교 육 학 석 사 학 위 논 문

해산동물에 대한 복합슬래그와 석탄의 생물독성 검정

2002년 8월

부경대학교 교육대학원

생물교육 전공

김 진 미

교 육 학 석 사 학 위 논 문

해산동물에 대한 복합슬래그와 석탄의 생물독성 검정

지도교수 진 평

이 논문을 교육학석사 학위논문으로 제출함.

2002년 8월

부경대학교 교육대학원

생물교육 전공

김 진 미

목 차

Bioassay of aquatic toxicity of composite slag and bituminous coal on marine animals

Jin Mee Kim

Graduate School of Education
Pukyong National University

Abstract

1. Marine and fisheries organisms showed a difference of tolerance to toxicity of composite slag between experimental species, especially *Hemicentrotus pulcherrimus* and young *Haliotis discus hannai* were different from the others.
2. *H. pulcherrimus* and young *H. discus hannai* showed lethal effects at the higher concentration than concentration of composite slag in 1.0 and 0.4% respectively.
3. *H. pulcherrimus* showed no lethal effects at the lower concentration than that of 1.0% at composite slag and some differences in the rate of oxygen consumption with the concentration of composite slag.
4. Lethal effects of bituminous coal on marine and fisheries organisms even at the high concentration were not observed.
5. At the higher concentration than that of 500㎎/L(ppm) of bituminous coal, decrease effects were appeared in the rate of oxygen consumption of experimental organisms.
6. Considered that experimental concentration of compound slag and bituminous coal were impracticable concentrations in the ocean, the results of this experiment suggest that the composite slag and bituminous coal were safe on marine or fisheries organisms.

I. 서 론

제철소에서 부산물로 생성되는 복합슬래그를 연안해역의 호안 및 방파제 등 해양구조물의 케이슨 채움재로 활용하는 것은 폐기물 재활용 차원에서 매우 좋은 발상이다 (Motz and Geisele, 2001). 이 때 복합슬래그를 케이슨 채움재로 사용할 때 해양 환경에 미치는 영향을 사전에 평가하여 해양생물에 대한 안전성 유무를 확인하고 영향이 있다면 영향 저감 방안을 마련하는 것이 필요하다. 따라서 이들 슬래그가 수산생물에 미치는 영향여부에 대한 관심이 높아졌다. 우리나라에서도 연안해역 매립 호안공사와 해양 방파제 공사에 이 슬래그를 매립제로 사용하는 실정이다. 농토의 비옥화에는 이 슬래그가 한몫을 한다고 알려져 있는 반면, 수산생물에 대한 연구는 그렇게 많지 않은 편이다.

연안해역에 슬래그를 투입한 후 해양 및 수산생물의 반응과 슬래그 투입 수조내에서 어류와 어란 및 치어의 성장과 생존률에 대한 연구 (Iitaka, 1973), 와 편모 조류의 휴면포자 발아에 미치는 영향 (이 등, 1999) 및 미세 조류의 대량 생산에 대한 연구 (박 등, 2001b) 등은 수산생물에 대한 슬래그의 긍정적 효과와 다소의 부정적인 면을 보여 주고 있다.

따라서 해양 및 수산생물에 대한 슬래그의 이러한 긍정적 효과가 보편적인 현상인지 아니면 반응을 달리하는 것도 있는지의 여부를 조사해 보려고 하였다.

한편 석탄 (역청탄)은 제철공장 부속 발전소의 주 연료로 사용되고 있다. 해상 수송 후 하역시나 야적되어 있는 석탄은 대량 강우 시 해역으로 유입될 수 있다. 석탄은 고정탄소량 85 90%를 함유한 광물로서 생물 독성이 거의 없는 것으로 알려져 있다.

석탄회분 투입 어초에서 해양 및 수산생물의 반응 (Collins and Jensen, 1992,

1994, 1995), 석탄폐기물의 저서 동물상에 미치는 영향 (Greenfield and Ireland, 1978) 그리고 어류상과 생태에 미치는 영향 (Scullion and Edwards, 1980; Hinton et al., 1983; Radwan et al., 1991) 등에서 대체로 석탄의 안정성이 보고되고 있다.

따라서 석탄 (역청탄)이 해양 및 수산동물에 미치는 독성여부를 생물검정 실험하여, 유용 수산동물의 생존과 생리에 저해영향을 미치는지 그 여부를 구명하고저 하였다.

II. 재료 및 방법

가. 복합슬래그 실험

실험생물은 어류에서 자리돔, *Chromis notata*(건중 1.8±0.3g), 점망둑, *Chasmichthys dolichognathus* 치어(건중 0.11±0.02g), 패류에서 빛조개, *Nuttallia olivacea*(건중 2.4±0.5g), 참전복, *Haliotis discus hannai* 치패(건중 1.0±0.2g), 갑각류에서 보리새우, *Marsupenaeus japonicus*(건중 2.1±0.4g), 줄새우아재비, *Palaemon serrifer*(건중 0.46±0.05g) 그리고 극피동물인 말똥성게, *Hemicentrotus pulcherrimus*(건중 1.9±0.2g)였으며 우리나라 남해 연안산으로서 채집 및 구입하여 실험수조에 운반, 1주일간 사육 적응시킨 후 크기가 비슷한 건강한 개체를 선별하여 실험에 사용하였다.

시험물질은 입도 0.5 5㎜∅의 제강슬래그와 고로슬래그를 무게비 7:3으로 혼합한 복합슬래그를 사용하였으며 희석해수의 염분은 33.0 33.5‰의 범위였다. 복합슬래그 실험용액의 슬래그 농도는 각각 5, 10, 15 및 20%, 0.5, 1.0, 3.0 및 5.0% 그리고 0.1, 0.16, 0.25, 0.40, 0.63 및 1.0%로서 고농도구에서 저농도구 까지 실험적으로 설정하였다. 실험수온은 20℃였다.

실험에 사용한 제강슬래그와 고로슬래그 그리고 복합슬래그 용출수의 수질

분석 결과는 Table 1과 같다 (박 외, 2001).

