

영천호와 대청호에서 담수어류의 microcystin 농축에 따른 인체 건강위해성 평가

이경락¹ · 정원화² · 강영훈 · 김한순*

(경북대학교 생물학과, ¹국립과학수사연구소 법의학과, ²국립환경과학원 먹는물연구과)

Evaluation of the Potential Human Health Risk Associated with the Microcystin Bioaccumulation in the Freshwater Fish from Lake Yeongcheon and Lake Daecheong. Lee, Kyung-Lak¹, Weon-Hwa Jheong², Young-Hoon Kang and Han-Soon Kim* (Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea; ¹Department of Forensic Medicine, National Institute of Scientific Investigation, Seoul 158-707, Korea; ²Drinking Water Research Division, Incheon 404-170, Korea)

This study evaluated the potential human health risk on the basis of the level of bioaccumulation and EDI (Estimated Daily Intake) of microcystin-LR, one of hepatotoxic, in organs, including liver, muscle, viscera and gill, of fish from Lake Yeongcheon and Lake Daecheong when the cyanobacterial water-blooms broke out. The result has confirmed that *Carassius cuvieri* from Lake Yeongcheon contains higher level of microcystin-LR in its organs including liver. In Lake Daecheong, omnivorous *Hemibarbus labeo* and phytoplanktivorous *Carassius cuvieri* have shown high microcystin-LR level on average, especially higher for viscera, and *Carassius cuvieri* has appeared to contain higher level of microcystin-LR in the liver and the gill compared with other species. As a result of comparison between EDI of microcystin-LR from each organs and TDI (Tolerable Daily Intake) of WHO (Chorus and Bartram, 1999) to evaluate human health risk, the EDI levels from *Carassius cuvieri*'s organs except muscles have exceeded TDI level at the both lakes. Consequently, the study has proved that microcystin was bioaccumulated in the various parts of fish, and it can be ingested by human resulting in risking human health. Continuous monitoring and reducing consumption of fish, especially *Carassius cuvieri*, during the cyanobacterial water-blooming period will be needed to protect human health.

Key words : human health risk, microcystin-LR, Fish, TDI, *Carassius cuvieri*

서 론

독성 남조류는 전 세계적으로 담수 및 해수에서 널리 발생하며, 적어도 46종이 잠재적 독성을 지니는 것으로 알려져 있다(Sivonen and Jones, 1999). Microcystin은

protein phosphatases 1 and 2A의 저해를 일으킴으로써 세포골격 섬유의 과도한 인산화를 유발하여 결과적으로 간 손상을 유발한다(Honkanen *et al.*, 1990; Mackintosh *et al.*, 1990; Craig *et al.*, 1996). 따라서, 다량의 microcystin을 섭취할 경우, 간 조직을 중심으로 손상이 동반되면서 사망에 이를 수 있다(Ressom *et al.*, 1994).

* Corresponding author: Tel: 053) 950-5344, Fax: 053) 953-3066, E-mail: kimhsu@knu.ac.kr

인간이 microcystin에 노출되는 주된 경로는 물의 음용, 레크레이션 활동 및 어류 등과 같은 수산물의 섭취를 들 수 있다(Falconer, 1999). 유해한 남조류 및 남조독소가 발생하면 인간의 피해를 최소화하기 위해 가이드라인 설정이 요구된다. 특히, 상수원지의 경우, 매일 섭취하더라도 건강상 위해를 주지 않는 허용 범위를 따로 정할 필요성이 있다. WHO (1998)는 음용수의 안정성을 확보하기 위해 microcystin-LR의 잠정적인 최대 허용농도를 $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 지정하였으며, 이는 일생 (lifetime)동안 물을 음용하더라도 인체에 위해성이 미치지 않는 범위를 의미한다. 이 가이드라인 값은 $0.04 \mu\text{g (kg of body weight)}^{-1} \text{day}^{-1}$ 의 TDI (tolerable daily intake)값에 기초하며, 13주 동안 microcystin-LR을 mouse에게 음용시킨 Fawell *et al.* (1994)의 실험결과를 토대로 계산되었다.

TDI 값은 어류와 같은 수산물에 축적된 microcystin이 인체에 미치는 잠재적 위해성 평가를 위해 널리 사용되어 왔다 (Ibelings and Chorus, 2007). 지금까지 음용수의 섭취와 관련하여 microcystin의 농도 변화에 대한 많은 연구들이 진행되었으나 (Fastner *et al.*, 1999; Watzin *et al.*, 2006), 최근에는 microcystin이 축적된 어류와 같은 수산물을 섭취함으로써 인간이 입을 수 있는 잠재적 위해성에 대한 연구들이 점차 증가하고 있다 (Magalhães *et al.*, 2003; Mohamed *et al.*, 2003).

일반적으로 인간이 치사량 이상의 microcystin을 섭취할 가능성은 낮지만, 음용수 및 어류 등의 섭취를 통해 오랜 기간 동안 microcystin에 노출될 경우 만성적 독성효과로 인한 부작용이 발생할 수 있다 (Magalhães *et al.*, 2003).

어류는 음용수 다음으로 가장 널리 섭취되며, microcystin이 인체 내로 흡수되는 주된 경로중의 하나이다 (Dietrich and Hoeger, 2005). 수생태계에서 어류들은 근육, 내장 및 간을 포함한 여러 조직들에서 microcystin과 같은 남조독소를 축적하는 것으로 알려져 있다 (Gkelis *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2008). 따라서, 어류의 섭취에 따른 인체의 잠재적 위험성은 항상 존재한다. 더욱이, microcystin은 높은 열 (300°C)에서도 화학적으로 매우 안정하며 고온에서 요리를 하더라도 그 구조는 쉽게 파괴되지 않는 특성을 지니고 있다 (Harada *et al.*, 1996). 성인 한 명이 섭취하는 평균 어류 섭취량은 $100 \text{ g} \cdot \text{day}^{-1}$ 으로 알려져 있으며 (WHO, 1998; Dietrich and Hoeger, 2005), 이 수치를 기준으로 어류에 축적된 microcystin의 잠재적 위해성이 평가될 수 있다.

