

수은 중독에 관한 실험적 연구

황인담 · 기노석 · 정인호 ·
이정상 · 이재형

전북대학교 의과대학 예방의학교실

An Experimental Study on Mercury Compounds Poisoning

I.D. Hwang · N.S. Ki · I.H. Chong ·
J.S. Lee · J.H. Lee

*Dept. of Preventive Medicine and Public Health,
College Medicine, Chonbuk National University*

Abstract

This experiment was performed to study the sequential accumulation of mercury in selected tissues of gold fish (*Carassius auratus*) exposed to 2, 6, 30, 120 and 300 $\mu\text{g Hg/l}$ as HgCl_2 . In order to prepare treatment groups suitable for the present study, one control and five experimental groups, which were composed of I (2 $\mu\text{g/l}$), II (6 $\mu\text{g/l}$), III (30 $\mu\text{g/l}$), IV (120 $\mu\text{g/l}$), V (300 $\mu\text{g/l}$), were used in 180 liter glass aquaria.

The experiment was started by transferring 20 fish of average total length 140 ± 20 mm to each of the six tanks and allowing the uptake to take place for 12 weeks period.

Fish were killed after time periods of 1, 2, 4, 8, and 12 weeks, and samples were dissected by five parts; gill, kidney liver, muscle and egg.

The summarized results were as follows:

1. In control group, low concentrations of mercury (range 0.01-0.11 $\mu\text{g/g}$) were determined in the all selected tissues.
2. In experimental group, the average levels of mercury residues in the gill, kidney, liver muscle and egg were 3.61-189.54 $\mu\text{g/g}$, 13.91-182.58 $\mu\text{g/g}$, 8.56-66.49 $\mu\text{g/g}$, 0.30-20.33 $\mu\text{g/g}$, and 1.63-23.76 $\mu\text{g/g}$, respectively.

※ 本論文은 1987年度, 문교부 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

3. The mercury residues in selected tissues of the experimental group were generally 230-9100 times higher than those of the control group.
4. The amounts of methylmercury per total mercury in the muscle after 12 weeks were 0.10/0.30 $\mu\text{g/g}$ (33.33%) in the I group, 0.14/1.18 $\mu\text{g/g}$ (11.86%) in the II group, 0.25/5.76 $\mu\text{g/g}$ (4.34%) in the III group, 0.39/11.48 $\mu\text{g/g}$ (3.40%) in the IV group and 0.40/20.33 $\mu\text{g/g}$ (1.97%) in the V group.

I. 서론

현대사회의 급진적인 산업화와 도시화 현상으로 각종 산업폐수와 도시하수 등이 호수나 하천에 유입되어 수질오염을 악화시키고 있으며 이중 유해금속에 의한 환경오염은 인간은 물론 동식물에도 피해를 줄 수 있기 때문에 보건학상 또는 동식물의 생리학상 매우 중요시되고 있다.

중금속은 생체내에 극미량으로 존재하지만 오염된 환경에 장·단기 폭로되므로써 혈장 단백질과 결합되어 신경계, 간장, 신장 등 모든 조직에 축적되어 생리적 기능적 장애를 초래하며,^{1,2} 환경에서 심각할 정도로 생물의 형태적, 생화학적 변화를 일으키는 것으로 알려져 있다.³

특히 수은은 비교적 일찍부터 인류가 사용해 온 중금속의 하나로서 이노제, 설사제, 매독의 치료제 등의 의약분야와 농업 및 산업분야에서도 광범위하게 사용되고 있으나 그 독성에 대해서는 1950년대 일본에서 발생한 Minamata 병이 보고된 이후 세계 각처에서 무기 및 유기수은의 중독사고가 발생하자 관심이 고조되기 시작하였다.⁴

이에 관한 연구는 주로 임상적인 면에서 기질적 기능적 장애⁵와 더불어 환경 및 생체내에서의 축적정도 및 영향에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 1971년 Wojtalik에 의해 생태계의 수은 분포, 축적 및 작용 기작 등이 폭넓게 종합된 바 있다.⁶

또한 수질을 통하여 가장 직접적인 영향을 받는 어류에 대해서는 Adelman 등⁷과 Hanumate 등⁸이 mercury chlorid를 사용하여 median lethal concentration(LC50)을 시간별로 결정하였고 Chang¹⁰은 신경독 작용을, Dinardi 등¹¹은 조직내 축적정도에 대해 이미 보고한 바 있으며 Jakim 등¹²과 Hinton 등¹³은 수은농도에 따른 간 효소의 활성을 측정하였다. 국내에서도 김등,¹⁴ 손등,¹⁵ 강등¹⁶이 담수어의 조직내 수은 함량을 조사한 바 있으며 등 등¹⁷이 수은 중독에 의한 붕어 장기조직의 변화에 대하여, 김¹⁸과 유¹⁹가 급성 독성에 대하여 연구하였다.

