



[UCI]I804:24011-200000334834



2020년 8월 석사학위 논문

블로우 사출 HDPE 해상부표의 전산구조해석에 관한 연구

조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학과 김 동 주



블로우 사출 HDPE 해상부표의 전산구조해석에 관한 연구

A Study on Computational Structural Investigations for a HDPE Injection Blow Molded Marine Buoy

2020년 08월 28일

조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학과 김 동 주



블로우 사출 HDPE 해상부표의 전산구조해석에 관한 연구

지도교수 박 설 현

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함 2020년 5월

조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학과 김 동 주



김동주의 석사학위논문을 인준함

위원장	· 조선대학교	卫	수	<u>김지훈(인)</u>
위 원	조선대학교	교	수	<u> 곽 재 복 (인)</u>
위 원	조선대학교	卫	수	박 설 현 (인)

2020년 6월

조선대학교 대학원



목 차

LIST OF TABLES I
LIST OF FIGURES IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII
ABSTRACT ······ IV
제 1장 서 론
1.1 연구 배경 및 필요성
1.2 연구 목적 및 내용
제 2장 부표 소재의 기계적 특성
2.1 HDPE 기계적 특성10
2.1.1 인장실험에서 변형 거동
2.2 부표 소재 인장실험
제 3장 부표 소재의 열적 특성
3.1 부표 소재 열팽창계수
제 4장 블로우 사출 HDPE 해상부표의 비선형 구조해석… 31
4.1 비선형 유한요소 해석 개요
4.2 해석 모델링 및 경계조건 설정
제 5장 결론
[참고문헌]



LIST OF TABLES

Table 2.1 Summary	of measured density of specimen 11
Table 2.2 Summary	of measured Izod impact strength 13
Table 2.3 summary	of measured tensile properties of specimen19
Table 3.1 Coefficier	t of thermal expansion measured for Y-axis at $0.6{}^\circ\!{\rm C}$ / $\min\cdots\cdots$ 27
Table 3.2 Coefficier	t of thermal expansion measured for X-axis at $0.6{}^\circ\!{\rm C}$ / $\min\cdots\cdots$ 27
Table 3.3 Coefficier	t of thermal expansion measured for Y-axis at $5^\circ\!\mathrm{C}$ / min 28
Table 3.4 Coefficier	t of thermal expansion measured for X-axis at $5^\circ\!\mathrm{C}$ / min 28
Table 4.1 summary	of the number of nodes and elements
Table 4.2 Blended 1	HDPE Properties applied for FEM analysis
Table 4.3 Summary	of load conditions 40
Table 4.4 Summary	of thermal load condition47

LIST OF FIGURES

Figure	1.1	Microplastics and ingestion by Zooplankton1
Figure	1.2	Guidelines for the implementation of an eco-friendly buoy supply support
		project ····· 2
Figure	1.3	Domestic aquaculture license area and number of licenses 3
Figure	1.4	Blow injection process chart 4
Figure	1.5	Edge and Scrub generated during molding4
Figure	1.6	Designed buoy 6
Figure	1.7	Pressure change with depth
Figure	1.8	Schematics of Eco-friendly buoy performance test



Figure	2.1	Specimen and electronic scale used for density measurements 10
Figure	2.2	Measured density of specimen used in this study11
Figure	2.3	Schematics of Izod impact test 12
Figure	2.4	Measured Izod impact strength for specimen used in this study13
Figure	2.5	Engineering S-S curve
Figure	2.6	Tensile specified in ASTM D 638 17
Figure	2.7	Photograph of tensile test and specimen after fracture
Figure	2.8	Measured engineering stress-strain curve for specimen used in this study $\!18$
Figure	2.9	S-S curve offset by 0.1 %
Figure	2.10	D Blended HDPE Engineering-True S-S curve 20
Figure	3.1	Thermal output measured as a function of temperature for 1018 steel $\cdots 23$
Figure	3.2	Thermal chamber used in this study and its specifications 24
Figure	3.3	Schematics of thermal expansion coefficient measurement apparatus24
Figure	3.4	Measurements of voltage and temperature with respects to time
Figure	3.5	Changes in the gauge factor as a function of temperature
Figure	3.6	Measured thermal expansion coefficient at given conditions each axis $\cdots 30$
Figure	4.1	Numerical scheme for Newton-Rapson method
Figure	4.2	Geometrical representation of stress tensor
Figure	4.3	Summary of boundary conditions applied for the FEM analysis
Figure	4.4	A Symmetry condition for computational model
Figure	4.5	computational domain and meshed model
Figure	4.6	True S-S curve after yield strength for Blended HDPE
Figure	4.7	Calculated von mises stress and strain distributions for a 4mm buoy 41
Figure	4.8	Effective volume for a 4mm buoy re-calculated after deformation 42
Figure	4.9	Calculated von mises stress and strain distributions for a 5mm buoy 43 $$
Figure	4.10	D Effective volume for a 5mm buoy re-calculated after deformation 44
Figure	4.1	l Calculated von mises stress and strain distributions for a 6mm buoy… 45
Figure	4.12	2 Effective volume for a 6mm buoy re-calculated after deformation 46
Figure	4.13	3 Calculated von mises stress and strain distributions for a 4mm buoy
		after thermal deformation 48

Figure 4.14 Effective volume for a 4mm buoy re-calculated after



	thermal deformation
Figure 4.15	Calculated von mises stress and strain distributions for a 5mm buoy
	after thermal deformation
Figure 4.16	Effective volume for a 5mm buoy re-calculated after
	thermal deformation
Figure 4.17	Calculated von mises stress and strain distributions for a 6mm buoy
	after thermal deformation
Figure 4.18	Effective volume for a 6mm buoy re-calculated after
	thermal deformation



ABSTRACT

A Study on Computational Structural Investigations for a HDPE Injection Blow Molded Marine Buoy

Kim, Dong-ju

Advisor : Prof. Park, Seul-Hyun, Ph.D. Department of Mechanical Systems Engineering Graduate School of Chosun University

The problems of marine environmental pollution and environmental pollution by microplastics are becoming global issues. In the case of expanded polysterene (EPS), which is a major cause of marine environmental pollution, it also adversely affects the marine ecosystem, such as HBCDs (Hexabromocyclododecanes), a type of bromine-based flame retardant, and hepatotoxic agents in oysters farmed in farms using EPS buoys. Is struggling. In this study, to replace the EPS buoy, which is the main cause of pollution of the marine environment and the marine ecosystem, a buoy is produced through HDPE (Highdensitypolyethylene) blow injection to replace it. In the case of HDPE, it has superior physical properties such as tensile strength and impact strength than EPS, and it is believed that microplastic problems can be improved by taking advantage of these physical properties. Therefore, in this study, the Ansys Workbench 19.2 tool is used to check the deformation and performance changes caused by pressure and thermal environment in the environment of use of the buoy in consideration of the physical property change by the reprocessing process of HDPE generated during the blow injection molding process. To perform. The physical properties required for finite element analysis were checked for mechanical properties such as elastic modulus, yield strength, and maximum tensile strength in accordance with ASTM D 638 standard, and the thermal expansion coefficient was measured using a strain gauge. In the case of the target buoy, a study on the deformation and performance of the buoy is performed through nonlinear analysis in consideration of the nonlinearity of the material and the geometric shape change of the buoy.



제1장서론

1.1 연구 배경 및 필요성

플라스틱으로 인한 해양환경 쓰레기의 비율은 60~80%에 달한다고 보고되고 있다 [1]. 또한, 해양에서의 플라스틱은 파고 및 풍랑에 의해 1mm 이하에서 333µm 수준까지 분해 및 해양환경에 축적된다고 보고되고 있다[2-3]. 또한, 이는 플랑크톤 및 유기체들 에 의해 섭취될 수 있으며 성장 및 생식능력에 악영향을 미치게 되며[4-5] 해양생태계 오염을 유발하게 된다고 알려져 있다. 미세플라스틱 오염이 전 지구적 환경 이슈로 부 상하게 되면서 2012년 국제해사기구(International Maritime Organization), 식량농업기구(F ood and Agriculture Organization), 유네스코 정부간해양위원회(UNESCO-Intergovernmental Oceanographic Commission), 유엔환경프로그램(United Nations Environment Program) 등 국제기구들이 공동으로 지원하는 국제해양환경전문가그룹(The joint Group of Expert on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection)이 결성되어 운영되고 있으며, 유네스코의 정부간해양위원회는 2010년에 '해양 생태계의 건강보호'분야에서 미세플라 스틱을 4대 주요 이슈중의 하나로 선정하였으며, 유엔환경계획은 2014년에 국제환경 현안문제에 미세 플라스틱을 포함하는 '플라스틱 해양쓰레기'를 포함하였다. 이에 국내 에서는 해양쓰레기에 대한 종합적 관리방안이나 대응책을 마련하기 위해 해양환경관리 공단(KOEM)에서 2016년 12월 5일부터 IMO 기술협력(ITCP : Integrated Technical coope ration Programme)해양 쓰레기 관리 워크숍을 개최하는 등 국내에서도 해양환경오염에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다.



