



# 형광입자를 이용한 분리막 표면 검측 방법의 파일럿 규모 플랜트 적용

## Application of fluorescent particles as a tracer to detect the membrane surface damage in a pilot scale membrane bioreactor

김초아<sup>1</sup>·김희준<sup>2</sup>·조진우<sup>1\*</sup>

Kim Choah<sup>1</sup>·Kim Hee Jun<sup>2</sup>·Cho Jinwoo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 환경에너지융합학과, <sup>2</sup>지우이앤이주식회사

<sup>1</sup>Department of Environment & Energy, Sejong University, <sup>2</sup>JUENE Corporation

### ABSTRACT

In this study, a fluorescent silica nano particle is used as the surrogate for challenging test of membrane surface integrity. The particles are functionalized by a fluorescent dyeing agent so that as an ultraviolet light is imposed a bright fluorescent image from the particles can be taken. If a membrane surface is damaged and has a compromised part larger than the size of surrogate the fluorescent particles would pass through and contained in the permeate. An operator can directly notice whether the membrane surface is damaged or not by detecting a fluorescent image taken from the permeate. Additionally, the size of compromised part is estimated through analysing the fluorescent image in which we surmise the mass of particles included in the permeate by calculating an average RGB value of the image. The pilot scale experiments showed that this method could be applied successfully to determine if a membrane surface had a damaged parts regardless of the test condition. In the testing on the actual damaged area of 4.712 mm<sup>2</sup>, the lowest error of estimating the damaged area was -1.32% with the surrogate concentration of 80 mg/L, flux of 40 L/m<sup>2</sup>/hr for 25 minutes of detection. A further study is still going on to increase the lowest detection limit and thus decrease the error of estimation.

**Key words:** Estimation error, fluorescent silica nanoparticle, membrane damage, pilot scale membrane integrity test, tracer

**주제어:** 추정 오차, 형광 실리카 나노입자, 막 손상, 파일럿 규모 분리막 무결성 검측, 추적자

## 1. 서 론

1990년 대 이후 분리막을 이용한 수처리 시장은 기하급수적으로 성장하였고, 먹는 물의 60%가 분리막을 통해 생산되어지고 있다(David et al., 2008). 이는 해수 담수화 방법으로써 기존 증발법에 비해 적은 에너지를 사용하는 역삼투 분리막(Reverse Osmosis Membrane)을 적용하는 사례가 꾸준히 증가하고 있기 때문이다(Khan, 1986). 국

내의 경우 2010년 ‘물 재이용 기본계획(2011~2020)’에 준하여 정책적으로 적극적인 하폐수 재이용을 추진함에 따라 다수의 처리장에서 분리막을 적용하는 사례가 증가하고 있다(Ministry of Environment, 2010). 이처럼 분리막을 이용한 수처리 방법이 각광을 받고 있는 이유는 다양한 수질의 원수를 처리하는데 있어서 안정적인 처리수질을 보장하고, 병원성 미생물 관리가 용이하며 소요 부지면적 축소 등의 이점이 있기 때문이다(K. Sutherland, 2010).

막분리 공정을 수처리 시스템에 적용하는데 있어서 가장 중요한 요인은 효과적인 막 오염 제어를 통한

Received 4 January 2016, revised 12 January 2016, accepted 15 January 2016.

\*Corresponding author: Cho Jinwoo (E-mail: jinwoocho@sejong.edu)

pp. 001-008
pp. 009-017
pp. 019-031
pp. 033-040
pp. 041-049
pp. 051-058
pp. 059-067
pp. 069-075
pp. 077-085
pp. 087-097
pp. 099-104
pp. 105-111

안정적인 처리수량의 확보이다. 따라서 국외의 많은 연구자들은 분리막 오염현상 기작 규명 및 오염 제어에 대한 연구를 진행하여 왔으며 국내 막 오염 제어 기술 역시 그동안의 연구개발 과정을 통해 상당한 막 오염 제어 전략과 기술을 보유하고 있는 것으로 평가되고 있다. 또한 막 오염 제어와 더불어 분리막 표면이나 모듈 및 전체 시스템의 무결성(integrity)을 확보하고 운전 중에 이를 모니터링 하는 것도 분리막 공정의 현장 적용에 있어서 매우 중요한 사항이다. 즉, 분리막 표면의 스크래치, 찢어짐, 파손 등 물리적인 손상여부, 분리막 내구성 변화로 인한 손상, 화학적 세정과정에서 분리막 표면 및 프레임의 변형 또는 손상 등을 상시 감시하고 문제발생 시 빠르게 대처할 수 있어야 한다. 이는 처리수의 안정적이고 안전한 수질 확보를 위해서 반드시 필요하다(Giglia et al., 2008).