이와같이 연구의 대부분이 담수어내의 축적정도나 급성 독성에 관한 실험이고 농도에 따른 기간별 축적 정도에 대한 연구는 어류에 미치는 수질의 온도, pH 조건 등 여러가지 제한적 요인 때문에 활발히 진행되지 못하고 있는 실정이다. 또한 앞으로의 산업사회에서는 환경조건의 급격한 변화나 오염물질에 의한 생태계 일부의 급성 중독보다는 저 농도에서 장기간 폭로에 의한 만성중독 사고가 빈번히 발생되리라 예상되며 수질 오염물질이 수계내에 미치는 영향에 대해 지속적인 조사가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 널리 분포되어 있는 붕어(Carassius auratus)를 선택하여 농도별로 mercury chloride(HgCl_2)를 수조에 투여한 후 지속적인 노출에 따른 생체조직내 축적 정도를 경시적으로 계속하고 어류

의 가식부인 근육부위를 택하여 수은 화합물 중 가장 위험한 독성을 나타내는 methyl-m-mercury의 함량 정도를 구하여, 수계에 배출되는 오염물질이 생태계에 미치는 영향과 붕어의 여러 장기의 조직내 축적량에 따른 생화학적변화를 파악할 수 있는 기초자료를 제공 하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험재료

전북 전주시 근교에 위치한 금천 저수지 양 어장으로 부터 붕어(Carassius auratus)200마리를 제공받아 1987년 3월 부터 2개월 동안 체장과 체중을 계속하였으며 수조에서 실험 조건에 적응 하도록 사육하여 환경변화에 의한 stress를 극소화시킨 후 무기수은(HgCl₂)의 실험 농도에 폭로시켰다.

본 실험에 사용한 붕어는 체장 140±20mm, 체중 50±20g의 건강한 개체만을 선별하여 105×35×50cm³ 크기의 6개 유리수조에 20마리씩 분배하였다.

2. 실험 방법

1) 중독 실험

실험 방법은 정수식에 의한 static bioassay법¹⁾이었으며 사용된 실험수는 지하수로서 2일 이상 폭기를 시킨 후 공급 직전의 수질 조건은 수온 17.5°C, 경도 23mg/l, pH 6.7, 용존산소량 6.6mg/l로서 수질의 물리, 화학적 성상은 Table 1과 같다.

농도 결정시 사용된 stock solution은 mercuric chloride (HgCl₂, Wako pure chemical industries Co.)의 용이운 특성을 무시하고²⁰⁾ 수은의 함량을 기초로 절대농도를 환산하여 Hg⁺² 0.1g/100ml로 만든 후 알맞은 배수로 희석하여 실험수에 부여하였으며 Ca-rr의 방법²¹⁾에 따라 1회 사용을 원칙으로 하

였다.

실험군 선정은 1961년 조사된 일본 Minamata Bay의 수질오염 농도인 2μg/l에서 96시간 LC 50에 가까운 300μg/l까지 5개군으로 나누었으며 대조군은 실험원수에 의해 사육된 정상군으로서 모두 6개군을 선정하여 12주 동안 실험 사육하였다.

실험기간중에는 motor 장치를 이용하여 각각의 수조에 1.5 l/min 조건으로 공기를 공급 하였고 먹이는 시판용 열대어 먹이를 1일 1회 제공하였다.

2) 시료의 채취

붕어는 1주, 2주, 4주, 8주 및 12주 후

Table 1. Composition of Test Water(Mean Values in Parenthesis)

Item	Measured Values
Hardness	21 - 25 (23)
Acidity	8 - 10 (.9)
Alkalinity	5.0 - 8.0 (6.5)
Temperature	16.0 - 19.0 (17.5)
Turbidity	1.0 - 1.5 (1.3)
pH	6.7 - 6.8 (6.7)
Oxygen	6.3 - 6.8 (6.6)
Ammonia	< 0.02
Nitrate	3.5
Nitrate	< 0.005
Calcium	16.5 - 17.0 (16.7)
Chloride	42.0 - 42.3 (40.2)
Fluoride	0.14 - 0.16 (0.15)
Arsenic	N, D
Chromium	N, D
Copper	0.01
Iron	0.12
Lead	N, D
Mercury	N, D
Zinc	0.03

Note) Values are expressed as mg/l except temperature(=Celcius)

N. D. Not detected (=less than 2 μg/l)

에 각각의 실험수조에서 4 마리씩 희생시킨 후
 개복하고 아가미, 신장, 간, 알, 근육질을 적
 출하여 부위별 수은 함량을 적출 즉시 측정하
 였으며 biomethylation 정도를 조사하기 위하
 여 12주 후에 어류의 주된 가식부인 근육부위
 를 택하여 메틸수은의 함량을 조사하였다.

3. 분석 방법

1) 수은 함량 측정

총 수은 분석을 위한 전처리는 $H_2SO_4-KMnO_4$ 로 하였으며 $SnCl_2$ 용액을 가하여 금속 수은으로 환원시킨 후 cold vapor atomic absorption법으로 정량하였다.²²⁾

메틸수은 분석을 위하여 전처리가 끝난 시
 료는 벤젠으로 유기수은 화합물을 추출하고 L-
 -cystein에 의하여 선택적으로 농축한 후 벤
 젠으로 재 추출하여 농축한 다음 Thin-layer
 chromatography(TLC)법^{23,24)}에 의하여 분
 리하고 메틸수은 만을 산화 분해하여 cold va-
 por atomic absorption법²⁵⁾으로 정량하였다.

총 수은 및 메틸수은 표준용액 회수율 시험
 은 총 수은 분석법과 같은 조건으로 하였으며
 결과는 Table 2와 같이 91~107%의 회수율
 을 나타냈다.

Table 2. Recovery of Mercury Standard So-
 lution added to Muscle Sample

Mercury (Hg)	Hg added	Hg found	Recovery (%)
	0	0.039	
HgCl ₂ (99) ^a	0.200	0.221	91
	0.400	0.468	107
	0.600	0.641	100
	0	0.018	
CH ₃ HgCl (92)	0.100	0.104	86
	0.200	0.213	98
	0.300	0.291	91

a: mean values of recovery

2) 시약 및 기기장치

사용된 시약은 blank test 값을 최소로 하
 기 위하여 유해금속측정용과 원자흡광분석용
 (Wako pure chemical industries Co.)을
 사용하였다.

