

회분식 전자빔 조사에 의한 적조제거 특성 연구 Feasibility Study for Removal of Red Tide by Batch Fed Electron Beam Irradiation

강 호[†] · 임선애 · 정지현 · 김유리* · 한범수*
Ho Kang[†] · Seon-Ae Lim · Ji-Hyun Jeong · Yu-Ri Kim* · Beom-Su Han*

충남대학교 환경공학과 · *EB Tech(주)
Department of Environmental Engineering, Chungnam National University · *EB Tech Co., Ltd.

(2009년 9월 8일 접수, 2010년 2월 18일 채택)

ABSTRACT : This study was carried out to assess the feasibility of the electron beam irradiation as a mean of red tide control in coastal water. *Prorocentrum minimum*, *Prorocentrum micans*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Heterosigma akashiwo*, *Alexandrium catenella* were selected and cultured for experiments, and red tide occurring in Tongyeong(2007. 8. 15) was also tested under the same conditions. The irradiation dose were 1 kGy, 2 kGy, 4 kGy and 8 kGy. The result showed 50~65% extinction in red tide cells was observed right after irradiation dose of 1 kGy and 86~97% within 1 day after irradiation, compared with control. Chlorophyll-a concentration of red tide was reduced by 50~64% immediately and it was drastically reduced up to 86~97% 1 day after irradiation. When the culture was irradiated at 1 kGy, 28~47% of s-protein was released immediately, and 77~138% was released 1day after irradiation. 77~212% of s-carbohydrate was excreted after 1 day while 16~45% of s-carbohydrate was excreted immediately. A transmission electron microscope(TEM) observation for the irradiated red tide revealed that the cell was destroyed and intracellular biopolymeric substance was leached out from the damaged cell as a result of electron beam irradiation. These results imply that electron beam irradiation is enable to control red tide by flocculation with extracellular biopolymer. The paralytic shellfish poisoning(PSP) toxin contents produced by *Alexandrium catenella* was decreased 48% by 1 kGy of electron beam irradiation compared with the unirradiated cells. As a result, electron beam irradiation was effective for detoxication as well as destruction of red tide.

Key Words : Red Tide, Electron Beam, Chlorophyll-a, Extracellular Polymeric Substance(EPS), Paralytic Shellfish Poisoning (PSP) Toxin

요약 : 본 연구는 연안해역에서 발생하는 적조의 현장 제어기술로 전자빔을 이용하고자 적조사멸에 대한 전자빔 조사의 효율성을 평가하였다. *Prorocentrum minimum*, *Prorocentrum micans*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Heterosigma akashiwo*, *Alexandrium catenella*의 5종을 실험대상 적조로 선정하여 배양하였으며, 실제 경남 통영(2007. 8. 15)에서 발생한 적조에 대해서도 동일한 실험을 수행하였다. 전자빔 조사선량은 1 kGy, 2 kGy, 4 kGy, 8 kGy로 1 kGy의 전자빔 조사로 50~65%의 적조사멸율을 보였으며, 1일 경과 시 86~97% 사멸하였다. Chlorophyll-a의 경우 조사 즉시 50~64% 감소하고, 1일 경과한 뒤 72~93%의 감소율을 보였다. 또한 전자빔 조사 즉시 S-protein은 28~47%, S-carbohydrate는 16~45%가 증가하였으며, 1일의 시간 경과 후에는 S-protein이 77~138%, S-carbohydrate가 77~212%까지 증가하였다. 또한 투과전자현미경을 통해 전자빔 조사 전후의 적조세포 관측을 통하여 세포의 파괴 및 세포내 구성물질의 용출을 확인할 수 있었다. 이렇듯 적조에 전자빔을 조사함으로써 Extracellular Biopolymer에 의한 Flocculation을 유도하여 적조를 침강 제어할 수 있다. 또한 전자빔 조사 전후 *Alexandrium catenella*의 PSP(Paralytic Shellfish Poisoning) 폐독 분석 결과 1 kGy의 전자빔을 조사함으로써 전자빔을 조사하지 않은 적조 대비 PSP 독성 함량이 48% 감소하여 전자빔조사가 유독적조의 사멸뿐만 아니라 제독에도 효과가 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 적조, 전자빔, 클로로필 a, 체외고분자물질, 마비성폐독

[†]Corresponding author : E-mail : hokang@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6675 Fax: 042-822-5610

1. 서론

우리나라 연안 해역에서 해마다 발생하는 적조현상은 적조생물의 과잉증식에 따른 많은 양의 산소 고갈로 저서생물의 서식을 불가능하게 하고 해양 어패류의 대량 폐사를 일으켜 엄청난 어류자원의 손실을 가져오고 있다. 1995년 발생한 유해성 적조(Harmful Algal Bloom; HAB)는 764억 원의 최대 피해를 입혔으며, 그 이후에도 매해 여름철 발생하는 유해성 적조에 의한 피해는 지속되어왔다. 2007년에도 33건의 적조가 발생하여 115억 원에 달하는 피해가 있었다.