실제 현장에서 적용되고 있는 분리막 무결성 검측 방법은 직접적인 방법(direct method)과 간접적인 방법(indirect method)으로 나눌 수 있다. 직접적인 방법은 분리막 모듈 자체를 대상으로 표면과 모듈의 손상이나 무결성을 검측하는 것이고, 간접적인 방법은 생산된 처리수의 수질변화를 살펴봄으로써 손상 발생 또는 무결성의 저하 여부를 판단하는 방법이다. 대표적인 직접적 관측법으로는 Pressure Decay Test (PDT), Diffusive Air Flow (DAF) 및 Bubble point test 등이 있으며, 간접법으로는 입자수 계측(Particle counting)과 탁도 관측(Turbidity monitoring)등이 대표적인 방법이다(Adham et al., 1995; Randles, 1997). PDT는 분리막 모듈 내부에 압력을 가하고 시간에 따른 압력 변화율을 관찰함으로써 모듈의 손상여부를 감지하는 방법이다. PDT는 실험이 간단하고 민감도가 높은 신뢰할 수 있는 방법이지만 압력을 이용하여 테스트를 수행하기 때문에 분리막 모듈이 손상되지 않을 정도의 적당한 압력을 설정하는 것이 중요하고 따라서 이 압력을 견디지 못하는 모듈에는 적용이 불가능하다. 또한 운전을 정지하고 off-line 상태에서 분리막 모듈을 테스트해야 한다는 단점이 있다.(Guo et al., 2010). DAF는 일정 압력의 공기가 분리막 공극을 통과 또는 확산되어 나오는지 여부로부터 표면 무결성을 검측하는 방법이다(Cheryan, 1998). 이 방법은 실험이 쉽고, 비교적 높은 검측 정확도를 가지고 있지만 온도에 매우 민감하고 테스트를 수행하기 위해 별도의 관로 설치가 필요하며 측정 설비를 위한 공간을 많이 요구한다는 단점

이 있다(Guo et al., 2010). Bubble Point Test는 공기를 역으로 주입하고 분리막 표면을 통해 누출되는 공기 방울수를 직접 관측하여 표면 손상을 판단하는 방법이다. 이 방법은 정밀여과(Microfiltration) 또는 한외여과(Ultrafiltration)와 같이 공극의 크기가 마이크로미터 단위인 모듈에 적용될 경우 실제로 분리막 표면이 손상되지 않았음에도 불구하고 공기 방울이 누출됨으로써 잘못된 관측이 될 수 있는 가능성이 매우 크다는 단점이 있다(Guo et al., 2010). Particle counting은 유출수 중 입자농도 또는 개수를 직접 모니터링하고 분리막의 손상여부를 판단하는 방법이다(Panglisch et al., 1998). 이 방법은 관측 장비인 Particle counter의 검측 한계치 이하의 크기를 가지는 입자를 모니터링 할 수 없으며 감압에 의해 처리수를 생산하는 침지형 분리막 모듈의 경우 유출수내 포함되는 공기방울을 유출입자로 오인함으로써 잘못된 판단을 하게 될 가능성이 높다는 단점이 있다. Turbidity monitoring는 Particle counting과 유사하며 다만 유출수의 탁도 변화를 관측한다는 차이가 있다. 이 방법 역시 Particle counting과 동일한 단점을 가지고 있으며 미세한 손상은 판별하기 어렵다(Guo et al., 2010). 또한 이상의 방법들은 공통적으로 손상부위의 면적을 정량적으로 추정하지는 못한다는 한계점을 가지고 있다.

따라서 기존 분리막 표면 검측 방법들의 단점을 보완하기 위하여 다양한 검측방법들이 제시되고 있다. 새로운 검측 기술들에 대한 해외 연구동향을 살펴보면, 환경적으로 무해하고 검측실험 중 안전성과 안정성을 유지할 수 있는 미생물 probe를 적용하거나, 나노 자성입자(Magnetic particles) 또는 금 나노입자 등의 특수한 입자(Nano probe)를 적용(Deluhery et al., 2008; Gitis et al., 2006)하는 등 특수한 tracer를 개발하고 측정의 민감도를 높이는 방향으로 연구를 수행한 사례와 tracer를 사용하지 않고 분리막 모듈 내 압력 변화를 보다 정밀하게 측정하여 막 손상여부를 판별하는 연구(Phattaranawik et al., 2008) 사례 등이 있다. 국내의 경우는 형광입자를 추적자(tracer)로 주입하여 하고 손상 부위를 통해 누출되는 유출수 내 포함된 tracer에 자외선을 조사하여 발광하는 형광강도를 측정함으로써 분리막 모듈의 손상여부와 손상 면적을 동시에 추정할 수 있는 새로운 방법을 제시한 사례가 있다(Choi et al., 2011; Suh et al., 2011; Choi et al., 2014). 상기 새로운 방법들은 현재까지는 실험실 규모



