



# 분광측색계에 의한 착색 수돗물 시험방법 연구

## A study on the testing method of discolored tap water by spectrophotometer

김동현<sup>1,2</sup> · 이종금<sup>2</sup> · 오지윤<sup>2</sup> · 김기태<sup>2</sup> · 전항배<sup>1\*</sup>

Dongheon Kim<sup>1,2</sup> · Jonggeum Lee<sup>2</sup> · Jiyeon Oh<sup>2</sup> · Gitae Kim<sup>2</sup> · Hangbae Jun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 환경공학과

<sup>2</sup>청주시 상수도사업본부

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

<sup>2</sup>Waterworks Headquarter, Cheongju City

### ABSTRACT

This study focuses on the application of a new measurement method that quantifies the residual color of filtered water using a spectrophotometer after filtering the discolored substances. It was confirmed through the color and turbidity cross-test that the discolored substances cannot be measured effectively with the current legal color and turbidity test method. Therefore, the National Institute of Environmental Research's filter testing method, which involves filtering the sample through 0.45 μm filter and visually inspecting the color, was improved. A membrane filter colorimetry (MFC) method was established by measuring the color difference ( $\Delta E^*ab(65)$ ) of the filtered filter using a spectrophotometer and expressing it as filter color unit (FCU). Using the MFC method, the FCU for reference materials such as iron and manganese, as well as field samples, was measured. The results showed a high correlation with turbidity, and the color difference patterns varied depending on the type of reference materials and field samples. This indicates that the MFC method is an effective new measurement method of discolored tap water.

Received 12 June 2023, revised 12 July 2023, accepted 14 July 2023.

\*Corresponding author: Hangbae Jun (E-mail: [jhbcbce@cbnu.ac.kr](mailto:jhbcbce@cbnu.ac.kr))

#### 1,2 김동현 (과장) / Dongheon Kim (Director)

충북 청주시 상당구 목련로 62번길 77, 28759  
77, Mongnyeon-ro 62beon-gil, Sangdang-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 28759, Republic of Korea

#### 2 이종금 (팀장) / Jonggeum Lee (Head of Team)

충북 청주시 상당구 목련로 62번길 77, 28759  
77, Mongnyeon-ro 62beon-gil, Sangdang-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 28759, Republic of Korea

#### 2 오지윤 (연구사) / Jiyeon Oh (Researcher)

충북 청주시 상당구 목련로 62번길 77, 28759  
77, Mongnyeon-ro 62beon-gil, Sangdang-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 28759, Republic of Korea

#### 2 김기태 (연구사) / Gitae Kim (Researcher)

충북 청주시 상당구 목련로 62번길 77, 28759  
77, Mongnyeon-ro 62beon-gil, Sangdang-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea

#### 1 전항배 (교수) / Hangbae Jun (Professor)

충청북도 청주시 서원구 흥대로 1, 31080  
1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 31080, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

pp. 177-186

pp. 187-202

pp. 203-214

pp. 215-229

**Key words:** Discolored substances, Fe-Mn, Filter test, FCU(filter color unit), MFC(membrane filter colorimetry)

**주제어:** 착색물질, 철·망간, 여과시험, 필터색도(FCU), 필터색도법(MFC)

## 1. 서 론

인천시 붉은 수돗물 사태 직후인 2019년 10월에 서울신문과 공공의장에서 조원씨앤아이에 의뢰해 실시한 『수돗물 대국민 인식 여론조사』에 따르면 Fig. 1과 같이 수돗물을 마시지 않는 이유로 『이물질이 나와서』가 25.2%로 가장 높았다. 그 외 『막연히 불안해서』가 21.8%로 나타났으며 정수시스템의 신뢰 불가, 상수원이 깨끗하지 않아서, 맛이 없어서(소독냄새 등)가 뒤를 이었다 (Seoul Shinmun, 2020).

상수도 관망 시스템(DWDS)에서 착색 문제는 관망에 축적된 느슨한 입자(Accumulated loose particles)의 재부유가 주요 원인이며, 이들 입자의 기원은 주로 정수처리수이며 (Vreeburg, 2010), 정수장에서 기인하는 입자성 물질은 정수장에서 입자성 물질을 불완전하게 처리하기 때문에 관망에 누적된다 (Vreeburg et al., 2008). 상수관망 자체에서도 입자상물질이 만들어질 수 있는데, 수도관에서 접속부의 부식, 라이닝 물질의 탈착이 원인이다 (Boxall et al., 2003; Slaats et al., 2002).

녹물은 수도관 내에서 산화된 콜로이드상의 수산화제2철이나 망간이 수돗물에 착색을 일으켜 수돗물의 급수과정에서 『녹물민원』의 가장 큰 원인이 된다 (K-water, 2005). 수중의 철(Fe)은 환원적인 조건에서는 Fe(II)이온의 형태로 높은 농도로 나타날 수 있다

(Langmuir, 1997). 2가 철(Fe<sup>2+</sup>) 상태는 일반적으로 가용성인 반면 3가 철(Fe<sup>3+</sup>) 상태는 불용성이다. 용존 산소 함량이 높은 환경에서 3가 상태는 수산기와 반응하여 고체 침전물을 형성한다 (Silveria, 1988). 철은 식수 분배 시스템 (DWDS ; Drinking water distribution system)에서 녹을 발생하고 소독을 위한 유리 염소를 감소시킬 수 있다 (Munasinghe et al., 2017).

망간(Mn)에 대한 미국 환경보호국(EPA)의 2차 최대오염물질 수준(SMCL)은 0.05 mg/L로, 씹쓸한 금속맛, 물속의 흑갈색 입자, 비품과 세탁물 변색의 원인으로 알려져 있다 (Sain et al., 2014). 망간은 수돗물 중에 미량으로 존재하여도 유리 잔류염소에 의해 산화되어 단독으로 존재할 때와 비교하여 약 300-400 배의 색도가 증가한다 (Sommerfeld, 1999). 정수장에서 미처리된 망간이 급배수관에 유입될 경우 흑수의 원인이 된다 (AWWA, 1999).

이러한 느슨한 침적물질(Loose deposit)을 제거하기 위해 미국수도협회(AWWA)에서는 4~5년마다 1회 이상의 플라싱을 실시하도록 권고하고 있으나 (Kim et al., 2015), 국내의 관세척은 수질문제가 있는 관말, 정체구간 등 일부지역 관리에 적용사례 정도가 있다 (K-water, 2021). 2019년 5월 인천 서구에서 수계전환 과정에서 관로 벽면에 붙어 있던 불순물에서 발생한 붉은 수돗물 문제가 전국적으로 확산된 바 있다 (Choe,

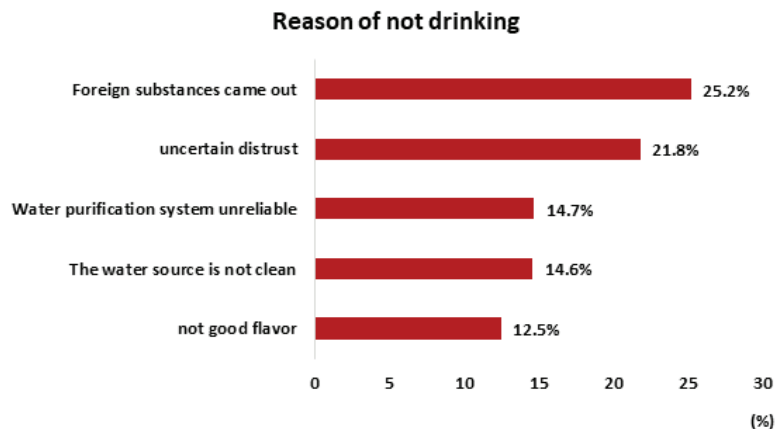


Fig. 1. Survey results : reason of not drinking tap water.



