질, 내구성 설계, 방호벽 등 안전관리 측면에서 큰 비용을 투자하고 있다. 특히 화학물질

Table 1. Chemical Leak Accident in Korea

Distinguishing	Fire	Leak	Explosion	Others	Subtotal
2018	3	60		3	66
2019		48	2	8	58
2020	6	63	4	2	75
2021	3	78	9	3	93
2022	7	50	6	3	66
Total	19	299	21	19	358

Table 2. Chemical Leak Accident in D** Company (1994~2022)

Distinguishing	Quantity	Leak		Ratio (%)
		Bottom crack	Nozzle Fusion	
5m ³ ↓	61	-	1	1.6
10m ³	10	1	4	50
15m ³	9	2	3	55.5
20m ³	20	4	3	35
30m ³	3	1	1	66.6
Total	103	8	12	-

의 종류가 점진적으로 늘어감에 따라 기업에서 관리하는 탱크의 종류는 다양해지고, 대용량 및 대형화되어 안전에 대한 위험도도 증가하고 있다. 그러나, 사업장에서는 내화화성과 내구성이 가장 좋은 “금속+PTFE Lining” 제품은 높은 단가로 사용하지 못하고, 저렴하며 이동과 설치가 쉬운 PE 탱크를 주로 사용하고 있다. 하지만, 환경조건, 운영조건, 사용 기간 등을 제대로 숙지하지 못해 화학물질 누출사고로 이어지고 있다. 본 연구에서는 탱크의 저장장소의 환경적인 요소,약품 주입 시 수 충격과 수두 압력, 동-하절기 저장장소의 온도변화에 따른 소재의 열충격 및 열팽창 등을 고려하고, LLDPE 탱크의 CFD (Computational Fluid Dynamics) 응력해석을 시행하여, 누출의 정확한 원인을 규명하고자 하였다. 또한 사업장에서 화학약품을 안전하게 저장할 수 있도록 저장시설 환경기준, 취급 및 관리방안을 제안하였다.

2. 본론

2.1 PE 소재의 기계적 특성

LLDPE 탱크 소재의 기계적 특성을 참고로 확인하기 위하여 가장 많이 사용하고, 선행연구가 다양하게 존재하는 PE 배관의 기본 특성을 검토하였고, 이를 통하여 LLDPE 소재의 경향성을 유추하였다. PE 배관재의 파괴 특성은 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 Stage 3단계에 따라 변화하고 최종수명도 차이가 있다[2].

-Stage1. 연성파괴 (Ductile failure)

-Stage2. 취성 파괴 (Brittle failure)

-Stage3. 기계 환경파괴(Environmental cracking)

연성, 취성 파괴가 외력, 진동, 내압과 같은 기계적 하중 상태에서 의존된 것과 달리 Stage 3은 기계-화학적 상호작용으로 발생한다[3].

이러한 현상은 금속재료의 응력부식균열과 매우 유사한 현상이며 일반적으로 균열 발생, 균열 성장, 균열 균의 형성 및 불안정 균열 전파 등의 3단계로 구분할 수 있다. PE 소재의 응력부식균열의 경우 대부분 수명이 균열 발생과정에서 나타나므로 화학적 열화 거동의 이해가 매우 중요하다[4]. 그리고, 산업현장에서 사용되는 PE 배관재는 내면과 물이 지속해서 접촉하게 되므로 산화(Oxidation)와 염소화 (Chlorination) 같은 열화 과정을 수반한다[5]. J. Won은 PE 배관의 열 노화가 기계적 및 열 거동에 미치는 영향을 받고[6], Guohua 등은 순환적이고 일정한 내부압력을 받는 PE 배관의 열 산화 성

능 및 수명을 연구하였으며, Stage 3의 경우 실험적 평가분석이 어려우나 배관재 내부의 유체특성에 따라 장기간 사용 시 환경적 영향으로 균열이 촉진되는 것을 확인하였다[7]. 본 논문에서도 탱크의 용량과 사용 기간, 저장환경을 토대로 균열 영향성을 연구하였다.

