Journal of Environmental Science International
28(11); 1033~1040; November 2019

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.11.1033

TECHNICAL NOTE

담수 어류 총수은 분석용 생물 표준물질 균질성, 안정성 시험평가

이수용* · 이장호 · 정다위 · 심규영 · 이하은 · 박기완
국립환경과학원 자연환경연구과

The Homogeneity and Short-term Stability Test of Bio-matrix Reference Material for Total Mercury Analysis of Freshwater Fish

Soo Yong Lee*, Jangho Lee, David Chung, Kyu-Young Shim, Ha-Eun Lee, Ki-Wan Park
Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea

Abstract

The National Environmental Specimen Bank (NESB) has set up a plan to develop reference materials in the facility for assuring analytical quality and validating analytical methods for its monitoring samples. Some of the crucial characteristics that reference materials must consist of are homogeneity and stability of both intra and inter-bottles. In this study, we examined the homogeneity and stability of cryogenically-milled muscle samples, from Common Carp (Cyprinus carpio) for total mercury. Homogeneity was tested using ANOVA analysis and regression analysis was used to test short-term stability. The variations of total mercury concentration did not significantly differ between the intra and the inter-bottle (F=0.8, p=0.37). Additionally, relative standard deviation of the total mercury concentration showed low values (2.28%). For the short-term stability test, total mercury variations were not statistically significant as demonstrated by the result of the regression analysis (F ratio = 3.11, p = 0.18). This suggests that the cryogenic-milling process has statistically proven the degree of homogeneity and short-term stability for samples of carp muscles in the chemical analysis for total mercury.

Key words : Bio-matrix reference material, Homogeneity test, Short-term stability test, Total mercury

1. 서 론

생물체를 활용한 환경질 모니터링은 이미 많은 국가에서 시행 중이며, 대상 물질과 생물도 매우 다양하다. 특히, 유럽에서는 담수생태계의 수질을 평가하는데 있어 담수어류를 활용하여 수환경을 모니터링하며, 이를 통해 규제물질을 정하고 배출기준을 설정하는데 활용하고 있다(Fliedner et al., 2016). 그리고 담수생태계 위해성을 평가하기 위해 어류에 축적된 오염물질을 분석하는 과정에서는 정도관리 및 분석결과의 신뢰성 확보를 위해 담수 어류를 매질로 하는 표준물질을 필요로 하게 된다. 표준물질(reference material)은 분석기기의 정도관리나 분석방법의 평가 등에 사용하기 위하여 하나 이상의 특성값이 충분히 적절하게 확정되어 있는 물질이다(ISC, 2017). 표준물질은 단일성분(순수표준물질; pure reference material)과 매질(matrix reference material)로 나눌 수

Received 23 August, 2019; **Revised** 17 September, 2019;
Accepted 21 September, 2019
***Corresponding author**: Soo Yong Lee, Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea
Phone : +82-32-560-7549
E-mail : randol84@korea.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
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.

있는데, 이 중에서 매질 표준물질은 실제 시료(동식물, 토양 등)의 특성을 갖는 표준물질을 말한다(KRISS, 2008; ISC, 2017). 따라서 매질표준물질은 측정결과의 정확성을 확인하는데 사용되는데, 실제시료와 동일한 방법 및 절차에 따라 전처리 및 분석을 진행함으로써 측정절차(방법) 및 과정의 유효성을 확인하는 도구로 이용된다(KRISS, 2008).

담수 어류를 매질로 하는 표준물질은 미국과 캐나다 등에서 생산 및 판매가 되고 있는데(Lee et al., 2017), 아직 국내에서는 직접 생산, 판매하는 곳은 없는 실정이다. 이로 인해 담수 환경측정용 생물 표준물질은 국외제품에 의존하고 있는데, 국외 매질 표준물질의 경우, 구매단가가 비싸기도 하지만, 원하는 분석항목을 포함하는 표준물질을 구하는데 애로사항이 있을 수 있다.

