

해수중의 물질 분리 및 분석을 위한 FI-FFF의 안정화 기법

최수훈 · 이상엽 · 홍승관[†] · 문지희^{*}

고려대학교 건축·사회환경공학부 물환경 플랜트공학 연구실

^{*}코오롱건설(주) 기술연구소 환경연구팀

Stabilization Methods to Separate and Analyze Materials in Seawaters using FI-FFF

Soohoon Choi · Sangyoup Lee · Seungkwan Hong[†] · Jihee Moon^{*}

Water Environmental Plant Engineering Lab., School of Civil, Environment & Architectural Engineering, Korea University

^{*}Environmental Research Team, R&D Institute, Kolon E&C

(Received 22 December 2008, Revised 2 February 2009, Accepted 11 February 2009)

Abstract

Flow field-flow fractionation (FI-FFF) device has been widely used to verify the size and molecular weight of various colloids and organics. The FI-FFF, however, generally uses carrier solutions with only low to moderate ionic strengths to exclude the high affinity of materials to the membrane under high ionic strength conditions. Thus, materials existing in seawaters have not been accurately analysed based on the hydrodynamic size and molecular weight using current FI-FFF techniques. The highest ionic strength tested was up to 0.1 M, while seawater ionic strength is about 0.6 M. The aim of this study is to accurately measure the hydrodynamic size of particles under carrier solutions close to seawater conditions with the FI-FFF. By employing various operating conditions during the FI-FFF analyses, it was demonstrated that the flow conditions, the concentration of surfactants, and stabilization times were key factors in acquiring compatible data. Results have shown that the cross flow was more influential factor than the channel flow. The concentration of the surfactant was to be at least 0.05% and the minimum 15 hr of stabilization was needed for accurate and reproducible data acquisition under seawater condition.

keywords : Flow field-flow fractionation (FI-FFF), FI-FFF stabilization, Seawater, Separation

1. 서론

Flow field-flow fractionation(FI-FFF)은 여러 종류의 입자, 미량물질(Hasselov et al., 1999) 또는 고분자 물질을 분리 및 측정하는 기기로서 미세 채널(channel) 내에서 용존성(Jiang et al., 2000; Kirkland et al., 1992) 또는 입자성 물질의 확산계수에 의한 물질분리를 기반으로 한다(Giddings, 1993, 1997; Hansen et al., 1989). FI-FFF는 다양한 범위의 (0.01~100 μm) 물질을 분리할 수 있으며, 분리 및 측정 가능한 범위의 물질들은 대부분 수처리에서 있어서 문제가 되고 있는 물질들이다. 즉, 일반적인 콜로이드 물질(0.01~10 μm)(Dulog and Schauer, 1996)부터 박테리아(0.1~4 μm)(Chon et al., 2007), 바이러스(Reschiglian et al., 2002) 및 일부 용존성 및 고분자물질(Beckett et al., 1987; Moon et al., 2006) 등을 포함하여 수처리 공정의 대부분의 오염물질을 분석하는데 있어 효과적인 분석기기이다.

FI-FFF에 의한 물질 분리는 기기의 채널에서 이루어지게 된다. 채널은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 물질이 채널 내에 흐르는 동안 확산계수에 의한 채널 내 위치 분포

에 따라 서로 다른 평행유속을 나타내어 분리가 일어나게 되는 구조로 되어있다. 채널 바닥에는 멤브레인이 장착되어 측정대상 물질의 손실이 일어나지 않게 되어 있으며, 채널의 공간은 spacer을 통하여 확보하게 된다. 채널에는 2개의 유입구와 1개의 유출구가 존재하는데 채널 선단에 유입구를 통하여 측정 대상물질을 흘리는 용매가 유입되며, 채널 중간의 유입구를 통해서 측정대상 물질을 모아주는 역할을 하는 용매가 유입되며 후단에 있는 유출구를 통하여 분리된 물질들이 UV 및 fluorescence 등의 측정기로 들어가 분석이 이루어진다. 채널에 평행한 방향으로 흐르는 층류(channel flow)에 의하여 물질이 흐르며 분리가 일어나고, 수직인 방향의 흐름인 십자류 흐름(cross flow)으로 인하여 실험에 사용되는 물질들이 멤브레인, 즉 “accumulation wall” 주위로 끌려가게 된다. 여기서 상대적으로 큰 입자들은 낮은 확산계수로 인하여 막에 가까운 곳에 위치하게 되며 상대적으로 확산계수가 큰, 작은 크기의 입자들은 막에서 멀리 떨어져 위치하여 상대적으로 채널 내에 형성된 포물선 형태 흐름(parabolic flow) 내에서 흐름이 보다 빠른 곳에 위치하게 되고 따라서 입자의 유출시간은 입자의 크기에 따라 달라진다.

FI-FFF의 normal mode에서 지체시간(t_R)은 입자의 지름(d)과 비례한다.

