

## 비이온 계면활성제를 사용한 토양으로부터 오일의 제거에 관한 연구 : 중간상생성 및 동적 계면장력의 영향

이기서 · 김영호\* · 김철웅\*\* · 이정민\*\* · 구기갑

서강대학교 화학공학과, 환경대학교 화학공학과, 한국화학연구소 화학공정연구센터\*

### Removal of Oil from Soil Using Nonionic Surfactant : The Effects of Middle Phase Formation and Dynamic Interfacial Tension

Kee-Suh Lee, Young-Ho Kim\*, Chul-Ung Kim\*\*, Jung-Min Lee\*\*, and Kee-Kahb Koo

Dept. of Chem. Eng., Sogang University, Seoul, Korea

\*Dept. of Chem. Eng., Hankyong National University, Kyunggi-Do, Korea

\*\*Chem. Research & Eng. Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Taejon, Korea

#### 요 약

비이온 계면활성제( $C_{12}H_{25}O(CH_2CH_2O)_5H$ , Triton X-100)를 사용하여 토양으로부터 오일을 제거하기 위한 기초 연구로서, 보조유화제(*n*-dodecanol)의 사용량에 따른 오일과 세정액 간의 중간상 생성온도(MPT; phase inversion temperature) 및 동적 계면장력을 측정하고, 모델 토양(모래)을 사용하여 간이세정 실험을 실시하였다. 실험결과, 사용한 계면활성제 수용액과 오일이 함께 공존하는 MPT에서 계면장력은 상대적으로 낮은 값을 나타내었으며, 이에 따른 토양으로부터 세정력도 향상시켰다. 또한 보조유화제의 첨가량에 따라 이 MPT는 비교적 낮은 온도까지 낮출 수 있어 낮은 온도 하에서 오일의 세정은 가능하였으나 무첨가의 경우와 비교할 때 세정력은 향상시키지 못했다. 동일조건에서 시간에 따른 계면장력 저하와 토양으로 오일의 제거량은  $C_{12}H_{25}O(CH_2CH_2O)_5H$ 를 사용한 경우가 Triton X-100 비해 더 우수하였으며, 오일의 종류의 효과는 kerosene>paraffin oil $\geq$ n-hexadecane 순이었다.

**Abstract :** The soil remediation by non-ionic surfactant solutions ( $C_{12}H_{25}O(CH_2CH_2O)_5H$  and Triton X-100) was studied. Depending on the amounts and use of co-surfactants, MPT(phase inversion temperature), dynamic interfacial tension, and the detergency efficiency of the surfactant solutions in soil were investigated. The oils used were kerosene, n-hexadecane, and paraffin oil. With respect to a higher detergency efficiency, a lower interfacial tension and the MPT was very important. The  $C_{12}H_{25}O(CH_2CH_2O)_5H$  was better than Triton X-100 on the oil removal from the soil and the effect of oil kinds was kerosene>paraffin oil $\geq$ n-hexadecane. The co-surfactant, n-dodecanol, reduced the MPT compared to no addition of this, whereas it did not enhance the detergent efficiency.

**Key words :** Soil remediation, dynamic interfacial tension, phase inversion temperature, non-ionic surfactant

## 서론

최근 들어 생활수준이 높아지고 산업활동이 활발해짐에 따라 새로운 화학물질에 의한 환경오염과 산업폐기물 처리 문제와 관련하여 토양오염에 대한 관심이 높아지고 있다.

이러한 토양을 정화하는 방법 가운데 계면활성제를 사용한 세정(surfactant washing) 방법은 효율이 높고 비용이 비교적 적게 드는 장점을 가지고 있다 [1-3]. 세정원리로는 일반 세정에서와 마찬가지로 계면장력 저하에 의한 rolling-up, 물/오일/토양간의 접촉각 감소 및 미셀(micelle)에 의한 가용화 등으로 볼 수 있는데, 마지막 방법인 비이온 계면활성제를 이용하여 계면활성제/물/오일상 간에 형성되는 오일성분의 가용화에 관한 연구는 최근 들어 활발하게 진행되고 있다. 이는 계면활성제가 과량의 물과 함께 오일이 중간상으로 존재하는 마이크로에멀전 생성온도 영역(MPT)을 갖는 것을 이용한 것으로서 이 MPT 조건에서 친수성과 소수성이 서로 평형을 이루며  $10^{-2} \sim 10^{-6}$  mN/m의 매우 낮은 계면장력을 갖기 때문에 유기물이 최대 가용화가 이루어진다고 알려져 있다 [4-9].

토양으로부터 오일을 제거하기 위해선 오일이 계면활성제 수용액의 미셀에 의한 가용화와 관계되기 때문에 계면장력이 낮을수록 유리할 것으로 생각되지만, 이러한 계면은 시간에 따라 변하는 동적인 상태이므로 동적 계면장력이 함께 고려되어야 한다 [7-8]. 동적 계면장력은 MPT 범위에서 마이크로에멀전의 생성속도 즉, 가용화 및 그 속도에 직접적으로 관계되며, 이 계면장력이 낮을수록(계면장력 감소 속도가 클수록) 가용화 속도가 커지므로 토양으로부터 오일의 제거속도가 커지게 된다. 따라서 이러한 중간상이 생성되어지는 속도가 느리다면 MPT의 조건이라 하더라도 일정한 짧은 시간에는 마이크로에멀전 현상에 의한 유화작용을 기대할 수 없어 오일 제거 효과는 감소한다고 할 수 있다.

