

포름아미드 추출에 의한 조제 메틸나프탈렌유에 함유된 질소화합물의 저감에 관한 실험인자의 영향

김수진[†]

청운대학교 화학생명공학과
(2023년 9월 13일 접수, 2023년 10월 19일 수정, 2023년 10월 20일 채택)

Effect of Experimental Factors on Reduction of Nitrogen Compounds Contained in Crude Methylnaphthalene Oil by Formamide Extraction

Su Jin Kim[†]

Department of Chemical & Biological Engineering, Chungwoon University, Incheon 22100, Korea
(Received September 13, 2023; Revised October 19, 2023; Accepted October 20, 2023)

초 록

조제 메틸나프탈렌유(CMNO) 중에는 퀴놀린(QU), 이소퀴놀린(IQU)과 인돌(IN)과 같은 질소화합물(NCs)이 함유되어 있다. CMNO 중의 이들 NCs는 대기환경을 오염시키고 불쾌한 냄새로 인해 CMNO에 함유된 불순물로서 취급되고 있다. CMNO의 품질향상을 위해서, 본 연구는 원료로서 CMNO를, 용매로서 포름아미드 수용액을 각각 사용하여 CMNO 중에 함유된 NCs의 저감에 관한 추출 실험인자의 영향을 검토했다. 초기 원료에 대한 용매의 체적비(S/F)₀의 증가는 NCs의 분배계수와 2-메틸나프탈렌(2MNA)을 기준한 NCs의 선택도를 증가시켰다. 또한 조작 온도의 상승은 NCs의 분배계수를 증가시켰으나, 역으로 선택도를 감소시켰다. 일정한 조건(초기 용매에 함유된 물의 체적분율(y_{w,0}) = 0.1, (S/F)₀ = 9, T = 303 K, 액-액 접촉시간(t) = 72 h)하의 평형추출을 통해 회수된 추잔유 중의 QU, IQU와 IN의 조성은 CMNO에 비해 각각 약 58.5 wt%, 61.9 wt%와 73.4 wt% 저감되었다. 본 연구의 포름아미드 추출법은 CMNO에 함유된 NCs의 유효한 저감법으로 기대되었다.

Abstract

The crude methylnaphthalene oil (CMNO) contains nitrogen compounds (NCs) such as quinoline (QU), isoquinoline (IQU), and indole (IN). These NCs in the CMNO are treated as impurities contained in the CMNO due to contamination of the atmospheric environment and unpleasant odors. In order to improve the quality of CMNO, this study examined the effect of extraction experimental factors on the reduction of NCs contained in CMNO using CMNO as a raw material and an aqueous formamide solution as a solvent, respectively. The increase in the volume ratio of solvent to feed in initial (S/F)₀ in initial increased the distribution coefficient of NCs and the selectivity of NCs in reference to 2-methylnaphthalene (2MNA). Additionally, an increase in operating temperature (T) increased the distribution coefficient of NCs but conversely decreased selectivity. The compositions of QU, IQU, and IN in the raffinate oil recovered through equilibrium extraction under a constant condition (volume fraction of water to solvent in initial (y_{w,0}) = 0.1, (S/F)₀ = 9, T = 303 K, liquid-liquid contacting time = 72 h) were reduced by about 58.5 wt%, 61.9 wt%, and 73.4 wt%, respectively, compared to those of CMNO. The formamide extraction method in this study was expected to be an effective reduction method for NCs contained in CMNO.

Keywords: Coal tar, Crude methylnaphthalene oil, Nitrogen compounds, Formamide extraction

1. 서 론

본 연구에 사용된 조제 메틸나프탈렌유(CMNO) 중에는 퀴놀린(QU), 이소퀴놀린(IQU), 인돌(IN)과 같은 질소화합물(NCs)이 총계 약 15.23

wt% 함유되어 있다. 이들 NCs는 대기오염 물질임과 동시에 불쾌한 냄새로 인해 CMNO에 함유된 불순물로서 취급되며, 또한 현재 국내에서 생산되는 CMNO 중에는 QU가 약 6.72 wt% 함유되어 있는 관계로 유해화학물질로 분류되어 운송 및 취급에 많은 제약이 따른다. 이와 같은 이유로 CMNO에 함유된 NCs의 저감을 통한 CMNO의 품질 향상이 가능하게 되면 그 의미가 매우 크다고 할 수 있다[1-5].

