

## 오일샌드 테일링 처리 동향연구

오경석<sup>†</sup>

인하공업전문대학 화학생명공학과, 교수  
(2023년 3월 6일 접수: 2023년 4월 26일 수정: 2023년 4월 27일 채택)

### Brief Review of Tailings Treatments in Oil Sands Field

Kyeongseok Oh<sup>†</sup>

*Department of Chemical and Biological Engineering, Inha Technical College  
(Received March 6, 2023; Revised April 26, 2023; Accepted April 27, 2023)*

**요약** : 오일샌드 테일링의 방류 예정 소식은 찬반 논쟁을 이끌고 있다. 노천광 채굴연계 비투멘 추출공정은 폐수의 발생이 필연적이며, 테일링 인공호수에 저장된다. 현재, 방치된 테일링 인공호수의 규모는 갈수록 그 양이 커지고 있다. 테일링 처리가 매우 어려운 원인으로, 테일링 내의 MFT(mature fine tailings) 층의 생성과 연관이 깊다. 테일링 처리를 위해서는, MFT내에 분산된 미립자를 효과적으로 응집시켜 고체와 액체를 분리하는 핵심 공정이 필요하다. 본 논문에서는 먼저 채굴연계 비투멘 추출공정을 소개하였고, 이를 통해 테일링의 구성 성분과 MFT 특성에 대해서 정리하였다. 또한, MFT 처리공정에 대해 살펴보았다. 향후, 효과적인 고분자 응집제의 선정과 효율적인 탈수공정의 연계성으로 MFT 처리가 성공적으로 진행되기를 기대한다.

**주제어** : 오일샌드, 비투멘, 테일링, 방류, 폐수처리

**Abstract** : The controversy is becoming a hot issue after informed that the water release from Canadian oil sands tailings may initiate within a few years. The surface-mined bitumen extraction in open pit generates wastewater inevitably, which has been conveyed to store in tailings ponds. Currently, the size of tailings pond is getting seriously larger. It is known that tailings treatment is very difficult because the generation of MFT (mature fine tailings) layer is hardly processable. It would be the key process to separate solids and liquid placed within MFT where fine particles are well dispersed. In this paper, the surface-mined bitumen extraction process was first introduced, and followed by presenting the components of tailings as well as the characteristics of MFT. In addition, MFT process options were evaluated. It is expected that successful MFT treatments may be achieved by dewatering process using effective polymer flocculants in near future.

**Keywords** : oil sand, bitumen, tailings, water release, wastewater treatment

---

<sup>†</sup>Corresponding author  
(E-mail: kyeongseok.oh@inhatc.ac.kr)

## 1. 서론

에너지 자원인 원유의 가격 변동은 석유자원 개발에 많은 영향을 끼치고 있다. 일례로, 원유의 가격상승은 캐나다의 오일샌드(Oil sands) 자원개발의 동력이 되었다. 주로 알버타주에 매장된 오일샌드 생산은 대부분 합성원유(syncrude) 형태로 가공되어 미국으로 수출된다[1,2]. 오일샌드는 노천광산(open pit)에 매장된 오일과 모래가 혼합된 광물(ore)을 채굴한 후 Clark hot water 공정을 거쳐 비투멘(bitumen)이라고 불리는 오일성분을 회수한다 [3]. 분자량이 큰 비투멘 성분은 상온에서 점성이 매우 크기에, 수송관을 이용하기 위해서는 파라핀계 용매에 희석하여 이송한다 [1,2]. 현재 비투멘 회수공정은 채굴없이 생산이 가능한 인씨추(in-situ) 공정이 함께 사용되고 있다. 인씨추 공정은 오일샌드 매장 깊이가 75m 이상인 곳에 스팀(steam)을 사용하여 비투멘을 유동화시켜 회수하는 방식이며, CSS (cyclic steam stimulation) 공정과 SAGD (steam assisted gravity drainage) 공정이 많이 알려져 있다 [2]. 이밖에도, 오일샌드에서 오일성분을 회수하는 방법에 대해서는 다른 자료에서 많이 찾을 수 있다 [4,5]. 그런데, 채굴연계 공정(surface-mined process)으로 비투멘을 생산할 경우에는 많은 물이 소비되며, 공정에 사용된 물은 테일링 인공호수 (tailings pond)로 보내진다. 여기서, 테일링이라는 용어는 광물 채굴 공정에서 흔히 사용하는 용어이며, 비투멘 채굴연계 공정에서도 같은 의미로 사용되는데 일종의 폐수를 테일링이라 한다. 또한, tailings pond 번역을 테일링 연못라고도 할 수 있지만, 그 규모가 매우 크기에 이 논문에서는 테일링 인공호수로 표현하였다. 일반적으로, 1배럴의 비투멘을 생산하기 위해서는 약 4배럴의 물이 필요하며, 사용되었던 4배럴의 물에서 약 3 배럴은 다시 비투멘 생산에 재순환되어 사용된다고 알려져 있다[6-8]. 재순환되는 물의 양이 많지만, 여전히 테일링으로 폐수형태로 계속해서 많은 물이 모아진다. 이런 오일샌드 테일링에는 모래, 점토와 같은 무기물, 회수가 안된 일부 비투멘 성분, 비투멘 회수공정에 사용되었던 나프타 혹은 파라핀 용매, 그리고 생산공정에서 발생한 나프텐산(naphthenic acid) 등이 포함되어 있다 [9,10]. 보도된 바에 의하면, 2022년말 현재 테일링의 폐수 규모가 약 1.7 trillion 리터로 알려졌다[11]. 그동안, 방치되다시피 한 테일링 인공호