이에 환경부 국가환경시료은행에서는 2018년부터 모니터링 대상 시료종을 매질 표준물질로 자체 제작하는 방안을 수립하여 추진하고 있다(Lee et al., 2018). 시료은행이 운영하고 있는 분쇄·균질화 설비 및 절차는 표준물질 제작 설비·공정과 유사하기 때문에 표준물질을 제작하기에 최적의 조건을 갖추고 있다. 더불어 분쇄, 균질화 시료를 초저온(-150℃ 이하) 환경에서 저장하고 있어 이화학적 성분변화 없이 장기적으로 안정적인 보관이 가능한 장점도 있다.

본 논문에서는 시료은행에서 채취·저장하고 있는 담수어류인 잉어(common carp, *Cyprinus carpio*)를 대상으로 후보 매질 표준물질로서의 균질성 및 단기안정성 시험평가를 수행한 결과를 제시하였다. 분석항목은 수은을 대상으로 하였다. 수은은 전지구적인 주요 규제 오염물질로 먹이사슬을 통한 생태계 위해성이 큰 물질이며(Choi et al., 2012; Choi et al., 2017), 특히 인간의 경우 수산물 섭취에 의한 체내 수은 농축이 잘 되기 때문에 우리나라에서도 주요 모니터링 대상에 포함된 물질이다. 이에 추후 담수어류 표준물질로 활용도가 높을 것으로 기대되며, 자동수은분석기를 활용한 분석도 용이하므로 본 연구의 분석대상 물질로 선정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험평가 재료

본 연구에서는 환경부 국가환경시료은행에서 채취하는 시료종인 잉어를 시험평가 대상으로 하였다. 잉어는 식약처의 식품기준에 총수은이 규제항목으로 지정되어 있는 시료로 식품과 해양분야의 공정시험법이 마련되어 있어 수산물 수은분석에 활용가능성이 높은 시료이다(MFDS, 2018).

잉어는 2017년 10월 한강에서 채취한 시료의 육질부 3 kg을 사용하였다. 채취한 잉어(10개체)는 냉장 상태로 실험실로 옮겨 해부하였다. 육질부는 스테인레스 메스를 사용하여 적출한 후 스테인레스 용기에 담아 액체질소 냉동고에 초저온(-150℃ 이하) 보관하였다.

본 연구에서 후보 표준물질 균질성 시험평가용 시료 제작은 시료은행의 기본적인 채취시료 분쇄 및 균질화 절차에 따라 전체 작업을 액체질소를 이용한 초저온 상태에서 진행하였다. 먼저 텅스텐 카바이드로 제작된 막자와 사발을 이용하여 수작업으로 시료 덩어리를 잘게 부순 후 초저온 액체질소로 냉각된 지르코늄 사발에 넣고, 볼 밀(planetary mill, Fritsch, DE/pulverisette 23 Mini Mill, Germany)을 이용하여 회당 350 rpm으로 2분씩 총 3~4회 분쇄·균질화하였다(Fig. 1). 분쇄·균질화된 시료의 입도 기준은 독일환경시료은행의 표준운영절차와 국가환경시료은행의 표준운영절차를 기준(입도분석 투입 시료의 90% 이상이 200 ㎛ 이하)으로 하였다(Rüdel et al., 2008; Lee et al. 2017). 분쇄 시료의 입도는 레이저 회절 입도분석기(particle size analyzer, Malvern Instruments, Masterizer 2000, Germany)를 활용하여 습식분산 방식으로 분석하였다. 습식분산 방식은 용매(증류수)에 시료(본 연구에서는 약 0.5 g ~ 1 g 투입)를 넣고, 분산시켜 측정하는 방식으로 초저온으로 분쇄되어 얼어 있는 생시료(wet sample)에 적합한 방법이다. 분쇄·균질화를 거친 시료는 동결건조기(동결건조기, 일신랩, PVTFD20R, 대한민국)로 건조한 후, 시험평가용으로 병입(bottling)하여 바이얼(20 mL) 319개(바이얼당 약 3 g 병입) 시료를 제작하였다. 이후 시료의 보관안정성을 강화하기 위해 γ -선 처리(60Co, 20kGy, ㈜그린피아)를 실시하였으며, 항온항습 조건(20℃, 30% 내외)에서 암소에 보관하였다.