현재 국내에서 적조를 방제하기 위해 가장 많이 사용하고 있는 방법은 황토살포이다. 그러나 황토살포는 조류제거 효율을 극대화시키기 위한 구체적인 방법론이 정립되지 않은 상태이며, 살포된 황토는 빛을 차단하고 저서생물의 호흡과 신진대사를 방해하여 다년간 쌓인 황토에 의해 저서생물이 살아갈 수 있는 환경이 파괴되는 것으로 밝혀지고 있다.¹⁾ 이에 날로 심각해지는 부영양화 및 적조현상을 제어하기 위한 다각적인 연구가 진행되고 있는 가운데 전기분해법, 천적미생물, 광촉매시스템, 적조제거제(Zeofloc)개발, 미세스크린 장치 이용, 고화된 정수슬러지 이용, 연안준설퇴적물이용, 천연물질을 이용하는 방법들이 연구되고 있다. 하지만 지금까지 개발된 적조제거기술의 대부분은 조류제거에 부분적으로 효과는 있으나 2차 오염 등 다른 부수적인 문제점들을 해결하지 못한 실정이다. 그러므로 연안해역의 적조현상을 2차 공해물질이 발생하지 않으면서 빠르고 손쉽게 조류 및 적조발생을 효과적으로 억제할 수 있는 기술개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서 시도한 전자빔 조사 공법은 발생된 적조에 고에너지의 전자빔을 조사하여 적조의 세포벽을 파괴함으로써 적조를 직접적으로 사멸시킬 수 있으며, Extracellular Biopolymer의 용출로 적조의 Bioflocculation을 유도함으로써 적조를 침강 제어할 수 있다. 이로써 전자빔 조사를 통해 조류의 즉각적이고 지속적인 조류제거 효과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전자빔 조사에 의한 적조사멸 Mechanism을 규명하고, 전자빔 조사 공법을 적조제거기술로써 도입하여 연안해역의 적조현상을 빠르고 효과적으로 억제할 수 있는 기술개발의 기초연구에 목적이 있다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험대상 적조류 선정 및 배양

우리나라에서 적조를 일으키는 생물은 약 60여종으로 국립수산과학원 해양수산정보에서 제공하는 자료 중 1995년에서 2005년까지 우리나라의 동·서·남해안 연안에서 10년간 빈번하게 출현하는 적조 자료를 토대로 (*Prorocentrum minimum*, *Prorocentrum micans*, *Heterosigma akashiwo*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Alexandrium catenella*) 5종을 실험대상 적조로 선정하였다.²⁾ 또한 본 연구에서는 실제 적조가 발생한 경남 통영 일대(2007. 8. 15)의 현장시료를 채취하여 전자빔 조사 실험을 시행하였다. *C. polykrikoides*는 여름철 우리나라 적조피해의 주요 생물로 미국, 대서양, 일본 중부에서도 적조를 일으키는 종으로 알려져 있으며, 이외의 적조는 주로 봄과 가을철에 출현하는 종으로 그 중 *A. catenella*는 마비성 패독(Paralytic Shellfish Poisoning, PSP)을 일으키는 독성을 지닌 적조이다.

본 연구에서 *P. minimum*, *P. micans*는 서울대학교 플랑크톤먹이망-적조연구실에서 분양받았으며, *H. akashiwo*는 부경대학교 미세조류은행에서, *C. polykrikoides*는 국립수산과학원에서, *A. catenella*는 부경대학교 미세조류은행과 부경대학교 양식학과에서 각각 분양을 받아 실험실 내에서 배양하였다. 배양액은 해수를 GF/F(0.7 μm)로 2차 여과하고

Table 1. Recipe of f/2-si media^{3,4)}

f/2 medium			
Quantity	Compound	Stock solution	Molar concentration in final medium
1 mL	NaNO ₃	75 g/L ⁻¹ H ₂ O	8.83×10 ⁻⁴ M
1 mL	NaH ₂ PO ₄ ·H ₂ O	5 g/L ⁻¹ H ₂ O	3.63×10 ⁻⁵ M
1 mL	f/2 trace metal solution	-	-
0.5 mL	f/2 vitamin solution	-	-
f/2 trace metal solution			
Quantity	Compound	Stock solution	Molar concentration in final medium
3.15 g	FeCl ₃ ·6H ₂ O	-	1×10 ⁻⁵ M
4.36 g	Na ₂ EDTA·2H ₂ O	-	1×10 ⁻⁵ M
1 mL	CuSO ₄ ·5H ₂ O	9.8 g/L ⁻¹ H ₂ O	4×10 ⁻⁸ M
1 mL	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	6.3 g/L ⁻¹ H ₂ O	3×10 ⁻⁸ M
1 mL	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	22.0 g/L ⁻¹ H ₂ O	8×10 ⁻⁸ M
1 mL	CoCl ₂ ·6H ₂ O	10.0 g/L ⁻¹ H ₂ O	5×10 ⁻⁸ M
1 mL	MnCl ₂ ·4H ₂ O	180.0 g/L ⁻¹ H ₂ O	9×10 ⁻⁷ M
f/2 vitamin solution			
Quantity	Compound	Stock solution	Molar concentration in final medium
1 mL	vitamin B ₁₂	1.0 g/L ⁻¹ H ₂ O	1×10 ⁻¹⁰ M
10 mL	Biotin	0.1 g/L ⁻¹ H ₂ O	2×10 ⁻⁹ M
200 mL	Thiamine · HCl	-	3×10 ⁻⁷ M