수의 규모가 제어가 불가능할 정도로 커졌고, 테일링을 저장하고 있는 뚝(dyke)의 안정성 등이 계속 문제점으로 제시되었다. 이에, 캐나다 정부 (Alberta Energy Regulator)에서는 2025년 초반기에 테일링에 저장된 폐수를 폐수처리를 거쳐 인근 아타바스카강(Athabasca River)으로 방류할 예정이라고 하였다[12]. 이로 인해, 2022년에는 환경보호단체를 중심으로 반대기류가 거세지며, 언론을 통해서 크게 보도되었다. 실제로, 테일링 처리 방법들은 이미 오일샌드 생산 초창기부터 다양한 방법들이 제안되고 평가되었지만, 수십년에 걸쳐 시도되지 못하고 테일링 인공호수에 방치되고 있는 상황이다 [6,12]. 우리나라와는 관계가 없다고 할 수 있겠으나, 테일링 규모가 워낙 방대하고, 또한 석유 개발과 환경보호라는 대치적인 상황에서 국제적인 관심은 매우 높다.

본 동향연구에서는, 테일링 처리와 관련하여 세 부분으로 나누어 정리하였다. 먼저, 테일링이 발생하는 채굴연계 비투멘 생산 공정에 대해서 살펴보았다. 이를 통해, 테일링에 포함된 물질과 성분들에 대해서 살펴보았다. 두 번째로, 테일링 인공호수내에서 콜로이드 상으로 오랜기간 안정한 상태를 유지하고 있는 MFT(mature fine tailing) 처리 방법 중 응집제를 이용한 고품질물과 물을 분리하는 방법들에 대해서 살펴보았다. 세 번째로는 현재 진행형인 고분자 응집제를 중심으로 탈수공정과 연계된 수처리 기술에 대해서도 살펴보았다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 오일샌드 생산과 테일링 처리 연구분석

#### 2.1.1. 채굴연계 비투멘 회수공정

비투멘은 분자량이 크고 점성이 매우 높은 탄화수소가 주성분이다. 비투멘에는 아스팔텐이라는 고리형의 탄소구조와 황, 질소 등의 원자를 포함하고 있다. 특히, 중동지역에서 생산되는 원유성분의 아스팔텐과는 다르게, 비투멘에 포함된 아스팔텐의 분자량은 더 큰 것으로 보고되기도 하였다[13,14]. 오일샌드 생산 공정은 오일샌드의 지질본포에 따라 나뉜다. 예를 들어, 지표면에 가까이 분포되어 있을 경우, 지표면을 걷어내고 채굴하는 노천광 오일샌드 채굴이 가능하며, 오일샌드가 지표면에서 깊이 매장되어 있을 경우에는

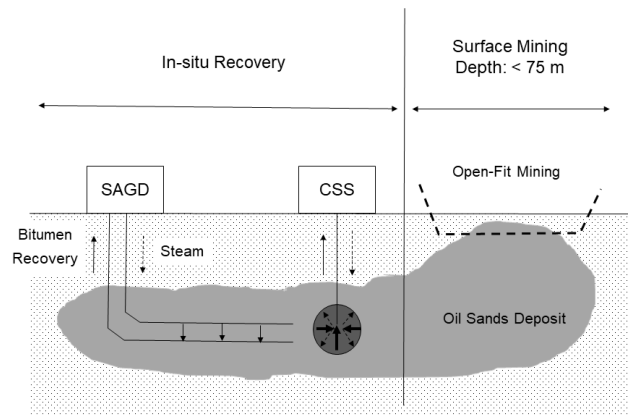


Fig. 1. Conceptual diagram of two different bitumen recoveries processed in in-situ recoveries and surface mining process.

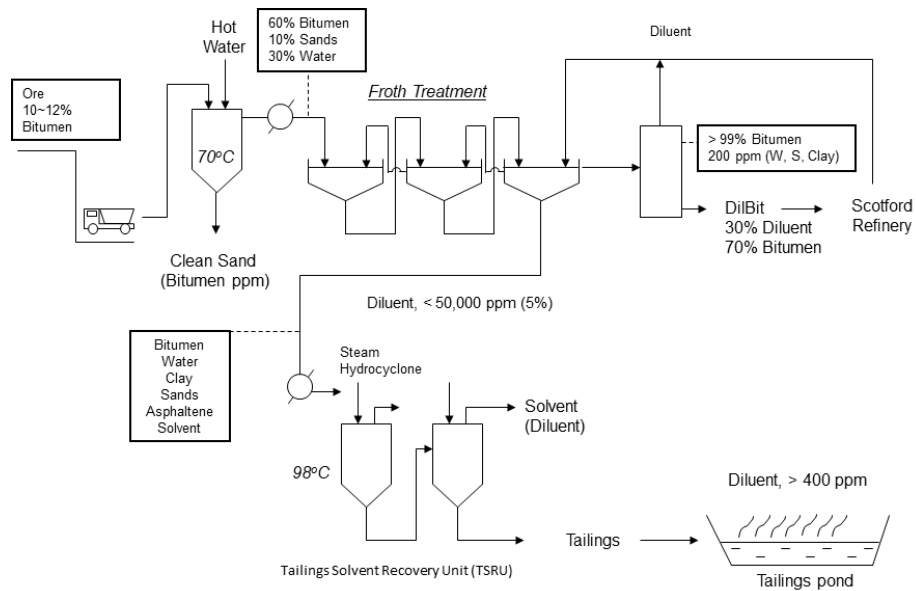


Fig. 2. Overall schematic diagram for bitumen extraction in surface-mined process.

스팀을 활용한 회수 방법이 경제적으로 유리할 것이다. Fig. 1에서는 비투멘의 회수 방법에 대해서 개략적으로 표현하였다[2].