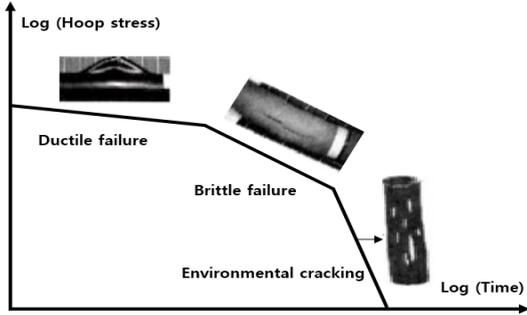


Fig. 1. Destructive Properties of PE Materials.

2.2 LLDPE 탱크 균열 사례

D社 사업장은 LLDPE 소재 화학약품 탱크를 총 103대 설치 하였는데, 주로 폐수처리와 수질 품질 관리 목적으로 NaOCl, H₂O₂, 소포제, Polymer 등을 저장한다. Table 3은 균열이 발생한 저장탱크 현황을 나타내는데, 이중 사용 기간이 10년 이상 이거나, 크기가 10m³ 이상인 약품 탱크의 하부와 측면에서 Fig. 2와 같은 균열이 발생한 것을 확인하였다. Fig. 3은 사업장에 설치된 LLDPE 탱크의 모습으로 산업안전 보건기준에 따라, 사다리 설치할 때 높이 7m 이상일 때 2.5m 지점부터 추락 방지용 등반이 울을 설치하고, 탱크변형 방지를 위해 금속 링으로 보강하였다.

Table 3. Tank of cracked LLDPE material

Chemical	Capacity (m ³)	pH	Construction Year	Crack Position
NaOCl	20	Alkali	2005	Bottom
Polymer	15	Neurtal	2005	Bottom
Heavy metals remover	15	Alkali	2005	Shell, Bottom
Defoamer	10	Neutral	2004	Bottom
H2O2	30	Alkali	2007	Bottom
Defoamer	20	Neutral	2007	Bottom
ST-100	20	Alkali	2010	Bottom
PAC	19	Acid	2014	Bottom

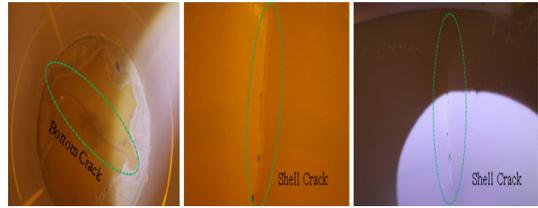


Fig. 2. Cracks in LLDPE Chemical Tank



Fig. 3. LLDPE Chemical Tank

2.3 실험방법 및 결과

본 논문은 LLDPE 탱크에 대한 하부 균열 사례를 통해 선형연구에 따른 검증평가와 현장 상황, 운영 방법에 따라 탱크의 균열에 미치는 요인을 분석하였다[8]. 폴리에틸렌 특성에 대한 경시 변화, 즉 환경응력균열(ESC: Environment Stress Cracking) 영향을 확인하였으며 [9], 실제 현장에서 15년 이상 사용한 것과 신품을 인장시험, FT-IR, 경도, 두께 변화로 비교, 평가하였다. 또한, 환경적 요인으로 온도 차에 의한 열팽창이 클 것으로 판단되어, 크기별 온도 차에 의한 유한요소해석을 진행하였다.

2.3.1 인장시험

인장시험 (Instron 5980 Model)을 위한 시편은 Fig. 4와 같이 ISO 527-4 규격에 근거하여 전체 길이 235mm, 폭 60mm로 시편을 제작하였다. 사용 중인 NaOCl 약품 탱크로부터 본체 옆면(상, 중, 하), 하부, 신품 등 총 5개 위치에서 시편을 각 5개씩 총 25개 제작하였다. PE 탱크의 위치별 두께 측정값은 Table 4에 정리하였다.



Fig. 4. Tensile test Specimen (ISO 527-4)

Table 4. NaOCl tank test specimen thickness

Distinguish	Shell (High)	Shell (Center)	Shell (Below)	Bottom
Thickness	14.6mm	14.9mm	15.4mm	7.2mm

인장시험 결과, 각 부분마다 시편의 두께 차이는 있지만 인장강도는 측정 오차범위 내로 큰 차이가 없었다. 이러한 결과는 대부분의 접촉면에서 내화학성을 유지하고, 전체 면적에 대한 부식의 침투나 수지의 구조적 변화가 없는 것으로 해석된다. 부위별 시험 결과를 수두 압력이 가장 높은 탱크의 Bottom부 S-N Curve로 신제품과 비교하여 Fig. 5, 6에 표현하였다. Table 5는 탱크 Bottom부로 제작한 시험편의 인장시험 결과이다.