측정은 원자흡광분광도계(Instrumenti-
 on Laboratory AAS 551, U.S.A)와 ato-
 mic vapor accessory(IL 440, U.S.A)로
 하였으며 사용가스는 nitrogen이었다.

III. 성 적

1. 부위별 수은 함량

12주 동안 지속적으로 노출된 붕어의 부위
 별 축적량은 표 3에서와 같이 신장과 간은 저
 농도 실험군(I, II, III군)에서 높은 축적치를
 보였고 아가미, 알, 근육의 순위로 감소하는
 경향이였으며 고농도 실험군(IV, V군)에서
 아가미와 신장이 높은 축적치를 보였고 간,
 근육 순위로 감소하였다. 즉 신장이 모든 실험
 군에서 가장 높은 축적치를 보였고 간은 저농
 도 실험군에서, 아가미는 고농도 실험군에서
 각각 높은 축적치를 보였으며, 알과 근육질은
 모든 실험군에서 가장 낮은 축적치를 보였다.

신장의 수은 함량은 12주 후에 I군 13.91
 $\pm 4.10 \mu g/g$, II군 26.81 $\pm 4.86 \mu g/g$, III군
 78.15 $\pm 14.96 \mu g/g$, IV군 121.81 $\pm 26.87 \mu g/g$,
 V군 182.58 $\pm 36.91 \mu g/g$ 으로 근육질에서
 나타난 I군 0.30 $\pm 0.11 \mu g/g$, II군 1.48 ± 0.14
 $\mu g/g$, III군 5.76 $\pm 0.88 \mu g/g$, IV군 11.48 ± 3.12
 $\mu g/g$, V군 20.33 $\pm 5.75 \mu g/g$ 보다 10 배 이상
 의 높은 축적치를 보였으며 정상군의 0.02-0.06
 $\mu g/g$ 보다는 230~9,100 배의 높은 축적치를
 보였다.

2. 농도별 수은 함량

1) 저농도 실험군

제 I, II군에서는 실험기간 중 모든 부위에

Table 3. Mercury Concentrations of Selected Tissues of Goldfish exposed to Mercuric Chloride during the 12 Week Exposure

Tissue	Group (E. C.) #	1 week	2 week	3 week	8 week	12 week
Gill	I (2)	0.05 ± 0.01 ^a	0.68 ± 0.05	1.41 ± 0.26	1.84 ± 0.51	3.61 ± 1.04
	II (6)	1.45 ± 0.28	1.82 ± 0.36	3.26 ± 0.33	3.92 ± 0.88	5.32 ± 1.26
	III (30)	5.12 ± 0.84	10.18 ± 0.64	12.37 ± 0.85	55.28 ± 4.16	15.94 ± 3.04
	IV (120)	41.26 ± 4.11	57.38 ± 7.92	76.39 ± 5.11	77.92 ± 5.07	82.70 ± 13.37
	V (300)	48.24 ± 11.08	72.93 ± 6.01	98.18 ± 18.61	124.05 ± 18.74	188.54 ± 30.25
	Control	0.03 ± 0.01				0.03 ± 0.01
Kidney	I (2)	1.04 ± 1.08	2.71 ± 0.42	3.29 ± 0.77	9.17 ± 1.24	13.91 ± 4.10
	II (6)	1.76 ± 0.36	2.99 ± 0.90	4.34 ± 0.22	16.71 ± 5.12	26.81 ± 4.86
	III (30)	19.74 ± 3.64	30.15 ± 5.16	45.89 ± 8.11	63.02 ± 9.19	78.15 ± 14.96
	IV (120)	32.72 ± 8.29	61.94 ± 13.61	81.62 ± 17.45	113.01 ± 22.84	125.81 ± 26.87
	V (300)	43.21 ± 11.65	77.24 ± 19.07	105.45 ± 18.84	139.41 ± 15.04	182.58 ± 36.91
	Control	0.55 ± 0.02				0.05 ± 0.01
Liver	I (2)	0.65 ± 0.08	0.01 ± 0.20	1.83 ± 0.11	4.82 ± 0.77	8.56 ± 1.65
	II (6)	1.38 ± 0.17	1.99 ± 0.38	3.62 ± 0.27	8.01 ± 2.44	13.81 ± 3.07
	III (30)	2.88 ± 0.51	6.59 ± 1.47	15.26 ± 3.52	19.28 ± 3.04	21.77 ± 3.28
	IV (120)	11.48 ± 3.11	28.35 ± 5.07	54.57 ± 8.98	55.18 ± 6.11	57.43 ± 18.19
	V (300)	13.95 ± 3.38	31.38 ± 4.19	58.59 ± 6.46	65.18 ± 12.28	66.49 ± 20.21
	Control	0.06 ± 0.82				0.04 ± 0.01
Muscle	I (2)	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.03	0.08 ± 0.01	0.24 ± 0.03	0.30 ± 0.11
	II (6)	0.06 ± 0.02	0.28 ± 0.03	0.47 ± 0.07	0.78 ± 0.07	1.48 ± 0.14
	III (30)	0.05 ± 0.08	1.16 ± 0.28	2.07 ± 0.94	4.18 ± 0.45	5.76 ± 0.88
	IV (120)	3.81 ± 0.24	4.01 ± 0.64	8.71 ± 1.56	10.21 ± 4.42	11.48 ± 3.12
	V (300)	3.65 ± 0.71	5.58 ± 1.26	9.35 ± 2.14	14.71 ± 4.92	20.33 ± 5.75
	Control	0.05 ± 0.02				0.04 ± 0.01
Egg	I (2)	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.87	1.63 ± 0.21
	II (6)	0.12 ± 0.04	0.20	0.27 ± 0.02	0.92 ± 0.15	1.82 ± 0.09
	III (30)	0.76	1.38 ± 0.16	2.28 ± 0.21	5.26 ± 1.18	7.24 ± 1.25
	IV (120)	3.46 ± 0.32	5.91 ± 2.47	12.18 ± 2.03	12.94 ± 2.01	14.49 ± 4.27
	V (300)	4.18 ± 0.65	7.62 ± 2.61	11.22 ± 3.39	17.89 ± 3.14	23.76 ± 3.44
	Control	0.02 ± 0.01				0.02 ± 0.01

