

고밀도 폴리에틸렌 배관의 기계적 물성에 미치는 오존의 영향

정유진¹, 방우석², 이광주^{3*}

¹삼성디스플레이 글로벌인프라총괄IRP그룹, ²한국기술교육대학교 대학원 기계공학과, ³한국기술교육대학교 기계공학부

Effects of Ozone on the Mechanical Properties of HDPE Pipes

Youjin Jeong¹, Wooseok Bang², Kwangju Lee^{3*}

¹Staff Engineer, IRP Group, Global Infra Technology, Samsung Display

²Department of Mechanical Eng., Graduate School of KoreaTech

³School of Mechanical Eng., KoreaTech

요약 디스플레이 제조 공정에서는 초순수 증류수 (DIW: Deionized Water)에 산화력이 강한 오존 가스를 강제로 용해 시켜 오존 수를 만들어 웨이퍼 위에 있는 금속성 이온을 용해한다. 이 과정을 거친 오존 수는 고밀도 폴리에틸렌 (HDPE: High Density Polyethylene, 이하 HDPE) 재질의 배관을 통해 폐수 처리 탱크로 이송된다. 그러나 최근 디스플레이 산업현장에서 HDPE 재질의 오존 폐수 배관에서 2년간 35회가 넘는 배관 균열 사고가 발생하였다. 또한 OLED 패널의 생산량 증가로 오존 폐수 배관의 충수 비율이 약 20%에서 약 90%로 높아지면서, 배관 내의 기층부 오존 농도는 약 14배로 증가하였다. 오존 가스는 인체에 대한 유독성이 매우 크다. 또한, 폐수 배관을 시공할 때 우회 배관을 따로 시공하지 않기 때문에 배관에 문제가 발생할 경우 배관 보수가 완료되는 시점까지 생산을 중단해야 하는 문제가 있다. 본 논문에서는 사용 전후 HDPE 소재 배관의 기계적 물성을 비교하여 보았다. 그 결과 5년간 오존 가스에 노출된 HDPE 배관은 미사용 배관에 비교하여 인장 강도, 연신율, 내압 파열강도, 충격에너지, 경도 등의 저하가 발생 되었으며, 배관 표면에 산화와 미세 균열이 발생하여 사용 안전성이 매우 저하되었음을 확인하였다. HDPE 배관에서 환경에 의한 균열이 발생하기 전에 주기적인 점검이 중요함을 확인할 수 있었다.

Abstract In the display manufacturing process, high-density polyethylene (HDPE) piping is used for deionized water waste where ozone gas is dissolved. In the past two years, 35 cracks were found in HDPE piping at display manufacturing sites. Leaked ozone gas from cracks is highly toxic to the human body. In this study, the properties of HDPE pipes were compared before and after use for five years. For this purpose, specimens were obtained from new pipes that had never been used and old pipes that had been used for five years to handle wastewater with ozone gas. Old pipes had a decrease in tensile strength, percent elongation, burst strength under internal pressure, impact strength, hardness, etc., compared to new ones. Oxidation and micro-cracks also occurred on the surface of pipes after use for five years, which significantly reduced their safety. This study shows the importance of periodic inspection of HDPE pipes before cracks occur.

Keywords : Piping, Ozone Gas, HDPE, Mechanical Properties, Crack

본 논문은 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-004)

*Corresponding Author : Kwangju Lee(Korea University of Technology and Education)

email: klee@koreatech.ac.kr

Received November 10, 2022

Revised December 5, 2022

Accepted February 3, 2023

Published February 28, 2023

1. 서론

디스플레이 제조 공정에서 사용된 오존 수는 고분자 소재의 배관을 통해 폐수 처리 탱크로 이송된다. 고분자 소재 중에서, 고밀도 폴리에틸렌 (HDPE: High Density Polyethylene, 이하 HDPE)은 오랜 수명, 내화학적, 높은 충격 저항성, 내부식성 등의 장점으로 디스플레이 제조 공정의 배관에서 많이 사용되고 있다.

HDPE 소재의 활용이 증가함에 따라 이 소재의 기계적 성능 평가에 많은 연구가 진행되었다. HDPE 소재의 파괴기구는 제1단계인 연성파괴 (ductile failure), 제2단계인 취성파괴 (brittle failure), 제3단계인 환경파괴 (environmental cracking)의 세 가지로 변화하고 최종 수명도 큰 차이를 나타낸다[1].