Table 2. Recipe of SWII media

Quantity	Compound	Stock Solution
1 mL	KNO ₃	72 g/L-dH ₂ O
1 mL	KH ₂ PO ₄	4.5 g/1L-dH ₂ O
1.05 mL	Na ₂ -glycerophosphate	10.5 g/1L-dH ₂ O
1 mL	Fe-EDTA	0.5 g/1L-dH ₂ O
10 mL	Vitamin MIX I	-
1 g	Tris-HCl	1 g
10 mL	Soil extract	10 mL
	PH	7.8~8.0
	Distilled water	100 mL
Vitamin MIX I	Thiamin HCl	1 mg
	Biotin	10 μg
	V _{B12}	2 μg

해수 1 L당 배지를 첨가하여 105℃에서 30분간 고압멸균하여 사용하였으며, 적조 배지로는 *P. minimum*, *P. micans*, *H. akashiwo*, *C. polykrikoides*는 f/2-si를, *A. catenella*의 경우는 SWII 배지를 사용하였다. 각 배지의 조성은 Table 1, 2와 같다. 적조는 이동성이 있어 배양 시 따로 교반은 하지 않았으며, 수온 18~23℃, 염분 25~33 psu, 광도 20~100 μ E/m²s의 조건을 유지하면서 배양된 조류가 일정 농도에 도달하면 전자선 조사를 실시하여 실험하였다.

2.2. 전자빔 조사 시스템의 설계

전자빔 조사에 의한 오염물질 처리 시 처리하고자 하는 대상 물질의 깊이에 따른 전자빔 흡수선량 분포가 매우 중요하며 이는 일반적으로 깊이의 함수로 표현할 수 있다. 전자빔은 전달매체와 에너지에 따라 진행할 수 있는 깊이가 달라지며, 1 MeV 정도의 전자빔 에너지가 도달할 수 있는 깊이는 약 4.37 mm이고, 이 깊이 이내에서 가속전자는 모든 에너지를 물에 전달하게 된다.⁵⁾

본 연구에서 사용한 전자빔 조사 시스템은 한국원자력연구소의 2 MeV 상전도 가속기와 eb Tech(주)가 보유하고 있는 2.5 MeV급의 ELV-8 Model 전자가속기를 이용하여 1, 2, 4, 8 kGy로 조사하였다. 2 MeV 상전도 가속기의 조사폭 및 면적은 5×30 cm이며, 19×19 cm의 폴리비닐백에 적조 시료를 150 mL씩 6개 주입하여 판에 부착시킨 후 세워 전자빔을 조사하였다. eb Tech(주)의 전자가속기는 적조 시료 150~250 mL를 48×37.5×3.5 cm의 덮개가 없는 반응조에 전자빔이 투과할 수 있는 두께를 만족하도록 담은 후 카트 위에 올려 레일 위를 10 m/min의 속도로 지나며 전자빔이 조사되는 방법을 이용하였다. 전자빔 조사창에서 시료표면까지의 거리는 약 30 cm 정도이며, 반응조의 길이(48 cm)와

부피(150~250 mL), 선속도(10 m/min)등을 고려하여 계산한 결과 적조시료의 조사시간은 약 50~80 mL을 1초에 조사하였다.

2.3. 전자빔 조사에 따른 적조 사멸효율 평가

물에 조사된 전자빔은 물의 방사분해를 유도하고 그로 인해 발생한 라디칼이 적조의 세포벽을 산화파괴하여 적조는 사멸하게 된다. 적조는 일반 미생물과 달리 엽록소(Chlorophyll)를 가지고 있어 광합성을 할 수 있다는 점에서 전자빔 조사 전후의 Chlorophyll의 농도변화를 통해 전자빔 조사의 효과를 간접적으로 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 적조의 사멸효율을 평가하기 위한 방법으로 적조의 개체수를 계수하는 방법과 Chlorophyll-a 농도를 측정하여 적조 세포내의 엽록체 손상에 의한 적조의 사멸율을 평가하는 방법을 이용하였다. 또한 전자빔 조사 후 적조의 광합성 기작 무능화의 지속성을 확인하기 위해 적조배양실에서 전자빔을 조사하지 않은 적조(Control)와 같은 조건하에서 재배양하며 시간경과에 따른 적조의 개체수, Chlorophyll-a의 농도변화를 비교 관측하였다.

2.4. 전자빔 조사가 적조류의 Bioflocculation에 미치는 영향 분석

전자빔 조사에 의한 적조제어의 세포파괴도를 평가하기 위하여 *C. polykrikoides*에 대하여 전자빔을 조사하지 않은 적조와 전자빔을 조사한 적조를 대상으로 전자빔 조사 전후의 적조세포의 형태변화를 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM, JEOL Ltd. JEM-1010 Model)을 이용하여 관찰하였다.