Figure 1.1 Microplastics and ingestion by Zooplankton [4]

- 1 -

2018 국가 해안 쓰레기 모니터링 조사 결과 중 10년 종합결과에서 스티로폼이 가 장 많은 개수 순위 및 발생 원인을 차지하고 있다. EPS(Expanded Polystyrene)의 특성상 잘게 쪼개지기 쉬우며 미세플라스틱의 주원인이 되고 있다. 우리나라의 경우 미세 플 라스틱 오염도가 세계 최고 수준이며 조성의 99%가 스티로폼으로 구성되어 있다고 보 고되고 있다[6]. 또한, 양식용에서 주로 사용되는 EPS 부표는 해양쓰레기 오염문제 뿐 만 아니라, 양식 종에서 생식 이상 및 간독성 유발물질인 HBCDs(Hexabromocyclododeca nes)[7] 가 고농도 함유되어 있는 등, EPS 부표의 유해성을 인지하고 국내에서도 Figure 1.2와 같이 해양수산부 주관으로 친환경 부표 보급을 통하여 연안 어장의 어업용 폐스 티로폼 부표 사용으로 인한 환경오염 방지 및 안전한 수산물 공급 기반 구축 도모를 목적으로 "친환경 부표 보급지원 사업"을 추진 중에 있다.

(2019년	친환경	부표 보	급 지원	사업 시작	행지침	Go	1양수산부
	♡ 목적 : 친환경 부표 보급을 통하여 연안어장의 발포 폴리스티렌(EPS) 부표 사용으로 인한 환경오염 방지 및 안전한 수산물 공급 기반 구축 도모									
	○ 근거법 : 어장관리법 제 13조 제 3항 및 같은 법 시행규칙 제5조, 수산업법 제 86조 및 같은 법 시행령 제 72조제12호・제16호									
	<mark>0</mark> 성	과 목표 및	지표 : 201 누적개수 1	9년 목표치 1,500천개	보급 누적	률 기존 17	.7% → 24	.3%		
	<u>0</u> 연	도별 재정 트	투입 실적 및	및 계획	-			(단	위 : 백만원)	
		구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	
		합계	9,943	14,857	10,000	10,000	20,000	30,000	40,000	
		-보 조 -지방비	3,480 3,480	5,200 5,200	3,500 3,500	3,500 3,500	7,000	10,500	14,000 14,000	
		-자부담	2,983	4,457	3,000	3,000	6,000	9,000	12,000	
1				자료	출처 : 해양수(안부 2019년도	친환경 부표 !	보급 지원사업	수정 지침 알림	

Figure 1.2 Guidelines for the implementation of an eco-friendly buoy supply support project [8]

국내 양식업의 경우, 양식생산 기술의 발전 및 양식생산 기반이 확대됨에 따라 양 식 면허 건수와 견적은 지속해서 증가하고 있다. Figure 1.3은 국내 천해 양식업 면허 면적 및 면허 건수를 2009년 기준으로 2019년까지 통계한 자료이다[9]. 양식어업 면허 면적은 2009년 13만 9천 ha이었으나 매년 증가하여 2019년 16만 lha로 꾸준히 증가하 고 있는 것을 확인할 수 있으며, 양식 면허 또한 2009년 9,709건에서 10,045건으로 꾸 준히 증가함을 확인할 수 있다.



국내 천해 양식업 면허 면적 및 면허 건수

Figure 1.3 Domestic aquaculture license area and number of licenses [9]

국내 양식업의 확대 및 양식업에서 사용되는 EPS 부표의 환경 유해성이 지속해서 보고되는바, 기존의 환경 및 인체에 유해성을 지닌 EPS 부표를 대체하기 위해 2019년 을 기준으로 439개의 부표가 인증시험을 통해 친환경 부표로 사용되고 있으며, HDPE 등의 고분자 소재를 Blow 사출 성형을 통해 제작되고 있다[10]. HDPE 소재의 극한 인 장강도 (Ultimate tensile strength)는 21.6 MPa, 충격강도 0.761 J/cm 과 EPS의 극한 강도 0.45 MPa, 충격강도 0.235 J/cm를 비교해 보았을 때[11] HDPE가 EPS에 비해 우수한 물성을 가지고 있다. 이러한 물리적 특성의 이점으로 인해 기존의 EPS 소재가 파고와 풍랑, 지속적인 선박과의 충돌로 인한 미세플라스틱 발생 문제점을 개선할 수 있을 것 으로 예상할 수 있다.

친환경 부표는 HDPE의 가열하면 유체화 되고 온도가 낮아지면 다시 고화되는 열 가소성 특성을 활용하여 아래의 Figure 1.4와 같이 HDPE를 가열 용융하여 Parison 형태 로 사출한 뒤, 금형에 삽입하여 내부에 공기를 취입하여 제작된다[12].





Figure 1.4 Blow injection process chart [13]

중공성형의 경우 Figure 1.4와 같이 금형을 맞대는 과정에서 아래의 Figure 1.5와 같이 Edge가 발생하게 되고, 발생하는 Edge, 불량품 등을 생산 효율성 및 원가절감을 고려하여 분쇄하여 Scrub으로 재가공하여 Pellet 형태의 원료와 섞어 재사용하게 된다. 이러한 과정에서 1차 성형된 HDPE가 다시 한 번 열 및 Parison 압력을 받게 되는데, 이러한 공정과정에서 HDPE의 물성 변화를 야기하게 된다. 이러한 재처리 공정 과정에 서의 물성변화를 확인하기 위해 Dan Weckström[14]는 14번의 재 성형과정을 통해 Poly propylene의 인장강도, 탄성계수 등을 확인하여 물성 변화를 관찰하였으며, Kuan-hua et all[15]는 Polyamide를 통하여 재처리 공정 과정에 따른 인장 항복응력, 탄성계수, 충격 강도 등을 관찰하였다.



Figure 1.5 Edge and Scrub generated during molding

미세플라스틱으로 인한 해양환경 오염에 대한 이슈가 지속해서 보고되고 있으며 양식업의 확대 및 양식용 EPS 부표의 유해성에 따라 기존 EPS 부표의 대체 필요성이 요구됨에 따라 본 연구에서는 EPS 부표를 대체하기 위해 성형성 및 가공성이 우수한 HDPE를 Blow 사출 성형하여 대체하기 위한 연구를 수행하고자 한다.

선행된 연구를 통해 재처리 공정과정에서 플라스틱 소재의 물성차이가 발생함이 확인된바, 본 연구에서는 재처리 공정과정으로 제작된 친환경 부표의 성능을 확인하기 위한 연구를 수행한다.

1.2 연구목적 및 내용

본 연구의 목적은 1장의 서론에서 언급한 바와 같이 인체 유해성 및 환경오염의 주범이 되는 EPS 부표를 대체하기 위해 재처리 공정을 통해 제작된 친환경 부표가 사 용 환경에서의 압력과 온도변화에 대한 안정성을 검토하기 위한 연구를 수행하고자 한 다. 아래의 Figure 1.6은 본 연구의 대상인 친환경 부표이다.

기존의 EPS 부표의 경우, 간답대와 결속을 위해 노끈과 부표를 묶는 과정에서 많 은 노동력이 소모되는 점, 결합된 노끈과 지속적인 마찰에 의해 마모되어 미세플라스 틱을 발생시키며 결국 부표의 유실로 이어져 해양오염의 주범이 되는 문제점을 개선하 기 위해 부표의 하단부에 간답대 결합공을 설계하였으며 조류의 흐름에 의한 부표의 이탈을 최소화하기 위해 조류의 흐름에 의한 저항을 최소화 할 수 있도록 설계하였다. 설계된 부표의 부력은 아래의 식 1.1을 통해 계산할 수 있으며, 부표의 유효 체적 0.02 683m³ 와 해수밀도 1020kg/m³[16]에 의해 27.3kgf의 부력을 갖도록 설계하였다.

$$B = \rho Vg \tag{1.1}$$



Figure 1.6 Designed buoy

제작된 친환경 부표는 사용 환경에 의해 압력 및 온도변화를 받게 된다. 해양 기상악화 조건인 풍랑경보 발생 시 유의 파고는 5m까지 발생하게 되며[17] 이러한 기상악화 조건에 의해 부표는 수심 5m까지 침수될 수 있고, 이때 친환경 부표는 해 수압에 노출될 수 있으며, 친환경 부표에 부하될 압력은 다음과 같이 계산할 수 있 다.