우리나라의 경우, 독성 남조류의 수화 발생과 관련된 연구들은 진행되었으나 (Oh *et al.*, 2001; 이 등, 2008), 어류에 농축된 microcystin에 대한 연구는 전무한 실정이다.

이번 연구에서 저자들은 독성 남조류의 수화발생기간에 어류의 각 조직에 농축된 microcystin 농도를 분석하고 이에 기초하여 인간이 어류를 섭취함으로써 발생할 수 있는 인체 건강위해성 (health risk)을 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지역

국내에서 남조류의 수화발생이 가장 빈번한 영천호(성곡리)와 대청호(추동)를 대상으로 남조류 및 어류를 채집하였다 (국립환경과학원, 2005).

2. 시료채취

현장의 남조류 시료들은 플랑크톤 넷 (KC, $25 \mu\text{m}$ mesh size, Denmark)를 이용하여 표층수 (0.5 M)를 농축하여 채집하였다. 남조류를 포함한 식물플랑크톤의 계수를 위한 시료 (1 L)는 Lugol's solution으로 현장에서 즉시 고정하였으며, 실험실로 운반 후 $50 \sim 100 \text{ mL}$ 로 농축한 후에 Sedgwick-Rafter counting chamber를 이용하여 현미경 (Zeiss Axioskop 2, Germany) $400 \sim 1,000$ 배하에서 계수하였다.

어류의 각 부위 (간, 아가미, 내장, 근육)에 축적되어 있는 microcystin 분석을 위해 영천호와 대청호에서 4과 10종의 어류를 채집하였다 (Table 1). 어류의 채집은 정치망, 통발 및 자망을 이용하였으며, *Microcystis*를 중심으로 남조류가 번성한 8월 22일 (영천호)과 8월 23일 (대청호)에 실시하였다. 채집은 현장에 상주하는 어부에게 위탁하여 실시하였으며, 어류의 대부분은 영천호의 떡붕어 (2개체)와 잉어 (2개체)를 제외하고 단일 개체가 채집되었다. 어류의 동정은 최 등 (1990)의 도감자료에 기초하였다.

3. Microcystin 분석

남조류의 microcystin 분석을 위해 high-pressure liquid chromatography (HPLC, Waters, USA)와 enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA, EnviroLogix Inc., USA)를 사용하였다. HPLC 분석을 위해 현장에서 plankton net로 농축한 조체시료들은 동결건조기 (Labconco, USA)에서 건조시켰다. 동결 건조된 시료들 (약 100 mg DW)은 50 mL 의 5% acetic acid로 초음파 분쇄 (Fisher Scientific, USA)와 함께 3회에 걸쳐 추출하였다. 추출액은 15분 동안 $4,000 \text{ g}$ 로 원심 분리 하였으며, 상등액은 활성화된 Sep-Pak C_{18} cartridge (Waters, USA)에 흡착시켰다. 이

Table 1. Scientific name, sampling site and feeding type of each fish collected in this study.

Scientific name	Sampling site	Feeding type
Cyprinidae		
<i>Cyprinus carpio</i>	Yeongcheon, Daecheong	Omnivorous
<i>Carassius cuvieri</i>	Yeongcheon, Daecheong	Phytoplanktivorous
<i>Hemibarbus labeo</i>	Daecheong	Omnivorous
<i>Pseudogobio esocinus</i>	Daecheong	Omnivorous
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	Daecheong	Carnivorous
Bagridae		
<i>Leiocassis ussuriensis</i>	Daecheong	Carnivorous
Siluridae		
<i>Silurus asotus</i>	Yeongcheon, Daecheong	Carnivorous
Centropomidae		
<i>Coreoperca herzi</i>	Yeongcheon	Carnivorous
Centrarchidae		
<i>Lepomis macrochirus</i>	Daecheong	Carnivorous
<i>Micropterus salmoides</i>	Daecheong	Carnivorous

후, cartridge를 20% methanol로 cleaning하고 메탄올에 용해된 0.1% TFA로 microcystin을 용출하였다. 용출물은 동결건조기(Labconco, USA)로 완전 건조시키고 methanol로 녹여 분석에 사용하였다. 1 mL min⁻¹의 유속에서 methanol: 0.05 M phosphate buffer (pH 3.0; 52 : 48)로 구성된 mobile phase를 사용하였으며, Xterra-C₁₈ 4.6 × 15 cm, 5 μm column (Waters, USA)을 이용하여 210~420 nm에서 PDA detector (Waters 960, USA)로 검출하였다.

수중에 용존하는 microcystin을 분석하기 위해 현장수 1L를 여과지(Whatman GF/C, UK)로 여과한 후, 여과액은 동결건조기(Labconco, USA)에서 건조시킨 후, HPLC와 동일한 방법으로 추출 및 용출과정을 거쳤다. 건조된 용출물은 methanol에 녹인 후, Microcystin ELISA Plate Kit (EnviroLogix Inc., Portland, USA)에 반응시켜 microcystin-LR 농도를 분석하였다.