열가소성 수지로 제작된 배관의 장기 정수압 강도를 예측하는 방법은 ISO 9080과 같은 표준에서 명시하고 있다[2]. Ryu 등은 HDPE 용접부의 단기간 파손을 연구하였다[3]. Guidara 등은 결함이 존재하는 HDPE 배관의 내압 파열 시험을 수행하였으며 이를 수치해석적으로 모사하였다[4].

Parsons 등은 HDPE에서 단계적 피로와 크리프 균열의 상관관계를 연구하였다[5]. Lu 등은 수직 하중을 받는 폴리에틸렌의 불연속 균열 성장을 연구하였다[6]. Chen 등은 HDPE 배관의 피로 및 파괴 거동을 연구하였다[7]. Wee 등은 균열층 이론 (crack layer theory)에 의한 균열 성장을 연구하였다[8]. Chudnovsky는 균열층을 이용해 배관용 HDPE의 균열 성장에 대한 연구를 진행하였다[9].

앞에서 언급된 파괴기구가 내압과 같은 기계적 하중 상태에 의존하는 것과 달리, 환경 파괴 (environmental cracking)는 기계-화학적 상호작용으로 발생 된다. HDPE 배관 소재의 경우, 배관 내면과 물이 지속해서 접촉하게 되므로 산화 (oxidation)나 염소화 (chlorination)와 같은 열화 과정을 수반한다. Weon은 저밀도 폴리에틸렌 (LDPE: Low Density Polyethylene) 배관의 열 노화가 기계적 및 열적 거동에 미치는 영향을 연구하였다[10]. Chen 등은 주기적이고 일정한 내부압력을 받는 폴리에틸렌 파이프의 열 산화에 의한 노화 및 수명을 연구하였다[11].

최근 디스플레이 산업현장에서 HDPE 소재의 오존 폐수 배관에서 2년간 35회가 넘는 배관 균열 사고가 발생하였다. 오존 가스는 인체 유독성이 매우 크다. 또한, 폐수 배관을 시공할 때 우회 배관을 따로 시공하지 않기 때

문에 배관에 문제 발생하면 보수가 완료되는 시점까지 생산을 중단해야 하므로 생산에 큰 영향을 미친다.

HDPE 배관의 균열은 대부분 설치 후 수년 후에 발생한다. 따라서 배관으로 사용되지 않은 새 소재와 배관으로 수년 동안 사용된 소재의 물성을 비교함으로써, 수년 동안 사용된 배관의 물성이 어떻게 변화하였는지 고찰해 볼 필요가 있다. 본 논문에서는 오존과 HDPE 소재의 반응으로 인한 인장강도, 내압 파열강도, 충격강도, 경도, 폴리에틸렌의 분자 사슬 구조, 표면 상태 등의 변화와 산소 원자 함량의 변화 등을 살펴봄으로써, 고농도의 오존 가스가 HDPE 소재의 기계적 물성에 미치는 영향을 확인하고자 한다.

2. 사용 전후 HDPE 배관의 물성 측정 실험

오존 가스를 처리한 폐수로 인해 HDPE 소재 배관의 물성 저하를 확인하기 위하여 인장강도, 내압 파열강도, 충격강도, 경도, HDPE 분자 사슬 구조 및 산소 원자 함량을 측정하였다. 전혀 사용되지 않은 HDPE 배관 소재 (이하 배관 소재 A)와 5년간 오존에 노출된 HDPE 배관 소재 (이하 배관 소재 B)를 대상으로 하였다.

배관 소재 B의 경우, 배관 내의 폐수 정체 등으로 기층부의 영역이 협소해짐에 따라서 400ppm 이상 농도의 오존가스에 노출되어 왔다.

2.1 인장 실험

배관 소재의 인장강도를 측정하기 위하여, 배관 소재 A와 B를 사용하여 ASTM D638 기준에 맞도록 Fig. 1과 같이 인장 실험 시편을 제작하였다[12].

