

미생물을 이용한 원유 회수증진법에 대한 동향연구

오경석[†]

인하공업전문대학 화공환경과, 부교수
(2021년 7월 28일 접수: 2021년 8월 26일 수정: 2021년 8월 30일 채택)

Brief Review on Microbial Enhanced Oil Recovery

Kyeongseok Oh[†]

*Department of Chemical, and Environmental Technology, Inha Technical College
(Received July 28, 2021; Revised August 26, 2021; Accepted August 30, 2021)*

요약 : 유전에 매장된 석유는 1차, 2차, 그리고 3차에 걸쳐 회수된다. 3차 회수로 분류된 공법 중 미생물을 이용한 원유 회수증진법은 크게 *in-situ*와 *ex-situ* 공법으로 나눌 수 있다. *In-situ* 공법은 미생물을 저류층에 직접 투입하여 미생물의 대사활동을 통한 원유의 회수를 유도하는 공법이다. 대사물질 중 바이오계면활성제는 저류층 잔존 유분의 유동화에 큰 역할을 한다. 한편, *ex-situ* 공법은 외부에서 미생물의 대사물질을 추출하여 저류층에 투입하여 원유를 회수하는 방법이다. 두 가지 공법 모두 친환경적이지만, 보다 경제적인 *in-situ* 공법이 선호된다. 미생물을 이용한 원유 회수증진법은 오랜기간 검토되었음에도, 현재까지도 파일럿 규모에서 여전히 평가가 진행 중이다. 본 논문에서는, *in-situ* 공법에 적용가능한 미생물 중 박테리아의 종 특성과 대사물질에 대해서 살펴보았다.

주제어 : 미생물, 원유 회수증진법, 바이오 계면활성제, 박테리아, 대사물질

Abstract : Petroleum oil in reservoir has been acquired by primary, secondary and tertiary oil recoveries. Microbial enhanced oil recovery (MEOR) classified to tertiary oil recovery has been evaluated in two ways of *in-situ* and *ex-situ* options. *In-situ* MEOR injects microbes into a depleted oil reservoir and stimulates those to generate metabolites. Among metabolites, biosurfactants play an important role to make heavy residues flow. *Ex-situ* MEOR injects microbial metabolites instead of microbes into a reservoir to recover oil. Even though both *in-situ* MEOR and *ex-situ* MEOR are eco-friendly processes, *in-situ* MEOR can be preferred because it is more economic. Even though MEOR have been evaluated for a long time, it is still in the state of evaluating in a pilot-scale. Among microbes, bacteria have been widely evaluated in MEOR purpose. In this paper, bacteria for MEOR were summarized and their metabolites were qualitatively evaluated.

Keywords : microbial, enhanced oil recovery, biosurfactant, bacteria, metabolites

[†]Corresponding author
(E-mail: kyeongseok.oh@inhac.ac.kr)

1. 서론

유전에서 석유의 생산은 1차 회수 (primary recovery), 2차 회수(secondary recovery), 그리고 3차 회수 (tertiary recovery)로 진행된다. 1차 회수는 원유가 매장된 저류층(oil reservoir)의 높은 압력에 의해서 석유 회수가 가능하며, 2차 회수는 물을 사용하는 수공법(water flooding)이 대표적인 사례이다. 매장량 대비 석유 회수율에 대해서는 가변적이라고 할 수 있지만, 약 40% OOIP (original oil-in-place, 원시 석유 매장량) 이상의 탄화수소가 여전히 매장되어 있다고 추정된다[1]. 3차 회수는 원유 회수증진법(enhanced oil recovery, EOR)이라고 하는데, 저류층에 남아있는 분자량이 매우 크며 유동성이 없는 잔존 유분을 회수하는 방법이라고 할 수 있다. 잔존 유분의 유동성을 촉진하는 방식에는 스팀을 사용하는 방식, 유기용매를 사용하는 방식, 그리고 수용성 고분자를 투입하는 방식 등이 대표적이라고 할 수 있다[2]. 이외에, 오일샌드 회수 기술로 알려진 SAGD (steam-assisted gravity drainage), 그리고 오일세일 회수에 제안되었던 electrical heating 법과 *in-situ* combustion 방식이 포함된다[3]. 이에 반하여, 열을 사용하지 않는 원유 회수증진법에도 다양한 방법들이 있는데, 기체를 주입하는 방법이 있다[4]. 최근에는, 이산화탄소를 이용한 원유 회수증진법(CO₂-EOR)이 많이 시도되고 있다. CO₂-EOR은 저류층 잔존 유분을 밀어내고 생긴 암반의 빈 공간을 이산화탄소가 대체하여 들어가게 되는 이산화탄소 격리(CO₂ sequestration) 목적으로도 활용되고 있다[5]. 이외에 고분자, 계면활성제, 그리고 알칼리 물질을 투입하여 3차 회수하는 경우를 CEOR (chemical enhanced oil recovery, 화학물질을 사용한 원유 회수증진법)이라고 명명하기도 한다[2,4]. 한편, 미생물을 사용하는 경우에는 MEOR(microbial enhanced oil recovery, 미생물을 이용한 원유 회수증진법)이라고 부르고 있다. MEOR은 *in-situ* 와 *ex-situ* 공법으로 구분할 수 있는데, *in-situ* 공법은 미생물이 서식하고 있는 기존 공간인 저류층에 영양분을 공급하여 미생물의 증식과 대사 활동을 촉진시키는 공법이다. 대사물질 중에는 바이오 계면활성제(biosurfactant)가 있으며, 바이오 계면활성제의 특징으로는 저류층 잔존 유분의 유동화를 돕는 역할을 한다. 한편, *ex-situ* 공법은 외부 반응기에서 발효공정을 통해 생산한 대사물

질을 추출하여 저류층으로 투입하는 공법이다 [6-9].