[†] To whom correspondence should be addressed.

skhong21@korea.ac.kr

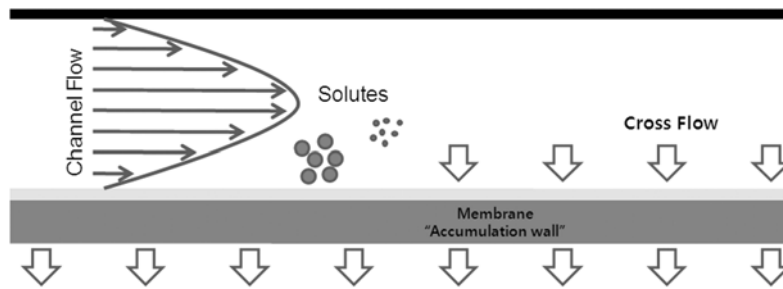


Fig. 1. Characteristic flows and separation in FI-FFF system.

$$\frac{t_R}{t^0} \cong \frac{\pi \eta w^2}{2kT} \frac{V_c}{V^0} d \quad (1)$$

여기서 t^0 는 void time이며, η 는 용매의 점성, w 는 채널의 두께, k 는 Boltzmann 지수, T 는 절대온도, V_c 는 십자흐름(cross flow)의 크기, 그리고 V^0 는 channel void volume이다. 위 식에서 t_R 과 d 를 제외한 값들은 기기 상에서 이미 결정되어 있는 값이므로 지체시간을 이용하여 입자크기를 측정할 수 있다(Giddings, 1991; Schimpf et al., 2000).

FI-FFF를 이용한 기존의 실험에서는 다양한 성상의 용매(solution chemistry)를 이용하여 입자성 물질의 크기를 측정하였을 뿐 아니라, 입자가 가지는 고유의 확산계수를 산정한 연구 또한 있었다(Cho et al., 2005). FI-FFF의 측정 범위가 수처리에서 문제가 되는 대부분의 물질을 포함하는 관계로 측정대상 물질의 다양성 측면에서 많은 장점이 있다. 그러나 측정 시에 사용하는 용매(carrier solution)의 화학적 구성성분과 이온강도 및 pH, 그리고 용매의 속도와 같은 FI-FFF의 분석조건과 온도 등 물리·화학적 조건 등이 입자의 분석에 영향을 미칠 수 있다(Schimpf et al., 2000). 따라서 분석 대상 입자의 고유의 특성을 파악하기 위하여 이러한 실험조건에 의한 영향을 최소화시킬 수 있는 최적 분석조건이 도출되어야 한다. 특히, FI-FFF에서는 얇은 채널 내에서 “accumulation wall”인 멤브레인과의 정전기적 인력(electrostatic interaction)으로 인한 상호작용이 분석에 있어 큰 영향인자로서 작용한다. 막과 측정대상 물질과의 정전기적 인력이 증가하게 되는 조건(높은 이온강도 및 낮은 pH)에서는 측정대상 물질의 멤브레인 표면에 대한 흡착 등의 영향으로 측정대상 물질의 회수율이 감소하며, 채널 내에서의 지체시간이 증가하게 된다. 이러한 측정대상 물질의 지체시간 증가 현상은 낮은 pH에서보다 높은 이온강도의 용매를 사용하였을 경우에 더 확연하게 관찰된다(Schimpf et al., 2000). 즉, 지나치게 높은 이온강도의 용매를 사용할 경우에는 멤브레인과 측정대상 물질 간의 정전기적 인력이 증가하여 측정대상 물질의 채널을 통한 유출이 일어나지 않고 멤브레인에 흡착하는 경향을 보이게 된다. 일반적인 담수에 존재하는 물질의 측정에 있어서는 이러한 문제는 일어나지 않으나 FI-FFF를 해수와 같이 이온강도가 높은 해수 내에 존재하는 물질을 측정하는데 있어서는 정확한 분석이 어렵게 된다. 물론 입자성 물질과

같이 용매의 이온강도가 크거나 형태에 크게 영향을 미치지 않는 경우에는 용매가 FI-FFF의 크기 측정에 최적화된 이온 강도로 조정하는 것이 적절하나, 유기물이나 미생물과 같은 경우에는 이온 강도에 따라 그 구조나 크기가 변하여 낮은 이온 강도 하에서는 분석된 물질의 특성은 해수상태와 크게 다를 수 있다.

해수 담수에 관한 관심이 높아지는 시점에서 해수 내에 존재하는 오염물질이 유체 내에서 가지는 크기와 확산특성 등에 대한 이해가 필요하나 FI-FFF를 이용한 연구의 경우 현재 염 농도는 0.1 M 정도까지만(Moon, 1995) 이루어져 앞으로 해수 내에 물질 크기를 측정하는데 있어서는 후속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 그 높은 이온 강도로 인하여, 해수에 존재하는 물질은 전자기적 이중층(electrostatic double layer)에 많은 영향을 받으며 유기물의 경우에는 그 형태도 일부 변형되는 것(Kim et al., 2005)으로 알려졌으나 오염물의 종류에 따른 구체적인 크기변화는 아직 밝혀지지 않고 있다. 본 연구의 주 목적은 FI-FFF를 이용하여 실제 해수와 같은 상태의 용매에서 오염물질들이 가지는 크기나 특징들을 연구하기 위한 전신으로, 높은 염 농도 하에서 용매의 이온강도와 유속 등 FI-FFF의 분석조건을 중심으로 안정적이고 재현성 있는 방법으로 물질을 분리하여 측정하는 방법을 탐색해 보고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 실험재료

