

넙치(*Paralichthys olivaceus*) 치어조직의 나프탈렌(Naphthalene) 생물농축

이경선*[†] · 류향미**

* 목포해양대학교 환경·생명공학과, ** 국립수산물과학원 서해수산연구소

The Bioconcentration of Naphthalene in Tissues of Juvenile Olive flounder, *Paralichthys olivaceus*

Kyoung-Seon Lee*[†] · Hyang-Mi Ryu**

* Department of Environmental Engineering and Biotechnology, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

** West Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute, Incheon, 400-420, Korea

요 약 : 나프탈렌(Naphthalene)과 같은 다환방향족탄화수소류(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)는 수계에 유입되어 해양생물들에게 영향을 미치게 된다. 나프탈렌은 유류속의 PAHs 내에서 함량이 가장 높으며, 독성이 강하다. 본 연구에서는 대조구(0 $\mu\text{g/L}$), 1000, 1800, 3200, 5600, 10000 $\mu\text{g/L}$ 의 6개 나프탈렌 농도구를 설정하고 넙치 치어에 대한 나프탈렌의 24시간 반수치사농도(24h-LC₅₀)을 구했으며, 아가미, 간, 신장, 근육내의 나프탈렌 농도를 분석하였다. 넙치 치어의 24h-LC₅₀은 Large 그룹에서 2410.76 $\mu\text{g/L}$, Small 그룹에서 2230.67 $\mu\text{g/L}$ 을 나타내었다. 각 조직에서의 나프탈렌 농도는 간 및 신장에서 아가미 및 근육보다 높았다.

핵심용어 : 다환방향족탄화수소, 나프탈렌, 생물농축, LC₅₀, 넙치

Abstract : Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) such as naphthalene, are released into the aquatic environment and have been identified as endocrine effects on marine organisms. Naphthalene makes up the highest fraction of PAHs in oil and shows the strong toxicity to aquatic organisms. I analyzed 24h-median lethal concentration (24h-LC₅₀) for juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus* to study the acute toxicity of naphthalene. Bioconcentrations in the gill, liver, kidney and muscle of olive flounder were analyzed after to 6 naphthalene concentrations of 0, 1000, 1800, 3200, 5600 and 10000 $\mu\text{g/L}$. Olive flounder has 24h-LC₅₀ value of 2410.76 $\mu\text{g/L}$ in Large group, and 2230.67 $\mu\text{g/L}$ in Small group. Naphthalene concentration was varied with tissues. The concentrations of naphthalene were much higher in liver and kidney than in gill and muscle.

Key Words : Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), Naphthalene, Bioconcentration, LC₅₀, Olive flounder

1. 서 론

산업 발달과 더불어 국가 간 교역이 증가함에 따라 해상에서의 교통량이 증가하고 있고, 이와 더불어 선박사고에 의한 유류의 해양 유입량이 증가함에 따라 해양의 유류오염이 사회적으로 큰 문제가 되고 있다(Seo, 2005). 우리나라는 1980년대부터 산업화에 따른 유류 사용 증가로 인해 우리나라에서의 원유 수입량은 폭발적으로 증가하였고, 수출입 물동량이 증가하여 선박사고에 의한 해양 유류 오염 발생율이 높아지고 있으며, 해난사고 방지 시스템이 취약하여 해양 유출사고가 매년 300건 이상 발생되고 있

는 실정이다(Kim, 2008). 해양으로 유출된 유류는 선박사고 외에 해저유전의 누출, 정유공장, 도시 및 공장 폐수 등에 의해서도 해양으로 유입되고, 낮은 용해도에 의하여 수계에 잔류하고, 수년간 지속해서 해저층에 분포하여 해양생태계를 오염시킨다(Kim and Shin, 2001). Hwang et al.(2001)은 씨프린스호의 해상 유류 유출 사고 지역에 오염되지 않은 조피볼락(*Sebastes schlegelii*)과 담치류(홍합과, Mytilidae), 전복류(전복과, Haliotidae) 및 굴(*Crassostrea gigas*)을 사육시킨 결과, 이들 생물에서 다환방향족탄화수소류(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)가 검출되었음을 보고하였다. PAHs는 두개 이상의 방향족 고리를 포함하고 있는 탄화수소류로, 물에 대한 용해도가 낮은 소수성 물질이다. 나프탈렌은 다양한 원유 속에 포함된 PAHs 중

