Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 25(1), pp.5-13 (2017) ISSN 1225-6498 eISSN 2508-3015 https://doi.org/10.17137/korrae.2017.25.1.5

Original paper

TPU 재질을 적용한 다목적 고액분리 모듈의 여과판 구조해석

정희숙, 오두영, 고동신^{*}, 송형운 †

고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부 고등기술연구원 산연협력센터*

Structural Analysis of TPU Membrane Plate in Multi-purpose Module for Solid-liquid Separation

Hee Suk Jung, Doo Young Oh, Dong Shin Ko*, Hyoung Woon Song[†]

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering Center for Research & Business Cooperation, Institute for Advanced Engineering^{*}

(Received: Dec. 9, 2016 / Revised: Dec. 28, 2016 / Accepted: Dec. 28, 2016)

ABSTRACT: Polypropylene is the main existing material in the domestic market being used for the filter plate because of its moldability, low cost, and commercial availability. Polypropylene filter plate once distorted due to the high-pressure during operation may cause the problem in the continuous operation of the solid-liquid separation module. Thermoplastic Poly Urethane (TPU) can be a high-performance alternative material for the filter plate in the solid-liquid separation module of the dehydration process. Hence, to predict and evaluate the TPU for structural stability in the filter plate through analytical techniques designed and experimental verification is essential. As a result, TPU filter plate had maximum strain of 27.85 MPa at 20 bar pressure condition. This result is less than TPU stress-strain limit, which ensures the structural stability of the TPU material.

Keywords: Structural analysis, Filter press, Membrane, Thermoplastic Polyurethane, Polypropylene

초 록: 기존 국내 여과판의 재질은 주로 polypropylene 소재의 여과판을 사용하였으며 그 이유는 성형성이 좋 고, 가격이 저렴하며 매우 보편적으로 보급된 소재이기 때문이다. 그러나 고압에 의해 한번 뒤틀려진 polypropylene 소재 여과판은 재사용이 어려우며 가압형 고액분리모듈의 연속 운전에 문제를 야기할 수 있다. 따라서 기존 polypropylene 소재보다 성능이 뛰어난 TPU(Thermoplastic Poly Urethane) 소재개발을 위해 새 로운 소재에 대해 설계된 여과판의 구조적 안정성을 해석적 기법을 통해 예측하였다. 20 bar의 압력하중 하에 서 TPU를 적용한 여과판은 최대 변형량이 27.85 MPa로 나타났으며 이 값은 TPU 응력-변형률 (Stress-Strain) 한계치 이하 값으로 여과판 재질에 대한 구조적 안정성을 확보하였다.

주제어: 구조해석, 필터프레스, 여과판, 열가소성폴리우레탄, 폴리프로필렌

⁺ Corresponding author(e-mail : hwsong@iae.re.kr)

1. 서 론

2012년부터 하수슬러지. 가축분뇨의 해양배출이 금지되고 2013년부터 음식물류 폐기물 폐수의 해양 배출처리가 전면 금지됨에 따라 안전하고 적절한 육상처리방안의 모색이 필요하다^{1,2,3)}, 그러므로 현 시점에서는 슬러지 처리를 위한 탈수, 건조, 소각, 용융, 퇴비화 등과 같은 환경 친화적인 고효율 처리 공정들이 절대적으로 요구된다. 슬러지는 다양한 하·폐수처리 단계에서 침강되어 생성되는 수분을 다량 함유한 고형물질이다⁴⁾. 이러한 슬러지 발생량 은 단계별 처리공정의 강화로 인해 지속적으로 증 가하고 있는 추세이다. 국내에서 발생하는 슬러지 는 다량의 수분에 유기물 함량이 낮으므로 직접 소 각과 같은 열적 처리는 어려운 실정이다. 탈수공정 에 의해서 슬러지의 함수율을 최대한 낮출 경우 파 생되는 장점은 부피 감량으로 인해 운반 및 처리 비 용의 절감과 건조·소각 시 에너지절약 그리고 매 립에 의한 침출수 발생의 감소 효과 등을 기대 할 수 있다. 이러한 탈수공정에서 사용되는 여과판은 탈수효율적인 측면에서 매우 중요한 부품이다. 고 액분리모듈에 요구되는 압력 및 조건에 따라서 설 계된 여과판은 실험에 의해 구조적인 특성을 예측 하기에는 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 여 과판에 작용하는 하중에 취약하지 않은지 검증할 필요성이 있다.

