

식용 어패류 조직중의 glutathione S-transferase 활성과 화학물질 오염에 의한 변화

송미란 · 최선남* · 박관하**

기전여자전문대학 식품영양학과, *군산대학교 해양과학대학 수산가공학과

**군산대학교 해양과학대학 수족병리학과

Glutathione-S-transferase Activity and its Changes to Chemical Pollution in Edible Shells and Fishes

Miran Song, Sun-Nam Choe* and Kwan Ha Park**

Department of Food Nutrition, Kijeon Women's Junior College

*Department of Sea Food Science & Technology

**Department of Fish Pathology, College of Ocean Science & Technology,
Kunsan National University

Abstract

This study was undertaken to explore the applicability of glutathione S-transferase (GST) activity as a predictable indicator to monitor chemical pollution in shells and fishes utilized for food. There were some variations in the basal level of GST activity depending on species tested. Ark shells, *Anadara satowi*, showed the highest normal enzyme activity, followed by catfish and marine mussels, *Mytilus coruscus*. White clams, *Meretrix lusoria*, Israeli carp and catfish had lower activity. When *A. satowi* was exposed to 3-methylcholanthrene (3-MC), a prototypic polycyclic aromatic hydrocarbon for 1 week, GST activity decreased by about 30%. This reduction in GST activity induced by 3-MC did not recover until two weeks after the cessation of exposure. GST activity increased in response to 3-MC in most of the other species studied. The GST elevation in *M. coruscus* attained its maximum of about 200% at the termination of 3-MC exposure maintaining this level up to 2 weeks, and declined gradually thereafter. 3-MC also induced GST activity in Israeli carp in a similar fashion to *M. coruscus*. Phenobarbital induced GST activity both in *M. coruscus* and Israeli carp. Other chemicals, such as clofibrate, butylated hydroxyanisole, hexachlorobenzene, and oxolinic acid did not change the enzyme activity significantly in most species. Phenol depressed GST activity only in Israeli carp. These results suggest that the basal level of GST activity is somewhat variable and that the direction of change in response to chemicals seems to be related to its normal activity. The change in enzyme activity can be a predictable indicator of some environmental chemicals such as PAHs and phenol.

Key words: mussels, fishes, glutathione S-transferase activity, enzyme activity change

서 론

어류 및 패류는 외부에서 침입한 환경오염물질에 반응하여 약물들의 대사효소가 변화하는 것이 알려져 있다. 이들 효소는 오염물질의 산화반응을 매개하는 cytochrome P-450계인 phase I 효소와 conjugation 반응을 수행하는 phase II 효소계를 모두 포함한다⁽¹⁾. 예를 들면 수중의 어류에서 polycyclic aromatic hy-

drocarbon (PAH)류나 polychlorinated biphenyl류의 물질들에 장기간 노출에 의해 간체장에서 phase I 효소인 cytochrome P₄₅₀-dependent monooxygenase 및 phase II 효소인 UDP-glucuronosyl transferase나 glutathione S-transferase (GST)의 활성을 변화시킨다^(2,3).

GST (E.C. 2.5.1.18)는 약물의 phase II 단계를 촉매하는 효소 중의 하나로 생체내의 세포질에 주로 존재한다고 알려져 있으며 다양한 동식물에서 발견되고 있다⁽⁴⁾. GST는 다소 hydrophilic 한 nucleophile의 탄소 원자를 가진 물질간의 포합반응을 매개한다. *In vitro*에서의 연구결과 1-chloro-2,4-dichlorobenzene, p-ni-

Corresponding author: Kwan Ha Park, Department of Fish Pathology, Kunsan National University, Kunsan, Chonbuk 573-400, Korea

troebnzyl chloride, Δ^5 -androsterone-1,4-dione, bromosulfo-phthalein, ethacrynic acid 등의 물질들이 GST의 기질이 됨이 확인되었다⁽⁵⁾. GST에는 수종의 isozyme이 존재하는데 포유동물에서 최소한 8종의 isozyme이 알려져 있으며 각 효소는 기질특이성이 상당히 넓다. 모든 GST는 2개의 subunit로 구성되어 있으며 어류의 경우 90%의 효소활성이 cytosol에서 발견되고 있고 그 나머지는 소포체에 결합된 상태로 존재한다. Cytosol 형과 소포체형의 GST는 생화학적 특성이 매우 상이하여, iodoacetamide나 N-ethylmaleimide에 의해 소포체형은 수배 활성화 되나 cytosol형은 변화가 없다. 또한 phenobarbital이나 3-methylcholanthrene과 같은 전형적인 microsomal 효소 유도물질에 대해 microsomal의 GST활성 변화는 미약한 편이다(2~5배의 증가)⁽⁶⁾.