Table 1. Chemical components of slag used

Item \ Sample	Composite slag	Steel slag	Furnace slag
pH	11.78	11.79	11.23
Ca^{2+} (㎎/L)	145.7	116.3	139.6
Mg^{2+} (㎎/L)	54.6	58.2	4.5
PO_4^{3-}-P (㎎/L)	0.017	0.015	0.017
H_2S (㎎/L)	0.022	0.005	0.013
Cu (㎍/L)	0.4	1.5	0.9
Fe (㎍/L)	1.7	2.2	0.1
Pb (㎍/L)	1.8	1.8	1.9
Cd (㎍/L)	0.1	0.2	0.1
Cr^{6+} (㎍/L)	ND	ND	N.D

N.D : Non-detected

실험방법은 지수식과 재순환유수식을 병행하였으며 통기를 하였고 실험생물은 크기에 따라 실험수량 20 60ℓ에 실험구별로 각각 10 또는 20미씩을 넣었다. 그리고 폭로 15일간 폐사개체를 매일 선별하였다. 그리고 말똥성게와 점망

둑 치어에 대해서는 실험 각 구별 개체들의 호흡산소소비량도 YSI 58 산소검량기로 20℃에서 측정하였다.

나. 석탄 실험

실험생물은 어류에서 넙치, *Palalichthys olivaceus*(건중 12.7±4.2g), 조피볼락, *Sebastes schlegeli*(건중 23.6±2.7g), 개량송사리, *Orizias latipes*(건중 0.61±0.02g), 패류에서 바지락, *Tapes philippinarum*(건중 1.2±0.3g), 새조개, *Fulvia mutica*(건중 3.8±0.4g), 진주담치, *Mytilus edulis*(건중 1.3±0.2g), 복족류에서 참전복, *Haliotis discus hannai* 치패(건중 1.2±0.2g), 극피류에서 검정해삼, *Stichopus japonicus*(건중 1.6±1.2g) 그리고 갑각류에서 점곤쟁이, *Neomysis awatschensis*(건중 0.0042±0.0003g)였으며 우리나라 남해 연안산으로서 채집 및 구입하여 실험수조에 운반, 1주일간 사육 적응시킨 후 크기가 비슷한 건강한 개체를 선별하여 실험에 사용하였다.

실험물질은 석탄 중 역청탄 (유연탄)이며 희석해수의 염분은 33.0 33.5‰, 수소이온농도는 8.0 8.1이었다.

실험에 사용한 석탄시료의 X-선 회절 분석 결과 결정도가 아주 낮은 비정질성의 석탄으로 구성되었으며, 미량의 석영, 카오리나이트 및 녹니석이 함유되어 있었다 (Fig. 1A). 과산화수소 및 염산 처리에 의해서도 회절 패턴과 구성광물의 변화가 수반되지 않았다 (Fig. 1B, 1C), (박 외, 2000).

석탄시료의 원소분석 결과는 Table 2와 같다. 석탄 시료의 과산화수소 및 염산처리에 의한 용해특성을 파악하기 위한 탄소 분석 결과, 원 시료에서 70.63% 그리고 과산화수소와 염산의 혼합처리에 의한 시료에서는 69.25%로 나타났다. 석탄은 대부분 결합성 탄화수소 화합물로 구성되어 있고 용해성 유기물이나 탄산염 형태의 탄소 성분은 전체 탄소 성분의 1%미만이었다.

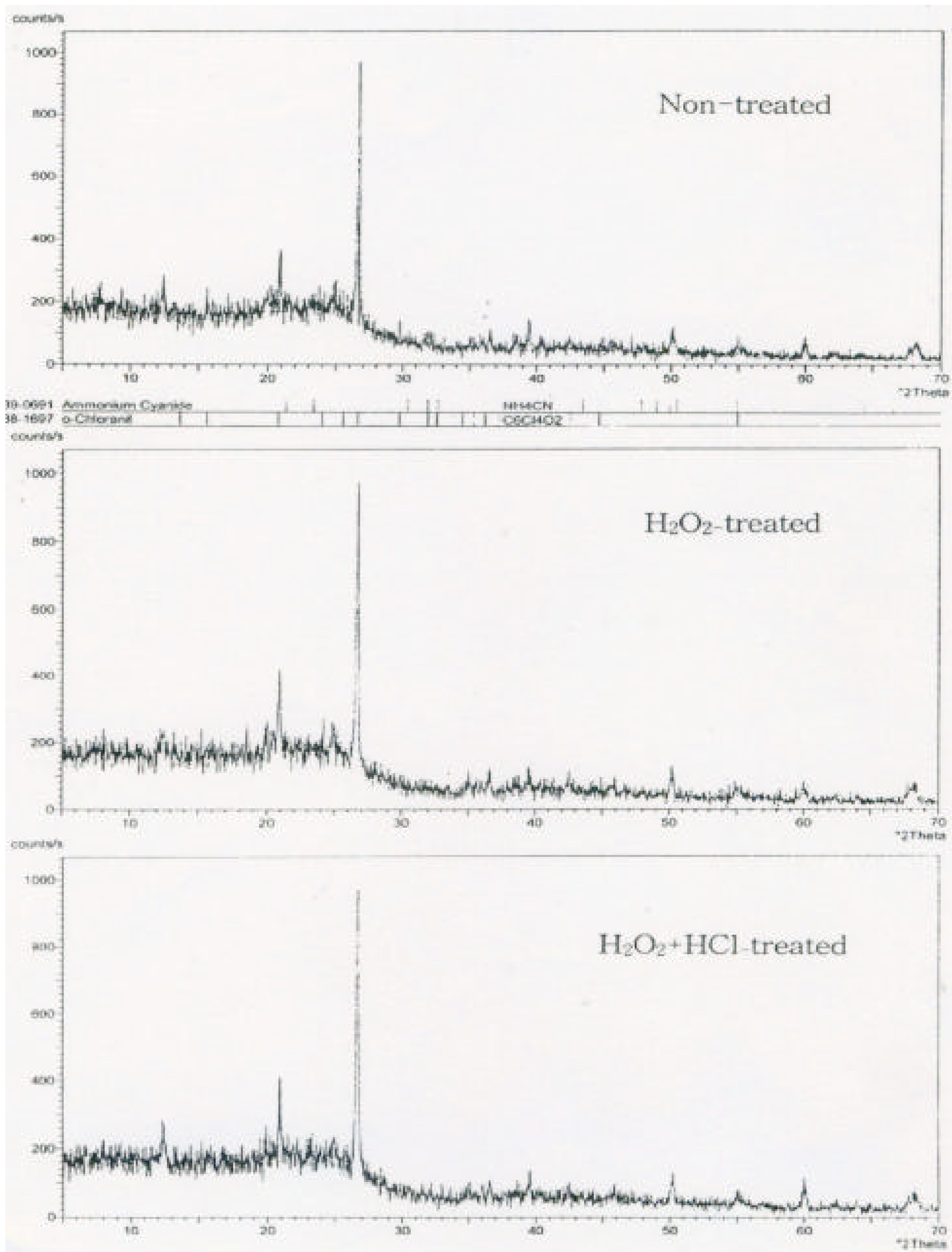


Fig. 1. X-ray diffraction analysis of bituminous coal used.