여과판의 membrane은 우수한 내후성과 내화학 성 및 반복운동에 대한 강한 내구성을 요구한다. 기 존의 국내 여과판의 재질은 주로 polypropylene 소 재를 사용하였으며 그 이유는 성형성이 좋고, 가격 이 저렴하며 매우 보편적으로 보급된 소재이기 때 문이다⁵⁾. 그러나 고압에 의해 한번 뒤틀려진 polypropylene 소재의 여과판은 재사용이 어려우며 가 압형 고액분리모듈의 연속운전에 문제를 야기할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 polypropylene 소재의 대체 소재로서 내구성이 강한 열 가소성폴리우레탄(TPU)을 membrane의 소재로 적 용하여 polypropylene을 적용하였을 경우와 구조 적 특성을 비교 평가하고자 한다⁶⁾.

2. 재료 및 방법

2.1. 여과판의 구조 및 원리

수행하고자 하는 여과판의 구조 해석절차는 [Fig. 1]에 나타낸 바와 같이 기하모델을 생성하고, 생성된 기하모델을 토대로 유한요소모델을 구축해 서 여과판이 받는 압력하중 및 경계조건을 부여하 여 구조해석을 수행한다. 여과판이 받는 20 bar의 실제 압착압력조건을 적용하고 고정되어 있는 지지 판의 가장자리를 경계조건으로 부여하여 구조해석 을 수행함으로써 설계된 여과판의 구조적인 특성변 화를 평가하였다.

다목적 여포이동식 고액분리모듈에 사용되는 여 과판의 내부구조는 membrane, base, center socket, inlet socket으로 구성되어 있다. 고액분리 모듈의 메카니즘은 기계장치에 의한 가압식 탈수여 과에 바탕을 두고 있으며 슬러리 형태의 혼합물에 펌프를 이용해 가압탈수하게 된다. [Fig. 2]에 나타 난 것과 같이 여과판이 장착되어 형성되는 여실 안 으로 여액주입구를 통해 유체를 주입하며 보통 하 나의 모듈에 이러한 여과판이 여러 장으로 구성되 어 있다⁷⁷. 여과판의 표면에 위치하는 여과포는 필 터의 역할을 하며 여과판 사이의 고체-액체혼합물 에 고압을 가하여 혼합물을 고액분리하게 된다.



Fig. 1. Process of structural analysis.



Fig. 2. Filtration process in the filter press.

2.2. 여과판 해석모델

Membrane을 제외한 부분은 모두 polypropylene 재질을 적용하고 membrane은 기존에 주로 사용하 는 polypropylene과 TPU 재질을 각각 적용하여 구 조해석을 수행하였다.

구조해석에서 사용된 기하모델에서는 inlet socket 을 생략하고 구속조건으로 설정하였다. 설계된 여 과판은 비선형 해석조건으로 구조적 변형특성을 평 가하였다. 또한 최대변형조건으로 membrane에서 40 mm거리에 있는 접촉면을 생성하여 최대변형조건 을 주었을 때 변화추이를 확인하였다. 1000×1000 사이즈 여과판의 구성된 기하모델은 여과판 geometry model로서 [Fig.3]에 나타내었다.



Fig. 3. Geometry model of filter plate.

또한 여과판 유한요소모델은 모두 3차원요소를 이용하여 구성하였다. 구성된 유한요소모델의 node 수는 142,608개, element수는 130,825개로 구성하 였다. [Fig. 4]에 여과판의 유한요소모델을 나타내 었다. base plate와 membrane은 solid element로 구성되었으며 contact wall은 shell element로 구 성하였다.



Fig. 4. Finite element model.

2.3. 여과판 해석조건

[Table 1]에 구조해석에 필요한 polypropylene 과 TPU에 대한 물리적 특성을 나타내었다.