Fig. 1에서는 본 논문에서 다루게 될 MEOR의 범위를 나타내었다. 특히, 미생물에는 박테리아, 효모, 그리고 곰팡이 등이 포함되는데, 본 연구에서는 박테리아에 한정하였다. MEOR에 대해 대략적으로 범위를 정한다면, 저류층 특성 파악, 박테리아 분리, 대사물질 분석, 대사물질의 응용 등이 포함될 수 있다. 박테리아 분리 장소로는 유전, 해수 그리고 지하수가 대표적이다. *In-situ* 공법은 2차 회수 후 원유의 생산량이 급감한 저류층에 서식하는 박테리아의 활성을 촉진하는 방법이지만, 촉진 방법을 찾기 위해서는 박테리아의 증식에 유리한 조건을 찾는 것이 필요할 것이다. 이 과정은 저류층에 서식하는 고유종 박테리아의 분리와 실험실 조건에서 배양 실험이 필요하다. 또는, 저류층 환경조건에서 생존이 가능한 박테리아 종을 찾아 활성화 조건을 찾는 방안이 포함될 수 있다. 반면, *ex-situ* 공법은 적용가능한 박테리아 종류를 선정하기 보다는, 박테리아가 생산하는 대사물질에 더 관심이 있다. 그런데, 대사물질이 MEOR에는 적합하지 않는 경우도 많다. 이 경우에는 대사물질을 다른 용도에 적용하기도 한다. 이런 상황을 Fig. 1에서 나타내었는데, 대사물질을 사용한 다른 응용 분야 중에는 생물 환경정화(bioremediation), 세정용품, 의약품, 화장품, 농업용 제품을 들 수 있다. 그러나, 이 논문에서 다루고자 하는 부분은 박테리아 대사물질의 추가적인 응용성보다는 MEOR 적용에 초점을 맞추었다. 또한, MEOR에 사용되는 박테리아를 중심으로 대사물질에 대해서 정리하였다. MEOR 적용이 가능한 박테리아를 찾는 것은 매우 복잡한 조건을 만족시켜야 한다는 단점이 있다. 먼저, 고온 고압인 저류층에서 생존할 수 있는 능력이 있어야 하며, 대사활동을 통한 증식 활동도 활발히 일어나야 한다. 이 외에도, 박테리아는 저류층 내부의 잔존 유분과의 상관관계도 필요하다. 이미 2차 회수까지 진행된 저류층에 남아있는 잔존 유분은 미생물이 분해하기 까다로운 물질들로 일반적으로 분자량이 크고 많은 고리결합을 가지고 있다. 그러함에도 잔존 유분 중에는 박테리아가 섭취할 수 있는 저분자의 지방족 물질도 포함되어 있을 수 있다. 또한, 질소와 인이 함유된 영양분이 충분히 공급이 될 경우에는 박테리아 군체가 증식으로 늘어나 단계별 대사활동과 대사물질의 효과가 나타날 수 있을 것으로 기대한다. 그

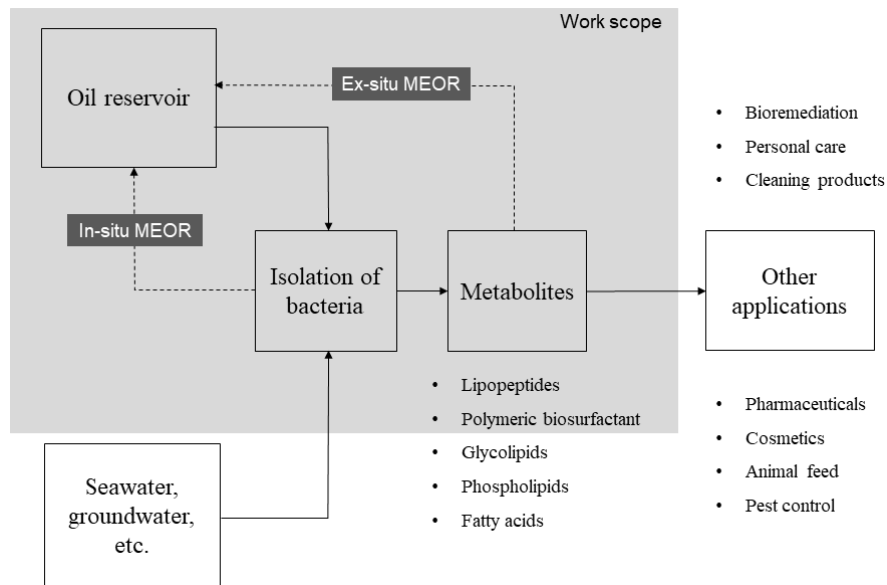


Fig. 1. Schematic work scope of this study.

