

초임계이산화탄소 하에서 QCM을 이용한 I-TEDA의 제거특성 측정

유재룡, 고문성, 성진현, 이정근, 박광현*

경희대학교 원자력공학과
446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1
(2008년 5월 21일 접수; 2008년 6월 22일 채택)

Measurement of I-TEDA Removal Rate Using QCM in Supercritical Carbon Dioxide

Jaeryong Yoo, Moonsung Koh, Jinhyun Sung, Jeongken Lee, and Kwangheon Park*

Department of Nuclear Engineering, Kyung-Hee University
1 Sochon-dong, Giheung-gu, Yongin, Gyeonggi-do 446-701, Korea
(Received for review May 21, 2008; Revision accepted June 22, 2008)

요 약

원자력산업이 발생하는 방사성폐기물은 고체, 액체 그리고 기체상으로 구분된다. 특히 기체상 방사성폐기물인 방사성 메틸요오드는 활성탄을 이용하여 흡착된다. 이때 활성탄에는 방사성 메틸요오드를 보다 효율적으로 포집하기 위해 5 wt%의 트리에틸렌디아민 (Triethylenediamine; 1,4-diazonia-bicyclo[2.2.2]octane, TEDA)이 침착되어 있다. 일반적으로 대기중에서 TEDA와 메틸요오드(CH₃I)는 I-TEDA(TEDA와 메틸요오드 결합물)를 형성하게 된다. 방사성 요오드를 포집한 방사성 폐 활성탄을 재사용하기 위해서는, 이러한 형태의 I-TEDA를 제거해야 하는데, 현재는 아세토나이트릴을 이용한 습식재활용법이 개발되었다. 그러나 이러한 습식재활용법은 다량의 2차폐기물을 발생하는 문제점이 있기 때문에, 본 연구에서는 I-TEDA를 제거하기 위한 방법으로 초임계이산화탄소를 기본용매로써 사용하였으며, 수정미량저울(Quartz Crystal Microbalance, QCM)을 이용하여 I-TEDA의 제거율을 측정하였다. 실험결과 I-TEDA를 제거하기 위해 추출을 위한 첨가 용액으로 메탄올이 가장 적합하였고, 최적화된 온도, 압력 및 추출용매의 유량조건을 찾아내었다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 방사성 폐활성탄으로부터 I-TEDA를 제거할 수 있는 가능성에 대한 검토를 하였다.

주제어 : 초임계이산화탄소, 활성탄, 트리에틸렌디아민, 수정미량저울, 방사성 메틸요오드

Abstract - The radioactive wastes generated from the nuclear industry can be divided into the forms of solid, liquid, or gas. Radioactive methyl iodide, a gaseous radioactive waste, is absorbed by activated carbon with 5 wt% of Triethylenediamine (1,4-diazonia-bicyclo[2.2.2]octane, TEDA) impregnated on the surface. Methyl Iodide (CH₃I) is combined chemically with TEDA (the final product: I-TEDA). To recycle radioactive activated carbon, removal of I-TEDA from activated carbon is needed. A wet method for recycling impregnated active carbon was developed to remove radioactive I-TEDA using an acetonitrile solution, which produces lots of secondary wastes. We suggest the removal of I-TEDA by supercritical carbon dioxide with co-solvents. In this experiment, we used a quartz crystal microbalance (QCM) for measuring the removal rate of the I-TEDA. From the experimental results, methanol was found to be the optimum co-solvent, and the optimum conditions such as temperature, pressure, and co-solvent flow rate were obtained. Possibility of using supercritical fluid in the removal of I-TEDA from radioactive activated carbon was also discussed.

Key words : Supercritical carbon dioxide, Activated carbon, Triethylenediamine (TEDA), Quartz crystal microbalance (QCM), Radioactive methyl iodide

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail : kpark@khu.ac.kr

1. 서 론

세계의 인구증가와 경제성장에 따라 필연적으로 에너지의 소비량도 증가하게 될 것이다. 에너지는 우리 인류에게 절대적인 생활의 필수조건이며, 현재 고도화된 사회는 더욱 많은 양의 에너지를 소비하고 있다. 이에 따른 에너지 수급의 노력으로 화력발전소, 수력발전소, 원자력발전소 등이 건설되어 에너지를 수급하고 있다[1]. 특히 원자력발전은 이산화탄소 배출을 최소화 할 수 있는 환경친화적인 청정에너지라고 할 수 있다[2]. 그러나 원자력발전소가동 중 필연적으로 발생하는 방사성폐기물은 가장 중요한 현안이라고 할 수 있다. 원자력발전소에서 발생하는 방사성옥소(I)를 제거하기 위해 활성탄을 이용하게 되는데, 이때 더욱 효과적인 방사성 옥소의 포집을 위해 활성탄에 5 wt%의 TEDA를 첨착시켜 사용한다. 활성탄에 첨착된 TEDA는 메틸요오드와 화학결합을 하여 활성탄 표면에서 I-TEDA를 형성하게 된다. 이러한 I-TEDA를 방사성 폐활성탄으로부터 제거하기 위해 개발된 방법은 아세트나이트릴을 용매로 사용한 용매추출법이다. 습식재활용법은 TEDA 첨착활성탄 5g을 50 ml의 아세트나이트릴을 이용하여 탈착을 시도하였을 경우 90% 이상 제거율을 나타내었다[3]. 그러나 이러한 습식재활용 방식은 다량의 2차 폐기물을 발생시키는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 초임계이산화탄소를 이용하였다. 초임계이산화탄소는 온화한 임계조건 (31°C, 73bar)을 가지고 있으며, 초임계이산화탄소는 무독성, 무연성, 저렴한 가격 및 다루기가 용이하다는 특징을 가지고 있다. 또한 압력이나 온도변화를 통해 이산화탄소의 특성을 변화시켜서 유기물의 추출에 용이하다는 장점을 가지고 있다[4-8].

초임계이산화탄소를 이용하여 폐활성탄에 첨착되어 있는 I-TEDA의 제거율을 확인하기 위한 선행실험으로 초임계이산화탄소 하에서 I-TEDA 및 추출용매의 용해도를 '가변부피 용해도 측정장치'를 이용하여 확인하였다. 본 실험에서는 이러한 용해도 결과를 바탕으로 QCM을 이용하여 I-TEDA의 제거효율을 측정하였

다. QCM은 수정전극판 위에 흡착 및 탈착된 물질의 양에 따른 진동수를 나타내며, 특히 초임계이산화탄소의 조건하에서 I-TEDA의 제거율을 실시간으로 측정할 수 있다[9-12].

본 연구에서는 초임계이산화탄소 하에서 QCM을 이용하여 I-TEDA의 제거율을 확인하고, 방사성 폐활성탄의 재사용을 위한 실제 적용에의 가능성에 대해 검토해보고자 한다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

원자력발전소에서 발생하는 방사성요오드(I)를 효과적으로 흡착하기 위해 TEDA가 5 wt% 첨착된 활성탄을 사용하였다. 활성탄의 입자크기는 8×16 mesh이며 비표면적이 1,000-1,200 m²/g인 아자각 입상활성탄이다. TEDA와 방사성 메틸요오드가 결합된 I-TEDA는 메탄올 및 아세트나이트릴에서 좋은 용해도를 보인다.

방사성 요오드(I)에 오염된 활성탄에서 제염하여야 할 오염 대상물이 I-TEDA이므로, 초임계이산화탄소와 추출유기용매에 대한 반응특성(용해도)을 확인하기 위해 I-TEDA를 합성하였다 (Figure 1).

I-TEDA 합성을 위해 100 ml 둥근 유리반응용기에 아세트나이트릴 50 ml를 넣고 TEDA 5 g(44.6 mmol)을 용해시킨

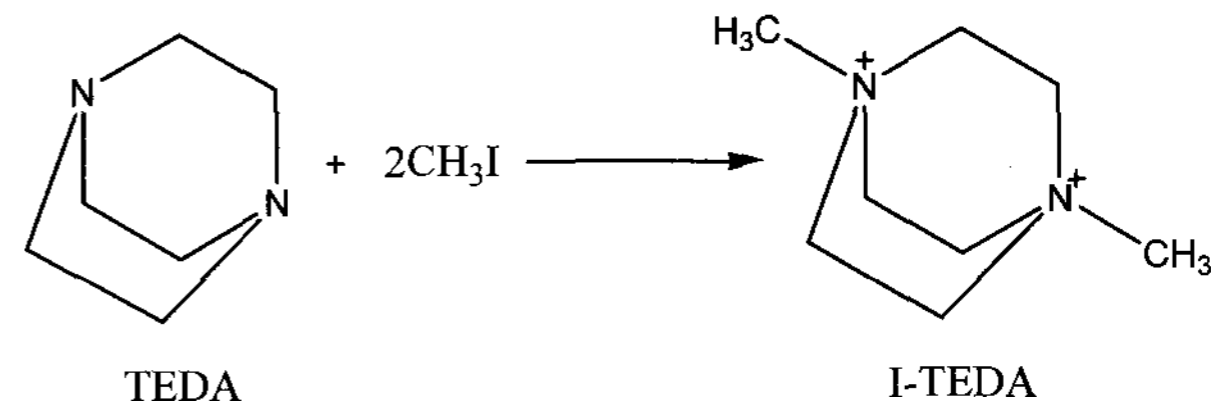


Figure 1. The reaction formula for the synthesis of I-TEDA.