의 기초연구단계 수준으로써 향후 실제 현장적용을 위한 추가적인 연구가 진행될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 형광입자를 추적자로 적용하는 검측 방법의 현장 적용 가능성을 살펴보고자 한다. 이를 위하여 파일럿 규모(10톤/일)의 침지식 평막형 모듈이 설치된 플랜트를 대상으로 검측 실험을 수행하고 그 결과로부터 제시된 검측방법을 통해 분리막 표면의 손상 여부 판별이 가능한지 여부와 손상 면적의 추정이 얼마나 정확하고 정밀하게 이루어질 수 있는지를 조사해보고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 막 검측 및 손상 면적 추정

형광입자를 이용한 분리막 검측 방법의 원리, 개요 및 형광입제 제조방법은 기존 연구에 상세히 제시되어 있다(Choi et al., 2011). 검측 개요를 간략히 설명하면 다음과 같다. 검측대상 분리막 공극의 크기보다 큰 직경의 형광입자를 추적자(tracer)로 주입한다. 이후 분리막을 통해 유출수를 생산하는 과정에서 만약 표면이나 모듈에 손상이 존재하는 경우에는 손상부위를 통해 형광입자가 누출되고 따라서 유출수에는 이 입자가 포함된다. 이렇게 누출된 형광입자를 포함한 유출수에 자외선을 조사하여 형광입자의 발색을 유도하고 발색영상을 촬영하여 형광이미지를 획득한 뒤 이미지 분석을 통해 형광강도를 수치화한다. 동일한 검측조건하에서 손상면적이 클수록 더 많은 형광입자가 누출되고 이에 따라 촬영된 이미지의 형광강도가 높아질 것이다. 따라서 손상 면적의 크기는 유출수 이미지의 형광강도로부터 추정될 수 있다.

본 연구에서는 파일럿 규모의 분리막 시스템의 유출수 관로에 형광 검측기를 부착하여 실시간으로 분리막 표면 검측을 수행할 수 있도록 하였다. 실시간 검측기의 중심부에는 유출수 관로와 연결되는 석영관이 위치해 있고, 석영관의 측면에는 365, 385, 395 nm 파장대의 자외선을 조사할 수 있는 LED lamp를 설치하였다(Fig. 1. 참조). 석영관의 위쪽에 설치된 카메라는 실시간으로 형광입자가 발색하는 형광이미지를 촬영하고 이미지의 RGB값을 분석하여 수치화하고 이 값을 데이터베이스에 저장하도록 구성되어 있다. 저장되는 RGB 값의 평균치를 자동으로 산정하고 검량

선을 이용해 RGB평균값으로부터 누출된 형광입자의 질량을 추정한다. 이렇게 추정된 질량값을 아래 손상 면적 추정식에 대입하여 손상 면적의 추정치를 획득한다. 또한 추정된 손상면적과 실제 손상면적과의 차이로부터 추정값의 오차율을 산정할 수 있다. 손상면적 추정식은 기존 연구에서 제시된 다음의 식을 이용하였다(Suh et al., 2011).

$$A_1 = [2\log(J/P) + 2\exp(J/P) + (m/C)^{(J/P)^J} + (m/C) + 4J] \times [\log(J/P) + (m/C) + (J/P) + J + \exp(J/P) + \log(J/P)] \quad \text{Eq.(1)}$$

여기서,  $A_1$ 은 추정 손상 면적( $\text{mm}^2$ ),  $J$ 는 투과유속( $\text{mm/s}$ ),  $P$ 는 운전압력( $\text{kPa}$ ),  $C$ 는 주입한 형광 나노입자의 농도( $\text{mg/L}$ ),  $m$ 은 유출수를 통해 유출된 형광 나노입자의 추정질량( $\text{mg}$ )이다. 실제 손상 면적은 인위적으로 손상시킨 원의 직경으로부터 계산이 가능하다.

$$B_1 = \frac{\pi}{4} D^2 \quad \text{Eq.(2)}$$

여기서,  $B_1$ 은 실제 손상 면적( $\text{mm}^2$ )이고,  $D$ 는 인위적으로 손상된 원의 직경( $\text{mm}$ )이다. 최종적으로 오차율(%)은  $(A_1 - B_1)/B_1 \times 100$ 으로 산출하였다.