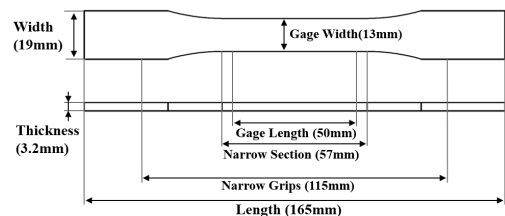


Fig. 1. Dimensions of tensile test specimens

실험 장비는 제조회사 Instron의 모델 5980 인장시험기를 사용하였다. 인장시험기의 사양을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Specifications of tensile test machine

Maximum load	250kN
Test speed	0.0005~508mm/min
Load tolerance	± 0.4%
Location resolution	0.004μm
Size	1130mm(W),777mm(D),2773mm(H)
Weight	1141kg

2.2 수압 실험

배관 소재의 내압 파열강도를 측정하기 위하여 수압 실험을 수행하였다. 이를 위하여, 외부 지름이 100mm 인 배관으로부터 배관 소재 A와 B를 각각 700mm의 길이로 절단한 다음에 플랜지를 사용하여 배관 양쪽을 마감하였다. 한국산업안전보건공단 (KOSHA: Korea Occupational Safety and Health Agency)의 지침 D-54 [13]와 ASTM D1598 [14]의 기준에 따라서 배관 소재가 파열 될 때까지 온도 20°C의 물을 사용하여 수압 실험을 실시하였다. 최초 10분 동안 10kgf/cm²의 압력을 유지하고, 30초 동안 압력을 10kgf/cm²에서 20kgf/cm²으로 선형적으로 증가하고, 9분 30초 동안 압력을 20kgf/cm²으로 유지하고, 30초 동안 압력을 20kgf/cm²에서 50kgf/cm²으로 선형적으로 증가하고, 다시 9분 30초 동안 압력을 50kgf/cm²으로 유지하면서 파열이 발생하는지를 확인하였다. 실험에 사용한 장비와 시편을 Fig. 2에 나타내었다. 실험 장비의 사양을 Table 2에 정리하였다.

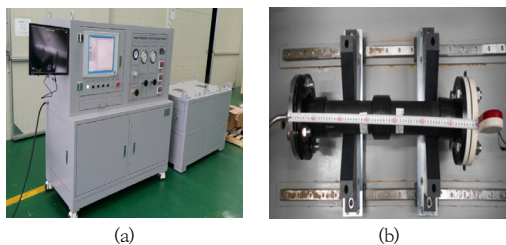


Fig. 2. Burst pressure tester and specimen
(a) Tester (b) Specimen

Table 2. Specifications of burst pressure tester

Maximum pressure	300bar
Fluid	Water
Heater temperature	80°C
Specimen Size	within 1,000mm
Size	1800mm(W),700mm(D),1500mm(H)
Weight	500kg

2.3 충격 실험

길이 55mm, 두께 10.5mm, 폭 10.5mm 및 깊이 3.0mm의 V-형상의 홈 (notch) 형태로 시편을 가공하여 충격실험을 수행하였다. 이를 위하여 제조회사 QSY의 모델 QM 700CA 샤르피 충격시험기를 사용하였다. 충격시험기의 사양을 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Specifications of Charpy impact tester

Lift motor	DC 2kW
Brake	Auto stopping brake
Indicator	LCD display (RS232C Type)
Net weight	480kg
Pendulum angle	135°
Striking center	898.2mm
Capacity	Max 450J
Power	220V, 50/60Hz

2.4 경도 실험

배관 소재 A와 B에 대하여 쇼어 D 경도를 측정하였다. 이를 위하여 제조회사 Hando의 모델 HD-KR10D 휴대용 경도 시험기를 사용하였다. 사용 전후 배관 (소재 A와 B)의 경도 변화를 확인하여 HDPE 배관 소재의 외력에 대한 저항의 크기 변화를 확인하였다. 사용한 장비를 Fig. 3에 나타내었다. 사용한 장비의 사양을 Table 4에 정리하였다.



Fig. 3. Shore D hardness tester

Table 4. Specifications of Shore D hardness tester

Measurement range	0~100°
Minimum scale	0.5HD
Material	Plastic, Rubber, Sponge

2.5 푸리에 변환 적외선 분광 시험

시료에 적외선을 비추면 극성을 갖는 분자들 간에 진동과 회전 들뜸에 상응하는 에너지의 흡수가 일어나는데, 이 때 흡수 정도를 주파수에 따라 측정함으로써 특정

분자의 작용기 여부나 분자 운동에 대한 정보를 얻는 방법이 푸리에 변환 적외선 분광 시험 (FT-IR Spectroscopy: Fourier Transform Infrared Spectroscopy)이다. 일반적으로 중간 범위의 주파수 ($4000\sim 400\text{cm}^{-1}$)를 사용한다.