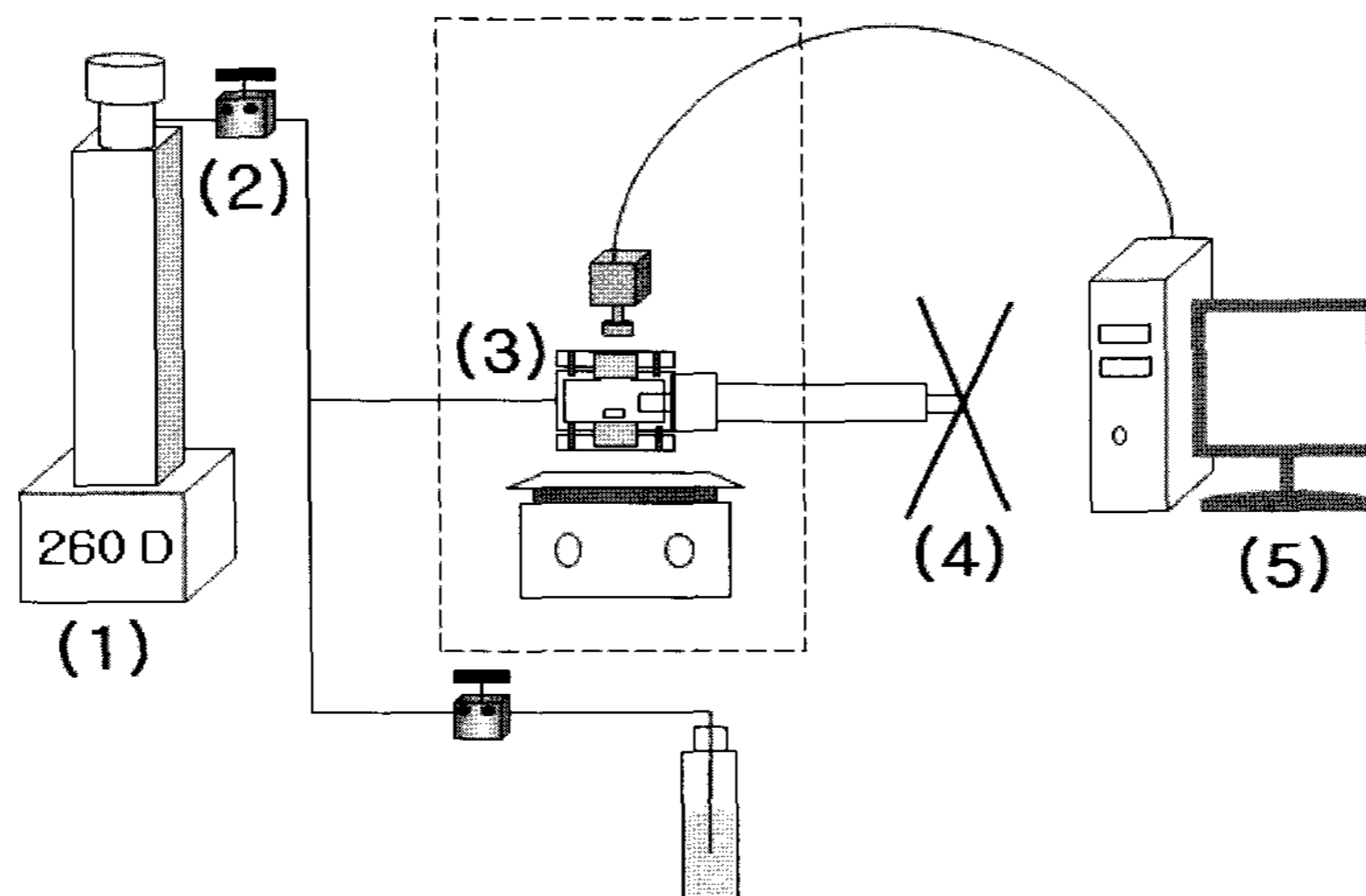


Figure 2. The apparatus for measuring solubility. (1) Syringe pump, (2) Inlet valve, (3) Variable volume cell, (4) Volume changer, (5) Monitor

후 얼음수조를 이용하여 온도를 5°C로 유지하면서 메틸요오드 6.7 ml (53.5 mmol)을 주사기로 천천히 주입하여 1 시간 정도 반응시켰다. 진공 회전증발기로 아세토나이트릴을 증발시켜 I-TEDA 결정을 얻었으며, 건조된 결정을 NMR로 분석하여 성분이 I-TEDA임을 확인하였다.

2.2. 용해도 측정장치

I-TEDA의 용해특성을 측정하기 위해 앞서 I-TEDA를 추출하기 위한 추출용매(공용매)인 아세토나이트릴 또는 메탄올의 이산화탄소 내 용해도를 ‘가변부피용해도측정장치’를 이용하여 측정하였다(Figure 2). 가변부피 용해도 측정장치는 고압 하에서 부피를 조절할 수 있는 가변부피압력용기로 구성되어 있고, 이산화탄소 용매 내 대상 물질의 용해여부는 사파이어 창을 통해 고압 하에서 용기의 내부를 관찰하여 용기 내에 몇 개의 상이 존재하는지 직접 보면서 측정하게 된다. 용해도 측정방법은 다음과 같다. 용기 안에 일정양의 대상물질을 넣은 뒤, 용기를 항온조 내에 두어 실험온도로 가온시킨다. 그리고 정량가압펌프(syringe pump 260D, ISCO)를 이용하여 이산화탄소 용매를 주입하고 압력을 일정하게 증가시키면서 대상물질이 완전히 용해되는 압력을 측정한다. 일반적으로 이 압력이상이면 이산화탄소 용매 내에 대상물질이 용해된다고 볼 수 있다. 용해시키는 압력(용해압력)을 측정한 후 용기의 부피를 변화시켜 용기 내 대상 물질의 농도를 변화시킨 후, 다시 연속적으로 이산화탄소를 주입하면서 용해압력을 측정한다. 이 장치를 이용하면 대상물질의 이산화탄소하에서의 대상 물질의 농도에 따른 용해압력을 쉽게 구할 수 있다.

2.3. QCM

이산화탄소 내에서의 용해반응속도를 측정하기 위해 QCM 장치를 이용하였다. QCM이란 수정진동자의 표면에 질량 변화가 생기면 수정진동자의 진동 주파수가 변화하고 이 주파수 변화를 측정함으로써 극미량의 질량변화를 측정할 수 있는 일종의 센서 장치이다(Figure 3). 이 장치의 가장 큰 장점은 고압 내 실시간으로 질량 변화를 측정할 수 있다는 것이다.

