



## 태화강 하류의 적조발생 특성

### Characteristics of Red Tide Blooms in the Lower reaches of Taehwa River

조흥제\* · 윤영배 · 강호선 · 윤성규

Hong-Je Cho\* · Yeong-Bae Yoon · Ho-Seon Kang · Sung-Kyu Yoon

울산대학교 건설환경공학과

(2010년 7월 21일 접수 ; 2010년 10월 7일 1차수정 , 2011년 3월 29일 2차수정 ; 2011년 6월 27일 채택)

#### Abstract

This study was analyzed to determine the cause of red tide at 10 and 30 days antecedent rainfall, stage and discharge in the Taehwa River, tidal data of Ulsan port, also, it was analyzed variation of red tide population, salinity, BOD, COD, T-N, T-P at S1, S2 each point. Most of the red tide in the Taehwa River occurred by provision of proper nutrients with antecedent, the proximity between discharge and low-flow capacity, and stage and discharge of stabilized condition after the sea water was inflowed by maximum tide difference. Red tide population is not nearly related to the change of salinity, the Taehwa River seems specific features of Non-coastal rivers downstream, because red tide was occurred when salinity quite low-end condition.

**Key words** : Taehwa River, Red Tide, Antecedent Rainfall, Water Quality Variation

**주제어** : 태화강, 적조, 선행강우, 수질변화

#### 1. 서론

적조의 사전적 의미는 ‘동물성 플랑크톤의 이상 번식으로 바닷물이 붉게 물들어 보이는 현상’이다. 이처럼 적조는 주로 바다에서, 특히 연안해역에서 많이 발생하였고, 많은 연구가 연안해역을 대상으로 이루어졌다(이 등, 2001; 이 등, 2006). 그러나 최근에는 남해와 남동해에 위치한 하천 하류부에서도 적조가 빈번히 발생하고 있으나, 이에 대한 연구는 많지 않은 실정이다(이, 2009).

일반적으로 식물성플랑크톤의 증식은 외양해수와 혼합이 어려운 연안하구지역이나 내해는 태평양 등의 외양해수와 특징이 다르지만(Fisher 등, 1992), 육지에서는 인,

바다에서는 질소의 영향을 크게 받는다(Hecky and Kilham, 1988, Mahoney, 1989)고 하였으며, 우리나라 연안해역에서 발생하는 적조와 관련한 연구를 살펴보면 다음과 같다.

최(2001)는 남해안 나로도와 소라도 사이의 해역을 대상으로 수온과 염분을 관측하여 적조의 발생, 진행, 소멸의 원인이 염분분포의 차이라고 주장하였다. 서 등(2003)은 나로도 주변해역에 대한 7년간의 위성영상을 분석하여 최초 발생하는 적조의 원인을 고온고염의 열염전선대와 관련된다고 추정하였다. 이 등(2007)은 여수반도를 중심으로 한 남해안에서 적조 발생에 기여하는 담수의 영향을 조사하여 집중 호우시 인근 섬진강 및 동천으로부터 유입하는 다

\* Corresponding author Tel:+82-52-259-2262, Fax:+82-52-259-2629, E-mail: hjcho@mail.ulsan.ac.kr(Cho, H.)

량의 질산염이 적조 발생의 원인이라 결론지었다.

우리나라 하천 하류부에서 발생하는 적조와 관련된 연구에서 이(2009)는 형산강 하류에 대한 유출현상 및 수질변화 특성을 검토하여 형산강 하류지역의 정온도와 유기물의 농도가 적조발생에 기여한다고 주장하였다.

태화강은 울산광역시 중심을 관류하여 남동해로 유입되는 국가하천으로 2004년 이후 강물이 검붉어지는 적조 현상이 빈번히 발생하고 있다. 국립해양조사원의 조석조화 분석 결과에 의하면, 태화강 하구 울산항의 약최고고조위는 60.8cm, 평균해면이 30.4cm이며, 대조차 48.2cm, 평균조차 32.8cm로 나타나 조석의 영향이 크지 않지만, 하류로부터 약 10km상류에 위치한 삼호교까지 바닷물의 영향을 받는다(태화강 하천정비기본계획, 2007). 따라서 위에서 언급한 연안해역과는 달리 하천하류에 조석의 영향으로 바닷물이 밀려들어오므로 적조발생특성이 다를 가능성이 매우 높으며 형산강 하류와 적조발생특성이 유사할 개연성이 매우 높다.