Table 1. Material properties of	filter	plate
---------------------------------	--------	-------

	Polypropylene	Thermoplastic Polyurethane (TPU)
Density(g/cm ³)	0.920	0.8995
Modilus of Elasticity (MPa)	1,300	11.85
Poisson's Ratio	0.45	0.49

고무, 중합체(polymer) 그리고 인체의 조직(tissue) 등은 하중을 받아 변형하게 되면 내부에 축적되는 변형률에너지(strain energy)는 이동경로와 무관한 특성을 나타낸다. 그 결과 변형률에너지는 포텐셜 함수(potential function)로 표현이 가능하며, 이러 한 재질은 초탄성체(hyperelastic material)로 불린 다. 초탄성체의 변형률에 대한 응력의 변화, 즉 응 력-변형률선도(stress-strain diagram)는 현저한 비선형성(nonlinearity)을 나타내기 때문에 수학적 인 표현을 위해 많은 연구가 진행되었다^{8,9)}. 고무의 변형을 표현하기 위해서 재료거동이 탄성 및 등방 성이라는 가정하에 변형률 에너지함수 W는 아래와 같이 나타낸다.

$W=W(I_1, I_2, I_3)$	(1)

 $W=W(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3) \cdots (2)$

여기에서, λ₁,λ₂,λ₃은 주연신률이며, 재료가 등방 성인 경우, I₁,I₂,I₃은 다음의 식 (3)-(5)와 같다.

 $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ (3)

$$I_{2} = \lambda_{1}^{2} \lambda_{2}^{2} + \lambda_{2}^{2} \lambda_{3}^{2} + \lambda_{3}^{2} \lambda_{1}^{2}$$
 (4)

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \cdots (5)$$

대부분의 고무재료는 비압축성이므로, I₃=1이며, 일반적으로 고무의 해석에는 Mooney-Rivlin모델



(a)Polypropylene

Fig. 5. S-S curve (a)Polypropylene (b)TPU.

과 Ogden 모델이 널리 사용되고 있으며 Ogden모 델이 초탄성체의 재료거동을 보다 정확하게 표현한 다고 알려져 있다¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서는 Ogden 모델식을 여과판의 구조해석에 적용하였으며 Ogden모델은 식 (6)과 같다.

Ogden model :

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{n=1}^{N} \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \cdots (6)$$

여기서 an, µn은 재질상수이며 일축인장시험, 압 축시험, 전단시험 등으로부터 얻어지는 응력과 변 형률의 관계를 이용하여 결정된다.

비선형재료 물성 값으로는 Ogden모델을 이용하 였고, 유한요소해석의 비선형재질상수를 이용하기 위하여 인장시험 등을 통해 얻은 데이터를 비선형 재질상수에 적용하였다. [Table 2]에 Ogden함수의 비선형재료상수를 나타내었다.

Table 2. Nonlinear material constants of TPU forOgden function

	μ	α
1	-10.2725949	4.22179187
2	2.49226264	4.81638378
3	21.4089544	-7.32150660

								TP	U
	20 -							/	
(INFa)	15 -						/		
Scaless	10 -				_				
	5 -	/							
	0 -	(_
	()	50	100	150 Stra	200 in (%)	250	300	350
					(1)				



[Fig. 5]는 polypropylene과 TPU의 인장강도시 험을 통해 얻은 데이터를 응력-변형률(Stress-Strain) 곡선으로 나타낸 그래프이다. Polypropylene 은 plastic 재질이기 때문에 대변형이 없으므로 인 장강도시험을 통해 얻은 데이터를 바로 적용하여 선형해석을 수행하였으며 TPU는 hyper elastic이 기 때문에 대변형을 가정하여 Ogden모델을 적용하 였다. 따라서 본 연구에서는 재료를 비선형으로 가 정하고 비선형해석을 수행하였으며 구조해석을 위 해 구조해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.

여과판의 구조해석을 수행하기 위해서 구조해석 을 위한 하중조건 및 구속조건을 적용하였다. 여과 판에 작용하는 20 bar의 압력하중조건을 적용하였 고, 경계조건으로는 여과판의 구조가 대칭구조이기 때문에 symmetry 조건을 적용하였으며, 여과판을 지지하는 여과판의 base판 테두리부분과 여과판 중 앙 socket 부분은 완전히 고정하였다.