2.1.1. Flow Field-Flow Fractionation (FI-FFF)

본 연구에 사용된 FI-FFF은 Postnova사의 AF2000 Focus Asymmetric Flow FFF system이다. 기기의 채널 길이는 26.0 cm이고, 두께는 250 μ m에 시작부분의 폭이 2.0 cm에 끝부분의 폭이 1.0 cm인 사다리꼴 모양이며 끝은 삼각형 모양으로 되어있다(Fig. 2). 채널의 바닥에는 Postnova의 10 kDa regenerated cellulose 멤브레인을 장착하였다. 시료의 주입은 Rheodyne(Cotati, CA, USA) 사의 Model 7725i loop injector를 통하여 이루어졌으며 일회 실험에 주입된 시료의 양은 25 μ L이었다. 실험에 사용된 용매는 Postnova사의 Model PN 1130 HPLC pump(tip pump)에 의하여 주입되었으며 focusing flow는 tip inlet에서 10 cm 떨어진 위치에서 채널에 역행하는 focus flow를 형성하도록 했다. 실

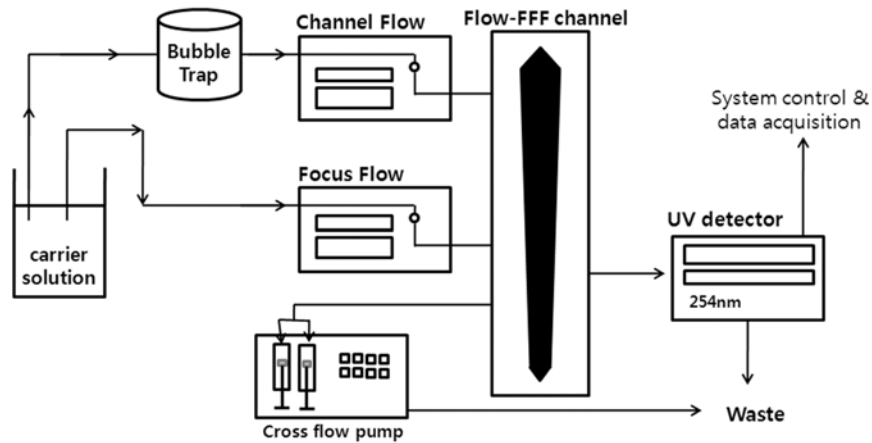


Fig. 2. Schematic illustration of FI-FFF system.

험 중 대부분의 용매 흐름은 십자류 흐름(cross flow)를 통하여 흘러 나가고 층류(channel flow)로 설정한 양만 UV 측정기로 흘러 들어간다. 십자류 흐름의 효과적인 통제를 위해서는 Postnova의 Model PN1610 syringe pump가 사용되었다. 3~5분간의 focusing 단계 이후에 모든 데이터는 AF2000 control 프로그램을 통하여 기록되었다.

2.1.2. Carrier Solution

실험에 사용된 모든 용매는 Easy Pure RO system의 D7429-33(Labsience, South Korea)를 이용하여 제조되었으며 이온강도는 NaCl로 조절하였다. 입자의 흡착을 방지하는 계면활성제로는 FL-70 (Fisher Science products)을, 미생물의 번식을 억제하기 위하여 NaN_3 0.1 mM(Fisher Science products)을 사용하였다. 해수성상을 만들기 위하여 염 농도를 35,000 mg/L로 조절하였으며, 용매에 들어가는 NaCl, NaN_3 및 FL-70은 1~2시간 이상 교반시킨 후 실험을 실시하였다.

2.1.3. Particle

입자성 물질로는 30 nm 크기의 1% polystyrene latex particle(Duke Science)을 1,000 mg/L의 농도로 희석하여 실험하였다.

2.2. 실험방법

실험에 사용된 10 kDa Postnova regenerated cellulose 멤브레인은 24시간 동안 증류수에 담근 후, 채널에 삽입되었다. 멤브레인과 채널 사이에는 스페이서(spacer)를 삽입하여 분리채널(elution channel)을 형성하였다. 채널 조립을 완성하여 시스템에 연결시킨 후, 채널 내에 공기방울을 완전히 제거하여 채널의 조립과정에서 발생한 공기방울에 의한 채널 내의 유체 및 용질의 흐름 특성의 변형이 일어나지 않도록 하였다. 그 후 해당 용매를 바꿔 안정화를 시켰다. 안정화 시간이 끝난 후 본 실험에 들어가기 전 void peak를 확인하기 위하여 입자성 물질 대신 증류수를 주입하여 baseline test를 실시하여 void peak를 확인함으로써 시스템의 안정성을 체크하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 최적 flow condition의 도출