2.2. 총수은 분석

수은의 표준원액(1,005 mg/L)은 Kanto Chemicals (Tokyo, Japan), 인증표준물질(NIST SRM 2976, mussel

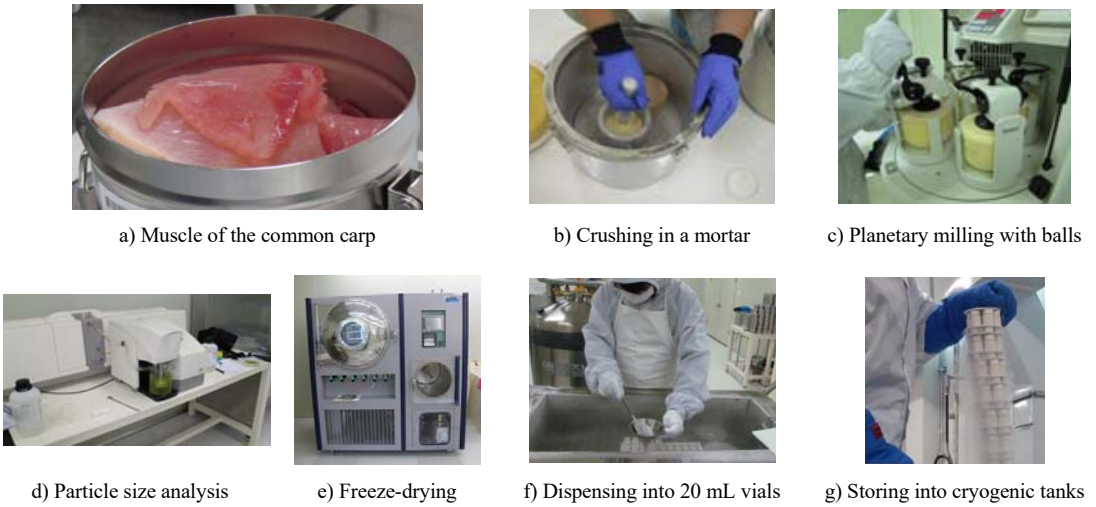

Fig. 1. Milling, homogenization and preservation processes.

tissue)은 National Institute of Standards and Technology (Maryland, USA) 제품을 사용하였고, 표준용액 희석을 위한 L-cysteine은 Junsei (≥ 98%, Tokyo, Japan) 시약을 사용하였다.

총수은의 정량을 위한 수은 표준용액은 표준원액(1,005 mg/L)을 0.01% L-cysteine 용액으로 희석하여 10, 50, 100 ug/L의 표준용액으로 만들어 사용하였다. 0.01% L-cysteine 용액은 L-cysteine 100 mg을 정량하여 질산(Sigma-Aldrich ACS급)과 저항값 18MΩ의 초순수로 용해하여 제조하였다. 검정곡선은 저농도와 고농도 범위의 검정곡선을 각각 구하였고, 회수율 실험은 인증표준물질(NIST SRM 2976, mussel tissue, 61.0 ± 3.6 ug/kg)을 사용하여 실시(n=10)하였다.

잉어 시료의 총수은 분석은 다른 전처리 없이 가열기화 골드아말감법(gold amalgamation merhod)과 원자흡광분광기(atomic absorption spectrometry)를 사용하는 자동 수은분석기(MA-3000 mercury analyzer, Nippon instruments corporation, Tokyo, Japan)를 이용하여 분석하였다(MFDS, 2018). 시료의 연소를 위하여 고순도 산소를 사용하였으며, 그 외 분석조건은 Table 1과 같다. 더불어 분석시료 10개마다 인증표준물질을 분석하여 기기의 재현성을 확인하였다.