화학물질의 노출에 따른 GST의 활성변화는 주로 rainbow trout나 담치에서 연구되고 있으나⁽¹⁻³⁾ 국내에서 식용으로 사용하고 있는 어패류에서의 GST활성은 아직 체계적으로 연구된 바가 없으며 더구나 화학물질에 의한 활성변화에 대해서는 전혀 연구된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 식용으로 사용하고 있는 어패류에서의 오염정도를 추정할 수 있는 지표로서 phase II 효소계의 하나인 GST의 활성이 수종의 다양한 유형의 화학물질에 의해서 어떻게 변화하는가를 검토하였다. 특히 증가일로에 있는 유류오염과 관련하여 유류물질 중에 다량 함유되어 있는 polycyclic aromatic hydrocarbon류 물질에 오염되었을 경우에 일어날 수 있는 효소변화에 대하여 중점적으로 연구하고자 하였다. 그런 목적으로 유류성분은 아니지만 대표적 PAH류 물질로서 다른 시험계에서 다양한 화학물질 대사효소계의 활성증가를 유발하는 것으로 알려진 3-methylcholanthrene에 대해서는 노출 후의 경시적 변화도 추적하였다.

재료 및 방법

어패류 시료

GST활성을 측정할 시료는 이스라엘 잉어(*Cyprinus carpio*), 조피볼락(*Sebastes schlegeli*), 메기(*Parasilurus asotus*), 백합(*Meretrix lusoria*), 큰이랑 피조개(*Anadara satowi*), 홍합(*Mytilus coruscus*)을 사용하였다. 조피볼락, 이스라엘 잉어 및 메기는 인근의 양식장에서 구입 후 약 1개월간 실험실에서 사육 후 시험에 사용하였으며, 패류 시료는 자연산을 현장에서 포획하거나 시장에서 포획 수시간 내의 살아있는 상태로 구입하여 실험실에서 사육하면서 사용하였다. 순치기간 및 시험

기간중 동물들은 수온 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 에서 유지하였으며, 순치기간 중 어류에는 치어용 사료를 급여하였으나 패류에는 별도의 급여를 하지 않았다. 화학물질 노출 기간중에는 어패류 모두 사료를 공급하지 않고 10 L의 해수 또는 담수에 5마리씩 수용하였다. 사육수는 매 2~3일에 1회씩 환수하였다. 어류에서는 간채장만을 적출하여 사용하였으며 패류는 소화선을 적출하여 사용하였다.

GST활성의 측정

어류 GST의 활성은 주로 간장의 cytosol (90% 이상) 부분에서 존재하나 isoform에 따라서 microsome에도 존재하기 때문에⁽⁷⁾ cytosol과 microsome을 모두 포함하는 S-9 fraction을 효소활성의 측정에 사용하였다. 즉, 냉각시킨 100 mM potassium phosphate buffer (pH 7.4)를 조직의 3배양을 가하고 Potter-Elvehjem glass-Teflon homogenizer로 균질화 하였다. 이 suspension을 high-speed refrigerated centrifuge (Hitachi)로 4°C 에서 20분간 원심분리하였다. Supernant를 50 μL 를 취해 증류수 450 μL 와 혼합하고 glutathione 1 mM, 1-chloro-2,4-dinitrobenzene (CDNB) 1 mM의 존재하에서 340 nm에서의 1분간 흡광도 변화를 측정함으로써 GST의 활성을 측정하였다. 조직 homogenate내의 단백질 함량은 assay kit를 사용하여 micro-Lowry method 등⁽⁷⁾에 따라 수행하였다.

시약

Glutathione, CDNB, clofibrate, 3-methylcholanthrene, phenol, butylated hydroxyanisole, oxolinic acid, sodium phenobarbital, hexachlorobenzene, micro-Lowry method용 protein assay kit는 Sigma (St. Louis, USA)에서 구입하였다. CDNB는 ethanol에 3-methylcholanthrene과 clofibrate는 dimethylformamide에 각각 녹여서 사용하였으며 기타의 약물은 saline에 용해하여 사용하였다.