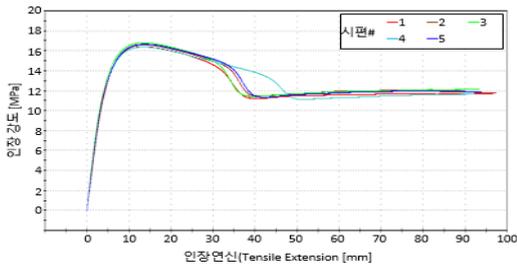


Fig. 5. S-N Curve by the tensile test Bottom

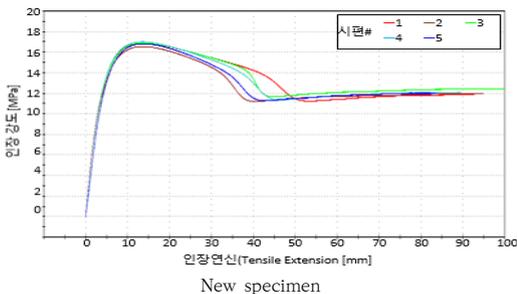


Fig. 6. S-N Curve by the tensile test

Table 5. The result of tensile test in Bottom

	Shell (High)	Shell (Center)	Shell (Below)	Bottom	New article
1	16.9	17.0	16.8	16.3	16.9
2	17.2	17.0	17.1	16.9	16.5
3	17.2	17.0	17.0	16.7	16.9
4	17.2	16.8	17.1	16.6	17.0
5	17.2	17.0	16.9	16.4	16.8
Avg.	17.1	17.0	17.0	16.6	16.8

2.3.2 초음파탐상시험

Fig. 7과 같이 균열이 발생된 탱크 8대 중 6대에 대해 본체 높이 기준으로 상, 중, 하, 3개 구역으로 나누어 두께 측정하였다. 초음파탐상검사 장비(Olympus, Epoch XT)는 가청주파수 이상의 주파수를 갖는 초음파를 이용하여 소재의 내부결함을 검출하거나 두께를 측정할 수 있으며 탐촉자에서 발생한 초음파의 경로상에 결함이 존재할 때 초음파는 반사되고 이 신호를 이용하여 결함의 깊이와 크기를 평가한다. 두께 측정 결과 LLDPE 구조가 Fig. 8과 같은 발포 삼중 층(안쪽, 발포 층, 바깥쪽) 구조로 구성되어 있어, 발포 층 내 기공으로 인해 초음파검사의 신뢰성을 얻기 어려웠다. 이에 따라 두께 변화 확인을 위해 장기간 사용한 탱크 철거 후 실측한 결과, 두께 감소는 없었다. 이러한 결과는 인장시험을 통한 S-N Curve 해석 결과와 일치하는 것으로 확인하였고, 전체 면적에 대한 내화학성을 유지한 채, 침식 등 수지 자체의 물성 변화가 없는 것으로 판단하였다.