Figure 1.7 Pressure change with depth [18]

Figure 1.7과 같이 유체의 표면으로부터 수직거리 h만큼 아래인 곳의 압력, 즉 깊이가 h인 곳의 유체의 압력, 즉 깊이가 h인 곳의 유체의 압력 P_h는 아래의 식 1.2 와 같이 계산할 수 있다.

$$P_h = P_0 + \rho g h \tag{1.2}$$

기상악화에 의해 친환경 부표가 5m 까지 침수될 시, 친환경 부표는 0.05 MPa의 압력을 받게 된다. 또한 해양환경의 대기에서 지속적인 노출에 의해 친환경 부표는 지속적인 온도변화에 노출되게 된다. 친환경 부표의 품질 및 기능 수행을 위해서는 이러한 사용 환경의 압력변화 및 온도변화에 따른 안정성이 요구되며, 해양수산부 에서도 Figure 1.8의 모식도와 같이 해양환경폭로 시험은 평균수심 5m 이상 실제 해수가 있는 장소에서 모식도와 같이 바닥에 단단하게 고정한 후, 2개월 동안 침수 와 건조를 반복하였을 때, 수압을 받는 부표에 균열, 파손, 찢김 등을 확인하고, 열 피로도 시험은 항온항습기를 이용하여 (60±2) ℃에서 10시간, (-20±2) ℃에서 10시간 을 유지하여, 이를 1 cycle으로 15 cycle 시험을 실시하는 등 해수 내압시험 및 열피 로도 시험을 공시하여 친환경 부표의 성능을 시험하고 있으며 해양환경폭로 시험 후 초기 부력의 80%, 열피로도 시험 후 초기 부력의 90% 이상의 부력을 유지해야 한다고 명시하고 있다.





(a) Schematic of marine environmental exposure test

(b) Schematic of thermal fatigue test

Figure 1.8 Schematics of Eco-friendly buoy performance test

본 연구에서는 이러한 시험 조건에 대한 부표의 안정성 및 변형에 의한 성능변 화를 관찰하기 위해 재료역학을 기초로 하여 인장실험, 열팽창계수 측정을 통해 유 한요소해석에 필요한 물성 및 소재의 적합성을 판단하고 연속체역학을 통해 연구대 상인 부표를 수학적 모델화하여 부표의 변형 거동과 성능을 수치적으로 확인하기 위한 연구를 수행하고자 한다.



2. 부표 소재의 기계적 특성

2.1 HDPE 기계적 특성

HDPE의 물성은 분자구조에 의해 결정되는데, HDPE를 중합하는 과정에서 결정화 온도, 분자량, 압력 등의 환경 차이에 의해 고분자 재료의 미세구조의 기본 단위인 라 멜라 구조의 두께에 영향을 미치게 되며 이러한 분자구조의 차이가 제조사마다 다른 물리적 특성을 띄게 된다[18]. 서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 연구될 친환경 부표의 소재는 생산성 등의 이유에 의해 중공성형 과정 중 열 및 Parison 압력을 받게 되는 HDPE인 Scrub과 HDPE가 혼합되어 중공성형 되는데, 중공성형 과정 중의 열 및 Parison 압력에 의해 물리적 특성 차이가 있을 것으로 예상되는바 친환경 부표의 소재 로 사용될 Scrub과 HDPE의 혼합재의 기계적 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다.

성형 및 재처리 공정 중의 Parrison 압력, 열에 의한 기계적 특성 변화를 관찰하기 위해 아래의 Figure 2.1과 같이 ISO 180 규격에 따라 충격강도 시편을 제작하여 밀도를 측정하였다. Daelimpoly 사의 5502 HS와 Scrub, 그리고 5502 HS와 Scrub을 80:20의 비 율로 혼합하여 3개의 시편을 제작하였으며 정밀저울과 전자 버니어 캘리퍼스를 사용하 여 제작된 시편의 질량과 체적을 측정하여 부피를 계산하였으며 계산 결과는 그래프와 표로 정리하여 다음 장의 Figure 2.2와 Table 2.1에 도시하였다.



Figure 2.1 Specimen and electronic scale used for density measurements





Figure 2.2 Measured density of specimen used in this study

Table 2.1 Summary of measured density of specimen

	HDPE	Blended HDPE	Scrub
Density (kg/m³)	870.33	874.87	895.12

측정된 밀도를 비교한 결과 HDPE, Blended HDPE, Scrub의 밀도는 각각 870.33 kg/m^{3,} 874.87 kg/m^{3,} 895.12 kg/m³ 로 재처리 공정을 통해 HDPE의 밀도가 증가되는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 밀도의 변화가 충격강도 특성에 어떠한 영향을 끼치는지 살펴보기 위해 ISO 180 규격에 따라 시편의 중앙부에 2.0 mm의 노치를 가공 후 아래 Figure 2.3의 모식도와 같이 한쪽 끝을 고정하고 시편의 노치방향을 팬듈럼 해머로 타격 하여 팬듈럼 해머의 초기 위치에너지와 파단후의 에너지의 차를 통해 충격강도를 측정 하였으며, 파단 될 때의 에너지는 아래의 식 2.1과 같이 위치에너지를 통해 정의할 수 있다.

$$wh_1 = wR + wR\cos(180 - \alpha) = wR(1 - \cos\alpha)kgm$$

$$wh_2 = w(R - R\cos\beta) - wR(1 - \cos\beta)$$

$$E = w(h_1 - h_2) = wR(\cos\beta - \cos\alpha)$$
(2.1)





Figure 2.3 Schematics of Izod impact test [20]

실험 결과 HDPE, Blended HDPE, Scrub의 충격장도는 각각 22.85 KJ/m², 23.8 KJ/m², 31.25 KJ/m²로 Scrub을 가공하거나 Blend 하였을 때 HDPE에 비해 충격강도가 증가함을 관찰할 수 있었으며 실험 결과는 그래프와 표로 정리하여 다음 장에 Table 2.2와 Figure 2.4에 도시하였다.

Scrub의 경우 HDPE의 충격강도보다 약 36% 증가함을 확인할 수 있었으며 재처리 공정을 통해 제작된 HDPE의 밀도와 충격강도를 측정을 통해 재처리공정에 Parison 압 력 및 열에 의해 HDPE의 기계적 특성 변화를 확인하였다.





Figure 2.4 Measured Izod impact strength for specimen used in this study

Table 2.2 Summary of measured Izod impact strength

	HDPE	Blended HDPE	Scrub
Izod Impact	00.0E	22.76	21.95
strength (KJ/m²)	22.00	23.70	51.20

2.1.1 인장실험에서 변형 거동

물체는 힘을 받으면 변형이 발생한다. 공학에서는 변형의 종류를 외력을 제거하면 원형으로 되돌아가는 탄성변형과 힘을 제거해도 원형으로 되돌아가지 않는 소성변형 두 가지로 분류한다. 힘에 의한 변형 거동을 확인하기 위해 균일 단면 봉에 인장 하중 을 가하는 인장실험을 통해 인장 부재에서 발생하는 미소신장량 (δ) 이 발생하게 된다. 인장실험 중 초기구간에서는 인장 부재에 부하되는 힘을 제거하면 인장 부재에서 발생 한 미소 신장량 δ 은 완전히 또는 부분적으로 없어지며, 인장 하중을 가하기 전의 초기 길이인 *l*로 되돌아가는 성질을 띠게 된다. 이러한 재료가 하중의 제거에 따라 원형으로 돌아가는 성질을 탄성이라고 부르며 탄성 영역에서의 신장량 δ가 인장력 P와 봉의 길 이 1에 비례하고 봉의 단면적 A에 반비례한다는 Hooke의 법칙에 의해 아래의 식 2.2와 같이 쓸 수 있다.

$$\delta = \frac{Pl}{AE} \tag{2.2}$$

위의 식 2.1 에서 E는 각 재료에 의해 정해지는 상수로 그 재료의 인장 하에서 탄 성계수(modulus of elasticity), 영의 계수(Young's modulus)라고 불린다. 재료가 인장 하 중이 제거 된 후에 초기의 길이로 돌아가는 탄성 구간에서는 탄성계수를 재료의 강성 도 비교의 척도로 사용할 수 있으며, 하중에 대한 재료의 변형을 계산할 수 있다.

탄성 영역 내에서 재료의 인장 시 재료의 축신장은 반드시 횡수축을 동반하며 탄 성 영역 내에서는 아래의 식 2.3과 같이 일정한 축신장과 횡수축은 일정한 비를 통해 결정된다.

$$\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \tag{2.3}$$

위의 식 2.2에서 v를 재료의 포와송비(Poisson's ratio)라고 하며 ɛ'은 재료의 가로방 향 변형도, ɛ은 세로 방향 변형도를 의미한다. 가로 방향의 변형도와 세로 방향의 변형 도는 방향이 다르기 때문에 음의 부호를 띄게 된다. 이러한 재료의 인장시험 시 가로 방향의 변형도와 세로 방향 변형도 신장의 비를 포와송 비(Poisson's ratio)라고 부르며 재료의 인장시험 중에서 봉의 길이가 l에서 l+ε 로 변화되었을 때 인장 시험 중의 재료 의 단면적은 A₁ = A(1-με)² 으로 되고 봉의 길이 변화와 단면적 변화를 고려하여 체적 의 변화율 구할 수 있고 아래의 식 2.4로 표현할 수 있다. 이때 ε는 미소 변화량이기 때문에 고차항은 무시한다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Al\varepsilon(1-2\nu)}{Al} = \varepsilon(1-2\nu)$$
(2.4)

식 2.2, 식 2.4에 의해 재료의 변형이 응력과 선형관계를 나타내는 탄성 구간 내에 서의 재료의 길이 변화, 체적 변화의 계산이 가능하다. 하지만 재료의 변형이 응력과 비례하지 않게 되는 탄성 영역 이후의 영역에서는 Hooke의 법칙을 따르지 않게 되며, 재료의 변형은 인장실험을 통해 측정된 재료의 하중과 변형데이터를 이용하여 시험편 내의 응력과 변형률 값을 계산하여 아래의 Figure 2.5와 같이 응력을 종축, 변형률을 횡 축으로 하여 응력-변형률선도로 표시할 수 있다. 아래의 Figure 2.5는 구조용 강의 응력 변형률 선도이다.