Data의 처리

실험결과는 평균±표준오차의 형태로 표현하였으며 대조군과의 차이는 unpaired t-test를 사용하여 비교하고 $p < 0.05$ 이 하인 경우 유의성이 있다고 판단하였다.

결과 및 고찰

기초적 GST 활성과 화학물질에 의한 변화

시험한 어류 및 패류에의 정상적 GST 활성이 동물종에 따라 큰 차이가 발견되었다(Table 1). 시험한 3종

Table 1. Change in glutathione-S-transferase activity ($\mu\text{mole}/\text{min}/\text{mg}$ protein) by various chemical contaminants in fresh fishery foods

Chemicals	Ark shell (<i>Anadara satowi</i>)	Mussel (<i>Mytilus coruscus</i>)	White clam (<i>Meretrix lusoria</i>)	Israeli carp (<i>Cyprinus carpio</i>)	Catfish (<i>Parasilurus asotus</i>)	Rock fish (<i>Sebastes schlegelii</i>)
Control	6.25 \pm 0.23	1.05 \pm 0.05	0.45 \pm 0.03	0.52 \pm 0.03	1.08 \pm 0.62	0.53 \pm 0.03
CF 10 mg/L	7.04 \pm 0.32	1.24 \pm 0.28	0.48 \pm 0.04	0.72 \pm 0.06	1.38 \pm 0.34	0.44 \pm 0.02
3-MC 1 mg/L	3.33 \pm 0.41*	1.88 \pm 0.32*	0.54 \pm 0.02	1.21 \pm 0.34*	2.04 \pm 0.44*	0.71 \pm 0.03*
HCB 1 mg/L	5.43 \pm 0.72	1.23 \pm 0.06	nt	nt	nt	0.52 \pm 0.07
PB 20 mg/L	4.23 \pm 0.72	1.64 \pm 0.09*	nt	1.03 \pm 0.02*	nt	nt
BHA 1 mg/L	6.31 \pm 1.20	nt	nt	0.43 \pm 0.05	nt	nt
phenol 10 mg/L	5.28 \pm 0.81	nt	nt	0.21 \pm 0.05*	nt	nt
OA 10 mg/L	6.42 \pm 0.44	nt	nt	0.59 \pm 0.11	nt	nt

Animals were exposed to each chemical for 1 week and GST activity was measured on the next day.

The number of animals was 8-12 in each group.

*Significantly different from control.

n.t.: not tested.

CF: clofibrate.

3-MC: 3-methylcholanthrene.

HCB: hexachlorobenzene.

BHA: butylated hydroxyanisole.

PB: Na phenobarbital.

OA: oxolinic acid.

의 패류 소화관에서는 큰이랑피조개에서 가장 높은 기초적(정상적) 활성이 발견되었으며 홍합, 백합에서는 그 보다 낮은 활성이 관찰되었다. 이들 패류에서는 어류에 비하여 장기의 구분이 명확하게 구분되지 않아 실험시의 적출방법에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 본 연구결과에서 나타난 커다란 차이는 적출난 이도에 기인한 오차는 아닐 것으로 보인다. 어류 중에서는 메기에서의 활성이 이스라엘잉어나 조피볼락에서 보다 2배정도 높게 나타났다. 3종의 어류에서의 체중에 대한 간체중량의 상대중량이 비슷한 것을 고려하면 이 차이는 어종에 따른 진정한 차이일 것으로 추정된다. 또한 본 연구에서는 이들 시험계의 화학물질 노출에 따른 효소활성변화에 관한 기초적 정보를 얻기 위하여 다양한 유형의 화학물질을 사용하였으며 그 결과 사용한 화학물질들의 노출에 따른 변화의 방향은 다양한 것으로 드러났다.