초임계이산화탄소 하에서의 용해반응속도를 비교하기 위해

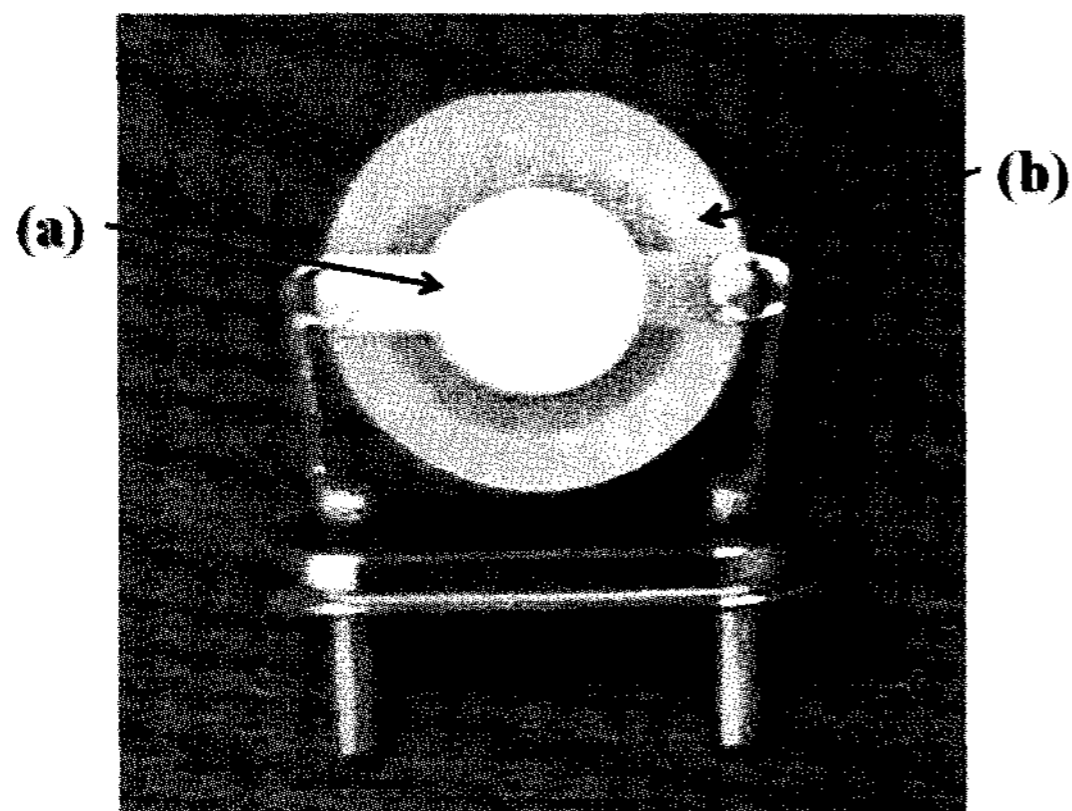


Figure 3. A Photograph of QCM. (a) Au electrode and (b) Quartz

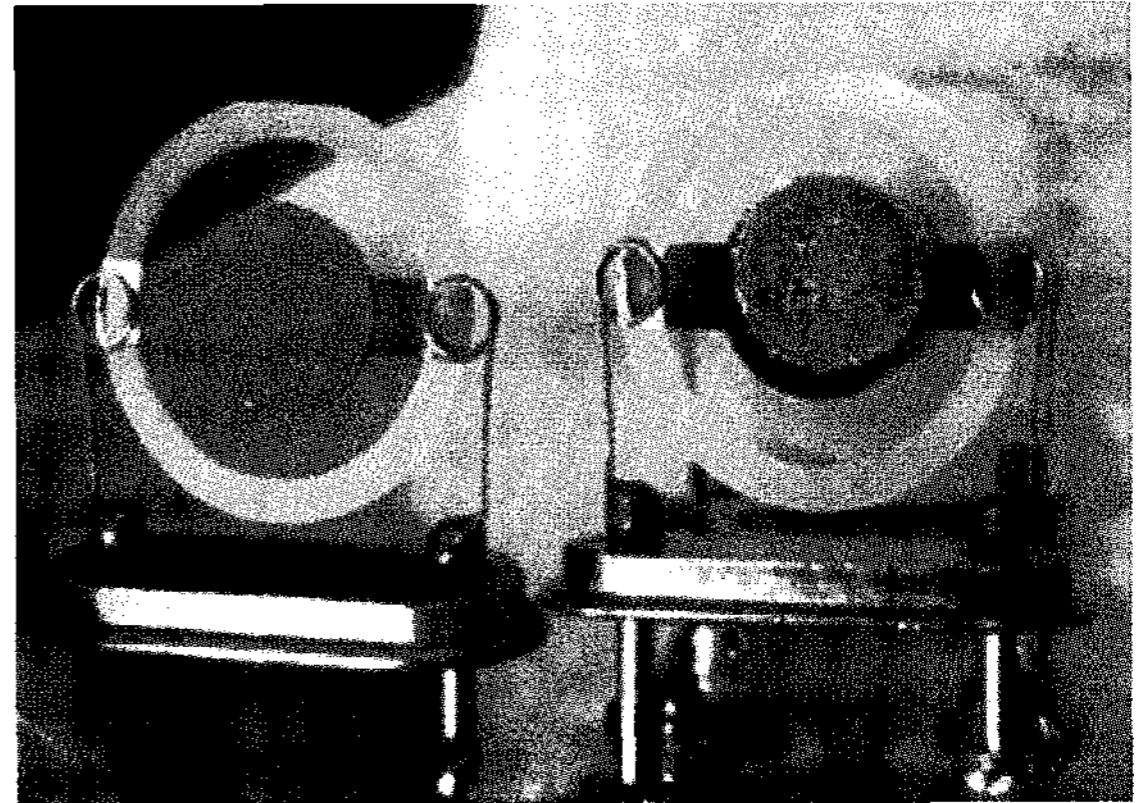


Figure 4. Absorption of I-TEDA on QCM surface (left) before absorption (right) and after absorption.

QCM을 이용하였다. 추출시편은 합성된 I-TEDA를 메탄올에 용해시켜 0.016 M농도의 용액으로 만든 후, QCM의 한 면에 약 165 μg을 떨어뜨려 건조시켜 준비하였다(Figure 4).

고압 반응용기의 양쪽에 사파이어 윈도우를 설치하고 고압반응을 시각적으로 관찰할 수 있게 하였다. QCM의 고유진동수는 표면에 흡착 및 탈착되는 물질의 두께뿐만 아니라 압력과 주변 유체의 밀도와 점도에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 압력 그리고 밀도와 점도의 효과를 없애기 위해 공 QCM을 같은 조건에 두어 기준 진동수로 삼았다. 즉, 압력용기 내에 2개의 단자를 두어 2개의 QCM을 장착 할 수 있도록 제작하여, Ch 1 부분에 공 QCM, Ch 2 부분에 I-TEDA가 흡착된 QCM을 설치하였다. QCM의 진동은 수정 진동자 미세저울(Research Quartz Crystal Microbalance, RQCM) 장치를 이용하여 측정하고 이를 컴퓨터 모니터를 통해 나타내었다(Figure 5).

두 개의 QCM(I-TEDA가 흡착된 QCM과 흡착되지 않은 공 QCM)을 반응로에 넣고 200 bar 압력과 실험온도(20°C, 40°C, 60°C)에서 추출용매를 함유한 초임계이산화탄소를 반응용기 내로 흘려주면서 제거되는 I-TEDA의 양을 측정하였다. 실험방법은 준비된 두 개의 QCM을 고압 반응용기에 넣고 실험온도로 가온한다. 설정온도가 평형상태에 도달하면 가압정량펌프를 이용하여 이산화탄소를 가압하여 주입한다. 고압용기 내 압력조건이 평형상태에 도달하면, 추출용매와 이산화탄소를 정해진 비율로 연속적으로 공급하면서 QCM에 침착된 I-TEDA의 용해속도를 측정한다.

3. 결과 및 검토

3.1. 초임계이산화탄소 하에서 I-TEDA 용해도 측정

초임계이산화탄소 하에서 아세토나이트릴의 온도(40°C와 60°C)에 따른 용해도를 측정하였다(Figure 6). 본 실험에서는 아세토나이트릴의 양을 늘려가면서 용해도를 측정하였는데, 수평축은 이산화탄소에 대한 아세토나이트릴의 질량비를 나타낸 것이고 수직축은 하나의 상을 이루는 압력을 나타낸다. 즉, 이 압력보다 높으면 아세토나이트릴이 이산화탄소에 완전히 용해되어 단일