그동안 비투멘의 생산량은 노천광 채굴을 통한 공정에서 더 많이 생산되었으나, 매장 분포를 고려한다면, 향후에는 인씨추 공정이 늘어날 것으로 기대된다. 2022년 기준으로, 오일샌드로부터 생산되는 원유의 양은 하루생산량이 3백만 배럴을 넘고 있다. Fig. 2에는 Hot Water 공정을 개략적으로 나타내었다 [2,3]. 비투멘이 포함된 오일샌

드 광물은 고온(70°C)의 물과 가성소다(NaOH)와 혼합되어, 오일성분과 광물 성분을 분리한다. 이 공정을 Froth이라고 하며, 비투멘이 상온에서는 점성이 매우 높기에 유체 특성을 나타내는 고온공정으로 진행된다. 비투멘의 비중은 물과 유사한 1의 값에 가깝지만, 이곳에 나프타 혹은 펜테인과 같은 비중이 낮은 파라핀계 용매를 혼합하면, 용매와 혼합된 비투멘이 상층부로 이동하여 효과적으로 물에서 분리된다[4,5]. 즉, 혼합된 오일성분들은 비중이 물보다 작기에 Froth의 상층

부에서 회수되며, 하층부에서는 모래성분들이 공정수와 혼합되어 폐수로 분리된다. 비투멘 회수공정에 발생된 폐수는 테일링이라 하며, 테일링 인공호수에 저장된다. 비투멘 1배럴 회수를 위해 필요한 약 4배럴의 공정수 중 약 3배럴의 물을 테일링으로부터 재순환하여 사용되고 있다[2]. 그렇지만, 공정수 부족분은 인근의 강에서 가져와야 하고, 양론적으로는 1배럴의 비투멘 생산 대비 1배럴의 폐수가 지속적으로 발생하기에 테일링 인공호수는 갈수록 커지고 있다. 만약, 우리가 테일링 인공호수 처리를 잘하고 있다고 가정한다면, 다음과 같은 시나리오대로 진행될 것이다. 테일링 성분 중 물과 고체가 층분리가 잘 되도록 유도한 후, 탈수공정을 통해 테일링에서 물을 제거한 후 남은 고형 물질을 처리하여 환경매립 (environmental relamation) 과정을 거치게 된다. 이후 생태계 복원 과정으로 이어질 것이다[11].

### 2.1.2. MFT 형성과 미립자 특성

비투멘 추출공정에서 발생한 테일링에는 다양한 고형물질과 유기물이 혼재되어 있다. 먼저, 고형물질로는 입자크기가 상대적으로 큰 자갈 (coarse sand)이 있고, 자갈보다는 작은 입자들이 있는데, 앞서 설명하였듯, 44 마이크론보다 작은 경우 미립자(fine)로 구분한다[6-8]. 미립자에는 모래 미립자와 점토 미립자로 구분할 수 있다. 모래 미립자 성분에는 quartz 혹은 feldspar가 있으며, 점토 미립자 성분에는 kaolinite, illite, and smectite와 같은 성분들이 있다[15]. 이밖에, 미립자에는 유기물 미립자가 존재하는데, 아스팔텐과 파라핀계 용매들이 포함될 수 있다. 공정폐수인 초기 테일링은 중량대비로 물과 고형입자가 50:50 수준으로 혼재되어 있다. 50%의 고형 성분의 약 80% (테일링의 약 40%)는 입자가 다소 크며, 약 20% (테일링의 약 10%)는 미립자로 구성되어 있다[15]. Fig. 3에는 테일링 인공호수에 대한 개략도를 나타내었다[16]. 테일링이 인공호수의 뚝(dyke)으로 이동하여 기울어진 구간을 통과하면서, 입자가 큰 고형물은 빠른 침전으로 기울어진 경사면에 그대로 남겨지고, 나머지 성분은 테일링 인공호수로 이동한다. 즉, 테일링 인공호수에는 공정수, 탄화수소 미회수분, 뚝 경사면에서 침적되지 않은 다양한 미립자들이 모인다고 할 수 있다. 테일링 인공호수 내에는 시간이 흐름에 따라, 고형물질 중 침전되는 경우와 침전되지 않고 콜로이드 상태로 유지하는 물질들로 나

누어 진다[16]. 설명의 편의를 위해, 테일링 인공호수내의 오염수를 4개층으로 구분하여 아래로부터 L1, L2, L3, 그리고 L4로 정의하였다. 먼저, 하층부인 L1층에는 물보다 비중이 큰 자갈 성분과 입자크기가 44 마이크론 이상의 모래가 침전된 퇴적층이라고 할 수 있다. 우리가 관심이 있는 부분은 L2층인데, 콜로이드 상태로 분산되어 있는 구간이다. 초기 미립자는 대략 중량으로 15%이며, 이 중 76%가 점토성분으로 알려져 있다. 가장 많은 점토성분으로는 kaolinite이다. 이후, 수십년에 걸쳐 고형물질이 30-35% 까지 증가된 채 여전히 안정화된 상태를 유지하는데, 이를 MFT(mature fine tailings)이라는 용어로 부르고 있다[6,15]. 테일링 처리에서는, 대부분의 관심이 MFT의 탈수공정에 집중되고 있다. 또한, 탈수공정을 통해 고형물질의 효율적인 고밀화 (consolidation)는 매우 중요하다[11]. L3층은 주로 물로 이루어진 곳이며 재순환에 사용된다. L4층에는 비투멘 희석에 사용된 파라핀계 탄화수소가 얇은 막의 형태로 있다.