Figure 2.5 Engineering S-S curve[21]

인장 실험을 통해 얻은 응력-변형률 선도(S-S diagram)에서 응력이 변형률과 비례하 는 탄성영역(elastic region), Hooke의 법칙을 이탈하게 되는 비례한도(Proportional limit), 비례한도를 넘어 재료의 소성변형이 시작되는 항복점(Yield point), 항복점 이후에서는 신장량이 더 빨리 증가하여 곡선의 응력-변형률 선도를 띄게 된다. 이때의 변형은 변형 경화(strain hardening)를 일으키고 극한강도(ultimate stress)까지 도달하게 된다. 최후강도 이후에는 시험편의 신장이 계속됨에도 불구하고 하중은 감소하여 네킹(necking) 현상이 일어나고 결국 응력의 작용에 의해 둘 이상의 조각으로 분리되는 파괴에 이르게 된다. 이때의 균열을 일으키는 응력을 파괴강도(fracture stress)로 정의하게 된다.

파괴강도까지의 응력-변형률 선도를 아래의 식을 통해 적분하여 재료의 파단에 필 요한 단위 부피당 에너지, 인성(toughness)을 계산할 수 있고 파단에 대한 재료의 저항성 을 측정할 수 있다.

$$\frac{energy}{volume} = \int_{0}^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon$$
 (2.5)

이러한 HDPE와 같은 플라스틱의 변형 및 파괴 거동을 확인하기 위해 ASTM D 638 규격에서는 시편, 시험 속도 등을 규격화하여 플라스틱의 탄성계수, 포아송비, 항복 점 등의 물리적 특성을 정의하고 있다.

2.2 부표 소재 인장실험

재처리 공정을 통해 제작된 부표 소재의 변형 거동을 확인하기 위해 HDPE와 Scrub, HDPE와 Scrub을 80:20의 비율로 혼합하여 ASTM D 638 규격의 Type 1 Dumbel 형 시편을 제작하였다. HDPE는 Daelim poly 사의 5502 HS 제품을 사용하였으며 시험에 사용한 시편의 총길이는 165mm, 두께 3.2mm, 너비 13mm, 표점 길이 50mm로 형상 및 치수는 아래 Figure 2.6과 같다.



Figure 2.6 Tensile specimens specified in ASTM D 638

인장실험은 만능시험기(Universal Testing Machine) 실험장비의 그립에 시편을 장착 하고 시편의 축 방향으로 5mm/min의 속도로 시편이 파단 될 때까지 인장을 진행하였으 며, 이때의 힘과 실험장비 크로스헤드의 변위 변화를 연속적으로 측정하여 데이터를 기 록하였다. 인장실험 사진과 파단 후 시편의 사진은 아래의 Figure 2.7과 같다.



Figure 2.7 Photograph of tensile test and specimen after fracture

실험 중 시편에 가한 하중과 변형을 시편의 초기길이 l₀ 와 초기 단면적 A₀ 를 나 누어 공칭응력(Engineering Stress)과 공칭 변형률(Engineering Strain)을 계산하고 공칭응력 과 공칭변형률의 관계를 아래의 Figure 2.8에 도시하였다. ASTM D 638 규격에 따라 인 장시험 중 초기구간 (0.0005~0.0025mm)의 축 변형구간에서의 기울기를 구하여 탄성계수 를 구하고 이를 Figure 2.9와 같이 0.1 %만큼 Offset하여 Offset 라인과 응력-변형률 선도 의 교차점을 통해 항복강도를 정의하였으며 응력의 최고점에서 최대인장강도, 파단강도 까지의 응력-변형률 선도의 적분을 통해 소재의 인성을 측정하였다.

인장실험을 통해 측정된 HDPE, Blended HDPE, Scrub의 탄성계수를 확인한 결과 탄 성계수와 항복강도는 Parison 압력 및 열에 의해 저하됨을 확인할 수 있었으며, 최대인 장강도는 이와 반대로 Parison 압력 및 열에 의해 강화됨을 확인하였다. 실험결과를 통 해 얻어진 세 개 시편의 탄성계수(Young's Modulus), 항복강도(Yield Strength), 최대인장 강도(Ultimate Strength), 인성(Toughness)은 다음 장의 Table 2.3에 정리하였다.



Figure 2.8 Measured engineering S-S curve for specimen used in this study





Figure 2.9 S-S curve offset by 0.1 %

Table 2.3 summary of measured tensile properties of specimen

	Young's modulus [MPa]	Yield strength [MPa]	Ultimate Strength [MPa]	Toughness (J/mm³)
HDPE	1248.8	9.6	25.2	20.17
Blended HDPE	1315.2	9.3	26.7	24.17
Scrub	1206.0	9.3	27.7	18.04

실험 결과 소성변형을 일으키는 항복강도의 경우 Blended HDPE가 HDPE의 항복강 도보다 낮았으나 항복강도를 제외한 탄성계수, 극한강도, 인성은 HDPE에 비해 더 높음 을 확인할 수 있었다. 이러한 물성의 차이에 의해 Blended HDPE로 제작되어진 부표가 압력 시험환경에서 내구성이 더 높을 것으로 판단되며 부표의 생산효율, Scrub 처리 측 면 및 부표의 기능 수행에 더 적합할 것으로 판단된다.

인장실험 중 시편은 시편의 길이 변화와 단면적 감소가 수반된다. 탄성영역 내에서 는 재료의 변형이 크지 않고 하중이 제거되었을 때 재료가 원상태로 돌아오기 때문에 탄성한도에서 변형 거동의 차이는 크지 않다. 제작된 부표의 경우 부피가 얇아 대변형 (Large deflection)이 예상되는바 인장실험 중의 길이 변화와 단면적 감소를 고려하여 아 래의 식 2.6을 사용하여 공칭응력 σ_N 공칭변형률 ϵ_N 을 아래의 식 2.6을 통해 Figure 2.10 과 같이 진응력 σ_T 진변형률 ϵ_T 의 관계로 재 정의하였다.

$$\sigma_T = \sigma_n (1 + \varepsilon_n)$$

$$\varepsilon_T = \ln (1 + \varepsilon_n)$$
(2.6)



Fig 2.10 Blended HDPE Engineering-True S-S curve



3. 부표 소재의 열적 특성

3.1 부표 소재 열팽창계수

사용 환경의 온도 차에 의해 부표에는 열응력이 발생하게 된다. 이때 부표 소재의 항복강도나 파괴강도 이상의 응력이 발생하게 되면 부표는 소성변형이 발생하거나 파 괴될 수 있다. 이러한 변형 거동은 부표의 성능에 영향을 끼칠 수 있는바 열응력에 의 한 부표의 안정성을 확인하는 연구가 수행되어야 한다.

열에 의해 발생되는 응력은 Hooke's Raw에 의해 변형률과 탄성계수와의 관계를 통해 정의할 수 있다. 열에 의한 변형은 아래의 식과 같이 열팽창계수 α와 온도 차이 ΔT에 의해 아래의 식 3.1과 같이 쓸 수 있다.

$$\varepsilon_t = \alpha (\Delta T)$$

$$\sigma_t = E\alpha (\Delta T)$$
(3.1)

열응력을 통해 부표의 안정성을 평가하기 위해서는 열팽창계수 측정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 열팽창계수를 측정하기 위해 스트레인 게이지를 사용하여 열피로 도 시험 온도인 -20℃부터 60℃에서의 열팽창계수를 측정하기 위해 스트레인 게이지를 활용하여 열팽창계수를 확인한다.

측정을 위해 스트레인 게이지는 MM(Micro-Measurements) 사의 C2A-06-062LW-120 제품을 사용하였다. 실험에 사용한 스트레인 게이지의 그리드 저항은 120±0.6 Ω이며, C 2A 타입의 스트레인 게이지의 사용온도 범위는 -50℃부터 80℃ 까지며, 본 연구에서 수 행될 열팽창계수의 측정 범위인 -20℃부터 60℃까지의 온도 범위 내에 위치한다.