전자빔에 의해 파괴된 적조는 정상적인 성장을 못하고 결국 세포가 내생호흡단계나 사멸단계에 돌입하면서 그로 인해 Extracellular Polymeric Substance(EPS)가 분비된다. EPS란 세포가 물질대사나 분해를 통해 배출하는 대사산물로 주로 다당류로 이루어진 중합체로 Polysaccharides, Nucleic Acids, Protein 등으로 구성된다. 이 EPS는 세포간의 아교질 역할을 함으로써 Bacteria 세포로 이루어진 Floc을 덮고 Bactrea 세포를 서로 뭉치도록 하여 Floc 형성에 관여하며, 점도를 증가시키는 주원인으로 알려져 있다. 전자빔 조사에 의한 적조제어는 궁극적으로 Chlorophyll 감소에 의한 광합성 기작의 저해와 사멸된 적조에서 분비되는 Biopolymer에 의한 Algal Flocculation을 목적으로 한다. 본 연구에서는 전자빔을 조사한 적조를 재배양하면서 pH, 알칼리도, 적조사멸율, Chlorophyll-a, S-protein, S-

carbohydrate, SOCD 등을 분석하였다. S- carbohydrate 분석은 Anthron Method를 사용하였고, S-protein 분석은 Lowry Method를 사용하였다.⁶⁾

2.5. 전자빔 조사에 의한 Biotoxin의 변화 분석

적조에 의한 어류의 폐사기구는 다량 발생하는 유해성 적조의 어류 아가미 흡착에 따른 질식사 뿐 아니라 유독성 적조에 의한 중독사를 들 수 있다. 유독적조생물이 생산하여 공중보건상의 문제를 야기시키는 독성물질은 직접 어패류에는 치명상을 주지 않으나 어패류를 섭취한 사람을 중독시켜 피해를 준다. 이 독성물질에는 마비성패독(Paralytic Shellfish Poisoning;PSP), 신경성 패독(Neurotoxic Shellfish Poisoning;NSP), 기억상실성 패독(Amnesic Shellfish Poisoning;ASP), 설사성 패독(Diarrhetic Shellfish Poisoning;DSP), 시구아테라(Ciguatera)독 다섯 가지 종류가 있다. 국내 연안에서는 특히 *Alexandrium catenella*와 *Alexandrium tamarense*가 마비성 패류독화를 일으키는 주요 원인 생물로 확인된 바 있다.⁷⁾ 마비성패독은 강한 수용성의 신경독으로 포유동물 체내에서 나트륨 채널에 대한 이온수송을 저해하여 신경과 근섬유에서 강한 마비 증상을 일으킨다.⁸⁾ 독화된 조개류를 섭취하였을 때 나타나는 가장 일반적인 증상은 감각 이상과 구강 주변의 마비 및 멀미와 구토, 졸림 등을 유발하고, 심할 경우 호흡곤란과 순환기 마비에 의한 사망을 일으키게 된다.⁹⁾ 이러한 마비성 패독은 STX(Saxitoxin) 화합물을 총칭하는 헤테로고리형 구아닌으로 주 골격을 이루고 20개 이상의 화합물로 구성되어 있다. 독성이 상대적으로 높은 Carbamate계 독소[Gonyautoxin (GTX₁₋₄), Saxitoxin(STX), NeoSaxitoxin (neoSTX)]와 독성이 가장 낮은 N-sulfocarbamoyl계 독소(C₁₋₄, GTX₅₋₆), 그 중간의 독성을 가지는 Decarbamoyl계 독소(dcGTX₁₋₄, dcSTX) 등으로 밝혀져 있다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 유독 적조에 전자빔을 조사함으로써 유독적조가 분비하는 독소에 미치는 영향을 평가하고자 *A. catenella*에 1 kGy, 2 kGy, 8 kGy의 전자빔을 조사하여 전자빔을 조사하지 않은 Control 적조의 독성물질 함량과 비교함으로써 전자빔 조사에 의한 독소성분 변화를 확인하였다. 마비성 패독 분석은 부경대학교 양식학과에 의뢰하여 Ochima¹¹⁾ 방법에 따라 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)를 이용하였다. 분석에 사용된 표준 독소는 일본 도호쿠대학의 Oshima교수로부터 제공받았으며, 독성은 표준독소에 대한 상대값으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전자빔 조사에 따른 적조류의 사멸효율 평가