총수은 분석의 정확·정밀성을 검증하기 위한 직선성, 검출한계, 정량한계, 인증표준물질의 회수율을 확인한 결과, 직선성은 상관계수(r)는 0.999 이상이었으며, 방법검출한계와 정량한계는 각각 0.25 ng/g, 0.80 ng/g이었고, 회수율은 92.8~103.2% 이었다. 분석의 측정불확도는 주요 영향요인을 표준용액 조제, 검량선 작성, 시료 전처리, 반복성 네 가지로 구분하여 산출하였다(Fig. 2).

2.3. 균질성 및 단기안정성 시험평가

균질성 평가는 10개씩 분주용기(1개 병내 3회 분취)를 준비하여 바이얼 내, 바이얼 간 균질성을 평가하였으며, 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)으로 통계적 차이 여부를 판단하였다(ISC, 2005). 각 바이얼 간의

Table 1. The operating conditions of mercury analyzer (MA-3000)

Conditions	Heating temperature (℃)	Heating time (s)	Flow (L/min)	Slope time (s)
1st Decomposition	180	120	0.4	120
2nd Decomposition	850	120	0.4	30

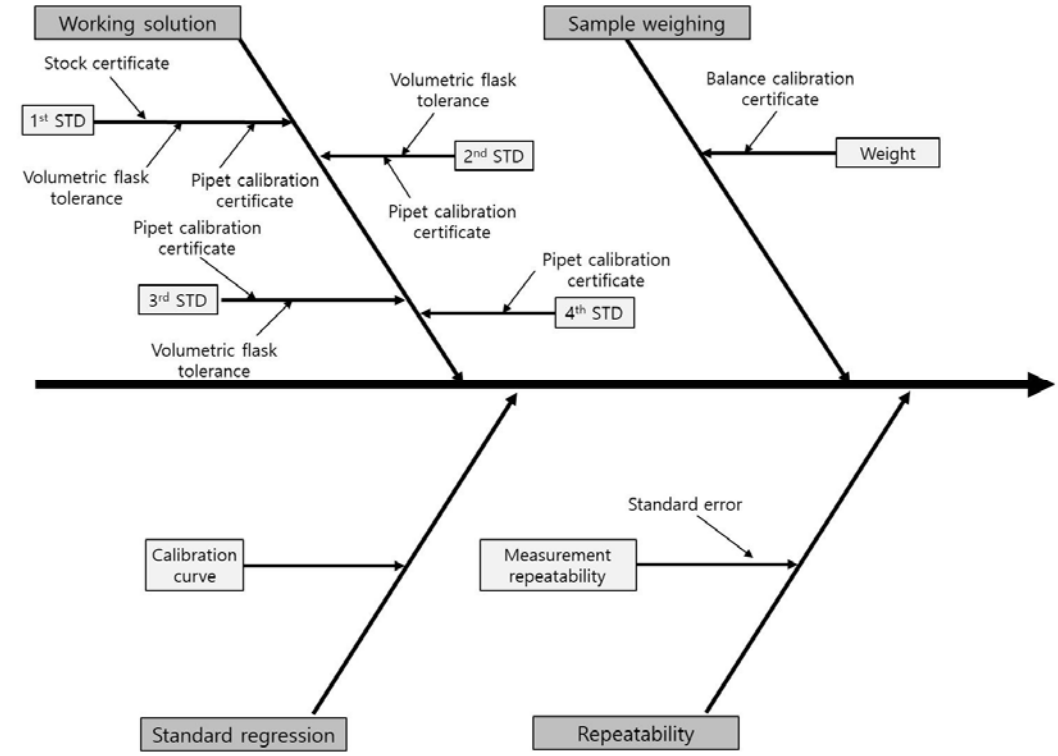

Fig. 2. Fish-bone diagram for potential sources of uncertainty in mercury measurement by MA-3000.