렇지만, 실질적으로 성공적인 MEOR 적용 사례는 보고되지 않고 있다. 현재로서는 사용수명이 다한 폐유전과 같은 곳에서 파일럿 형태의 평가가 진행 중인 경우가 많다[6,7]. MEOR과 연관된 많은 논문들이 보고되고 있으나, 저류층 환경이 모두 다르고 또한 잔존 유분의 물성도 모두 다르기에 한 종류의 박테리아를 활용한 보편적 적용은 매우 어렵다. 이에, 연구자들은 일종의 연구결과에 대한 보험의 성격으로 MEOR 적용과는 별도로 바이오 계면활성제 생산과 응용성에 대해 함께 관심을 가지고 있다고 여겨진다. Fig.1에서 나타내었듯, 알려진 박테리아 대사물질들에는 lipopeptides, polymer biosurfactant, glycolipids, phospholipids 그리고 fatty acid 등이 있다. 그러나, 본 논문에서는 MEOR에 적용이 가능한 대사물질로는 lipopeptide와 polymer biosurfactant에 한정하였다.

2. 본 론

2.1. MEOR

MEOR은 박테리아와 같은 미생물을 저류층에 직접 투입하는가, 아니면 박테리아를 외부 반응기

에서 배양하여 그 과정에서 생성하는 대사물질을 분리하여 저류층에 투입하는가에 따라 구분이 가능하다[9]. 이때, 대사물질을 분리하여 투입하는 경우는 CEOR과 유사하다. 또한, 목표로 하는 특정 저류층에 살고 있는 고유종 미생물 공동체(indigenous microbial community)를 활성화시키는 방법으로 접근하는가, 아니면 외부에서 분리된 박테리아 종을 외부 반응기에서 증식시킨 후 상당량의 박테리아를 저류층으로 투입하는가를 각각 나누어 생각할 수도 있다[8,9]. Fig. 2에서는 *in-situ* MEOR과 *ex-situ* MEOR을 비교하여 나타내었다. 즉, 박테리아를 투입하는 경우를 *in-situ* MEOR로 구분하였고, 대사물질을 투입하는 경우를 *ex-situ* MEOR로 구분하였다. *In-situ* MEOR는, 먼저 대상이 되는 박테리아를 분리한다. 실험실에서 다양한 환경과 영양분 영향을 고려하여 증식 활동을 관찰한다. 증식 활동에 영향을 주는 요인으로는 온도, 압력, pH, 그리고 염도 등을 고려할 수 있다. 그리고 대사물질에 대해서도 분석한다. 저류층에서 분리된 박테리아 중에는 호기성과 혐기성으로 나뉘지며, 각각 조건에 맞는 환경을 제공하여 MEOR 조건을 찾는다[9,10]. 이후 박테리아를 저류층에 직접 투입하여 MEOR에 적용하는 순서로 진행이 예상된다.

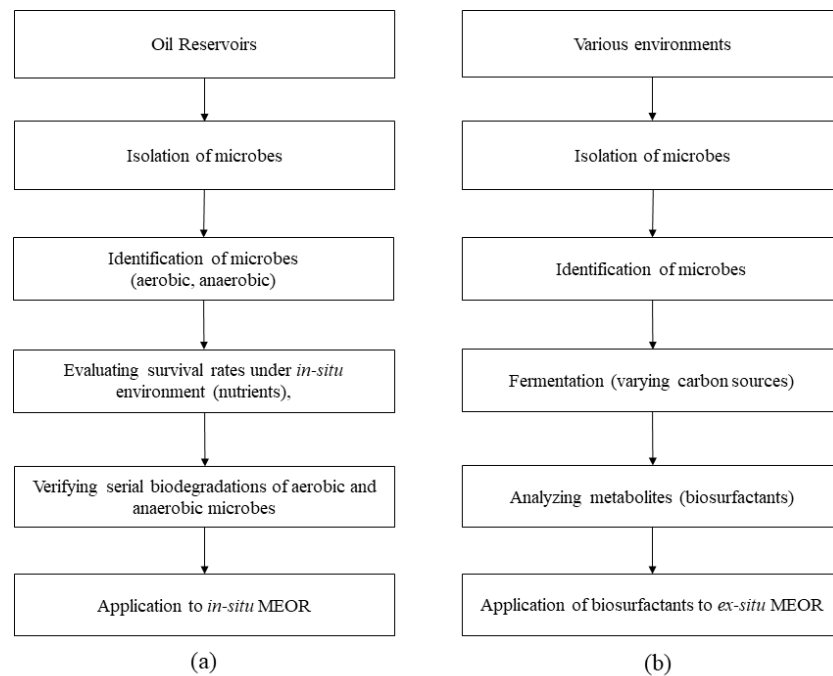


Fig. 2. Comparison of microbial applications after isolation and characterization of microbes; (a) application scenario to in-situ MEOR, and (b) application scenario to *Ex-situ* MEOR.

In-situ MEOR 메카니즘은 다음과 같다. 선정된 박테리아는 물과 혼합되어 저류층에 투입되어, 다공성 암석 구조에 축적된다. 미생물이 증식할 수 있는 환경을 위해서는 산소포화도가 높은 물을 제공하고 질소, 인 등이 풍부한 영양분을 함께 제공한다. 먼저, 고유종인 호기성의 박테리아들을 자극하여 잔여 유분에 포함된 분자량이 큰 방향족 화합물의 분해가 가능할 수 있다[11]. 박테리아는 잔존 유분을 소비하고 대사활동을 통해 산(酸), 용매, 계면활성제, 그리고 이산화탄소를 생산한다. 생산된 산 성분은 암석의 구성성분인 광물질을 녹이게 되고, 생산된 용매 물질은 유분에 포함된 분자량이 큰 파라핀 계열을 용해하여 암석 기공의 막힘을 제거함으로써 저류층의 투과도를 높인다[11]. 박테리아는 꾸준히 증식하게 되며, 일정 시간이 지남에 따라 유동성이 없었던 잔존 유분을 유동화시킨다. 또한, 박테리아의 대사물질은 주위의 혐기성 박테리아에 의해 더 분해가 진행될 수 있다. 혐기성 박테리아는 대사활동으로 메테인을 생성하며, 생성된 메테인은 저류층 압력 증가로 이어진다. 계속해서 주위 유기물질에 녹을

경우 잔존 유분과 접촉하여 유분의 유동성을 높이는 연속 과정이 기대된다. 그러나, 여전히 미생물의 역할은 매우 복잡하다[10,11].