어류의 각 부위(간, 아가미, 내장 및 근육)에 축적된 microcystin 분석을 위해 먼저, 현장에서 냉장상태로 운반해온 각 어류 종들을 해부하여 간, 아가미, 내장 및 근육부위를 각각 분리한 후 중량을 측정하였다. 각 부위들을 -20°C에서 24시간 동결시킨 후에 동결건조기(Labconco, USA)를 통해 완전히 건조시켰으며, 건조된 각 부위들의 중량을 측정하였다. 동결 건조된 각 부위들에 대해 최초 5% (v/v) acetic acid을 첨가한 후, 초음파 분쇄 (Fisher Scientific, USA)와 함께 3회에 걸쳐 최종 5% (v/v) acetic acid 60 mL의 부피로 microcystin을 추출하였다. 이 후의 microcystin의 용출 과정은 HPLC법에 적용된 과정과 동일하게 실시하였다. 어류의 각 부위에서 용출된 microcystin은 ELISA Microcystin Plate Kit (Envirologix,

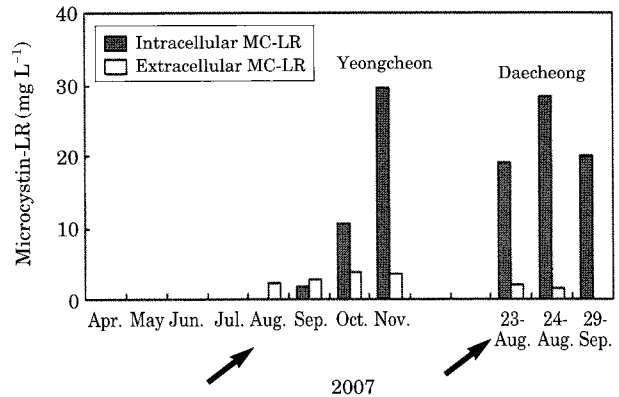


Fig. 1. Seasonal variations of microcystin (MC)-LR in Lake Yeongcheon and Lake Daecheong. Arrow; sampling date.

USA)을 이용하여 분석하였다. 분석방법은 제작사에서 제공된 프로토콜을 따랐다. WHO (1998)가 제안한 TDI 값과의 비교를 위해 어류의 각 조직에 축적된 건조중량(dry weight)당 microcystin-LR의 농도는 생체중량(fresh weight)당 농도로 환산하였으며 (Wilson *et al.*, 2008), 일일 평균어류 섭취량 100 g을 기준으로 EDI (estimated daily intake)값을 계산하였다 (WHO, 1998; Dietrich and Hoeger, 2005).

결 과

납조류 수화발생 기간 동안 영천호와 대청호에서 채집

한 어류들을 대상으로 microcystin (-LR type) 농축양상을 조사하였다(Table 1). 채집당시 두 호수에서 분석된 microcystin-LR의 농도는 세계보건기구(WHO, 1998)가 제안한 microcystin-LR의 허용농도($1 \mu\text{g L}^{-1}$)를 모두 초과하였다(Fig. 1).

영천호에서 채집한 잉어(*Cyprinus carpio*), 떡붕어(*Carassius cuvieri*), 메기(*Silurus asotus*), 꺾지(*Coreoperca herzi*)에 대한 분석결과에서 microcystin-LR의 농도는 간(liver)에서 가장 높은 평균값($0.487 \mu\text{g g}^{-1}$ DW)을 나타내었으며, 그 다음으로 내장($0.111 \mu\text{g g}^{-1}$ DW), 아가미($0.036 \mu\text{g g}^{-1}$ DW), 근육($0.017 \mu\text{g g}^{-1}$ DW) 순으로 microcystin-LR의 평균농도가 확인되었다(Table 2; Fig. 2). 어종별로는 조식성(phytoplanktivorous, 藻食性)인 떡붕어가 간에서 가장 높은 microcystin-LR의 축적양상을 보였으며, 내장에서는 육식성(肉食性)의 꺾지가 가장 높은 농도를 나타내었다. 아가미와 근육에서는 어종별로 microcystin-LR의 농도는 큰 차이를 보이지 않았으나, 꺾지와 떡붕어가 상대적으로 높은 microcystin-LR 농도를 보였다.

대청호에서 채집한 9종의 어류들, 잉어(*Cyprinus carpio*), 떡붕어(*Carassius cuvieri*), 누치(*Hemibarbus labeo*), 모래무지(*Pseudogobio esocinus*), 끄리(*Opsarichthys uncirostris amurensis*), 대농갱이(*Leiocassis ussuriensis*), 메기(*Silurus asotus*), 블루길(*Lepomis macrochirus*) 및 베스(*Micropterus salmoides*)를 대상으로 microcystin-LR의 축적 양상을 분석한 결과, 내장($3.627 \mu\text{g g}^{-1}$ DW), 아가미($0.969 \mu\text{g g}^{-1}$ DW), 간($0.580 \mu\text{g g}^{-1}$ DW) 및 근육

($0.013 \mu\text{g g}^{-1}$ DW) 순으로의 평균농도가 확인되었다(Table 3; Fig. 2). 이들 결과들은 간에서 가장 높은 microcystin-

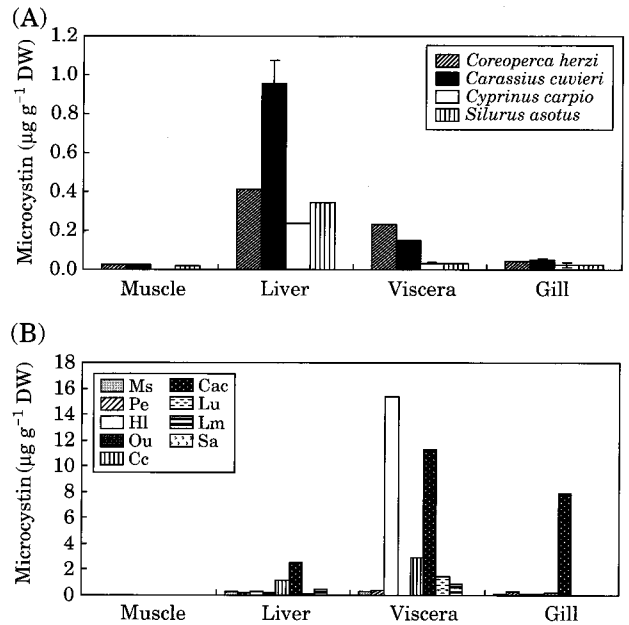


Fig. 2. Microcystin-LR concentrations accumulated in the muscle, liver, viscera, and gill of the fish samples collected from Lake Yeongcheon (A) and Lake Daecheong (B). Ms: *Micropterus salmoides*, Pe: *Pseudogobio esocinus*, Hl: *Hemibarbus labeo*, Ou: *Opsarichthys uncirostris amurensis*, Cc: *Cyprinus carpio*, Cac: *Carassius cuvieri*, Lu: *Leiocassis ussuriensis*, Lm: *Lepomis macrochirus*, Sa: *Silurus asotus*.