### 2.2 파일럿 실험 장치 개요

제안된 검측방법의 현장 적용 가능성을 살펴보기 위하여 반응조 내부에 침지식 평막형 모듈이 설치된 파일럿 규모(10톤/일)의 실험 장치를 구축하고 이 장치를 대상으로 검측 실험을 수행하였다. 플랜트 개요도, 전경 및 검측기 내부 모습은 Fig. 1에 도시하였다. 반응조 내부에는 총 10개의 분리막 모듈을 설치하였다. 파일럿 플랜트에 대한 자세한 제원은 아래 표에 나타내었다(Table 1).

검측 실험에 사용된 추적자의 평균 직경은 1~1.2  $\mu\text{m}$ 로써 분리막의 공극(0.2  $\mu\text{m}$ )보다 5-10배 크게 설정하였다. 분리막 표면 손상을 모사하기 위하여 1.0 mm의 직경을 가지는 syringe needle을 이용하여 인위적으로 표면에 구멍을 천공하였다. 10개의 분리막 중 첫 번째, 다섯 번째, 열 번째에 분리막의 정가운데 지점에 1.0 mm 직경의 구멍을 양쪽 측면에 한 개씩 천공하여 총 6개의 구멍을 만들었고 이때 실제 손상면적

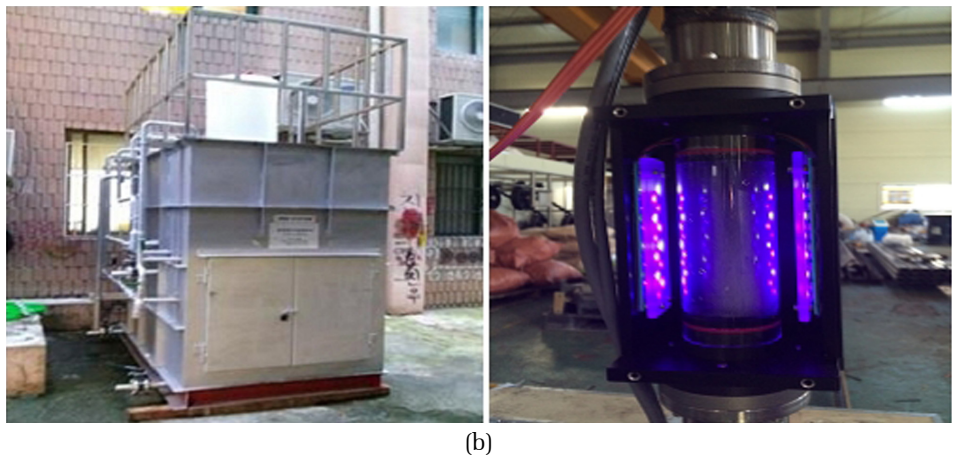
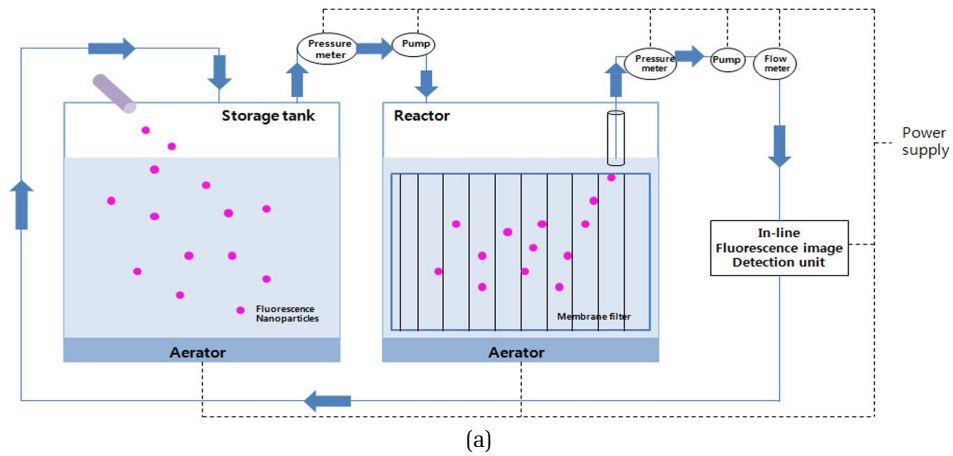


Fig. 1. (a) Schematic of pilot-scale experiment for the membrane integrity test; (b) Picture of pilot scale MBR and fluorescence image detection unit.