Ex-situ MEOR은 박테리아를 다양한 환경 즉, 저류층에 한정하지 않고 해양 혹은 지하수와 같은 곳에서 분리한 박테리아를 사용할 수 있다. 또한, 외부 반응기에서 박테리아가 발효과정에서 생성한 대사물질을 분리공정을 통해 추출한 후 저류층에 투입한다. 모든 대사물질이 *ex-situ* MEOR이 가능한 것은 아니며, 잔존 유분의 유동성을 촉진시킬 수 있어야 한다.

2.2. MEOR에 활용되는 박테리아와 대사물질

MEOR에 응용하기 위해서 다양한 박테리아 연구와 박테리아가 생산하는 대사물질에 대해서도 많은 연구들이 있었다[12,13]. 주된 대사물질로는, 언급되는 빈도에 따라서 glycolipids, lipopeptides, phospholipids, 그리고 polymeric biosurfactants로 나눌 수 있다[13,14]. Glycolipids 계열에 속하는 대표적인 물질로는 rhamnolipids, sophorolipids, 그리고 trehalose lipids가 있다.

Table 1. Strains and their biosurfactants applicable to MEOR

Strains	Biosurfactants	Year	Ref.
<i>Bacillus subtilis</i> ARCC6633	lipopeptides (surfactin)	2019	[17]
<i>Bacillus subtilis</i> MG495086	lipopeptides (surfactin)	2018	[18]
<i>Bacillus subtilis</i> HSO121	lipopeptides (surfactin)	2015	[19]
<i>Bacillus subtilis</i> A1	lipopeptides]2017	[20]
<i>Bacillus subtilis</i> 32811	cyclic lipopeptides	2019	[21]
<i>Bacillus astrophaeus</i> 5-2a	lipopeptides	2016	[22]
<i>Bacillus licheniformis</i> DM-1	EPS	2020	[23]
<i>Geobacillus</i> spp.	EPS	2019	[24]
<i>B. firmus</i> BG4 and <i>B. halodutans</i> BG5	-	2018	[25]
<i>Thermus</i> , <i>Acinetobacter</i> , and <i>Pseudomonas</i>	-	2018	[26]

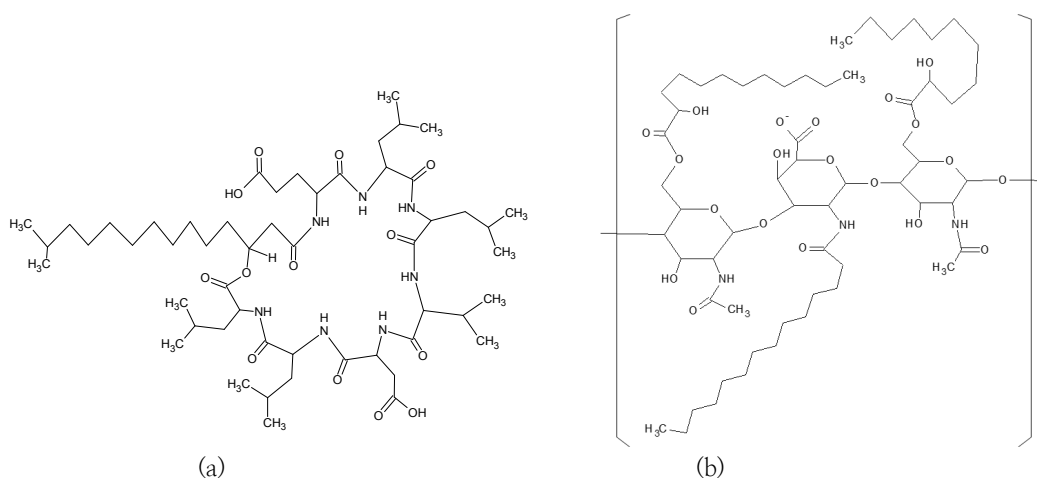


Fig. 3. Chemical structures of (a) surfactin, and (b) emulsan.

Lipopeptides 중에는 surfactin이 대표적이며, 이외에도 lichenysin과 viscosin이 있다[14,15]. 그런데, 위에 열거된 바이오 계면활성제 관련 연구는 MEOR 적용과는 별도로 진행되었다고 보는 것이 타당할 것이다 [14,16]. 왜냐하면, 빈도가 높게 인용되는 rhamnolipid 물질은 MEOR 적용에 유리하지 않다. 오히려, lipopeptides와 EPS (exopolysaccharides)가 MEOR에 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. Table 1에서는 MEOR에 적용되는 박테리아 종과 그 대사물질에 대해서 소개하였다. 또한, lipopeptides의 대표물질인 surfactin과 EPS로 분류되는 물질 중 구조가 알려진 emulsan의 화학구조식[15]을 Fig. 3에 나타내

었다.