콜타르의 증류 부산물 중의 NCs의 분리는 부산물을 구성하고 있는 화합물들의 비점이 매우 근접하여 증류법을 이용한 각 화합물 간의 분리는 곤란하다[2,3,6]. 따라서 콜타르의 증류 부산물 중의 NCs의

[†] Corresponding Author: Chungwoon University
Department of Chemical & Biological Engineering, Incheon 22100, Korea
Tel: +82-32-770-8187 e-mail: sujkim@chungwoon.ac.kr

분리는 산 및 염기 물질을 사용한 반응 추출법[7,8], 유기용매 추출법[2,3,9-12], 초임계 추출법[1,5,7], 이온성 액체를 사용한 추출법[4,13-17], 액막 투과법[18], 흡착법[19]과 포집 착물화 형성법[20,21] 등의 분리법에 의해 연구되고 있다. 지금까지 콜타르의 증류 부산물 중에 함유된 NCs의 분리는 주로 산과 염기 물질을 사용한 반응 추출에 의해 이루어지고 있지만, 강알칼리성 용액(예: NaOH)과 산성 용액(예: H₂SO₄)이 모두 사용되는 이 분리법은 비용이 많이 들고, 금속 분리장치를 부식시키고 동시에 환경을 심각하게 오염시키며, 또한 분리제를 재생할 수 없어 분리 공정이 복잡하다는 단점이 있다. 따라서 반응추출보다 간단하면서 효율적인 새로운 대체 분리법을 찾는 것은 큰 의미가 있다.

저자 등은 이전 연구[2]에서 CMNO를 원료로, 포름아미드 수용액을 용매로 각각 사용하여 초기 용매에 함유된 물의 체적분율($y_{w,0}$)을 변화시킨 1단 평형추출과 일정한 평형추출조건하에서 회분 병류 5단 평형추출을 행해, NCs의 분배계수와 2MNA를 기준한 NCs의 선택도를 검토하여 포름아미드 추출이 CMNO 중의 NCs의 저감에 매우 효율적인 분리법임을 보고했다. 본 연구는 CMNO 중에 함유된 NCs의 저감을 위한 포름아미드 추출의 최적 추출조건을 선정하기 위하여, 이전 연구[2]에서 행한 $y_{w,0}$ 를 제외하고 CMNO 중의 NCs의 저감에 미치는 실험인자의 영향을 검토했다.

2. 실험방법과 조건

먼저 일정량의 수돗물과 포름아미드를 혼합하여 규정 농도의 용매를 작성했다. 일정량의 CMNO와 용매(포름아미드 수용액)를 투입한 250 mL의 삼각플라스크를 실험 온도로 유지시켜 놓은 진동 고온조속 속에 넣어 진동을 개시했다. 일정 시간이 경과한 후에 진동을 중지하고 분-액 로드를 사용하여 2상(추출상, 추진상)을 분취했다. 분취한 소량의 2상에 아세톤을 각각 소량 첨가한 각 샘플을 가스크로마토그래피(GC) 분석하여 2상의 조성을 결정했다. Table 1과 2에 2상의 분석에 사용된 GC 및 분석조건과 본 연구에서 사용한 물질계와 실험조건을 각각 나타냈다. 상술한 바와 같이 원료로서는 CMNO를, 용매로서는 포름아미드 수용액을 각각 사용했으며, 본 연구의 액-액 평형실험은 $y_{w,0}$ 를 일정하게 유지시켜, 액-액 접촉시간(t), 초기 원료에 대한 용매의 체적비(S/F)₀와 조작온도(T)를 각각 변화시켰다.