유기 분자에 적외선을 비추면 그 분자의 쌍극자 모멘트에 변화를 일으키는 진동에너지에 대응하는 주파수의 적외선이 흡수된다. 모든 물질마다 적외선 영역에서 고유의 흡수대를 가지고 있으므로 분자 고유의 흡수 스펙트럼 (고유 에너지 준위)을 얻을 수 있다. 미지 화합물을 정성 분석하기 위해서는 특정 원자단이나 골격구조를 가진 화합물의 기준 스펙트럼을 측정한다. 미지 시료의 스펙트럼을 동일 조건에서 측정해 비교함으로써 성분을 예측할 수 있다. Fig. 4에서는 적외선 스펙트럼의 예시를 나타내었다. 본 연구에서는 제조회사 Agilent의 모델 4300 장비를 사용하였다 (Fig. 5).

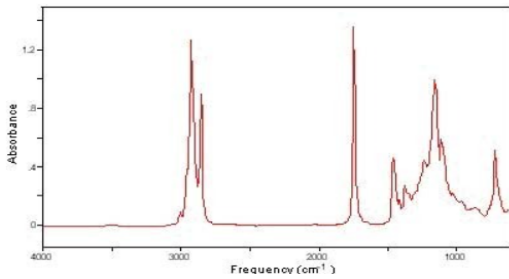


Fig. 4. Example of IR spectrum



Fig. 5. Portable FT-IP device (manufacturer Agilent and model 4300)

2.6 표면 관찰 및 표면 성분 분석 시험

주사형 전자현미경 (SEM: Scanning Electron Microscope, 이하 SEM)과 함께 이에 부착된 에너지 분산 분광기 (EDS: Energy Dispersive Spectroscopy, 이하 EDS)를 사용하여 배관 시편의 표면을 관찰하고 표면 성분을 분석하였다. 배관 소재 A와 B로부터 각각 가

로 30mm와 세로 30mm의 크기로 시편을 채취하여, SEM-EDS를 사용하여 3500~5000배의 배율로 배관 시편의 표면 상태를 촬영하고 성분을 확인하였다.

이를 위하여 제조회사 FEI의 모델 Quanta 3D FEG를 SEM-EDS 장비로 사용하였다 (Fig. 6). 사용한 장비의 사양을 Table 5에 정리하였다.



Fig. 6. SEM-EDS device (manufacturer FEI and model name Quanta 3D FEG)

Table 5. Specifications of SEM-EDS device (manufacturer FEI and model name Quanta 3D FEG)

Electron optics	High-resolution field emission SEM column optimized for high brightness/high current
Ion optics	Magnum ion column with Ga liquid metal ion source with a lifetime of 1500 hours
Electron beam resolution	- 1.2nm@30kV@high vacuum mode - 1.5nm@30kV@ESEM mode - 1.5nm@3kV@low vacuum mode
Ion beam resolution	10nm@30kV@1pA
Accelerating voltage	200V to 30kV for electron beam imaging 5 to 30kV for ion beam imaging
Detectors	Everhardt - Thornley SED, Low-vacuum SED, Gaseous SED, IR-CCD, EDS detector and Gaseous BSED
Specimen stage	4-axis motorized eucentric goniometer stage X=50mm, Y=50mm, T=-15+75°(manual), Z = 50mm (25mm motorized), rotation = 360° continuous

3. 사용 전후 HDPE 배관의 물성 측정 결과

3.1 인장 실험 결과

배관 소재 A (미사용 HDPE)와 배관 소재 B (5년 동안 오존에 노출된 HDPE)를 사용하여 Fig. 1의 형상대로 각각 4개의 시편을 제작하였다. 두 소재에 대한 응력-변

형률 선도를 Fig. 7에 도시하였다. 인장 실험의 결과를 Table 6과 Table 7에 정리하였다. 배관 소재 A와 B의 평균 인장강도는 각각 20.02MPa와 18.48MPa로 측정되었다. 미사용 HDPE 시편의 인장강도에 비하여, 5년 동안 오존에 노출된 HDPE 시편의 인장강도가 약 7.7% 감소한 것을 확인하였다. 배관 소재 A와 B의 평균 연신율은 각각 378%와 158%로 측정되었다. 미사용 HDPE 시편의 연신율에 비하여, 5년 동안 오존에 노출된 HDPE 시편의 연신율이 약 58.2% 감소한 것을 확인하였다. 이는 5년 동안 오존에 노출된 HDPE가 기계-화학적 영향으로 인하여 취성화되었음을 나타낸다.