통상 토양으로부터 오일을 효과적으로 제거하기 위해 MPT에서 유화작용을 돕고 계면활성제 구조를 변화시키지 않으면서 세정 온도를 낮출 목적으로 첨가제들을 사용하고 있다. 이에 적당한 첨가제로는 보조유화제로 알려진 긴 사슬의 알코올인 n-dodecanol과 hydrotrope로 urea를 비롯한 많은 종류가 알려져 있다 [10-14]. 즉, 이러한 첨가제의 투입에 의해 마이

크로에멀전을 쉽게 형성시키고 계면장력을 낮춤으로써 결국 MPT를 떨어뜨려 낮은 온도에서 유화에 의한 세정이 가능하게 되는데, 이는 첨가제에 의해 미셀의 격자 간격을 넓혀서 가용화 능력을 향상시키는 데 기인하는 것으로 알려져 있다 [15,16].

본 연구에서는 비이온 계면활성제( $C_{12}H_{25}O(CH_2CH_2O)_5H$ , Triton X-100)를 사용하여 토양으로부터 오일을 제거하기 위한 기초 연구로서, 보조유화제의 양에 따라 오일과 세정액 간의 MPT 및 동적 계면장력에 관한 실험을 실시하였으며, 이를 모델 토양(모래)에 적용하여 유화에 의한 오일의 제거 효과를 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시료

실험에 사용한 계면활성제는 비이온제로 DDAE-5(n-dodecyl pentaoxyethylene monoether,  $C_{12}H_{25}O(CH_2CH_2O)_5H$ , 한국 한농화학)와 Triton X-100(polyoxyethylene(9.5) isootylcyclohexylether,  $C_8H_{17}(C_6H_4)(CH_2CH_2O)_{9.5}OH$ , 미국 Aldrich)이었다. 첨가제로는 n-dodecanol(미국 Aldrich, 99%)과 urea( $H_2NCONH_2$ , 미국 Aldrich, 99%)를, 오일로는 n-hexadecane, kerosene(미국 Aldrich, 99+%), paraffin oil(일본 Yakuri, 99%)을, 마지막으로 모델 토양으로는 정제된 모래(일본 Junsei, 20x30 mesh)를 사용하였다.

또한 사용한 물은 1차 증류수를 초순수 장치인 이온수지(Milli-Q Labo)와 역삼투압 수지(Milli-Q plus PF)에 연속적으로 통과시켜 얻은 순수(18.2M $\Omega$ )였으며, 모든 초자류는 칼륨염 15g을 진한 황산 500ml에 녹인 크롬산 용액에서 유기물질을 철저히 세척한 후 사용하였다.

### 2.2. 중간상(middle phase) 생성온도(MPT)

Fig. 1에는 물-오일간의 계면에서 상변화를 관찰하기 위해 사용한 장치를 나타내었는데, 이는 기존의 문헌에서 발표된 장치와 유사하며 [11], 0.1 $^{\circ}C$ 까지 온도조절이 가능한 항온조와 편광필터로 구성되었다. 시료는 50ml의 유리시험관에 일정한 계면활성제와 순수 10ml를 넣고, 이를 초음파세척기에 6시간 이상 균일하게 혼합시켰다. 이어서 여기에 오일 10ml를 다시 채운 후 오일과 물 층이 섞이지 않게 조심스럽게

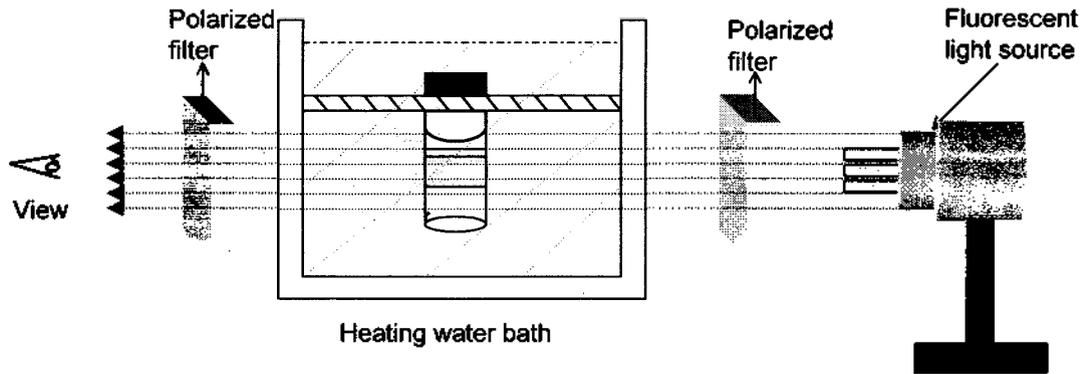


Fig. 1. Experimental apparatus for phase inversion temperature.

유지하면서 실험장치인 항온조에 넣어 상거동을 관찰하였다. 이때 항온조 온도는 온도조절기에 의해 15~80℃ 범위에서 1℃/min으로 서서히 온도를 올리면서 오일과 세정액 간에 상변화를 편광필터를 통해 관찰하였다. 이러한 상거동은 처음에는 상부의 오일 층과 하부의 물 층이 2상으로 존재하다가 온도를 서서히 올리면 비이온 계면활성제의 담점(cloud point)이 나타나 상이 흐려지며, 계속해서 온도를 올리면 오일과 수용액상의 경계면에서 중간상(3상이 혼합된 별도의 상)이 존재하는 영역이 나타나는데 이때 온도를 중간상 생성온도(MPT)로 정하였다.