: Exposure concentration ($\mu\text{g}/\text{l}$)

a : Mean \pm S. D. ($\mu\text{g}/\text{g}$)

서 지속적인 축적 현상을 보였으며 이중 신장이 12주 후에 제 1군 $13.91 \pm 2.10 \mu\text{g}/\text{g}$, II군 $26.81 \pm 1.86 \mu\text{g}/\text{g}$ 으로 가장 높았고 간, 아가미, 알, 근육의 순위로 감소하는 경향을 보였

다(Fig. 1,2).

축적치중 최고치와 최저치는 I군에서 신장이 $13.91 \mu\text{g}/\text{g}$, 근육질이 $0.30 \mu\text{g}/\text{g}$ 으로 46.4 : 1.0의 함량비를 보였으며 II군에서는 신장

이 26.81 $\mu\text{g/g}$, 근육질이 1.48 $\mu\text{g/g}$ 으로 18.1 : 1.0의 함량비를 보였다. 제Ⅲ군에서도 신장 78.15 $\mu\text{g/g}$, 근육질 5.76 $\mu\text{g/g}$ 으로 13.6 : 1.0의 함량비를 나타내 역시 신장에서 지속적인 높은 축적현상을 보였으며 간, 아가미에서는 4주 이후 완만한 축적현상을 보였다(Fig.3).

2) 고농도 실험군

신장과 아가미의 수는 함량이 높아졌으며 (Fig. 4) V군에서는 12주 후에 아가미와 신장이 유사한 축적 정도를 보였고(Table 3, Fig. 5), 간에서는 4주 이후 증가폭이 감소하여 저농도 실험군의 지속적인 증가와는 다른 완만한 축적 현상을 보였다.

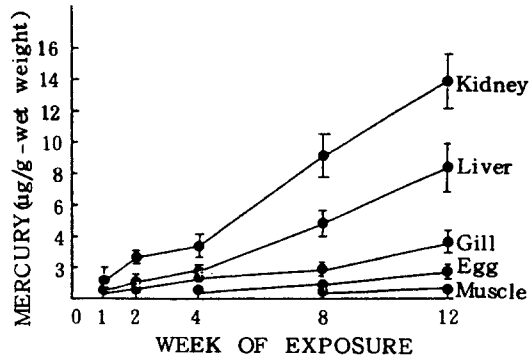


Fig 1. Mercury contents in selected tissues of goldfish exposed to 2 $\mu\text{g/l}$ HgCl_2

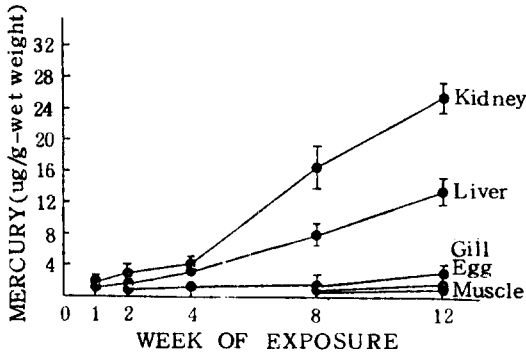


Fig. 2. Mercury contents in selected tissues of goldfish exposed to 6 $\mu\text{g/l}$ HgCl_2

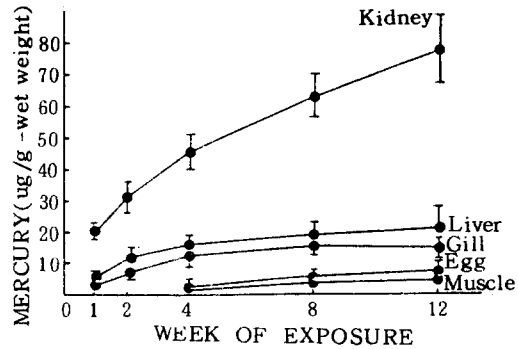


Fig. 3. Mercury contents in selected tissues of goldfish exposed to 30 $\mu\text{g/l}$ HgCl_2

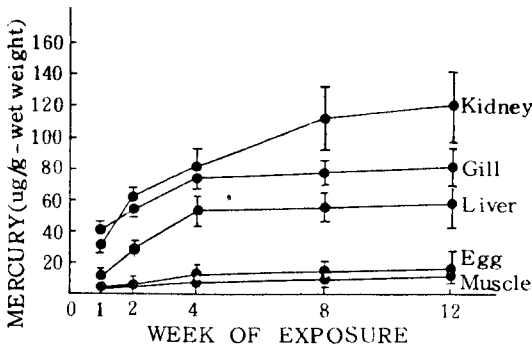


Fig. 4. Mercury contents in selected tissues of goldfish exposed to 120 $\mu\text{g/l}$ HgCl_2