대표적인 MEOR 적용 박테리아 종에는 *Bacillus*가 있다. *Bacillus* 종은 저류층 혹은 유출류로 오염된 지역에서 분리가 가능한 종이다. *Bacillus* 종은 원유가 있는 곳에서 배양할 경우, 원유를 먹이로 소비하며 생존한다. 특히, *Bacillus* 종은 고염도, 고온 조건에서도 MEOR 적용이 가능할 것으로 예상된다. *B. subtilis* ARCC6633, MG495086, 그리고 HSO121이 MEOR에 적용이 가능하며, 그 이유로 바이오 계면활성제인 lipopeptides를 생성하기 때문으로 알려져 있다 [17-19]. 먼저, Park et al.[17]은 *B. subtilis* ATCC6633가 생성하는 바이오 계면활성제인

surfactin의 역할로 oil-brine-rock상에서 계면장력을 낮게 하며 습윤성(wettability)을 증가시킴을 확인하였다. 또한, surfactin은 β -hydroxy fatty acid tail에 연결된 고리형의 heptapeptide 구조를 가진다고 보고하였다. Datta et al.[18]은 *B. subtilis* MG495086가 생산한 surfactin의 역할로 *in-situ*와 *ex-situ* MEOR에서 모두 적용이 가능하다고 보고하였다. 한편, Liu et al.[19]은 *B. subtilis* HSO121이 생산한 surfactin은 적은 친수성과 많은 친유성 그룹을 가지며, 이러한 구조적 특성으로 self-assembly 현상, 마이셀 형성, 그리고 영집(agggregates) 형성이 가능함을 설명하였다. 박테리아의 lipopeptide 합성 메카니즘은 효소와 연관지어 제시되기도 하였다. Parthipan et al.[20]은 *B. subtilis* A1을 이용하여 박테리아의 알케인 소비 메카니즘을 연구하였다. 40°C에서 7일간 영양분을 함께 공급된 배양조건에서, *B. subtilis* A1은 알케인 C10-14을 완전히 분해하였고, 알케인 C15-19는 97%까지 분해하였다. 여기서 중요한 점은, 탄화수소의 분해시 작용하는 2가지 효소로 alkane hydroxylase와 alcohol dehydrogenase가 특정되었다는 점이다. 효소가 특정되었기에, 향후 연구를 통해 이 효소들이 탄화수소의 분해 메카니즘에 어떤 역할을 하는지 알 수 있을 것이다. *Bacillus* 계열의 박테리아 중에는 원유를 소비하는 과정에 대사물질로 cyclic lipopeptide를 생성하기도 한다[21]. 또한, *B. subtilis* 종 이외에도 *B. astrophaeus* 5-2a 박테리아도 MEOR 적용이 가능한 lipopeptides의 생성을 보고하였는데, 생성된 lipopeptides는 혼합물 형태로 고온, 고염도, 넓은 pH 조건에서 안정적이었다[22].

MEOR에 적용이 가능한 lipopeptide 이외의 대사물질 중 EPS(exopolysaccharides)가 있다. Fan et al.[23]은 중국 Dagang 유전에서 분리한 박테리아인 *B. licheniformis* DM-1에 당밀(molasses)을 영양분으로 공급하였을 때, 대사물질로 EPS가 생성됨을 보고하였다. 생성된 EPS는 분자량이 568 kDa이었으며, 고염도와 고온 환경에서 낮은 농도(1% w/v)에서도 높은 점성을 나타내었다. 주목할 내용은, *B. licheniformis* DM-1가 C36에 해당하는 큰 분자를 분해한다는 결과였다. 이와 함께, 실험실 조건에서 *in-situ* MEOR 적용가능성도 확인하였다. *Bacillus* 종 이외에도 대사활동 중 EPS 생성이 보고되었다. Lin et al.[24]은 호열성인 *Geobacillus* 종이 탄화수소

를 활용해 에너지를 얻는 특성과 에멀전화 능력이 있다고 보고하였다. 그런데, *Geobacillus* spp.는 *Bacillus* 종과는 다른 효소를 통한 EPS를 생산하는 것으로 알려졌다.

최근에는 파일릿 규모의 MEOR 실험 결과들이 보고되었다. MEOR에 적용하기 위해서는 박테리아의 탄화수소 분해능이 필요한데, 적용된 2가지 사례를 아래에 소개하였다. Shibulal et al.[25]은 포자를 형성하는(spore-forming) 박테리아 종을 대상으로 MEOR 적용 사례를 보고하였다. 일반적으로 열악한 환경에서 서식하는 박테리아는 생존방법으로 포자를 만든다고 알려져 있다. 중동 오만에서 분리한 *B. firmus* BG4와 *B. halodurans* BG5를 투입 후 9일 이후에 중질유의 분해과정을 연구하였다. 호기성 조건에서 두 경우 모두 81%가 넘는 분해능을 나타내었다. 특이한 점은, 고리결합을 가진 방향족 물질이 지방족으로 변형되는 과정을 보고하였다. 또한, Phetcharat et al.[26]은 태국의 Mae Soon 유전지역에서 MEOR 가능성을 연구하여 보고하였는데, 매우 특이한 결과를 보고하였다. Mae Soon 저류층에서 서식하는 박테리아 종으로는 분리를 통해 *Deinococcus-Thermus*와 *Betproteobacteria*가 지배종을 확인하였지만, 영양분을 공급한 후에는 지배종이 바뀌는 결과를 얻었다. 다른 종류의 박테리아인 *Thermus*, *Acinetobacter*, 그리고 *Pseudomonas* 종이 증식을 더 활발히 진행하여 지배적인 종이 된 것을 보고하였다. 이 결과는 기존 MEOR을 통해 저류층 박테리아 환경이 애초에 기대했던 결과와는 다르게 바뀔 수 있음을 나타내 주었는데, 그만큼 MEOR 연구의 복잡성을 또한번 드러낸 결과라고 할 수 있다.