Table 2. Element components of coal used

(%)

Element / Item	C	H	N
Bituminous coal	70.63	5.397	1.113
H_2O_2+HCl treatment	69.25	5.040	1.110

석탄을 무게비로 희석해수에 침적시키거나 현탁 부유시켜 각 실험농도의 실험용액을 만들었다. 실험용액은 정상해수의 대조구와 실험해수의 경우 석탄농도 50, 100, 500, 1,000 및 5,000㎎/L의 5개 실험구를 설정하였다.

대조구와 각 실험구에서 실험생물을 8일간 실험용액에 폭로시키면서 폐사개체를 선별 도태시켰으며 생존개체의 호흡산소소비율을 측정하였다. 실험장치는 예비실험을 통하여 얻어진 결과로 보아 지수식 사육수조를 사용하였다.

사육수조에 대조구와 실험구의 각 실험용액을 실험동물 크기에 따라 20 60 ℓ씩 주수하고 실험생물을 각 구별로 10 20미씩 투입하였으며 실험용액은 2일마다 환수하였다. 폐사율은 일간 폐사율을 측정하여 계산하였고 호흡산소소비량은 YSI 58 산소검량기로 측정하였다. 실험수온은 20℃를 기준으로 하였다.

Ⅲ. 결 과

가. 복합슬래그의 영향

1) 생존에 미치는 영향

복합슬래그 농도 5.0 20% 범위의 고농도 실험해수에 폭로된 점망둑 치어와 빛조개는 폭로경과일수 15일 동안 생존률에 거의 영향을 받지 않았다 (Table 3). 그

러나 말똥성게는 0.5 5.0% 복합슬래그 농도 범위의 실험해수에 폭로되었을 때 1.0% 농도구에서는 폭로경과일수 15일 동안 80% 이상 생존하였으나 3.0%에서는 10일째에 50% 정도 생존하였고 15일째까지 4일간에 모두 폐사되었다. 그리고 5.0% 이상에서는 폭로 10일째에 모두 폐사되었다 (Fig. 2).

한편, 복합슬래그 농도 0.1 1.0% 범위에 폭로된 자리돔, 점망둑 치어, 보리새우, 그리고 줄새우아재비 등에서도 저해영향은 나타나지 않았다 (Table 4).

그러나 복합슬래그 농도 0.1 1.0% 범위의 실험해수에 폭로된 참전복 치패는 저해영향을 나타내었다. 참전복 치패의 경우 복합슬래그 0.25% 농도에서는 폭로 경과일수 15일 동안 거의 다 생존하였으나 0.4% 1.0% 농도에서는 폭로경과일수 15일 동안 약 7.5 10% 정도 폐사되었다 (Fig. 3).

Table 3. Survival rates of young *C. dolichognathus* and *N. olivacea* with concentration of composite slag

(%)

Conc. of slag (%)	No. of test animals	Exposure time(days)			
		0	5	10	15
0	10	100	100	100	100
5	10	100	100(90)[a]	100(90)[a]	100(90)[a]
10	10	100	100	100	100
15	10	100	100	100	100
20	10	100	100	100	100

a : *N. olivacea*

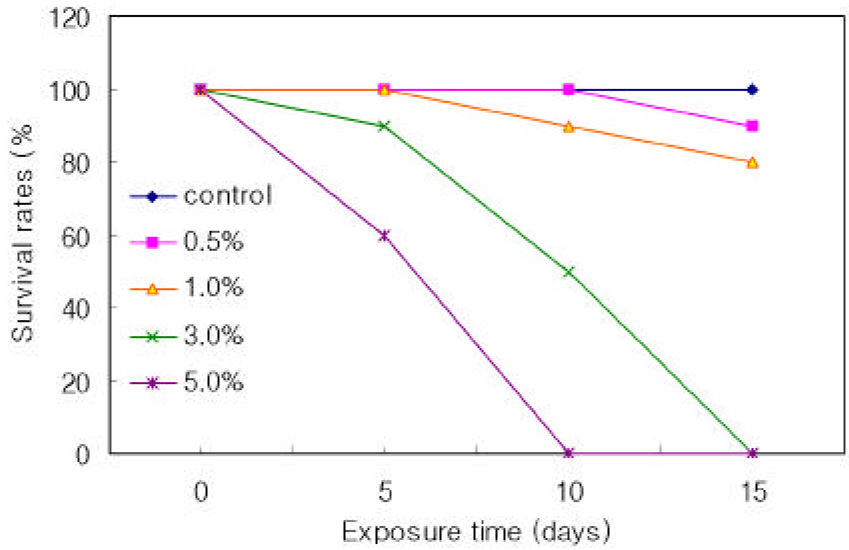
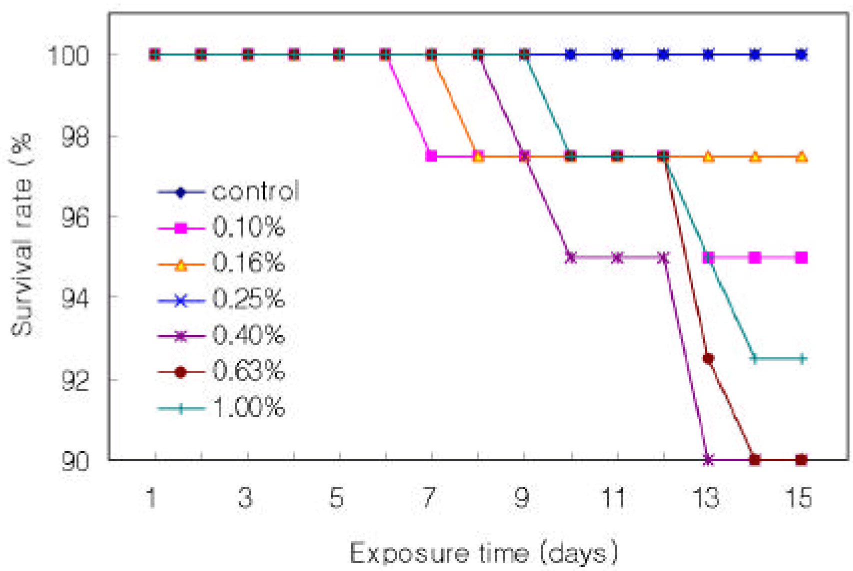


Fig. 2. Survival rate of *H. pulcherrimus* with concentration of composite slag.