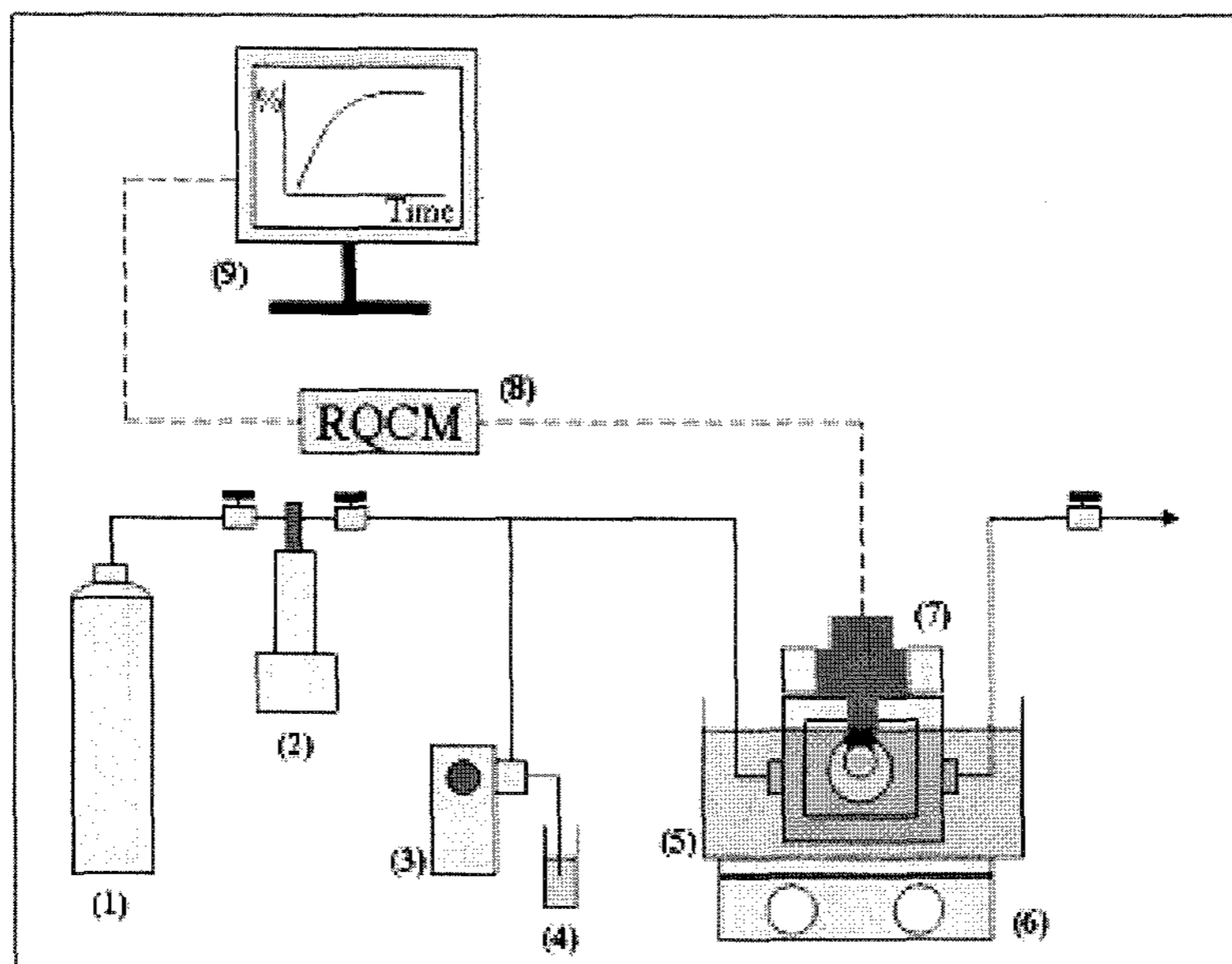


Figure 5. The flow sheet for measuring the solubility of I-TEDA using QCM. (1) CO₂ tank, (2) Syringe pump, (3) Liquid pump, (4) Extraction solvent, (5) Water bath, (6) Stirrer, (7) QCM high pressure vessel, (8) Monitor

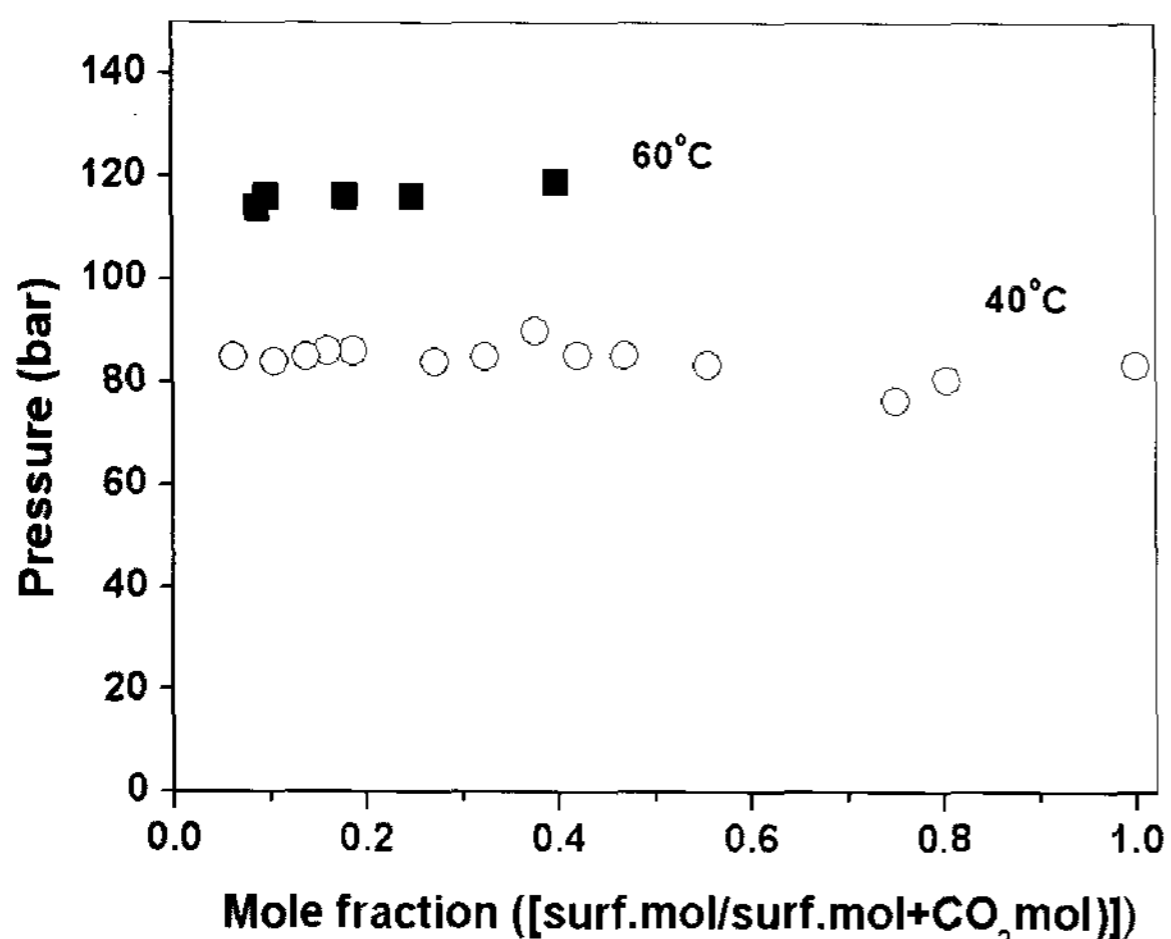


Figure 6. The solubility limit of acetonitrile in supercritical carbon dioxide depends on the temperature and pressure.

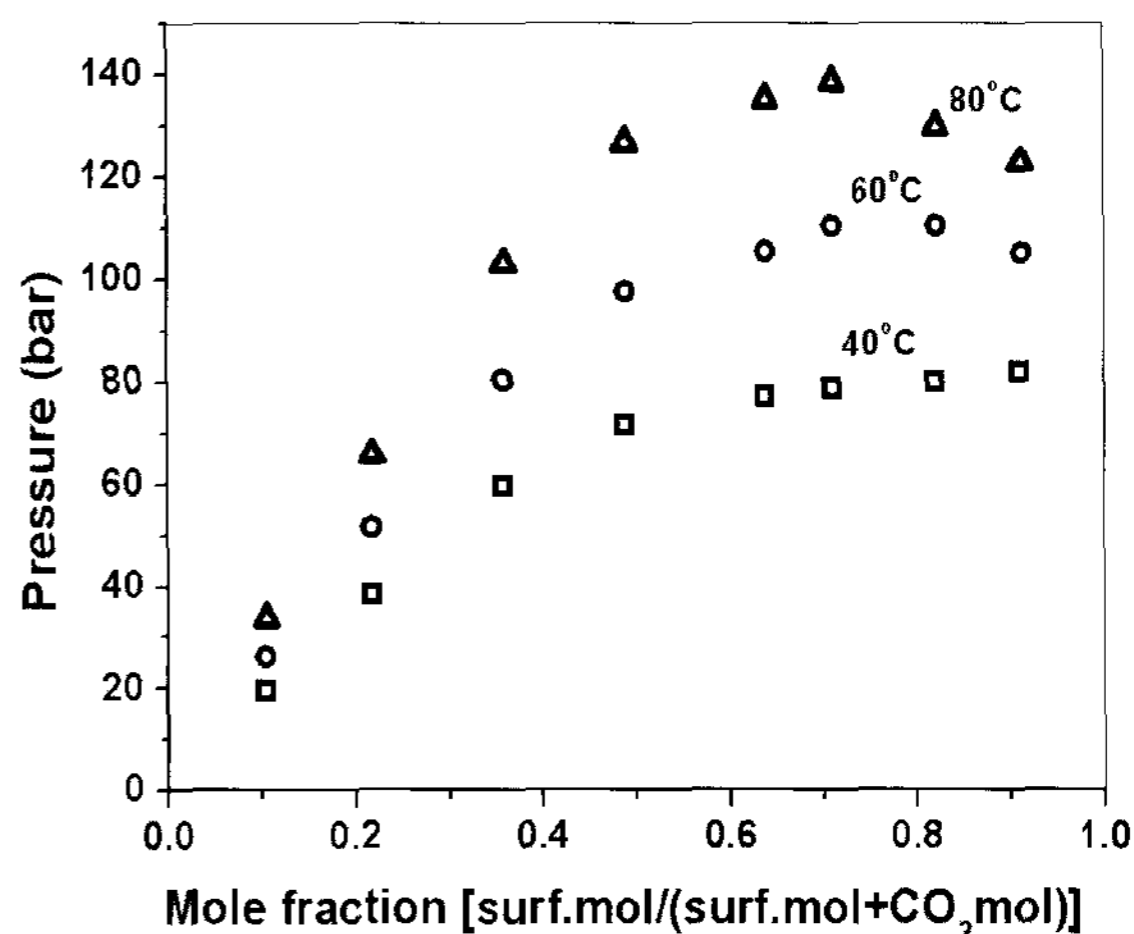


Figure 7. The solubility of methanol in supercritical carbon dioxide depends on the temperature (Tricia S. Reighard et al., 1996).