어류에서 phase I 효소류는 3-MC나 β -naphthoflavone 등의 PAH 류 물질에 의해 수 십배 내지 백배의 효소 유도 현상이 관찰되지만 phase II 효소계에 해당하는 GST의 경우는 최고 수배 이상의 유도는 일어나지 않는 것이 일반적이다⁽¹³⁾. 본 연구에서는 시험한 6종의 어패류 중 큰이랑피조개와 백합을 제외한 홍합, 이스라엘잉어, 메기 및 조피볼락의 4종 모두에서 3-MC에 의해 활성의 증가가 관찰되었다(Table 1). 그러나 매우 흥미롭게도 큰이랑피조개에서는 3-MC가 활성의 감소를 유도하였다. 이 결과만으로 일반적인 현

상을 설명하기는 어렵겠지만 큰이랑 피조개와 같이 이미 기초적 효소활성이 높은 어패류에서는 활성이 저해되는 방향으로, 반대로 기초적 활성이 낮은 어패류에서는 유도의 방향으로 작용할 가능성이 있다. 이 결과는 3-MC는 실제로 다양한 어종에서 다양한 방향으로의 활성변화를 유발하는 사실과 관련이 있는 듯하다. 즉 plaice에서 유도⁽¹⁴⁾, flounder에서 억제⁽¹⁵⁾ 및 fat-head minnow와 killfish에서는 불변⁽¹⁶⁾ 등 다양한 변화가 보고되고 있다. Hexachlorobenzene (HCB)은 1950년대에 농업용 향진균제로 사용되었던 물질로 화학적으로 매우 안정하여 환경내에서 파괴가 매우 느린 지속성 있는 환경오염 물질이어서 현재에도 전세계의 수계환경에서 검출되고 있다. HCB는 cytochrome P₄₅₀ 효소계에 대한 유도물질임이 포유동물에서는 보고되고 있으나⁽¹⁷⁾, 이 연구에서 검토한 어패류에서는 phase II계 효소의 하나인 GST의 활성은 변화시키지 아니하였다.

Clofibrate (CF)는 cytochrome P₄₅₀계 효소중 P-450IVA를 유발하는 물질⁽¹⁸⁾로 과거에는 고cholesterol증 치료제로 사용되었기 때문에 환경오염물질이 될 가능성은 희박하나 포유동물에서 대사효소의 증가를 유도한다고 알려져 있기 때문에 본 연구에 포함시켰다. 한편 마취제나 수면제로 사용되는 phenobarbital (PB)도 수산식품을 특수한 경우가 아니면 오염시킬 가능성이 있는 물질은 아니나 다양한 포유류, 조류, 어류 및 패류에서 GST 등의 약물대사효소의 활성을 유도하는 전형적인 물질^(15,16)이므로 본 연구에 사용된 어패류 중

에서의 효소 변화 추이를 검토하기 위하여 사용하였다. 그 결과 phenobarbital은 홍합 및 이스라엘 잉어에서의 GST의 활성을 증가시켰으나 큰이랑피조개에서는 감소하는 추세를 나타내었다(큰이랑 폐조개에서 통계학적 유의성은 없음). 항산화제로 사용되고 있는 합성화학물질인 butylated hydroxyanisole (BHA)는 인공적으로 사료에 혼합하여 투여하기 때문에 양식어류에 노출될 가능성이 있는 물질이다. 본 시험에서는 노출에 따른 GST의 변화를 유발하지 못하였으나 가자미류 어류에서는 활성이 유도됨을 보고한 바가 있다^(6,10). 최근 환경오염물질로 사회적인 문제가 되고 있는 phenol은 그 친화도가 낮기는 하나 정상적인 GST의 기질이 되는 물질⁽¹⁷⁾이며 anabas에서는 GST의 활성을 유도하는 것이 보고되어 있다⁽¹⁸⁾. 본 연구에서는 이스라엘 잉어에서 활성의 저해현상이 관찰되었으나 phenol이 효소반응을 저해한 것인지 아니면 효소의 합성저해에 의한 것인지 그 원인에 대해서는 더 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다. 한편 이 연구에서 사용된 oxolinic acid는 빈번히 사용되고 있는 수산용 합성항균물질로 양식어종들이 노출될 가능성이 높다. 그러나 시험한 2종의 동물인 큰이랑피조개와 이스라엘 잉어에서의 활성변화는 관찰되지 않았으므로 oxolinic acid (OA)는 GST활성의 변화를 유발하는 능력은 없는 물질로서 이 물질의 오염도에 대한 평가는 GST의 측정에 의한 방법은 적정지 않는 것으로 보인다.