초기의 적조 개체수는 적조 중의 성장속도 및 특성에 따라 다르나 적조 개체수 계수를 통한 사멸율은 5종 모두가 비슷한 사멸율을 보였다. 1 kGy의 전자빔을 조사한 경우 50~60%의 사멸율을 나타냈으며, 2 kGy 조사 시 60~68%, 4 kGy와 8 kGy 조사 시 각각 69~78%, 73~88% 사멸하였다. 경남 통영의 현장 시료인 *C. polykrikoides* 또한 초기 3,000 cell/mL에서 1 kGy의 전자빔을 조사함으로써 49%가 즉각 사멸하였고, 54%, 62%, 70%로 조사선량별로 순차적으로 사멸율이 증가하였다. Chlorophyll-a의 농도를 분석한 결과 Fig.1.에 나타낸 것과 같이 초기 Chlorophyll-a의 농도는 1 kGy의 전자빔을 조사함으로써 전자빔 조사 즉시 50~65%가 감소하여 122~151 $\mu\text{g/L}$ 에서 49~69 $\mu\text{g/L}$ 범위의 농도를 나타내었다. 그리고 2 kGy의 전자빔을 조사할 경우는 58~73%의 감소율을 보였으며, 4 kGy 조사 시는 62~81%, 8 kGy 조사 시 69~89%의 감소율을 보였다. 5종의 적조 중 가장 큰 Chlorophyll-a 감소율을 보인 종은 *C. polykrikoides*로, 경남 통영의 현장시료 역시 1 kGy의 전자빔 조사 시 60%의 감소율을 보였고, 2 kGy 조사 시 63%, 4 kGy 조사 시 75%, 8 kGy 조사 시 83%의 감소율을 보여 순수 *C. polykrikoides* 배양체보다는 낮으나 거의 비슷한 수준으로 감소한 것을 알 수 있다. 특히 *C. polykrikoides*는 현재 우리나라에서 출현하여 많은 피해를 주는 유해적조로서 전자빔의 적조발생현장 적용 시 큰 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 전자빔 조사 후 재배양하면서 지켜본 적조의 사멸율과 Chlorophyll-a의 농도는 1 kGy 전자빔을 조사한 적조의 경우 1일 경과 후 적조사멸율은 86~97%, Chlorophyll-a 감소율은 72~93%까지 증가하였

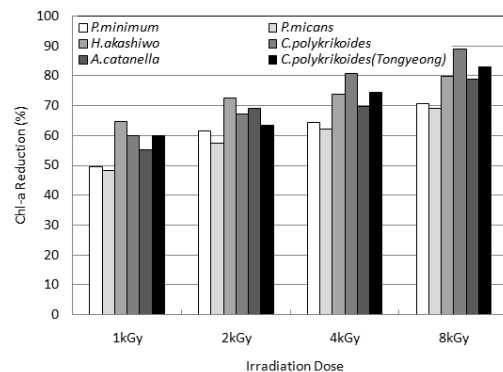


Fig. 1. Chlorophyll-a reduction in red tides immediately after electron beam irradiation.

다. 전자빔 조사선량이 높아질수록 적조의 사멸을 역시 증가하는 것은 사실이나 1 kGy 이내의 전자빔을 조사하여도 1일 내 적조사멸을 80% 이상을 달성함으로써 적조사멸에 뛰어난 효과가 있음을 알 수 있었다.

3.2. 전자빔 조사에 의한 적조 세포파괴도 평가

적조의 전자빔 조사 유무에 따른 세포의 형태를 보면 Fig. 2의 전자빔을 조사하지 않은 *C. polykrikoides*(Control)는 세포를 구성하고 있는 세포소기관이 뚜렷이 세포를 채우고 있으나 전자빔을 조사한 적조의 경우 세포벽이 파괴되고 그 파괴된 세포벽 틈으로 세포의 구성물질들이 용출되며, 세포의 형태를 완전히 잃고 세포질 물질만이 부유함으로써 세포의 파괴를 입증하고 있다.

전자빔을 조사하지 않은 적조는 초기 pH가 8.1~8.9로 약

알칼리성을 나타내었으나 1 kGy의 전자빔을 조사하였을 때 pH 7.9~8.8로 감소하였고, 알칼리도 역시 전자빔 조사선량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나 그 차이는 작았다. 이는 전자빔 조사에 따른 물의 방사분해에 의한 H⁺의 영향 및 적조의 세포파괴로 인한 산 형태의 세포질 성분 용출에 인한 것으로 사료되며¹²⁾, pH의 미비한 변화는 윤(尹) 등의 황토살포에 의한 적조생물 제거 연구¹³⁾의 결과와 유사한 pH 감소율을 보였다.

SCOD는 초기 6.8~8.8 mg/L에서 1 kGy 전자빔 조사 후 103~137% 증가하였으며, *A. catenella*는 약 209%까지 증가하였다. 또한 전자빔 조사에 따른 적조의 S-protein의 농도 변화를 분석한 결과 Fig. 3에서 보는 것과 같이 조사선량이 증가함에 따라 S-protein의 농도가 증가하였음을 볼 수 있다. 1 kGy의 전자빔을 조사함에 29~47% 증가하였고, 2