Table 1. Gas Chromatography and Analysis Conditions

Gas chromatograph	HP 6890 (Hewlett Packard Co.)
Column	Capillary column HP-1
Length [m]	60
Inner diameter [mm]	0.32
Film [μ m]	0.25
Carrier gas	N ₂
Split ratio [-]	0.025
Flow rate in column [mL/min]	2
Sample volume [μ L]	1
Injection temperature [K]	523
Column temperature [K]	383~593
Increasing rate [K/min]	0 (for 0~3 min) 5 (383~523 K) 14 (523~593 K)
Detector (FID) temperature [K]	593

Table 2. Material System and Experimental Conditions

System	
Feed crude methylnaphthalene oil (CMNO)	
Solvent aqueous formamide solution	
Experimental conditions	
Liquid-liquid contacting time, t (h)	24~96
Operating temperature, T (K)	277~343
Volume fraction of water to solvent in initial, $y_{w,0}$ (-)	0.1
Volume ratio of solvent to feed in initial, $(S/F)_0$ (-)	0.5~3

3. 결과 및 고찰

3.1. CMNO의 가스크로마토그램

원료로서 사용한 CMNO의 가스크로마토그램과 표준 시약을 사용하여 동정한 각 화합물명을 Figure 1(a)에 나타냈다[2]. 피크 번호 2, 3과 4이 본 연구의 농도 저감 목적 성분인 3종류의 NCs (QU, IQU, IN)이다. CMNO 중에는 NCs (QU = 6.72 wt%, IQU = 4.15 wt%, IN = 4.36 wt%)가 합계 15.23 wt%, 3종류의 2환 방향족 화합물(BACs; 나프탈렌(NA) = 2.88 wt%, 2-메틸나프탈렌(2MNA) = 38.93 wt%, 1-

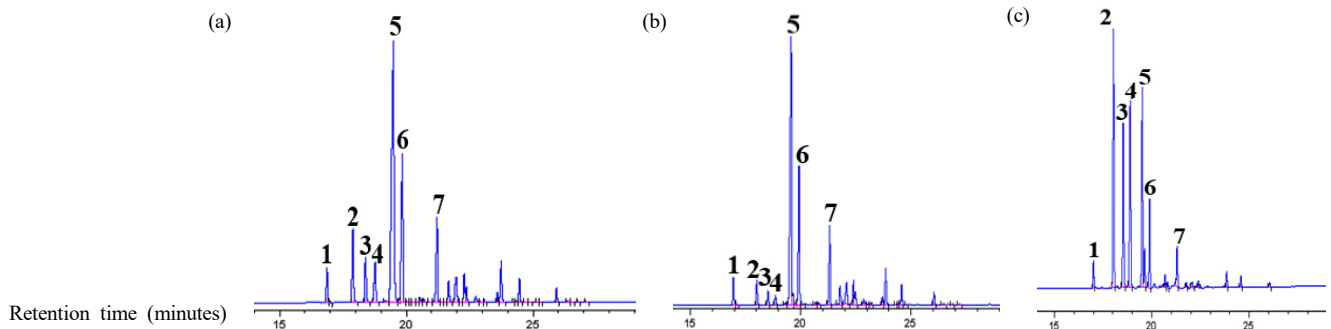


Figure 1. Gas chromatograms of (a) CMNO [2], (b) raffinate phase, (c) extract phase. Peak number 1: naphthalene (NA), 2: quinoline (QU), 3: iso-quinoline (IQU), 4: indole (IN), 5: 2-methylnaphthalene (2MNA), 6: 1-methylnaphthalene (1MNA), 7: biphenyl (BP). Experimental conditions: $y_{w,0} = 0.1$, $(S/F)_0 = 9$, $T = 303$ K and $t = 72$ h.