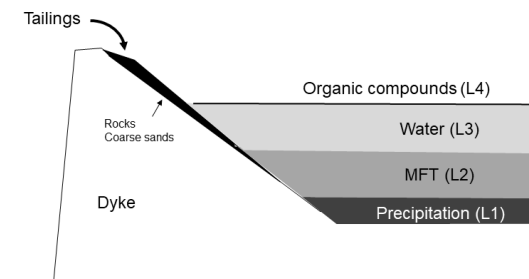


Fig. 3. Conceptual diagram of oil sands tailings pond.

Soares et al.[6]는 MFT의 생성 이유를 음전하를 띤 미립자들의 고유한 친수성으로 설명하였다. 우선, 비투멘 추출 공정에서 수산화나트륨 (NaOH)을 사용하기에 알칼리 분위기는 미립자 표면에 강한 음전하를 발생시키며, 이는 콜로이드 미립자들 간의 강한 반발력을 갖게 하기에 침전을 어렵게 한다. 또한, MFT층에 포함된 친유성을 가진 미량의 비투멘은, MFT를 희석한 후 친수성 응집제를 투입하더라도 응집제들의 역할을 방해할 수 있다. 일반적으로, MFT에는 약 30-35%의 고형물질이 있으며, 현재 기술로는 MFT를 희석하여 고분자 응집제와 같은 응집제

를 투입하여 물과 분리하는 방법들이 사용될 수 있는데, 침전분리된 고형물질에도 여전히 함수율이 높기에 원심분리와 여과공정 등 추가공정이 필요한 것으로 보고되고 있다[7,8]. 결국, 고형물질의 분리가 효율적이지 못하여 탈수공정도 효과적이지 못한 것으로 보고하였다. 이밖에도, MFT로 인해 테일링으로부터 재순환되는 공정수에도 미립자들이 포함되기에 전체 비투멘 추출 공정의 효율을 떨어뜨린다고 설명하고 있다. MFT의 미립자 제거를 위한 방법 중 고형물의 침전을 유도하는 것이 아닌 위로 뜨게하는 부상법을 사용하는 경우도 있다[15]. 이는 앞서 제시되었듯, 미립자 중 많은 양의 kaolinite와 같은 점토 미립자는 응집제와 결합하여 수면위로 부상하게 되는데, 이 경우는 미립자를 수면위에서 한번 분리하고, 이후 침전으로 또다시 분리하는 방법이 가능하기에, 더 많은 미립자 분리가 가능할 것으로 예상된다. 부상법으로는 4차 아민류를 사용하는 방법이 보고되어 있다. 아민의 주된 역할은 점토 성분과 응결(coagulation)하여 친유성으로 표면을 개질하여 수면 위로 부상시키는 역할이다. 이 방법에 사용되는 화학물질은 Fig. 4에 제시하였다.

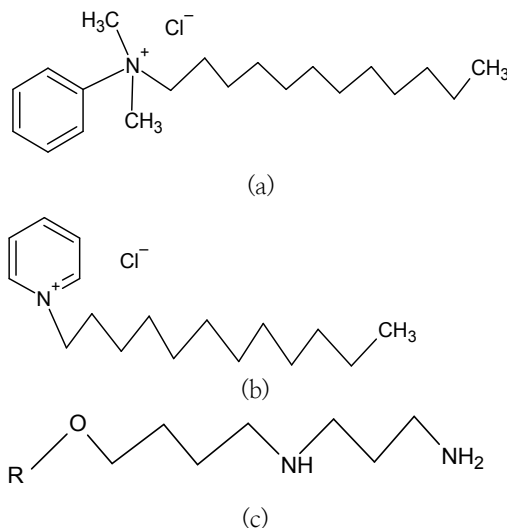


Fig. 4. Chemical structures of amines applied to coagulate with tailing fines and float; (a) dodecylpyridinium chloride (DPC), (b) benzyltrimethylammonium chloride (BTTA), and (c) ether diamines.

### 2.1.3. 고분자 응집제

먼저, 응집(flocculation)은 응결(coagulation)과 현상은 다르지만, 혼용하여 사용하는 경우가 많다. 본 연구에서는 두 용어를 각각 다른 용도로 사용하였다. 미립자 표면의 음전하를 중성화시키는 목적으로 투입하여 미립자와 결합하는 역할에 초점을 맞춘 경우 응결이란 용어를 사용하였고, 이미 응결된 미립자들이 서로 충돌과정을 거쳐 입자로 성장하는 경우 응집이란 용어로 서술하였다. 따라서, 고분자 응집제의 주된 역할은 MFT에 분산된 이미 응결되어 표면이 중성화된 경우 그 다음 단계에서 고형 입자 혹은 미립자를 응집시킨다. 계속해서 응집된 입자의 크기를 성장시키며, 최종적으로는 침전을 유도한다. 앞서 소개하였듯, 미립자 고형물 중 점토 성분의 미립자가 가장 많은 비중을 차지한다. 점토 미립자의 표면은 음전하를 띠고, 점토 미립자들 사이에는 지속적인 반발력이 유지되어 콜로이드 상을 유지시킨다. 점토 미립자의 표면전하를 중성화시키는 방법으로 양이온을 사용할 수 있다. 예를 들면, 응결을 유도하기 위해 먼저 칼슘이온(Ca<sup>2+</sup>)을 투입하여 점토 미립자의 표면을 음전하에서 중성전하로 유도한다. 이후 양이온성 폴리아크릴아미드(cationic PAM, polyacrylamide)를 투입한다면, 중성전하 상태인 점토 미립자 표면에 PAM이 결합하여 가교결합을 통한 응집을 유도할 수 있다 [6-8]. 중성 및 이온성 PAM에 대한 화학구조식은 Fig. 5에 제시하였다. PAM은 일반적인 폐수 처리에 많이 사용되는 물질이다. 그런데, 테일링 처리에서 사용하는 PAM은 주로 개질된 형태가 많이 보고되고 있는데, 분자량의 차이와 다른 기능성을 포함한 고분자와의 copolymer 적용 등이 차이점이라 할 수 있다[6-8]. 탈수공정까지 고려한다면, 효율성을 높이기 위해 친유성이 좀더 발휘되는 고분자가 유리할 것이다. 이에 친유성이 추가된 copolymer 등을 이용한 고분자를 응집제로 사용할 수 있다. 이처럼 탈수공정까지 고려한, 고분자 응집제의 성능평가는 매우 복잡하다. 지속적인 모니터링과 샘플테스트를 통해 적합한 고분자를 사용하여야 할 것이다[11].