Table 1. Specification of pilot-plant scale MBR

Devices	Specification
Membrane bioreactor	1.2 m × 2.0 m × 2.0 m
Membrane module	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Size : 512 mm × 236 mm × 1,300 mm</li> <li>• Type : Flat Sheet</li> <li>• Pore size : 0.2 μm</li> <li>• Manufacturer: YUASA (Japan)</li> </ul>

Table 2. Experiment condition of testing membrane surface integrity

Experiment #	Membrane surface			Inspection condition		
	Hole diameter (mm)	Hole number (ea)	Total damaged area (mm <sup>2</sup> )	Particle concentration (mg/L)	Flux (LMH)	Permeate collection time (min)
1	1	6 ea	4.712	10, 40, 80	40, 60	25, 35

은 4.712 mm<sup>2</sup>이 된다. 다양한 검측조건에 따라 유출수의 RGB값 변화 여부로부터 손상여부 판정이 가능한지 살펴보았다. 또한 획득된 자료를 이용하여 손상 면적을 추정하고 실제 손상면적과의 오차율을 계산하였

다. 실제 손상면적 4.712 mm<sup>2</sup>에 대하여 분리막 운전 flux, 형광입자 주입 농도 및 검측시간 등의 검측 조건을 다양하게 설정하고 각 조건에 따라 검측을 수행하였다(Table 2).

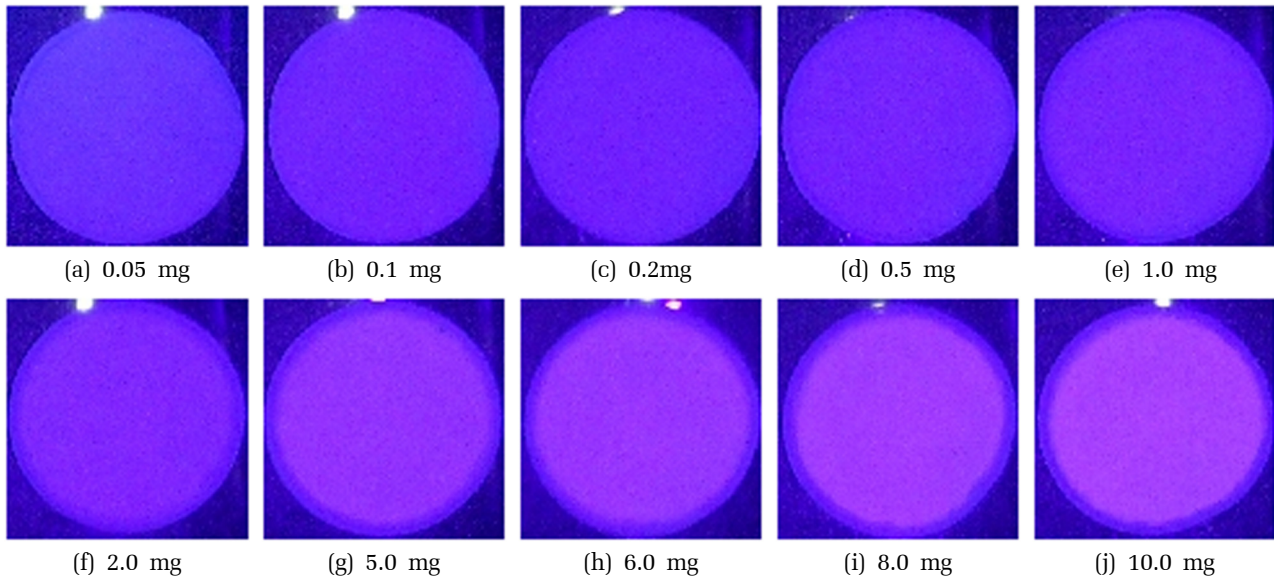


Fig. 2. Fluorescence images of nanoparticles with different masses from 0.05 to 10.0 mg.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 형광이미지와 나노입자 질량 상관 관계식

유출수를 통해 빠져나오는 형광 나노입자의 질량은 형광이미지를 통해 간접적으로 추정하기 위해서 형광 이미지와 나노입자간의 상관 관계식을 도출하였다. Fig. 2는 다양한 농도의 형광 나노입자를 포함한 시료를 GF/C 필터로 여과한 후 암실에서 365nm, 385nm, 395nm 파장의 LED lamp를 조사한 후 촬영한 이미지이다. 이렇게 촬영한 이미지를 1,000×1,000개의 격자로 구분하고 각 격자가 나타내는 RGB의 평균값을 산출하였다. 최종적으로 Fig. 3과 같이 x축은 형광 나노입자의 질량(mg), y축은 모든 격자의 RGB평균값으로 놓고 비선형회귀분석을 통해 형광 나노입자의 질량과 RGB 평균값의 상관 관계식을 다음과 같이 도출하였다.

$$I = 5.9 \ln(m) + 135.7 \quad \text{Eq.(3)}$$

상기 식에서 I는 형광이미지의 RGB평균값, m은 형광입자의 질량(mg)을 의미한다.