3-Methylcholanthrene에 의한 GST활성의 경시적 변화

오염물질에 노출되었을 경우 생존상태로 유통되는 대부분의 수산물은 축양기간 또는 유통기간 동안 물질이 상당량 배설될 가능성이 높다. 따라서 수종의 기기분석학적 방법에 의한 잔류량분석법은 충분한 감도를 갖추지 못할 경우 미량의 검출은 불가능할 것이다. 그러나 만약 오염물질 노출 후에 상당기간 지표로 사용하고자 하는 효소의 활성이 유지된다면 효소측정 방법이 기기분석수단을 대체할 수 있는 예민한 수단이 될 수도 있다. 이러한 가능성을 검토하기 위하여 PAH류의 물질인 3-MC를 대표적 검토물질로 하여 홍합, 큰이랑피조개 및 이스라엘 잉어에서의 GST활성이 1주간 노출 후에 어떻게 변화하는가를 추적하였다. 3-MC를 홍합에 노출시키면서 GST의 경시적 변화를 관찰한 결과는 Fig. 1와 같다. 즉 1주일간의 노출직 후에 GST활성은 평균 약 2배로 증가되었으며 그 수준은 노출을 중단하고도 1주간 계속하여 유지되다가 중단 2주경 부터는 정상수준으로 회복되는 추세를 보

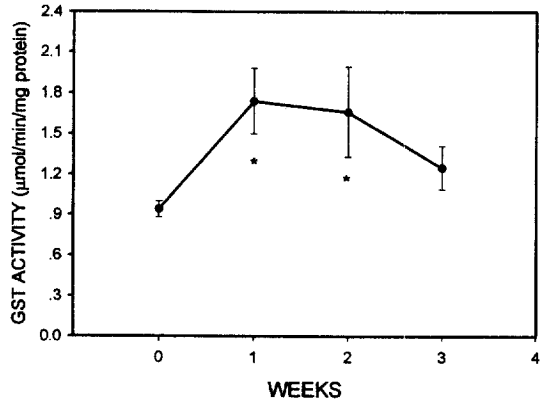


Fig. 1. GST activity changes in a marine mussel, *Mytilus coruscus*, following 3-MC treatment. The marine mussels were exposed to 1 mg/L of 3-MC for the first 1 week and GST activity was measured at 0, 1, 2 and 3 week. *Significantly different from Week 0.

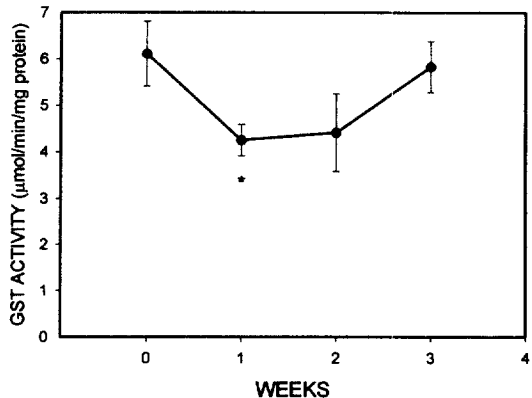


Fig. 2. GST activity changes in ark shells, *Anadara satoii*, following 3-MC treatment. Ark shells were exposed to 1 mg/L of 3-MC for the first 1 week and GST activity was measured at 0, 1, 2 and 3 week. *Significantly different from week 0.

여주었다. 한편 큰이랑피조개에서의 활성은 3-MC 1주일 노출로 오히려 약 30%의 감소가 관찰되었으며 노출의 중단 후에도 감소된 상태로 유지되다가 노출 중단 2주경에는 정상화되는 변화를 보여주었다 (Fig. 2). 이스라엘 잉어에서도 기초 활성의 약 2배에 상당하는 GST활성의 증가가 관찰되었으나 홍합에서와는 달리 최대 수준은 노출중단 직후가 아닌, 중단 1주 후에 관찰되었으며 중단 2주 후에는 홍합의 경우에서처럼 정상화하는 경향을 보여주었다(Fig. 3). 일반적으로 패류에서의 cytochrome P₄₅₀계 효소 유도능은 어류보다 훨씬 낮은 것으로 평가되고 있다^(19,20). 그러나 본 연구에서의 결과로는 phase II 효소계의 일종인 GST의 정