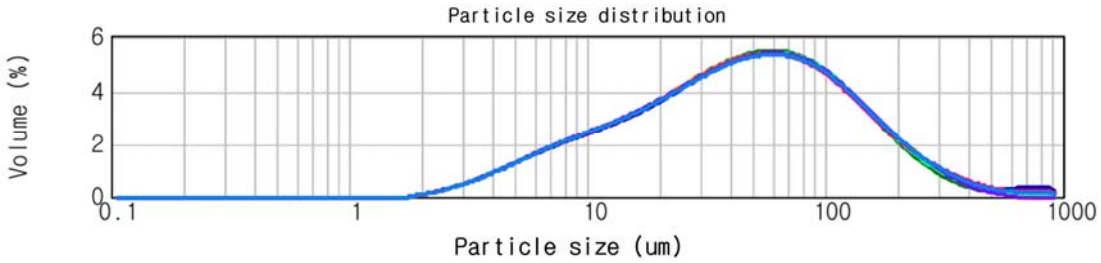

Fig. 3. The particle size distributions of cryo-milled samples (common carp).

농도 값의 변동여부를 확인하기 위해 변동계수(coefficient of variation)인 상대표준편차(표준편차/평균 × 100, %)를 구하여 검토하였다.

안정성은 후보표준물질의 보관, 운송, 유효기간 등과 관련한 장·단기 안정성을 의미하며, 기간별(2주 ~ 32주, 64주) 농도변화를 회귀분석으로 평가하게 된다. 본 연구에서는 12주간(총 5회: 0주, 1주, 2주, 6주, 12주)의 단기 안정성을 엑셀의 회귀분석을 활용하여 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분쇄 입도

시료의 균질성 정도를 확인하기 위해 실시한 입도분석 결과, 잉어는 입도분석에 투입된 시료의 92.61%가 분쇄입도 달성기준(입도분석 투입 시료의 90% 이상이 200 um 이하)을 만족하였다(Fig. 3). 한국표준과학연구원의 경우 체거름을 통해 인삼분말 시료를 50~250 um 사이의

Table 2. The one-way analysis of variance (ANOVA) of mercury concentrations (ug/kg dry) for homogeneities of Common Carp samples

Samples	n	Mean	Standard deviation	ANOVA			RSD (%)
				F ratio	Critical F value	*p* value	
Common carp	20	291.7	6.6	0.8	4.4	0.37	2.28

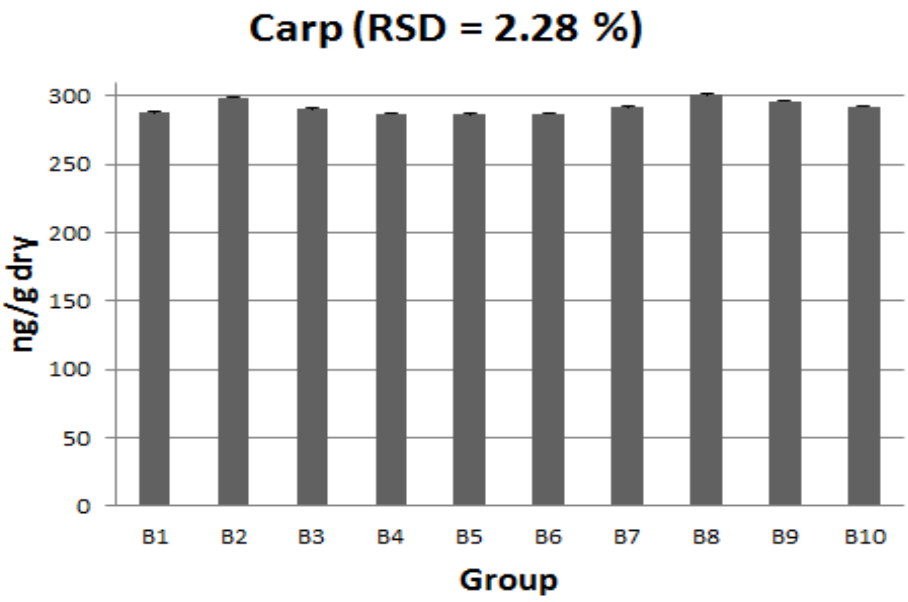

Fig. 4. Mean and standard deviation of total mercury concentrations among bottles.