2019). 특히 가정에서 수도꼭지에 정수필터를 설치하는 경우 수중에 미량으로 존재하는 착색물질(Discolored substances)로 인해 단시간에 필터가 변색되는 현상이 다수 발생하였고, 이에 따라 수도물 이용자들은 수도물 공급체계에 대한 불신과 수질 안전성의 의구심을 갖게 되는 상황이 발생하였다 (Lee et al., 2019).

이에 국립환경과학원에서는 수도물의 색깔 입자에 의한 수질 이상에 효과적으로 대응하고 탁도, 색도 등의 수질기준 항목의 한계를 보완하기 위해 수질관리의 한 방법으로 필터시험법을 개발하였다 (NIER, 2020). 그러나 필터시험법은 필터의 색을 육안으로 확인하는 방법으로 정량적 측정이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 분광학적 정량법을 적용하여 수도물의 착색물질을 효과적으로 측정하는 시험법을 연구하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 시료채취 및 착색 표준물질

#### 2.1.1 착색 수도물 시료채취

본 연구에 사용된 시료는 다양한 특성의 착색 수도물을 비교하기 위하여 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 1. 정수지 침전물, 2. 배수지 침전물, 3. 공동주택 저수조, 4. 소화전 및 수용가에서 채취하였으며 개별 채취지점의 특징은 Table 1과 같다.

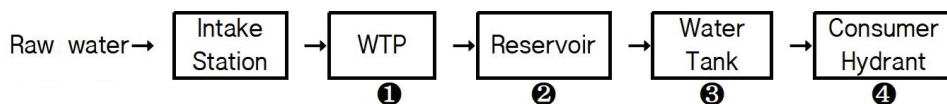
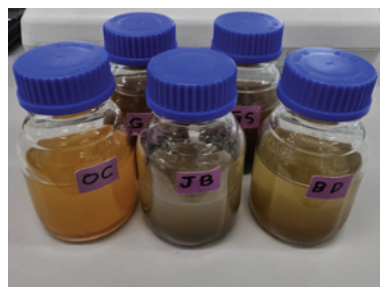


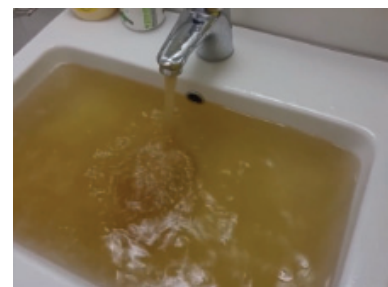
Fig. 2. Sampling points.



(a) JB



(b) Samples



(c) SB

Fig. 3. Discolored tap water samples.

Table 1. Characteristics of the samples

Sample	Classification	Materials	Size	Installing year	
①	JB	WTP, Clear well	Concrete, Epoxy	6,600 m <sup>3</sup>	2016
②	GS	Service reservoir	Concrete, STS lining	5,000 m <sup>3</sup>	2014
				9,000 m <sup>3</sup>	2002
				5,000 m <sup>3</sup>	1998
③	GD*	Apartment water tank	STS	720 m <sup>3</sup>	2008
				344 m <sup>3</sup>	2017
④	SB*	Consumer	Steel/PVC	Φ15 mm	1984
④	OC	Hydrant	Cast iron, Bronze	Φ150 mm	2010

- ① JB : Ji buk
- ② YY : Yul Yang, GS : Gae Sin, GG : Ga Gyeong
- ③ GD : Gagyeong Daewon, BF: Bokdae Fovill
- ④ SB : Sachang Buheung, OC : O Chang
- \* YY, GD, SB : Elemental analysis samples

#### 2.1.2 표준물질

수도 관망에서 착색을 일으키는 대표적인 물질인 철(Fe), 망간(Mn)과 알루미늄(Al) 화합물 중 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O(yellow), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(red), MnO<sub>2</sub>(black), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(white)을 표준물질로 선정하고 Table 2와 같이 준비하였다.

Table 2. Preparation of colored reference materials

Chemical formula	Chemical name (CAS No)	Manufacturer (Product No)	Dissolved color
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	Yellow iron oxide (51274-00-1)	JUNSEI (32226-1601)	yellow
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Iron(III) oxide (1309-37-1)	SAMCHUM (081315-54)	red
MnO <sub>2</sub>	Manganese dioxide (1313-13-9)	JUNSEI (53165-0401)	black
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminium oxide (1344-28-1)	KANTO (01173-00)	white

## 2.2 분석기기 및 필터색도법 적용

### 2.2.1 분광측색계(spectrophotometer)

분광측색계(spectrophotometer)와 색차계(Chroma meter)는 색의 색상, 명도, 채도에 값을 부여하여 색을 수치화하는 방법으로 사람의 눈으로 알 수 없는 미세한 색 차이의 구분이 가능하다 (Serup, 1990).

색을 표현하는 방식인 색 공간(Color space)에는 색상, 명도, 채도로 표현하는 HSV (Hue, Saturation, Value) 색을 가감하여 혼합하는 RGB(Red, Green, Blue)와 CMYK(Cyan, Magenta, Yellow, Key) 그리고 데이터 기반으로 표현된 CIE 색공간 등이 있다 (Smith, 1978). 색 지각의 정의에서 색 공간은 1931년 국제조명위원회 (CIE: Commission internationale de l'éclairage)가 만든 XYZ색 공간이다. XYZ 색 공간 좌표를 기반으로 Hunter 1948 Lab 색 공간이 개발되고, 1976년 CIE에서 색 데이터의 세 제공근 변환을 기반으로 CIE 1976 (L\*,a\*,b\*)이 정립되었다 (Warner,

2014). 본 실험에 사용되는 분광측색계와 색차계는 Fig. 4의 (b), (c)와 같이 CIE L\*a\*b\* 방식의 Konica Minolta CM-3700A와 CM-700d 모델을 사용하였다.

CIE Lab 색 공간에서 Fig. 4의 (a)와 같이 L은 흰색 (100)과 검정(0)의 명도를 나타내고 a와 b는 색상으로, -a는 녹색 +a는 빨간색 축, -b는 파란색 +b는 노란색 축을 나타낸다 (Belasco, 2020). 색차는 색의 차이를 의미하며, 3차원 공간에서의 두 좌표 간 거리가 곧 색차를 의미하며, 그 값(ΔE)은 아래의 식으로 계산된다 (Park et, al., 2019).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

$$= \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$$

한편, 실험에 사용된 Konica Minolta CM-3700A와 CM-700d의 Software인 SpectraMagic NX에 의한 색차 ΔE\*ab(FCU)의 표현형식은 Fig. 5와 같다.

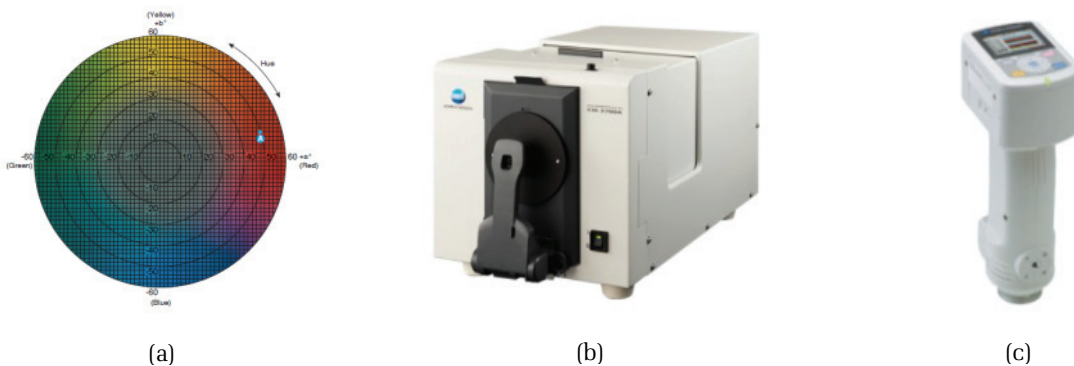


Fig. 4. CIE L\*a\*b\* color space(a), spectrophotometer CM-3700A(b), CM-700d(c).