스트레인 게이지는 저항으로 이루어진 센서로 피 측정물에 부착되어 피 측정물의 변형률(strain)을 저항의 변화로 바꾸어 주는 센서이며, 저항의 변화율 $\frac{\Delta R}{R}$ 과 변형률 ϵ 사이의 관계식은 아래의 식 3.2와 같다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \tag{3.2}$$

이때 K는 스트레인 게이지마다 고유하게 가지고 있는 게이지 상수 값이며, 피측정 물의 온도가 변화하면 식 3.3과 같이 표현된 저항 변화율은 온도변화에 따른 저항 변화 율과 시편의 열팽창계수 α_s 와 스트레인 게이지 그리드의 열팽창계수 α_g 차이에 따른 저항 변화율이 더해져 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_T = [\beta + K(\alpha_S - \alpha_G)] \Delta T$$
(3.3)

식 3.3에서 β는 저항 온도계수이며, 식 3.3은 온도의 변화에 따라 발생하는 스트레 인 게이지의 열적 변형은 식 3.4와 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_T = \left[\frac{\beta}{K} + (\alpha_S - \alpha_G)\right] \Delta T$$
(3.4)

위의 식 3.4에서 미지의 저항온도계수 $\frac{\beta}{K}$ 와 그리드의 열팽창계수 α_g 를 상쇄하기 위해 측정하려는 시편의 열 변형률과 열팽창계수를 알고 있는 기준물질의 열변형률을 연립하면 아래의 식 3.5와 식 3.6과 같이 쓸 수 있다.

$$\varepsilon_s = \left[\frac{\beta}{K} + (\alpha_s - \alpha_G)\right] \Delta T \tag{3.5}$$

$$\varepsilon_R = \left[\frac{\beta}{K} + (\alpha_R - \alpha_G)\right] \Delta T \tag{3.6}$$

위의 식 3.5와 식 3.6을 연립하면 아래의 식 3.7과 같이 표현할 수 있고 기준물질의 열팽창계수와 기준물질의 열적 변형을 알고 있다면 측정하고자 하는 시편의 열팽창계 수를 확인할 수 있다.

$$\alpha_s - \alpha_R = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_R}{\Delta T}$$
(3.7)

열팽창계수 측정을 위해 스트레인 게이지는 MM(Micro-Measurements) 사의 C2A-06-062LW-120 제품을 사용하였다. 실험에 사용한 스트레인 게이지의 그리드 저항 은 120±0.6 Ω이며, C2A 타입의 스트레인 게이지의 사용온도 범위는 -50℃부터 80℃ 까 지며, 본 연구에서 수행될 열팽창계수의 측정 범위인 -20℃부터 60℃까지의 온도 범위 내에 위치한다. 기준물질의 열적 변형은 실험에 사용한 C2A-06-062LW-120 스트레인게 이지에 4차항으로 명시된 1018 Steel의 열적 변형을 사용하였으며, 이를 Gauge Factor 2.0에서 온도에 변화에 따른 1018 Steel의 열적 변형을 그래프와 식으로 표현하면 아래 의 Figure 3.1, 식 3.8과 같다.



Figure 3.1 Thermal output measured as a function of temperature for 1018 steel

$$\epsilon_r = -46.9 + 3.55 T + (-7.70 \times 10^{-2}) T^2 + (4.98 \times 10^{-4}) T^3 + (-1.30 \times 10^{-6}) T^4 + (1.67 \times 10^{-9}) T^5$$
(3.8)





Figure 3.2 Thermal chamber used in this study and its specifications

측정하려는 시편의 열적 변형을 확인하기 위해 사용한 열환경 챔버의 사진 및 스펙 은 Figure 3.2와 같다. 열환경챔버의 콘트롤러를 이용하여 측정하고자 하는 열팽창계수 의 온도범위인 -20℃ ~ 60℃까지의 온도변화를 친환경부표의 열피로도 시험의 열환경 과 동일하게 설정하였다.

실험에 사용한 시편은 2장에서 사용한 것과 동일하게 HDPE, Blended HDPE, Scrub 3종류로 준비를 하였으며 아래의 Figure 3.3과 같이 3종류의 시편 모두 종방향 및 횡방 향으로 동일한 위치에 스트레인 게이지를 부착, 시편의 정중앙에 K-type 열전대를 부착 하여 시편의 온도변화 및 저항의 변화를 측정하였다.



Figure 3.3 Schematics of thermal expansion coefficient measurement apparatus

스트레인 게이지를 측정되는 저항변화는 브릿지 박스를 통해 전압 값으로 변환 하 고, 이를 스트레인 앰프(Kyowa DPM311A)를 통해 증폭하여 전압 값으로 출력하였으며, 증폭되는 전압 값 및 온도 Data는 PC와 연결된 Daq를 통해 획득하였으며 실험을 통해 획득한 3개시편의 종, 횡방향의 전압 출력 값과 온도 data는 아래의 Figure 3.4의 그래프 와 같다.



(a) Measured voltage registered to strain gauge



(b) Measured temperature as a function of time

Figure 3.4 Measurements of voltage and temperature with respects to time

측정된 전압을 통해 열에 의한 변형을 측정하기 위해서는 전압 값에 실험 시 설정 한 스트레인 앰프의 전압감도(Range)를 보정하여야 한다. 또한, 정확한 변형 값을 측정 하기 위해서는 스트레인 게이지마다 고유하게 설정된 게이지 상수를 보정하여야 한다. 실험에 사용한 C2A-06-062LW-120 스트레인 게이지의 경우 게이지 상수 K는 24℃ 에서 2.155 (±0.5) 이나 온도변화에 따라 게이지 상수 값이 변하게 되며 온도 변화 100 ℃ 당 1.2%씩 변하게 되며 이를 그래프로 도시하면 아래의 Figure 3.5와 같다.



Figure 3.5 Changes in the gauge factor as a function of temperature

스트레인 게이지를 사용하여 얻은 전압 값과 실험에서 사용한 앰프 전압감도(Range 50 × 100 µm) 를 통해 측정하고자 하는 시편의 열에 의한 변형을 계산할 수 있다. 측정 된 열에 의한 변형은 식 3.7과 같이 기준물질인 1018 Steel의 열에 의한 변형을 연립하 여, 식 3.6과 같이 측정하고자 하는 시편의 열 변형과 기준물질 1018 Steel의 열변형의 차를 측정하고자 하는 온도범위인 -20℃부터 60℃ 에서의 온도 차 80℃ 를 나누고, 이 에 1018 Steel의 열팽창 계수 11.5 10⁶mm/mm℃[10] 를 더하여 측정하고자 하는 시편의 열팽창 계수를 측정 할 수 있다.

사출성형을 통해 제작된 HDPE, Mixing, Scrub 3가지 시편을 사출 방향을 Y축, 사출 성형 방향과 수직인 방향을 X축으로 하여 승온 속도 0.6℃/min, 5℃/min으로 승온 속도 를 다르게 하여 -20℃부터 60℃까지 감온, 승온 조건에서 열팽창계수를 분석하였으며, 분석한 열팽창계수는 다음 장의 Table 3.1, 3.2, 3.3, 3.4와 Graph3.6으로 정리하였다.



	HDPE	Mixing	Scrub		HDPE	Mixing	Scrub
	(10-6	(10-6	(10-6		(10-6	(10-6	(10-6
	mm/mm	mm/mm	mm/mm		mm/mm	mm/mm	mm/mm
	°C)	°C)	°C)		°C)	°C)	ິ (ປີ
	97.87	168.10	153.28		148.40	170.01	153.47
Cooling	154.90	167.08	239.61		154.90	167.08	239.61
	154.39	150.75	157.03	Heating	154.39	150.75	157.03
	155.11	180.27	153.00		156.22	164.88	154.24
	170.62	117.32	136.92		171.50	139.23	139.07
average	146.58	156.70	167.97	average	157.08	158.39	168.68
	± 25.11	± 21.81	± 36.48	average	± 7.69	± 11.64	± 36.00

Table 3.1 Coefficient of thermal expansion measured for Y-axis at 0.6 $^\circ\!\!{\rm C}$ / min

Table 3.2 Coefficient of thermal expansion measured for X-axis at 0.6 $^\circ\!\!\mathbb{C}$ / min

	HDPE	Mixing	Scrub		HDPE	Mixing	Scrub
	(10-6	(10-6	(10-6		(10-6	(10-6	(10-6
	mm/mm	mm/mm	mm/mm		mm/mm	mm/mm	mm/mm
	°C)	°C)	°C)		°C)	°C)	°C)
Cooling	93.76	112.67	112.44		94.31	112.90	112.64
	131.34	115.24	106.43		131.34	115.24	106.43
	117.06	130.44	112.27	Heating	117.06	137.44	112.27
	112.95	131.30	151.13		115.50	107.89	154.11
	148.36	113.01	126.35		151.12	94.28	127.03
average	120.69	120.53	121.72	average	121.87	113.55	122.50
	± 18.31	± 8.49	± 16.06	average	± 18.80	± 13.98	± 17.20