입도를 가진 시료만 취하여 표준물질을 제작한 바 있다(KRISS, 2010; Lee et al., 2018). 이와 같은 건조 시료의 경우에는 체거름하는 공정을 통한 균질화가 가능하지만, 시료은행처럼 초저온 환경에서 생시료(wet sample)를 분쇄하여 균질화하는 경우에는 분말이 체에 달라붙기 때문에 체거름 공정을 적용하기 어렵다. 따라서 습식분산을 통한 입도분석기를 활용하여 분말의 균질성을 확인하였다. 다만, 본 연구에서 균질성의 최종적인 평가는 측정대상 화학물질 농도(총수은)의 병간, 병내 균질성 시험결과로 판단되기 때문에 후보 표준시료의 균질성의 달성 여부는 다음의 균질성 화학분석 시험평가 결과로 판단하였다.

3.2. 균질성 시험평가

ISO Guide 35(ISC, 2005)를 참조하여 잉어시료 후보표준물질의 총수은에 대한 병내, 병간 균질성을 일원배치 분산분석으로 평가한 결과, 신뢰수준 95% 기준으로 F비(병간 분산과 병내 분산의 비율)가 0.8로 F기각치(4.4) 보다 작았고, 유의수준 *p*값은 0.37로 병간, 병내의 농도차이가 통계적으로 없는 것으로 나타나 초저온 분쇄공정에 의한 균질화가 달성된 것으로 판단되었다(Table 2). 다음으로 수은의 평균 농도에 대한 표준편차의 변동비를 나타낸 상대표준편차는 2.28%로 나타났다(Fig. 4).

일반적으로 상대표준편차가 5% 미만이면, 정밀도가 양호하다고 알려져 있다(Jin et al., 2017, Lee et al., 2018). 한국표준과학연구원에서는 인삼분말의 표준시료(납, 카드뮴) 제작 시 병간 상대표준편차를 각각 0.22~0.33%로 제시한 바 있고(KRISS, 2010), 국립환경과학원에서는 PCBs 분석용 폐절연유 표준물질 제작에서 상대표준편차 2.71~5.01% 범위를 제시한 바 있다(Kim et

Table 3. Expanded uncertainty of mercury concentrations (ug/kg dry)

Samples	n	Mean	Expanded uncertainty	Uncertainty ratio⁋ (%)	Coverage factor(k) (95% confidence interval)
Common carp	20	302.0	9.3	3.1	2.00

⁋: expanded uncertainty / mean value × 100 (%)

Table 4. Regression analysis of mercury concentrations (ug/kg dry) for short-term stability of common carp samples

Regression statistics	
Multiple R	0.71
R Square	0.51
Adjusted R Square	0.34
Standard Error	25.99
Observations	5

ANOVA

	df*	SS**	MS***	F ratio	Significance F
Regression	1	2097.01	2097.01	3.11	0.18
Residual	3	2025.79	675.26		
Total	4	4122.80			

*Degree of freedom
**Sum of squares
***Root mean sqare

	Coefficients	Standard Error	t Static	P-values	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	46070.97	1377.94	33.43	0.00	41685.75	50456.19
X1	-8.40	4.77	-1.76	0.18	-23.57	6.77

al. 2010). 생물 매질의 표준물질의 경우 가물치 살을 활용한 PCB 분석용 표준물질 제작 연구에서 세부 분석항목에 따라 상대표준편차 2.9~26.6%의 범위를 보고한 바도 있다(Interface Engineering Co. Ltd, 2007). 시료은행에서 괭이갈매기 알과 홍합을 활용한 총수은 분석용 후보 표준물질 균질성 연구에서 각각 1.78%와 2.02%의 상대표준편차를 제시한 바도 있다(Lee et al., 2018).

이처럼 매질에 따라 다양한 상대표준편차가 나올 수 있는데, 후보 표준물질의 균질성 시험평가에서 상대표준편차가 5% 이하의 일정수준을 유지하는 것이 중요한 이유는 시료의 병간, 병내 분석결과의 차이가 분산분석에서 통계적으로 유의하지 않아 균질성이 양호하다고 판단되더라도 그러한 결과는 병간, 병내의 농도변동이 큰 경우에도 나타날 수 있기 때문이다. 따라서 상대표준편차를 함께 검토하는 것은 바이얼 간 분석결과의 차이가 적은 상태에서 균질성이 보장되는 지를 평가하는데 중요한 부분이며, 본 연구의 상대표준편차 결과는 잉어 시료의 바이얼 간 분석결과의 농도 차이가 적다는 것을 반영하고 있다.