상을 형성한다. Figure 6 에서 보는 바와 같이 40°C일 경우 대략 95 bar 이상에서 단일상을 형성하였으며 60°C에서의 아세토나이트릴의 용해도는 40°C일 때보다 높은 125 bar 이상에서 단일상을 형성한다. 초임계이산화탄소는 온도가 상승할수록 밀도가 낮아지게 되는데, 낮아진 밀도를 높이기 위해서는 가압을 하면 된다. 따라서 아세토나이트릴의 이산화탄소에 대한 용해도는 이산화탄소의 밀도에 의존적이라 판단된다.

QCM 실험결과 반응물인 I-TEDA를 가장 잘 녹이는 것은 메탄올로 나타났다(Figure 10 참조). 따라서 본 연구에서는 메탄올이 폐활성탄을 제염할 수 있는 가장 적합한 추출용매로 판단되어

메탄올과 I-TEDA에 관한 용해도에 집중하였다. Figure 7에서 보는바와 같이 온도에 따른 메탄올의 용해도 유형은 type-1의 경향성을 가지고 있으며, 40°C에서는 80 bar, 60°C에서는 110 bar 미만에서 단일상을 형성하는 것을 알 수 있다.

폐활성탄에 있는 오염물인 I-TEDA는 초임계이산화탄소에 용해된 메탄올로 추출된다. 따라서 I-TEDA를 용해시킨 메탄올이 초임계이산화탄소에 얼마나 용해되는지 알 필요가 있다. 이를 위한 기초실험으로 3성분(I-TEDA, CO₂, MeOH) 용해도인 이산화탄소하에서 추출용매(아세토나이트릴 또는 메탄올)와 I-TEDA의 용해도를 측정하였다. Figure 8에서 Figure 9까지는 설정된

Table 1. The ternary data for methanol, I-TEDA, and CO₂ at 40°C

Pressure (bar)	I-TEDA (w/o)	MeOH (w/o)	CO ₂ [w/o]
214	0.068	10.7	89.2
177	0.045	7.1	92.8
154	0.028	4.4	95.5

온도에서 이산화탄소, I-TEDA 및 추출용매가 1개의 상을 갖는 압력을 3상 상태도에 나타내었다.

40°C 초임계이산화탄소 하에서 메탄올을 추출용매로 이용하여 I-TEDA의 용해도를 측정하였다. Table 1 에서와 같이 40°C의 실험조건에서 메탄올과 I-TEDA는 157:1의 질량비로 이산화탄소에 용해되었으며(1 ml 메탄올, 0.005 g I-TEDA), 이때 이산

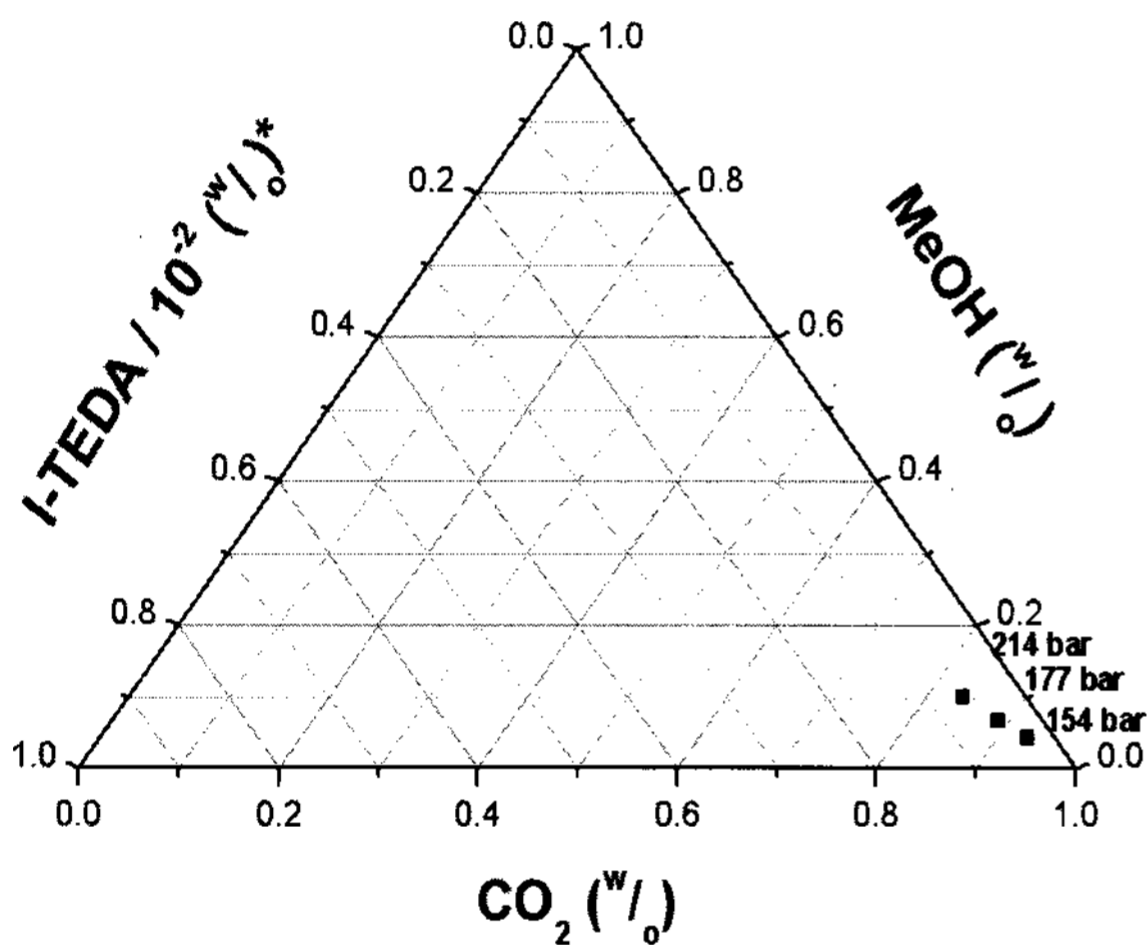


Figure 8. The ternary diagram for methanol, I-TEDA, and CO₂ at 40°C ([w/o]* : weight percent).

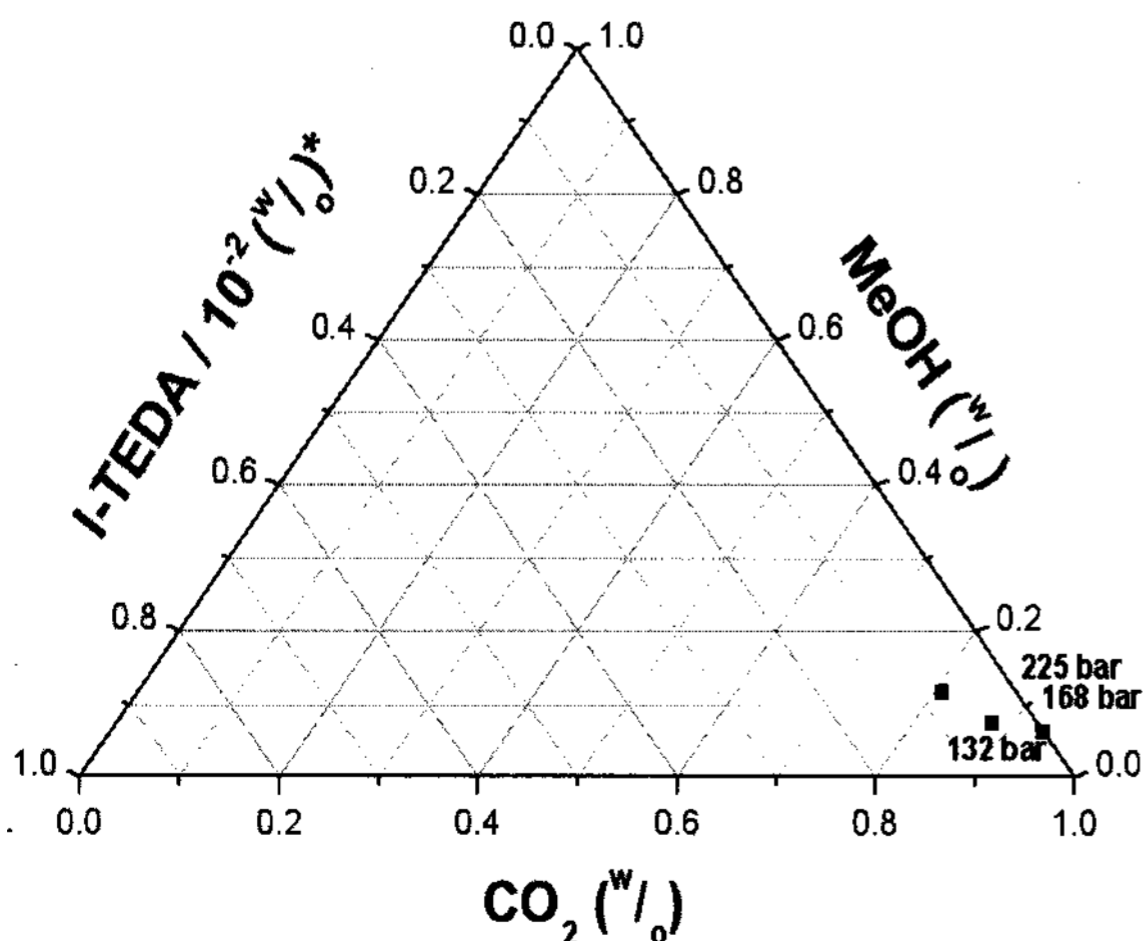


Figure 9. The ternary diagram for methanol, I-TEDA, and CO₂ at 60°C ([w/o]* : weight percent).