[†] Corresponding Author : kslee@mmu.ac.kr, 061-240-7317

72.3~93.5%로 가장 높은 비율을 차지하고 있다(Chung et al., 2006). 비늘모양의 무색 결정체인 나프탈렌은 고체에서 액체를 거치지 않고 바로 기체로 변화하는 승화성 물질이며, 분자식은 $C_{10}H_8$ 로써 벤젠고리 두 개가 이어져 있는 방향족 탄화수소 화합물이며, 분자량은 128.18, 녹는점은 80.2 °C, 끓는점은 218 °C, 수용해도는 $3.17 \times 10^4 \mu\text{g/L}$, 헨리상수는 $4.89 \times 10^2 \text{Kpa}(25 \text{ }^\circ\text{C})$ 로(Kim and Shin, 2001), 석유계 탄화수소류의 수용성 분획 중에서 급성 독성이 비교적 높다.

PAHs에 의한 생물 폐사 농도는 일부 패류 및 어류에 있어 보고되고 있으나(Eisler, 1987), 지금까지 PAHs에 의한 생물 영향에 관한 연구는 대부분 저서무척추동물에 초점이 맞추어져 왔으며 생물체에 독성을 발휘하는 PAHs의 농도에 대해서는 아직 규명되지 않은 부분이 많다. 또한 어류의 경우 용이한 이동성 때문에 일반적으로 피해가 적은 것으로 알려져 있어 유영성 어류에 관한 연구는 상대적으로 적은 실정이다. 그러나 연안에 양식장이 밀집되어 있어 연안에서 발생하는 선박사고 및 유류 유출사고 등으로 인하여 PAHs 오염에 노출될 수 있는 확률이 높고, 연안이 주요 어종의 산란지로 이용된다고 볼 때 PAHs에 의한 연안오염은 중보전 및 자원관리에 있어 심각한 영향을 끼칠 수 있다.

저서성 어류인 넙치(Olive flounder, *Paralichthys olivaceus*)는 우리나라 대표적인 양식어종이며, 이동 범위가 비교적 좁기 때문에 연안지역에 주로 생활하여 유류유출 사고 시 PAHs에 노출될 가능성이 높아 많은 영향을 받을 것으로 예상 된다(Kim et al., 2003). 특히 치어의 경우 유출된 유류막이 몸 전체를 감쌀 경우 폐사할 확률이 높으며, 성어보다 독성물질에 더욱 민감하다. 어류의 유해물질 축적은 독성발현과 많은 관련이 있으며, 조직에 축적되는 정도는 오염물질에 대한 바이오모니터로 이용되기 때문에 각 조직에 따른 축적 정도는 매우 중요한 의미를 갖는다(Handy, 1992).

본 연구는 넙치 치어를 대상으로 생물검정시험을 실시하여 나프탈렌의 24h-LC₅₀을 구하고, 체내에 흡수된 나프탈렌의 생물농축특성을 알아보기 위하여 아가미, 간, 신장, 근육 조직에서의 나프탈렌의 농도를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험어 및 실험조건

실험생물로 사용한 넙치는 전남 무안군에 위치한 넙치종묘생산장에서 생산된 치어를 분양 받아 실험실로 운반한 후 실험조건으로 순치시키면서 폐사율이 안정될 때까지 2~3주 사육하였다. 수온은 1 °C/day로 온도 상승시켜 20 °C로 순치시켰으며, 광주기는 14:10(L:D)으로 유지하였

다. 수질을 유지하기 위하여 GF/F로 여과한 해수를 2일 주기로 교환하였으며, 벽면의 이물을 제거하고 수조저면의 배설물을 제거하였다. 사육기간 동안 넙치 치어용 배합사료(우성사료)를 하루 2회 매일 9시와 5시에 전체 치어체중의 3%를 급여하였다. 실험에는 건강한 개체를 선별하여 실험에 사용하였다.