본 연구에서는 실제 현장에서 여과판을 고정시 키는 범위인 40 ㎜ 조건의 contact wall을 생성하 여 contact 조건의 유무와 membrane재질의 종류 에 따라 4 case구조해석을 수행하였다. [Table 3] 에 해석모델에 대한 design variable 조건을 나타 내었다.

Model	Contact condition	Filter plate Size	Material	Pressure
Model		(mm)	Material	(bar, g)
Case 1	non contact	1000×1000	Polypropylene	20
Case 2	non contact	1000×1000	TPU	20
Case 3	contact	1000×1000	Polypropylene	20
Case 4	contact	1000×1000	TPU	20

 Table 3. Condition of design variable

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 구조해석에 의해 최적화한 1000×1000 여과판의 설계모델에 대해 기존에 주로 사용했던 Polypropylene 재질과 새롭게 TPU 재질 을 적용했을 때를 비교평가하고, 20 bar로 압력하 중에서의 구조적 특성변화를 고찰하였다. Case 1과 2는 contact 조건은 없으며 여과판 자체의 구조적 변형을 확인한 모델이다.

polypropylene 재질을 적용한 1000×1000 여과 판 구조해석결과는 20 bar의 압력하중에 대한 구조 적인 특성을 확인하였다¹¹⁾. [Fig.6]과 같이 주로 여 과판중앙부 지지구조가 edge 부분의 노치효과 (notch effect; 구조물의 불연속부나, 용접금속과 모재와의 재질적 불연속과 용접결함 등 응력집중의 원인이 되며 이것이 노치의 큰 원인이 된다. 재료에 노치를 만들면, 피로나 충격과 같은 외력이 작용할 때, 집중응력이 생겨서, 파과되기 쉬운 성질을 갖게 된다. 이 효과를 노치효과라고 한다)에 의해 구조적 인 취약성이 나타나고 있는 것을 확인하였다¹²⁾. polypropylene을 적용한 해석모델의 최대 변형량 은 78.49 mm, 최대응력은 418 MPa로 나타났다¹¹⁾.

동일한 design variable 조건에서 membrane의 재질만 TPU로 변경하여 구조해석을 한 결과는 아 래 [Fig. 7]과 같다. 압력하중이 20 bar로 최대 변 형량은 237 mm, 최대응력은 여과판중앙부 소켓부분 에서 98 MPa로 나타났다. 이것은 polypropylene 재질을 적용하였을 때와 비교하면 최대 변형량은 약 3배 이상 증가하였고 최대응력은 약 4.26배 감 소한 것이다. 이러한 결과는 여과판의 재질을 polypropylene에서 TPU로 변경하는 것이 국부에 작용하는 응력을 감소시킬 수 있으며 팽창과 수축이 반복되는 공정에서의 여과판 수명을 늘리고 경제성 을 확보할 수 있는 방안이 될 수 있음을 나타낸다.



Fig. 6. Structure analysis result of polypropylene filter plate(non-contact).



Fig. 7. Structure analysis result of TPU filter plate(non-contact).

Cor	ndition	Result		
Filter plate material	ilter plate material Contact Condition		Peak strain(mm)	
Polypropylene	\times	418	78.49	
TPU	×	98	237	
Polypropylene	0	230	40	
TPU	0	27.85	40	

Table 4. Structural deformation result of filter plate

변형량이 가장 큰 부분은 노치효과가 나타나는 여 과판 중앙부 소켓부분이며 여과판이 압력하중을 반 복하여 받을 때 여과판의 수명을 결정짓는 중요한 부분이라고 할 수 있다. 이 부분의 응력은 98 MPa 로서 TPU 샘플의 인장강도시험을 통해 얻은 응력-변형률(Stress-Strain) 곡선을 확인해보면 한계치 인 348.84 MPa에 도달하지 못한 값임을 알 수 있 다. 이 결과는 TPU 재질이 갖는 한계변형률보다 작 은 값으로서 20 bar의 압력하중을 적용하였을 때 설계된 여과판의 TPU 재질에 대한 구조적 안정성 을 확보하였음을 확인하였다.

[Table 4]는 contact 조건의 유무와 여과판의 재 질에 따른 구조적변형을 확인한 것으로 1000×1000 여과판 재질에 따른 최대응력과 최대 변형량을 비 교한 결과이다.