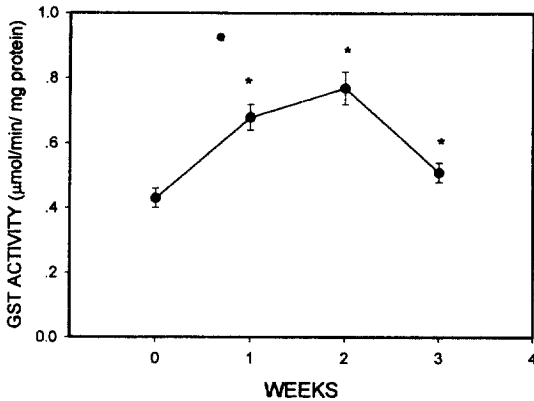


Fig. 3. GST activity changes in Israeli carp following 3-MC treatment. The fish were exposed to 1 mg/L of 3-MC for the first 1 week and GST activity was measured at 0, 1, 2 and 3 week. *Significantly different from week 0.

상적 활성이나 유도경향이 어류와 패류간에는 뚜렷한 차이는 없는 것으로 확인되었다.

본 연구 결과에 의하면 어류 및 패류에 존재하는 효소의 변화는 식품으로 사용될 어패류가 환경오염물질에 오염이 되었던 가를 추정하는 지표로 사용될 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 이런 맥락에서 환경학 분야의 연구자들이 환경오염도를 추정하는 지표로써 다양한 생물종에서의 약물대사효소의 변화를 측정하는 방법을 제시하고 있다. 연체동물은 이런 목적으로의 사용이 증가추세에 있다. 연체동물에서의 오염지표들은 직접적으로 오염물질의 농도를 측정할 수도 있고⁽²¹⁾ 비치사수준의 장기적인 생물학적현상의 변화를 측정하기도 한다^(22,23). 한 예로서 홍합류의 일종인 *Mytilus galloprovincialis*의 소화선내에서 benzo(a)pyrene hydroxylase의 활성이 PAH hydrocarbon에 48시간 노출에 의해 현저하게(60~90%) 증가함이 관찰되었다⁽²⁴⁾. 또 현장에서 포획한 동일종의 패류에서는 PAH의 sediment내의 농도에 비례하여 효소의 활성이 증가됨이 확인되었다. 특히 패류는 어류와는 달리 도파능력이 제한되어 있기 때문에 화학물질의 오염시 직접적이고 지속적인 노출을 피할 수 없는 경우가 많다. 더구나 담치와 같은 여과섭식자들은 지용성 오염물질들을 농축시켜서 환경내의 농도보다 높은 농도로 축적시키기 때문에 피해가 증폭되는 현상이 있다. 최근 PAH류의 물질에 의한 육수 및 해수의 오염은 심각한 사회문제로 대두되고 있다. PAH류는 유류연소 잔류물, coal tar, 담배연기, 석유화학 물질, 절삭유 등에 존재하고 있으며 자연계에서는 파괴속도가 느리기 때문에 우리

가 섭취하는 수종의 수산식품을 오염시킬 가능성이 크다. 이렇게 오염물질로써 혼입된 PAH류는 3-methylcholanthrene으로 실험동물에서 증명된 바와 같이 인간에서 암을 유발할 가능성이 크다⁽²⁵⁾.

환경오염물질들의 존재를 수산식품내에서 파악하는 수단으로 현재는 주로 시료내에 존재하는 화학물질을 분석화학적 방법으로 정량하는 방법이 많이 활용되고 있으나 본 연구에서와 같이 생물학적인 지표의 변화를 파악하는 방법을 추가적인 수단으로 모색해볼 충분한 가치가 있는 것으로 보인다. 화학적 분석의 장점은 식품내에 존재하는 화학물질의 종류와 양을 파악하는 장점이 있으나 화학물질의 양이 너무 다양하고 예상물질에 대한 정보가 있는 경우가 아니면 매우 복잡하고 까다로운 분석과정을 필요로 하는 문제점이 있다. 반면에 본 연구에서와 가같은 생물학적인 지표 반응(biomarker response)은 시험과정은 간단하나 오염된 물질의 종류를 알 수가 없는 단점이 있다. 현재의 연구결과만으로는 직접적으로 특정한 화학물질에의 오염현상을 예측할 수 있는 지표가 되기는 아직 어렵지만, 화학물질에 의한 노출로 나타나는 GST의 변화는 증가든 감소든 간에 최소한 어패류가 비생리적인 화학적 stress 조건에 처해있었던가를 추정하는 자료로서는 의미가 있다고 사료된다. 다음 단계의 연구로는 화학 구조적으로 또는 독성학적으로 유사한 물질들을 한두종의 생물에 노출시키면서 변화 방향을 추적하는 연구가 수행되어야 본 연구결과의 응용가능성에 대한 보다 검토가 가능할 것이다. 한편 생물학적 지표반응이 분석적 방법으로 정량이 불가능한 농도범위에서도 변화가 감지될 가능성이 있는가를 집중적으로 검토할 필요가 있다고 본다.