2.2 생물검정시험

넙치 치어에 대한 나프탈렌 생물검정시험은 Hall and Golding(1998)의 생물검정시험 방법에 준하여 실시하였다. 넙치 치어는 Large 그룹(BW; $9.26 \pm 2.23 \text{ g}$, BL; $81.53 \pm 6.38 \text{ mm}$)과 Small 그룹(BW; $4.88 \pm 1.52 \text{ g}$, BL; $69.79 \pm 7.63 \text{ mm}$)으로 나누어 10 L 해수를 채운 수조에 넙치 10마리씩 넣고 대조구(메탄올 10 mL주입), 1000, 1800, 3200, 5600, 10000 $\mu\text{g/L}$ 의 6개의 농도구를 설정하여 실험하였다. 각 농도구별 농도를 일정하게 유지하기 위하여 1000, 1800, 3200, 5600, 10000 $\mu\text{g/L}$ 의 실험구는 2시간 마다 메탄올 10 mL에 나프탈렌 80%를 녹여 보충하였으며, 대조구는 2시간 간격으로 메탄올 10 mL씩 주입하였다. 실험 중 해수의 수온은 $20 \pm 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 염분은 $31 \pm 0 \text{ psu}$, pH는 7.8 이상으로 유지시켰고, 용존산소량(DO)은 6.5 mg/L 이상이 되도록 하였다.

생물검정시험 중 폐사한 개체는 생체량을 측정된 후 아가미, 간, 신장, 근육을 채취하여 -70 °C에서 동결 보관하였다. 24시간 실험 종료 후 살아있는 개체는 5% 2-phenoxyethanol로 마취시킨 후 각 조직을 채취하여 동결 보관하였다. 또한 폐사율 분석을 위해 실험 시작 후 나프탈렌 노출 환경에 따른 넙치의 행동을 관찰하였으며, 아가미 활동이 완전히 정지된 상태를 폐사한 것으로 판단하였다.

2.3 조직분석

각 조직에 농축된 나프탈렌의 농도는 GC-MSD (Shimadzu, GC 17A)를 이용하여 분석하였다. 각 조직으로부터 속실텍 추출(Sohxlet extraction)과 액액 추출(Liquid-liquid extraction) 방법에 의하여 나프탈렌을 추출하였고(Husain et al., 1997; Takatsuki et al., 1985), 농축시킨 시료는 dichloromethane/hk n-hexane(1:2)로 활성화시킨 Sep-pak florasil cartridge(Waters, USA)를 이용하여 정제한 후 GC-MSD를 사용하여 각 조직의 나프탈렌을 정량 하였다. 사용한 column은 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm 의 J&W사의 DB-5 column을 이용하였고, 시료 주입 방법은 Splitless mode로 하였다. 검출 방법은 특정 질량의 이온만을 선택하여 검출하는 방법인 SIM mode를 이용하였으며, GC-MSD 분석 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Operating condition of GC-MSD

GC	• Column	• J&W DB-5 capillary column(30 m×0.25 mm×0.25 μ m)
	• Carrier gas	• He (99.999 %)
	• Injection port temp.	• 250 °C
	• Injection mode	• Splitless, purge time : 1 min, 2 μ l
	• Column flow	• 3.6 mL/min
	• Oven temp. programing	• Start temp. : 40 °C (1 min) Final temp. : 110 °C (1 min) Increasing speed : 10 °C (1 min)
MSD	• Interface temp.	• 280 °C
	• Ionization mode	• Electron Impact (EI)
	• Electron energy	• 70 eV
	• Ion source temp.	• 280 °C
	• Analyzer	• Quadrupole
	• Detection mode	• Selected Ion Monitoring (SIM)