탈수공정으로 일컫는 MFT의 고체-액체 분리공정의 효율성은 화학적 특성과 물리적 특성에 의해 결정된다. 화학적 특성은 고분자 응집제의 특성, MFT층에 분산된 콜로이드 미립자의 표면 특성, 폐수의 pH, 그리고 폐수내 이온분포 등이 탈수공정에 영향을 준다. 반면, 물리적 특성으로

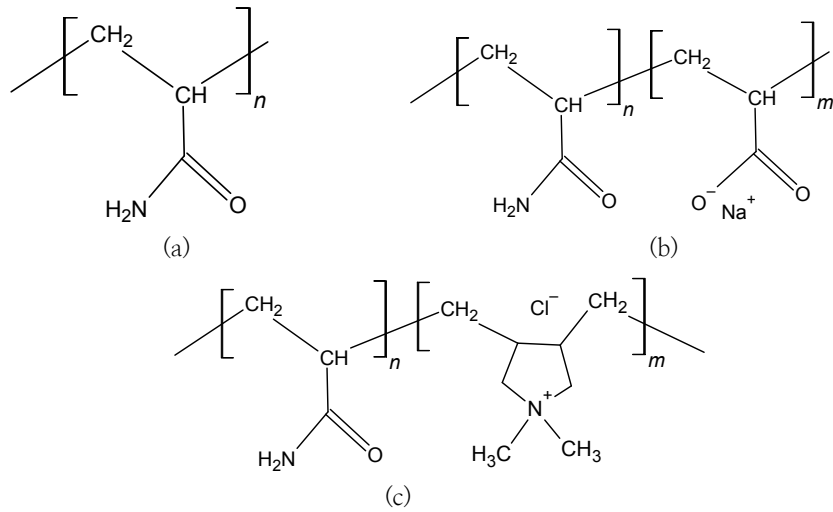


Fig. 5. Chemical structures of (a) polyacrylamide (non-ionic), (b) anionic polycrylamide, and (c) cationic polyacrylamide-polydiallyldimethylammonium chloride (DADMAC).

는 MFT를 구성하고 있는 고형물질의 양, 미립자의 크기, 온도, shear 요건, 고분자 응집제의 농도 등이 분리공정에 영향을 준다[6]. 가장 큰 역할을 기대하는, 고분자 응집제의 투입은 수용액의 점도, 초기응집에 반응하는 시간, 응집 형태, 응집물의 크기, 응집된 고형물의 밀도, 고형물의 함수량, 고형물의 탈수력(dewaterability), 그리고 고형물의 압축력 (compressibility) 등이 MFT의 탈수공정에 영향을 주는 요인들이다. 일반적으로 비극성 고분자 응집제와 비교하여, 이온성 고분자의 경우는 응집 입자의 성장에 유리하게 작용하여 더 효과적일 수 있다[7,8]. 분자량 입장에서는, 분자량이 클수록 미립자들과 결합에 효과적이며, 단점으로는 수용액은 점성이 커진다. 만약, 고분자 수용액의 점성이 높을 경우, 고분자들의 쓸림현상으로 인해 미립자와의 결합이 어려울 수 있다. 오히려, 쓸림현상은 MFT 콜로이드 구조를 더욱 안정화시킬 가능성도 있다. 그렇다고, 쓸림현상을 피하고 원활한 혼합을 목적으로 과도한 shear를 사용할 경우, 성장한 고형물 응집체를 분해시켜 다시 작은 응집단위로 되돌릴 수도 있다. 또한, 교반장비의 shear 범위가 작을 경우에는, 분자량이 작은 고분자 응집제를 사용하는 것이 유리하다. 따라서, 장비조건과 혼합시스템에 맞는 적절한 shear 사용이 요구된다.

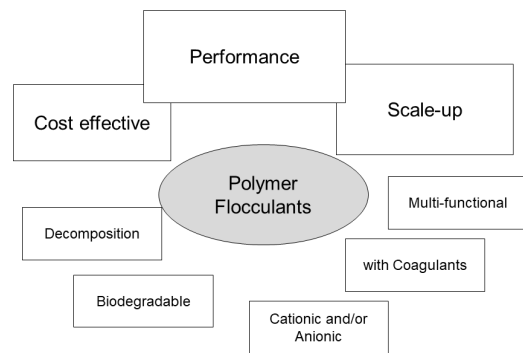


Fig. 6. Considerations when polymer flocculants were evaluated.