Table 2. Microcystin-LR concentrations accumulated in the muscle, liver, viscera, and gill of fish samples collected from Lake Yeongcheon.

Species	Muscle	Liver	Viscera	Gill
<i>Coreoperca herzi</i>	0.026	0.414	0.234	0.045
<i>Carassius cuvieri</i>	0.024	0.956 ± 0.119	0.148	0.051 ± 0.008
<i>Cyprinus carpio</i>	0.000	0.236	0.034 ± 0.001	0.024 ± 0.011
<i>Silurus asotus</i>	0.018	0.344	0.028	0.025

Table 3. Microcystin-LR concentrations accumulated in the muscle, liver, viscera, and gill of fish samples collected from Lake Daecheong.

Species	Muscle	Liver	Viscera	Gill
<i>Micropterus salmoides</i>	0.017	0.261	0.280	0.136
<i>Pseudogobio esocinus</i>	0.009	0.212	0.427	0.277
<i>Hemibarbus labeo</i>	0.024	0.247	15.375	0.127
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	0.000	0.155	0.019	0.062
<i>Cyprinus carpio</i>	0.000	1.126	2.906	0.183
<i>Carassius cuvieri</i>	0.018	2.558	11.307	7.843
<i>Leiocassis ussuriensis</i>	0.011	0.124	1.467	0.037
<i>Lepomis macrochirus</i>	0.015	0.511	0.837	0.037
<i>Silurus asotus</i>	0.027	0.030	0.028	0.023

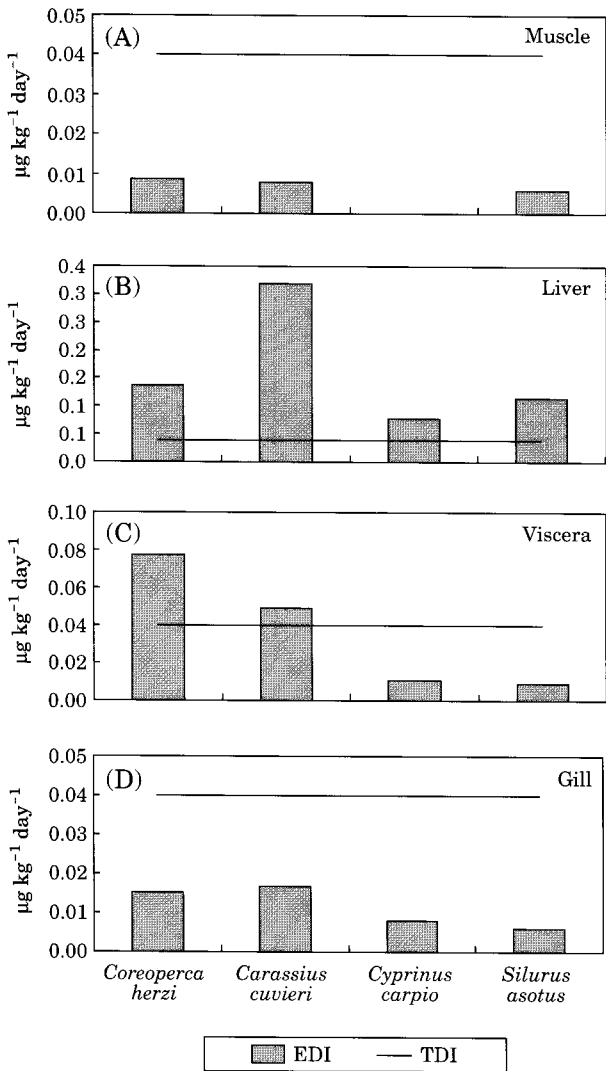


Fig. 3. EDI (estimated daily intake, $\mu\text{g kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) values calculated from microcystin-LR concentrations in each organ of four fishes in Lake Yeongcheon. TDI (tolerable daily intake): $0.04 \mu\text{g kg}^{-1} \text{day}^{-1}$ determined by WHO (1998).

LR의 농도를 보인 영천호의 결과들과는 다른 양상을 나타내었다. 어종별로는 일반적으로 잡식성(Omnivorous, 雜食性)의 누치와 조식성인 떡붕어의 각 조직에서 높은 microcystin-LR 농도가 관찰된 가운데 내장에서는 누치와 떡붕어가 매우 높은 microcystin-LR 농도를 보였으며, 떡붕어는 다른 종들과 비교하여 내장이외에도 간과 아가미에서 높은 microcystin-LR 농도를 나타내었다.

WHO (Chorus and Bartram, 1999)가 제안한 TDI (tolerable daily intake) 값, $0.04 \mu\text{g (kg of body weight)}^{-1} \text{day}^{-1}$ 과의 비교를 위해 이전의 연구들(WHO, 1998; Die-

trich and Hoeger, 2005; Ibelings and Chorus, 2007)에서 제안된 일반 성인(60 kg 기준)의 평균 어류 섭취량(100 g)을 기준으로 EDI (estimated daily intake) 값을 계산하였다(Figs. 3, 4).