3. 고찰

MEOR에 적용 가능한 박테리아 중 *Bacillus* 종에 대해서 주로 다루었다. 또한, 박테리아의 대사활동을 통해 생성되는 바이오 계면활성제 중에는 lipopeptides와 EPS에 대해서 주로 다루었다. MEOR 박테리아를 활성화시키기 위해서는 저류층의 환경에서 생존이 가능하여야 한다. 고온, 고압, 그리고 고염분과 pH 범위 등이 모두 박테리아가 생존하기에는 어려운 환경이다. 또한, 석유 생산이 2차 회수까지 진행된 이후로, 남아있는 잔존 유분의 특성은 분자량이 크고, 복잡한 고리

결합을 포함한 resins과 asphaltenes 같은 유동성이 없는 성분을 많이 포함하고 있다[4]. 박테리아를 활용하려고 한다면, 박테리아 증식이 활발해야 할 것이며, 증식을 위해서는 질소와 인이 함유된 영양분이 공급되어야 할 것이다. 결과적으로, *in-situ* MEOR 박테리아는 저류층 환경인 가혹한 조건에서 생존력이 뛰어나야 하며, 복잡한 구조의 탄화수소를 분해하는 능력도 있어야 할 것이다. 이러한 조건들에 맞는 박테리아를 찾아 MEOR에 적용까지는 시간이 오래 걸린다. 그렇지만, 여전히 친환경적이고 경제적일 수 있다는 평가로 인해 *in-situ* MEOR에 대해서는 지속적으로 연구가 진행되고 있다.

Fig. 4에는 *in-situ* MEOR 적용 사례 중 *P. aeruginosa* WJ-1 사례[10]를 바탕으로 MEOR 적용 시나리오를 가정하여 제시하였다. 먼저, 저류층 환경과 유사한 환경에 사는 박테리아를 분리한다. 다음으로, 분리된 박테리아의 특성 연구를 수행하여 생존 가능한 환경 범위를 특정하고, 대사활동을 연구한다. 박테리아가 먹이로 소비 가능한 물질을 찾고 대사물질을 분석한다. 만약, 박테리아가 유기물을 분해한다면, 유기물을 분해하는 효소를 찾는다. 효소를 찾게 될 경우, 이 효소를 발현하는 유전자를 특정할 수 있다. 그런데, 그동안 MEOR 연구에서 사용된 *Pseudomonas* 계열과 같은 박테리아들은 병원성이다. 이 경우, 유전공학이 도움이 될 수 있다. 비병원성 박테리아 내부로 특정 유전자를 이식하는 유전자 재조합 기술을 활용할 수도 있을 것이다.

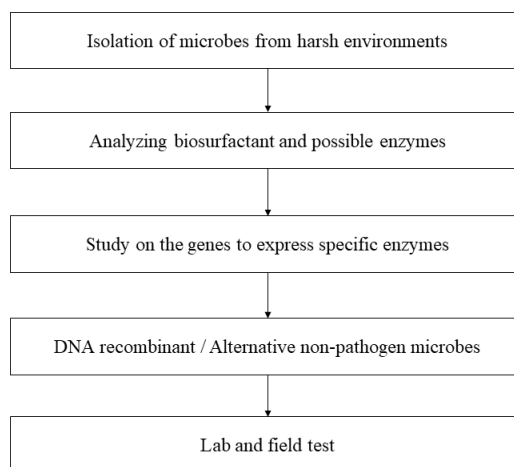


Fig. 4. Simplified procedures to screen microbial bacteria and to develop their MEOR application.

앞서 언급하였듯, 바이오 계면활성제 개발 연구는 MEOR과는 별도로 진행하고 있다고 보는 시각이 타당성 있는 시각이라고 본다. 그러나, MEOR과 연관된 박테리아를 이용하여 대사활동을 연구하고, 대사물질의 활용성을 찾는 연구는 계속되고 있다. 그 이유는, 상업화 성공 가능성과 연관되어 있다. 효모를 활용하여 sophorolipids를 생산하는 회사와 *Pseudomonas aeruginosa* 박테리아의 대사물질인 rhamnolipids를 생산하는 회사들이 등장하고 있다. 이는 10여년 전에는 예상하기 어려운 일이었다[16]. 참고문헌 [16]에 제시된 내용을 바탕으로 바이오 계면활성제 제조사를 Table 3에 나타내었다. 바이오 계면활성제는 항균성 특성을 활용하는 연구도 보고되고 있고[28], 나노입자 생성에 중요한 역할을 하고 있다[29]. 이것은, MEOR 연구 입장에서는 긍정적이라 할

Table 3. Active companies to manufacture biosurfactants [16]

Biosurfactant manufacturer	Partner	Brand	Expecting products to grow in future market
Evonik Industries	Unilever	Quix	home and personal care
Logos Technologies	Purchased by Stepan	NatSurFact	cosmetic, personal care
Jeneil Biotech	U. of Arizona	Zonix	Antifungi
AGAE Techologies	-	-	bioremediation

수 있는데, MEOR 적용이 어렵더라도 부수적으로 바이오 계면활성제 생산과 응용 분야로 연구 영역을 전환할 수 있기 때문이다.