고분자 응집제의 고려 사항들을 요약하여, 아래 Fig. 6에 표현하였다. 먼저, 고분자 응집제 적용에 가장 중요한 것은 응집 성능이라고 할 수 있다. 즉, 까다로운 MFT의 탈수공정을 효과적으로 진행시킬 수 있어야 한다. 또한, 실험실 규모의 성능이 실제 규모의 테일링에서도 그대로 성능을 발휘할 수 있어야 한다. 오일샌드의 테일링은 오랜기간 동안 많은 시도가 있었으며, 실험실에서의 성능만큼 실제 공정에서 성능을 발휘하지 못한 경우가 많다고 알려져 있다. 이밖에도, 경제적인 고분자 응집제와 연계된 탈수공정 개발이 중요하다. 이외에, 고분자 성능을 높이기 위해서

는 다양한 조합의 고분자 제조가 제안될 수 있는데, 다기능성을 가진 고분자 제조, 응집제와 함께 성능을 발휘하는 고분자 제조, 성능이 향상된 양/음이온성 기능을 가진 고분자 제조 등이 응집제 개발과 연관되어 있다고 할 수 있다. 고분자 물질의 분해와 안전성 관련, 친환경 응집제 개발이 지속적으로 보고되고 있다. Fig. 7에는 생분해에 유리한 천연소재가 포함된 응집제의 사례로 키토산(chitosan)이 포함된 응집제 후보의 화학구조식을 나타내었다[6].

### 3. 결과 및 고찰

캐나다 알버타주에 위치한 오일샌드 테일링 인공호수의 크기는 갈수록 커지고 있다. 그 규모를 감당하기 어렵다고 판단한 캐나다 정부와 석유회사들은 2025년 초반 테일링의 방류를 예고하고 있다[12]. 지역주민들과 야생동물 보호지역의 환경보호를 위해서, 많은 환경보호자들은 테일링의 방류는 불가하다는 입장이다. 현재, 산업계, 정부, 대학, 연구소 등이 연계된 Canada's Oil Sands Innovation Alliance(COSIA)라는 협회는 2012년 3월부터 테일링 처리 해결에 노력하고 있다. 지속적으로 다양한 연구들이 진행되었고, 알버타 대학에서는 실험실 규모에서 다양한 고분자 응집제 개발이 진행되었다[6,7]. 그러함에도 불구하고, 아직까지는 뚜렷한 해결책을 제시하지 못하고 있다. 현재, COSIA 홈페이지에는 현재도 세계적인 석학들로부터 창의적인 제안을 열어두고 있다[18]. 일단, 테일링 방류를 결정한 입장에서는, 최근에 있었던 몇 차례의 테일링 붕괴사고를 통해 안정

성에 대해서 많은 고민을 한 것으로 여겨진다. 대표적인 붕괴사고로는 브라질에서 일어난 댐 붕괴 사고[19]와 Mount Polley의 유출 사고[20]를 들 수 있다. 또한, 테일링의 폐수 방류라고는 하지만, 방류가 가능할 정도로 오염물질의 농도를 낮추어 방류할 것이기에, 큰 문제는 아니라고 주장하고 있다. 아직까지는 방류수 기준이 마련되어 있지 않은 상태이다. 실제로, 방류할 수 있는 수질 기준이 정해지면, 그 기준을 맞추어 방류하는 것은 오일샌드 업체 입장에서는 타당해 보인다. 그런데, 2009년도에 있었던 멕시코만 기름 유출 사태에 사용되었던, 유화제의 생태계 영향 사례[21]와 유사하게 고분자 응집제에 대한 환경영향에 대해서 염려가 커 보인다[22]. 이와 더불어, 테일링에 포함되었는 화학물질 중 발암성의 나프텐산의 대한 염려도 크다고 할 수 있다. Scott et al. [23]에 의하면, 테일링내의 나프텐산 분해가 상업적으로 알려진 나프텐산에 비하여 생분해가 적게 진행된다. 즉, 테일링 방류수내의 나프텐산의 함량은 매우 낮게 허용되고 조절되어야 할 것이다. Fig.8에서는 나프텐산으로 분류된 화학물질 중 생태계 분해 연구를 위해 모델로 사용했었던 일부 나프텐산의 화학구조식을 나타내었다[24]. 그런데, 오일샌드 추출공정에서 나오는 나프텐산은 분자량도 크고, 분해도 더 느릴 것으로 예상된다. 현재, 테일링 처리를 위한 움직임 중에 Kemira Oyj 회사가 눈에 띈다[25]. 핀란드 회사지만, 캐나다 알버타에서 고분자 물질의 생산도 가능한 회사이다. 테일링 인공호수 현지에 직원들이 상주하여, 샘플링과 모니터링을 실시간으로 지속해서 운영 중에 있다. 여러 기능을 가진, 선형 고분자, 가지형 고분자, 다기능성의 고분자 등

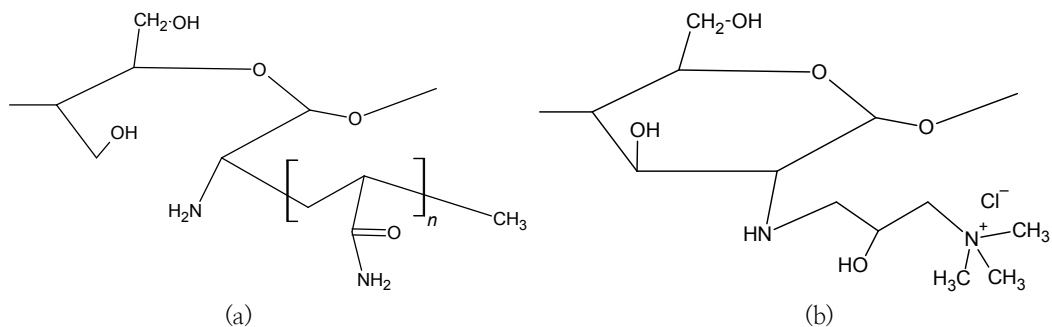


Fig. 7. Chemical structures of (a) Chitosan-g-PAM (polyacrylamide) and (b) Chitosan-g-CTA (3-chloro-2-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride).