요 약

본 연구는 식용으로 사용되는 어패류의 화학오염지표로서 glutathione S-transferase (GST)의 활성을 사용할 수 있는 가를 검토하기 위하여 수행하였다. 어류의 간체장 및 패류의 소화선에서 기초적 GST 효소활성은 시험한 동물종에 따라 차이를 보였다. 시험한 어패류 중 큰이랑 피조개에서의 활성이 가장 높았으며 메기 및 홍합이 그 다음이었다. 백합 및 이스라엘 잉어에서는 낮은 기초적 활성을 보여 주었다. 큰이랑 피조개를 전형적인 PAH물질인 3-methylcholanthrene에 1주일간 노출 시켰을 경우 GST의 활성은 약 30% 감소하였으며 노출중단 2주경에는 회복되었다. 다른 대부분의 동

물종에서는 GST의 활성이 3-MC에 의하여 증가하였다. 홍합의 경우 기초 활성의 약 200% 수준으로 증가하여 노출중단 후에도 1주일간 지속되다가 서서히 감소하였다. 이스라엘 잉어에서도 홍합과 유사한 반응이 관찰되었다. Phenobarbital은 홍합 및 이스라엘 잉어에서 GST 활성을 증가시켰다. Clobibrate, butylated hydroxyanisole 및 oxolinic acid 등은 효소활성의 변화를 유발하지 아니하였다. 한편 phenol은 이스라엘 잉어에서 활성을 감소시켰다. 이 결과를 종합하면 식용 어패류의 정상적 GST활성은 동물종에 따라 큰 차이가 나며 화학물질 오염에 따른 변화도 증가, 감소 및 불변으로 다양한 것으로 관찰되었다. 따라서 이 효소의 활성을 측정함으로써 PAH나 phenol과 같은 환경오염물질에 의한 오염정도를 추정할 수 있는 지표로서의 사용이 가능하리라고 본다.