Case 3과 4 는 현장에서 적용되는 최대변형 범위 인 40 mm contact 조건을 설정하여 해석하였다. 40 mm의 contact 조건에서 Polypropylene 재질과 TPU 재질을 각각 적용했을 때를 비교평가하고, 20 bar로 압력하중에서의 구조적 특성변화를 고찰하였 다[Fig.8]. Polypropylene재질을 적용한 40 mm contact 조 건에서 여과판의 최대응력은 여과판중앙부와 여과 막 테두리부분에서 230 MPa을 나타났다. 그 결과, 20 bar 압력을 받을 때 여과판중앙부와 membrane 테두리부분이 응력이 집중되는 것을 확인하였다. 또한 membrane 테두리 부분의 응력이 여과판의 중심을 기준으로 대각선 방향과 수직방향이 다르게 분포하는 것을 알 수 있다. 이것은 여과판의 구조가 비교적 안정된 원형구조가 아닌 사각형구조로써 여 과판 중심을 기준으로 R방향이 일정하지 않기 때문 에 응력분포가 다르게 나타나고 거리가 짧은 쪽이 집중응력을 받기 때문이다. 따라서 여과판 중심에 서 R방향으로 거리를 최대한 일정하게 구현하는 것 이 테두리부분의 집중응력을 회피 할 수 있는 구조 로 판단하였다.

따라서 구조해석을 통해 최적화된 여과판은 중앙 부의 구조를 변형하였을 경우, 굴곡을 줄여주고 소 켓과 맞닫는 부분에 여유공간을 줌으로써 최대응력 을 줄여줄 수 있었다. 중심부의 구조에서 굴곡을 최 대한 줄여주고 20 bar의 압력을 받았을 때 중앙소 켓에 의한 edge를 감소시킬 수 있게 해주었기 때문 으로 판단된다.



Fig. 8. Structure analysis result of polypropylene filter plate(contact).

중앙부구조를 edge를 최소화시키는 방향으로 최 적화 설계된 여과판 모델을 동일한 design variable 조건에서 membrane의 재질을 TPU로 변 경하여 구조해석을 한 결과는 [Fig. 9]와 같다. 여 과판의 최대응력은 27.85 MPa로 나타났으며 이는 Polypropylene 재질을 적용하였을 때 보다 약 8.2 배 감소한 값이다. 이는 20 bar의 압력으로 팽창할 때 여과판이 받는 응력으로서 고무와 같이 유연한 특징을 여과판 재질로 변경함으로 인해 기존에 높 은 응력 값을 갖던 membrane 테두리 부분의 응력 을 낮추고 여과판중앙부분의 응력도 감소시키는 결 과를 나타낸 것이다.

또한 [Fig. 10]에서 보듯이 Contact 조건의 설정

하였을 때 최대 변형량을 확인해보면, 기존 polypropylene 재질을 적용한 구조해석 결과에서 보다 최대 변형범위 설정 시 변형량이 고르게 분포 하는 것으로 나타났다. 붉은색으로 표현된 부분이 여과판이 변형을 일으킨 부분이며 변형한계 조건인 벽과 맞닿는 부분으로 붉은색은 최대 변형된 부분 을 나타낸다. 여과판 재질을 TPU로 변경하면서 여 과판중앙부의 응력은 감소하면서 중앙부까지 고르 게 압력분포를 갖는 것을 알 수 있었다. 이것은 실 제 현장에서 탈수에 적용하였을 경우 여과판의 압 력분포가 고르게 분포되어 여과효율측면에서 긍정 적인 결과이다.



Fig. 9. Structure analysis result of TPU filter plate(contact).



Fig. 10. Peak strain of contact condition (a) Polypropylene (b) TPU.

4. 결 론

본 연구에서는 다목적 여포이동식 고액분리모듈 에 사용되는 1000×1000 여과판을 재질에 따른 구 조적 특성을 평가하기 위해 polypropylene와 TPU 각각의 재질을 적용한 여과판의 구조해석을 수행하 였다. 이에 따라 여포이동식 고액분리모듈에 사용 되는 1000×1000 여과판의 형상에 작용하는 20 Bar의 압력에 의한 구조적 특성변화를 고찰하였다. 실제 현장에서 여과판의 양옆이 고정되는 조건인 40 mm contact 조건의 유무와 Polypropylene과 TPU 재질 조건을 적용한 모델에 대해 비교 평가하 였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. Polypropylene재질을 적용한 1000×1000 여 과판의 구조해석 결과, 경계조건에 대한 민감도 분 석을 통한 구조적 특성을 검토하였을 때 전반적으 로 최대응력이 높게 나타나기 때문에 재질강성에 대한 보강이 필요하다.