2.3. 동적 계면장력 측정

동적 계면장력은 spinning drop 방법(Kruss K-04 모델)에 의해 측정하였는데, 오일 방울을 계면에서 일단 형성시킨 후 시간에 따라 계면장력의 변화를 측정하는 방법으로 통상 낮은 계면장력(2mN/m 이하)의 측정에 사용된다. 실험 방법은 일정 온도 하에서 유리 튜브 안에 계면활성제 종류 및 조성에 따라 제조한 용액을 채운 후 이 튜브를 일정한 속도(약 3000~6000rpm)로 회전시킨다. 계속해서 마이크로실린지를 사용해서 소량의 오일을 주입시켜 오일 방울을 형성시키는데, 주입 직후에는 이 오일 방울은 일정한 회전력 하에서 거의 구형을 이루다가 수초 후부터 계면장력 변화에 의해 횡 방향으로 늘어난다. 이러한 현상은 시간이 경과함에 따라 수용액으로부터 계면활성제가 오일/수용액 계면에 흡착되는 것을 의미하며, 이에 따라 계면장력이 감소하게 된다. 즉, 시간에 따른 계면장력은 오일 방울의 모양과 계면장력( $\gamma$ )간의 다음과 같은 관계에 의해 얻어졌다.

$$\gamma = \frac{\omega^2 \Delta \rho r_o^3}{4}$$

여기서  $\omega$ 는 각속도,  $\Delta \rho$ 는 오일과 수용액간의 밀도 차,  $r_o$ 는 늘어난 타원형 오일 방울의 종 방향의 반경이다.

2.4. 토양으로부터 오일 제거 실험

사용한 실험장치는 Fig. 2에 나타내었으며, wilhelmy판 방법에 의해 표면장력을 측정하는 KSV Sigma-70(KSV Instruments, Finland)을 변형하여 사용하였다. 실험은 모델 토양으로 사용한 모래 2g을 원통형 철망(직경 12mm, 높이 15mm) 안에 넣고 마이크로실린지를 사용하여 0.08ml의 오일을 모래 표면에 주입하여 이 오일이 모래 입자들 표면에 골고루 적셔지기 위해 1시간 이상 상온에서 방치해 두었다. 계속해서, 이를 실험 장치에 장착하여 여러 조성으로 제조한 세정액(용기크기: 100ml)에 담근 후 자석 교반기를 사용하여 15rpm으로 일정하게 교반시키면서 시간에 따른 시료의 무게 변화를 측정하여 모래로부터 제거되는 오일 량을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 사용한 세정액의 중간상 생성온도(MPT)

Fig. 3에는 오일(0.02wt% n-hexadecane)과 세정액(비이온 계면활성제: 물을 기준으로 1.0wt% DDAE-5, 보조유화제: n-dodecanol)간의 상전이 온도를 보조유화제 농도에 따라 나타내었다. 이 그림에

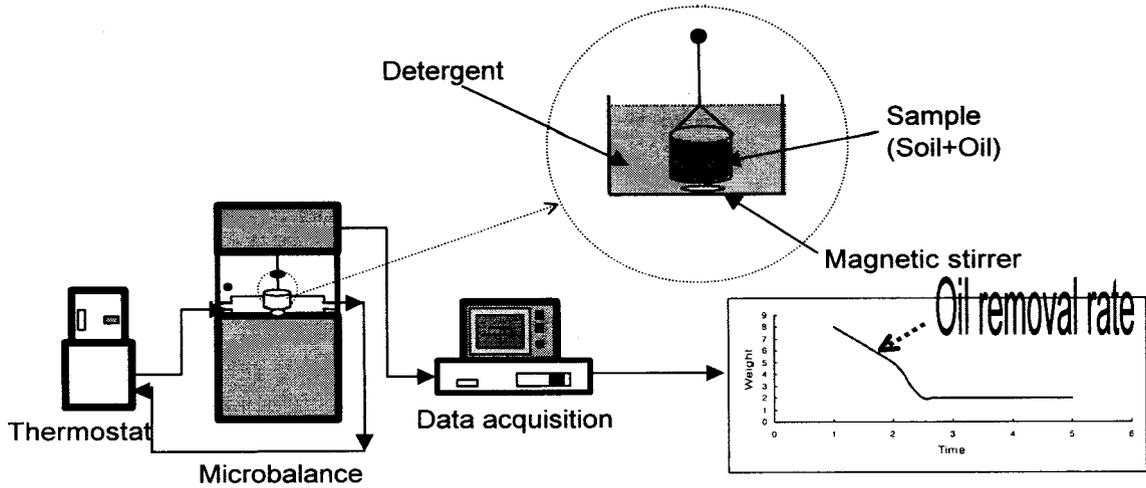


Fig. 2. Experimental apparatus for oil removal from soil.

서 알 수 있듯이 온도에 따른 상전이 현상은 먼저 상온에서는 계면활성제 수용액과 오일이 2상으로 존재하다가 온도를 올리면 오일과 물의 계면에서 파잉의 물과 파잉의 오일로 이루어진 3상이 존재하는 즉, 평형조건하에서 3상이 공존하는 중간상이 생성되는 온도인 MPT 영역이 관찰되었다. 이 MPT는 보조유화제를 사용하지 않은 경우 49-50℃ 및 75℃의 두 영역에서 관찰되었으며, 보조유화제의 첨가함에 따라 이 중간상이 존재하는 온도((Fig. 3의 빗금친 영역)는 점점 낮아지는 경향을 나타내었다. 또한 이 MPT 영역은 보조유화제의 첨가량이 증가할수록 더 넓은 온도 범위에서 관찰되었다.