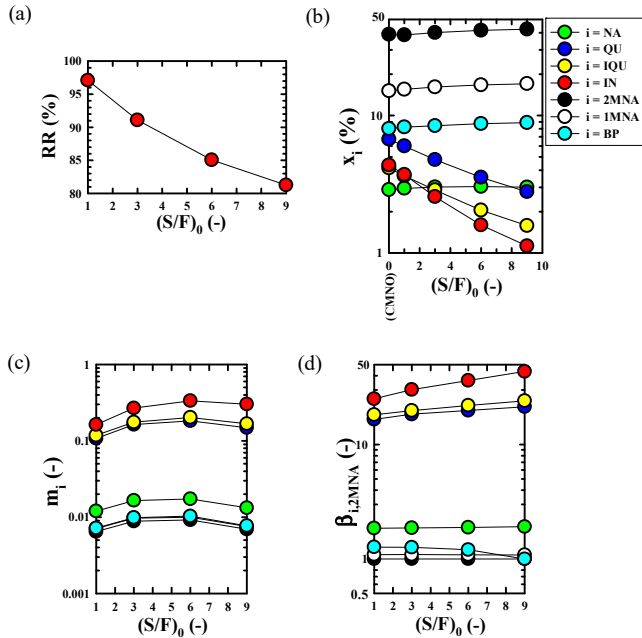


Figure 2. Effect of volume ratio of solvent to feed in initial $(S/F)_0$ on (a) residual rate of raffinate phase (RR), (b) mass fraction in raffinate phase (x_i , solvent-free), (c) distribution coefficient (m_i), and (d) selectivity in reference to on 2-methylnaphthalene ($\beta_{i,2MNA}$), of component i . Experimental conditions: $y_{w,0} = 0.1$, $T = 303$ K, and $t = 72$ h.

메틸나프탈렌(1MNA) = 15.11 wt%)이 합계 약 56.92 wt%와 비페닐(BP)이 8.03 wt% 함유되어 있었다[2].

3.2. 평형도달시간의 확인

그림은 생략했으나, 평형도달시간을 확인을 위해 일정한 실험조건 하에서의 액-액 접촉($t = 24, 48, 72, 96$ h)을 통해 회수한 추산상과 추출상을 각각 분석한 결과 $t = 48$ h 이후에 회수된 2상에 함유된 각 화합물의 조성이 거의 동일했다. 따라서 본 연구에 사용된 계의 평형도달시간은 48 h 이내에 존재함을 알 수 있었다. 이로부터 본 연구의 전체 실험은 $t = 72$ h 동안 액-액 접촉시켜 평형에 도달시켰다.

3.3. 분배평형

Figure 2(a)-(d)에 일정한 조건($y_{w,0} = 0.1$, $T = 303$ K, $t = 72$ h)하에서 추산상의 잔존율(RR), 추산상 내의 화합물 i 의 질량분율(x_i), 화합물 i 의 분배계수(m_i)와 2MNA를 기준한 화합물 i 의 선택도($\beta_{i,2MNA}$)에 미치는 $(S/F)_0$ 의 영향을 각각 나타냈다. RR, m_i 와 $\beta_{i,2MNA}$ 는 다음의 정의식에 의해 각각 산출했다.

$$RR = R/R_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$m_i = y_i/x_i \quad (2)$$

$$\beta_{i,2MNA} = m_i/m_{i,2MNA} \quad (3)$$

여기서 R 과 R_0 는 각각 분배평형 조작 후에 회수된 추산상과 평형조각 전의 원료(CMNO)의 질량을, x 와 y 는 분배평형 조작 후에 회수된

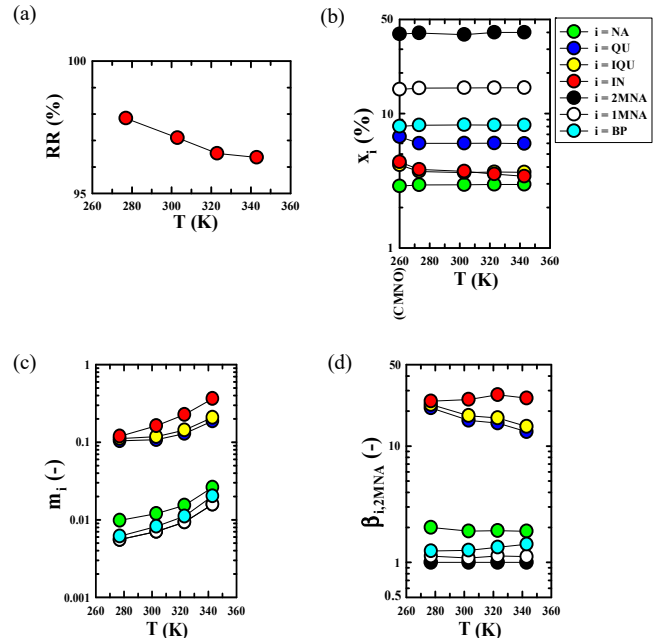


Figure 3. Effect of operating temperature (T) on (a) residual rate of raffinate phase (RR), (b) mass fraction in raffinate phase (x_i , solvent-free), (c) distribution coefficient (m_i), and (d) selectivity in reference to 2MNA ($\beta_{i,2MNA}$), of component i . Experimental conditions: $y_{w,0} = 0.1$, $(S/F)_0 = 1$, and $t = 72$ h.