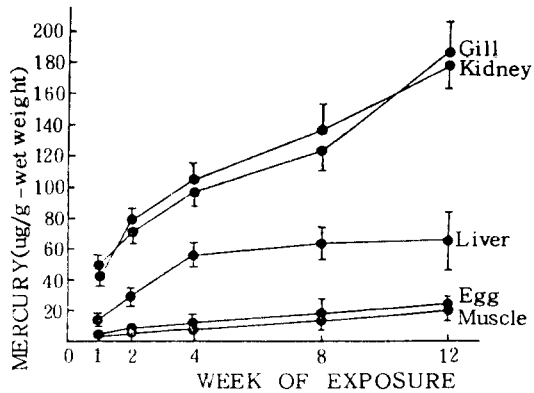


Fig. 5. Mercury contents in selected tissues of goldfish exposed to 300 $\mu\text{g/l}$ HgCl_2

축적치중 최고치와 최저치는 IV군에서는 신장이 $121.81\mu\text{g/g}$, 근육질이 $11.48\mu\text{g/g}$ 으로 10.6 : 1.0의 함량비를 보였으며 V군에서는 아가미가 $189.54\mu\text{g/g}$, 근육질이 $20.33\mu\text{g/g}$ 으로 9.3 : 1.0의 함량비를 보였다.

3. 근육내 메틸수은 함량

실험군의 근육내 메틸수은 함량은 Table 4에서와 같이 절대함량치에 있어서는 V군에서 $0.40 \pm 0.10\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높은 함량을 보였으며 IV, III, II군 순위로 함량이 감소하는 경향을 보였다.

총 수은과 메틸수은의 함량 비율은 I군에서 총 수은량이 $0.30 \pm 0.10\mu\text{g/g}$, 메틸수은량이 $0.10 \pm 0.10\mu\text{g/g}$ 으로 3 : 1 (33.33%)의 비율로 나타났으며 II, III, IV, V군 순위로 고농도일수록 낮은 함량 비율을 보였다.

IV. 고찰

수은은 자연상태에서 고농도의 광석으로 존재하고 쉽게 정련이 되기 때문에 기원전부터 인류가 사용해 온 중금속의 하나로서 근래에 이르기까지 각종 산업분야에서 그 이용도가 증가되고 있는 실정이며⁴⁾ 이러한 중금속 사용의 증가로서 야기되는 환경오염은 수중 생물에게도 직접적인 피해를 줄뿐 아니라 생태계를 통하여 궁극적으로 인체에 피해를 발생시킬 수 있다.⁹⁾

수계에 배출되는 수은 화합물은 무기 또는 유기수은의 형태로서 어류에 직접적으로 흡수, 농축되고 흡수된 수은은 세포내의 sulfhydryl group과 결합하여 안정된 mercaptide를 형성하여 효소의 활성을 저해하며 더 나아가서는 purin, pyrimidine, nucleic acid, nucleotide와 작용하여 세포의 기능에 손상을 초래한다.¹⁰⁻¹³⁾

지금까지 어류에 대한 수은의 급성, 만성, 독

Table 4. Concentration of Total Mercury and Methylmercury in Muscle after 12 Weeks Exposure

Group (E.C.)#	Total mercury	Methylmercury	Percentage (%)
I(2)	0.30 ± 0.10^a	0.10 ± 0.02	33.33
II(6)	1.18 ± 0.14	0.14 ± 0.02	11.44
III(30)	5.76 ± 0.88	0.25 ± 0.08	4.34
IV(120)	11.48 ± 1.12	0.39 ± 0.07	3.40
V(300)	20.33 ± 2.75	0.40 ± 0.10	1.97

#: Exposure concentration ($\mu\text{g/l}$)

a: Mean \pm S.D. ($\mu\text{g/g}$)

(Note) Percentage indicates the rate of methylmercury per total mercury

성 및 축적에 관한 연구들로서는 1976년 McKim 등²⁵⁾이 메틸수은 $0.93\mu\text{g/l}$ 에 폭로된 실험수에 송어(Salvelinus fontinalis)를 40주 동안 노출시켜 기간별, 조직별 축적정도를 조사한 후 혈액, 비장, 신장 등에 축적되는 양이 간, 아가미, 근육질보다 높고 모든 부위에서 20~28주 동안 지속적으로 축적됨을 관찰한 연구와, Sharma 등²⁶⁾이 붕어(C. auratus)의 24시간 치사농도(LC 50)에 가까운 수은 $400\mu\text{g/l}$ 와 메틸수은 $80\mu\text{g/l}$ 에 노출시켜 근육질에서 축적치를 조사하고 세레늄의 농도에 따라 수은의 축적이 억제되는 정도를 조사한 연구 등이 있다.

또한 24시간 LC 50 독성실험에 관해서는 Adelman 등⁸⁾이 붕어(C. auratus)에서 0.40mg/l , Hanumante 등⁹⁾이 민물고기인 Channa gachua에서 4.1mg/l 의 치사농도를 보여 어종에 따라 민감도가 다르고, Spehar 등²⁷⁾은 무지개 송어(Salmo gairdneri)에서 성어 0.49mg/l , 치어 0.90mg/l 의 치사농도를 보여 크기에 따라서도 민감도가 있음을 보고하였

다. 또한 같은 어종인 송사리(*Oryzias latipes*)에서도 일본산 송사리 0.74mg/l, 한국산 송사리 0.51mg/l의 치사농도로 서식처에 따라 민감도의 차이를 보였다.¹⁹⁾ 이와 같이 수은의 독성에 관한 실험의 결과는 수은 화합물의 형태,²⁶⁾ 어종의 종류,^{8,9)} 크기,²⁷⁾ 조사부위,^{11, 14~17,25)} 농도^{18~20)}에 따라 차이가 있었고 본 실험에서도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 다음과 같은 부위별 특징을 고찰할 수 있었다.