영천호 어류들의 각 조직에 농축된 microcystin-LR 농도를 기준으로 EDI 값을 계산한 결과, 어류들의 모든 근육과 아가미에서는 TDI 값을 초과하지 않은 반면에 간에서는 TDI 값보다 약 2~8배 높은 EDI 값을 나타낸 가운데 떡붕어의 간에서 가장 높은 값이 확인되었다. 또한, 곁지와 떡붕어의 내장에서 EDI 값은 TDI 값을 1~2배 초과하였으며, 잉어와 메기의 EDI 값은 TDI 값보다 낮게 조사되었다(Fig. 3).

대청호의 어류들을 대상으로 각 조직에 농축된 microcystin-LR의 EDI 값을 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. 대부분 어류의 내장과 간에서의 EDI 값은 TDI 값을 초과하였으며, 특히, 떡붕어와 누치의 내장에서 TDI 값을 각각 94~128배 초과하는 매우 높은 EDI 값이 확인되었다. 간에서는 잉어와 떡붕어의 EDI 값이 TDI 값보다 9~21배 높은 양상을 보였다. 이에 반해, 모든 어류의 근육에서는 EDI 값이 TDI 값을 초과하지 않았으며, 대부분의 아가미에서 EDI 값은 TDI 값을 초과하지 않았으나, 떡붕어의 경우 TDI 값을 65배나 초과하는 높은 EDI 값을 나타내었다.

고 찰

이번 연구는 국내의 주요 인공호(영천호, 대청호)에서 독성 남조류인 *Microcystis*의 수화발생 기간 동안 어류에서 검출된 microcystin-LR의 분석결과를 보여준다.

어류에 있어 microcystin은 여러 경로를 통해 축적될 수 있다. 이를 테면, microcystin을 생성하는 식물플랑크톤(남조류)의 섭취, 아가미 등을 통한 수중에 용존하는 microcystin의 섭취 그리고 먹이연쇄를 통한 생물학적 농축 등을 들 수 있다(Preussel *et al.*, 2006; Ibelings and Chorus, 2007). 따라서, 영천호와 대청호에서 채집된 어류들의 microcystin의 농축양상은 다른 관점에서 해석이 가능하다. 영천호의 경우 채집 당시 남조류의 조체 내에서는 microcystin (intracellular microcystin-LR)이 검출되지 않은 반면에, 조체 외부에 용존하는 microcystin (extracellular microcystin-LR)만이 검출되었으며, 대청호는 조체 내부 및 외부에서 microcystin-LR이 모두 검출되었다(Fig. 1).

영천호의 결과에서 채집 당시에 용존성의 microcystin-

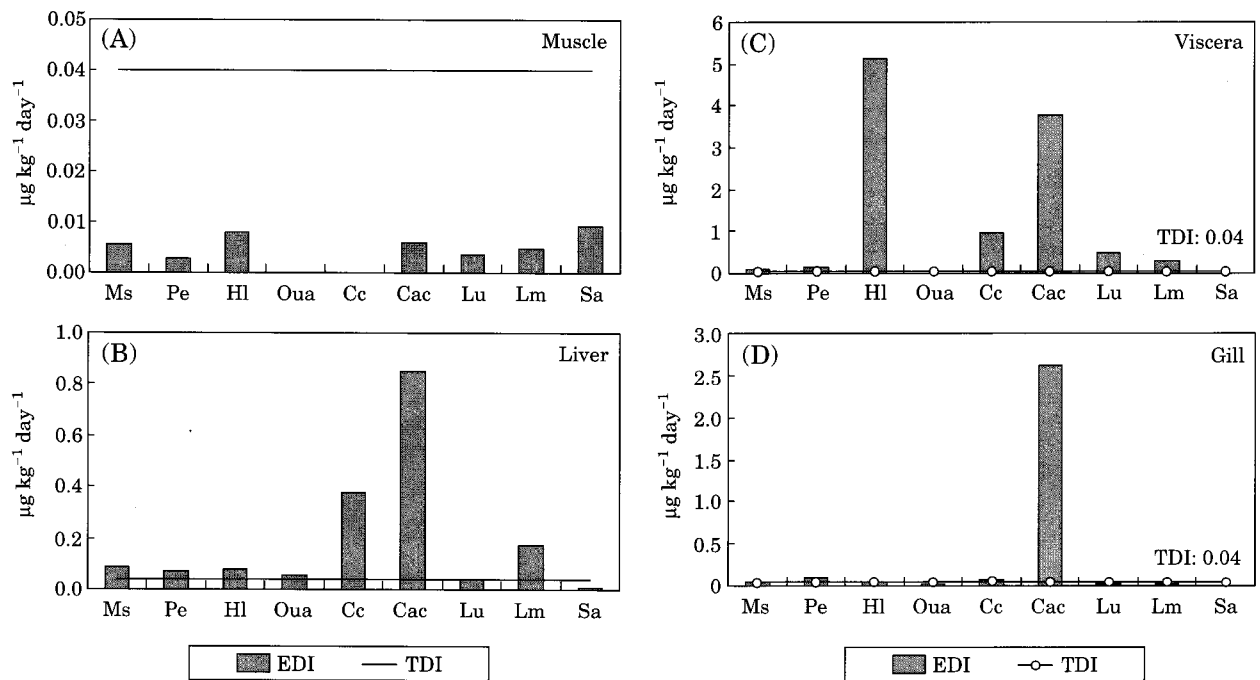


Fig. 4. EDI (estimated daily intake, $\mu\text{g kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) values calculated from microcystin-LR concentrations in each organ of nine fishes in Lake Daecheong. TDI (tolerable daily intake): $0.04 \mu\text{g kg}^{-1} \text{day}^{-1}$ determined by WHO (1998). Ms: *Micropterus salmoides*, Pe: *Pseudogobio esocinus*, Hl: *Hemibarbus labeo*, Ou: *Opsarichthys uncirostris amurensis*, Cc: *Cyprinus carpio*, Cac: *Carassius cuvieri*, Lu: *Leiocassis ussuriensis*, Lm: *Lepomis macrochirus*, Sa: *Silurus asotus*.