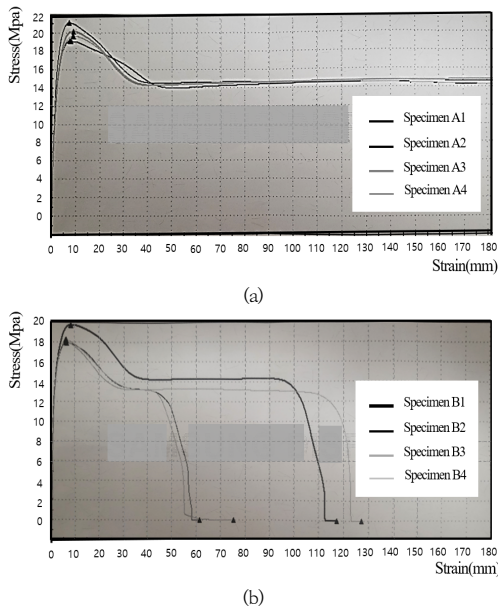


Fig. 7. Stress-strain curves from tension tests
(a) Specimen A (HDPE which had never been used)
(b) Specimen B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)

Table 6. Tension test results of specimens A (HDPE which had never been used)

Specimen	Tensile strength (MPa)	Percent elongation (%)
A1	19.09	371
A2	21.15	375
A3	19.68	383
A4	20.16	384
Average	20.02	378

Table 7. Tension test results of specimens B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)

Specimen	Tensile strength (MPa)	Percent elongation (%)
B1	19.70	194
B2	17.93	102
B3	18.24	211
B4	18.07	125
Average	18.48	158

3.2 수압 실험 결과

배관 소재 A와 B의 수압 실험에서는 각각 1개의 시편을 사용하였다. 실험을 통하여 측정된 파열강도를 Fig. 8에 나타내었다. 두 시편 모두 시편의 중앙부 근처에서 파열이 발생하였다. 배관 소재 A와 B의 시편은 각각 50kgf/cm² (4.9MPa)와 38kgf/cm² (3.7MPa)의 압력에서 파열되었다. 미사용 HDPE 시편의 파열강도에 비하여, 5년 동안 오존에 노출된 HDPE 시편의 파열강도가 약 24.0% 감소한 것을 확인하였다.

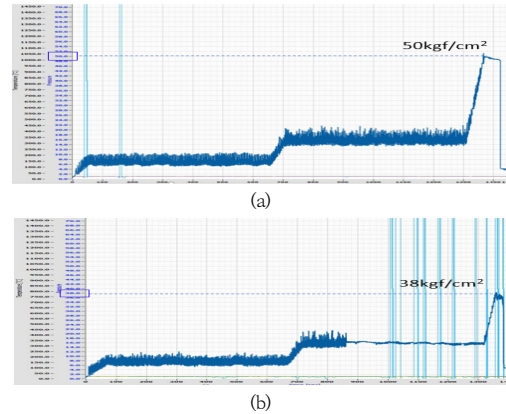


Fig. 8. Burst pressure test results
(a) Specimen A (HDPE which had never been used)
(b) Specimen B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)

3.3 충격 실험 결과

배관 소재 A와 B로부터 각각 4개의 시편을 채취하여 충격 실험을 실시하였다. 충격 실험의 결과를 Table 8과 Table 9에 정리하였다. 배관 소재 A와 B 시편의 평균 충격강도는 각각 441.29KJ/m²과 279.03KJ/m²로 확인되었다. 미사용 HDPE 시편의 충격강도에 비하여, 5년 동안 오존에 노출된 HDPE 시편의 충격강도가 약 36.8% 감소하였음을 확인하였다.