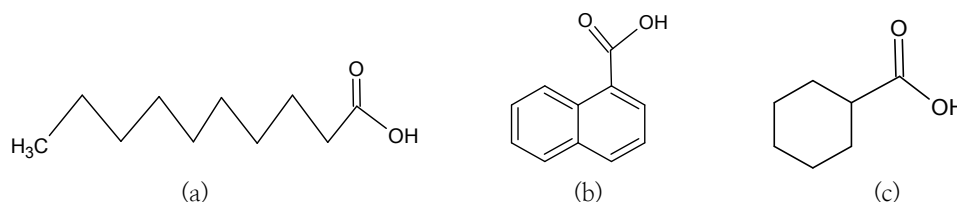


Fig. 8. Chemical structures of representative model naphthenic acids: (a) decanoic acid, (b) 1-naphthonic acid, and (c) cyclohexane carboxylic acid.

등 다양한 고분자 응집제의 적용 가능성을 시도하고 있다. 현재까지, 고분자 응집제와 결합한 탈수공정이 테일링 처리에 매우 중요한 접근으로 알려져 있으며, 여러 기능이 결합된 맞춤형의 고분자 응집제 개발이 매우 중요하다고 여겨진다.

#### 4. 결론

최근 보도된 바에 의하면, 캐나다 알버타주에 위치한 오일샌드 테일링 인공호수에 저장된 폐수의 방류가 2025년 초반에 시행될 것이라 한다. 현재, 방류에 대한 찬반 의견이 대립하고 있다. 방류를 찬성하는 입장인 캐나다 정부와 기업은, 수질기준을 세우고 그 기준에 맞춘 수처리를 통한 방류가 가능할 것을 기대하고 있다. 반면, 방류를 반대하는 입장에서는 수질기준을 현재 논의보다도 더 강화되기를 원하고 있다. 왜냐하면, 적절하게 처리되지 않은 폐수의 방류는 주변 생태계 파괴와 인근 지역 주민들의 보건에 큰 문제를 야기할 수 있기 때문이다. 오일샌드 개발이 시작된 이래로, 수십년간 테일링 처리에 대한 다양한 방법들이 시도되었었다. 그렇지만, 뚜렷한 기술 적용 사례는 없었다. 현재로서는, 테일링 인공호수에서 콜로이드 상태를 유지하고 있는 MFT (mature fine tailings)의 처리가 핵심 사안이다. MFT에는 미립자 크기는 44 마이크론 이하인 모래와 점토 성분을 갖고 있으며, 이런 고형 미립자는 MFT 증량대비 30-35%에 해당한다. 고형물 미립자의 분리는 MFT 처리에서 가장 중요하다. 고형물 미립자의 분리를 위한 방법으로는, 고분자 응집제를 사용하여 고형 미립자를 응집시키고, 응집물의 침전, 그리고 침전물질의 효과적인 탈수공정으로 구성되어 있다. 이러한 일련의 과정에서, 고분자 응집제의 개발이 가장 중요하다. 본

동향연구에서는 오일샌드 공정 중 채굴연계 비투멘 추출공정을 소개하였고, 이를 통해 테일링 인공호수 내의 성분들을 제시하였다. 특히, MFT의 처리가 테일링 처리 공정에서 가장 중요하며, 이를 위해서는 고형 미립자의 응집을 통한 제거가 중요하기에 예상되는 화학물질과 고분자 응집제에 대해서 소개하였다. 향후, 쉽지 않은 과정이 예상되지만, 적절한 고분자 응집제의 개발을 통한 테일링 폐수처리가 효과적으로 진행되기를 기대해본다.

#### References

1. U.G. Romanova, H.W. Yarranton, L.L. Schramm, W.E. Shelfantook, "Investigation of Oil Sands Froth Treatment", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol.82, pp.710-722, (2004).
2. Utah Heavy Oil Program, A Technical, Economic, and Legal Assessment of North American Heavy Oil, Oil Sands, and Oil Shale Resources, Ch.4, (2007). Available From <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/glatz2/docs/heavyoil.pdf> (accessed March 3, 2023).
3. K.A. Clark, D.S. Pasternack, "Hot Water Separation of Bitumen from Alberta Bituminous Sand", *Industrial Engineering Chemistry*, Vol.24, pp.1410-1416, (1932).
4. J. Masliyah, Z.J. Zhou, Z. Xu, J. Czarnecki, H. Hamza, "Understanding Water-Based Bitumen Extraction from Athabasca Oil Sands", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol.82, pp.628-654,