2.4 통계처리

넙치 치어의 생존, 사망개체수를 분석하여 24시간 반수치 사농도(24h-LC₅₀)를 계산하였다. 반수치사농도는 SPSS의 통계 패키지(Ver. 10)를 사용하여 Probit 방법으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

나프탈렌에 대한 넙치 치어의 생물검정시험 결과 Large 그룹에서는 대조구와 1000, 1800 μ g/L 농도구에서 폐사한 개체가 없었으며, 3200 μ g/L 에서는 24시간 이내에, 5600 μ g/L 에서는 12시간 이내에 모든 개체가 폐사하였고 10000 μ g/L 농도구에서 5시간 이내에 폐사하였다. Small 그룹은 대조구와 1000 μ g/L 농도구에서 폐사한 개체가 없었으나, 1800, 3200 μ g/L에서는 24시간 이내에, 5600 μ g/L에서는 13시간 이내에, 10000 μ g/L 농도구에서는 6시간 이내에 모든 개체가 폐사하였다. Large 그룹의 24h-LC₅₀ 값은 2410.76 μ g/L, Small 그룹의 24h-LC₅₀ 값은 2230.67 μ g/L로 분석되었다. Lee and Ryu(2011)는 넙치 치어의 나프탈렌에 대한 24h-LC₅₀ 값이 3600 μ g/L라 보고하였는데 본 연구의 생물검정시험과 달리 Lee and Ryu(2011)의 연구에서는 생물검정시험 중 나프탈렌을 재 보충하지 않고 초기 농도에서 24시간 동안 시험을 실시하여 시험 중 나프탈렌 농도 감소에 따른 영향이 나타나 본 연구보다 24h-LC₅₀ 값이 높았던 것으로 생각된다.

일반적으로 유해물질의 급성독성을 측정하는 방법으로 생물이 50% 폐사하는 농도를 나타내는 반수치사농도(LC₅₀)를 사용하는데 각종 유해물질의 독성정도를 상호 비교하기에 편리하다. 독성에 대한 생물반응은 독성물질의 복합성과 상호작용뿐만 아니라 생물종의 다양성과 개체

차이에 의하여 일정하지 않으며, 생물검정시험에 있어서도 독성 유해물질의 수중농도유지, 수중독성물질의 상태변화, 수질변화 등에 의해서도 큰 차이를 나타내므로 이에 대한 주의가 필요하다(Hall and Golding, 1998). Eisler(1987)는 캘리포니아 해양 생물 3종에 대해 나프탈렌 급성 독성을 실시한 결과 곱사연어(*Oncorhynchus gorbuscha*), 양두모치(*Cyprinodon variegatus*), 곰새우(*Crangon crangon*)의 24h-LC₅₀은 각각 920, 2400, 2500 μ g/L이라고 보고하였다. 넙치의 24h-LC₅₀값은 양두모치 및 곰새우와 유사하지만 곱사연어보다 높다. 이는 곱사연어에 비하여 넙치가 섭취할 경우를 제외하고는 활동성이 적고, 유영능이 강한 다른 어종에 비하여 대사강도가 낮으므로 독성에 대한 내성이 다소 높게 나타난 것으로 생각된다. 또한 Lee et al.(2004)은 황복(*Takifugu obscurus*)에 대한 나프탈렌 급성 독성 평가를 실시하였는데, 황복은 10000 μ g/L 농도에서 24시간 안에 30% 이하의 폐사율을 보였고, 48h-LC₅₀이 7,720 μ g/L를 나타내어, 이 결과로부터 넙치가 황복보다 나프탈렌 독성에 민감한 것으로 생각된다.