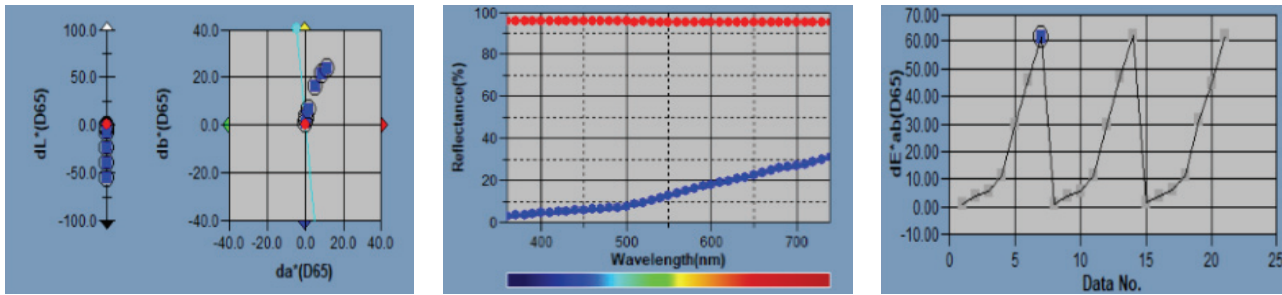


Fig. 5. Display type of  $\Delta E^*ab(FCU)$  by SpectraMagic NX software.

### 2.2.2 색도계(Colorimeter)

현재 우리나라 먹는물수질공정시험기준에서 색도 측정 방법으로 비색법과 분광학적 색도계법이 있다. 비색법은 염산에서 육염화백금산칼륨과-염화코발트로 만들어진 표준용액의 비색관을 육안으로 비교하여 측정하며, Pt-Co 용액에 포함된 백금과 코발트 이온으로 만들어진 기준 용액은 대부분의 자연수의 색조를 모방한다 (Hazen, 1892). 색도의 값은 표준용액 중의 백금(Pt) 농도 즉, 1 mg Pt/L = 1 TCU로 주어진다. 그러나 비색법은 실험자의 육안에 의한 단순 비교방법으로 정확하고 신뢰성 있는 분석결과를 얻기 힘든 단점이 있다. 또한 비색법에 의한 색도 측정에 있어 대부분의 실험자들은 5 TCU 이하의 색은 구별하지 못하는 것으로 보고되었다 (Hongve et al., 1996).

분광학적 색도계 측정방법은 색 성분의 광학적 특성과 화학적 검출방식을 이용한 현대적인 측정방법으로 비색법과 같은 전통적인 측정방법을 대체하고 있다. 분광학적 측정방법 중 다중 파장법은 크게 10 분할법과 30 분할법이 있으며 물속에서 색을 유발하는 다양한 유기·무기 화합물에 해당하는 파장을 선택, 흡광의 원리를 이용하여 색도를 측정하는 방법으로 자연수, 정수, 하수 등 다양한 시료의 색도 측정에 적합한 방법으로 알려져 있다 (Edwards, 1998; Gonsl et al., 2004).

한편, 최근 색도의 측정은 다중파장법을 응용한 색도계를 사용하며, 색도의 측정은 먹는물수질공정시험기준에 따라 시료에 탁질이 있을 경우 간섭영향을 배제하기 위하여 0.45  $\mu m$ 로 여과한 참색도(TCU, True color unit)를 측정한다. 본 연구에서 색도의 측정은 HACH사의 RICO 690을 사용하였다.

### 2.2.3 탁도계(Turbidimeter)

탁도는 빛이 산란 및 흡수되는 물의 광학적 특성의 표현으로 측정 단위에는 Jackson 탁도 단위(JTU), Formazin 탁도 단위(FTU) 및 Nephelometric 탁도 단위(NTU)가 사용된다 (Stern et al., 1978).

우리나라는 수돗물을 포함한 먹는물의 수질기준은 먹는물수질공정시험기준 ES 05308.1d, 2021에 의한 NTU 탁도(turbidity)를 측정하며, 탁도계는 광원부와 광전자식 검출기를 갖추고 있는 탁도계로서 광원인 텅스텐 필라멘트를 이용 측정 튜브 내에서의 투사광에 대하여 산란광을 검출하는 방식이다 (US EPA, 1978; APHA, 2005). 이 방법은 표준용액에 의해 산란된 빛을 측정하여 비교하는 nephelometry 측정법이다. 탁도 표준용액으로 formazin 용액을 사용하고 있으며, 광원은 tungsten lamp를 사용하며 광원과 detector의 각도는  $90^\circ \pm 30^\circ$ 로 측정각도를 사용한다 (Chauncey et al., 2005).

또한 입사광이 광대역 광 spectrum(백색)을 사용하면 산란이 파장에 따라 다르게 광을 산란시켜 매질이 filter의 역할을 하게 된다. 이는 매질의 색이나 측정 cell의 색이 탁도 측정값에 영향을 준다. 색깔 보상은 흡광처럼 큰 영향은 보정하지만 색깔에 따른 산란광의 작은 영향은 보정 하지 못한다. 이 문제를 해결하기 위해 오직 단색광을 사용하도록 규정하고 있다. 단색광을 사용하면 광의 세기만이 탁도 측정의 변수이고 산란 되는 시료의 색상에 따른 영향은 의미가 없다 (Jang, 2007). 따라서 시험법에서는 시료가 색을 띠는 경우 시료중의 빛을 흡수하여 탁도가 낮아질 수 있다고 밝히고 있다 (MOE, 2021). 본 연구에서 탁도계는 먹는물수질공정시험기준을 만족하는 Hach사의 2100AN을 사용하였다.

pp. 177-186

pp. 187-202

pp. 203-214

pp. 215-229



### 2.2.4 필터색도법 (MFC, Membrane filter colorimetry) 개발

본 연구에 사용하는 시험법은 수돗물의 공급과정에서 발생하는 착색물질을 정량적으로 측정하기 위하여, 국립환경과학원 NIER-GP2020-177(2021)의 필터시험법과 ASTM D7843-21(2023)의 MPC(Membrane patch colorimetry)시험을 수정하여 새로운 필터색도법(MFC, Membrane filter colorimetry)을 개발·적용하고, 이 시험법으로 측정된 색차인  $\Delta E^*ab$ 값을 필터색도(FCU, Filter color unit)라고 하고자 한다.

이 시험방법은 수돗물 등 먹는물의 불용성 착색물질을 필터를 사용하여 Table 3과 같은 기준으로 아래의 필터색도법(MFC) 시험절차에 따라 분석하는 방법이다.

Table 3. Apparatus and conditions of MFC method

Filtrate volume	Filter dimension, Pore size	Material of membrane	Vacuum pressure
1 L	47 mm, 0.45 $\mu$ m	MCE* or CA*	33 kPa↓

\* Mixed cellulose ester(MCE), Cellulose acetate(CA)

착색물질의 필터색도법(MFC)의 시험절차는 다음과 같다.

1. 필터 지지대와 필터 깔대기 중간에 필터를 놓고 필터 홀더로 고정한다.
2. 진공(33 kPa 이하)을 연결하고 소량의 물로 필터를 적셔준다.
3. 시료를 30초 동안 격렬하게 혼합하여 착색물질을 균질하게 한다.