	HDPE	Mixing	Scrub		HDPE	Mixing	Scrub
	(10-6	(10-6	(10-6		(10-6	(10-6	(10-6
	mm/mm	mm/mm	mm/mm		mm/mm	mm/mm	mm/mm
	°C)	°C)	°C)		°C)	°C)	ິ (ປີ
Cooling	155.76	148.40	153.52	Heating	148.32	169.94	153.47
	156.60	150.40	154.58		157.00	169.36	151.65
	151.46	149.11	166.38		151.22	167.88	153.08
	153.73	173.53	152.88		155.90	168.86	155.14
	141.58	179.21	137.61		143.18	205.87	139.40
average	151.83	160.13	152.99	average	151.12	176.38	150.55
	± 5.42	± 13.39	± 9.15	average	± 5.06	± 14.75	± 5.68

Table 3.3 Coefficient of thermal expansion measured for Y-axis at 5 $^\circ C$ / min

Table 3.4 Coefficient of thermal expansion measured for X-axis at 5 $^\circ\!\!{\rm C}$ / min

	HDPE	Mixing	Scrub		HDPE	Mixing	Scrub
	(10-6	(10-6	(10-6		(10-6	(10-6	(10-6
	mm/mm	mm/mm	mm/mm		mm/mm	mm/mm	mm/mm
	°C)	°C)	°C)		°C)	°C)	°C)
Cooling	116.73	120.49	126.05	Heating	94.24	112.90	112.64
	127.17	133.48	154.61		128.95	118.51	151.27
	100.17	141.58	151.81		101.83	126.57	116.47
	131.41	136.47	112.90		136.47	148.53	115.93
	103.08	117.55	127.95		106.85	96.64	131.89
average	115.71	129.91	134.66	36 02average	113.67	120.63	125.64
	± 12.48	± 9.31	± 16.02		± 16.23	± 17.04	± 14.44



0.6 °C /min Cooling







(b) Coefficient of thermal expansion for each axis at heating rate of 0.6 $^\circ C/min$









(d) Coefficient of thermal expansion for each axis at heating rate of 5 $^{\circ}$ C/min Figure 3.6 Measured thermal expansion coefficient at given conditions each axis

4. 블로우 사출 HDPE 해상부표의 비선형 구조해석

4.1 비선형 유한요소 해석 개요

유한요소 해석은 이론 해를 구하기 어려운 문제를 수치적인 근사해법(approxima tion method)을 통해 이론적으로 계산하기 어려운 복잡한 모델을 유한개의 요소(Ele ment)로 분할하고 이를 근사적으로 계산하는 방법이다. 유한요소 해석을 수행할 때 재료의 비선형 및 구조물이 외부의 하중에 의해 기하학적 형상 변화에 의해 비선형 적 거동을 나타내는 경우 비선형해석(Non-linear Analysis)를 통해 이론 해를 계산하 여야 한다. 비선형해석은 구조물 강성 재평가, 하중 증분(Load Increment), 수렴성 평 가(Convergence Criteria)를 통해 오차범위 내의 이론해가 얻어질 때까지 추정치를 조 정하고 다시 해석하는 반복해법(Iteration Method)을 통해 수행된다. 아래의 Figure 4. 1은 본 연구에서 사용된 비선형 해석의 반복 계산 방법인 뉴턴-랩슨법(Newton Raps hon Method)의 수행과정을 도시하였으며, 뉴턴-랩슨법의 풀이 과정은 아래의 식 4.1 과 같다.



Figure 4.1 Numerical scheme for Newton-Rapson method[22]



$$[K_n^{n+1}]{\Delta U} = {F_n^a} - {F_{n+1}^a}$$
(4.1)

식에서 [K]는 강성행렬(Stiffness Matrix)로 구조물의 형상 및 재료 물성을 기반으로 만들어지게 되는 행렬이다. 항복점 이후 구조물이 기하학적 형상 변화를 수반하는 경 우 물리적 거동은 변형된 물체의 형상을 기준으로 재계산되어야 한다.

유한요소 해석에서는 3개의 주 평면과 3개의 주축에 대한 응력 성분을 아래의 식 4.2와 같이 9개의 응력 성분을 텐서(Tensor)의 행렬 형태를 사용하여 계산하게 된다. 텐 서의 기하학적 표현은 아래의 Figure 4.2와 같다.

$$[T] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \sigma_{12} \sigma_{13} \\ \sigma_{21} \sigma_{22} \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \sigma_{32} \sigma_{33} \end{bmatrix}$$
(4.2)



Figure 4.2 Geometrical representation of stress tensor[23]

재료 내부의 점에서 응력 상태는 3개의 주 평면과 3개의 주축에 대한 응력 성분의 Tensor는 아래의 식과 같이 응력 텐서와 법선벡터 n과 연결한다. 이때 응력성분은 각운 동량 보존의 법칙에 의해 대칭하게 되어 9개의 응력 성분은 6개의 응력 성분으로 대체 가능하며 아래의 식 4.3과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \sigma_{12} \sigma_{13} \\ \sigma_{21} \sigma_{22} \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \sigma_{32} \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$$
(4.3)

응력과 변형은 벡터로 단순화 가능하다. 2D 평면 응력의 경우 Z 방향을 따라 응력 이 없으며 응력과 변형은 벡터로 단순화 할 수 있다. 아래의 식 4.4에서 벡터는 u(r)는 변형 후 점 r = (x,y,z)의 변위를 나타낸다.

$$\vec{\varepsilon}(x,y) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \, \varepsilon_{yy} \, 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$
(4.4)

응력 벡터와 변형 벡터는 아래의 식 4.5와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 \nu & 0 \\ \nu 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}$$
(4.5)

정적 평형을 유지하기 위해 응력으로 인한 힘은 외력과 같으며 무한히 작은 요소 이때의 Strain Tensor는 강체에 의한 회전을 배제하여 Green Strain Tensor는 텐서 표기법으로 아래의 식 4.6과 같이 쓸 수 있다.



$$\begin{split} \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2} \left(F_{ki} F_{kj} - \delta_{ij} \right) \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \right) \end{split}$$
(4.6)

대칭인 Strain tensor는 아래와 식 4.7과 같이 6개의 성분을 가진 행렬로 구성된다.

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \, \varepsilon_{xy} \, \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \, \varepsilon_{yy} \, \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \, \varepsilon_{yz} \, \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$
(4.7)

이때 Strain tensor의 각 성분에 대한 구체적인 식은 아래의 식 4.8 과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial X} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial X} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial Y} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial Z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial Z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial Z} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X} \frac{\partial v}{\partial Y} + \frac{\partial w}{\partial X} \frac{\partial w}{\partial Y} \right]$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{\partial w}{\partial X} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{\partial v}{\partial X} \frac{\partial v}{\partial Z} + \frac{\partial w}{\partial X} \frac{\partial w}{\partial Z} \right]$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial Z} + \frac{\partial w}{\partial Y} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial Y} \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{\partial v}{\partial Y} \frac{\partial v}{\partial Z} + \frac{\partial w}{\partial Y} \frac{\partial w}{\partial Z} \right]$$
(4.8)

비선형 해석의 수렴성 평가는 반복적인 강성행렬의 재계산 및 재계산 된 강성행렬 을 사용하여 증분변위 (ΔU)를 계산하고 외력 항 {F_n^a} 과 내력 항 {F_{n+1}^a}의 차가 허용 오차 내에 도달할 때까지 아래의 식 4.9와 같이 함수의 미적분을 반복적으로 증분 하 여 근사치를 추정하게 된다.



$$x_{1} = x_{0} - \frac{f(x_{0})}{f'(x_{0})}$$

$$x_{n+1} = x_{n} - \frac{f(x_{n})}{f'(x_{n})}$$
(4.9)

이러한 비선형 해석과정에서 강성행렬의 재계산, 수렴성 평가에 따른 반복 해법의 과정에 의해 해석 소요 시간이 증가하지만, 구조물이 하중에 의해 비선형적(Non-linear) 거동을 띄게 될 경우 이를 고려하여 비선형 해석을 수행하여야 한다.

본 연구에서 수행될 Blended HDPE의 경우 응력-변형률의 관계가 비선형을 띄고 있으며 부피가 얇아 대변형(Large deformation)이 예상되는바, 구조해석 Ansys Workbenc h 19.2 tool을 활용하여 기하학적 형상 변화를 고려한 정적 구조해석(Static Structural)을 수행한다.

해수압을 받게 되는 부표의 경우 해수압에 의해 소성변형 가능성이 있으며, 응력 집중에 따른 파괴가 발생할 수 있으므로 연성재료의 항복을 판단하는 기준 척도로 폰 미세스 응력를 관찰하여 항복강도와 비교를 통해 소성변형 여부를 판단했다.

연성재료의 항복을 판단하는 기준 척도로 사용하는 폰 미세스 응력은 3축의 복합 하중을 받는 구조에서 아래의 식 4.10으로 표기 할 수 있다.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\left[\frac{1}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]\right]}$$
(4.10)

4.2 해석 모델링 및 경계조건 설정



Figure 4.3 Summary of boundary conditions applied for the FEM analysis

Figure 4.3은 부표가 겪게 될 해양환경폭로 시험에 대한 경계조건 및 열피로도 시 험에 대한 경계조건을 모식도이다. 해석 모델의 실제 모델의 경우 부표 중앙부에 부표 의 치수 및 제조사 등이 양각되어 있지만, 이는 수치해석에 영향을 미치지 않을 것으 로 판단되어 해석 시간을 단축하기 위해 이를 무시하고 Catia V5R18 tool을 사용하여 4mm부터 6mm까지 1mm씩 두께를 증가시켜 모델링을 수행하였으며, Figure 4.4와 같이 부표 앞면을 X축을 기준으로 하여 XZ 평면과 YZ 평면에 Symmetry 조건을 설정하여 해석모델을 간략화하였다.