Table 4. Survival rates of *C. notata*, young *C. dolichognathus*, *M. japonicus* and *P. serrifer* with concentration of composite slag (%)

Conc. of slag (%)	No. of test animals	Exposure time(days)			
		0	5	10	15
0	20	100	100	100	100
0.10	20	100	100	100	100
0.16	20	100	100	100	100
0.25	20	100	100	100	100
0.40	20	100	100	100	100
0.63	20	100	100	100	100
1.00	20	100	100	100	100



Fig

2) **산소소비에 미치는 영향**

한편 말똥성게와 점망둑 치어를 복합슬래그 농도 0.1 1.0%**범위 농도에 순환유수식으로 폭로시켰을 때** 15**일간 전부 생존하였으며** (Table 5), **산소소비량을 측정한 결과는** Table 6**과** 7**에 나타내었다**.

복합슬래그 0.1 1.0%**범위의 실험농도에 폭로된** 15**일 동안 말똥성게와 점망둑 치어의 산소소비율은 폭로기간** 5, 10 **및** 15**일째에 각 실험군과 대조군 간에 큰 차이는 없었다**. **그러나 말똥성게는 복합슬래그 농도** 1.0㎎/L **시험해수에 폭로된 지** 5**일과** 10**일째에 약** 10%, 15**일째에 약** 16% **그리고 점망둑 치어는 복합슬래그 농도** 1.0㎎/L **시험해수에 폭로된 지** 5**일째에 약** 14%, 10**일째에는 거의 영향이 없었으며** 15**일째에 약** 5%**의 산소소비율 감소를 나타내었다**.

Table 5. Survival rates of *H. pulcherrimus* and young *C. dolichognathus* with concentration of composite slag

(%)

Conc. of slag (%)	No. of test animals	Exposure time(days)			
		0	5	10	15
0	30	100	100	100	100
0.10	30	100	100	100	100
0.16	30	100	100	100	100
0.25	30	100	100	100	100
0.40	30	100	100	100	100
0.63	30	100	100	100	100
1.00	30	100	100	100	100

Table 6. Rate of oxygen consumption of *H. pulcherrimus* with concentration of composite slag

(㎖ O_2/g d.w./hr)

Conc. of slag (%)	Exposure time(days)					
	5	Decrease rate(%)	10	Decrease rate(%)	15	Decrease rate(%)
0	0.058	0	0.062	0	0.064	0
0.10	0.053	8.6	0.059	4.8	0.061	4.7
0.16	0.060	+3.4	0.055	11.3	0.059	7.8
0.25	0.054	6.9	0.062	0	0.068	+6.3
0.40	0.055	5.2	0.067	+8.1	0.064	0
0.63	0.054	6.9	0.061	1.6	0.058	9.4
1.00	0.052	10.3	0.056	9.7	0.054	15.6

Table 7. Rate of oxygen consumption of young *C. dolichognathus* with concentration of composite slag

(㎖ O_2/g d.w./hr)

Conc. of slag (%)	Exposure time(days)					
	5	Decrease rate(%)	10	Decrease rate(%)	15	Decrease rate(%)
0	1.076	0	1.022	0	1.046	0
0.10	0.949	11.8	1.029	+0.7	1.049	+0.3
0.16	0.897	16.6	1.112	+8.8	1.118	+6.9
0.25	1.027	4.6	1.180	+15.5	1.012	3.3
0.40	1.028	4.5	0.985	3.6	1.024	2.1
0.63	1.003	6.8	1.041	+1.9	1.090	+4.2
1.00	0.924	14.1	1.003	1.9	0.996	4.8

나. 석탄의 영향

1) 생존에 미치는 영향

해수 중에 침적된 석탄이 넙치, 조피볼락, 바지락, 새조개, 진주담치 및 참전복 치패의 생존에 미치는 영향을 Table 8에 나타내었다.

석탄 50, 100, 500, 1,000 및 5,000㎎/L 농도의 해수 실험구와 대조구에 각각 시험동물 20미씩을 넣고 실험폭로기간 8일 (192시간)간 폐사된 사망개체수를 매시간 조사한 결과를 일간 집계하여 나타내었다. 석탄농도 50㎎/L 실험구에서 폭로 4일째에 넙치 1미가 폐사되고 1,000㎎/L 실험구에서 바지락 1미가 폐사된 것 외에 조피볼락, 바지락, 새조개, 진주담치 및 참전복 치패 등은 대조구와 어느 실험구에서도 폭로기간 8일간 폐사가 발생하지 않아서 사망개체수는 없었다.

Table 8. Survival rates of *P. olivaceus, S. schlegeli, T. philippinarum, F. mutica, M. edulis* and young *H. discus hannai* with concentration of bituminous coal

(%)

Conc. of coal (㎎/L)	No. of test animals	Exposure time(days)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	100	100	100	100	100	100	100	100
50	20	100	100	100	100(95)[a]	100(95)[a]	100(95)[a]	100(95)[a]	100(95)[a]
100	20	100	100	100	100	100	100	100	100
500	20	100	100	100	100	100	100	100	100
1000	20	100	100	100	100(95)[b]	100(95)[b]	100(95)[b]	100(95)[b]	100(95)[b]
5000	20	100	100	100	100	100	100	100	100

a : *S. schlegeli,* b : *T. philippinarum*

한편 해수 중에 침적된 석탄이 검정해삼의 생존에 미치는 영향을 Table 9에 나타내었다.

석탄 50, 100, 500, 1,000 및 5,000㎎/L 농도의 해수 실험구와 대조구에 각각 검정해삼 20미씩을 넣고 실험폭로기간 8일 (192시간)간 폐사한 검정해삼의 사망개체수를 매시간 조사한 결과를 일간 집계하여 나타내었다. 검정해삼은 50㎎/L 실험구에서 폭로 2, 3 및 7일째에 각각 1미씩 그리고 8일째에 2미가 폐사되었으며 100㎎/L 실험구에서는 폭로 3일째에 1미 그리고 8일째에 1미가 폐사되었다. 그리고 석탄농도 500, 1,000 및 5,000㎎/L 실험구에서는 폭로 8일째에 각각 2, 4 및 4미씩 폐사되었다.