화탄소는 약 92 ± 3 wt%이다. 동일한 온도의(40°C) 아세토나이트릴 하에서 용해도 결과보다 더 낮은 압력이 필요하며 이산화탄소가 차지하는 질량비는 거의 유사한 것을 알 수 있다.

60°C 초임계이산화탄소 하에서 메탄올을 추출용매로 이용하여 I-TEDA의 용해도를 측정한 결과를 Table 2에 나타내었다. 40°C의 실험조건보다 용해압력은 상승하였으나 이산화탄소의 질량비가 감소하였음을 알 수 있다. Figure 9에서 보는 바와 같이 압력이 감소할수록 이산화탄소가 차지하는 비율은 증가하게 되며, 이에 따라 I-TEDA 및 추출용매인 메탄올의 질량비는 감소한다. 이를 통해 폐활성탄에 침착되어 있는 I-TEDA를 제거하기 위해서는 높은 압력이 필요하며, 이산화탄소의 사용량을 줄이기 위해 높은 온도가 필요할 것이라 예상되며, 추출 실험조건 설정을 위한 추가적인 실험이 수행되어야 할 것이라 판단된다.

3.2. QCM을 이용한 용해특성

3.2.1. 추출용매에 따른 영향

폐활성탄용 추출용매인 아세토나이트릴과 메탄올의 반응속도를 비교하는 실험을 수행하였다. Figure 10에서와 같이 아세토나이트릴을 사용했을 경우 초기 10분까지는 I-TEDA의 제거율이 나타나지 않았고, 그 이후에 서서히 제거가 되면서 약 52분이 지나서 거의 모든 I-TEDA가 제거되어 포화구간을 가졌다. 반면에 메탄올을 사용한 경우에는 초기 5분이 지나서 제거반응이 시작되었고, 급격하게 제거되는(가속화 구간) 모습을 볼 수 있었다. 메탄올의 경우 약 16분이 되었을 때 QCM 표면에 I-TEDA가 모두 제거되었다. I-TEDA의 제거 가속구간은 메탄올(14 μg/min)이 아세토나이트릴(4 μg/min)보다 약 3.5배 빠르게 나타났다. 또한 QCM에 침착된 I-TEDA를 제거하기 위해 사용된 추출용매의 총량에 있어서도 메탄올은 32 ml, 아세토나이트릴은 104 ml가 사용되어 큰 차이를 볼 수 있다. 메탄올이 아세토나이트릴보다 용해 및 반응속도에서 I-TEDA를 용해하는데 높은 효율을 나타냄을 알 수 있었다.

3.2.2. 메탄올을 이용한 결과

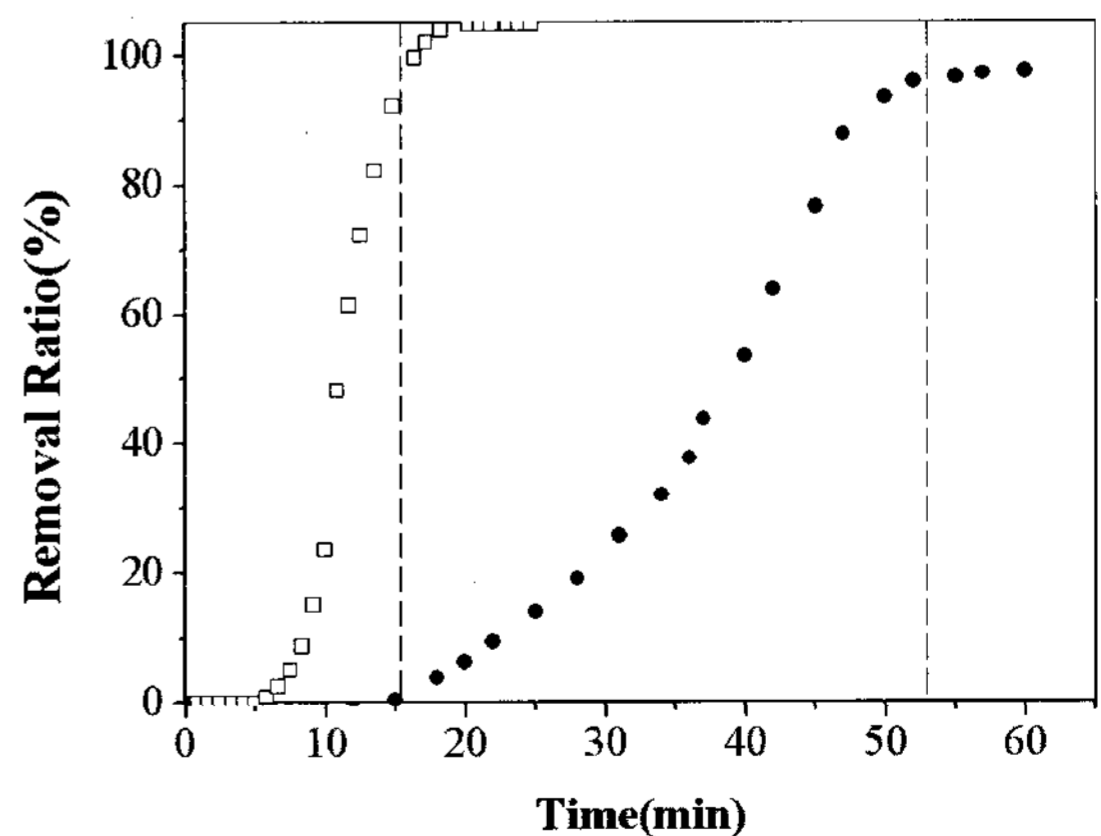


Figure 10. Comparison of I-TEDA removal rates for different extraction solvents at 200 bar, 60°C, and CO₂ flow rate = 3~5 ml/min. (Uncertainty in the data = ±5%)

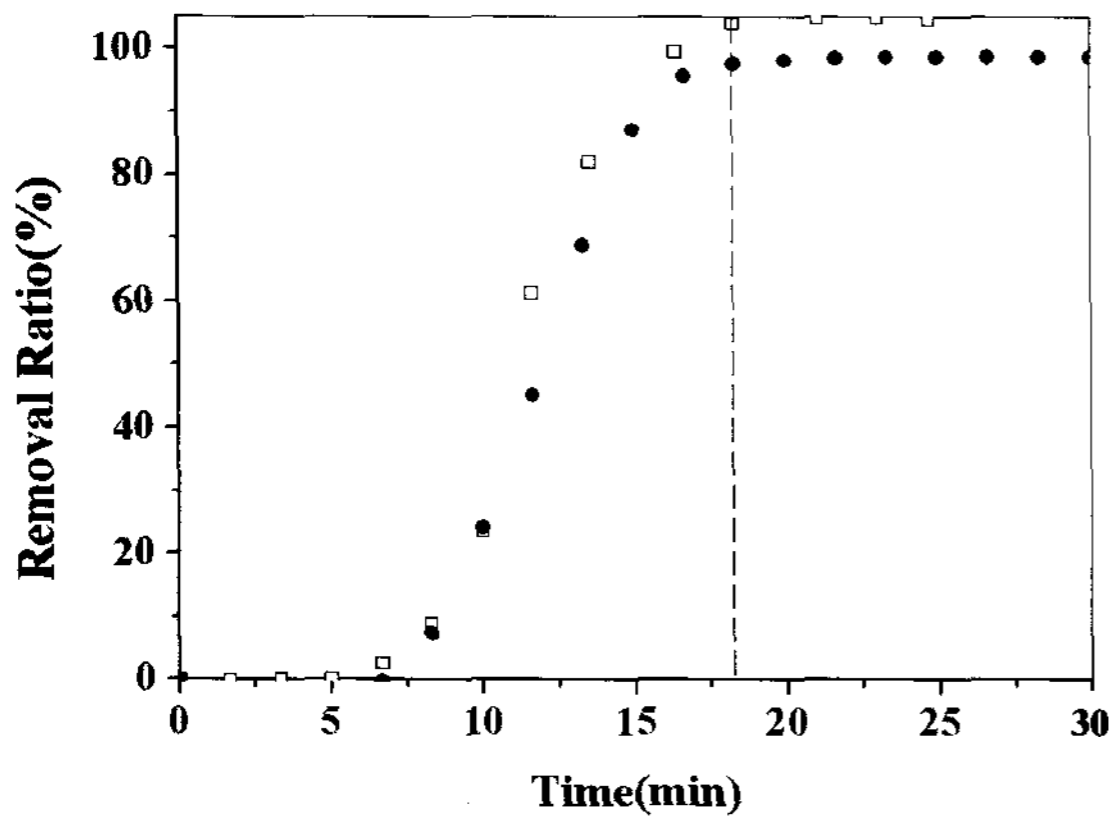


Figure 11. Comparison of I-TEDA removal rates for different pressures (150 and 200 bar) at 60°C with the methanol flow rate of 2 ml/min and the CO₂ flow rate of 3~5 ml/min (Uncertainty in the data = ±5 %).