#### 3.2 분리막 표면 검측 결과

평막형 모듈의 분리막 한쪽 표면에 직경 1 mm의 구멍을 세 군데씩 양쪽 면에 모두 6군데를 인위적으로 천공하여 총 4.712 mm<sup>2</sup> 면적의 손상을 일으킨 후 형광입자 주입 농도, flux, 검측시간을 변화시키면서

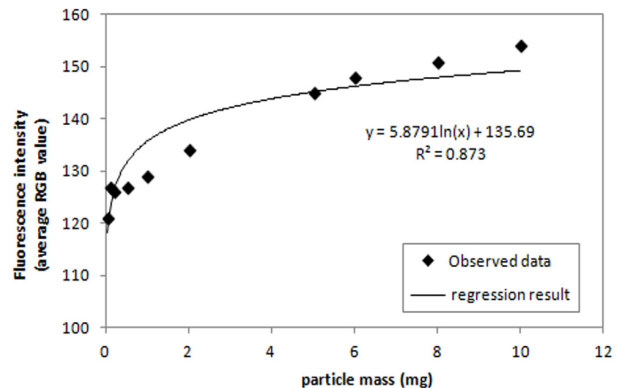


Fig. 3. Relationship between fluorescence intensity (RGB) and mass of particles (mg).

분리막 표면 검측을 수행하였다. 실험조건에 따라 분리막 표면의 손상 부위를 통해 유출되는 입자의 형광강도를 실시간 검측기를 통해 관측하고 형광강도를 평균 RGB값으로 환산한 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 손상이 일어나지 않았을 경우 유출수의 평균 RGB값은 77.65로 측정되었고 따라서 만약 분리막 표면에 손상이 발생하여 이 부위로 형광입자가 누출되었다면 유출수의 평균 RGB값은 손상되지 않았을 경우의 평균 RGB값보다 높은 수치가 관측될 것이다. Fig. 4에서 각 검측 조건에 따라 관측된 평균 RGB값은 최소 81.91에서 최대 114.13로써 손상이 없을 경우 유출수의 평균 RGB값(77.65)보다 높으며 이로부터 분리막 손상 부위로 형광입자가 누출되었음을 간접적으로 확

pp. 001-008  
pp. 009-017  
pp. 019-031  
pp. 033-040  
pp. 041-049  
pp. 051-058  
pp. 059-067  
pp. 069-075  
pp. 077-085  
pp. 087-097  
pp. 099-104  
pp. 105-111

인할 수 있었으며 이는 검측 조건에 관계없이 분리막 표면의 손상여부 판별이 가능하다는 것을 의미한다.

한편, Fig. 4의 결과로부터 형광입자의 주입 농도를 증가시킬수록 유출수에서 측정되는 형광강도(평균 RGB값)가 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, flux 40 LMH, 관측시간 25분인 조건에서 주입되는 형광입자의 농도가 10에서 40 mg/L로 증가될 때 유출수 형광강도의 평균 RGB값은 각각 81.91과 83.40로써 큰 차이를 나타내지는 않았으나 주입농도가 40에서 80 mg/L로 증가하면서 형광강도의 평균 RGB값이 83.40에서 101.76로 22 %가 증가하는 것을 확인하였다. Flux 60 LMH, 관측시간 25분인 조건에서는 주입되는 형광입자의 농도가 10, 40, 80 mg/L로 증가할수록 관측되는 형광강도의 평균 RGB값 역시 각각 78.27, 99.36, 114.13 로 증가하는 것을 볼 수 있다. 동일한 입자 주입농도와 flux에서 검측 시간이 25분에서 35분으로 증가하는 경우를 살펴보면, 주입농도 40 mg/L, flux 40 LMH 인 검측조건을 제외하고 다른 모든 조건에서는 관측되는 형광강도의 평균 RGB값에 큰 차이를 보이지 않는다. 이상으로부터 검측시간은 유출수 형광강도 관측값에 큰 영향을 미치지 않으며, 전반적으로 입자 주입 농도와 flux가 증가할수록 유출수 형광강도의 평균 RGB값이 크게 관측되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 주입 농도와 flux가 증가할수록 동일한 관측 시간 동안 동일한 크기의 손상면적을 통해 누출되는 형광입자의 총 질량이 증가하기 때문이다.

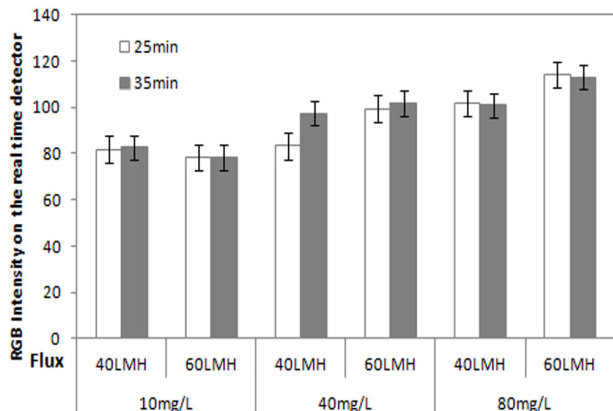


Fig. 4. Effect of fluorescent particle concentration (10, 40, 80 mg/L) and flux (40, 60 LMH) on the RGB intensity of permeate with the testing time of 25 and 35 minutes (Actual damaged area : 4.712 mm<sup>2</sup>, 6 holes with each diameter of 1.0 mm).