Table 4. Cross-test of chromaticity and turbidity

Chromaticity		Turbidity		Turbidity		Chromaticity	
Std (CU) <sup>1)</sup>	Avg (CU)	min (NTU) <sup>2)</sup>	max (NTU)	Std (NTU)	Avg (NTU)	Direct (CU)	Filter (TCU) <sup>3)</sup>
1	1.0±0.00	0.055	0.070	0.1	0.13±0.01	0.4±0.49	0
3	3.0±0.00	0.052	0.075	0.3	0.31±0.02	1.4±0.49	0
5	5.0±0.00	0.054	0.065	0.5	0.51±0.01	2.0±0.00	0
10	10.2±0.40	0.055	0.079	1.0	1.02±0.04	5.0±0.00	0
30	31.0±0.00	0.050	0.081	3.0	2.85±0.18	14.6±0.49	0
50	52.4±0.49	0.057	0.075	5.0	4.77±0.28	25.0±0.89	0

1) CU : Color unit

2) NTU : Nephelometric turbidity unit

3) TCU : True color unit

4. 혼합 후 즉시 시료 1 L를 필터 깔때기에 붓는다.
  5. 최소 35 mL의 물로 필터 깔때기를 행군 후 여액이 완전히 흐르도록 한다.
  6. 필터를 조심스럽게 분리하여 페트리디쉬에 넣고 공기 중에 3시간 건조한다.
  7. 증류수 1 L를 여과한 필터를 이용하여 분광측색계로 바탕 색상을 측정한다.
  8. 측정된 증류수 바탕 색상과 시료의 색상 차이(색차)  $\Delta E^*ab$  선택한다.
  9. 분광측색계 CIELAB  $\Delta E^*ab$  값은 소수점 첫째 자리까지 기록한다.  $\Delta E^*ab$ 값을 필터색도(FCU)\*로 한다.  $\Delta E^*ab$ 값이 4.0이면 4.0 FCU로 읽는다.
- \* 필터색도(FCU : Filter color unit)=  $\Delta E^*ab$  = 색차

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 색도, 탁도 교차실험

수돗물의 착색 사고(Discoloration events) 발생 시 일반적으로 색도, 탁도 항목에 의해 먹는 물로 적합 여부가 판단됨에 따라, 현행 시험법에 따른 색도와 탁도 측정의 수질관리 신뢰성과 한계를 확인하기 위하여 색도와 탁도의 교차시험을 실시하였다. 먹는물수질공정시험기준과 Standard methods의 색도표준용액( $K_2PtCl_6+CoCl_2 \cdot 6H_2O$ )을 이용하여 탁도를 측정하고, 탁도표준용액( $(NH_2)_2 \cdot H_2SO_4+(CH_2)_6N_4$ )을 이용하여 색도를 측정한 결과 Table 4와 같이 나타났다.

교차실험 결과, 색도표준액(1~50 CU)의 탁도 측정 결과는 색도의 농도와 관계없이 모두 0.050~



0.081 NTU로 나타나, 현행 시험법의 황색 Pt-Co 색도 용액은 탁도값으로 측정되기 어려운 것으로 나타났다(Table 4). 이와 같은 결과는 입사광이 광대역 광 spectrum(백색)을 사용하면 산란이 파장에 따라 다르게 광을 산란시켜 매질이 filter의 역할을 하게 되며, 이는 매질의 색이나 측정 cell의 색이 탁도 측정값에 영향을 준다는 연구(Jang, 2007)와 일치하는 결과로써 현행의 탁도검사의 한계를 보여주며, 수돗물 착색 사고 발생 시 가정에서 필터가 변색해도 탁도가 수질기준에 적합으로 나타나는 이유를 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 탁도표준액의 색도 시험 결과 탁도표준액을 여과 없이 그대로 측정하면 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 NTU에 따라 평균 0.4, 1.4, 2.0, 5.0, 14.6, 25.0 CU의 증가추세로 나타났다. 하지만 먹는물수질공정시험기준에서 정하는 바와 같이 탁도물질을 0.45  $\mu\text{m}$ 의 필터로 제거한 참색도(TCU)는 모두 0(불검출)으로 나타났다. 이와 같은 결과는 탁도를 동반한 수돗물의 일반적인 착색 사고 발생 시 기존 시험법의 탁도와 색도에 대한 수질검사의 한계를 나타냈다.

### 3.2 착색물질 원소분석

배수지, 저수조, 수용가에서 채취한 침전물과 착색물질의 원소분석을 하기 위하여 주사전자현미경-에너지 분광형 엑스선분광기(SEM-EDS, Scanning electron microscope/energy - dispersive X-ray spectroscopy), 유도결합플라즈마-방출분광기(ICP-OES, Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy)의 분석을 시행하였다.

SEM-EDS 분석결과 Fig. 6과 같이 시료에 가장 많이 함유된 원소의 평균 함유율은 산소(O, 56.42%)와 탄소(C, 29.42%)이며, 철(Fe, 3.53%), 알루미늄(Al, 1.58%), 아연(Zn, 0.45%), 규소(Si, 0.34%), 망간(Mn, 0.25%), 염소(Cl, 0.09%) 순으로 조사되었다. 이런 결과는 탄소(C)와 산소(O)성분은 여과막 자체 대조 시험으로 셀룰로오스 여과막(Cellulose Membrane) 자체의 재질에 기인한 것으로 판단되며, 그 외에 정수처리과정에서 미처리 된 무기응집제 성분인 알루미늄(Al)이 확인된다. 또한, 관망 내에서 재부유한 착색물질인 철(Fe)과 망간(Mn) 성분을 함유하고 있어 유출 시 수돗물의 착색을 일으키는 원인으로 판단된다.

또한, SEM-EDS에서 확인된 알루미늄(Al)과 착색물질인 철(Fe)과 망간(Mn)의 3개 항목을 ICP-OES 분석을 통한 시료별 각각의 농도를 보면, Fig. 7과 같이 알루미늄(Al)은 평균 2.10~150.73( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), 철(Fe)과 망간(Mn)은 각각 41.28~58.88( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )과 1.50~28.45( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )로 나타났다.

이들 물질의 공급과정 중의 변화를 보면 Fig. 7과 같이 알루미늄(Al)과 망간(Mn)은 배수지에서 수용가로 갈수록 침전과 관내 농축으로 농도가 감소하였으나 철(Fe)은 관망 부식의 영향으로 증가하고 있으며, 이는 Fig. 6에서 SEM-EDS의 철(Fe)과 망간(Mn) 분석결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 SEM-EDS와 ICP-OES 분석 결과는 상수도 관망(distribution network)에서의 착색물질(녹물, 흑수, 탁수) 발생이 정수처리 과정에서 미처리된 부유물질과 철(Fe)과 망간(Mn)이 관망에서 느슨한 형태로 결합하여 있다가 수류, 수압의 변동으로 발생한다는 연구(Vreeburg et al., 2008)와 일치된다.

그러나 수돗물에서 착색물질에 의한 사고나 민원 발생시, 현행의 먹는물수질공정시험기준에 의한 철, 망간, 탁도, 색도 등의 검사 결과는 대부분 먹물로 적합한 것으로 판정되어 수돗물의 불신을 키우고 있다. 이와 같은 이유는 이들 검사 항목이 일반적으로 물이나 필터에서 보이는 착색물질을 제대로 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 현행의 탁도, 색도 교차실험을 통해 문제점을 확인하고, 원소분석 착색물질인 철과 망간의 표준용액을 제조하여 앞서 정립한 필터색도법(MFC)에 따라 분광측색계(Spectrophotometer)로 정량하는 착색물질의 새로운 시험법을 적용하였다.

### 3.3 표준물질의 필터색도법(MFC) 실험

앞서 측정한 원소분석 결과 확인된 철(Fe), 망간(Mn)과 알루미늄(Al)의 필터색도법(MFC) 적용을 위해 산화철1수화물( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), 산화제2철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 이산화망간( $\text{MnO}_2$ ), 산화알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 화합물을 철, 망간, 알루미늄으로써 Table 5와 같이 원소분석 결과보다 넓은 농도 범위(1~300  $\mu\text{g}/\text{L}$ )로 단일 표준물질과 복합 표준물질을 조제하여 탁도와 색도를 측정하고 필터색도법(MFC)을 실시하였다.