Table 9. Survival rate of *S. japonicus* with concentration of bituminous coal

(%)

Conc. of coal (㎎/L)	No. of test animals	Exposure time(days)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	100	100	100	100	100	100	100	100
50	20	100	95	90	90	90	90	85	75
100	20	100	100	95	95	95	95	95	90
500	20	100	100	100	100	100	100	100	90
1000	20	100	100	100	100	100	100	100	80
5000	20	100	100	100	100	100	100	100	80

2) 표준생물에 미치는 영향

해수 중에 침적된 석탄이 점곤쟁이와 개량송사리의 생존에 미치는 영향을 Table 10에 나타내었다.

석탄 50, 100, 500, 1,000 및 5,000㎎/L 농도의 해수 실험구와 대조구에 점곤쟁이와 개량송사리 20미씩을 각각 넣고 실험폭로기간 8일 (192시간)간 폐사한 점곤쟁이와 개량송사리의 사망개체수를 매시간 조사한 결과를 일간 집계하여 나타내었다. 점곤쟁이와 개량송사리는 대조구와 어느 실험구에서도 폭로기간 8일간 폐사가 발생하지 않아서 사망개체수는 없었다.

Table 10. Survival rates of *N. awatschensis* and *O. latipes* with concentration of bituminous coal

(%)

Conc. of coal (㎎/L)	No. of test animals	Exposure time(days)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	100	100	100	100	100	100	100	100
50	20	100	100	100	100	100	100	100	100
100	20	100	100	100	100	100	100	100	100
500	20	100	100	100	100	100	100	100	100
1000	20	100	100	100	100	100	100	100	100
5000	20	100	100	100	100	100	100	100	100

3) 부유석탄의 치사영향

석탄을 해수 중에 넣고 교반시킨 후 두 시간 방치시킨 다음 부유현탁층을 분리하였다. 석탄이 부유현탁된 해수를 여과시켜 석탄의 부유입자를 얻었다. 입경 62㎛ 이하의 입도를 가진 부유석탄분을 실험농도별로 해수에 현탁시켜 실험하였다. 실험수조는 통기를 계속시키고 또한 매시간별로 교반시켜 현탁입자의 침전을 막았으며 매일 환수하였다.

해수 중에 부유현탁시킨 석탄이 넙치와 조피볼락의 생존에 미치는 영향을 Table 11에 나타내었다.

부유석탄 100, 300, 500, 1,000, 3,000 및 5,000㎎/L 농도의 해수실험구와 대조구에 각각 넙치 20미씩을 넣고 실험폭로기간 8일 (192시간)간 폐사한 넙치의 사망개체수를 매시간 조사한 결과를 일간 집계하여 나타내었다. 넙치는 300㎎/L 실험구에서 폭로 7일과 8일째에 각각 1미씩 폐사되었다. 그리고 500, 1,000

및 3,000㎎/L 실험구에서는 폭로 8일째에 각각 1미씩 폐사되었으며 5,000㎎/L 실험구에서는 폭로기간 8일 동안 폐사가 발생하지 않아서 사망개체는 없었다. 조피볼락은 5,000㎎/L 실험구에서만 폭로기간 8일째에 2미가 폐사되었다.

Table 11. Survival rates of *P. olivaceus* and *S. schlegeli* with concentration of suspended bituminous coal

(%)

Conc. of coal (㎎/L)	No. of test animals	Exposure time(days)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	100	100	100	100	100	100	100	100
100	20	100	100	100	100	100	100	100	100
300	20	100	100	100	100	100	100	95	90
500	20	100	100	100	100	100	100	100	95
1000	20	100	100	100	100	100	100	100	95
3000	20	100	100	100	100	100	100	100	95
5000	20	100	100	100	100	100	100	100	100(90)[a]

a : *S. schlegeli*

4) 생리에 미치는 영향

가) 어류에 대한 침적 석탄의 저해영향

해수 중에 침적된 석탄이 넙치와 조피볼락의 생리기능에 미치는 영향을 호흡산소소비량을 지표로 하여 측정한 결과를 Table 12 및 13에 나타내었다.

석탄농도 50, 100, 500, 1000 및 5,000㎎/L 실험해수에 4일과 8일간 폭로시킨 어류의 호흡산소소비량에 미치는 침적석탄의 저해영향을 대조구에 대한 백분비 증감률로서 나타내었다. 어류의 호흡산소소비량은 석탄농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

Table 12. Rate of oxygen consumption of *P. olivaceus* with concentration of bituminous coal

(㎖ O_2/g d.w/hr)

Conc. of coal (㎎/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.97	0	0.94	0
50	0.92	8.2	0.83	18.1
100	0.82	18.6	0.78	23.4
500	0.85	15.5	0.77	24.5
1000	0.76	24.7	0.77	24.5
5000	0.70	30.9	0.81	20.2

Table 13. Rate of oxygen consumption of *S. schlegeli* with concentration of bituminous coal

(㎖ O_2/g d.w/hr)

Conc. of coal (㎎/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.51	0	0.59	0
50	0.48	5.9	0.58	1.7
100	0.50	2.0	0.62	+5.1
500	0.40	21.6	0.45	23.7
1000	0.41	19.6	0.57	3.4
5000	0.37	27.5	0.47	20.3

석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 넙치의 호흡산소소비율은 8.2% 감소되었고 500㎎/L에서는 15.5% 그리고 5,000㎎/L에서

는 대조구에 비해서 30.9% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 호흡산소소비율은 18.1% 감소되었고 500㎎/L에서는 24.5% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 20.2% 감소되었다.

석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 조피볼락의 호흡산소소비율은 5.9% 감소되었고 500㎎/L에서는 21.6% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 27.5% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 호흡산소소비율은 1.7% 감소되었고 500㎎/L에서는 23.7% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 20.3% 감소되었다.

나) 패류에 대한 침적 석탄의 저해영향

해수 중에 침적된 석탄이 바지락과 새조개 및 진주담치의 생리기능에 미치는 영향을 호흡산소소비량을 지표로 하여 측정한 결과를 Table 14, 15 및 16에 나타내었다.