### 3.3 손상 면적 추정 및 오차율 분석

Fig. 5는 실제 손상면적이 4.712 mm<sup>2</sup>인 경우 검측 조건 별로 상기 과정에 의해 추정된 손상면적을 나타내고 있다. 결과로부터 입자 주입농도가 증가함에 따라 추정 손상면적이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 검측 조건이 flux 40 LMH, 검측 시간 25분인 경우, 입자 주입농도가 10, 40, 80 mg/L로 증가할 때 손상면적은 2.45, 2.86, 4.65 mm<sup>2</sup>으로 추정되었다. 이때 실제 손상면적 대비 추정 손상면적의 오차율은 각각 -48.01, -39.30, -1.32% 이다. 즉, 입자 주입농도가 증가할수록 손상면적 추정 오차율은 감소하였다. 동일 flux에서 검측시간 35분에 대한 손상면적 추정치는 입자 주입농도 10, 40, 80 mg/L에 대하여 각각 0.53, 4.10, 3.31 mm<sup>2</sup>였고, 실제 손상면적 대비 추정 손상면적 오차율은 -88.75, -12.99, -29.75% 이다. 이상에서 flux 40 LMH인 경우 최소 검측오차는 입자주입농도 80 mg/L 및 검측 시간 25분인 경우가 가장 낮았으며 오차율도 -1.32%수준으로 실제 손상면적과 거의 유사한 면적으로 추정이 가능함을 볼 수 있었다. 최대오차율은 검측시간 35분, 입자주입농도 10 mg/L 일때 -88.75% 이다.

Flux가 60 LMH인 경우 검측시간 25분에 대한 추정치는 입자 주입농도가 10, 40, 80mg/L로 증가할 때 0.42, 1.60, 1.59 mm<sup>2</sup>으로 각각 실제 손상면적과 -91.08, -66.04, -66.26% 의 오차율을 갖는다. 검측시간 35분의 경우에는 주입농도가 10, 40, 80 mg/L로 증가할 때, 손상면적이 0.01, 2.57, 2.72 mm<sup>2</sup>로 추정되었고 이는 각각 -99.79, -45.46, -42.28%의 추정 오차를 가진다.

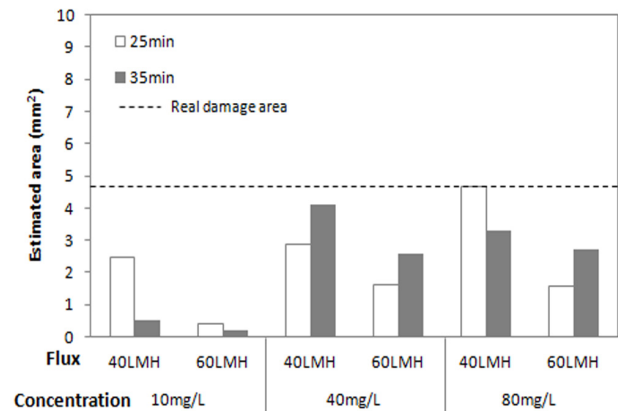


Fig. 5. Effect of fluorescent particle concentration (10, 40, 80 mg/L) and flux (40, 60 LMH) on the estimation of damaged area with different testing time of 25 and 35 minutes for actual damaged hole area of 4.712 mm<sup>2</sup> (6 holes with each diameter of 1.0 mm).



이상에서 flux 60 LMH인 경우 최소오차율은 검측시간 35분, 입자주입농도 80 mg/L일 때 -42.28%, 최대오차율은 검측시간 35분, 입자주입농도 10 mg/L일 때 -99.79%이다.