추산상 및 추출상 중의 성분 i 의 질량분율을 각각 나타낸다. (b)의 x 축에 나타낸 $(S/F)_0 = 0$ 은 본 연구의 원료로 사용된 CMNO를 의미한다. $(S/F)_0$ 가 증가함에 따라 RR이 감소하여 $(S/F)_0 = 1$ 인 경우 $RR = 97.1\%$ 에서 $(S/F)_0 = 9$ 인 경우 $RR = 81.3\%$ 로 감소함을 (a)로부터 알 수 있다. 이로부터 $(S/F)_0 = 9$ 로부터 회수된 추산상은 물을 사용한 세정 후, 품질 향상된 CMNO로서 재활용할 수 있다. (b)로부터 CMNO 중에 함유된 3종류의 BACs와 BP에 비해 극성이 큰 NCs는 다량 추출상으로 이동하여 $(S/F)_0$ 가 증가함에 따라서 x_i 가 급격히 감소하는 추세를 보였으나, NCs를 제외한 BACs와 BP는 $(S/F)_0$ 에 관계없이 거의 $x_{i,N}$ 가 일정함을 보였다. 이는 CMNO에 포함된 NCs에 비해 BACs와 BP의 농도가 매우 높아 추출에 의해 NCs이 다량 추출되어도 BACs와 BP의 농도 변화에 크게 영향을 미치지 않기 때문이라 사료된다. $(S/F)_0 = 9$ 일 때, QU, IQU와 IN의 x_i 는 각각 약 2.79 wt%, 1.58 wt%와 1.16 wt%를 보여 CMNO내의 각 NCs에 대한 x_i 에 비해 각각 약 58.5 wt%, 61.9 wt%와 73.4 wt% 저감되었다. 이로부터, 본 연구의 포름아미드 추출법은 CMNO에 함유된 NCs의 유효한 저감법의 하나임을 확인할 수 있었다. 본 연구의 모든 화합물에서 $(S/F)_0$ 가 증가함에 따라 m_i 가 미약한 증가 추세를 보인 후, 감소하는 경향을 나타냄을 (c)로부터 알 수 있다. 전체 화합물의 m_i 는 $IN > QU = IQU > NA > 2MNA = 1MNA = BP$ 의 순서를 나타냈다. 이로부터 각 화합물 간의 극성의 크기를 비교 예측할 수 있었다. $1 < (S/F)_0 < 9$ 의 범위에서, NCs의 m_i 는 $0.11 < m_i < 0.33$ 를 나타냈다. (d)에 나타낸 NCs의 $\beta_{i,2MNA}$ 은 $(S/F)_0$ 가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으나, BACs와 BP의 $\beta_{i,2MNA}$ 에 대한 $(S/F)_0$ 의 영향은 일정할 수 없었다. 전체 화합물의 $\beta_{i,2MNA}$ 는 전술한 m_i 의 크기 순서와 동일했다. $1 < (S/F)_0 < 9$ 의 범위에서, NCs의 $\beta_{i,2MNA}$ 는 $16.6 < \beta_{i,2MNA} < 43.6$ 의 높은 값을 보였다. $(S/F)_0$ 에 따른 NCs의 m_i 와 $\beta_{i,2MNA}$ 의 밸런스를 고려할 때, 포름아미드 수용액을

용매로 사용한 CMNO 중의 NCs의 저감에는 $(S/F)_0 = 1$ 인 추출이 NCs의 저감 측면에서 유리할 것으로 사료되었다.