Table 14. Rate of oxygen consumption of *T. philippinarum* with concentration of bituminous coal

(㎖ O_2/g d.w./hr)

Conc. of coal (㎎/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.37	0	0.34	0
50	0.36	2.7	0.32	5.9
100	0.35	5.4	0.37	+8.8
500	0.31	16.2	0.25	32.4
1000	0.30	18.9	0.23	32.4
5000	0.22	40.5	0.30	11.8

Table 15. Rate of oxygen consumption of *F. mutica* with concentration of bituminous coal

($m\ell$ O_2/g d.w./hr)

Conc. of coal (mg/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.47	0	0.43	0
50	0.36	23.4	0.37	13.9
100	0.37	21.3	0.46	+7.0
500	0.34	27.7	0.39	9.3
1000	0.30	36.2	0.31	27.9
5000	0.29	38.3	0.29	32.6

Table 16. Rate of oxygen consumption of *M. edulis* with concentration of bituminous coal

($m\ell$ O_2/g d.w./hr)

Conc. of coal (mg/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.72	0	0.73	0
50	0.63	12.5	0.67	8.2
100	0.49	31.9	0.71	2.7
500	0.50	30.6	0.51	30.1
1000	0.47	34.7	0.63	13.7
5000	0.48	33.3	0.48	34.2

석탄농도 50, 100, 500, 1,000 및 5,000mg/L 실험해수에 4일 및 8일간 폭로시킨 패류의 호흡산소소비량에 미치는 침적 석탄의 저해영향을 대조구에 대한 백

분비 증감률로서 나타내었다. 패류의 호흡산소소비량은 석탄농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 바지락의 호흡산소소비율은 2.7% 감소되었고 500㎎/L에서는 16.2% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 40.5% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 호흡산소소비율은 5.9% 감소되었고 500㎎/L에서는 32.4% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 11.8% 감소되었다.

석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 새조개의 호흡산소소비율은 23.4% 감소되었고 500㎎/L에서는 27.7% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 38.3% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 호흡산소소비율은 13.9% 감소되었고 500㎎/L에서는 9.3% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 32.6% 감소되었다.

그리고 석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 진주담치의 호흡산소소비율은 12.5% 감소되었고 500㎎/L에서는 30.6% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 33.3% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 8.2% 감소되었고 500㎎/L에서는 30.1% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 34.2% 감소되었다.

다) 복족류에 대한 침적 석탄의 저해영향

해수 중에 침적된 석탄이 참전복의 생리기능에 미치는 영향을 호흡산소소비량을 지표로 하여 측정한 결과를 Table 17에 나타내었다.

석탄농도 50, 100, 500, 1,000 및 5,000㎎/L 실험해수에 4일과 8일간 폭로시킨 참전복의 호흡산소소비량에 미치는 침적 석탄의 저해영향은 역시 대조구에 대한 백분비 증감률로서 나타내었다. 참전복의 호흡산소소비량도 석탄농도가 증

가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 참전복의 호흡산소소비율은 8.6% 감소되었고 500㎎/L에서는 2.9% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 14.3% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 호흡산소소비율은 13.5% 감소되었고 500㎎/L에서도 13.5% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 21.6% 감소되었다.

Table 17. Rate of oxygen consumption of young *H. discus hannai* with concentration of bituminous coal

(㎖ O_2/g d.w./hr)

Conc. of coal (㎎/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.35	0	0.37	0
50	0.32	8.6	0.32	13.5
100	0.33	5.7	0.34	8.1
500	0.34	2.9	0.32	13.5
1000	0.32	8.6	0.31	16.2
5000	0.30	14.3	0.29	21.6

라) 극피동물에 대한 침적 석탄의 저해영향

해수 중에 침적된 석탄이 검정해삼의 생리기능에 미치는 영향을 호흡산소소비량을 지표로 하여 측정한 결과를 Table 18에 나타내었다.

석탄농도 50, 100, 500, 1,000 및 5,000㎎/L 실험해수에 4일과 8일간 폭로시킨 검정해삼의 호흡산소소비량에 미치는 침적 석탄의 저해영향을 대조구에 대한 백분비 증감률로서 나타내었다. 호흡산소소비량은 석탄농도가 증가함에 따라

감소하는 경향을 보였다.

석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 검정해삼의 호흡산소소비율은 5.0% 감소되었고 500㎎/L에서도 20.0% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 25.0% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 호흡산소소비율은 5.9% 감소되었고 500㎎/L에서는 11.8% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 17.6% 감소되었다.

Table 18. Rate of oxygen consumption of *S. japonicus* with concentration of bituminous coal

(㎖ O_2/g d.w./hr)

Conc. of coal (㎎/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.20	0	0.17	0
50	0.19	5.0	0.16	5.9
100	0.17	15.0	0.15	11.8
500	0.16	20.0	0.15	11.8
1000	0.16	20.0	0.15	11.8
5000	0.15	25.0	0.14	17.6

마) 어류에 대한 부유석탄의 저해영향

해수 중에 부유된 석탄이 넙치와 조피볼락의 생리기능에 미치는 영향을 호흡산소소비량을 지표로 하여 측정한 결과를 Table 19 및 20에 나타내었다.

석탄농도 50, 100, 500, 1,000 및 5,000㎎/L 실험해수에 4일이나 8일간 폭로시킨 어류의 호흡산소소비량에 미치는 부유석탄의 저해영향을 대조구에 대한 백분비 증감률로서 나타내었다. 어류의 호흡산소소비량은 석탄농도가 증가함에

따라 감소하는 경향을 보였다.

Table 19. Rate of oxygen consumption of *P. olivaceus* with concentration of bituminous coal

(㎖ O_2/g d.w./hr)

Conc. of coal (㎎/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.97	0	0.94	0
50	0.94	3.1	0.87	7.4
100	0.91	6.2	0.90	4.3
500	0.92	5.2	0.85	9.6
1000	0.80	17.5	0.82	12.8
5000	0.69	28.9	0.81	20.2

Table 20. Rate of oxygen consumption of *S. schlegeli* with concentration of bituminous coal

(㎖ O_2/g d.w./hr)

Conc. of coal (㎎/L)	Exposure time(days)			
	4	Decrease rate(%)	8	Decrease rate(%)
0	0.51	0	0.52	0
50	0.45	11.8	0.51	1.9
100	0.50	2.0	0.47	9.6
500	0.38	25.5	0.46	11.5
1000	0.40	21.6	0.47	9.6
5000	0.39	23.5	0.40	23.1

석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 넙치의 호흡산소소비율은 3.1% 감소되었고 500㎎/L에서도 5.2% 그리고 5,000㎎/L에서는

대조구에 비해서 28.9% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 호흡산소소비율은 7.4% 감소되었고 500㎎/L에서는 9.6% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 20.2% 감소되었다.