아가미는 수은과 제일 먼저 접촉되는 부위로서 체내 축적에 직접적인 영향을 주고 형태학적 변화가 가장 특징적으로 나타난다. 고농도 실험군에서 높은 축적치를 보인 것은 Pagenkopf²⁸⁾가 밝혔듯이 아가미는 다른 부위에 비하여 활발하게 수소 이온과 수은의 복합체를 형성하고 체적당 금속 이온과의 교환이 이루어지는 면적이 크기 때문으로 생각된다. 특히 치사되기 직전의 붕어에서는 아가미 lamella의 외피에서 floc 모양을 육안으로 관찰할 수 있었으며 이는 아가미 lamella에서 분비되는 점액질과 수은이 응집을 이루고 중국에는 Ca^{+2} , Mg^{+2} 등의 경도를 높이는 금속과의 경쟁적 억제제가 더욱 크게 작용하여 호흡곤란이 일어나 치사되는 것으로 사료된다.

저농도 실험군에서의 외형적 관찰은 정상군과 차이가 없었으나 12주 후에 저농도 실험군에서는 정상군의 아가미 수은 함량 0.03 μ g/g보다 120~150 배, 고농도 실험군에서는 2,700~6,300 배의 높은 축적치를 보여 수은 농도와 폭로 기간에 따라 체내 중금속 축적량도 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

신장은 아가미를 투과한 수은에 가장 직접적이고 민감한 영향을 받는 부위로 등 등¹⁷⁾의 메틸수은에 의한 급성중독 실험에서 소포체나 mitochondria가 손상을 받아 형성된 것으로 보이는 공포들을 관찰하였고 기지막의 비후 현상으로 신장 중독증(nephrotoxicity)을 일으

킨다고 보고하였으나 무기수은에 의한 만성중독의 미세구조나 생화학적 연구는 미비한 실정이다. 본 실험에서도 신장의 수은 함량은 정상군의 조사부위 보다 230~9,100 배의 높은 축적치를 보이고 있어 축적량에 따른 형태학적 변화가 클 것으로 생각된다. 또한 간은 고농도군에서 4주 이후 완만한 축적현상을 보였으나 신장은 모든 농도군에서 12주까지 지속적인 축적현상을 보여 메틸수은에 의한 축적 정도를 조사한 Mckim 등²⁹⁾의 실험 결과와 일치하고 있다.

간은 체내의 혈액과 담즙에 직접적인 영향을 받으며 수은함량의 증가로 succinic dehydrogenase, acid, alkaline phosphatase 등의 효소 활성이 억제되고 75 μ g/g 정도의 메틸수은 축적에 의해 간 괴사가 일어나 부분적으로 푸른색을 육안으로 볼 수 있다²⁹⁾고 하였으나 본 실험에서는 어느 실험군에서도 관찰할 수 없었으며 이는 무기수은의 독성이 메틸수은보다 약하기 때문으로 생각된다.

또한 고농도군에서 4주 이후 축적정도가 다른 부위에 비해 완만한 증가를 보이는 것은 Duve 등³⁰⁾의 연구에서와 같이 생리적 항상성에 의해 간세포의 lysosome이 급격히 증가하여 세포내로 흡수된 수은이나 수은에 의해 손상받은 세포내 소기관을 탐식하여 배설시킴으로서 간에서의 수은 축적을 억제시키기 때문으로 사료된다. 최고 농도 300 μ g/l의 실험군에서는 12주 후에 66.49 μ g/g의 축적치를 보여 김¹⁸⁾의 무기수은에 의한 급성중독시 7~9 μ g/g의 축적치와는 큰 차이가 있었으나 Mckim 등의 폭로 기간에 따른 지속적인 증가 현상과는 일치된 결과를 보였다.

근육질은 어류의 주된 가식부로서 수은 축적 정도는 흡수되는 수은 화합물의 형태에 따라 차이가 나며 체내 50% 이상이 유기수은 화합물로 축적이 되는 것은 유기수은이 아가미나 소화기관의 membrane barrier를 용이하게

통과하여 다른 조직으로 수송되어 고정되고 이로 인하여 반감기가 증가하기 때문에 다른 부위와 비슷한 축적치를 보인다고 하였다.^{25,31)} 본 실험에서 나타난 근육질의 수은 축적치는 조사부위중 가장 낮았으며 Mckim 등²⁵⁾이 조사한 유기수은의 높은 흡수율에 비하여 무기수은의 흡수율이 상대적으로 낮아 이제까지의 여러 연구 결과⁶⁻¹³⁾와 같이 수은 화합물의 형태가 축적에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 300 $\mu\text{g}/\text{l}$ 군에서 12주 후에 나타난 근육내 축적치는 20.3 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 김이 조사한 Hg-Cl₂ 500 $\mu\text{g}/\text{l}$ 에서 96시간 급성중독에 의한 축적치 1.3 $\mu\text{g}/\text{g}$ 보다 15배 이상 높게 나타났으며, 이는 같은 종류의 수은 화합물의 경우에도 폭로 농도보다 기간에 의해 축적 정도가 크게 영향을 받기 때문으로 생각된다.