일정한 조건($y_{w,0} = 0.1$, $(S/F)_0 = 1$, $t = 72$ h)하에서 RR, x_i , m_i 와 $\beta_{i,2MNA}$ 에 미치는 T의 영향을 Figure 3(a)-(d)에 각각 나타냈다. T의 상승은 RR를 감소시켰으나, 전체 화합물의 x_i 에 미치는 T의 영향은 거의 없었다. 본 연구의 6종 전체화합물에 있어 m_i 는 T가 상승함에 따라 급격히 상승했으나, IN의 $\beta_{i,2MNA}$ 는 T와 무관하게 일정한 값을, QU와 IQU의 $\beta_{i,2MNA}$ 는 T가 상승함에 따라 감소하는 경향을 보였는데 반해 BACs와 BP의 $\beta_{i,2MNA}$ 는 T와 관계없이 일정한 값을 보임은 (c)와 (d)로부터 알 수 있었다. $277\text{ K} < T < 343\text{ K}$ 의 범위에서, 3종의 NCs의 m_i 와 $\beta_{i,2MNA}$ 는 각각 $0.1 < m_i < 0.36$ 과 $13.27 < \beta_{i,2MNA} < 27.61$ 의 값을 보였다. NCs의 m_i 와 $\beta_{i,2MNA}$ 의 밸런스를 고려할 때, CMNO 중의 NCs의 저감에는 실온조작이 가능할 것으로 사료되었다.

Figure 1(b),(c)는 일정한 조건($y_{w,0} = 0.1$, $(S/F)_0 = 9$, $T = 303\text{ K}$, $t = 72$ h)하의 평형 추출을 통해 회수된 추산상과 추출상의 가스크로마토그램을 각각 나타낸다. (b)의 추산상의 가스크로마토그램은 NCs가 다량 추출되어짐에 따라 추산상 중의 각 NCs 성분의 피크 높이가 매우 감소하여 (a)의 CMNO의 가스크로마토그램과 매우 닮음을 보였다. 이와 반대로 추출상의 가스크로마토그램을 CMNO의 그것과 비교했을 때, 포름아미드 추출에 의해 각 NCs 성분의 피크 높이가 매우 증가했지만, BACs와 BP의 피크 높이는 매우 감소하였음을 알 수 있었다. 이로부터, 본 연구의 포름아미드 추출에 의한 CMNO 중의 NCs의 저감효과를 재확인할 수 있었다.

CMNO 중에 함유된 NCs의 저감에 미치는 $(S/F)_0$ 와 T의 영향을 검토한 본 연구의 실험적 결과와 이전 연구결과[2]를 종합하여 고려할 때, $y_{w,0} = 0.1$, $(S/F)_0 = 1$, $T = \text{실온}$ 이 최적의 실험조건으로 사료되었다.

4. 결 론

본 연구는 CMNO의 품질향상을 목적으로, 포름아미드 추출에 의한 CMNO 중에 함유된 NCs의 저감에 관한 실험인자 및 조건의 영향을 검토하여 $y_{w,0} = 0.1$, $(S/F)_0 = 1$, $T = \text{실온}$ 의 실험조건에서 추출이 진행될 때, 우수한 CMNO 중의 NCs의 저감 효율을 달성할 수 있었다. 본 연구에서 적용한 포름아미드 추출법은 CMNO 중에 함유된 NCs의 높은 분배계수와 BACs를 기준한 NCs의 높은 선택도를 보여 지금까지 적용되고 있는 산과 염기를 사용한 반응추출법의 대안으로 기대되었다.

감 사

본 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2020R111A3061492).

References

1. K. Sakanishi, H. Obata, I. Mochida, and T. Sakaki, Removal and recovery of quinoline bases from methylnaphthalene oil in a semi-continuous supercritical CO₂ separation apparatus with a fixed bed of supported aluminum sulfate, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **34**, 4118-4124 (1995).
2. H. C. Kang and S. J. Kim, Experimental study on reduction of nitrogen-containing compounds contained in crude methylnaphthalene