LR만 검출되었음에도 불구하고 어류의 각 조직에서 microcystin-LR이 대부분 검출되었다. 이는 영천호의 어류들이 이전부터 용존성 microcystin-LR의 섭취 및 먹이 연쇄에 의한 microcystin-LR의 농축 과정에서 지속적으로 microcystin-LR에 노출되고 있음을 보여준다(Magalhães *et al.*, 2001). 영천호 어류들의 각 조직에서 microcystin-LR 농도는 간에서 가장 높은 농도를 보였으며, 근육에서는 가장 낮은 농도를 나타내었다. 이는 microcystin 농도가 어류의 다른 조직들에 비해 간에서 더 높은 농도를 나타낸다고 보고한 선행연구들과 유사하였으며(Magalhães *et al.*, 2001; Xie *et al.*, 2005), 동시에 microcystin이 간에 주로 작용하는 간장독소임을 명확히 보여주었다(Wilson *et al.*, 2008).

어류에서 microcystin의 축적은 먹이습성에 따라 차이를 보인다(Xie *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008). Zhang *et al.* (2008)은 간과 내장의 microcystins (-RR, -LR, -YR) 농도는 조식성 어류에서 가장 높게 나타났으며, 특히, 근육 내 microcystins-LR 농도는 조식성 어류보다 육식성 어류에서 더 높게 검출된다고 보고하였다. 또한, Xie *et al.* (2005)의 연구결과에 따르면, 육식성 어류는 간과 근육에서 더 높은 microcystins (-RR, -LR) 농도를 나타내었

며, 조식성 어류는, 내장에서 높은 microcystins 농도를 보였다.

영천호의 경우, 간에서 조식성 어류인 떡붕어가 가장 높은 microcystin-LR 농도를 나타내었으며, 근육에서는 육식성의 꺾지가 상대적으로 높은 농도를 나타내었다. 이는 Zhang *et al.* (2008)의 결과와 유사하였다. 하지만, 내장에서는 떡붕어가 꺾지보다 낮은 microcystin-LR 농도를 나타내었는데, 이는 떡붕어의 먹이원인 남조류의 조체 내 microcystin-LR의 불검출과 관련성이 있는 것으로 생각된다(Fig. 2). 반면에, 떡붕어는 내장의 microcystin-LR 농도가 낮음에도 불구하고 간에서 더 높은 농도를 나타내어 Zhang *et al.* (2008)의 연구결과와 다른 양상을 보였는데, 이는 내장 및 아가미 등을 통해 동시에 microcystin이 간에 축적된 결과로 생각된다.

대청호에서는 잉어과에 속하는 잡식성의 누치와 조식성인 떡붕어의 분석결과를 주목할 필요가 있다. 이들 어류들의 조직 중에서 내장은 가장 높은 microcystin-LR의 농도를 보였다. 이는 이들 어류가 microcystin-LR을 생성하는 남조류를 다량 섭취했음을 의미한다. 실제로, 현미경 검경에서 이들 두 어종의 내장에서 microcystin 생성종인 *M. aeruginosa*가 다량으로 관찰되었으며, 그 외의

육식성 어류들에서는 관찰되지 않았다. 떡붕어는 아가미에서도 높은 microcystin-LR 농도를 나타내었는데, 이 결과는 조식성인 떡붕어가 남조류 세포를 직접 섭취할 뿐만 아니라, 아가미를 통해 용존하는 microcystin-LR을 다량 흡수했음을 보여주었다. 반면에, microcystin-LR 농도를 보면 떡붕어에서는 microcystin-LR이 높은 농도로 검출되었으나, 누치에서는 거의 검출되지 않는다고 보고하였다. 이는 남조류의 섭취를 통한 소화 작용이 떡붕어의 microcystin 축적에 있어 가장 큰 영향을 주고 있음을 의미한다.

대청호의 결과들은 선행연구에서도 증명된 바 있다. Fischer and Dietrich (2000)는 잉어과에 속하는 조식성의 어류는 육식성 어류보다 넓은 표면적과 높은 흡수능을 지닌 긴 회장(ileum)을 지니는데, 이와 같은 특성이 육식성 어류보다 더 많은 microcystin을 축적할 수 있다고 하였다. 따라서, 잉어과에 속하는 조식성 어류인 떡붕어가 내장을 제외한 간 등의 조직에서 잡식성인 누치보다 더 많은 microcystin을 축적할 수 있었던 것으로 생각된다.

대청호에서 간, 내장 및 아가미에서 조식성 어류를 중심으로 높은 microcystin-LR 농도를 보인 결과들은 선행 연구들과 유사한 양상을 보였다(Mohamed *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2008). Zhang *et al.* (2008)과 Mohamed *et al.* (2003)에 의하면, 조식성 어류는 간과 내장에서 더 높은 microcystin-LR 농도를 보인다고 보고한 반면에, 간, 내장 및 아가미 등에서 높은 microcystin-LR이 검출되었음에도 불구하고 근육에서는 먹이습성에 관계없이 microcystin-LR이 거의 검출되지 않았다. 따라서, microcystin-LR의 농도가 어류의 근육 내 다량 축적된다고 보고한 Magalhães *et al.* (2003)의 결과와는 다른 양상을 보였다.

영천호와 대청호의 분석결과들을 종합해보면 조식성인 떡붕어는 두 호수에서 공통적으로 내장과 아가미를 통해 흡수된 microcystin-LR이 다른 육식성 혹은 잡식성 어류에 비해 더 높은 비율로 간 조직에 축적된다는 것을 알 수 있다.