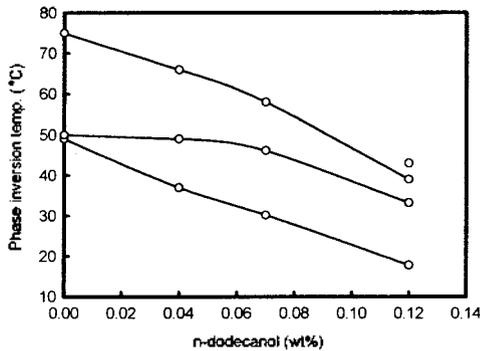


Fig. 3. The effect of n-dodecanol on phase inversion temperature in 0.2 wt% n-haxadecane/1.0wt% DDAE-5 aqueous solution.

Table 1은 위의 비이온 계면활성제(1wt% DDAE-5)를 동일한 농도의 Triton X-100으로 바꾸어 여러 오일(kerosene, n-hexadecane, paraffin oil)을 사용하여 MPT를 측정한 결과이다. Triton X-100은 DDAE-5를 사용한 결과와는 달리 보조유화제(n-dodecanol)를 사용하지 않는 경우 100℃까지 상변

Table 1. The effect of n-dodecanol and urea on MPT in 0.02wt% urea/0.2wt% kerosene/1.0wt% TX-100 aqueous solution.

Oil type	n-dodecanol (wt%)	PIT(℃)
Paraffin oil	0	78~80
	0.04	61.4~67
	0.07	52.5~55
	0.12	45~50.2
Kerosene	0	68~71
	0.04	56~62
	0.07	50.4~65
	0.12	40.3~50
n-hexadecane	0	ND
	0.04	62.8~73.8
	0.07	56~67
	0.12	45~51

화가 관찰되지 않았다. 따라서 여기에 hydrotrope로 알려진 urea를 일정량 첨가하여 MPT를 낮추었으며 첨가 농도에는 거의 영향을 나타내지 않았다. 즉, urea의 첨가에 의해 파라핀오일의 경우에는 78-80°C 낮추어졌으며, kerosene의 경우에는 68-71°C를 나타낸 반면, n-hexadecane의 경우에는 여전히 MPT가 나타나지 않았다. 따라서 urea 농도는 일정하게 0.02wt%로 고정하고 여기에 보조유화제(n-dodecanol)를 첨가하였는데 MPT는 그 첨가량에 따라 상당량 낮출 수 있었다. 실험온도 범위에서 앞서의 DDAE-5를 사용한 경우(Fig. 3)에 두 온도영역에서 MPT가 나타난 것과는 달리 Triton X-100을 사용한 경우에는 한 온도 영역에서만 나타났다. 후자인 Triton X-100을 사용하여 오일로 탄화수소 계열로 분자량 크기가 상당히 차이가 있는 kerosene, n-hexadecane, paraffin oil의 영향을 살펴보았는데, MPT가 나타나는 온도는 그다지 큰 차이를 나타내지 않았지만 보조유화제의 첨가량에 따라 대체적으로 kerosene>paraffin oil≥n-hexadecane의 경향을 나타내었다.

3.2. DDAE-5수용액/n-hexadecane 상에서 동적 계면장력 및 오일제거

Fig. 4와 5에는 세정액으로 비이온 계면활성제인 1.0wt% DDAE-5를 사용하여 오일로 0.01wt% n-hexadecane과의 계면에서 동적 계면장력 및 모델 토양(모래)으로부터 오일의 제거에 관한 결과를 각각

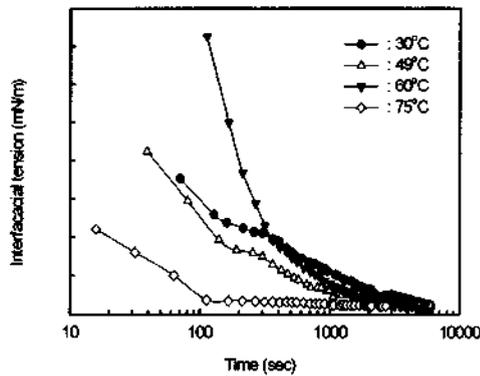


Fig. 4. The effect of temperatures on dynamic interfacial tension behavior in 0.2wt% n-hexadecane/1.0wt% DDAE-5 aqueous solution(temp: 30, 49, 60, 75°C).

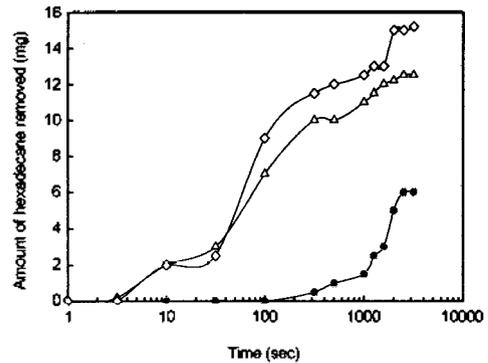


Fig. 5. Removal rate of n-hexadecane from contaminated sand in 0.2 wt% n-hexadecane/1.0wt% DDAE-5 aqueous solution(temp: 30, 49, 75°C).