Flow condition을 설정하기에 앞서 초기에 결과에 영향을 미치는 flow들을 따로 분류하여 각각의 흐름별로 변화시켜 가며 결과를 관찰하였다. 결과에 영향을 미치는 영향인자로는 집중(focus) 단계의 십자류 흐름, 분리(elution) 단계의 십자류 흐름(Hartmann et al., 2002; Wright et al., 2001), 그리고 분리단계의 층류 흐름을 꼽을 수 있었다. 첫번째로 focus 단계의 십자류 흐름을 변화시켰다. focus 단계에서는 분석 대상인 용질이 채널에 유입된 후 용질의 크기에 따른 확산계수와 채널에 수직으로 작용하는 십자류 흐름과의 균형에 따라 채널 내에서의 용질의 위치가 결정되며 이는 유출시간과 직결된다. 이 과정에서, focus에 영향을 주는 인자는 focus 시간과 focus cross flow의 강도이다. 본 실험에서는 focus cross flow의 강도를 변화시키면서 최적의 분석조건을 도출하고자 하였다. Focus cross flow가 증가하게 된다면, focus 단계에서 입자들이 보다 멤브레인과 가까운 거리에 분포되며 이는 곧 elution peak가 그만큼 늦게 나오는 결과를 초래한다. 특히 너무 높은 focus cross flow를 가할 경우, 입자가 멤브레인에 흡착하여 elution peak가 나타나지 않거나 형태가 변형되어 나타나게 된다.

본 연구에서는 계면활성제를 첨가하여 흡착작용을 완화시켰으나 염 농도가 높아 멤브레인과 입자간의 흡착이 일어날 가능성이 큰 관계로 focus cross flow를 낮게 설정하여 실험을 실시하였다. 두 번째로는 분리 단계의 십자류 흐름을 변화시켰다. 분리 단계의 십자류 흐름은 멤브레인에 수직으로 통과하는 흐름으로 focus 단계에서 멤브레인과 거리가 결정된 입자들이 분리과정 동안 계속적으로 그 위치를 유지하기 위한 flow 상태이다. 마지막으로 분리단계의 층류 흐름으로써 이는 멤브레인과 평행하게 흐르는 흐름으로써 입자의 유출과 직접적인 영향을 주는 흐름이다.

흐름을 결정하는 실험들은 다른 조건이 변화하지 않는 경우에는 분리단계의 층류는 1.0 mL/min ($Re=0.455$ (채널 입구)~1.731(채널 출구))으로, 십자류 흐름은 0.5 mL/min으로

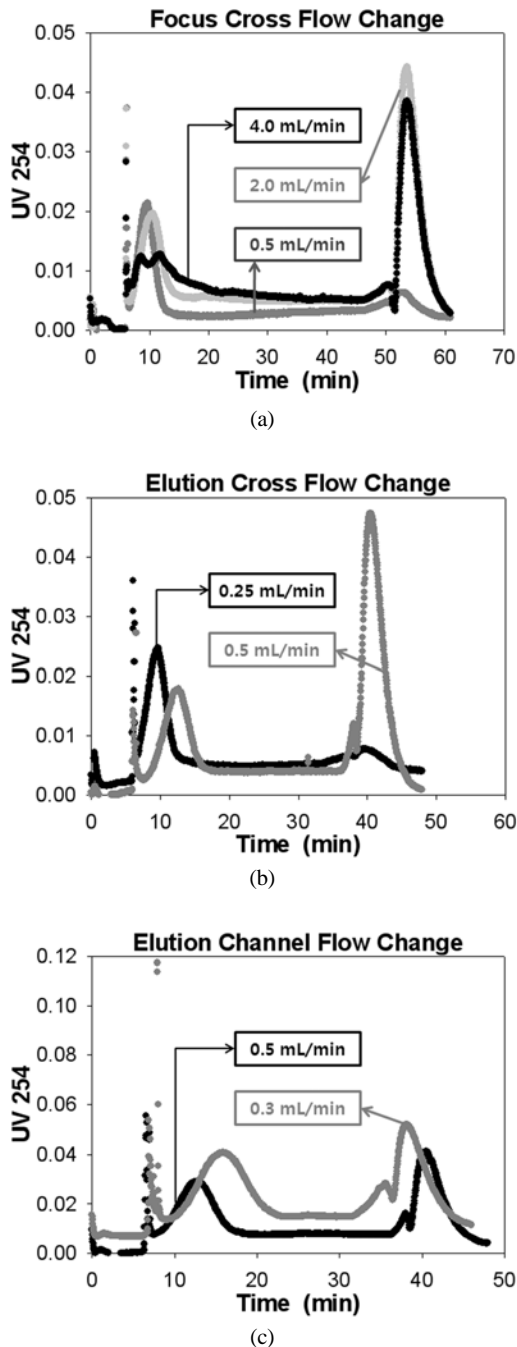


Fig. 3. Variation in void, elution, and rinse peaks during FI-FFF analyses with respect to flow conditions. (a) Focus cross flow, (b) Elution cross flow, (c) Elution channel flow

설정하였다. 용매는 NaCl 35,000 mg/L, FL-70 0.05%, 그리고 NaN_3 0.1 mM이 첨가되었다. Fig. 3(a)에서 보이는 바와 같이, focus cross flow의 흐름은 0.5 mL/min, 2.0 mL/min 및 4.0 mL/min의 세 가지로 유속을 변화시키며 실험을 하였다. 각 단계의 시간은 focus 5분과 분리시간 40분 그리고 rinse 단계는 10분으로 설정하였다. 실험결과, 0.5 mL/min에서는 elution peak가 9.7분이었으며, 2.0 mL/min에서는 10.5분이었다. 이러한 결과는 보다 강한 십자류 흐름 상태에서 입자들이 멤브레인 표면에 보다 가까이 접근하여, 분