Fig. 7. Equipment of Ultrasonic testing



Fig. 8. Schematic for LLDPE material

2.3.3 FT-IR

푸리에 변환형 적외선 분광기 (FT-IR: Fourier Transformation Infrared)는 적외선의 물질 투과 및 반사 성질을 이용하여 분자 내 화학결합의 특성, 즉 작용기를 알아보는 장비이다. 일반적으로 적외선 주파수 범위 ($4000\text{-}400\text{cm}^{-1}$)를 분석하는데, 유기 분자에 적외선을 비추면 그 분자의 쌍극자 모멘트에 변화를 일으키는 진동에너지에 대응하는 주파수의 적외선이 흡수된다. 모든 물질은 적외선 영역에서 고유 흡수대를 가지고 있으므로 분자 고유의 흡수 스펙트럼(고유에너지 준위)을 얻을 수 있고 그 주파수로부터 정성분석이 가능하다. 미지 화합물을 정성 분석하기 위해서는 특정 원자단이나 골격 구조를 가진 화합물의 기준 스펙트럼을 측정 후 미지 시료의 스펙트럼을 동일 조건에서 측정하여 비교함으로써 성분을 예측하였다. 본 연구에서는 Agilent社의 “4300handheld FT-IR” 모델을 사용하여 사용 전 탱크와 NaOCl 탱크의 표면 흡수 스펙트럼을 비교하였는데, Fig. 9, 10의 사용 탱크 시험편의 카보닐기(Carbonylgroup) 흡수 스펙트럼에서 나타난 바와 같이 폴리에틸렌 고분자 끝단에 수소 대신 산소가 결합하여 고분자 사슬이 끊어져 열화가 진행됨을 확인하였다[10,11]. 적외선 그래프의 붉은색 선은 균열이 발생한 탱크 표면의 스펙트럼을 나타내고, 또한 카보닐기는 C-O 결합의 변형 최고조로서 파수(Wave number)가 $1,050\sim 1,150\text{cm}^{-1}$ 영역에서 최고치임을 확인할 수 있었다.

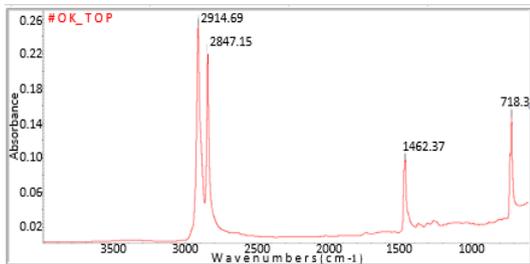


Fig. 9. Specimen by new material

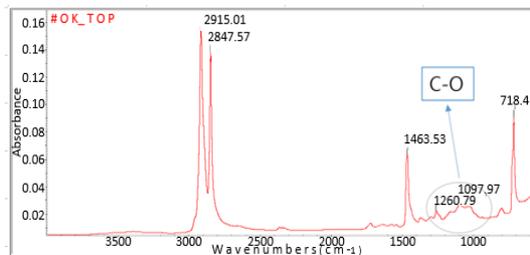


Fig. 10. Used Specimen material

2.3.4 경도시험

최초 설치 후 18년 사용한 탱크의 소재와 신품소재를 대상으로 Hando社의 휴대용 경도시험기(HD-KR10D)로 쇼어D 경도를 측정하였다. 사용 전, 후 배관의 경도 변화로 LLDPE 배관 소재의 외력에 대한 저항의 크기 변화를 확인하였다. 각 경도값은 12회 측정 후 최소값과 최대값을 제외한 평균으로 계산하였다. 전체적으로 안쪽 측정 결과, Tabel 6에서 나타난 바와 같이 상부 대비 Bottom부 경도가 높은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 앞선 FT-IR을 통해 확인한 산화력이 높은 산소가 폴리에틸렌 분자의 사슬을 끊으면서 Bottom 부 표면을 산화시켰기 때문이다.

2.3.5 유한요소해석

약품이 공급되는 실제 조건을 입력하여, 탱크 용량별 수두 압력과 주변 환경 즉 온도 차에 따른 열팽창 (Thermal Expansion) 해석을 통하여 LLDPE 탱크에서 발생하는 변형과 약품 공급 시 가해지는 압력과 수 충격에서의 응력을 해석하였다. 해석에 사용된 소프트웨어는 Dassault systems 社의 Abaqus와 SIEMENS 社 Starccm+를 사용하였다. Table 7은 해석에 사용된 탱크의 제원 및 유한요소해석 조건이다.

해석은 3가지 조건에서 실시하였다. 첫 번째 조건은 약품 공급 중 탱크 바닥 면에 발생하는 작용 응력을 해석하였다. 약품 공급 중 발생하는 최고 유속은 23m/s 이고 바닥 면에 충격 시 속도는 약 17.8m/s 이다. 바닥 면에 발생한 응력은 2MPa 로 계산되었으며, Fig. 11, 12는 약품 공급 중 바닥 면 충격 시 발생 속도 및 응력을 나타냈다. 두 번째는 수두 앞에 의한 탱크 크기별 발생하는 응력을 해석하였다. 해석 결과 Table 8 와 같이 해석되었다. Fig. 13은 약품 수두에 의한 탱크에 발생하는 응력 및 변위를 나타내고 있다. 세 번째는 탱크 내부 온도변화에 따른 열팽창을 해석하였다. 용량별 해석 결과 Tank 용량이 작은 것보다 대용량일수록 하부 응력집중 및 변형이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 실제 균열이 발생한 탱크와 유사한 패턴을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 LLDPE의 이론적 열팽창률 역시 20C 기준 $2.4\times 10^{-4}/\text{C}$ 인 것으로 나타나 결과를 뒷받침하였다 [12]. Fig. 14는 30m^3 기준 탱크의 온도 편차별 바닥 면을 해석하였고, 탱크 용량별 열 팽창 크기 변화를 Table 9에 정리하였다.