나타내었다. 먼저 Fig. 4에는 온도를 변수로 동적 계면장력인 시간에 따른 계면장력의 결과를 나타내었는데, 여기서 실험온도는 MPT영역인 49°C, 75°C(△, ◇)와 MPT가 아닌 영역인 30°C, 60°C(●, ▼)였다. 실험 결과, 온도에 관계없이 시간에 따라 계면장력은 급속히 낮아졌으며 약 3시간 이후부터는 거의 동일하게 일정한 값(평형장력)에 도달하였다. MPT 영역과 아닌 조건을 비교할 때 MPT 영역에서 동적 계면장력(계면장력이 평형에 도달하는 시간)은 상대적으로 컸는데 즉, 더 빠른 시간에 계면장력이 평형에 도달했다. 동일한 MPT 영역에서는 온도가 높을수록 (75°C>49°C) 이 동적 계면장력은 더 큰 값을 나타내었다.

Fig. 5에는 Fig. 4와 동일조건에서 시간에 따른 오일의 제거 결과를 나타내었다. 이 Fig. 5에서 알 수 있듯이 MPT 영역에서 오일 제거량은 MPT가 아닌 영역(30°C)에 비해 상대적으로 컸으며 그 제거속도도 향상됨을 알 수 있었다. 또한 초기에는 그 제거속도가 크지 않지만 어느 시간 이후 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 초기에는 이 보조유화제에 의해 동적 계면장력이 감소되지 않지만 어느 시간이 지나면 미셀의 가용화량의 증가로 인해 오일의 제거량이 갑자기 증가하게 된 것으로 생각된다. 따라서 각 온도에서 동적 계면장력의 경시변화(Fig. 4)와 연계하여 고려할 때 오일의 제거속도는 MPT에 크게 영향을 받음을 알 수 있었으며 어느 시간에서 일정한 계면장력인 평형장력은 동일하지만, 시간에

따라 계면장력이 감소되는 동적 계면장력은 차이가 있어 결국 오일 제거속도와 관계됨을 알 수 있었다.

Fig. 6과 7에는 Fig. 4, 5와 동일한 조건에서 보조유화제로 0.07wt% n-dodecanol을 첨가한 경우 동적 계면장력과 모델토양(모래)으로 오일의 제거에 관한 결과를 각각 나타내었다. 이마 설명한 바와 같이 보조유화제의 첨가에 의해 MPT는 75°C에서 58°C로 크게 감소하였지만(Fig. 3), Fig. 6에서 알 수 있듯이 일정한 온도에서 시간에 따른 계면장력이 상대적으로 낮거나 거의 유사해 보조유화제의 첨가하지 않은 실험(Fig. 4)에 비해 그 첨가영향이 그다지 크지 않음을 알 수 있었다. 그러나 이 조건에서 시간에 따른 오일 제거량의 결과인 Fig. 7을 살펴보면 MPT 조건에서 오일 제거량이 상대적으로 증가함을 알 수 있었다. 즉, 보조유화제 첨가에 따른 오일제거에 관한 온도영향은 MPT 범위가 아닌 온도(28°C, 53°C)에서는 상대적으로 가장 낮았으며, 58°C > 35°C > 53°C > 28°C 순서였다. Fig. 7과 Fig. 5의 토양으로부터 오일 제거에 관한 보조유화제의 첨가 영향을 살펴보면 MPT 영역에서 오일의 제거량은 보조유화제를 첨가하지 않는 경우보다 더 우수한 결과를 나타내었으며 MPT 영역이 아닌 영역에서는 거의 유사한 경향을 나타내었다.

이러한 결과는 동일 온도에서 보조유화제의 첨가는 동적 계면장력 저하에는 기여하지 못하고 MPT를 낮추어 더 낮은 온도에서 오일을 제거하는 역할을 함을 알 수 있었다. 이는 보조유화제로 사용한 긴 사슬 알코올인 n-dodecanol이 비이온 계면활성제의 미셀 표면에 침투하는 경우로 생각되는데, 이 미셀 표면에 긴 사슬이 붙어 표면적을 증가시켜 오일의 가용화를 촉진시키지만, 이 표면적을 증가시키기 위해선 많은 시간이 소요되어 결국 일정 시간에서의 동적 계면장력의 감소효과는 거의 나타나지 않고 미셀의 거대분자 크기구조로 인해 오히려 계면 흡착속도가 저하되어 동적 계면장력이 역으로 증가하는 것으로 사료된다[15].

### 3.3. Triton X-100 수용액/오일(kerosene, n-hexadecane, paraffin oil) 상에서 동적 계면장력 및 오일제거

일반적으로 Triton X-100은 DDAE-5에 비해 생분해성이 뛰어나다고 알려져 있기 때문에 이를 사용한 실험을 실시하였다. 즉, Fig. 8-14는 앞서의 결과(Fig. 6, 7)와 비교를 위해 기준에 사용한 비이온 계

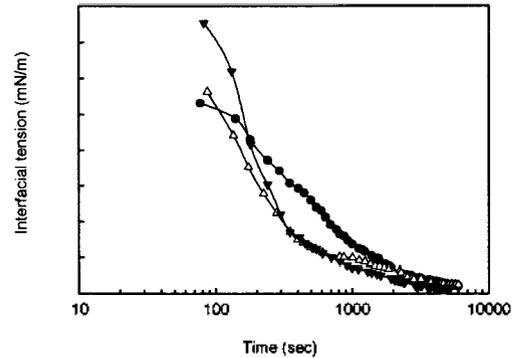


Fig. 6. The effect of temperatures on dynamic interfacial tension behavior in 0.07wt% n-dodecanol/0.2wt% n-hexadecane/1.0wt% DDAE-5 aqueous solution(temp: 28, 35, 53°C).