조직 중의 나프탈렌은 노출된 모든 개체에서 검출되었으며 각 조직별 나프탈렌 농축은 신장>간>아가미>근육 순으로 나타났다(Fig. 1). 각 조직에서의 나프탈렌 농축 정도를 어체중으로 환산하여 Large 그룹과 Small 그룹간의 상대적인 비율을 Fig. 2에 나타내었다. 나프탈렌의 상대적 조직 농축량은 Large 그룹보다 Small 그룹에서 높아 개체 크기에 따라 농축물의 차이를 보였다. Small 그룹이 Large 그룹보다 24h-LC₅₀이 낮아 나프탈렌에 대한 독성이 더 강하게 작용한 것으로 보아 체내의 높은 농축에 의하여 독성을 발현시키는데 영향을 미친 것으로 판단된다.

넙치(*Paralichthys olivaceus*) 치어조직의 나프탈렌(Naphthalene) 생물농축

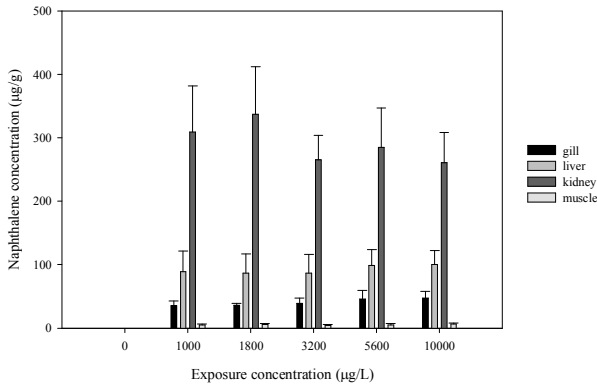


Fig. 1. Naphthalene concentration(mean±SE) in various tissues of olive flounder exposed to 6 experimental naphthalene concentrations.

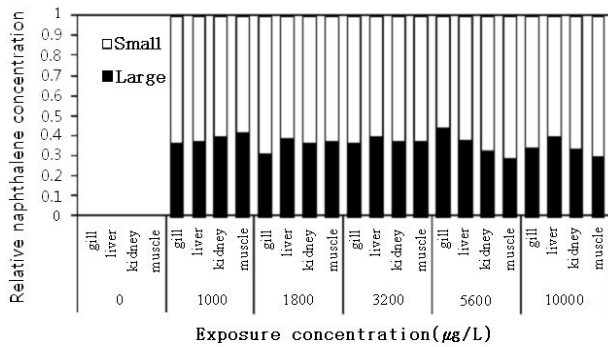


Fig. 2. Relative concentration for naphthalene in various tissues of olive flounder to body size.

Hellou and Warren(1997)이 보고한 대서양 북서부 지역에서 포획한 미국 가자미류 *Hippoglossoides platessoides*와 *Pleuronectes ferruginea*에서 PAHs의 농도를 조사한 결과 *H. platessoides*는 근육과 생식선 보다 간에서 PAHs의 농축농도가 높았으나, 나프탈렌은 근육에서 가장 높게 나왔으며, *P. ferruginea*에서는 근육과 생식선에서 PAHs가 불검출 되었으나, 간에서 유기계 메탄계 탄화수소인 알칸이 우세하게 나타났다. 참돔(*Pagrus major*), 흑대기(*Paruplagusia japonica*)와 같은 연안 서식종 11종을 채집하여 조직속의 나프탈렌의 분포를 조사한 결과 대부분의 어류가 뇌, 생식선 등 지방함량이 높은 조직에서 저분자량의 나프탈렌이나 고분자량의 Flouranthane 모두 높게 검출되었으며 아가미나 간은 근육보다 상대적으로 낮은 농도를 보였다(Deb et al., 2000). 송어류인 *Mugil curema*의 나프탈렌 체내 농축은 빠르게 진행되고 특히, 간 및 신장에서의 농축률이 높으며, 생물농축지수(Bioconcentration factor, BCF)는 근육과

아가미 보다 간과 신장에서 높게 나타났으며 생물 농축속도가 배출 속도 보다 빠른 경향을 보였고, 나프탈렌의 농축은 각 기관에서 48시간 안에 최대에 이른 후 점차 감소하는 경향을 보였다(Correa and Venables, 1985).