리시간이 늦어지는 결과를 초래한 것으로 볼 수 있다. 이러한 경향은 각 peak의 형태를 통해서도 볼 수 있는데, 2.0 mL/min의 경우에는 elution peak와 rinse peak가 뚜렷이 나왔지만, 4.0 mL/min의 경우에 elution peak의 형태가 확연히 다른 것을 확인할 수 있다. 이는, cross flow가 너무 강하여 입자들이 일부 분리되어 두 개의 peak로 나타난 것으로 볼 수 있다. 0.5 mL/min의 경우에는 rinse peak가 없는 것을 확인할 수 있는데, 이는 주입된 대부분의 입자들이 void peak와 elution peak에서 흘러나온 것으로 추측을 할 수 있다.

Fig. 3(b)와 같은 경우에는 분리단계에서 십자류 흐름을 변화시킨 결과이다. 분리 단계에서의 십자류 흐름은 보통 입자들을 일정하게 모으고, 채널 내에서 크기에 따른 분리가 일어나게 하는 역할을 한다. 그림에서 보는 바와 같이 십자류 흐름을 0.25 mL/min과 0.5 mL/min의 두 가지 경우로 실험을 실시하였다. 결과에서 0.25 mL/min에서는 void peak가 5분에 일어난데 반하여 elution peak가 9.5분에서 일어났으며, 0.5 mL/min에서는 12.6분에 일어나고, 이때의 elution peak 또한 작게 나왔다. 이는 보다 강한 십자류 흐름 상황 하에서는 입자들이 막에 보다 가까운 위치에 포진하게 되며, 이에 따라 입자들이 물의 흐름이 느리게 흐르는 부분에 위치하며 또한 입자들이 멤브레인에 더 많이 흡착하게 된 결과이다. Rinse peak의 유무 또한 앞의 결과를 뒷받침한다. Fig. 3(c)는 분리단계에서 층류 흐름의 변화에 따라 유출특성을 확인할 수 있다. 층류 흐름은 멤브레인과 평행하게 흐르는 관계로 입자들이 멤브레인에 흡착하는 것을 방해하여 elution flow와 rinse flow의 크기에는 영향을 주지 않고, 다만 분리단계에서 elution peak의 유출 시간에만 영향을 받게 된다. 따라서 elution peak와 rinse peak의 형태와 크기가 같다는 것을 확인할 수 있었다. 다만 이 경우 elution peak의 유출시간이 12.7분에서 16.3분으로 증가한 것을 확인할 수 있다. 그러나 peak의 형태는 동일한 것으로 보아 유출 시간에만 영향을 끼친 것으로 해석되며, 실험결과 층류 흐름의 변화는 elution peak와 void peak의 분리가 정상적으로 이루어진다면 분석조건에 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

3.2. Elution Peak의 도출을 위한 계면활성제의 농도 결정

높은 염 농도 하에서는 입자와 입자간, 입자와 멤브레인간의 전자기적 이중층(electrostatic double layer)이 감소하게 되는데 이로 인하여 입자와 멤브레인의 흡착이 일어나 peak가 나타나지 않는 경우가 있다. 이 경우에는 입자와 멤브레인간의 흡착을 방지하기 위하여 계면활성제를 사용하게 되는데 기존의 연구(Moon, 1995; Moon and Cho, 2005)를 통하여 FL-70를 사용하기로 결정하였다. FL-70는 극성, 무극성의 계면활성제로 입자간의 분산정도를 증가시키며 유착을 방지한다. 그러나 실제 실험에 있어 너무 많은 양의 계면활성제는 입자의 지나친 분산으로 인하여 입자 유출 특성에 영향을 주어 적절한 분리 데이터를 얻기

힘들어진다.

입자의 유출특성을 나타내기 위해 가장 적절한 계면활성제의 농도를 설정하기 위하여 FL-70의 농도는 0.01%에서 0.05%까지 3번에 걸쳐 변화시켰다(Fig. 4). FL-70의 농도를 제외한 용매의 농도는 NaCl 35,000 mg/L에 NaN_3 0.1 mM로 일정하게 유지하였으며 flow condition은 십자류 흐름 0.5 mL/min에 층류 흐름은 1.0 mL/min으로 설정하였다. 실험결과는 아래의 Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 0.01%의 FL-70 농도에서는 elution peak와 rinse peak가 모

두 나타나지 않은 것을 확인할 수 있었다. FL-70의 농도를 0.03%로 올렸을 때에는 elution peak는 나타나지 않았으나(Fig. 4(b)) 십자류 흐름이 제거된 상태에서 층류만 흘렸을 때 나타나는 rinse flow에서는 peak data가 나타난 것을 확인할 수 있었다. 농도를 0.05%로 올린 경우에는 elution peak와 rinse peak가 모두 뚜렷하게 나타난 것을 확인할 수 있어(Fig. 4(c)) 해수와 같이 높은 염 농도에서는 FL-70의 농도를 0.05% 이상으로 하여 분리효율을 높일 수 있음을 확인하였다.