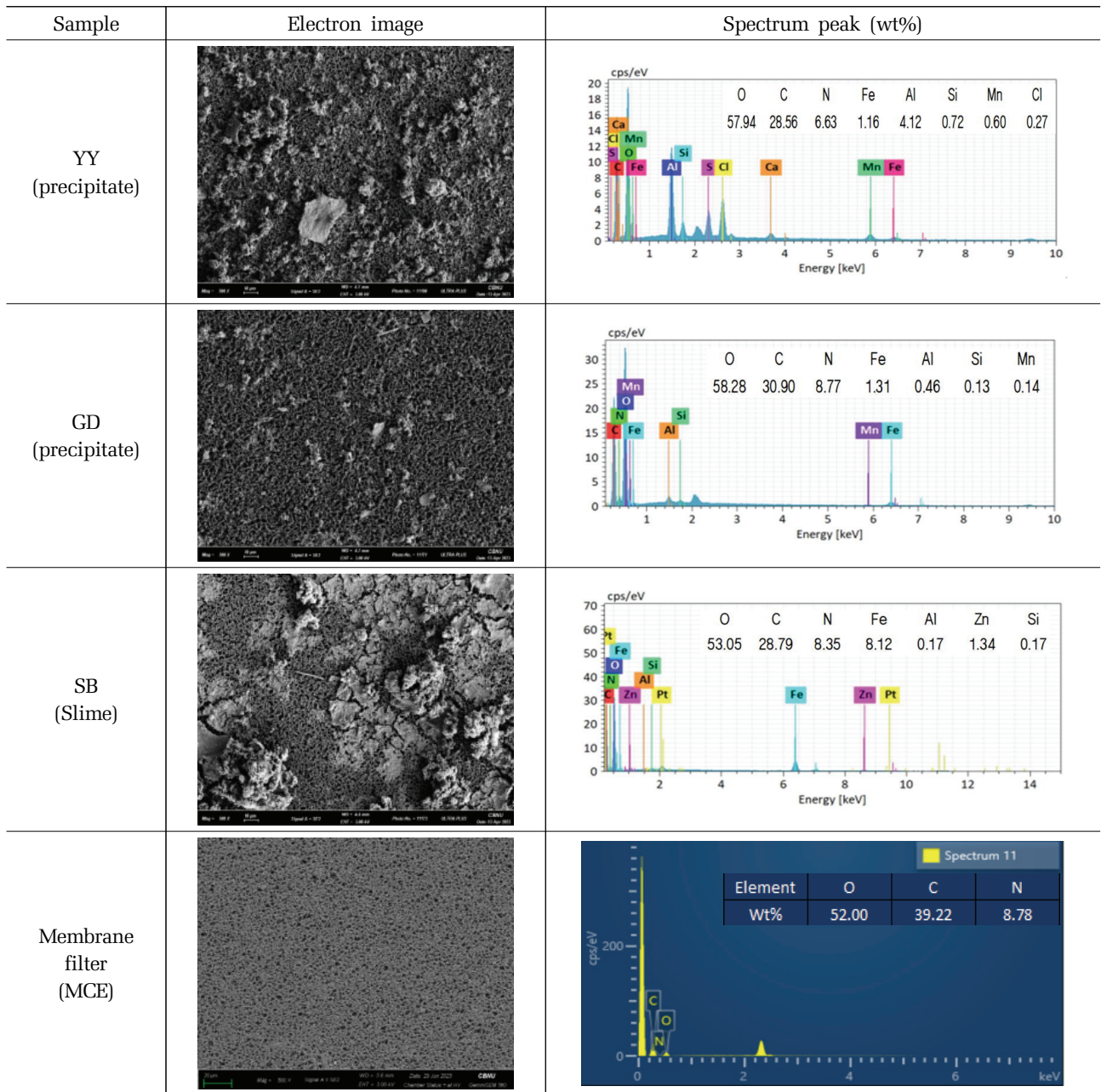


Fig. 6. SEM-EDS images by field samples and MCE filter.

Table 5. Preparation of single and composite reference materials

Reference materials	Concentration (µg/L)						
① Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O (Yellow)	1	5	10	50	100	200	300
② Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Red)							
③ MnO <sub>2</sub> (Black)							
④ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (White)							
Composite ①+②+③+④							



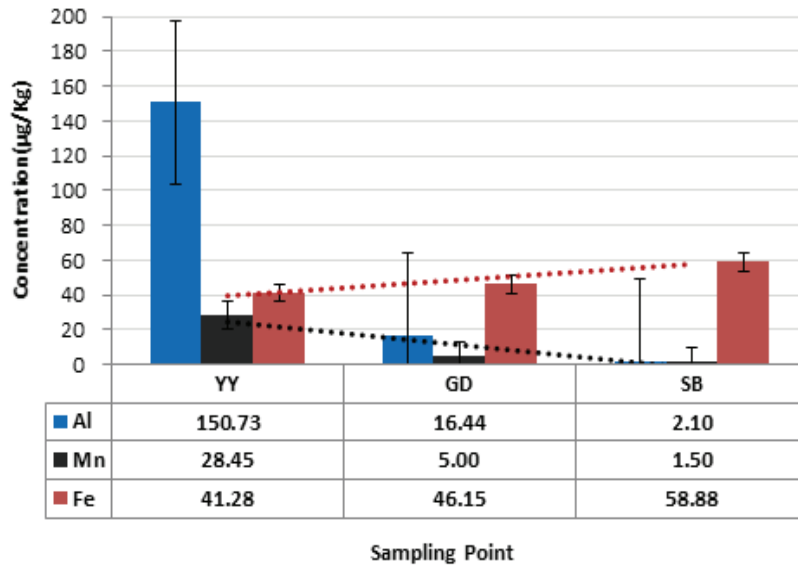


Fig. 7. ICP-OES analysis results of sampling point.

Table 6. Turbidity(Tub) and filter color unit(FCU) of reference materials

Conc. (µg/L)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O (Yellow)		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Red)		MnO <sub>2</sub> (Black)		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (White)		Composite	
	Tub(NTU)	FCU(ΔE*ab)	Tub(NTU)	FCU(ΔE*ab)	Tub(NTU)	FCU(ΔE*ab)	Tub(NTU)	FCU(ΔE*ab)	Tub(NTU)	FCU(ΔE*ab)
1	0.12±0.01	0.48±0.15	0.10±0.00	0.22±0.03	0.08±0.01	0.23±0.01	0.06±0.01	0.64±0.25	0.15±0.02	1.08±0.41
5	0.20±0.01	1.61±0.03	0.15±0.00	0.62±0.02	0.09±0.01	0.31±0.05	0.09±0.01	0.48±0.08	0.29±0.04	2.22±0.12
10	0.30±0.02	2.94±0.26	0.22±0.01	1.19±0.04	0.16±0.01	0.43±0.02	0.20±0.05	0.97±0.09	0.46±0.02	3.97±0.20
50	1.32±0.01	14.06±0.48	0.80±0.05	5.95±0.19	0.25±0.02	1.59±0.02	0.23±0.01	0.46±0.08	2.11±0.16	16.09±0.95
100	2.54±0.01	25.07±0.63	1.51±0.07	11.22±0.20	0.35±0.03	3.23±0.09	0.28±0.05	0.54±0.08	3.97±0.10	28.61±0.41
200	4.96±0.06	42.16±0.67	2.99±0.16	19.23±0.46	0.51±0.02	7.10±0.10	0.34±0.03	0.35±0.06	7.78±0.19	42.99±0.61
300	7.41±0.04	54.23±1.34	4.54±0.09	26.00±0.79	0.65±0.01	9.78±0.25	0.40±0.03	0.52±0.07	11.73±1.27	51.22±0.10
R <sup>2</sup>	0.9999	0.9805	0.9997	0.9897	0.9736	0.9969	0.8192	0.1983	0.9999	0.9504