2. TPU 재질을 적용한 1000×1000 여과판구조해 석결과, contact 조건을 주었을 때 최대응력이 27.85 MPa로 기존 Polypropylene 재질에 비해 약 8배 이상 감소한 결과를 나타내었으며 TPU 재질을 적용하면 재질에 대한 강성을 높이는데 유리할 것 으로 판단된다.

3. 또한 TPU 재질을 적용하였을 때 최대 변형량 을 갖는 부분이 TPU 응력-변형률(Stress-Strain) 한 계치인 348.84 MPa에 도달하지 못하였으며 이결과 는 TPU 재질이 갖는 한계변형률보다 낮은 값으로 서 20 bar의 압력하중을 적용하였을 때 설계된 여 과판의 TPU 재질에 대한 구조적 안정성을 확보하 였음을 의미한다.

4. 실제 필터프레스의 조건과 동일하게 여과판 양사이드의 최대변위를 40 mm로 제약하여 적용하였 을 때, Membrane의 압력분포가 고르게 분포되었 으며, 이는 실제현장에서 탈수에 적용하였을 때 고 른 압력분포를 갖게 하여 여과 효율적인 측면에서 긍정적일 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농림축산식품부 수출전략기술개발사 업과 첨단생산기술개발사업에 의해 이루어진 것임

References

- Kim I. H., Ahn K. H., and Kim I. T., "Policy and Technology Trends for Organic Waste-to-Energy", society for new and renewable energy, pp. 79-79. (2016).
- Kim J. H., Choi W. J., and Lim B. S., "Status of Domestic Sewage Sludge Treatment and Improvement Plan for Thermal Recycle of the Sludge via Drying Process", Journal of The Institute of Environmental Studies, pp. 49-58. (2013).
- Lee D. J., Lee S. I., KWon Y. H., Bae I. S., and Cho. I. N., "A Study on Environmental and Economic Analysis for Each Treatment of Sewage Sludge(I)", J. of KORRA 24, 3-13. (2016).
- Bae, J. K., Hwang, J. W., Ko, H. B., and Ko, B. S., "Study on the analysis of sludge characteristics for incineration and drying system according to sewage sludge characteristics", Journal of Korea society of waste management, 19(3), pp. 283-291. (2002).
- http://starletzzang.blogspot.kr/2014/03/ pppolypropylene.html
- Choi E. J., Yoon J. H., Jo J. K., Shim S. E., Yun J. H., and Kim I., "Present and Future of Thermoplastic Elastomers As Environmentally Friendly Organic Materials", Elastomers and Composites, 45(3), pp. 170-187. (2010).
- Jung E. Y., Kim H. S., Jang D. S., Na E. S., and Kim H. S., "Theoretical Investigation of the dewatering process in a filter press for the treatment of sewage sludge", KSEE(The Korean Society of Environmental Engineers) Spring Conference pp. 1406-1410, (2003)
- 8. S. R. Swanson and L. W. Christensen, "Large

Deformation Finite Element Calculations for Slightly Compressible Hyperelastic Materials", Computer Struct.,

- pp. 81. (1985).
 J. A. Sundberg and B. H. Haggblad, "Large Strain Solutions of Rubber Components", Computer Struct., 17, pp. 835. (1983).
- Woo C. S., "A Study on the Fatigue Life Prediction and Evaluation of the Rubber Components", Chungnam National University. (2004).
- Jung H. S., Ko D. S., and Song. H. W., "Structural Analysis for Shape Optimization of Filter Plate in Multi-purpose Solid-liquid Separation Module", Journal of Korea Society of Waste Management, 33(2), pp.164-170. (2016).
- Yun, S. K. and Park, B. G., "Filtering System Design and Structural Analysis for Intake Water of Ship's Ballast Tank", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 282–287. (2009).