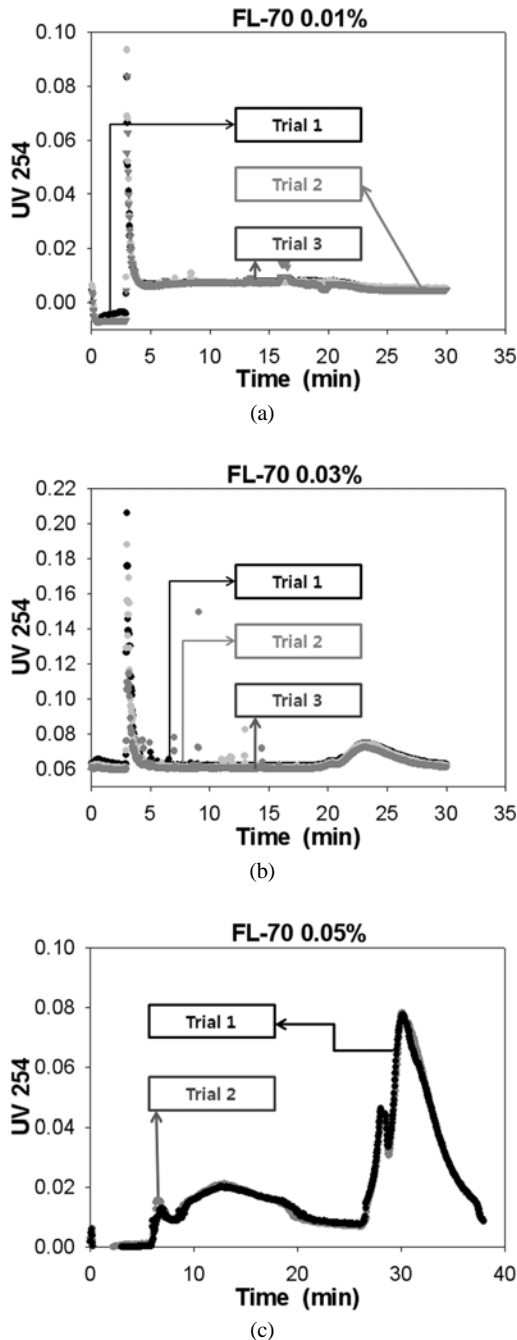


Fig. 4. Variation in void, elution, and rinse peaks during FI-FFF analyses with respect to the surfactant concentration. (a) FL-70 0.01%, (b) FL-70 0.03%, (c) FL-70 0.05%

3.3. 재현성 확보를 위한 안정화 시간의 결정

멤브레인과 입자간의 거리가 짧은 만큼 FI-FFF에서 입자들이 멤브레인의 전자기적 이중층에 영향을 많이 받게 된다. 이로 인하여 멤브레인의 이중층이 멤브레인 전체에 걸쳐 고르게 안정화되어 있지 않은 상태에서는 일정 부분에 약간의 흡·탈착으로 인하여 peak의 형태가 달라져 데이터의 재현성이 떨어지게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 멤브레인에 용매를 지속적으로 흘려서, 멤브레인에 전체적으로 전자기적 이중층을 안정화시킬 필요가 있다.

모든 실험에 사용한 용매는 NaCl 35,000 mg/L에 FL-70 0.05% 그리고 NaN_3 0.1 mM이었다. 안정화 실험에 앞서 채널을 포함한 시스템 내부에 용매를 효과적으로 채우기 위하여 3단계에 걸쳐 flow condition을 변화시켰다. 첫 번째 단계로는 층류를 3 mL/min 이상으로 10분 동안 흘려 채널 내부를 채웠으며, 다음 단계로는 층류 흐름 2.0 mL/min, 십자류 흐름 2.0 mL/min, 그리고 십자류 흐름 3.0 mL/min으로 설정하여 20분 동안 흘린 후, 마지막 단계로는 층류만을 1.0 mL/min으로 흘려 안정화 시간에 맞춰 실험을 실시하였다. 안정화 시간은 2, 9, 15 및 24시간으로 정하여 재현성 결과를 관찰하였다. 실험결과 2시간의 안정화 시간을 거친 경우에는 peak들의 크기와 형태가 모두 달랐으며(Fig. 5(a)) 9시간에서는 peak의 형태는 모두 유사했지만 그 크기는 일정하지 않은 것으로 나타났다(Fig. 5(b)). 이에 비하여 15시간과 24시간의 안정화 시간을 거친 실험의 경우에는 peak의 형태와 크기가 모두 동일한 것으로 나타났다(Figs. 5(c) and (d)). 15시간 이상의 긴 안정화 시간은 용매의 높은 염 농도로 인한 멤브레인과 입자간의 정전기적 인력이 급격히 증가하여 입자의 분석 이후에도 멤브레인에 흡착되어 있는 입자 잔여물들에 의한 영향을 배제하기 위해 소요되는 시간이다. 이러한 긴 안정화 시간을 단축시킬 수 있는 방안으로 채널 내의 분리용 멤브레인의 교체 또는 측정대상 물질의 분석 후에 단기간에 멤브레인 표면을 세척할 수 있는 방법으로 채널의 back flushing이나 흡착된 물질을 탈착시킬 수 있는 용매 등을 채널 내로 주입하여 flow condition의 변화를 통한 물리·화학적 안정화 작업을 통해 안정화 시간을 단축할 수 있다(Shimpf et al., 2000).