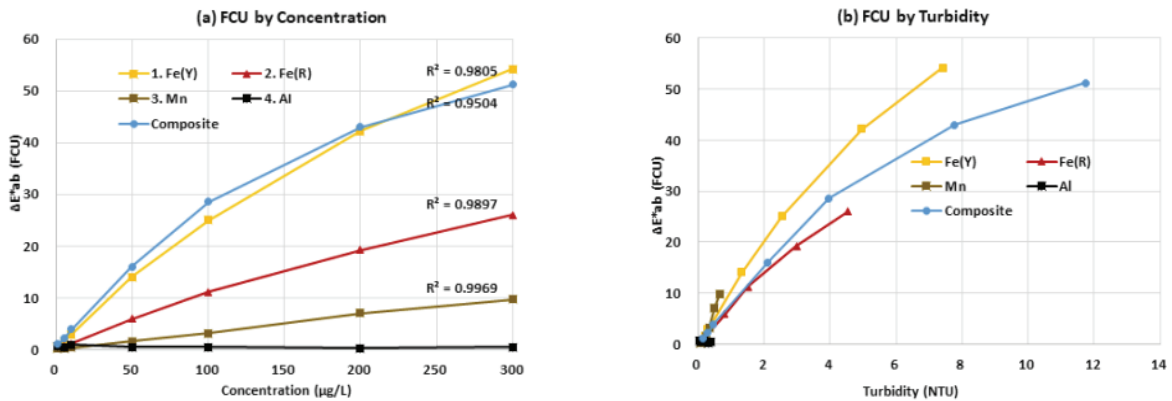


Fig. 8. FCU by concentration(a) and turbidity(b) of reference materials.

Fe (Yellow)							
Fe (Red)							
Mn (Black)							
Al (White)							
Composite							
Conc. (µg/L)	1	5	10	50	100	200	300

Fig. 9. Filter photographs of the reference materials.



실험결과 Table 5과 같이 조제된 표준물질의 농도와 탁도의 상관관계는 Table 6과 같이  $Al_2O_3$ 를 제외하고  $R^2 = 0.9736 \sim 0.9999$ 로 나타났으며, 필터색도(FCU)와는  $R^2 = 0.9504 \sim 0.9969$ 로 높게 나타나, 분광측색계(Spectrophotometer)를 이용한 필터색도법(MFC)이 착색물질을 효과적으로 측정할 수 있음을 보여준다.

한편, Table 6과 Fig. 8(a)와 같이 착색물질의 농도에 따른 필터색도(FCU)값은  $Fe(Y) > Fe(R) > MnO_2$ 과 같이 나타났으며,  $Al_2O_3$ 은 필터색도를 나타내지 않았다. 복합표준물질의 탁도는 단일표준물질 탁도의 산술합계에 근접했으나, 필터색도(FCU)는 단일표준물질 중 가장 높은 필터색도를 나타낸 Fe(Y)와 유사한 결과를 나타냈다. 또한 Fig. 8(b)에서와 같이 탁도에 따른 필터색도를 보면 복합표준물질의 필터색도(FCU)가 Fe(Y)보다 낮게 나타났다.

또한, 복합표준물질의 경우 0.005 mg/L에서 필터색도( $\Delta E^*ab$ )가 2.22로 나타났는데, 이는 망간(Mn)의 수돗물 수질기준인 0.05 mg/L보다 10배 낮은 농도이다. 이러한 결과는 미국치과의사협회에서 색차가  $\Delta E^*ab$  2 이상이면 색조차이가 있다고 보는 규정(Wozniak, 1987)을 초과하여 수돗물의 착색문제 발생시 탁도는 수질기준 이하이나 색깔에 의한 수돗물의 불만이 야기되는 원인으로 사료된다. 따라서 관망에서의 수돗물 수질관리를 위해서는 철, 망간, 탁도, 색도 등의 항목보다 필터색도법(MFC)을 적용함이 효과적일 것으로 사료된다. 표준물질의 필터색도법(MFC)에 의해 과된 필터의 사진은 Fig. 9와 같다.

### 3.4 현장시료의 필터색도법(MFC) 실험

급수계통에서의 다양한 착색시료 실험을 위하여 정

수지-배수지-저수조-소화전에서 채취한 5개의 시료에 대하여 실험을 시행하였다. 먼저, 각각의 시료를 약 1,000 NTU가 되도록 시료 원액을 조제하였다. 이 시료 원액을 1 L의 증류수에 탁도가 0.1~10 NTU가 되도록 0.1~10 mL의 7단계로 희석한 후 탁도, 색도(CU, TCU) 및 새로운 시험법인 필터색도법(MFC, Membrane filter colorimetry)을 수행하였다.

현장시료의 색도 측정 결과 Table 7와 같이 시료의 결보기 색도(CU)는 평균 0.0~27.3 CU로 나타났으며, 시료량 1 mL/L (평균 1.00 NTU±0.06)에서 OC시료가 최대 3.0 CU로 수돗물 색도의 수질기준인 5 CU보다 낮게 나타났다. 또한 시료를 0.45  $\mu m$ 로 여과한 참색도(TCU)는 모두 0으로 나타나, 앞선 탁도·색도 교차시험 실험 결과와 같이 현행 먹는물수질공정시험기준에 따른 색도 시험 항목은 수질 사고시 수돗물 착색을 판정하는 기준으로 이용하기 어려운 것으로 사료된다.

한편, 현장시료의 주입량과 필터색도(FCU)와의 상관관계는 Table 8과 같이  $R^2 = 0.8449 \sim 0.9482$ 로 높게 나타나, 필터색도법(MFC)을 이용한 착색물질의 측정이 새로운 시험법으로 정립될 수 있음을 보여준다. 현장시료의 필터색도법(MFC) 사진은 Fig. 10과 같다.

또한, 현장시료와 표준물질의 탁도에 따른 필터색도(FCU)는 Fig. 11(a), (b)와 같이 현장시료 OC에서 가장 높게 나타났으며, 그 외 현장시료와 표준물질의 FCU는 시료에 따라 다양한 특성을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 수돗물에서 발생하는 착색물질이 같은 탁도에서도 다양한 차이를 나타낼 수 있다는 것을 보여준다. 따라서 수돗물에서 착색사고 발생시 탁도와 색도 중심으로 대처하는 것은 시민들이 불편을 느끼는 수돗물의 색을 반영하기 어렵다고 사료된다.

Table 7. Color unit(CU) and true color unit(TCU) of the field samples

Volume (mL/L)	JB		GS		GG		BF		OC	
	CU	TCU	CU	TCU	CU	TCU	CU	TCU	CU	TCU
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0
0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	2.0	0.0
1	0.0	0.0	0.7	0.0	2.0	0.0	2.7	0.0	3.0	0.0
3	2.0	0.0	2.0	0.0	6.3	0.0	7.3	0.0	8.0	0.0
5	3.7	0.0	4.0	0.0	10.0	0.0	10.3	0.0	13.3	0.0
10	6.0	0.0	6.0	0.0	18.7	0.0	21.0	0.0	27.3	0.0

JB							
GS							
GG							
BF							
OC							
Volume (ml/L)	0.1	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0

Fig. 10. Filter photographs of the field samples.