Table 6. Measurement data of hardness testing

Measurement position		Hardness
Inside	High	57.0
	Middle	57.1
	Low	57.5
	Bottom	58.3

Table 7. Finite element analysis condition

Supply Pressure	Piping Size	Tank Capacity
2.8kgf/cm ²	65mm	30m ³ ($\varnothing 2,830 \times H 5,650$)
Yield Stress	Fracture Stress	Density
16.5MPa	25MPa	933kg/m ³
Poisson ratio	Specific heat	Thermal conductivity
0.44	2300J/kg*K	0.39W/m*K
Coefficient of thermal expansion	Young's Modulus	Temperature
1.8E-4/K	475MPa	5~34℃(상온23)

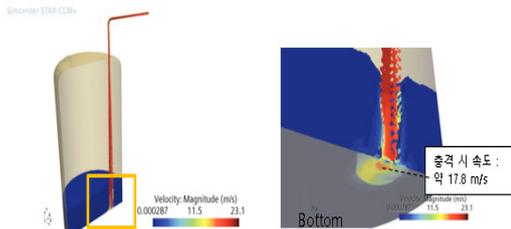


Fig. 11. Stress and velocity due to chemical supply pressure

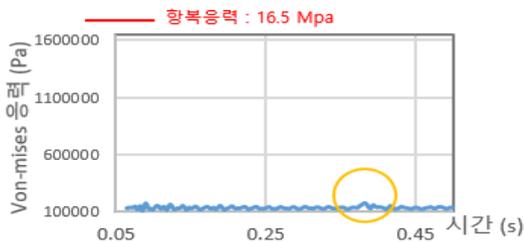


Fig. 12. Stress in Tank Bottom Plate

PE 탱크는 Fig. 15과 같이 변형 방지를 위한 금속보강 링을 설치하여 측면으로의 열팽창을 억제하였다. 탱크 하부는 콘크리트 구조물 위에 설치하여, 수두 압력과 열팽창에 따라 탱크 하부가 중심축을 기준으로 쌍방향으로 굽힘이 발생하고, FT-IR을 통해 확인한 바닥 면 산화 부분에 균열이 형성되어 장기간 반복적으로 응력부식과 균열이 진행된 것으로 확인하였다.

Table 8. Hydraulic stress by tank capacity

Tank Capacity	Size (C*H)	Stress (Mpa)
5m ³	1,900*2,400	1.7
15m ³	2,560*3,760	2.1
30m ³	2,830*5,650	2.9

Table 9. Thermal expansion by tank capacity

Temperature (Ref. 23℃)	Expansion (mm)	Season
5℃(Δt 18℃)	3	Winter
34℃(Δt 18℃)	57	Summer