석탄의 실험농도 해수에 폭로된 지 4일째에 석탄농도 50㎎/L에서 조피볼락의 호흡산소소비율은 11.8% 감소되었고 500㎎/L에서도 25.5% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 23.5% 감소되었다. 그리고 폭로 8일째에는 석탄농도 50㎎/L에서 호흡산소소비율은 1.9% 감소되었고 500㎎/L에서는 11.5% 그리고 5,000㎎/L에서는 대조구에 비해서 23.1% 감소되었다.

Ⅳ. 고 찰

해양 및 수산동물에 대한 복합슬래그의 영향은 어종에 따라 생리적 내성의 차이가 있음을 보여 주었다. 자리돔과 점망둑 치어, 보리새우와 줄새우아재비 그리고 빛조개 등은 해양에서 실제로 나타나기 어려운 비현실적인 고농도의 복합슬래그 실험농도에서도 생존률은 거의 영향을 받지 않았다. 그러나 말똥성게와 참전복 치패는 치사영향을 나타내었다.

Iitaka 등(1973)에 의하면 해양 투기한 제강슬래그 컨테이너에 돌돔, 쥐치, 벵에돔, 범돔, 거북복 등의 어류와 수종의 새우류와 파래 등의 해조류가 모여들었으며, 슬래그 8.0 9.0%의 농도에서 어류의 성장이 잘되었고 어란과 치어의 성장과 생존률도 좋았음을 밝히고 있다. 이러한 점으로 보아 본 실험에 사용된 어종 대부분이 치사영향을 받지 않음은 해양 또는 수산동물에 대한 복합슬래그의 치사영향이 거의 없는 것으로 생각된다. 그러나 복합슬래그 0.5 5.0% 농도에서 비록 고농도이지만 말똥성게와 참전복 치패는 타 어종과 달리 복합슬래그

농도가 증가함에 따라 그 생존률이 감소하고 있어서 내성이 다르다고 생각된다. 말똥성게도 복합슬래그 실험농도 0.1 1.0%에서는 전혀 치사영향을 받지 않아서, 복합슬래그 0.1 1.0% 농도도 해역에서 실제로 존재하기에는 비현실적인 고농도인 점을 감안하면 해양 또는 수산동물에 대한 복합슬래그의 치사영향은 거의 없을 것으로 생각된다.

한편 말똥성게가 생존하는 복합슬래그 농도 0.1 1.0%의 실험농도 범위에서 슬래그 농도 증가에 따라 호흡산소소비율이 감소하고 있는 점은 생리적 저해영향을 받을 수 있다고 본다. 이러한 생리적 저해영향을 받을 수 있는 복합슬래그의 한계농도에 대해서는 앞으로 더 정밀한 실험이 필요할 것이다.

이 등(1999)은 약 5.0%의 슬래그 농도에서 와편모조류의 휴면포자 발아가 억제됨을 보고하였다. 한편 박 등(2001[a], 2001[b])은 굴의 성장과 성분 그리고 미세조류의 성장과 성분에 미치는 제강슬래그의 긍정적 효과를 보고하고 있다. 이로 미루어 보아 해양 및 수산생물에 대한 슬래그의 영향은 더 정밀한 슬래그 농도와 실험조건 등을 고려한 실험적 평가가 있어야 할 것으로 생각된다.

해양 및 수산생물에 대한 석탄의 치사영향은 거의 나타나지 않았다. 넙치, 조피볼락, 바지락, 새조개, 진주담치 및 참전복 치패 그리고 점곤쟁이와 개량송사리 등 시험생물의 생존률은 석탄 50 5000㎎/L 실험농도 범위에서 약 0.5%의 고농도에 이르기까지 치사영향은 거의 없었다.

석탄은 해수 중에 침적된 경우와 넙치와 조피볼락에 대한 부유석탄의 경우에도 치사영향을 보이지 않았다. 그러나 검정해삼은 폭로일수가 경과될수록 폐사현상을 보였는데 저질을 먹이로 섭취하는 생태 때문인지는 분명하지 않으나 내성이 타 시험 어종과 다르다고 하겠다.

Collins and Jensen (1992, 1994, 1995)은 석탄폐기물이 함유된 어초에 형성되는 생물상이 별다른 영향을 받지 않는다고 하였으나, Greenfield and Ireland

(1978)는 석탄 폐기물로 오염된 강에서 어종이 감소되었음을 보고하였다. 그리고 Scullion, Edwards (1980)와 Radwan et al. (1991)은 석탄오염이 강의 어류상에서 수적 감소를 초래한다고 하였다.

이상으로 보아 석탄이 해수에 침적되었을 때 해양 및 수산생물에 대한 치사영향은 없는 것으로 생각되나 석탄회 등 석탄의 처리 폐기물이 강에 투입되었을 때는 치사 또는 저해영향이 나타난다고 할 수 있다.

석탄은 해양 및 수산생물의 생리에 대해서 상당한 저해성을 보였다. 시험생물 모두 호흡산소소비량은 폭로기간에는 상관없이 석탄농도의 증가에 따라 감소하고 있다. 이러한 결과는 화학적 저해성이 아닌 것으로 생각된다. Hilton et al. (1983)은 석탄연소회에 대한 어류의 대사가 저해를 받았음을 보고하고 있다.

석탄 (역청탄)은 유연탄으로 별칭 되기도 하는데 비중은 1.26 1.40이고 고정탄소함량은 85 90%로서 암흑색의 치밀한 괴상으로 탄소, 수소, 산소, 질소, 유황 및 회분 등으로 구성되어 있다. 실험에 사용한 석탄에서 2시간 부유된 현탁입자를 선별한 결과 무게비로 0.79%이었다. 따라서 석탄의 화학적 독성은 검색할 수 없었으나, 함유된 석탄 부유분진은 해수 중의 탁도를 증가시키는 입자로서 물리적인 저해를 초래할 수 있다. 부유입자는 수산동물의 호흡 아가미 표면에 침착해서 호흡산소소비량을 감소시킨다.