Table 8. Turbidity(Tub) and filter color unit(FCU) of the field samples

Volume (mL/L)	JB		GS		GG		BF		OC	
	Tub (NTU)	FCU ( $\Delta E^*ab$ )	Tub (NTU)	FCU ( $\Delta E^*ab$ )	Tub (NTU)	FCU ( $\Delta E^*ab$ )	Tub (NTU)	FCU ( $\Delta E^*ab$ )	Tub (NTU)	FCU ( $\Delta E^*ab$ )
0.1	0.14±0.01	1.21±0.04	0.13±0.01	0.97±0.15	0.11±0.01	1.34±0.09	0.11±0.01	1.98±0.15	0.14±0.00	2.47±0.13
0.3	0.31±0.00	3.73±0.12	0.30±0.01	3.01±0.06	0.31±0.01	4.25±0.06	0.31±0.01	6.08±0.28	0.33±0.01	6.92±0.22
0.5	0.51±0.01	5.68±0.39	0.51±0.00	5.10±0.49	0.51±0.01	7.67±0.33	0.51±0.01	9.85±0.14	0.51±0.00	11.99±0.78
1	1.01±0.01	11.24±0.17	1.00±0.02	10.36±0.55	1.01±0.03	13.99±0.34	1.00±0.01	18.15±0.34	0.99±0.03	20.89±0.19
3	3.00±0.03	30.47±0.87	3.03±0.02	26.38±1.23	2.93±0.09	33.67±0.36	2.92±0.01	39.89±0.69	2.98±0.04	49.62±0.24
5	5.02±0.09	45.75±0.88	5.07±0.01	38.95±0.48	4.97±0.08	44.13±0.01	5.07±0.01	50.07±0.36	5.01±0.02	68.47±0.80
10	10.12±0.14	61.70±0.34	10.14±0.20	54.54±0.78	9.93±0.20	50.52±4.53	10.02±0.01	59.84±0.60	9.88±0.09	80.49±0.13
R <sup>2</sup>	0.9999	0.9392	1.0000	0.9482	1.0000	0.8449	0.9998	0.8552	1.0000	0.8717

Table 9. Statutory water quality test at the end of the water pipe

Items	Relevant laws and regulations
End of pipe	The drinking water inspection rules : article 4
Monitoring	
Old water pipe	
Key management area	The waterworks act : article 21
Before the supply	The waterworks act : article 21
Water pipe cleaning	Ministry of environment notice : 2021-43
Home tap water quality test	No relevant laws

그리고, Fig. 11(b)와 같이 표준물질과 현장시료의 탁도에 따른 필터색도(FCU)를 중복시켜 보면 현장시료(푸른색 계열)의 FCU가 표준물질(붉은색 계열)의 FCU 보다 비교적 높게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 현장시료의 경우 철(Fe), 망간(Mn) 이외에 다양한 착색물질이 존재하여 필터색도를 증가시키는 것으로 판단된다.

위와 같은 연구 결과를 바탕으로 탁도의 수돗물 수질기준인 0.5 NTU를 중심으로 탁도에 따른 필터색도(FCU)의 분포를 보면, 현장시료의 탁도와 필터색도(FCU)는 Fig. 12과 같이 탁도의 증가에 따라 필터색도가 증가하지만 현장시료의 종류에 따라서 같은 탁도에서도 필터색도(FCU)는 다양하게 분포하고 있다. 특히, 수돗물 수질기준인 0.5 NTU부근에서 살펴보면,

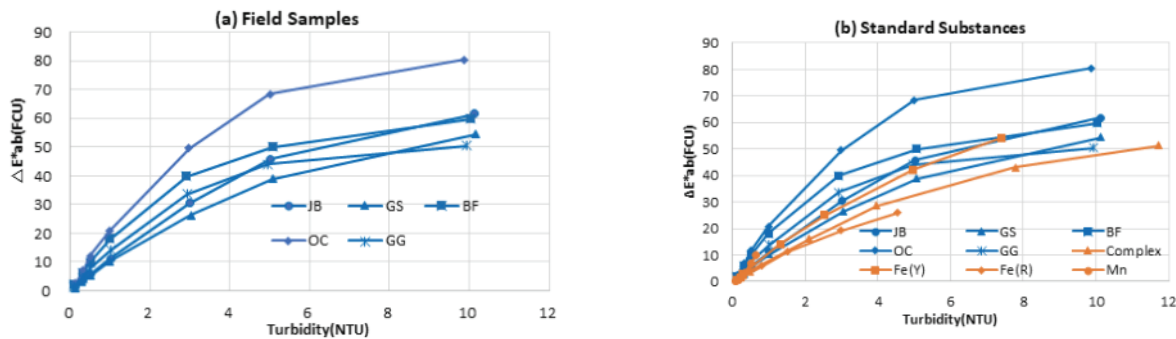


Fig. 11. Turbidity and FCU of the field samples(a) and reference materials(b).

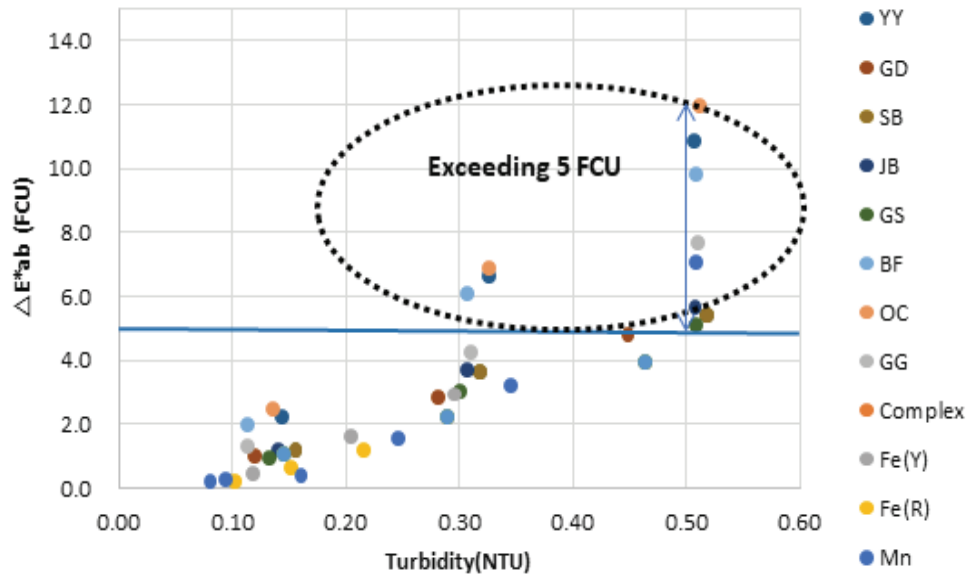


Fig. 12. Dispersion of samples exceeding 5 FCU

시료의 평균탁도 0.51 NTU(S.D±0.001)에서 필터색도는 약 5~12 FCU(평균 8.06 FCU(S.D±2.58))로 편차가 크게 나타나고 있다.

이와 같은 연구결과로 볼 때, 현행의 먹는물수질공정시험기준상의 탁도를 이용한 착색 수돗물 관리는 시민들의 수돗물의 불안을 해소할 수 없으므로 필터색도법(MFC)에 의한 관리가 필요하다. 필터색도법(MFC)에 의한 수돗물 착색물질의 관리기준은 10 FCU 정도에서 정할 수 있을 것으로 사료되며, 향후 관련 종사자와 연구기관의 후속 실험을 통해 수질기준을 정립할 수 있을 것으로 기대한다.

연구결과를 종합해 볼 때 필터색도법(MFC)에 의한 필터색도(FCU)의 수질기준이 정해지면 수계전환, 송·배·급수관 교체공사, 누수사고에서 돌발적으로 발생하는 『붉은 수돗물, 녹물, 흙탕물』 등의 착색 수돗물에 의한 수질사고 시 수돗물의 정상 공급 여부를 판단하는 유용한 검사항목이 될 것으로 사료된다.