본 연구에서는 넙치 치어가 최대 24시간 나프탈렌에 노출되어 상대적으로 나프탈렌에 노출된 시간이 짧으며 *M. curema*의 결과와 비교하면 넙치 치어에 있어 생분해 속도보다 생물농축 속도가 빠른 시기에 해당되는 것으로 보인다. 넙치 치어의 폐사시간과 나프탈렌 농축 정도를 비교해보면 10000 µg/L 농도구에서는 6시간 이내, 5600 µg/L 농도구에서는 12시간 이내, 3200 µg/L 농도구에서는 24시간 이내에 모두 폐사하였고 그 이하의 농도구에서는 24시간 생존하였으므로 나프탈렌 농도구에 따라 넙치치어가 나프탈렌에 노출된 시간이 차이가 난다. 따라서 본 연구에서 나프탈렌 농도에 따른 조직의 나프탈렌 농축 정도에 차이가 나지 않는 것은 나프탈렌에 노출된 시간의 차이에 의하여 체내 흡수되는 양에서 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 결과는 나프탈렌과 같은 PAHs의 오염에 상시 노출되어 있는 연안의 서식 종들에서 나타난 PAHs의 조직분포 특성과 다르다고 할 수 있는데 이는 급성독성의 경우 체내로 들어오는 독성물질을 해독, 배출하기 위해 생분해 과정이 일어나는 간 및 신장에서의 농도가 높아지고 만성적으로 노출되는 경우에는 지방함량이 높은 조직에 축적이 일어나기 때문에 뇌나 생식소와 같은 조직에서 농도가 높은 것으로 사료되며, 노출시간에 따른 생물농축 및 생분해 속도를 함께 고려해야 할 것이다.

어류 조직에서의 유해물질 농축은 온도, 성장주기, 연령, 다른 물질과의 관계 또는 수중의 화학성분과 대사 활성 및 유해물질에 노출된 양과 시간에 의존성이 높으므로 (Pagenkopf, 1983; Heath, 1987), 나프탈렌과 같은 PAHs류의 생물농축특성을 파악하기 위해서는 노출시간 및 체내 농축과 함께 생분해 속도를 함께 측정해야 할 것이며, 환경인자와의 상호작용을 함께 고려해야 할 것이다. 또한 약물 대사효소(drug-metabolizing enzyme)를 발생하여 PAHs에 분해하는 시스템을 가지고 있는 어류는 주로 산화, 환원, 가수분해 효소에 의해 PAHs를 생물대사시킬 수 있으므로 (Tuvikene, 1995), 나프탈렌과 같은 PAHs에 대한 효소작용에 대해서 함께 고려하면 나프탈렌의 조직에 농축 및 생분해되는 메카니즘을 규명할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 넙치 치어를 이용하여 나프탈렌에 대한 생물검정을 실시하고 각 조직의 농축 경향을 파악한 결과

는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- 1) 넙치 치어에 대한 나프탈렌의 24h-LC50은 Large 그룹 (BW; 9.26±2.23 g, BL;81.53±6.38 mm)에서 2410.76 µg/L, Small 그룹(BW; 4.88±1.52 g, BL; 69.79±7.63 mm)에서 2230.67 µg/L로 분석되었다.
- 2) Large 그룹에서 보다 Small그룹에서 각 조직의 나프탈렌 농축이 높게 나타났다.
- 3) 나프탈렌은 간과 신장에서 농축 정도가 높았다.