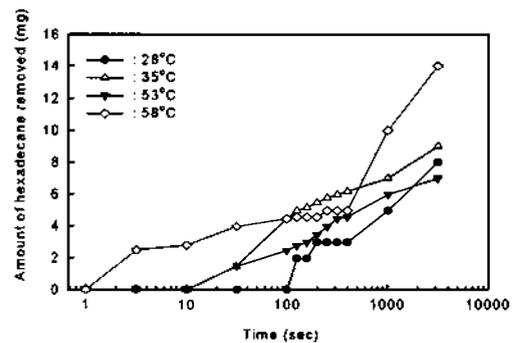


Fig. 7. Removal rate of n-hexadecane from contaminated sand in 0.07 wt% n-dodecanol/1.0wt% DDAE-5 aqueous solution(temp: 28, 35, 53, 58°C).

면활성제인 DDAE-5에서 동일농도인 Triton X-100으로 바꾸어 실시하였는데, 후자는 MPT 온도가 매우 높기 때문에 첨가제로 urea를 0.02wt% 첨가하였다. 먼저, Fig. 8은 오일로 보조유화제(n-dodecanol)를 사용하여 MDP 온도영역(○, △) 및 아닌 영역(●, ▲)에 대해 그 첨가량(○, ●: 0.07wt%, △, ▲: 0.12wt%)에 따라 동적 계면장력의 영향을 나타내었다. 이 Fig. 8에서 알 수 있듯이 보조유화제의 양을 증가시키면 계면장력은 상대적으로 더 큰 값을 나타내었다. 동일한 보조유화제 농도에서 MDP 영역에서 더 낮은 계면장력을 나타내었으나 동적 계면장력(시

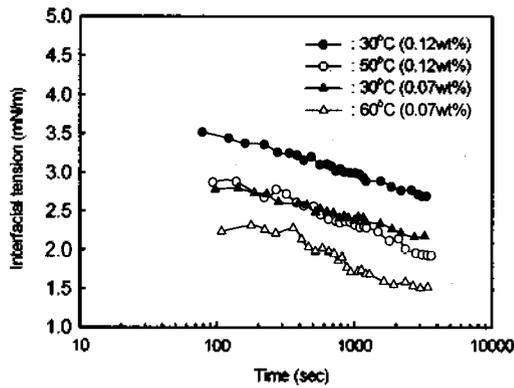


Fig. 8. The effect of n-dodecanol addition on dynamic interfacial tension behavior in 0.2wt% n-haxadecane/1.0wt% TX-100 aqueous solution(temp: 30, 50, 60°C, n-dodecanol addition: 0.07, 0.12wt%).

간에 따른 계면장력의 기울기)은 거의 유사하였다.

Fig. 9-10은 세정액(1wt% TX-100 계면활성제 수용액/0.12wt% n-dodecanol/0.02wt% urea)과 오일로 n-hexadecane을 사용하여 온도에 따른 동적 계면장력 및 시간에 따른 오일 제거량을 나타내었다.

이 결과에서 알 수 있듯이, 동적 계면장력은 MPT 온도인 50°C에서 가장 낮았으며(Fig. 9), 오일 제거

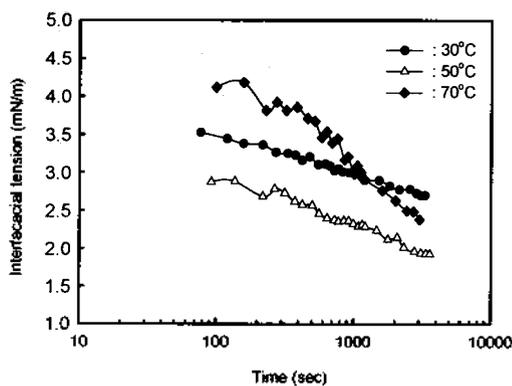


Fig. 9. The effect of temperatures on dynamic interfacial tension behavior in 0.07wt% n-dodecanol/0.02wt% urea/0.2wt% n-hexadecane/1.0wt% TX-100 aqueous solution(temp: 30, 50, 70°C).

량은 온도에 는 관계없이 100초 이후에 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며, 보조유화제의 첨가에 의해 온도에 따른 계면장력은 거의 차이가 없었다.

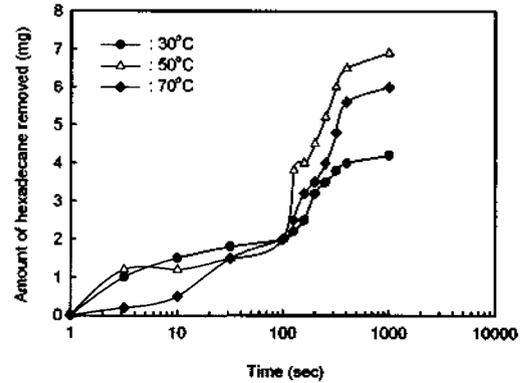


Fig. 10. Removal rate of n-hexadecane from contaminateds and in 0.07wt% n-dodecanol/0.02wt% urea/1.0wt% TX-100 aqueous solution(temp: 30, 50, 70°C).