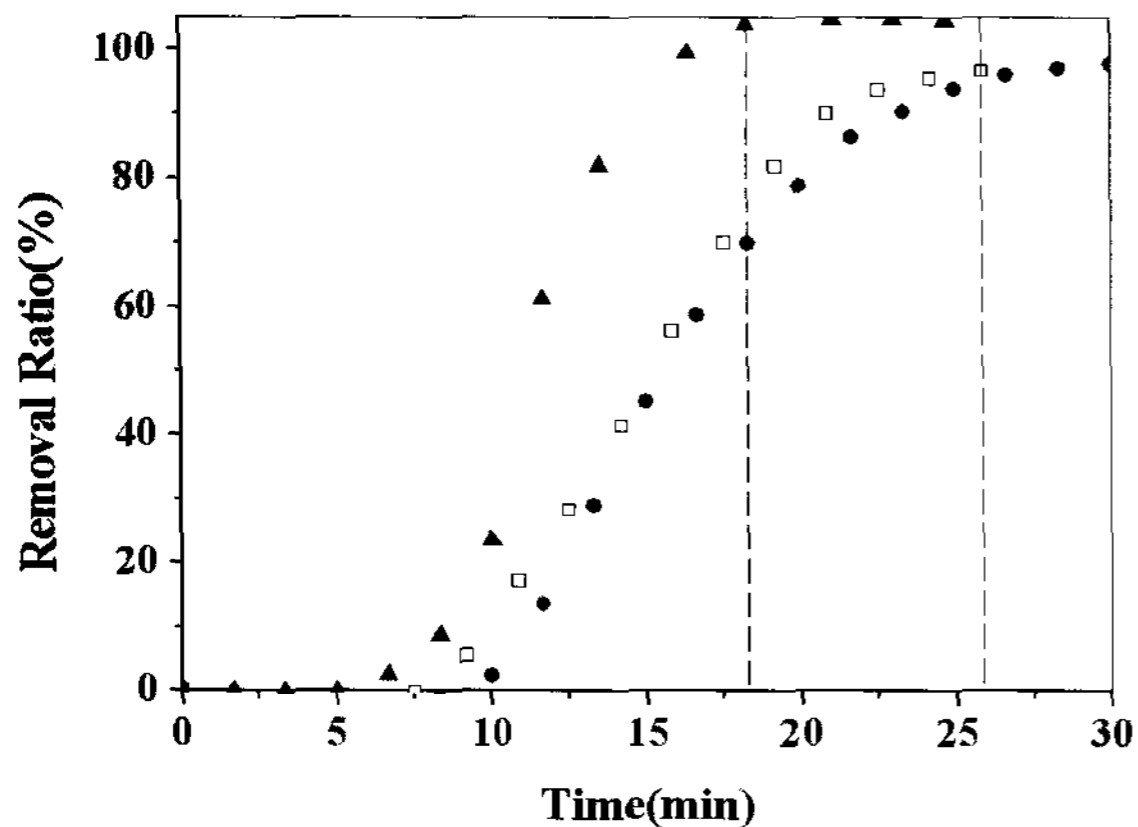


Figure 12. Comparison of I-TEDA removal rates for different temperatures (20, 40, and 60°C) at 200 bar with the methanol flow rate of 2 ml/min and the CO₂ flow rate of 3~5 ml/min (Uncertainty in the data = ±5 %).

(1) 압력에 의한 영향

압력의 변화는 밀도의 변화를 나타내므로 용해력을 높일 수 있다. 따라서 압력을 상승시키면 용해속도 및 제거율이 높아질 것으로 예상된다. 압력에 대한 효과를 비교하기 위해 150 bar, 200 bar에서 실험을 수행하고 비교하였다. 실험결과 예상과는 다르게 두 조건에서 거의 비슷한 용해 속도와 제거율을 나타내었다(Figure 11). 이는 메탄올의 초임계이산화탄소 내 용해도가 앞서 보인 바와 같이 150 bar 이하에서 전 구간에 걸쳐 용해되므로 150 bar 이상의 압력에서는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

(2) 온도에 의한 영향

온도에 따른 I-TEDA의 용해속도를 비교하기 위해 20°C, 40°C, 60°C에서 실험을 수행하여 비교하였다(Figure 12). 40°C와 60°C의 실험을 비교해 보면, 60°C의 실험에 비해 40°C의 실험에서 30%의 반응속도 향상이 나타남을 알 수 있다. 이는 온도에 따른 메탄올의 용해반응 속도가 높아져서 I-TEDA의 용해속도가

높아졌기 때문이라 판단된다. 이와는 다르게 20°C와 40°C의 실험은 액체 이산화탄소와 초임계이산화탄소의 비교실험이 된다. 실험결과는 거의 동일한 반응속도와 제거율이 나타남을 알 수 있다. 이는 액체 이산화탄소의 경우에는 높은 밀도(0.94 g/ml)에 의한 용해력 향상과 초임계이산화탄소의 경우에는 높은 확산력에 의한 용해력 향상에 의해 비슷한 결과를 보임으로 예상할 수 있다.

(3) 추출용매의 유량에 따른 영향

추출용매의 유량 변화는 용해속도에 영향을 미치므로 유량에 따른 비교실험을 수행하였다. 초임계이산화탄소에 첨가된 추출용매인 메탄올의 유량을 1~3 ml/min으로 변화시켜 실험을 수행한 결과, 예상대로 추출용매의 유량이 높을 경우 제거 반응속도가 커지는 것으로 나타났다. 즉 추출용매의 유량이 증가될수록 가속구간이 빨리 나타나는 것을 확인할 수 있다. 사용된 총 추출용매의 양은 추출용매 유량의 변화에 따라 54 ml (3 ml/min), 60 ml (2 ml/min), 77 ml (1 ml/min)였고, 동일한 양의 I-TEDA를

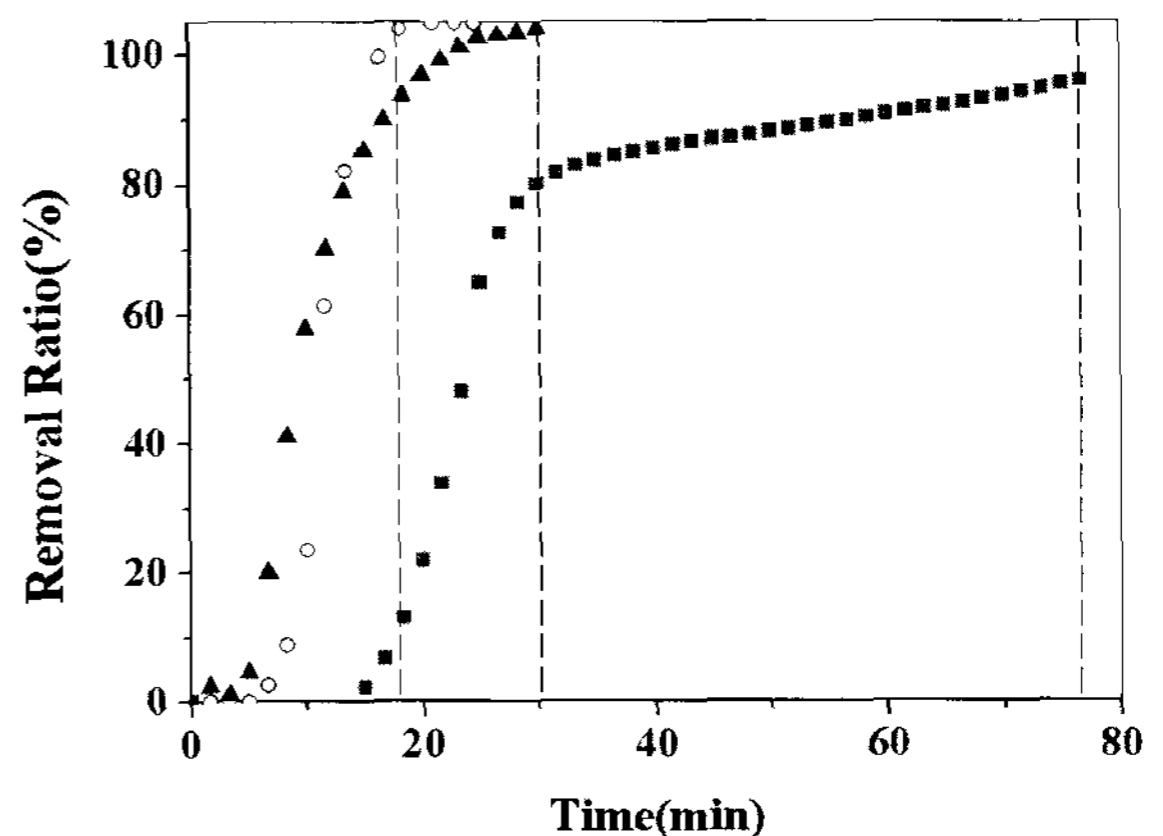


Figure 13. Comparison of I-TEDA removal rates for different extraction solvent flow rates at 200 bar and 60°C with the CO₂ flow rate of 3~5 ml/min (Uncertainty in the data = ±5 %).