감사의 글

본 연구의 GC/MSD 분석을 도와준 장석원 군에게 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Chung, H. H., E. H. Park and S. W. Choi(2006) Compositional characteristics and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) of crude oils and petroleum products, Journal of the Environmental Sciences, Vol. 15, pp. 397-403.
- [2] Correa, M. and B. J. Venables(1985) Bioconcentration of naphthalene in tissues of the white mullet (*Mugil curema*), Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 4, pp. 227-231.
- [3] Deb, S. C., T. Araki and T. Fukushima(2000) Polycyclic aromatic hydrocarbons in fish organs, Marine Pollution Bulletin, Vol. 40, pp. 882-885.
- [4] Eisler, R.(1987) Polycyclic aromatic hydrocarbon hazards to fish, wildlife, and invertebrates, Contaminant Hazard Reviews Report, No. 11, pp. 1-55.
- [5] Hall, J. A. and L. Golding(1998) Marine fish, Acute toxicity test protocol. In: Standard methods for whole effluent toxicity testing; development and application, NIWA, MFE 80205, Hamilton, pp. 1-29.
- [6] Handy, R. D.(1992) The assessment of episodic metal pollution. I. Use and limitation of tissue contaminant analysis in rainbow trout(*Oncorhynchus mykiss*) after short waterborne exposure to cadmium or copper, Archives of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 22, pp. 74-81.
- [7] Heath, A. G.(1987) Water pollution and fish physiology, CRC press, Florida, p. 245.
- [8] Hellou, J. and W. G. Warren(1997) Polycyclic aromatic compounds and saturated hydrocarbons in tissues of flatfish: Insight on environmental exposure, Marine Environmental Research, Vol. 43, pp. 11-25.
- [9] Husain, A., E. Naeemo, B. Dashti, H. Al-Omirah and S. Al-Zenki(1997) Polycyclic aromatic hydrocarbons in food products originating from locally reared animals in Kuwait, Food Additives and Contaminants, Vol. 14, pp. 295-299.
- [10] Hwang, I. Y., J. G. Park, K. H. Park, J. S. Kim, H. B. Jung and C. H. Bae(2001) PAHs accumulation in various marine organisms by the marine pollution after oil spill accidents, Korean Journal of Environmental Toxicology, Vol. 16, pp. 57-66.
- [11] Kim, S. G., S. W. Jang and J. C. Kang(2003) Cadmium elimination in tissue of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* after long-term exposure, Journal of Korean Fisheries Society, Vol. 36, pp. 44-48.
- [12] Kim, S. J.(2008) Herbei sprit oil spill accident, Journal of KSEE, Vol. 30, pp. 146-152.
- [13] Kim, T. S. and S. K. Shin(2001) Analytical methods and release of polycyclic aromatic hydrocarbons in environments, Analytical Science & Technology, Vol. 14, pp. 47-74.
- [14] Lee, J. S., K. T. Lee, D. H. Kim, J. H. Kim and K. N. Han(2004) Acute toxicity of dissolved inorganic metals, organotins and polycyclic aromatic hydrocarbons to puffer fish *Takifugu obscurus*, Korean Journal of Environmental Toxicology, Vol. 19, pp. 141-151.
- [15] Lee, K. S. and H. M. Ryu(2011) The acute toxicity of naphthalene on hematologic properties in juvenile flounder *Paralichthys olivaceus*, The Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 17, pp. 191-196.
- [16] Pagenkopf, G. K.(1983) Gill surface interaction model for trace-metal toxicity to fishes: role of complexation, pH and water hardness, Environmental Science and Technology, Vol. 17, pp. 342-347.
- [17] Seo, J. H.(2005) Physiological response of the pacific oyster, *Crassostrea gigas*, to PAH(polycyclic aromatic hydrocarbons) exposure, Gyeongsang National University Master Thesis, pp. 1-2.
- [18] Takatsuki, K., S. Suzuki, N. Sato and I. Ushizawa(1985) Liquid chromatographic determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in fish and shellfish, Journal-Association of Official Analytical Chemists, Vol. 68, pp. 945-949.
- [19] Tuvikene, A.(1995) Responses of fish to polycyclic aromatic

넙치(*Paralichthys olivaceus*) 치어조직의 나프탈렌(Naphthalene) 생물농축

hydrocarbons(PAHs), Finnish Zoological and Botanical
Publishing Board, Vol. 32, pp. 295-309.

원고접수일 : 2012년 08월 03일

원고수정일 : 2012년 09월 17일 (1차)

2012년 10월 12일 (2차)

게재확정일 : 2012년 12월 27일