이 결과와 DDAE-5를 사용한 실험(Fig. 6,7) 결과를 비교해 보면 계면장력은 상대적으로 높은 값을 나타내었으며 시간에 따른 오일 제거량은 상대적으로 낮은 경향을 나타내고 있다. Fig. 11-14는 위와 동일한 세정액에서 오일로 탄화수소의 체인이 다른 kerosene, n-hexadecane, 파라핀오일을 사용하여 동

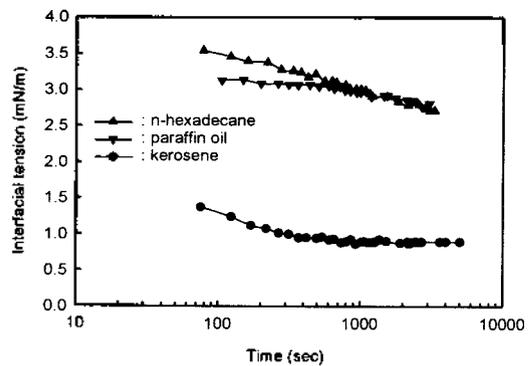


Fig. 11. The effect of oil kinds on dynamic interfacial tension behavior in 0.07wt% n-dodecanol/0.02wt% urea/1.0wt% TX-100 aqueous solution at 30°C.

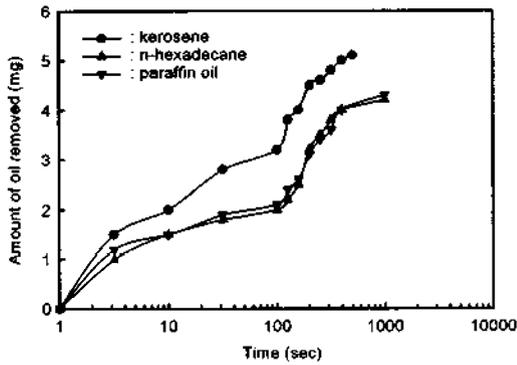


Fig. 12. The effect of oil kinds on the oil removal from contaminated sand in 0.07wt% n-dodecanol/0.02wt% urea/1.0wt% TX-100 aqueous solution at 30°C. 적 계면장력 및 오일제거에 관한 탄화수소 체인의 영향을 나타내었다. MPT가 아닌 조건(30°C, Fig. 11-12)과 MPT 조건(50°C, Fig. 13-14)에서 계면장력 저하와 오일 제거량은 각각 나타내었는데 체인의 길이와는 관계없이 동일한 경향을 나타내었는데 kerosene > paraffin oil ≥ n-hexadecane 순서였다. 즉, 사용한 오일의 체인길이보다는 바이온 계면활성제 수용액과 오일과의 계면특성에 기인하는 것으로 사료된다.

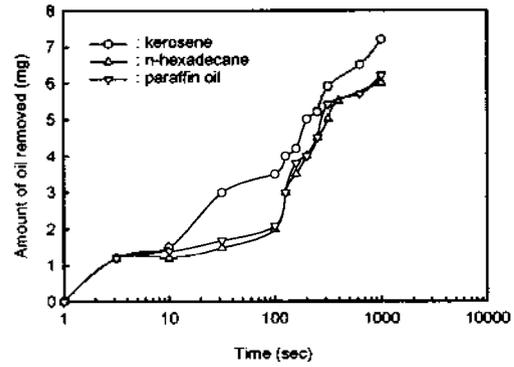


Fig. 14. The effect of oil kinds on the oil removal from contaminated sand in 0.07wt% n-dodecanol/0.02wt% urea/1.0wt% TX-100 aqueous solution at 50°C.

3.4. 모델토양(모래)로부터 오일의 세정 메카니즘

이러한 실험결과를 기초로 본 실험에 사용한 계면활성제에 의한 오일의 세정 메카니즘은 Fig. 15에

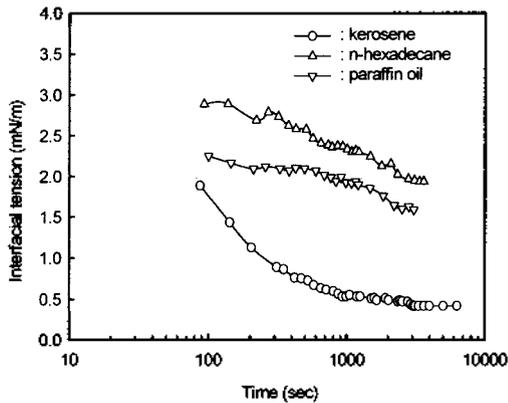


Fig. 13. The effect of oil kinds on dynamic interfacial tension behavior in 0.07wt% n-dodecanol/0.02wt% urea/1.0wt% TX-100 aqueous solution at 50°C.

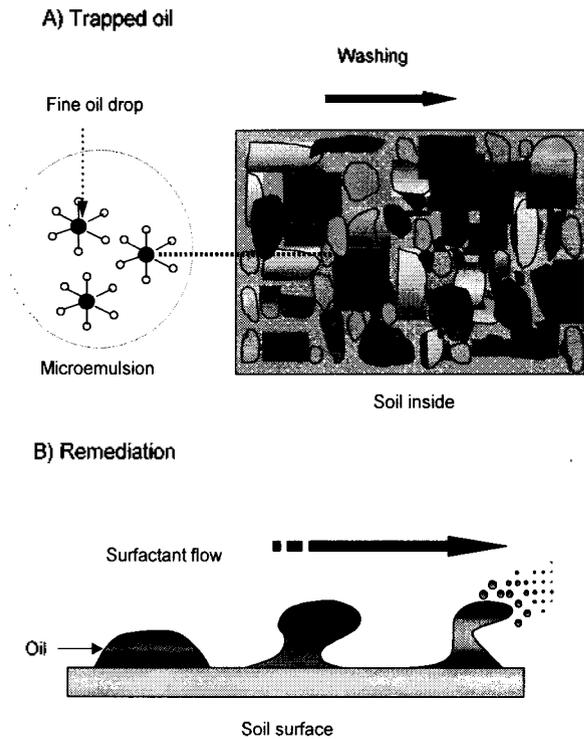


Fig. 15. The solubilization mechanism for oil removal from a soil surface.