알은 두꺼운 세포벽에 의해 오염물질로부터 보호를 받기 때문에 다른 조직에 비하여 축적되는 양은 낮으나 비록 소량의 축적 농도에도 민감한 영향을 받게 된다. Servizi 등³²⁾이 조사한 2종류 연어(Sockeye and Pink salmon)에 대한 HgCl₂ 농도에 따른 168시간 LC 50은 알에서 4 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 이 농도는 치어나 성어의 180~220 $\mu\text{g}/\text{l}$ 에 비하여 매우 낮은 저농도에서도 치사되는 것으로 보고 되었으며 수은에 폭로된 알은 성장과정에서 sperm viability, embryogenesis 등이 격감되고 치어의 생존율이 낮아진다고 하였다. 본 실험에서는 embryo에 미치는 영향은 조사되지 않았으나 근육질보다는 지속적으로 높은 축적을 보여 축적 정도에 따른 영향도 클 것으로 사료된다.

메틸수은은 무기수은 화합물이 수질 미생물이나 광화학적 반응에 의하여 methylation되거나 체내에서 유기수은으로 전환되어 축적된다. Biological methylation은 methionine synthetase, acetate synthetase, methane synthetase 등의 효소 작용과 methyl cobalamine, vitamine B와 같은 methyl do-

nor에 의하여 어류의 간과 장에서 활발히 형성되어 진다.^{32,33)} 본 실험에서는 300 $\mu\text{g}/\text{l}$ 실험군에서 메틸수은의 함량이 0.40 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 가장 높은 축적치를 보였으며 총 수은과의 함량비는 1 : 50으로 나타나 체내에서 이루어지는 methylation은 소량임을 알 수 있었으나 기간별 축적 정도는 조사하지 않아 농도에 따른 시간별 축적 정도는 규명하기 어려웠다. 수은 화합물중 가장 독성이 높은 메틸수은은 먹이 연쇄를 통하여 인간에게 섭취되며 그 대부분은 오염된 어류를 통하여 이루어지고 체내 흡수율에 있어서는 무기수은 화합물에 비하여 45배 이상의 높은 흡수율을 나타낸다고³²⁾ 하였다.

실험농도에 따른 총 수은과 메틸수은 함량에 대한 백분을 비교는 고농도 군일 수록 낮은 함량비율을 보였으며 이는 Hidemitsu 등³³⁾이 다랑어(Yellowfin tuna) 장내에서 이루어진 유기수은의 이동 경로에서 밝혔듯이 수은의 methylation 정도는 폭로 농도보다는 폭로 기간에 더 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.

V. 결 론

수은에 장기간 폭로 되었을때 생체에 축적되는 수은량을 파악하기 위하여 붕어(*Carassius auratus*)를 선택하여 기간별, 장기 부위별 조사를 실시하였다.

실험 방법은 HgCl₂ 2, 6, 120, 300 $\mu\text{g}/\text{l}$ 의 5개 농도군을 설정하여 1주, 2주, 4주, 8주 및 12주 후에 개복하고 이가미, 간, 신장, 근육, 알 등에 축적된 양을 조사하였으며 bi-omethylation 정도를 구하기 위하여 12주 후에 근육에서 총 수은량중의 메틸수은량을 구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 부위별 수은 축적량 : 신장과 간은 저농도 실험군에서 높은 축적치를 보였고 이가미, 알, 근육의 순위로 감소하였으며 고농도 실험군에서는 이가미와 신장이 높은 축적치를 보였고

간, 알, 근육의 순위로 감소하였다.

2. 농도별 수은 축적량 : 각 실험군의 최고치와 최저치는 $2\mu\text{g}/1$ 군에서 신장 $13.91\mu\text{g}/\text{g}$, 근육질 $0.30\mu\text{g}/\text{g}$ $6\mu\text{g}/1$ 군에서 신장 $26.81\mu\text{g}/\text{g}$, 근육질 $1.48\mu\text{g}/\text{g}$ $30\mu\text{g}/1$ 군에서 신장 $78.15\mu\text{g}/\text{g}$, 근육질 $5.76\mu\text{g}/\text{g}$ $120\mu\text{g}/1$ 군에서 신장 $121.81\mu\text{g}/\text{g}$, 근육질 $11.48\mu\text{g}/\text{g}$ $300\mu\text{g}/1$ 군에서 아가미 $189.54\mu\text{g}/\text{g}$, 근육질 $20.33\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 같은 실험군에서도 조사 부위에 따라 최고치가 최저치에 비하여 9.3~46.4 배의 축적도를 보였다.

3. 근육질내 총 수은과 메틸수은량의 함량비율은 $2\mu\text{g}/1$ 군에서 총 수은량 $0.30\mu\text{g}/\text{g}$, 메틸수은량 $0.10\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 3 : 1 (33.3%)의 비율로 나타났으며 고농도군 일수록 낮은 함량 비율을 보였다.