석유개발은 친환경에너지를 지향하는 현 시대에는 각광 받기 어려운 주제라고 생각된다. 그러나, 많은 산업이 아직까지는 석유의존도가 매우 높다. 또한, 경제적 부담이 큰 탐사를 통한 석유 자원 개발이 더디게 진행된다면, MEOR의 적용 가능성은 여전히 커질 수 밖에 없을 것이다. 이와 함께, MEOR 적용과 유사한 역할을 기대하는 생물 환경정화(bioremediation) 혹은 유출류 처리 분야에서 상업적 규모로 적용될 가능성이 커질 것으로 여겨진다.

4. 요약

유전에 매장된 석유개발 방법 중 3차 회수 방법으로 분류된 미생물을 이용한 원유 회수증진법은 크게 *in-situ*와 *ex-situ* 공법으로 나눌 수 있다. *In-situ* 공법은 미생물을 저류층에 직접 투입하여 미생물의 대사활동을 통한 생산을 유도하는 공법이다. 반면, *ex-situ* 공법은 외부 반응기에서 미생물이 생산한 대사물질을 추출하여 저류층에 투입하여 원유를 회수하는 방법이다. 두 가지 공법 모두 친환경적이지만, 상대적으로 경제적인 *in-situ* 공법이 선호된다. 박테리아의 대사활동은 종류별, 환경별로 매우 복잡하게 진행되기에 다양한 조건에서 연구가 필요하다. 본 논문에서는, MEOR 박테리아 중 *Bacillus* 종을 중심으로 특성을 살펴보고, 대사물질로는 lipopeptides와 exopolysaccharides가 주로 역할을 하고 있음을 제시하였다. 그런데, 바이오 계면활성제 입장에서는, MEOR에 적용가능성이 있는가와는 별도로 다양한 응용성도 함께 가지고 있다. 박테리아를 활용한 바이오 계면활성제 생산 연구는 그 응용성의 다양화로 인해, 앞으로 확대될 것으로 전망된다. 이러한 배경으로 인해, *in-situ* MEOR 적용 가능성도 함께 커질 것으로 기대된다.

References

1. I. Sandra, R. Sandra, "Global Oil Reserves-1: Recovery Factors Leave vast Target for EOR Technologies", *Oil & Gas Journal*, Vol.105, No.41, pp. 44-47, (2007).
2. Y. Choi, P.-S. Kang, J.-S. Lim, "Recent Trends in Prospects of Chemical Enhanced Oil Recovery", *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol.55, No.6, pp. 660-669, (2018).
3. 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 July 26, 2021)
4. S. Thomas, "Enhanced Oil Recovery - An Overview", *Oil and Gas Science and Technology*, Vol.63, No.1, pp. 9-19, (2008).
5. Z. Dai, R. Middleton, H. Viswanathan, J. Fessenden-Rahn, J. Bauman, R. Pawar, S.-Y. Lee, B. McPherson, "An Integrated Framework for Optimizing CO₂ Sequestration and Enhanced Oil Recovery", *Environmental Science & Technology Letters*, Vol.1, pp. 49-54, (2014).
6. K. Devi, R.K. Bhagobaty, "Development of Biochemically Enhanced Oil Recovery Technology for Oil Fields - A Review", *Nafta-Gaz*, No.2, pp. 63-74, (2021). DOI: 10.18668/NG.2021.02.01.
7. M.S. Jeong, E. Hong, K.S. Lee, "A Critical Review of Microbial Enhanced Oil Recovery: Mechanisms and Field Trials", *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol.55, No.5, pp. 500-510, (2018).
8. B. Shibulal, S.N. Al-Bahry, Y.M. Al-Wahaibi, A.E. Elshafie, A.S. Al-Bemani, S.J. Joshi, "Microbial Enhanced Heavy Oil Recovery by the Aid of Inhabitant Spore-Forming Bacteria: An Insight Review", *The Scientific World Journal*, Vol.2014, Article ID 309159, (2014).
9. Yernazarova A, Kayirmanova G, Baubekova