Table 8. Impact test results of specimens A (HDPE which had never been used)

Specimen	Fracture energy (J)	Impact strength (KJ/m ²)	Hammer climb angle after fracture(°)
A1	37.06	470.65	129.1
A2	36.42	462.54	129.4
A3	33.68	427.81	130.7
A4	31.82	404.15	131.6
Average	35.36	441.29	129.9

Table 9. Impact test results of specimens B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)

Specimen	Fracture energy (J)	Impact strength (KJ/m ²)	Hammer climb angle after fracture(°)
B1	21.20	269.31	134.8
B2	16.81	213.48	135.1
B3	26.19	332.69	134.4
B4	23.67	300.63	135.7
Average	22.74	279.03	134.9

3.4 경도 실험 결과

배관 소재 A와 B에서 각각 3개의 시편을 채취하여 각각 5회씩 경도 실험을 수행하여 평균값을 구하였다. 경도 실험의 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 경도 실험의 결과를 Table 10과 Table 11에 정리하였다. 배관 소재 A와 B의 쇼어 D 경도는 각각 64.8HSD와 50.4HSD로 확인되었다. 미사용 HDPE 시편의 경도에 비하여, 5년 동안 오존에 노출된 HDPE 시편의 경도가 약 22.2% 감소하였음을 확인하였다.

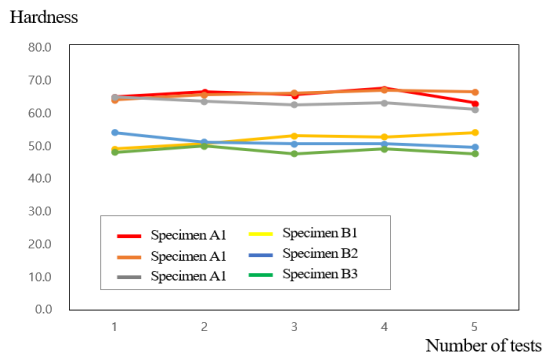


Fig. 9. Hardness test results
 (a) Specimen A (HDPE which had never been used)
 (b) Specimen B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)

Table 10. Hardness test results of specimens A (HDPE which had never been used)

Specimen	Hardness (HSD)					
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Average
A1	65.0	66.5	65.5	67.5	63.0	65.5
A2	64.0	65.5	66.0	67.0	66.5	65.8
A3	65.0	63.5	62.5	63.0	61.0	63.0
Average						64.8

Table 11. Hardness test results of specimens B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)

Specimen	Hardness (HSD)					
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Average
B1	49.0	50.5	53.0	52.5	54.0	51.8
B2	54.0	51.0	50.5	50.5	49.5	51.1
B3	48.0	50.0	47.5	49.0	47.5	48.4
Average						50.4

3.5 푸리에 변환 적외선 분광 시험 결과

작용기의 적외선 스펙트럼 특성을 통해 배관 소재 A와 B 시편의 분자구조를 확인하였다. Fig. 10에서는 오존 가스 and 폴리에틸렌 분자의 반응 메커니즘을 도시하였다.

배관 소재 A와 B의 적외선 스펙트럼을 각각 파란색과 붉은색 선으로 Fig. 11에서 나타내었다. 이 그림에서, 배관 소재 B 시편의 붉은 색 스펙트럼은 정점이 1680~1780cm⁻¹ 영역의 파수 (wavenumber)에서 발생함을 확인할 수 있다. 이 영역의 파수는 카르보닐기 (C=O)의 흡수 스펙트럼을 나타낸다. 이는 수소 원자보다 산화력이 더 높은 오존이 폴리에틸렌 분자의 수소와 교환되어 폴리에틸렌 분자의 사슬이 끊어지며 시편의 표면이 산화됐다는 것을 나타낸다.

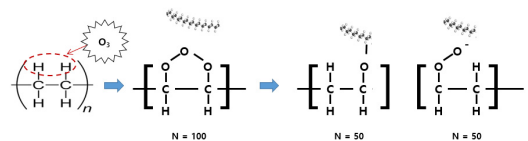


Fig. 10. Reaction mechanism between polyethylene and ozone gas

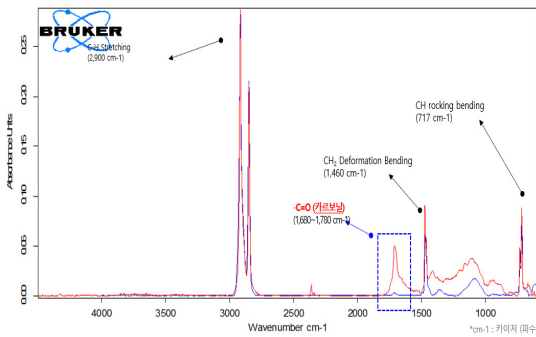


Fig. 11. IR spectrum of specimens A and B
 (a) Specimen A (HDPE which had never been used)-blue line
 (b) Specimen B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)-red line

3.6 표면 관찰 및 표면 성분 분석 시험 결과

배관 소재 A와 B로부터 각각 가로 30mm와 세로 30mm의 크기로 시편을 채취하여, SEM-EDS로 배관 시편의 표면 상태를 촬영하고 성분을 확인하였다.