또한, 구체적인 수질기준이 설정되기 이전에도 Table 9와 같이 현재 수도사업자가 수행하고 있는 관말수도꼭지, 급수과정, 노후관 등의 법정수질검사 항목을 정비하여 필터색도법(MFC)을 적용하면, 가정용 필터사용이 증가하는 현실에서 수돗물의 고객인 시민이 만족하는 상수도 서비스를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 수돗물의 착색물질에 대한 효과적인 검사를 위해 분광측색계를 이용한 새로운 검사법인 필터색도법(MFC)을 적용하여 필터색도(FCU)를 분석, 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 수도관망에서 유출되는 착색물질을 SEM-EDS 분석 결과 철(Fe)과 망간(Mn)이 확인되었으며, ICP-OES 측정 결과 철(Fe)과 망간(Mn)이 각각 41.28~58.88 (µg/kg)과 1.50~28.45(µg/kg)로 나타났다.
- 2) 색도와 탁도의 교차시험 결과 색도 표준액 1~50 CU는 탁도값이 0.050~0.081 NTU로 낮게 나타났고, 탁도표준액 0.1~5.0 NTU는 간섭물질인 탁질을 0.45 µm의 필터로 제거하였을 때의 참색도(TCU)는 모두 0으로 나타났으며, 표준물질과 현장시료의 참색도(TCU)도 교차시험에서와 같이 모두 0으로 나타나, 현행 시험법에 따른 색도와 탁도 항목에 의한 수돗물의 착색물질 관리에 한계가 있음을 확인했다.
- 3) 수돗물에 착색을 일으키는 대표적인 화합물인 철(Fe)과 망간(Mn)을 표준물질로 조제하여 필터색도법(MFC)으로 실험 결과, 표준물질의 농도와 색차(ΔE\*ab = 필터색도 = FCU)와의 R<sup>2</sup> =



0.9504~0.9969로 정량성이 높게 나타나, 필터색도법이 수돗물의 착색물질 관리를 위한 새로운 시험법으로 유용한 것으로 사료된다.

- 4) 표준물질에서 확인된 필터색도법의 정량성을 현장시료에 적용한 결과, 현장시료 주입량과 필터색도(FCU)의  $R^2 = 0.8449 \sim 0.9482$ 로 높게 나타났으며, 약 0.5 NTU 탁도에서 필터색도는 5~12 FCU로 차이가 크게 나타나, 사용자 중심의 수돗물 착색물질 관리를 위해서는 색도나 탁도보다 필터시험법이 효과적인 것으로 판단된다.
- 5) 향후 분광측색계를 이용한 필터색도법(MFC) 검사결과를 누적·분석하여, 필터색도(FCU)가 착색 수돗물 관리를 위한 새로운 수질검사 항목으로 운영되기를 기대한다.

## References

- APHA. (2005). Standard Methods 2130, Turbidity.
- AWWA. (1999). *Water Quality and Treatment 5th Ed*, Denver.
- Belasco, R., Edwards, T., Munoz, A.J., Rayo, V., and Buono, M.J. (2020). The effect of hydration on urine color objectively evaluated in CIE L\* a\* b\* color space, *Front. Nutr.*, 7, 576974.
- Boxall, J.B., Skipworth, P.J. and Saul, A.J. (2003). Aggressive flushing for discolouration event mitigation in water distribution networks, *Water Supply*, 3(1/2), 179-186.
- Chauncey W. Anderson (2005). USGS National Field Manual for The Collection of Water Quality Data, US Geological Survey, Turbidity, 6.7.
- Choe, H.J. (2019). Incheon's efforts to turn the tap water crisis into an opportunity, water for future : Water engineering research, 52(9), 23-29.
- Edwards, H.O. (1998). An instrument for the measurement of colour and turbidity in natural waters, *Water Sci. Technol.*, 37(12), 263-267.
- Hazen, A.A. (1892). New color-standard for natural waters, *Am. Chem. J.* 14, 300-310.
- Hongve, D. and Akesson, G. (1996). Spectrophotometric determination of water color in Hazen units, *Water Res.*, 30(11), 2771-2775.
- Jang, I.S. (2007). A Study on the Development of Turbidity Sensor for the Biochemical Process, Master's Thesis, Suwon University, 23-24.
- Kim, D.I., Cheon, S.B., and Hyun, I.H. (2015). A study on the removal of particulate matters using unidirectional flushing, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 29(3), 371-380.
- KONICAMINOLTA, [https://sensing.konicaminolta.co.kr/shop/list.php?ca\\_id=10](https://sensing.konicaminolta.co.kr/shop/list.php?ca_id=10) (May 31, 2023).
- K-water. (2005). Iron and Manganese Control Manual, 1-29.
- K-water. (2021). Methods of cleaning pipes to cope with foreign substances, 1-17.
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 600.
- Lee, J.S., Shin, G.J., Bae, I.S., Cho, S.J., Gil, H.K, Lee, M.Y. and Shin, Y.S. (2019). Analysis of Inorganic Components in Colored Tap Water Filters by Inflow of Trace element of Color-causing Substances, *Environ. Anal. Health Toxicol.*, 2019(10), 94-94.
- MOE. (2022). Rules on Drinking Water Quality Standards, Inspection, etc.
- MOE. (2022). The standard of official water quality testing of potable water (The National Institute of Environmental Research Notification, 2013-136.
- Munasinghe, T.S., Abayasekara, C.L., Jayawardana, A. and Chandrajith, R. (2017). The effect of iron corrosion in cast iron pipes on the microbiological quality of drinking water: a laboratory and field investigation, *Ceylon J. Sci.*, 46(2), 99-104.
- NIER(National Institute of Environmental Research). (2020). Guidelines for the Use of Filter Test Methods.
- Park, J.W., Byun, K.S., Cho, S.Y., Kim., B.S. and Oh, J.H. (2019). A study on rapid color difference discrimination for fabrics using digital imaging device, *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, 20(8), 29-37.
- Sain, A.E., Griffin, A. and Dietrich, A.M. (2014). Assessing taste and visual perception of Mn (II) and Mn (IV), *J. Am. Water Work. Assoc.*, 106(1), E32-E40.
- Serup, J. and Agner, T. (1990). Colorimetric quantification of erythema—a comparison of two colorimeters(Lange micro color and minolta chroma meter CR200) with a clinical scoring scheme and laser Doppler flowmetry, *Clin. Exp. Dermatol.*, 15, 267-272.
- Silveria, L. (1988). Groundwater, VoulmeIII "Insitu"ground water treatment, *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Available at; <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E2-09-08-05.pdf>.
- Slaats, N., Rosenthal, L.P.M., Siegers, W.G., Boomen, M.V.D., Beuken, R.H.S., and Vreeburg, J.H.G. (2002). Processes involved in the generation of discoloured water, KOA 02.058. American Water Works Association Research Foundation, Kiwa, The Netherlands.

- Smith, A.R. (1978). Color Gamut Transform Pairs, *Computer Graphics*, 12(3), 12-19.
- Seoul Shinmun, <https://www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20200115008002> (May 31, 2023)
- Sommerfeld, E.O. (1999). *Iron and Manganese Removal Handbook*, AWWA, Denver.
- Stern, E.M. and Stickle, W.B. (1978). Effects of Turbidity and Suspended Material in Aquatic Environments Literature Review, *Encyclopedia of Meat Sciences (Second Edition)*, Academic Press.
- US EPA. (1978). US EPA Method 180.1, Turbidity (Nephelometric).
- Vreeburg, J.H.G., Schippers, D., Verberk, J.Q.J.C. and Van Dijk, J.C. (2008). Impact of particles on sediment accumulation in a drinking water distribution system, *Water Res.*, 42(16), 4233-4242.
- Warner, R. (2014). Measurement of meat quality. Measurements of Water-holding Capacity and Color, Objective and Subjective, 2, Defense Technical Information Center, 164-171.
- Wozniak, W.T. (1987). Proposed guidelines for the acceptance program for dental shade guides, Chicago: American Dental Association, 1-2.