- A, Zhubanova A. Microbial Enhanced Oil Recovery, Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR) – A Practical Overview (Ch.5 edited by Laura Romero-Zerón), InTechOpen, (2016). dx.doi.org/10.5772/64805 (accessed July 26, 2021)
10. Q.F. Cui, S.S. Sun, Y.J. Luo, L. Yu, Z.Z. Zhang, “Comparison of In-situ and Ex-situ Microbial Enhanced Oil Recovery by strain *Pseudomonas aeruginosa* WJ-1 in Laboratory Sand-Pack Columns”, *Petroleum Science and Technology*, Vol.35, No.21, pp. 2044–2050, (2017). <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1380042>
 11. J.D. Van Hamme, A. Singh, O.P. Ward, “Recent Advances in Petroleum Microbiology”, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, Vol.67, No.4, pp.503–549 (2003).
 12. S. Patel, A. Homaei, S. Patil, A. Davery, “Microbial Biosurfactants for Oil Spill Remediation: Pitfalls and Potentials”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol.103, No.1, pp. 27–37, (2019).
 13. Varjani SJ, Biosurfactants in Microbial Enhanced Oil Recovery, In book: Modern Tools and Technologies to Understand Microbes (Ch.23, edited by A. Varma, Sharma, A.K.), pp. 369–379, Springer-Verlag GmbH, (2017).
 14. C.B.B. Farias, F.C.G. Almeida, I.A. Silva, T.C. Souza, H.M. Meira, R.F.S. da Silva, J.M. Luna, V.A. Santos, A. Converti, I.M. Banat, L.A. Sarubbo, “Production of Green Surfactants: Market Prospects”, *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol.51, pp. 28–39, (2021).
 15. C. Nikolova, T. Gutierrez, “Biosurfactants and Their Applications in the Oil and Gas Industry: Current State of Knowledge and Future Perspectives”, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol.9, Article ID 626639, (2021). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.626639>
 16. C. Bettenhausen, “Rhamnolipids Rise as A Green Surfactant”, *Chemical & Engineering News*, Vol.98, No.23, (2021). <https://cen.acs.org/materials/biomaterials/Rhamnolipids-rise-green-surfactant/98/i23>
 17. T. Park, M.-K. Jeon, S. Yoon, K.S. Lee, T.-H. Kwon, “Modification of interfacial tension and wettability in oil-brine-quartz system by in-situ bacterial biosurfactant production at reservoir conditions for microbial enhanced oil recovery”, *Energy & Fuels*, Vol.33, pp. 4909–4920, (2019).
 18. P. Datta, P. Tiwari, L.M. Pandey, “Isolation and Characterization of Biosurfactant Producing and Oil Degrading *Bacillus subtilis* MG495086 from Formation Water of Assam Oil Reservoir and Its Suitability for Enhanced Oil Recovery”, *Bioresource Technology*, Vol.270, pp. 439–448, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.047>
 19. J.-F. Liu, S.M. Mbadinga, S.-Z. Yang, J.-D. Gu, B.-Z. Mu, “Chemical Structure, Property and Potential Applications of Biosurfactants Produced by *Bacillus subtilis* in Petroleum Recovery and Spill Mitigation”, *International Journal of Molecular Sciences*, Vol.16, pp.4814–4837, (2015).
 20. P. Parthipan, E. Preetham, L.L. Machuca, P.K.S.M. Rahman, K. Murugan, A. Rajasekar, “Biosurfactant and Degradative Enzymes Mediated Crude Oil Degradation by Bacterium *Bacillus subtilis* A1”, *Frontiers in Microbiology*, Vol.8, Article ID 193, (2017).
 21. H. Xu, H. Wang, W. Jia, S. Ren, J. Wang, “Application of *Bacillus subtilis* strain for microbial-enhanced oil recovery”, *International Journal of Green Energy*, Vol.16, No.7, pp. 530–539, (2019).
 22. J. Zhang, Q. Xue, H. Gao, H. Lai, P. Wang, “Production of Lipopeptide Biosurfactants by *Bacillus atrophaeus* 5-2a and Their Potential Use in Microbial Enhanced Oil Recovery”, *Microbial Cell Factories*, Vol.15, No.1, Article ID 168, (2016). DOI: 10.1186/s12934-016-0574-8

23. Y. Fan, J. Wang, C. Gao, C., Zhang, W. Du, "A Novel Exopolysaccharide-Producing and Long-Chain n-Alkane Degrading Bacterium *Bacillus licheniformis* strain DM-1 with Potential Application for In-situ Enhanced Oil Recovery", *Scientific Reports*, Vol.10, Article ID 8519, (2020).
24. J.-H. Lin, K.-C. Zhang, W.-T. Ta, D. Wang, S. Li, "Geobacillus Strains That Have Potential Value in Microbial Enhanced Oil Recovery", *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol.103, pp. 8339-8350, (2019). <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10115-7>
25. B. Shibulal, S.N. Al-Bahry, Y.M. Al-Wahaibi, A.E. Elshafie, A.S. Al-Bemani, S.J. Joshi, "Microbial Enhanced Heavy Oil Recovery under Laboratory Conditions by *Bacillus firmus* BG4 and *Bacillus halodurans* BG5 Isolated from Heavy Oil Fields", *Colloids Interfaces*, Vol.2, No.1, Article ID 1, (2018).
26. T. Phetcharat, P. Dawkrajai, T. Chitov, P. Wongpornchai, S. Saenton, W. Mhuantong, P. Kanokratana, V. Champreda, S. Bovonsombut, "Effect of Inorganic Nutrients on Bacterial Community Composition in Oil-Bearing Sandstones from the Subsurface Strata of An Onshore Oil Reservoir and Its Potential Use in Microbial Enhanced Oil Recovery", *PLoS One*, Vol.13, No.11, Article ID e1098050, (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198050>
27. J.M.D.A. Câmara, M.A.S.B. Sousa, E.L. Barros Neto, M.C.A. Oliveira, "Application of Rhamnolipid Biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* in Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)", *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Vol.9, pp. 2333-2341, (2019).
28. K. Patoway, R. Patoway, M.C. Kalita, S. Deka, "Characterization of Biosurfactant Produced during Degradation of Hydrocarbons Using Crude Oil As Sole Source of Carbon", *Frontiers in Microbiology*, Vol.8, Article ID 279, (2017).
29. P.A. Çelik, E.B. Manga, A. Çabuk, I. Banat, "Biosurfactants' Potentila Role in Combating COVID-19 and Similar Future Microbial Threats", *Applied Sciences*, Vol.11, No.1, Article ID 334, (2021).