부유토나 부유사 또는 부유회분과 같이 부유석탄의 고농도에서는 호흡산소소비량에 대한 저해영향이 나타났다. 그러나 현실적으로 해수 중에 500 또는 5,000㎎/L의 부유석탄 농도가 형성되기는 어렵다고 생각된다. 또 100㎎/L 이상의 부유석탄 농도가 형성된다 하더라도 지속시간이 변수이며 해수가 교환되면 단시간 내에 저해영향은 회복될 수도 있다.

결론적으로 수산동물에 대한 복합슬래그와 석탄의 치명적 독성은 없거나 경미하리라고 생각된다.

V. 요 약

1. 복합슬래그에 대한 어종 간의 내성 차이가 있으며, 특히 극피동물인 말똥성게와 패류인 참전복은 타종과 구분된다.
2. 타종과 달리 말똥성게와 참전복 치패는 복합슬래그 농도 1.0%와 0.4% 이상 농도에서는 치사가 일어났다.
3. 말똥성게는 복합슬래그 1.0% 이하의 농도에서는 치사되지 않았으나 산소소비율에 있어서는 농도별 차이를 다소 보였다.
4. 해산 또는 수산 생물에 대한 석탄의 치사 영향은 고농도에서도 보이지 않았다.
5. 석탄 500㎎/L 이상의 농도에서 해산생물의 호흡산소소비에는 저해영향이 나타났다.
6. 실험에 사용된 복합슬래그와 석탄의 농도는 해양에 있어서 비현실적인 고농도인 점을 감안할 때 실험의 결과는 그 안전성을 시사하고 있다.

VI. 감사의 글

크신 사랑과 배려를 아끼지 않으시고 늘 한결같이 따뜻하게 하나하나 가르쳐 주시고 이끌어 주시며 학문의 길을 가도록 지도해 주시고 도와주신 진 평 교수님께 마음깊이 감사를 드립니다.

바쁘신 중에도 논문의 심사를 맡아 면밀히 검토해 주시고 다듬어 주신 박청길 교수님, 김복규 교수님께 감사를 드립니다.

아울러 홍성윤 교수님, 강용주 교수님, 유명숙 교수님, 남기완 교수님, 김수암 교수님, 백혜자 교수님께도 감사를 드립니다.

실험을 하고 논문을 쓰는데 많은 도움과 조언을 해준 실험실 후배들, 정아, 유나, 민호, 근순, 금주, 희진이에게 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 논문을 완성하기까지 사랑과 격려를 베풀어주시고 힘이 되어 주신 부모님과 언니, 형부, 조카 동주, 두언, 동생 은미, 승미와 나의 벗 정필이에게 고마움을 전합니다.

VII. 참고문헌

Collins, K.J. and A.C., Jenson. 1995. Stabilized coal ash artificial reef studies. Chemistry and Ecology, vol. 10, no. 3-4, pp. 193-203.

Collins, K.J., A.C. Jenson, A.P.M. Lockwood and A.W.H. Turnpenny. 1994. Evaluation of stabilized coal-fired power station waste for artificial reef construction. Fifth International Conference on Aquatic Habitat Enhencement, pp. 1251-1262, Bulletin of Marine Science, vol. 55, no. 2-3.

Collins, K.J., A.C. Jenson and A.P.M. Lockwood. Stabilized of a coal waste artificial reef. Papers from the first Int. Ocean Pollution Symp., 28th April-2nd May, 1991. University of Puerto Rico, Puerto Rico, U.S.A. (Part one)., 1992, pp. 79-93, Chemistry and ecology. London, vol. 6, no. 1-4.

Greenfield, J.P. and M.P. Ireland. 1978. A survey of the macrofauna of a coal-waste polluted Lancashire fluvial system. Environ. pollut., 16(2), 105-122.

Hinton, D.E., E.R. Walker and D.M. Kontir. 1983. Cellular bioassay of fish as a sensitive index of water quality related to ash from coal combustion. Tech. Compl. Rep. W. Va. Water Res. Inst., Wvu, Morgantown, Wv(U.S.A.), pp. 90.

Iitaka, Y., R. Tsuda, T. Morinaga and H. Kumai. 1973. Effects of slag on aquatic life. La mer, 11(4), 205-210.

Motz, H. and J. Geiseler. 2001. Products of steel slags on opportunity to save natural resources. Waste Management, 21, 285-293.

Radford, D.S. and D.N. Graveland. The water quality of some coal mine effluents and their effect on stream benthos and fish. Fish. pollut. Rep. Fish and Wildlife Division(Alta.), (no. 4).

Radwan, S., C.Z. Kowalczyk, B. Jarzyna, A. Paleolog, W. Zwolski and W. Kowalik. 1990-1991. Coal mine waters and their influence on the purity ecological state of river and the fish production. Environmental Managemant and Appropriate Use of Enclosed Coastal Seas -- Emecs '90., 1991, pp. 733-736, Marine Pollution Bulletin [Mar. Pollut. Bull.], vol. 23.

Scullion, J. and R.W. Edwards. 1980. The effect of pollutant from the coal industry on the fish fauna of a small river in the South Wales coalfield. Environ. Pollunt., Ser. A, 21(2), 141-153.

박기영, 박헌우, 박광석, 전희동, 정시현. 2001[a]. 해양 저질환경 개선을 위한 제강 슬래그의 복토재 활용 연구(II). 2001년도 춘계 수산관련학회 공동학술대회 발표요지집, 348-349.

박기영, 박흠기, 박광석, 전희동, 김예경. 2001[b]. 배기 가스 중 CO_2와 제강 슬래그를 활용한 미세 조류의 대량생산 가능성 연구. 2001년도 춘계 수산관련학회 공동학술대회 발표요지집, 291-292.

박정홍, 진 평, 박맹언, 강주찬, 황은경, 2000. 좌초선 현대 스피리트호의 석탄화물이 해양생물에 끼친 영향에 대한 조사. 한국수산연구소 보고서, 34-35.

박청길, 진 평, 권기생. 2001. 복합슬래그의 케이슨 채움재로서의 사용에 따른 해양환경 영향조사(중간 보고서). 부경대. 환경연구소. 3-4.

이충일, **곽영세**, **김대윤**. 1999. **해수의 무기영양염 농도와 제강슬래그가 와편모 조류 휴면포자 발아에 미치는 영향**. RIST **연구논문**, 13(4), 539-542.