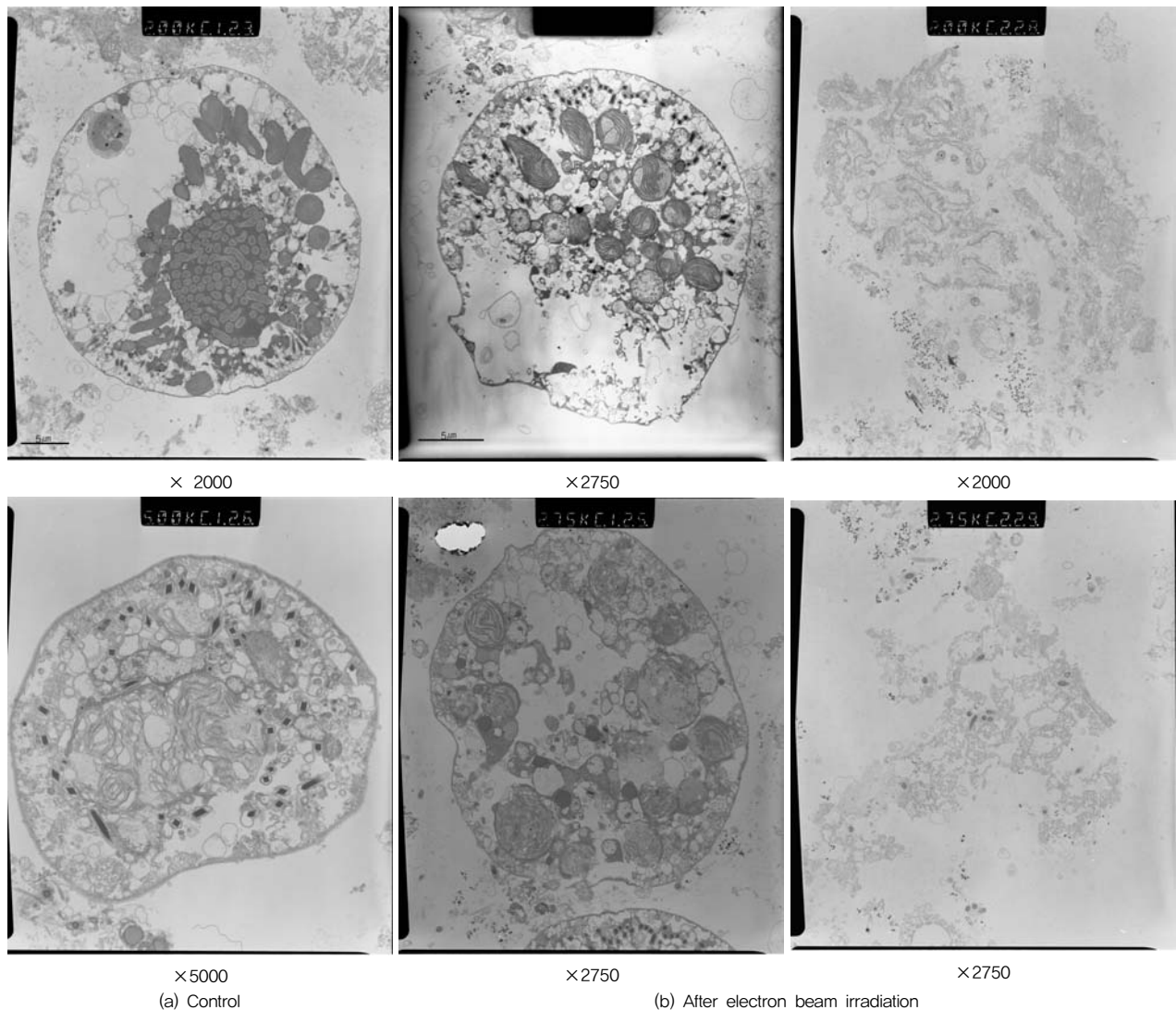


Fig. 2. TEM observation of *C. polykrikoides*.

kGy 조사 시 58~71%, 4 kGy 조사 시 83~111%, 8 kGy 조사 시 118~154%의 증가율을 보였으며, 현장시료의 경우 1 kGy 조사 시 41%, 2 kGy 조사 시 88%, 4 kGy 조사 시 159%, 8 kGy 조사 시 197%가 증가하였다. S-carbohydrate는 1 kGy의 전자빔을 조사함으로써 *P. minimum*은 초기 11.3 mg/L에서 12.9 mg/L로, *P. micans*는 초기 11.9 mg/L에서 15.9 mg/L로, *H. akashiwo*는 초기 8.8 mg/L에서 10.4 mg/L로, *C. polykrikoides*는 9.9 mg/L에서 14.2 mg/L로, *A. catenella*는 초기 7.4 mg/L에서 9.7 mg/L로 증가하여 각각 16%, 33%, 17%, 45%, 31%의 증가율로 종마다 다소 차이를 보였다. 그리고 2 kGy의 전자빔을 조사할 경우는 *P. minimum*, *P. micans*, *H. akashiwo*, *A. catenella* 4종의 경우 32~72%의 증가율을 보인데 반해 *C. polykrikoides*의 경우 119%의 큰 증가율을 보였으며, 4 kGy 조사 시 158%, 8 kGy 조사 시 184%의 증가율을 보여 5종 중 가장 높은 증가율을 나타내었다. 현장시료는 1 kGy 조사 시 42%, 2 kGy 조사 시 93%, 4 kGy 조사 시 120%, 8 kGy 조사 시 145% 증가하였다. S-carbohydrate의 농도변

화는 Fig. 4와 같다. 이러한 S-protein과 S-carbohydrate의 증가는 전자빔의 조사에 따른 세포의 파괴로 인한 세포내 세포질 성분의 용출에 기인한 것이다.