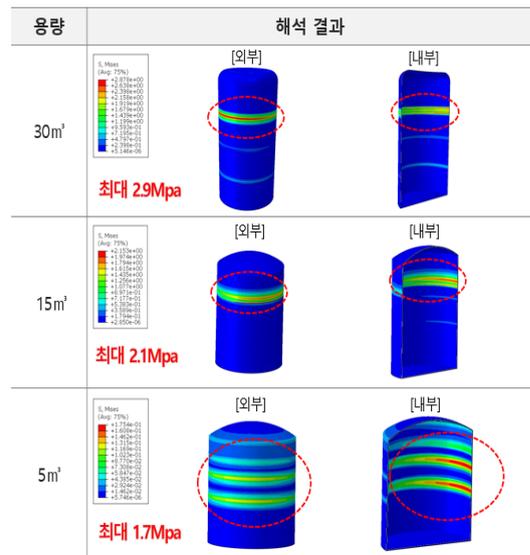


Fig. 13. Stress and displacement by chemical volume

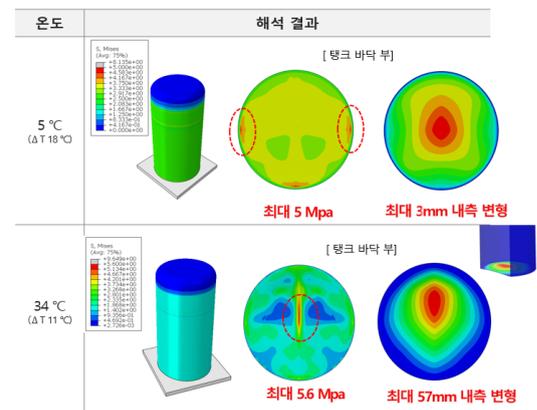


Fig. 14. Stress and displacement by chemical volume

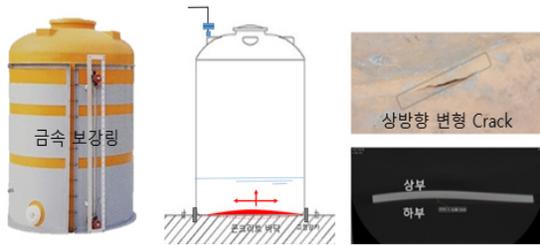


Fig. 15. Crack shape in Tank bottom

3. 결론

본 논문에서는 LLDPE 탱크에 저장하는 화학물질의 내 화학성과 온도 영향에 따른 탱크 균열의 메커니즘을 기계역학 시험과 시뮬레이션을 통해 검증하였다. LLDPE 탱크의 특성상 변형을 방지하기 위해 탱크 본체는 금속 보강 링을 설치했고, 바닥은 콘크리트 위에 고정설치 하여, Fig. 15와 같이 Tank 열팽창과 수축 시 응력이 탱크 바닥 중앙부로 반복 발생하고 있는 것을 응력해석으로 확인하였다. 따라서, 다음과 같은 세 가지 활동을 통해 LLDPE 탱크 바닥 균열을 사전 예방할 수 있다. 첫째, LLDPE의 경우 내화학성은 인장강도, 경도, FT-IR, 두께 등 기계적 강도시험을 통해 검증되었으나, 전산유체역학 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 해석 결과 온도편차가 크고 탱크가 대용량일수록 바닥부 발생 응력과 바닥부 변형이 높다는 것을 검증하였고, 이때 발생한 수 팽창으로 산화되었던 바닥부 미세크랙이 장기간 반복적으로 발생하여 누출로 연결되었다는 것을 확인하였다. 따라서, 사업장 내 약품 저장시설은 열팽창 최소화를 위해 온도관리가 쉽도록 공조시설을 구축하도록 권장한다. 둘째, ESC는 아주 작은 힘에서부터 서서히 점차 발생하였다. 통상적으로 항복응력의 10%부터 시작한다는 연구가 있었고, CFD 해석을 통해 약품주입 낙차에 의한 응력은 LLDPE의 항복응력의 12.2%에 불과 하지만 수격에 의한 손상이 장기간 발생 시 ESC의 원인이 되고 있어, 주입 배관은 “KOSHA GUIDE E-188-2021”에 따라 Dip Pipe 적용하여, 수격현상을 방지하도록 권장한다. 셋째, “화학물질관리법 시행규칙 제49조”에 따라 화학물질 유출 및 누출로 인한 인명피해 시 15분 이내 즉시 신고하여 화학 사고에 대응하여야 한다. 사업의 연속성과 화학사고 방지를 위하여 화학약품 저장 필요시 산 성분은 내부식성이 우수한 “STS+PTFE Lining”을 사용하고, 알칼리성은 STS 탱크 설치를 추천한다.