SEM으로 관찰한 시편의 표면 상태를 Fig. 12에서 나타내었다. 이 그림으로부터 배관 소재 B 시편의 표면에 백화현상 및 미세균열이 나타남을 확인할 수 있었다 (Fig. 12b).

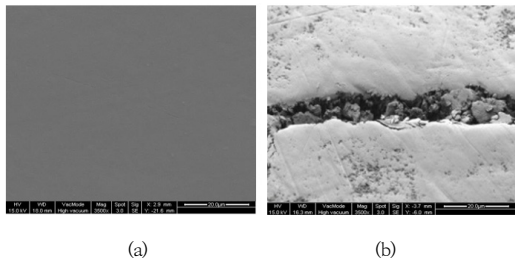


Fig. 12. SEM results
 (a) Specimen A (HDPE which had never been used)
 (b) Specimen B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)

EDS 결과를 Table 12에서 정리하였다. 이 표를 통하여, 배관 소재 A 시편과 비교하여 배관 소재 B 시편의 산소 원자 함량이 약 10.7% 증가한 것을 확인하였다. HDPE 배관 소재가 오존에 노출됨으로써, 산소 원자와 HDPE와 반응이 일어난 것을 알 수 있다.

Table 12. EDS test results - Specimen A (HDPE which had never been used), Specimen B (HDPE which had been exposed to ozone for five years)

Chemical element	Specimen A		Specimen B	
	Weight %	Chemical atom %	Weight %	Chemical atom %
C	95.46	96.61	73.67	83.51
O	4.41	3.35	16.47	14.01
F	0.01	0.00	0.01	0.01
Si	0.02	0.01	0.15	0.07
Al	0.00	0.00	0.09	0.05
P	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.02	0.01	0.00	0.00
Cl	0.01	0.00	0.00	0.00
Ca	0.02	0.01	0.03	0.01
Fe	0.06	0.01	0.07	0.02
Ga	0.00	0.00	9.52	2.32

4. 결론

사용된 적이 없는 HDPE 배관 소재와 5년 동안 오존에 노출된 HDPE 배관 소재에 대한 인장강도, 내압 파열강도, 충격강도, 비커스 경도, HDPE의 분자 사슬 구조, 표면 상태 및 산소 원자 함량 등을 측정해 보았다. 이를 통하여 미사용 HDPE 배관 시편에 비하여, 5년 동안 오존에 노출된 HDPE 시편의 기계적 물성이 다음과 같이 변화하였음을 확인할 수 있었다.

- 인장강도가 약 7.7% 감소 (인장 실험)
- 연신율이 약 58.2% 감소 (인장 실험)
- 내압 파열강도가 약 24.0% 감소 (수압 실험)
- 충격강도가 약 36.8% 감소 (충격 실험)
- 쇼어 D 경도가 약 22.2% 감소 (경도 실험)
- 수소 원자보다 산화력이 더 높은 오존이 HDPE 분자의 수소 원자와 교환됨으로써 시편의 표면이 산화 (푸리에 변환 적외선 분광 시험)
- 표면에 백화 현상과 미세 균열이 발생 (SEM을 사용한 시편의 표면 관찰)
- 산소 원자 함량이 약 10.7% 증가 (EDS)

5년 동안 오존에 노출된 HDPE 시편에서는 기계-화학적 열화에 의해 인장강도가 크게 감소하며, 취성이 증가하고, 충격에너지의 흡수능력이 작아 충격에 대한 저항이 작아지는 것을 확인하였다

HDPE와 같은 고분자 수지의 경우 인장강도와 경도는 서로 비례하므로, 5년 동안 오존에 노출된 HDPE 시편의 인장강도와 경도가 모두 감소하는 것을 알 수 있었다.