한편 본 연구에서 잉어의 총수은 분석결과의 평균값에 대한 확장불확도가 3.1%를 차지하였다(Table 3). NIST SRM 2976(홍합)의 경우, 인증서 상의 확장불확도는 평균에 대해 5.9%를 나타냈으며, KRISS CRM 108-04-002(다랑어)의 경우, 인증서 상의 확장불확도가 4.2%를 나타냈다. 보통 표준물질의 불확도는 균질성, 장단기안정성, 공동분석을 포함한 값으로 제시하게 되는데,

NIST SRM 2976(홍합)의 경우는 균질성·장단기안정성·공동분석결과를 포함한 값으로 제시되어 있고, KRISS CRM 108-04-002(다랑어)의 경우 균질성·장단기안정성을 포함하여 제시되어 있다. 본 연구에서의 확장불확도 비율은 3.1%를 보였지만, 이는 균질성 시험결과만 반영된 값으로서 향후 안정성과 공동분석 결과가 추가로 반영되면 불확도는 커질 것으로 예상된다. 따라서 후보 표준물질로서의 불확도 크기를 줄일 수 있도록 분석 과정 등에서 불확도 요인의 영향 정도에 대한 지속적인 검토와 관리가 요구된다.

3.3. 단기안정성 시험평가

ISO Guide 35(ISC, 2005)를 참조하여 12주간(총 5회: 0주, 1주, 2주, 6주, 12주) 측정한 총수은 분석결과에 대해 회귀분석으로 단기안정성을 평가하였으며, 회귀분석을 위한 귀무가설은 “시간에 따른 시료의 농도변화가 없다”로 설정하였다.

분석결과 잉어 시료는 신뢰수준 95% 기준(p=0.05)으로 p값이 0.18로서 귀무가설을 기각할 수 없으므로 시간에 따른 시료의 농도변화가 없는 것으로 나타났다(Table 4). 따라서 본 통계 분석결과는 초저온 분쇄공정, 동결건조 및 감마선 처리 후 보관되고 있는 시료은행의 바이얼 시료가 단기적으로 안정성이 유지되고 있는 것을 보여준다. 추후 추가 분석을 진행하여 장기안정성(16주 이상)을 평가할 예정이며, 안정성에 대한 측정불확도는 장기안정성까지 실시한 후 포함할 계획이다.

4. 결 론

생물 표준물질은 수용체를 활용한 환경질 평가 및 분석 분야에서 시료 내 오염물질 농도 분석결과의 정확성을 확인하는데 필요하다. 지금까지 생물 표준물질의 많은 부분을 국외 제품에 의존하고 있는 실정이며, 국내에서 생산되는 오염물질 분석용 생물 표준물질도 제한적이다. 이에 환경부 국가환경시료은행은 오염물질 생물 축적 모니터링을 위해 채취하고 있는 생물 시료를 활용하여 환경질 평가 및 오염물질 측정용 표준물질 개발을 추진하게 되었다. 본 연구에서는 담수 어류 중 잉어의 표준물질 개발을 위해 표준물질의 필수 요건인 제작 시료의 균질성 및 단기안정성을 시험 평가하였다. 초저온 상태에서 분쇄 및 균질화를 한 후, 동결건조 과정을 통해 제작한 잉어 시료의 총수은 농도에 대해 병간, 병내 차이를 평가하여 통계적으로 균질성이 보장됨을 확인하였다. 더불어 12주간의 총수은 분석결과를 평가하여 통계적으로 단기안정성이 유지되고 있음도 확인하였다. 향후에는 안정성과 관련하여 장기간의 안정성 확인을 위한 시험평가를 진행할 예정이며, 이 결과를 측정불확도에 포함시킬 예정이다. 이를 통해 균질성과 안정성이 보장된 생물 표준물질을 개발하여 환경분야 모니터링 분석기관 등에 보급, 활용될 수 있도록 추진할 계획이다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER 2018-01-01-051).