4. 결론

본 연구의 주 목적은 해수와 같이 높은 염 농도 하에서

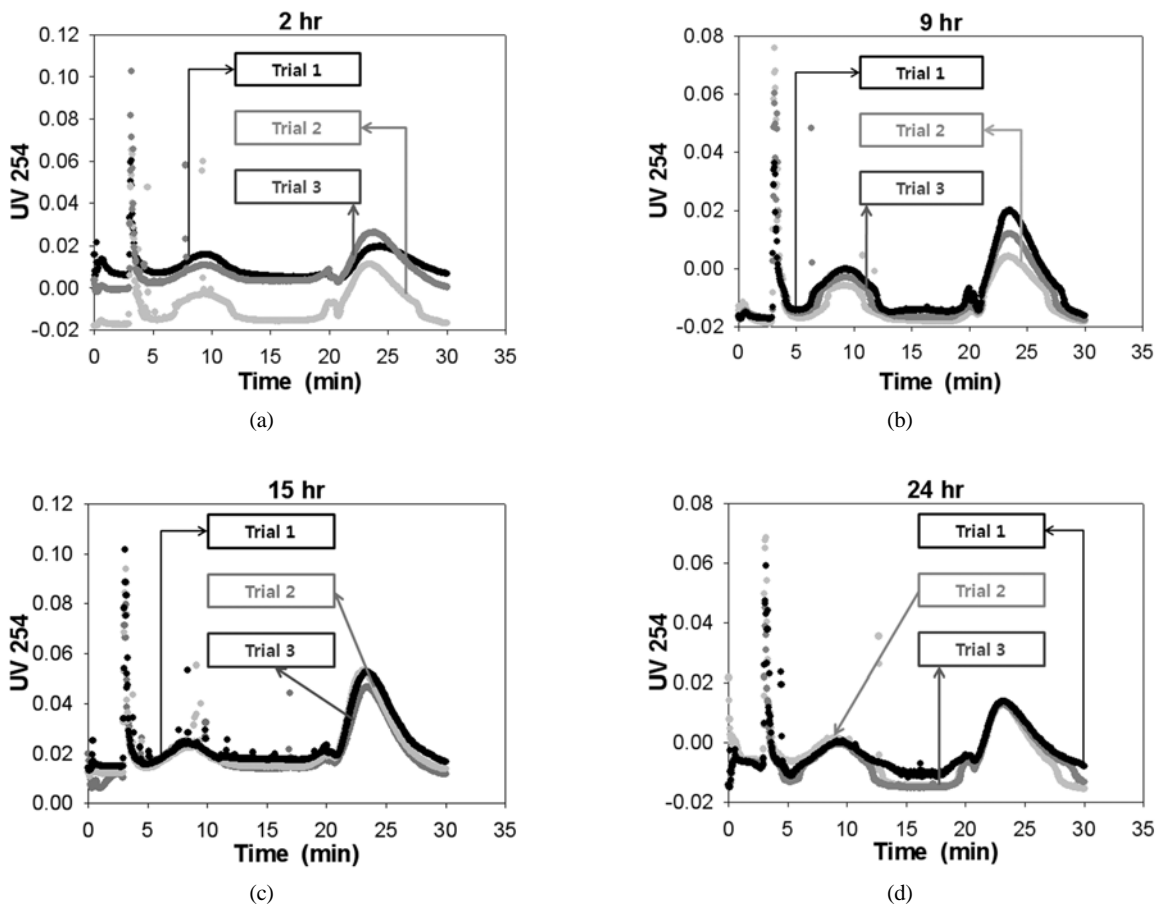


Fig. 5. Reproducibility of FI-FFF peak data with respect to the stabilization time. (a) 2 hr, (b) 9 hr, (c) 15 hr, (d) 24 hr

FI-FFF를 이용하여 물질의 분리 및 분석을 실시하기 위한 기본 조건을 설정하는 것이다. 연구 결과, 높은 해수 농도에서 물질분리에 영향을 끼치는 인자는 채널 내 흐름 조건의 변화 및 계면활성제의 유무 및 농도 그리고 재현성 있는 결과를 위한 안정화 시간이라는 것을 확인할 수 있었다. 실험결과 흐름 조건에 있어서는, focus 단계의 십자류 흐름은 2.0 mL/min 이하가 바람직하며, 분리단계의 십자류 흐름은 void peak와 층류가 분리가 일어나는 0.25 mL/min 이상이 적합하고 0.5 mL/min이 가장 적절한 것으로 확인되었다. 또한, 분리단계의 층류의 경우에는 void peak와 elution peak의 분리가 일어나는 유량을 찾아 이 이상으로 설정하면 되고, 그 크기는 실험결과에 큰 영향을 미치지 않았던 것으로 확인되었다. 계면 활성제의 경우에는 FL-70의 농도를 0.05% 정도로 유지함으로써 분리 및 측정에 재현성이 있음을 확인하였다. 실험결과 멤브레인을 일정시간 용매에 노출시키지 않으면, 재현성 있는 결과가 나오지 않았으며 재현성 확보를 위해서는 최소한 15시간 이상의 안정화 시간이 필요한 것으로 나타났다. 기존의 FI-FFF 분석 방법에서의 큰 장점인 단시간 분석 및 재현성 높은 결과와는 달리 15시간 이상의 긴 안정화 시간이 소요되는 부분은 해수 조건과 유사한 높은 염 농도로 구성된 용매를 사용하였기 때문이며, 향후 이러한 긴 안정화 시간을 단축할 수 있는 분석 최적화 방안에 대한 추가적인 연구가 이루어질