이상의 결과로부터 동일 조건에서 flux가 40 LMH에서 60 LMH로 증가할수록 검측 오차값과 그 범위가 크게 나타나고, 입자주입농도가 증가할수록 검측 오차는 감소하였음을 알 수 있다. 비록 특정 검측 조건(flux 40 LMH, 주입농도 80 mg/L, 검측시간 25분)에서 실제 손상 면적과 거의 유사한 면적의 추정치를 얻기는 하였으나, 모든 검측 조건에 대한 추정면적 평균값과 평균 오차율을 보면 각각 2.23 mm<sup>2</sup> 및 -52.59%로써 아직까지는 손상면적 추정치는 검측조건의 변화에 매우 민감하게 반응하는 것으로 판단된다. 따라서 향후 검측방법의 견고함을 확보하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

## 4. 결 론

형광입자를 추적자로 사용한 분리막 표면 손상 검측 방법을 파일럿 규모의 분리막 반응조에 적용한 결과 본 연구에서 설정한 모든 검측조건에서 침지형 분리막 모듈의 표면 손상 여부는 100% 검측이 가능하였다. 손상 면적 추정에 있어서는 모든 검측조건에 대하여 실제 손상 면적보다 더 작게 추정되었고 검측 조건에 따른 추정 면적 오차율도 매우 다르게 나타났다. 즉, 실제 손상면적 4.712 mm<sup>2</sup>에 대하여 flux 40 및 60 LMH, 입자주입농도 10, 40, 및 80 mg/L, 검측시간 25분과 35분의 조건으로 검측실험을 수행하였을 때, 추정면적 오차율은 최소 -1.32%에서 최대 -99.79%로 관측되었고 이는 손상면적 추정치가 검측조건 변화에 매우 민감하게 반응하였음을 나타낸다. 따라서 향후에는 추정면적 오차율을 낮추어 보다 정밀한 검측이 될 수 있도록 하고 이를 통하여 검측이 가능한 최소 손상면적의 한계, 즉 검측한계선을 제시할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 반응조 내에서 투입된 형광입자의 물성 변화, 생물학적 분해 가능성, 위해성 등 장기적인 입자 거동과 안정성에 대한 추가적인 연구를 지속적으로 수행하고자 한다.

## 사 사

본 연구는 환경부 환경산업선진화기술개발사업(과제번호 201300134004)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- Sutherland, K. (2010) The rise of membrane bioreactors, *Filtration & Separation*, 47(5), 14
- Ministry of Environment (2010), An study on the setup of master plan for water reuse, Ministry of environment, pp. 1-22
- Khan A.H. (1986) Desalination processes and multistage flash distillation practice, Elsevier
- Giglia, S., and Krishnan, M. (2008) High sensitivity binary gas integrity test for membrane filters, *Journal of Membrane Science*, 323, pp. 60-66.
- Adam, S.S., Jacangelo, J.G., Laine, J.M. (1995) Low-pressure membranes: assessing integrity. *AWWA3*, pp. 62-75
- Randles, N. (1997) Large scale perating experience in membrane systems for water and waste water reclamation. *Desalination* 108 (1-3), pp. 205-211
- Guo, H., Wyart, Y., Perot, J., Nauleau, F., Moulin, P. (2010) Application of magnetic nanoparticles for UF membrane integrity monitoring at low-pressure operation, *Journal of Membrane Science*, 350, pp. 172-179.
- Cheryan, M. (1998) Ultrafiltration and microfiltration handbook. Technomic Publishing Company
- Panglisch, S., Deinert, U., Dautzenberg, W., Kiepke, O., Gimbel, R. (1998) Monitoring the integrity of capillary membranes by particle counters, *Desalination* 119 (1-3), pp. 65-72
- Suh, C., Choi, B.G., Lee, S.H., Kim, D.I., Cho, J.W. (2011) Application of genetic programming to develop the model for estimation membrane damage in the membrane integrity test using fluorescent nanoparticle, *Desalination* 281, pp. 80-87
- Choi, Y.K., Kim, C.A., Kim, H.J., Cho, J.W. (2014) Estimation of damage area on membrane surface by application of fluorescent particles as a surrogate, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 28, No.2, pp. 151-160
- Choi, S.H. Yang, J., Suh, C., Cho, J.W. (2011) Use of fluorescent silica particles for checking the integrity of microfiltration membranes, *Journal of Membrane Science* 367, pp. 306-313
- David, H., Furukawa, P.E., Ch, E. (2008) NWRI Final project Report: a Global Perspective of Low Pressure Membranes
- Guo, H., Wyart, Y., Perot, J., Nauleau, F., Moulin, P. (2010) Low-pressure membrane integrity tests for drinking water treatment a review. *Water research*, 44, pp. 41-57
- Deluhery, J., Rajagopalan, N. (2008) Use of paramagnetic particles in membrane integrity testing, *Journal of Membrane Science* 318, pp. 176-181
- Phattaranawik, J., Fane, A.G., Wong, F.S. (2008) Novel

membrane-based sensor for online membrane integrity monitoring, *Journal of Membrane Science* 323, pp. 113-124

Gitis, V., Haught, R.C., Clark, R.M., Gun, J., Lev, O. (2006)

Application of nanoscale probes for the evaluation of the integrity of ultrafiltration membranes, *Journal of Membrane Science* 276, pp. 185-192