문헌

- Gregus, Z., Watkins, J.B., Thompson, N.T., Harvey, M. J., Rozman, K. and Klaassen, C.D.: Hepatic phase I and phase II biotransformations in quail and trout: comparison to other species commonly used in toxicity testing. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **67**, 430 (1983)
- Elcombe, C.R. and Lech, J.J.: Induction and characterization of hemoproteins P-450 and monooxygenation in rainbow trout. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **49**, 437 (1979)
- Andersson, T., Pesonen, M. and Johanson, C.: Differential induction of cytochrome P-450 dependent monooxygenase, epoxide hydrolase, glutathione transferase and UDP-glucuronosyltransferase activities in the liver of the rainbow trout by β -naphthoflavone or clophen A50. *Biochemical Pharmacol.*, **34**, 3309 (1985)
- Jacoby, W.B.: The glutathione S-transferase. *Adv. Enzymol.*, **46**, 383 (1978)
- Igarashi, T. and Kitagawa, H.: Glutathione S-transferase, Tokuseiseigagaku I, Chichin Shokan, Tokyo, p.298 (1989)
- George, S.G.: Enzymology and molecular biology of phase II xenobiotic-conjugating enzymes in fish. In *Aquatic Toxicology: Molecular, biochemical, and cellular perspectives*, 1st ed., Malins, D.C. and Ostrander, G.K. (Ed.), CRC Press, London, p.37, (1994)
- Nimmo, I.A., Coghill, D.R., Hayes, J.D. and Strange, R. C.: A comparison of the subcellular distribution, subunit composition and bile-acid binding activity of glutathione S-transferase from trout and rat liver. *Comp. Biochem. Physiol.*, **68B**, 579 (1981)
- Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L. and Randal, R.J.: Protein measurement with the folin phenol reaction. *J. Biol. Chem.*, **193**, 265 (1951)
- Goksoyer, A. Andersson, T., Hansson, T., Klungsoy, J., Zang, Y. and Frlin, L: Species characteristics of the hepatic xenobiotic and steroid biotransformation systems of two teleost fish, atlantic cod (*gudas morhua*) and rainbow trout (*salmo gairdneri*). *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **89**, 347 (1987)
- Leaver, M.J., Clarke, D.J. and George, S.G.: Molecular studies of the phase II xenobiotic-conjugating enzymes of marine pleuronectid flatfish. *Aquat. Toxicol.*, **22**, 425 (1992)
- Scott, K., Leaver, M. and George, S. Regulation of hepatic glutathione S-transferase expression in flounders. *Mar. Environ. Res.*, **34**, 233 (1992)
- James, M.O., Heard, C.S. and Hawkins, W.E.: Effects of 3-methylcholanthrene on monooxygenase, epoxide hydrolase, and glutathione S-transferase activities in small estuarine and freshwater fish. *Aquat. Toxicol.*, **12**, 1 (1988)
- Ecobicon, D.J.: Toxic effects of pesticides, In *Casarett and Doull's Toxicology*, 4th ed., Madur, M.O., Doull, J. and Klaassen, C.D. (Ed.), Pergamon Press, New York, p.565 (1991)
- Michel, X., Sala n, J.P., Galini, F. and Narbonne, J.F.: Benzo(a)pyrene hydroxylase activity in the marine mussel *Mytilus galloprovincialis*: A potential marker of contamination by polycyclic aromatic hydrocarbon-type compounds. *Mar. Environ. Res.*, **38**, 257 (1994)
- Adesnik, M., Bar-Nun, S., Maschio, F., Zunick, M., Lippman, A. and Bard, E.: Mechanism of induction of cytochrome P₄₅₀ by phenobarbital. *J. Biol. Chem.*, **256**, 10340 (1981)
- Galli, A., Del Chiaro, R. and Bronzetti, G.: Studies on cytochrome P450 in mytilus galloprovincialis: induction by Na-phenobarbital and ability to biotransform xenobiotics. *Mar. Biol.*, **100**, 69 (1988)
- Snyder, R., Longacre, S.L., Witmer, C.M., Kocsis, J.J., Andrews, L.S. and Lee, E.W.: Biochemical toxicology of benzene. In *Reviews in Biochemical Toxicology*, Elsevier/North Holland Publishing Co., New York, Vol. 3, p.123 (1981)
- Chatterjee, S. and Bhattacharya, S.: Detoxication of industrial pollutants by the glutathione S-transferase system in the liver of *Anabas testudineus* (Bloch). *Toxicol. Lett.*, **22**, 187 (1984)
- Livingstone, D.R., Moore, M.N. and Widdows, J.: Ecotoxicology: Biological effects measurements on molluscs and their use in impact assessment. In *Pollution of the North Sea: An assessment*, Spring-Verlag, Berlin, p.624 (1989)
- Michel, X.R., Cassand, P.M., Ribera, D.G. and Narbonne J.F.: Metabolism and mutagenic activation of benzo(a) pyrene by subcellular fractions from mussel (*mytilus galloprovincialis*) digestive gland and sea bass (*discentracus labrax*) liver. *Comp. Biochem. Physiol.*, **103C**(1), 43 (1992)
- Goldberg, E.D., Bowen, B.T., Farrington, J.W., Harvey, G., Martin, J., Parker, P.L., Risebrough, R., and Robertson, W.: The mussel watch. *Mar. Poll. Bull.*, **5**(2) 101 (1975)
- Moore, M.N., Livingstone, D.R., Widdows, J., Lowe, D. M. and Pipe, R.K.: Molecular, cellular and physiological effects of oil-derived hydrocarbons on molluscs and their use in impact assessment. *Phil. Trans. R. Soc.* (London), **B316**, 603 (1987)

23. Livingstone, D.R., Kirchin, M.A. and Wiseman, A.: Cytochrome P-450 and oxidative metabolism in molluscs. *Xenobiotica*, **19**(10), 1041 (1989)
24. Williams, G.M. and Weisburger, J.H. Chemical carcinogenesis, In *Casarett and Doull's Toxicology*, 4th ed, Am-

dur, M.O., Doull, J. and Klaassen, C.(Ed.), Pergamon Press, New York, p.127 (1991)

(1997년 8월 27일 접수)