것이다. 본 연구에서는 높은 염 농도에서 입자성 물질에 의한 분리 및 측정을 중심으로 실험 및 분석이 이루어졌고 향후 측정 대상 물질의 범위를 확장하여 동일 조건에서 유기물 및 미생물 등을 이용한 FI-FFF 안정화 기법에 대해서도 연구가 진행될 것이다.

사 사

본 연구는 국토해양부 플랜트고도기술 고도화사업의 연구비지원(과제번호: 07 해수담수 B01-05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Beckett, R., Zang, J., and Giddings, J. C. (1987). Determination of Molecular weight Distributions of Fulvic and Humic Acids Using Flow-Field Flow Fractionation. *Environ. Sci. Technol.*, **21**, pp. 289-295.
- Cho, J., Kim, I. S., Moon, J., and Kwon, B. (2005). Determining Brownian and shear-induced diffusivity of nano- and micro-particles for sustainable membrane filtration. *Desalination*, **188**, pp. 213-216.
- Chon, K., Moon, J., Kim, S., Kim, S. D., and Cho, J. (2007). Bio-particle separation using microfluidic porous plug for

- environmental monitoring. *Desalination*, **202**, pp. 215-223.
- Dulog, L. and Schauer, T. (1996). Field flow fractionation for particle size determination. *Progress in Organic Coatings*, **28**, pp. 25-31.
- Giddings, J. C. (1991). *Unified separation science*, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Giddings, J. C. (1993). Field-Flow Fractionation: analysis of macromolecular, colloidal, and particulate materials. *Science*, **260**, pp. 1456-1465.
- Giddings, J. C. (1997). Factors influencing accuracy of colloidal and macro-molecular properties measured by field-flow fractionation. *Anal. Chem.*, **69**, pp. 552-557.
- Hansen, M. E., Giddings, J. C., and Beckett, R. (1989). Colloid characterization by sedimentation field-flow fractionation: VI. Perturbations due to overloading and electrostatic repulsion. *J. Colloid Interface Sci.*, **132**(2), pp. 300-312.
- Hartmann, R. L., Williams, R., and Kim, S. (2002). Flow field-flow fractions as an analytical technique to rapidly quantitate membrane fouling. *Journal of Membrane Science*, **209**, pp. 93-106.
- Hasselov, M., Lyven, B., Haraldsson, C., and Sirinawin, W. (1999). Determination of continuous size and trace element distribution of colloidal material in natural water by online coupling of flow field-flow fractionation with ICPMS. *Anal. Chem.*, **71**, pp. 3497-3502.
- Jiang, Y., Miller, M. E., Li, P., and Hansen, M. E. (2000). Characterization of water-soluble polymers by flow FFF-MALS. *Am. Lab.*, **32**(3), pp. 98-109.
- Kim, D. H., Moon, J., and Cho, J., (2005). Identification of natural organic matter transport behavior near the membrane surface using flow field-flow-fractionation (FI-FFF) micro channel. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, **54**(4), pp. 249-259.
- Kirkland, J. J., Dilks Jr., C. H., and Rementer, S. W. (1992). Molecular weight distributions of water-soluble polymers by flow field-flow fractionation. *Anal. Chem.*, **64**, pp. 1295-1303.
- Moon, M. H. (1995). Effect of Carrier Solutions on article Retention in Flow Field-Flow Fractionation. *Bull. Korean. Chem Soc.*, **16**, pp. 7.
- Moon, J. and Cho, J. (2005). Investigation of nano-colloid transport in UF membranes using flow field-flow fractionation (flow FFF) and an irreversible thermodynamic transport model. *Desalination*, **179**, pp. 151-159.
- Moon, J., Kim, S. H., and Cho, J. (2006). Characterizations of natural organic matter as nano particle using flow field-flow fractionation. *Colloids and Surfaces*, **287**, pp. 232-236.
- Reschiglian, P., Zattoni, A., Roda, B., and Casolari, S. (2002). Bacteria Sorting by Field-Flow Fractionation. Application to Whole-Cell Escherichia coli Vaccine Strains. *Anal. Chem.*, **74**, pp. 4895-4904.
- Schimpf, M. E., Caldwell, K., and Giddings, J. C. (2000). *Field-Flow Fractionation Handbook* (ed), New York, Wiley.
- Wright, S., Ranville, J., and Amy, G. (2001). Relating complex solute mixture characteristics to membrane fouling. *Water Science and Technology*, **1**(5), pp. 31-38.