참 고 문 헌

1. Hannerz, L.: Experimental investigations on accumulation of mercury in water organisms. Fishery Board of Sweden, Institut. Freshwater Res. 1968, Drottingholm, Report 48.
2. Sprague, J.B.: Measurement of pollutant toxicity to fish. Water Res., 3: 793-821, 1969.
3. Rath, P., Panigrahi, A.K. and Misra, B.N.: Effects of both inorganic and organic mercury on the ATPase activity of *Westiellopsis prolifica*, *Jamet*. Environmental Pollution (Series A). 42:143-149, 1986.
4. Hammond, P.B. and Beliles, R.P.: Metals. In: Doull, J., Klassen, C.D. and Amdur (eds), M.O., Casarett and Doull's Toxicology. 2nd ed., Macmillan Publishing Co. Inc. New York, pp. 421-435, 1980.
5. Rustam, H., Burg, R.V. and Hassani, S.E.: Evidence for a neuromuscular disorder in methylmercury poisoning. Arch. Environ. Health. 30:190-195, 1975.
6. Donaldson, M.L. and Gubler, C.J. Biochemical effects of mercury poisoning in rat. The American J. of Clinical nutrition. 31:859-865, 1978.
7. Wojtalik, T.A.: Accumulation of mercury and its compounds. Journal of WPEF. 43:1280-1292, 1971.
8. Adelman, I.R. and Smith, G.D.: Acute toxicity of sodium chloride, pentachlorophenol, guthion and hexavalent chromium to fathead minnows and goldfish. J. Fish. Res. Bd. Canada. 33:203-208, 1976.
9. Hanumante, M.M. and Kulkarni, S.S.: Acute toxicity of molluscicides, mercuric chloride and pentachlorophenol to a freshwater fish (*Channa gachua*). Bull. Environm. Contam. Toxicol., 23:725-727, 1979.
10. Chan, L.W.: Neurotoxic effects of mercury-a review. Environmental Research., 14:329-373, 1977.
11. Dinardi, S.R., Wisnieski, K.S. and Macdonald E.C.: Mercury concentrations in tissues of fish from the Connecticut river. J.E.H., 36:547-551, 1974.
12. Jackin, E., Hamlin, J.M. and Sonis, S.: Effect of metal poisoning on five liver enzymes in the killfish (*Fundulus heteroclitus*). J. Fish. Res. Bd. Canada., 27: 383-390, 1970).
13. Hinton, D.E. and Koenig, J.C.: Acid phosphatase activity in subcellular fractions of fish liver exposed to methyl-

- mercury chloride. *Comp Biochem. Physiol.* 508:621-625, 1975.
14. 김명희, 박성배 : 담수어중의 총 수은 함량에 관한 연구, *한국육수학회지*, 14(3) : 13-19, 1981.
 15. 손동현, 홍순각, 송철용, 전상린 : 담수어중의 총 수은 함량에 관한 연구, *한국식품과학회지*, 14(2) : 168-173, 1982.
 16. 강희곤, 윤원용, 박상현, 박성배 : 북한강에 서식하는 담수어중의 중금속 함량에 관한 연구, *한국육수학회지*, 19(1) : 79-87, 1986.
 17. 등연건, 유관희, 최춘근, 최임순 : 수은중독에 의한 붕어 장기의 미세구조 변화, *한국동물학회지*, 121(3) : 87-102, 1978.
 18. 김종만 : 2종 담수어류에 대한 수은 및 카드뮴의 영향, *Bulletin of KORDI*, 1(1) : 15-21, 1979.
 19. 유용래 : 중금속이 송사리(*Oryzias latipes*)에 미치는 급성독성에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원 석사학위논문, 1987.
 20. Martin, T.R. and Holdich, D.M.: The acute lethal toxicity of heavy metals to peracarid crustaceans. *Water Research.* 20(9): 1137-1147, 1986.
 21. Carr. R.A. and Wilkiss, P.E. Mercury Short-term storage of natural waters. *Environmental Science & Technology.* 7(1):62-63, 1973.
 22. Coleman Instrument Division Sample preparation for the determination of mercury in blood. Application Data Sheet. MAS-50-7, 1971.
 23. Gay, D.D.: Methylmercury Formation in plant tissues. US E.P.A., Lasvegas. Nevada 89114. PB-255096.
 24. Czuba, M., Akagi, H. and Mortimmer D.C.: Quantitative analysis of methyl-and inorganic-mercury from mammalian, fish and plant tissue. *Environmental Pollution.* 2:345-352, 1981.
 25. Mckim, J.M., Olson, G.F., Holcombe, G.W. and Hunt, E.P.: Long-term effects of methylmercuric chloride on three generations of brook trout (*Salvelinus fontinalis*): Toxicity, accumulation, distribution, and elimination, *J. Fish Res. Board Can.* 33:2726-2739, 1976.
 26. Sharma, D.C. and Davis, P.S.: Effect of sodium selenite and selenomethionine on the accumulation and acute toxicity of mercuric and methylmercuric chloride in the goldfish. *Indian J. Exp. Biol.* 18 82-84, 1980.
 27. Spehar, R.L., Christensen, G.M., Curtis., Lemke, A.E. and Pickering, O.H. Effect of pollution on freshwater fish. *J. WPCF.* 54(6): 877-922, 1982.
 28. Pagenkopf, G.K.: Gill surface interaction model for trace-metal toxicity to fishes: Role of complexation, pH, and water hardness. *ES & T*, 17(6): 342-347, 1983.
 29. Kendall, M.W.: Acute effects of methyl mercury toxicity in channel catfish liver. *Bull. Environm. Contam. Toxicol.*, 18(2): 143-151, 1977.
 30. De Duve, C. and Wattiaux, R.: Functions of lysosomes. *Ann. Rev. Physiol.* 28: 435-492, 1966.
 31. Cappon, C.J. and Smith, J.C.: Mercury and selenium content and chemical form in fish muscle. *Arch. Environm. Contam. Toxicol.*, 10:305-319, 1981.
 32. Moore, J.W. and Ramamorrhthy, S.: Heavy metals in natural waters. Springer-Verlag N. Y. Inc. New York.. pp. 134-152, 1984.