어류의 조직들에 함유된 microcystin은 다양한 경로를 통해 인간에 위해를 가할 수 있다. 따라서, 이번 연구는 어류의 각 조직에 축적된 microcystin의 농도를 분석함과 동시에 이들 값에 기초하여 최종 소비자인 인간에게 미칠 수 있는 건강위해성(health risk)을 평가하고자 하였다. 이번 연구에서 두 호수의 모든 어류들은 각 조직에 따라 WHO (1998)가 제안한 TDI 값을 모두 초과하는 양상을 보였다. 영천호의 경우, 간과 내장의 EDI 값들이 TDI 값을 1~7배 초과한 반면에, 대청호는 간, 내장 및 아가미에서 TDI 값보다 1~128배 높은 EDI 값들이 확인

되었다. 대청호의 어류들이 영천호의 어류들보다 더 높은 비율로 TDI 값을 초과하는 양상을 보인 것은 물속에 용존하는 microcystin-LR보다 남조류의 조체내 microcystin-LR이 조식성 어류를 중심으로 어류의 microcystin 농축에 더 큰 영향을 주고 있음을 의미한다. 즉, 어류의 채집 당시에 영천호와 대청호에서 용존하는 microcystin-LR (extracellular microcystin-LR)은 $2 \mu\text{g L}^{-1}$ 내외로 비슷한 값을 보인 반면에, 조체 내부의 microcystin-LR (intracellular microcystin-LR)은 대청호에서만 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 검출되었다(Fig. 1). 더욱이, 두 호수에서 조식성 어류에 축적된 높은 microcystin-LR 농도와 TDI 값의 초과치들을 고려할 때, 독성 남조류(*M. aeruginosa*)의 직접적인 섭취는 어류에 microcystin-LR이 농축되는 가장 주된 경로로 판단된다.

인간이 주로 섭취하는 근육부위에서는 microcystin 농도가 낮았을 뿐만 아니라, 위해성 평가에서도 조사 대상의 모든 어류들은 TDI 값을 전혀 초과하지 않았다. 이는 어류의 근육부위를 섭취하더라도 건강상으로 안전하다는 것을 의미한다. 하지만, 이번 결과만으로 근육 내 microcystin 농도가 안전하다고 판단하기에는 이르며, 높은 microcystin-LR의 축적이 확인된 간, 내장, 아가미 등의 부위 또한 섭취에 따른 위해성이 발생할 수 있음을 고려해야만 한다. 이와 동시에, 대청호와 영천호에서 봄, 여름 및 가을에 걸쳐 장기적으로 독성 남조류가 수화형성을 일으킨다는 선행연구들을 고려했을 때(Oh *et al.*, 2001; 이 등, 2008), 앞으로 microcystin에 대한 어류의 지속적인 노출이 근육을 비롯한 다른 부위에 microcystin 농축의 증가를 가져올 가능성은 매우 높다. 특히, 국내의 인공호를 중심으로 개체수가 급격하게 증가하고 있는 떡붕어의 각 조직 내 microcystin의 높은 농축양상은 건강위해성 측면에서 반드시 고려되어야만 한다.

결과적으로, 지역민들을 포함한 국민들의 보건상의 안전을 확립하기 위해서 현장의 관리자들과 남조류 수화 발생시 지속적인 모니터링과 더불어 어류와 같은 수산물의 섭취를 최대한 제한시키는 등의 적절한 조치를 취해야 할 것으로 판단된다.

적 요

영천호와 대청호 어류들의 각 조직들(근육, 간, 내장, 아가미)에 농축된 microcystin-LR의 농도 및 TDI (total daily intake) 값에 기초하여 인체의 건강위해성을 평가하였다. 영천호의 분석결과에서 조식성(藻食性)인 떡붕

어(*Carassius cuvieri*)는 다른 종들과 비교하여 간을 포함한 대부분의 조직에서 높은 microcystin-LR의 농축양상을 보였다. 대청호에서 잡식성(雜食性)인 누치와 조식성인 떡붕어의 각 조직에서 높은 microcystin-LR 농도가 관찰된 가운데 내장에서는 누치와 떡붕어가 매우 높은 microcystin-LR 농도를 보였으며, 떡붕어는 다른 종들과 비교하여 내장이외에도 간과 아가미에서 높은 microcystin-LR 농도를 나타내었다. 인체의 건강위해성 평가를 위해 각 조직에서 도출된 microcystin-LR의 EDI(estimated daily intake) 값들을 TDI 값과 비교하였다. 결과에서, 두 조사지역에서 모두 떡붕어(*Carassius cuvieri*)는 근육을 제외한 대부분의 조직들에서 EDI 값들이 TDI 값을 초과하는 양상을 보였다.

사 사

어류의 동정에 많은 도움을 주신 국립생물자원관 담수 어류분과 선생님들께 감사의 말씀을 드립니다.