3.3. 전자빔 조사가 적조류의 Biofloculation에 미치는 영향 분석

전자빔 조사 후 시간경과에 따른 적조의 사멸율, Chlorophyll-a와 S-protein, S-carbohydrate 등의 Extracellular Biopolymer의 농도 변화를 살펴봄으로써 전자빔 조사 후 적조의 Biofloculation 기작 유도 및 그에 따른 적조의 생물학적 침전의 가능성을 확인하였다. Table 3. 에서 보는 것과 같이 1 kGy의 전자빔을 조사한 적조를 1일간 재배양하였을 경우 개체수는 86~97%가 감소하였고, 2 kGy와 4 kGy를 조사한 적조는 97~100%로 모든 적조가 사멸하였음을 알 수 있다. 또한 Chlorophyll-a 농도의 경우 역시 1 kGy의 전자빔을 조사한 적조는 72~93%의 감소율을 보였고, 2 kGy, 4 kGy의 전자빔을 조사한 적조는 각각 76~96%, 84~100%의 감소율을 나타내어 1 kGy의 선량으로도 충분히 적조의 사멸이 가능함을 알 수 있다.

또한 EPS의 경우, S-protein은 1 kGy 조사 시 1일 경과 후 77~138%, 2 kGy 조사 시 139~200%, 4 kGy 조사 시 146~290% 증가하였으며, S-carbohydrate는 1 kGy 조사 경우 77~212%, 2 kGy, 4 kGy 조사 시 각각 113~233%, 228~286%의 증가율을 보였다. 이로써 적조내의 Extracellular Biopolymer의 용출에 의한 적조의 Biofloculation에 의한 적조의 침강효과를 짐작할 수 있으며, 실제 전자빔을 조사한 적조를 Jar Tester에서 교반하며 관측한 결과 Floc이 형성된 모습을 관찰할 수 있었다.

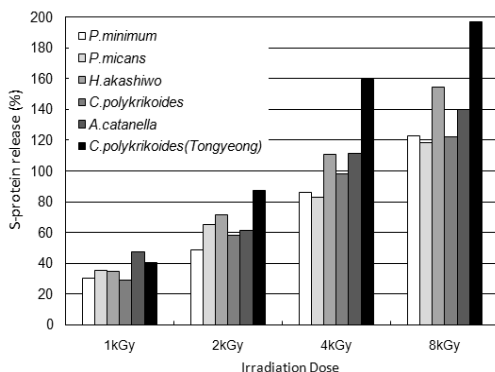


Fig. 3. S-protein release(%) of red tides immediately after electron beam irradiation.

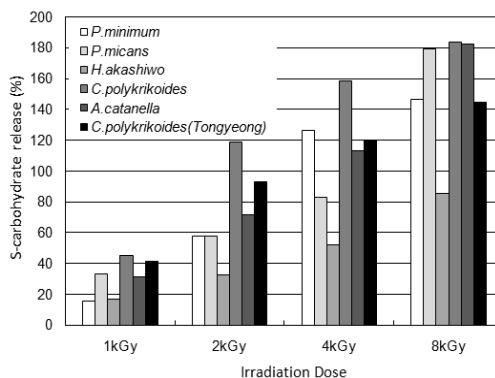


Fig. 4. S-carbohydrate release(%) of red tides immediately after electron beam irradiation.

3.4. 전자빔 조사에 의한 Biotxin 변화 분석

마비성패독(PSP)을 일으키는 *A. catenella*에 1 kGy, 2 kGy, 8 kGy의 전자빔을 조사하여 전자빔을 조사하지 않은 적조의 독함량과 전자빔을 조사한 적조의 독함량을 표준 독소 성분 및 함량과 서로 상대 비교하였다. 그 결과 Fig. 5에

Table 3. Temporal variation of parameters for irradiated red tides

Irradiation Dose	Extinction Rate		Chlorophyll-a Reduction Rate		S-protein Increase Rate		S-carbohydrate Increase Rate	
	Right after	1 day	Right after	1 day	Right after	1 day	Right after	1 day
1 kGy	42-52	86-97	42-60	72-93	33-38	77-138	49-86	77-212
2 kGy	46-67	97-99	50-71	76-96	49-89	139-200	90-145	113-233
4 kGy	65-76	99-100	60-87	84-100	57-147	146-290	158-223	228-286

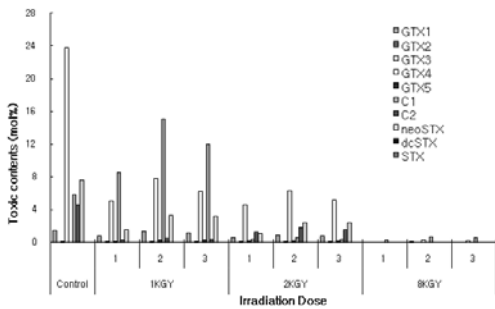


Fig. 5. Change in the toxin contents of *Alexandrium catenella* by electron beam irradiation.