REFERENCES

Fliedner, A., Lohmann, N., Rüdel, H., Teubner, D., Wellmitz, J., Koschorreck, J., 2016, Current levels and trends of selected EU Water Framework Directive priority substances in freshwater fish from the German environmental specimen bank, Environ. Pollut., 216, 866-876.

Interface Engineering Co. Ltd., 2007, Development of certified reference for the environmental analysis, Korea Environmental Industry & Technology Institute, Seoul.

ISC (Industrial Stanard Council), 2005, Certification of reference materials - general and statistical principles, KS A ISO Guide 35:2005, Korean Agency for Technology and Standards, Chungcheongbuk-do.

ISC (Industrial Stanard Council), 2017, Reference materials – selected terms and definitions, KS A ISO Guide 30:2015, Korean Agency for Technology and Standards, Chungcheongbuk-do.

Jin, M. E., Sun, G. M., Park, S. G., Jwa, Y. J., 2017, A Preliminary study of Korean Geostandards using mesozoic granites, J. Korean Earth Sci. Soc., 38(6), 421-426.

Kim, W. I., Kwon, M. H., Jeon, T. W., Kim, D. H., Chun, J. W., Sim, K. T., Yeon, J. M., 2010, Estimation on the application of reference materials for PCBs proficiency testing from the transformer oil, Anal. Sci. Technol., 23(3), 247-254.

KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science), 2008, Establishment of preparation methods of reference materials for environmental analysis - Reference materials of heavy metals for soil analysis, NIER (National Institute of Environmental Research) -Report, Daejeon.

KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science), 2010, Preparation of standard samples and assignment of reference values for the proficiency testing of pharmaceutical analysis, MFDS (Ministry of Food Drug Safety)-Report, Daejeon.

KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science), 2018, (2018, Aug 30) http://eshop.kriss.re.kr/crmSvc.do.

Lee, J. H., Chung, D., Choi, J. H., Lee, S. Y., Lee, J. C., 2018, Homogeneity test on bio-matrix reference material for chemical analysis of environmental pollutants, J. Environ. Sci. Int., 27(12), 1271-1277.

Lee, J. H., Lee, J. C., Choi, J. H., Lee, S. Y., Kim, Y. M., Jang, H. Y., 2017, Understanding of environmental representative specimen: Coastal ecosystem, Korean mussel (Mytilus coruscus), National Environmental Specimen Bank, National Institute of Environmental Research.

Lee, J. H., Lee, J. C., Choi, J. H., Shin, S. K., Lee, S. Y., Shim, K. Y., Jang, H. Y., Kim, Y. M., Ju, K. K., Sa, K. H., 2017, Development of reference material for establishing homogeneity and stability of cryogenic environmental samples (I), NIER-RP2017-140, National Institute of Environmental Research, Incheon.

MFDS (Ministry of Food Drug Safety), 2018, (2018, Aug 30) https://www.foodsafetykorea.go.kr/foodcode/01_03.jsp?idx=12.

Rüdel, H., Uhlig, S., Weingärtner, M., 2008, Pulverisation and homogenisation of environmental samples by cryomilling, December 2008, V 2.0.0, Fraunhofer Institute, Schmallenberg, Germany.

• 이수용, 국립환경과학원 자연환경연구과 전문위원
randol84@korea.kr
• 이장호, 국립환경과학원 자연환경연구과 연구관
ficedula01@korea.kr
• 정다위, 국립환경과학원 자연환경연구과 연구관
david426@daum.net
• 심규영, 국립환경과학원 자연환경연구과 전문위원
sarcan@naver.com
• 이하은, 국립환경과학원 자연환경연구과 전문위원
gkdms12@korea.kr
• 박기완, 국립환경과학원 자연환경연구과 전문위원
nick876@naver.com