나타내었다. 즉, 토양으로부터 흡착된 오일이 세정액(비이온 계면활성제, 보조유화제의 혼합 수용액)의 유화작용에 의해 제거되는 과정을 나타낸 것으로서, 토양으로부터 오일의 세정과정은 계면활성제가 과량의 물과 오일이 공존하는 중간상(middle phase) 온도 영역(MPT)에서 오일과 세정액 간의 계면장력이 시간에 따라 변하는 동적인 상태이므로 오일이 미셀 속으로 가용화를 야기하며 마이크로에멀전 생성 속도는 이러한 동적 계면장력 감소속도에 의존한다고 볼 수 있다. 또한 보조유화제의 첨가에 의해 MPT는 낮아졌지만 동일온도에서 가용화 량의 증가에는 큰 영향을 주지 않았다. 이는 보조유화제의 첨가가 동적 계면장력에 거의 영향을 주지 않기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 비이온 계면활성제(DDAE-5, Triton X-100)를 사용하여 토양으로부터 비 수용성 오일 성분을 제거하기 위한 기초 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시간에 따른 계면장력(동적 계면장력) 및 토양으로부터 오일제거는 중간상 생성온도(MPT)와 밀접한 관계가 있었으며, MPT 영역에서 계면장력은 저하되며 유화에 의한 오일 제거량이 증가되는 경향을 나타내었다.
2. 사용한 비이온 계면활성제 중 DDAE-5가 Triton X-100에 비해 더 낮은 MPT를 나타내었으며, 시간에 따른 계면장력 저하가 상대적으로 커서 즉, 동적 계면장력이 낮아서 유화에 의한 오일 제거량도 상대적으로 큰 값을 나타내었다.
3. 보조유화제로 사용한 n-dodecanol과 hydrotrope로 사용한 urea의 첨가에 의해 MPT는 효과적으로 낮출 수 있었으며, 전자는 첨가량에 따라 MPT를 비례하여 낮춘 반면 후자는 첨가량 농도에는 거의 영향이 없었다.
4. Triton X-100을 계면활성제로 사용하여 오일인 탄화수소의 체인의 길이에 관한 영향은 체인 길이에 따라 kerosene > paraffin oil > n-hexadecane 순서로 시간에 따른 계면장력은 더 낮은 값을 나타내었으며 유화에 의한 오일 제거량은 상대적으로 큰 값을 나타내었다.
5. 전반적으로 토양으로부터 오일의 제거 속도는 계

면장력의 저하속도(즉, 동적 계면장력의 크기)에 큰 영향을 받았으며, 동적 계면장력이 작을수록 유화 속도가 향상되어 오일 제거 속도가 높았다.

#### 참 고 문 헌

1. Lim, J. C. : J. of Korean Ind. & Eng. Chem., 8(3), 357(1997).
2. Raney, Kirk H. and Miller, C. A. : J. of Colloid and Interface Sci. 119(2), 539(1987).
3. Zhichu, Bi and Zhenshu, Zhang : J. of Colloid and Interface Sci., 214, 368(1999).
4. Benton, W. J., Raney, K. H., and Miller, C. A. : J. of Colloid and Interface Sci., 110(2), 363(1986).
5. Raney, Kirk. H., Benton, W. J., and Miller, C. A. : J. of Colloid and Interface Sci., 117(1), 282(1987).
6. Saito, H. and Shinoda, K. : J. of Colloid and Interface Sci., 32, 647(1970).
7. Campanelli, J. R. and Wang, Xiaohong : J. of Colloid and Interface Sci., 213, 340(1999).
8. Socrates, A. and Maria, A. : Fuel, 78, 309(1999).
9. Lai, Kuo-Yann, NcCandlish Elizabeth F. K., and Aszman Harry : "Liquid Detergents", Surfactant Science Series, Vol 67, Marcel Dekker Inc., 207(1997)
10. Li, Zhi-ping, Zeng, Hong-Xia, Zhao, Ren-Bao, and Jiao, Li-Mei : J. of Dispersion Science and Technology, 20(4), 1143(1999).
11. Ghosh, Olina and Miller, C. A. : J. Phys. Chem., 91, 4528(1987).
12. Princen, H. M. : Langmuir, 15, 7386(1999).
13. Xie, X. and Morrow, N. R. : Colloids Surface A: Physicochemical & Engineering Aspects, 138, 97(1998).
14. Kim, Young H. and Wasan, Darsh T. : J. of Ind. & Eng. Chem., 3(2), 128(1997).
15. Adamson, Arthur W. : "Physical Chemistry of Surface" Fifth edition, John Wiley & Sons, Inc., 500(1990).
16. Maidment, Linda J., Chen., Vicki, and Warr, Gregory G. : Colloids and surfaces, A:

Physicochemical & Engineering Aspects,  
129-130, 311(1997).