제거할 때에는 유량이 클수록 사용된 용매양이 적어짐을 알 수 있었다. 이는 메탄올의 농도에 따른 I-TEDA의 반응속도가 높아지기 때문이다. 메탄올의 유량이 2 ml/min와 3 ml/min 사이에 큰 차이를 보이지는 않았다(Figure 13).

지금까지의 결과를 바탕으로 메탄올의 유량에 따른 I-TEDA 제거율을 비교하였다. 유량이 2 ml/min 이하에서는 유량에 따른 제거율은 어느 정도 비례관계에 있음을 알 수 있었다. 즉, 초임계이산화탄소 내 추출용매의 양이 증가할수록 제거율이 증가하였다. 메탄올이 I-TEDA를 용해시키고 초임계이산화탄소가 이 화합물을 이동시키기 때문이다. 즉, 메탄올의 양이 증가하면 증가할수록 제거율이 높아지게 된다. 그러나 추출용매의 주입량이 많아지게 되면 그 효과는 줄어들는다. QCM을 이용한 I-TEDA의 반응속도 실험을 통해 폐 활성탄 내 방사성 요오드를 제거하기 위한 조건을 도출하였다. 최적화된 제염조건은 압력 200 bar, 온도 60°C, 메탄올 유량은 대략 2 ml/min 이다(Figure 14).

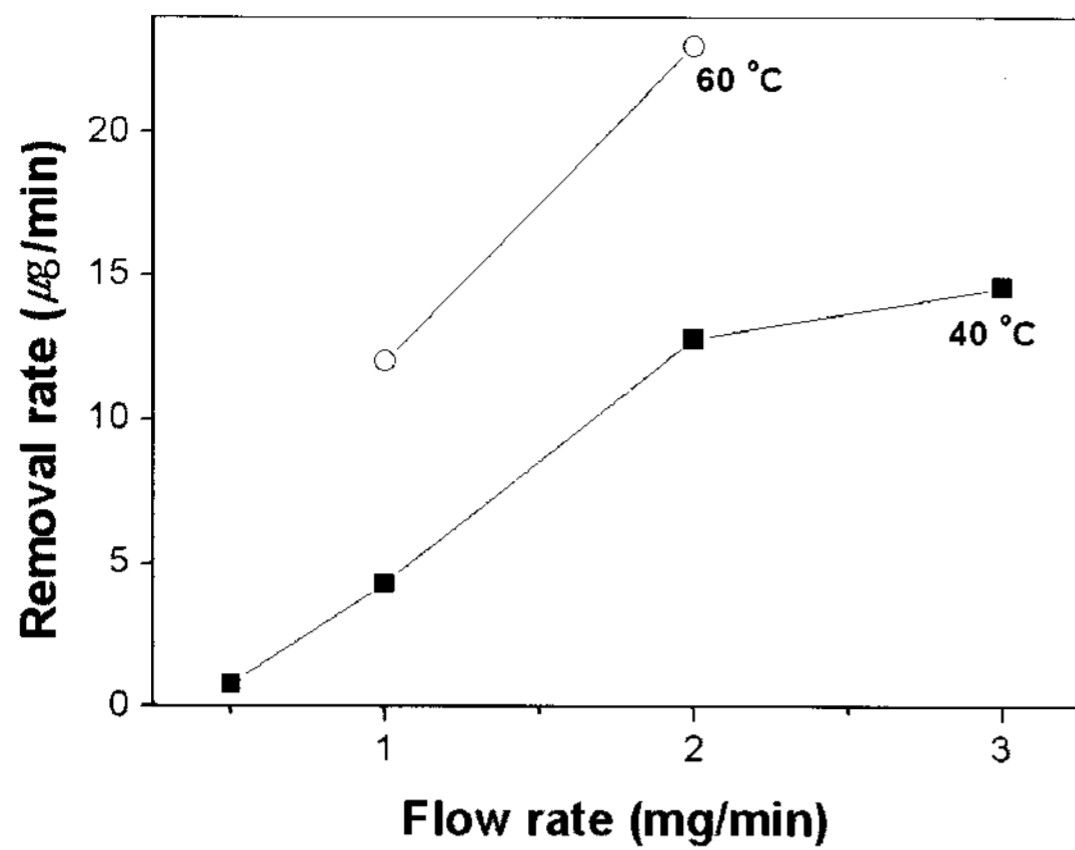


Figure 14. Variation of I-TEDA removal rates on the QCM surface depends on the methanol flow rates at 200 bar with the CO₂ flow rate of 3~5 ml/min (Uncertainty in the data = ±5 %).

4. 결 론

초임계이산화탄소하에서 I-TEDA의 제거특성을 확인하기 위해 QCM을 이용한 실험을 수행하였으며, I-TEDA의 용해도는 압력/온도와 추출용매에 의해 영향을 받는 것을 확인하였다. 초임계이산화탄소 하에서의 I-TEDA의 제거율은 압력 200 bar, 온도 60°C, 메탄올 2 ml/min의 조건에서 가장 높게 나타났으며, 각 실험조건에서 제거율이 급격하게 증가하는 ‘가속구간’과 제거율이 95 %에 도달했을 때, 더 이상 제거율이 증가 하지 않는 ‘포화구간’을 가지는 것을 확인하였다. 이 실험결과를 바탕으로 추출용매인 메탄올을 이용하여 방사성 폐활성탄을 제염할 경우 높은 온도조건 및 압력조건을 유지해야 하며, I-TEDA가 용해될 수 있는 충분한 시간이 필요할 것이라 판단된다.

감 사

본 과제(결과물)는 산업자원부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. Jun, J. P., "A Need for Nuclear Energy- Nuclear Energy for Next Millennium," *J. Korean Electr. Soc.*, **39**(11), 7-14 (1990).
2. Ministry of commerce, Industry and Energy, "The 1st National Fundamental Plan for the Supply of Electricity," *J. Korean Electr.*, 16-28 (2002).
3. Kael Environment Laboratory, "Development of a Wet Cleaning System for the Recycle of Waste Active Carbon," Final Report to Ministry of Science and Technology (2002).
4. McHugh, M. A., and Krukoni, V. J., *Supercritical Fluid Extraction: Principles and Practice*, Butterworth-Heinemann, Boston, 1994.
5. Yoo, J. R., Sung, J. H., Park, K. H., Lee, S. S., Lee, S. H., and Choi, K. Y., "Separation of Radioactive Waste Oil by Membrane with SC-CO₂," Korean Nuclear Society Annual Meeting (Fall, 2005).
6. Park, K. H., Kim, H. W., and Kim, H. D., "Techniques of Liquid / Supercritical CO₂ Used in Decontamination of Radioactive Contaminants," Paper No. IL-11, Supergreen 2004, Tianjin University, Tianjin, China (October 23-26, 2004).
7. Kiran, E., Johanna, M. H., and Sengers, L., "Supercritical Fluids Fundamentals for Application," NATO ASI Series E, 9-12 (1994).
8. Wai, C. M., and Wang, S., "Supercritical Fluid Extraction: Metals as Complexes," *J. Chromatogr. A*, **785**, 369-383 (1997).
9. Park, K. H., Koh, M. S., Yoon, C. H., Kim, H. W., and Kim, H. D., "The Behavior of Quartz Crystal Microbalance in High Pressure CO₂," *J. Supercrit. Fluid*, **29**, 203 (2004).
10. O'Sullivan, C. K., and Guilbault, G. G., "Commercial Quartz Crystal Microbalance Theory and Application," *Biosens Bioelectron*, **14**, 663 (1999).
11. Lucklum, R., and Hauptmann, P., "The Quartz Crystal Microbalance; Mass Sensitivity, Viscoelasticity and Acoustic Amplification," *Sensor Actuat B-Chem*, **70**, 30 (2000).
12. Yoon, C. H., "Decontamination of Radioactively Contaminated Materials Using Liquid/Supercritical Carbon Dioxide," Master's Thesis, Kyung Hee University, Korea, 2004.