Figure 4.4 A Symmetry condition for computational model

부표의 압력 및 열에 대한 해석은 장기간의 시험 조건을 고려하여 정상상태(Steady state)로 가정하고 Static Structural에서 해석을 수행하였다. 연구대상인 부표는 재료의 비선형성 및 비선형성 변형 거동이 예상되는바 비선형 기계적 물리 환경 설정을 통해 Nonlinear Mechanical Mesh 설정 및 부표 곡면부 형상을 고려하여 아래 Figure 4.5와 같 이 형상의 자유도가 높은 삼각 메쉬를 사용하여 평균 크기 5mm로 격자를 설정하였으며, 해석에 사용된 4mm, 5mm, 6mm 부표 모델의 Node와 Element의 개수는 아래의 Table 4.1과 같다.





Figure 4.5 computational domain and meshed model

	-		
	4T buoy	5T buoy	6T buoy
Nodes	74,353	79,935	60,346
Element	37,003	41,381	31,816

Table 4.1 summary of the number of nodes and elements

해석은 부표의 대 변형을 고려하여 Solver Controls에서 Large deflection을 설정하여 해석을 수행하였다. 부표를 구성하고 있는 요소에 설정된 각 요소에 인장실험, 열물성 실험 측정을 통해 얻은 Blended HDPE의 물성을 대입하여 해석을 수행하였으며 해석에 사용한 밀도, 탄성계수, 항복강도, 열팽창계수는 아래의 Table에 4.2에 정리하였다.

부표의 소성변형을 모사하기 위해 Blended HDPE의 항복점 이후 진응력-변형률 선 도를 Figure 4.6과 같이 다중직선(Multi-linear) 모델화하여 항복강도 이후의 응력-변형률 을 모사하여 해양환경폭로시험 과정에서 부표에 부하될 압력 0.05 MPa 과 열피로도시 험에서 부하되는 온도변화 (ΔT=80℃)를 경계조건으로 설정하여 해석을 수행하였다.

Table 4.2 Blended HDPE Properties applied for FEM analysis

	Vound's		Tonsilo Viold	Tensile	Coefficient of
Density	modulus	Poisson's Ratio	Strength	Ultimate	Thermal
(kg/cm3)				Strength	Expansion
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(10-6mm/mm℃)
874.87	1315.2	0.46	9.34	26.77	161.78



Figure 4.6 True S-S curve after yield strength for Blended HDPE

해수압에 의한 부표의 소성변형 및 성능변화를 확인하기 위해 부표의 초기압력 조 건, 5m 침수되었을 때의 압력 조건, 수면위로 부상했을 때의 압력 조건을 3 step으로 설정하였으며 이때의 압력 조건은 아래의 Table 4.3과 같다.

Table	4.3	Summary	of	load	conditions
		<i>J</i>			

	Initial	5m	Last
	pressure condition	pressure condition	pressure condition
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
MPa	0	0.05	0

최대 응력 부하 상태에서 부표의 폰 미세스 응력과 응력이 제거된 후의 변형을 확 인하였으며 해석 결과를 추출하여 Catia V5 R18 tool을 통해 유효 체적 및 유효 체적 의 변화에 따른 부력변화를 확인하였다.

각 두께별 폰 미세스 응력, 변형, 유효 체적 및 부력의 변화는 다음 장의 Figure 4. 7, Figure 4.8. Figure 4.9, Figure 4.10, Figure 4.11. Figure 4.12에 각각 도시하였다.





Figure 4.7 Calculated von mises stress and strain distributions for a 4mm buoy

4mm 부표의 압력해석 결과 부표의 측면부에서 17.0 MPa의 폰 미세스 응력을 확 인 할 수 있었으며 Blended HDPE의 항복강도 9.3 MPa와 비교해 보았을 때 폰 미세스 응력이 부표소재인 Blended HDPE의 항복강도보다 높음으로 인해 부표의 항복을 예측 할 수 있다. 또한 폰 미세스 응력은 파단강도 26.7 MPa보다 낮기 때문에 파단에 대해 안전할 것으로 예상된다.

해수압이 제거되었을 때의 부표의 변형은 폰 미세스 응력 분포와 유사하게 부표측 면부에서 26.8mm의 변형을 확인 하였다. 변형 후 부표의 유효 체적을 계산한 결과 0.2493m³ 의 유효 체적을 확인할 수 있었으며 유효 체적을 통해 변형 후 부표의 부력 을 계산한 결과 25.4 kgf의 부력을 확인할 수 있었으며 해수 내압 시험 후 초기 부력 27.3 kgf 대비 93.0%의 부력변화를 확인할 수 있었다.

계산된 부력감소율을 친환경 부표 시험 성적서의 해수 내압시험 후 부력감소율 90.5%와 비교한 결과 해석 결과와 시험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

CATIA VS - (4mm budy deform.CATPart) Start ENOVIA VS VPM Elle Edit View Insert Tools Window Help Auto Auto Auto Auto Auto Auto Auto		× a ×
4mm buoy deform yz plane zx plane Zx plane Geometrical Set.1 Geometrical Set.2 Measure InertiaVolume.10 Marea		14 8 8 8 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
Image: Construction Image: Construction Image: Constretion Image: Constretion	Measure ineffia ? X Definition Selection : PartBody_Amm buoy deform	, . 80 60 1 <> @ 41 1 €, 1,
	⊕ ⊨∋ Q, Q, 🍰 🖽 🗗 🕃 🦉 🖉 🔛 🔛 🗮 🝓 💧 🎉 📚 🗰 💋 1020kg.m3	ATIA

Figure 4.8 Effective volume for a 4mm buoy re-calculated after deformation





Figure 4.9 Calculated von mises stress and strain distributions for a 5mm buoy

5mm 부표의 압력 해석 결과 4mm 부표와 다르게 부표 전면부에서 13.1 MPa의 폰 미세스 응력을 확인할 수 있었으며 4mm 부표와 마찬가지로 5mm 부표에서도 소성변 형을 예측할 수 있으며 파단에 대해 안전할 것으로 판단된다.

폰 미세스 응력 분포와 유사하게 부표 전면부에서 4.4mm의 변형을 확인하였으며, 변형 후 부표의 유효 체적을 계산한 결과 0.02651 m³의 유효 체적과 유효 체적을 통해 부표의 부력을 계산한 결과 27.0 kgf의 부력을 확인하였으며 해수 내압 시험 후 초기 부력 대비 98.9%의 부력변화를 확인하였다.



Fig 4.10 Effective volume for a 5mm buoy re-calculated after deformation





Figure 4.11 Calculated von mises stress and strain distributions for a 6mm buoy

6mm 부표의 압력 해석 결과 부표 전면부에서 12.8 MPa의 폰 미세스 응력을 확할 수 있었으며 6mm 부표 또한 소성변형을 예측할 수 있으며 파단에 대해 안전할 것으 로 판단된다.

폰 미세스 응력 분포와 유사하게 부표 전면부에서 1.3mm의 변형을 확인하였으며, 부표의 세 모델 중 가장 적은 변형을 확인할 수 있었다. 변형 후 부표의 유효 체적을 계산한 결과 0.02674 m³의 유효 체적과 유효 체적을 통해 부표의 부력을 계산한 결과 27.2 kgf의 부력을 확인하였으며 해수 내압 시험 후 초기 부력 대비 99.6 %의 부력변 화를 확인하였다.



Fig 4.12 Effective volume for a 6mm buoy re-calculated after deformation

온도에 의한 부표의 소성변형 및 성능변화를 확인하기 위해 상온 온도조건, 열피 로도 시험 중 최저 온도 조건, 열피로도 시험 중 최고 온도 조건, 상온 온도 조건을 4 step으로 경계조건을 설정하였으며 아래의 Table 4.4에 정리하였다.

	Ambient	Minimum	Maximum	Ambient
	temperature	temperature	temperature	temperature
	condition	condition	condition	condition
	[℃]	[℃]	[°]	[°]
Temperature	22	-20	60	22

Table 4.4 Summary of thermal load condition

열피로도 시험조건 중 가장 큰 온도변화가 발생하는 -20℃에서 60℃로 승온 되었 을 때의 폰 미세스 응력과 최고온도에서 상온으로 돌아왔을 때의 변형을 확인하였으며 해석 결과를 추출하여 Catia V5 R18 tool을 통해 유효 체적 및 유효 체적의 변화에 따 른 부력 변화를 확인하였다.

각 두께별 폰 미세스 응력, 변형, 유효 체적 및 부력의 변화는 다음 장의 Figure 4. 13, Figure 4.14, Figure 4.15, Figure 4.16, Figure 4.17 Figure 4.18에 각각 도시하였다.