- (2004).
5. F. Rao, Q. Liu, "Froth Treatment in Athabasca Oil Sands Bitumen Recovery Process: A Review", *Energy & Fuels*, Vol.27, No.12, pp.7199–7207, (2013).
  6. J.B.P. Soares, F. L.Motta, "Using Polymer Reaction Engineering Principles to Help the Environment: The Case of the Canadian Oil Sands Tailings", *Journal of the Brazilian Chemical Society*, Vol.30, No.3, pp.426–435, (2019).
  7. S.P. Gumfekar, V. Vajihinejad, J.B.P. Soares, "Advanced Polymer Flocculants for Solid-Liquid Separation in Oil Sands Tailing", *Macromolecular Rapid Communications*, Article ID 1800644, (2018).
  8. R. Hripko, V. Vajihinejad, F.L. Motta, J.B.P. Soares, "Enhanced Flocculation of Oil Sands Mature Fine Tailings Using Hydrophobically Modified Polyacrylamide Copolymers", *Global Challenges*, Vol.2, No.3, Article ID 1700135, (2018).
  9. X. Yang, J. Czarnecki, "Tracing Sodium Naphthenate in Asphaltenes Precipitated from Athabasca Bitumen", *Energy & Fuels*, Vol.19, pp.2455–2459, (2005).
  10. A.C. Scott, M.D. Mackinnon, P.M. Fedorak, "Naphthenic Acids in Athabasca Oil Sands Tailings Waters Are Less Biodegradable than Commercial Naphthenic Acids", *Environmental Science & Technology*, Vol.39, pp.8388–8394, (2005).
  11. J.J. Gibson, D.L. Peters, "Water and Environmental in Oil Sands Regions", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 44, Article ID 101274, (2022).
  12. N. Williams, "Canada's Oil Sands Sector Aims to Release Treated Tailings Water into Water", *Reuters*, August 20, (2022). Available From: <https://www.reuters.com/business/energy/canadas-oil-sands-sector-aims-release-treated-tailings-water-into-river-2022-08-18/> (accessed March 3, 2023).
  13. K. Oh, "Review on Asphaltene Architecture", *Journal of Korean Oil Chemists' Society*, Vol.31, pp.151–158, (2014).
  14. H. Sabbah, A. L. Morrow, A.E. Pomerantz, O.C. Mullins, X. Tan, M.R. Gray, K. Azyat, R.R. Tykwinski, R.N. Zare, "Comparing Laser Desorption/Laser Ionization Mass Spectra of Asphaltenes and Model Compounds", *Energy & Fuels*, Vol.24, No.6, pp.3589–3594, (2010).
  15. S. Yuan, J. Lorentz, R. Siman, (2020). Collectors for Treating Tailings (Syncrude Canada Ltd., Patent UP-20200129991-A1). Available From: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/20200129991> (accessed March 3, 2023).
  16. A. Sworska, J.S. Laskowski, G. Cymerman, "Flocculation of the Syncrude Fie Tailings Part I. Effect of pH, Polymer Dosage and Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup> Cations", *International Journal of Mineral Processing*, Vol.60, pp. 143–152, (2000).
  17. M. Mamer, "Oil Sands Tailings Technology: Understanding the Impact to Reclamation", Suncor Energy. *British Columbia Mine Reclamation Symposium*, (2010). Available From: <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/59367/items/1.0042580> (accessed March 3, 2023).
  18. COSIA. Deep Deposit Design Guide for Oil Sands Tailings [Internet]. Calgary: Canada's Oil Sands Innovation Alliance – Deep Deposit Working Group, July, p.260, (2022). Available From: [https://cosia.ca/sites/default/files/attachments/COSIA\\_2022\\_Deep\\_Deposit\\_Design\\_Guide\\_for\\_Oil\\_Sands\\_Tailings.pdf](https://cosia.ca/sites/default/files/attachments/COSIA_2022_Deep_Deposit_Design_Guide_for_Oil_Sands_Tailings.pdf) (accessed March 2023).
  19. L.H.S. Rotta, E. Alcântara, E. Park, R.G. Negri, Y.N. Lin, N. Bernardo, T.S.G. Mendes, "The 2019 Brumadinho Tailings Dam Collapse: Possible Cause and Impacts of the Worst Human and Environmental Disaster in Brazil", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.90, Article ID 102119, (2020).
  20. J. Marshall, "Tailings Dam Spills at Mount Polley and Mariana: Chronicles of

- Disasters Foretold”, August, (2018). Available From: [https://policyalternatives.ca/sites/default/files/uploads/publications/BC%20Office/2018/08/ccpa-bc\\_TailingsDamSpills\\_SUMMARY.pdf](https://policyalternatives.ca/sites/default/files/uploads/publications/BC%20Office/2018/08/ccpa-bc_TailingsDamSpills_SUMMARY.pdf) (accessed March 3, 2023).
21. V. John, C. Arnosti, J. Field, E. Kujawinski, A. McCormick, “The Role of Dispersants in Oil Spill Remediation: Fundamental Concepts, Rationale for Use, Fate, and Transport Issues”, *Oceanography*, Vol.29, No.2, pp.108–117, (2016).
22. Intrinsic Final Report (2022), Environmental Fate and Behaviour of Anionic Polyacrylamides in Oil Sands Tailings Management: A State of Knowledge Synthesis [Internet]. Available From: [https://cosia.ca/sites/default/files/attachments/COSIA\\_Environmental\\_Fate\\_and\\_Behaviour\\_of\\_Anionic\\_Polyacrylamides\\_in\\_Oil\\_Sands\\_Tailings\\_Management.pdf](https://cosia.ca/sites/default/files/attachments/COSIA_Environmental_Fate_and_Behaviour_of_Anionic_Polyacrylamides_in_Oil_Sands_Tailings_Management.pdf) (accessed March 3, 2023).
23. A.C. Scott, M.D. Mackinnon, P.M. Fedorak, “Naphthenic Acids in Athabasca Oil Sands Tailings Waters Are Less Biodegradable than Commercial Naphthenic Acids”, *Environmental Science and Technology*, Vol.39, pp.8388–8394, (2005).
24. C. Wu, A. De Visscher, I.D. Gates, “On Naphthenic Acids Removal from Crude Oil and Oil Sands Process-Affected Water”, *Fuel*, Vol.253, pp.1229–1246, (2019).
25. Kemira Oyj. Raising the Bar for Tailings Treatment [Internet]. Available From: <https://www.kemira.com/insights/raising-bar-tailings-treatment/> (accessed March 3, 2023).