인 용 문 헌

- 국립환경과학원. 2005. 2005년도 조류예보제 시행결과보고서. 국립환경과학원, 인천.
- 이경락, 정원화, 김종민, 김영생, 최희진, 김한순. 2008. 영천호에서 남조류 독소(microcystins)의 계절적 변동. 한국하천호수학회지 41: 264-274.
- 최기철, 전상린, 김익수, 손영목. 1990. 원색한국담수어도감. 향문사.
- Chorus, I. and J. Bartram. 1999. Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring, and Management. SPON Press, on behalf of the World Health Organization.
- Craig M., H.A. Luu, T.L. Mccready, D. Williams, R.J. Andersen and C.F.B. Holmes. 1996. Molecular mechanisms underlying the interaction of motuporin and microcystins with type-1 and type-2A protein phosphatases. *Biochem. Cell Biol.* **74**: 569-578.
- Dietrich, D. and S. Hoeger. 2005. Guidance values for microcystins in water and cyanobacterial supplement products (blue-green algal supplements): a reasonable or misguided approach? *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **203**: 273-289.
- Falconer, I. 1999. An review of problems caused by toxic blue-green algae (cyanobacteria) in drinking water. *Environ. Toxicol.* **14**: 5-12.
- Fastner, J., U. Neumann, B. Wirsing, J. Weckesser, C. Wiedner, B. Nixdorf and I. Chorus. 1999. Microcystins (Hepatotoxic heptapeptides) in German fresh water bodies. *Environ. Toxicol.* **14**: 13-22.
- Fawell, J.K., C.P. James and H.A. James. 1994. Toxins from blue-green algae: Toxicological assessment of microcystin-LR and a method for its determination in water. Water Research Centre, Medmenham.
- Fischer, W.J. and D.R. Dietrich. 2000. Pathological and biochemical characterization of microcystin-induced hepatopancreas and kidney damage in carp (*Cyprinus carpio*). *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **164**: 73-81.
- Gkelis, S., T. Lanaras and S. Sivonen. 2006. The presence of microcystins and other cyanobacterial bioactive peptides in aquatic fauna collected from Greek freshwaters. *Aqua. Toxicol.* **10**: 32-41.
- Harada, K.-I., K. Tsuji, M.F. Watanabe and F. Kondo. 1996. Stability of microcystins from cyanobacteria. III. Effect of pH and temperature. *Phycologia* **35**: 83-88.
- Honkanen, R.E., J. Zwiller, R.E. Moore, S.L. Daily, B.S. Khatra, M. Dukelow and A.L. Boynton 1990. Characterization of microcystin-LR, a potent inhibitor of type 1 and type 2A protein phosphatases. *J. Biol. Chem.* **265**: 19401-19404.
- Ibelings, B.W. and I. Chorus. 2007. Accumulation of cyanobacterial toxins in freshwater "seafood" and its consequences for public health: A review. *Environ. Pollut.* **150**: 177-192.
- MacKintosh, C., K.A. Beattie, S. Klumpp, P. Cohen and G.A. Codd. 1990. Cyanobacterial microcystin-LR is a potent and specific inhibitor of protein phosphatases 1 and 2A from both mammals and higher plants. *FEBS Lett.* **264**: 187-192.
- Magalhães, V.F., R.M. Soares and S.M.F.O. Azevedo. 2001. Microcystin contamination in fish from the Jacarepaguá Lagoon (Rio de Janeiro, Brazil): ecological implication and human health risk. *Toxicon* **39**: 1077-1108.
- Magalhães, V.F., M.M. Marino, P. Domingos, A.C. Oliveira, S.M. Costa, L.O. Azevedo and S.M.F.O. Azevedo. 2003. Microcystins (cyanobacteria hepatotoxins) bioaccumulation in fish and crustaceans from Sepetiba Bay (Brasil, RJ). *Toxicon* **42**: 289-295.
- Mohamed, Z.A., W.W. Carmichael and A.A. Hussein. 2003. Estimation of microcystins in the freshwater fish *Oreochromis niloticus* in an Egyptian fish farm containing a *Microcystis* bloom. *Environ. Toxicol.* **18**: 137-141.
- Oh, H.-M., S.J. Lee, J.-H. Kim, H.-S. Kim and B.-D. Yoon. 2001. Seasonal variation and indirect monitoring of

- microcystin concentration in Daechung Reservoir, Korea. *Appl. Environ. Microbiol.* **67**: 1484-1489.
- Preussel, K., A. Stuken, C. Wiedner, I. Chorus and J. Fastner. 2006. First report on cylindrospermopsin producing *Aphanizomenon flos-aquae* (Cyanobacteria) isolated from two German lakes. *Toxicon* **47**: 156-162.
- Ressom, R., F.S. Soong, J. Fitzgerald, L. Turczynowicz, O. El Saadi, D. Roder, T. Maynard and I. Falconer. 1994. Health effects of toxic cyanobacteria (blue-green algae), National Health and Medical Research Council, Australia.
- Sivonen, K. and J. Jones. 1999. Cyanobacterial toxins. p. 41-112. In: Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management (Chorus I. and J. Bartram, eds.). World Health Organization, Geneva.
- Watzin, M.C., E.B. Miller, A.D. Shambaugh and M.A. Kreider. 2006. Application of the WHO alert level framework to cyanobacterial monitoring of Lake Champlain, Vermont. *Environ. Toxicol.* **21**: 278-288.
- WHO. 1998. Guidelines for drinking water quality, 2nd edition. Addendum to volume 2. Health criteria and other supporting information, World Health Organization, Geneva.
- Wilson, A.E., D.C. Gossiaux, T.O. Höök, J.P. Berry, P.F. Landrum, J. Dyble and S.J. Guildford. 2008. Evaluation of the human health threat associated with the hepatotoxin microcystin in the muscle and liver tissues of yellow perch (*Perca flavescens*). *Can. J. Fish Aquat. Sci.* **65**: 1487-1497.
- Xie, L.Q., P. Xie, L.G. Guo, L. Li, Y. Miyavara and H.-D. Park. 2005. Organ distribution and bioaccumulation of microcystins in freshwater fish at different trophic levels from the eutrophic Lake Chaohu, China. *Environ. Toxicol.* **20**: 293-300.
- Zhang, D., P. Xie, Y. Liu and T. Qiu. 2008. Transfer, distribution and bioaccumulation of microcystins in the aquatic food web in Lake Taihu, China, with potential risks to human health. *Sci. Total Environ.* **407**: 2191-2199.

(Manuscript received 26 July 2009,
Revision accepted 13 September 2009)