서 보는 것과 같이 Total 독함량을 볼 때 전자빔을 조사하지 않은 적조(Control)의 경우 43.12 mol%인데 반해 1 kGy의 전자빔을 조사하였을 때는 평균 22.44 mol%로 Control 대비 48% 감소하였고, 2 kGy를 조사하였을 경우는 평균 10.08 mol%로 77%, 8 kGy를 조사하였을 경우는 평균 0.65 mol%의 98% 감소율로 독성이 대폭 감소한 것을 볼 수 있다. 그리고 독성이 가장 높은 STX의 경우 neoSTX가 Control 대비 1 kGy의 전자빔 조사 시 65%, 2 kGy의 전자빔 조사 시 75%가 감소하였고, 8 kGy의 전자빔을 조사했을 때 미검출되어 100% 제독됨을 확인할 수 있었다. 이는 전체 독함량의 감소에 비해 더 많은 감소율을 보여 전체적인 독성은 더 낮아진 것으로 사료되며, 이는 전자빔을 조사함으로써 PSP 독소의 화학적 연결구조의 파괴 혹은 결합에 의한 제독으로 판단된다.

4. 결론

이상의 연구결과를 종합 요약하면 아래와 같다.

- 1 kGy의 전자빔 조사 직후 50% 이상의 적조사멸율을 보였으며, 시간의 경과에 따라 1일 경과 시 86~97%의 적조사멸율을 얻었다. 또한 Chlorophyll-a 농도의 경우도 1 kGy의 전자빔을 조사한 직후 50~64% 감소하였으며, 1 kGy 전자빔 조사 후 1일이 경과한 뒤 72~93%의 감소율을 보였다.
- 전자빔을 조사한 *C. polykrikoides*를 투과전자현미경(TEM)으로 관찰한 결과 세포의 변형 및 세포벽 파괴로 세포내 구성물질의 용출이 관측되었으며, S-protein은 1 kGy의 전자빔을 조사한 즉시 28~47%, S-carbohydrate는 16~45%가 증가하였다. 1일 경과 시에는 S-protein은 77~138%가 증가하고 S-carbohydrate는 77~212%까지 증가하였다.

- 3) *A. catenella*의 PSP 패독분석한 결과 1 kGy의 전자빔을 조사한 경우 Control 대비 48%가 감소하고, 2 kGy 조사 시 77%, 8 kGy 조사 시 98%가 감소하였다.

KSEE

사 사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구기반확충사업에 의해 일부 수행되었으며, 일부는 중소기업청 지원사업인 산학공동 기술개발에 의해 이루어진 것이므로, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 박지현, 이병호. “적조방제용 황토살포가 연안 저서생태계에 미치는 영향,” 한국환경과학회지, **15**(11), 1035~1043(2006).
- 이창규, 이옥희, 이삼근. “한국연안에서 분리한 적조형성 미세조류 10종의 성장에 미치는 온도, 염분, 광도의 영향,” *J. Korean Soc. Ocean.*, **10**(1), 79~91(2005).
- Guillard, R. R. L. and Ryther J. H., “Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* Cleve,” *Can. J. Microbiol.* **8**, 229~239(1962).
- Guillard, R. R. L., “Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates, *In: Culture of Marine Invertebrate Animals*,” Smith, W. L. and Chanley M. H. (eds.), Plenum Press, New York, USA., pp. 26~70(1975).
- Woods, R. J. and Pikaev, A. K., “Applied Radiation Chemistry Radiation Processing,” Wiley Inter Science, New York, USA., pp. 104~120(1994).
- 김한규, “끈상여재를 이용한 살수여상시스템에서 EPS 정상변화 및 수질특성,” 단국대학교 대학원 토목환경공학과(2006).
- 박정경. “진해만의 마비성 패독 발생과 Real-time PCR 기법을 이용한 *Alexandrium*속의 검출,” 부경대학교 대학원(2008).
- Kao, C. Y., “Paralytic shellfish poisoning. *In: Algal Toxins in Seafood and Drinking Water*,” Falconer, I.R.(ed), Academic Press. London, pp. 75~86(1993).
- Bricelj, V. M. and shumway, S. E., “Paralytic Shellfish Toxins in Bivalve Molluscs: Occurrence, Transfer Kinetics, and Biotransformation,” *Rev. Fish. Sci.* **6**, 315~383(1998).
- Oshima, Y. B., Luckas and Hummert, “Analytical methods for paralytic shellfish poisons. *In: Manual on Harmful Marine Microalgae*,” Hallegraef, G. M., D. M. Anderson and A. K. Cembella(eds), Intergovernmental Oceanographic Commission,

-
- UNESCO, France, pp. 191-209(2003).
11. Oshima, Y., "Chemical and enzymatic transformation of paralytic shellfish toxins in marine organisms. In: Harmful Marine Algal Blooms," Lassua, P., Arzul, g., Erard, e., Gentien, P. and Marcaillou, C.(eds), Lavoisier, Intercept Ltd. pp. 475-480(1995).
12. 강 호, 나은경, 신경숙, 장제현, "전자선조사를 이용한 부영양화 호수와 연안에서의 조류제거 가능성에 관한 연구," 대한환경공학회지, **25**(11), 1368~1374(2003).
13. 윤종섭, 김승현, 윤조희, "황토살포에 의한 적조생물 제거," 대한환경공학회지, **25**(3), 358~363(2003).