References

- [1] <https://icis.me.go.kr/main.do>
- [2] Alexander Chudnovsky, O. Manuel Uy and Paul D. Wienhold, "Service life of HDPE drain pipe: The recently proposed specification and an alternative approach". Proceedings of the ASCE Pipeline Division Speciality Conference, Houston, Texas, August 21-24, 2005
DOI: [https://doi.org/10.1061/40800\(180\)90](https://doi.org/10.1061/40800(180)90)
- [3] Lustiger, A., Markham, R.L., "Importance of tie molecules in preventing polyethylene fracture under long-term loading conditions." Polymer 24, 1647-1654
https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NO DE02111593&googleIPSandBox=false&mark=0&ipRange=false&b2cLoginYN=false&isPDFSizeAllowed=true&accessgl=Y&language=ko_KR&hasTopBanner=true
- [4] Joy J. Cheng, Maria A. Polak and Alexander Penlidis, "Influence of micromolecular structure on environmental stress cracking resistance of high density polyethylene". Journal of Tunnelling and Underground Space Technoloty, Vol26, pp.582-593, 2011
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.02.003>
- [5] Won-Young Jung and Jong-Il Weon, "Characterization of Thermal Degradation for High Density Polyethylene: Mechanical and Thermal Behaviors and Long-Term Lifetime Prediction", Polymer(Korea), Vol. 39, No. 6, pp. 873-879, 2015
DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2015.39.6.873>
- [6] J. Weon, "Effects of thermal ageing on mechanical and thermal behaviors of linear low density polyethylene pipe", Korea Research Institute of Chemical Technology, Vol/ 95, Issue 1, pp. 14-20, 2010
DOI : <https://doi.org/10.1016/i.polymdegradstab.2009.10.016>
- [7] Guohua Chen, Yi Yang, Chilou Zhou, Zhihang Zhou, Dapeng Yan, "Thermal-oxidative aging performance and life prediction of polyethylene pipe under cyclic and constant internal pressure" Internal pressure. Journal of applied polymer science, Vol. 136, Issue 28, 2019
DOI: <https://doi.org/10.1002/app.47766>
- [8] Cheng, J. J., "Mechanical and Chemical Properties of High Density Polyethylene: Effects of Microstructure on Creep Characteristics." Ph.D. Thesis. Department of Chemical Engineering, University of Waterloo, CANADA, 2008
URI: <http://hdl.handle.net/10012/4121>
- [9] Altstadt, V., "The influence of molecular variables on fatigue resistance in stress cracking environments." Advances in Polymer Science, Vol. 188, pp.105-152
DOI: <https://doi.org/10.1007/b136975>
- [10] Ward, A.L., Lu, X., Huang, Y., Brown, N., "The mechanism of slow crack growth in polyethylene by an environmental stress cracking agent." Polymer 32 (12), 2172-2178.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(91\)90043-1](https://doi.org/10.1016/0032-3861(91)90043-1)

- [11] Brown, N., Ward, I.M., " The influence of morphology and molecular weight on ductile-brittle transitions in linear polyethylene." Journal of Materials Science 18, 1405-1420.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01111960>
- [12] eXsource, "Thermal and electrical properties of PE." Technical Notes
URL: [https://www.qenos.com/internet/home.nsf/\(LUI%20images\)/Tech%20Guide:%20Thermal%20and%20Electrical%20properties%20of%20PE/\\$File/144%20QEN%20eX%20TN%20Thermal%20&%20Electrical%20properties%20of%20PE.pdf](https://www.qenos.com/internet/home.nsf/(LUI%20images)/Tech%20Guide:%20Thermal%20and%20Electrical%20properties%20of%20PE/$File/144%20QEN%20eX%20TN%20Thermal%20&%20Electrical%20properties%20of%20PE.pdf)

홍 성 철(Sungchul Hong)

[종신회원]



- 2013년 2월 : 성균관대학교 대학원 화학공학과 졸업 (공학박사)
- 2014년 10월 ~ 현재 : 호서대학교 안전공학과 교수 (현: 미래융합대학장), 일반대학원 안전행정공학과 전공교수

<관심분야>

위험성평가, 공정안전, PSM

이 은 석(Eunseok Lee)

[정회원]



- 1995년 7월 ~ 2015년 6월 : 삼성전자
- 2015년 7월 ~ 현재 : 삼성디스플레이
- 2022년 8월 ~ 현재 : 호서대학교 안전행정공학과 석사과정

<관심분야>

위험성평가, 공정안전, PSM

장 현 민(Hyunmin Jang)

[정회원]



- 2010년 6월 ~ 현재 : 삼성디스플레이
- 2023년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 안전행정공학과 석사과정

<관심분야>

위험성평가, 공정안전, PSM