5년 이상 오존에 노출된 배관 소재의 기계적 물성 저하가 심각하므로, 오존에 노출된 배관계를 사용할 경우에는 주기적인 점검을 통하여 안전을 도모하는 것이 중요하다.

오존에 노출이 되면 HDPE 배관의 기계적 물성 저하가 발생하므로, 디스플레이 제조 공정에서는 배관 내에서 오존 농도를 가능하면 낮게 유지하는 것이 배관계의 수명을 연장시킬 수 있는 방법이 될 것이다. 배관 내에서 폐수의 정체가 발생하면, 배관 내 기층부에서 오존 농도가 상승하게 된다. 따라서 배관 내에서 폐수의 정체가 발생하지 않도록 배관을 설계하여야 배관계의 수명을 연장시킬 수 있다.

References

- [1] B.H. Choi, "Observation and modeling of fracture behaviors of polyethylene pipes", *Proceedings of Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, pp. 53-54, 2018.
- [2] International Organization for Standardization, "ISO 9080: Plastics piping and ducting systems - Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation", 2012.
- [3] H.W. Ryu, J.J. Han, Y.J. Kim, J.S. Kim, J.H. Kim, and C.H. Jang, "Development of a short term failure assessment of high density polyethylene pipe welds", *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 39, No. 4, pp. 405-413, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.4.405>
- [4] M.A. Guidara, M.A. Bouaziz, C. Schmitt, J. Capelle, E. Haj Taïeb, Z. Azari, and S. Hariri, "Structural integrity assessment of defected high density polyethylene pipe: burst test and finite element analysis based on J-integral criterion", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 57, pp.282-295, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.042>
- [5] M. Parsons, E. Stepanov, A. Hiltner, and E. Baer, "Correlation of stepwise fatigue and creep slow crack growth in high density polyethylene", *Journal of Materials Science*, Vol. 34, No. 14, pp. 3315-3326, 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004616728535>
- [6] X. Lu, R. Qian, and N. Brown, "Discontinuous crack growth in polyethylene under a constant load", *Journal of Materials Science*, Vol. 26, No. 4, pp. 917-924, 1991.
- [7] H. Chen, R.J. Scavuzzo, and T.S. Srivatsan, "Influence of joining on the fatigue and fracture behavior of high density polyethylene pipe", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol 6, No. 4, pp. 473-480, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00576768>
- [8] J.W. Wee and B.H. Choi, "Modeling of stress corrosion crack growth and lifetime of pipe grade high density polyethylene by using crack layer theory", *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 11, No. 2, pp. 45-50, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.20466/KPVP.2015.11.2.045>
- [9] A. Chudnovsky, "Slow crack growth, its modeling and crack-layer approach: A review", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 83, pp. 6-41, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2014.05.015>
- [10] J.I. Weon, "Effects of thermal aging on mechanical and thermal behaviors of linear low density polyethylene pipe", *Polymer Degradation and Stability*, Vol 95, Issue 1, pp. 14-20, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.10.016>
- [11] G. Chen, Y. Yang, C. Zhou, Z. Zhou, and D. Yan, "Thermal-oxidative aging performance and life prediction of polyethylene pipe under cyclic and constant internal pressure", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 136, Issue 28, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1002/app.47766>
- [12] ASTM International, "ASTM Standard D638: Standard test method for tensile properties of plastics", 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- [13] Korea Occupational Safety and Health Agency, "KOSHA Guide D-54: Technical instructions about pressure test of chemical equipment", 2014.
- [14] ASTM International, "ASTM Standard D1598: Standard test method for time-to-failure of plastic pipe under constant internal pressure", 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1520/D1598-21>

정 유 진(Youjin Jeong)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 (메카트로닉스공학학사)
- 2021년 8월 : 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 삼성디스플레이 글로벌인프라총괄 IRP그룹 Staff engineer

<관심분야>

구조역학, 재료거동

방 우 석(Wooseok Bang)

[준회원]



- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (기계공학학사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학 대학원 기계공학과 석사과정 재학

<관심분야>

구조역학, 재료거동

이 광 주(Kwangju Lee)

[종신회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 항공공학 (항공공학학사)
- 1991년 11월 : 미국 Virginia Polytechnic Institute and State University (항공우주공학박사)
- 1992년 6월 ~ 1992년 12월 : 국방과학연구소 선임연구원
- 1993년 1월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

구조역학, 재료응용