Figure 4.13 Calculated von mises stress and strain distributions for a 4mm buoy after thermal deformation

4mm 부표의 열 해석 수행 결과 고정조건으로 설정한 결합공에서 14.4 MPa의 폰 미세스 응력을 확인할 수 있었으며 소성변형을 예측할 수 있었으며 파단에 대해 안전 할 것으로 판단된다.

폰 미세스 응력 분포와 유사하게 간답대 결합공에서 0.02mm 의 변형을 확인할 수 있었다. 변형 후 부표의 유효 체적은 0.02683 m³로 초기부표의 유효 체적을 유지할 수 있음을 확인할 수 있었고 열에 의한 성능변화는 없을 것으로 판단된다.



Figure 4.14 Effective volume for a 4mm buoy re-calculated after thermal deformation





Figure 4.15 Calculated von mises stress and strain distributions for a 5mm buoy after thermal deformation

5mm 부표의 열 해석 수행 결과 4mm 부표와 유사하게 간답대 결합공에서 15.5 M Pa의 폰 미세스 응력을 확인할 수 있었으며 5mm의 부표 또한 소성변형을 예측할 수 있었으며 파단에 대해 안전할 것으로 판단된다.

간답대 결합공에서 0.01 mm의 변형을 확인할 수 있었으며 5mm 부표 또한 변형 후 초기 부표의 유효 체적인 0.02683 m³을 유지할 수 있음을 확인하였으며 열에 의한 성능변화는 없을 것으로 판단된다.



Figure 4.16 Effective volume for a 5mm buoy re-calculated after thermal deformation





Figure 4.17 Calculated von mises stress and strain distributions for a 6mm buoy after thermal deformation

6mm 부표의 열 해석 수행 결과 4mm, 5mm 부표와 동일하게 간답대 결합공에서 1 7.8 MPa의 폰 미세스 응력을 확인할 수 있었으며 6 mm 부표 역시 파단에 대해 안전 할 것으로 판단된다.

폰 미세스 응력 분포와 유사하게 간답대 결합공에서 0.02 mm의 변형을 확인할 수 있었으며 변형 후 부표의 유효 체적감소를 확인할 수 있었으나, 이는 부표의 성능에 영향을 끼치지 않을 것으로 판단된다.



Figure 4.18 Effective volume for a 6mm buoy re-calculated after thermal deformation

5. 결 론

본 연구에서는 HDPE의 중공성형과정 중에서 발생하는 Edge를 Scrub으로 재가공하 여 HDPE와 섞음으로 인해 발생하는 물성 차이와 이를 사용하여 제작된 친환경 부표 의 성능에 관한 연구를 수행하였다. 구조해석을 활용하여 친환경 부표 인증 시험 중 해양환경폭로시험, 열피로도 시험에 대한 안정성을 확인하기 위해 인장 실험과 열팽창 계수를 측정하는 실험을 진행하였으며 실험을 통해 얻은 물성의 비교를 통해 Blended HDPE 소재가 부표의 기능수행에 가장 적합할 것으로 판단하고 측정된 물성을 통해 부표의 인증조건인 해양환경폭로시험, 열피로도 시험 조건을 기준으로 재료의 비선형 성 및 부표의 기하학적 형상 변화를 고려하여 비선형해석(Non-linear Analysis)을 수행하 였으며, 부표 소재의 물성 분석 및 비선형해석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 실험을 통해 HDPE와 Scrub을 섞은 HDPE의 물리적 특성을 확인한 결과 Scrub 을 섞음으로 인해 HDPE의 물리적 특성이 강화됨을 확인하였다. 이는 재처리공 정의 열과 압력에 의해 고분자 재료의 기본구조인 라멜라 구조에 영향을 미친 것으로 판단된다.
- 2) 측정된 물성을 비교한 결과 소성변형이 시작되는 한계 응력인 항복강도의 경우 Blended HDPE가 HDPE보다 낮아 더 낮은 강도에서 소성변형을 일으키게 되나 소재에 부하될 수 있는 최대 강도인 최대인장강도 및 파단에 대한 저항성인 인성(toughness)이 더 우수함을 확인할 수 있었다. 따라서 Blended HDPE의 소재 가 부표의 기능수행에 더 적합한 소재로 판단된다.
- 3) HDPE, Blended HDPE, Scrub 3가지 시편을 사용하여 승온 속도와 축 방향을 기 준으로 열팽창계수를 측정한 결과 승온 속도의 차이는 열팽창계수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 승온 속도와는 달리 사출 방향 축에 따라 열 팽창계수의 차이가 있음을 확인하였으며, 사출 방향을 Y축, 사출 방향과 수직 인 방향을 X축으로 열팽창 계수를 비교해 보았을 때, Y축의 열팽창계수가 X축 의 열팽창계수보다 더 큰 것을 확인하였다.

- 4) 대변형 및 재료의 비선형성을 고려하여 부표의 비선형 해석 수행 결과 압력에 의해 4mm, 5mm, 6mm 부표의 소성변형 및 부력 감소를 확인할 수 있었으며, 실제 인증에 사용된 4mm 부표의 해석결과 초기 부력의 93%의 부력을 확인할 수 있었으며 이는 인증시험 결과 90.5%와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.
- 5) 해석수행 결과 해양환경폭로시험에 의해 부표의 소성변형 및 부력 감소를 확인 할 수 있었으나, 이는 친환경 부표 인증기준인 80% 이상의 부력을 유지할 수 있음을 확인하였으며, 부표의 기능 수행에 이상 없을 것으로 판단된다.
- 6) 열피로도 시험을 기준으로 하여 구조해석 수행 결과 열피로도 시험의 온도차 (80℃)에 의해 항복강도 이상의 폰 미세스 응력 분포를 확인할 수 있었으나 온 도차에 의해 발생되는 소성변형은 매우 작아 부표의 성능에 영향을 끼치지 않을 것으로 판단된다.



【참고문헌】

- [1] Derraik, J. G. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debr is: a review. Marine pollution bulletin, 44(9), 842-852.
- [2] Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. Marine polluti on bulletin, 62(8), 1596-1605.
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: sources and sinks. Environmental science & technology, 45(21), 9175-9179.
- [4] Cole, M. (2013). Microplastic Swallowing Zooplankton Environ. Sci. Technol, 4 7, 6646-6655.
- [5] Kang, J. H., Kwon, O. Y., & Shim, W. J. (2015). Potential threat of microplasti cs to zooplanktivores in the surface waters of the Southern Sea of Korea. Arc hives of environmental contamination and toxicology, 69(3), 340-351.
- [6] Lee, J., Lee, J. S., Jang, Y. C., Hong, S. Y., Shim, W. J., Song, Y. K., ... & Hon g, S. (2015). Distribution and size relationships of plastic marine debris on bea ches in South Korea. Archives of environmental contamination and toxicology, 69(3), 288-298.
- [7] 환경유래 식품 오염물질의 위해관리목표 설정기법 연구(IV), 2018, 9page
- [8] 2020년 친환경부표보급지원사업 시행지침, 2020
- [9] 수산포털자료, 어촌양식/천해양식어업권통계, 어촌양식/어업권/어업권 현황
- [10] 2019년 친환경부표 계약현황(단가 및 사진)_최종, 2019
- [11] http://www.matweb.com
- [12] Szczepański, K., Kwiatkowski, D., & Koszkul, J. (2006). Multiaspect analyzes of blow moulding process. Journal of Achievements in Materials and Manufact uring Engineering, 17(1-2).
- [13] http://pp.gscaltex.com/tech/gs_tec05_5.asp
- [14] Weckström, D. (2012). Changes in mechanical properties of recycled polyprop



ylene.

- [15] Su, K. H., Lin, J. H., & Lin, C. C. (2007). Influence of reprocessing on the m echanical properties and structure of polyamide 6. Journal of Materials Process ing Technology, 192, 532-538.
- [16] http://sonaki.pe.kr/earth1/txt/2322.html
- [17] https://www.weather.go.kr/weather/warning/standard.jsp
- [18] https://freshrimpsushi.tistory.com/52017
- [19] Kim, G. C. (1993). High Density Polyethylene. Polymer Science and Technolo gy, 4(1), 12-22.
- [20] https://m.blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=anseum&logNo=220739283367& proxyReferer=https:%2F%2Fwww.google.com%2F
- [21] https://civilsnapshot.com/S-S-curve-complete-explanation/
- [22] Mohsen, M. A., Abbas, A. M., & Saadoon, A. S. (2016). Effect of Loading Le vel and Span Length on Critical Buckling Load. Basrah Journal for Engineeri ng Science, 16(1), 15-21.
- [23] https://ghebook.blogspot.com/2011/06/tensor.html
- [24] 양희걸, & 주진원. (2011). 스트레인 게이지를 이용한 열팽창 계수 측정. 대한기 계학회 춘추학술대회, 404-409.
- [25] Implementation of 2D S-S Finite Element Modeling on MATLAB