- oil by solvent extraction (II), *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 477-481 (2022).
3. S. J. Kim, Upgrading of wash oil through reduction of nitrogen-containing compounds, *Processes*, **9**, 1869-1877 (2021).
4. Y. Ji, Y. Hou, S. Ren, and W. Wu, Highly efficient separation of indole from model wash oil using tetraethyl ammonium amino acid ionic liquids, *Sep. Purif. Technol.*, **258**, 117997 (2021).
5. K. Sakanishi, H. Obata, I. Mochida, and T. Sakaki, Capture and recovery of indole from methylnaphthalene oil in a continuous supercritical CO₂ extraction apparatus over a fixed bed of anion-exchange resin, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 335-337 (1996).
6. S. J. Kim, Purification of indole contained in wash oil by combination of extraction and crystallization (Part I: Recovery and concentration of indole contained in wash oil by solvent extraction), *Molecules*, **27**, 5331 (2022).
7. Y. Mamoru and K. Tomonori, Separation and purification of indole from coal tar by supercritical fluid extraction, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **26**, 153-158 (1993).
8. R. H. Xiao and W. M. Gao, Study on the recovery of indole from coal tar wash oil, *Coal Convers.*, **21**, 59-61 (1998).
9. K. Ukegawa, A. Matsumura, Y. Koderu, T. Kondo, T. Nakayama, H. Tanabe, S. Yoshida, and Y. Mito, Solvent extraction of nitrogen compounds from a coal tar fraction. (Part 1). Effect of extraction conditions on the extraction rate and the selectivities of nitrogen compounds, *J. Jpn. Pet. Inst.*, **33**, 250-254 (1990).
10. R. Egashira and M. Nagai, Separation of nitrogen heterocyclic compounds contained in coal tar absorption oil fraction by solvent extraction, *J. Jpn. Pet. Inst.*, **43**, 339-345 (2000).
11. S. J. Kim and Y. J. Chun, Separation of nitrogen heterocyclic compounds from model coal tar fraction by solvent extraction, *Sep. Sci. Technol.*, **40**, 2095-2109 (2005).
12. Y. Koderu, K. Ukegawa, Y. Mito, M. Komoto, E. Ishikawa, and T. Nagayama, Solvent extraction of nitrogen compounds from coal liquids, *Fuel*, **70**, 765-769 (1991).
13. D. Xu, M. Zhang, J. Gao, L. Zhang, S. Zhou, and Y. Wang, Separation of heterocyclic nitrogen compounds from coal tar fractions via ionic liquids: COSMO-SAC screening and experimental study, *Chem. Eng. Commun.*, **206**, 1199-1217 (2019).
14. T. Jiao, C. Ren, S. Lin, L. Zhang, X. Xu, Y. Zhang, W. Zhang, and P. Liang, The extraction mechanism research for the separation of indole through the formation of deep eutectic solvents with quaternary ammonium salts, *J. Mol. Liq.*, **347**, 118325 (2022).
15. P. Gao, J. Zhang, Z. Guo, J. Gao, D. Xu, Y. Ma, L. Zhang, and Y. Wang, Experimental and quantum chemical calculations investigations of morpholine-based ionic liquids as extractants for efficient extraction of nitrogen heterocyclic neutral compounds, *Fuel*, **333**, 126446 (2023).
16. Q. Liu, T. Zhang, P. Gao, J. Gao, D. Xu, P. Zhao, L. Zhang, and Y. Wang, Separation of indole by designed ionic liquids with dual functional chemical sites: Mechanism exploration and experimental validation, *J. Environ. Chem. Eng.*, **9**, 105971 (2021).
17. L. Zhang, D. Xu, J. Gao, S. Zhou, L. Zhao, and Z. Zhang, Extraction and mechanism for the separation of neutral N-compounds from coal tar by ionic liquids, *Fuel*, **194**, 27-35 (2017).
18. S. J. Kim, H. C. Kang, Y. S. Kim, and H. J. Jeong, Liquid membrane permeation of nitrogen heterocyclic compounds contained in model coal tar fraction, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **31**, 1143-1148 (2010).
19. I. Mochida, Y. Q. Fei, and K. Sakanishi, Capture and recovery of

- basic nitrogen species in coal tar pitch, using nickel sulfate as adsorbent, *Chem. Lett.*, 515-518 (1990).
20. I. Uemasu, Effect of methanol-water mixture solvent on concentration of indole in coal tar using β -cyclodextrin as complexing agent, *J. Jpn. Pet. Inst.*, **34**, 371-374 (1991).
21. I. Uemasu and T. Nakayama, Concentration of indole in coal tar using α -cyclodextrin as the host for inclusion complexation, *J.*

Inclus. Phenom. Molec. Recogn. Chem., **7**, 327-331 (1989).

Authors

Su Jin Kim; Ph.D., Professor, Department of Chemical & Biological Engineering, Chungwoon University, Incheon 22100, Korea; sujkim@chungwoon.ac.kr