이에 본 연구에서는 태화강의 적조발생 원인을 파악하기 위하여, 적조 발생시 강우량, 수위, 유량 등 수리수문현상을 조사하였고, 적조 발생시의 수질변화 특성을 검토하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 연구지역

태화강 유역 중 본 연구의 대상지역은 최근 적조가 빈번하게 발생하는 하류지역으로 삼호교에서 태화강 하구까지이며, Fig. 1에 표시하였다. 적조 발생시점의 수리수문현상을 파악하기 위해 삼호수위표 지점(P1), 울산수위표 지점

(P2)의 수위 및 유량자료(<http://www.nakdongriver.go.kr>, [hppt://www.wamis.go.kr](http://www.wamis.go.kr))와 울산항(태화강 하구, P3)의 조위자료(<http://www.khoa.go.kr>)를 이용하였고, 적조발생 시 수질변화 특성을 파악하기 위해 태화강전망대 지점(S1)과 십리대밭교지점(S2)을 선정하여 수질분석을 실시하였다.

### 2.2 분석방법

적조발생 시 선행강우량을 파악하기 위하여 울산기상대의 강우량자료(<http://www.kma.go.kr>)를 수집하여 선행 10일 강우와 선행 30일 강우를 분석하였고, 태화강의 유출현황을 파악하기 위하여 낙동강홍수통제소가 운영하는 2개 수위표지점(P1, P2)의 같은 기간 수위 및 유량자료와 국립해양조사원의 울산항 지점(P3)의 조위자료를 수집·분석하였다. S1, S2 지점의 2009년 이후 적조발생 시의 수질변화 특성을 검토하기 위해 실시한 수질분석 항목은 적조생물의 개체수, BOD, COD, T-N, T-P, 염분 등이며, 수질분석 기간은 적조가 지속된 2009년 10월 7일부터 2010년 4월 15일까지이다.

## 3. 결 과

### 3.1 수문현황 검토

본 연구에서는 적조발생시와 2009년 이후 적조가 유지되던 기간 중 적조생물이 번성한 5일의 선행 강우조건 및 P1, P2, P3 지점의 수위변화가 적조발생에 미치는 영향을 검토하기 위해 울산기상대의 적조발생일 기준 10일, 30일 선행강우량을 조사하였고, 국립해양조사원의 P3 지점의 조

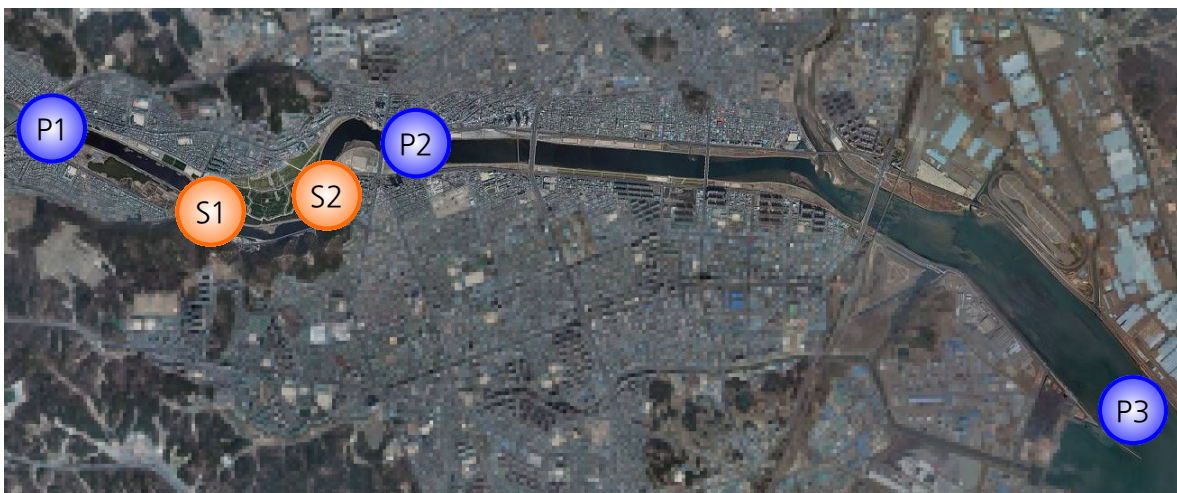


Fig. 1. Research Area.

위와 낙동강 홍수통제소의 P1, P2 지점의 수위 및 유량의 변화를 조사하여 그 결과를 Table 1과 Fig. 2-1~ Fig. 2-12에 나타내었다.

3.1.1. 선행강우량

Table 1에 나타난 바와 같이 2008년 이전 11년의 적조 발생시점과 2009년 이후 5년의 적조 번성시점에서 30일 선행강우량을 조사한 결과, 선행강우가 없었던 적은 한번도 없었으며, 각각 135.0mm, 77.0mm의 강우량을 기록한 2006년 4월 26일과 2010년 3월 31일을 제외하면 모두 48.1mm 이하의 강우량을 기록한 것으로 조사되었다. 그리고 10일 선행강우량을 조사한 결과, 2006년 1월 23일 기록한 17.1mm의 강우량이 가장 큰 값으로 기록되었으며, 대부분의 경우 10mm 이하의 강우량을 기록하였다. 그러므로 2006년 4월 26일과 2010년 3월 31일의 30일 선행강우량이 크게 나타난 것은 적조 발생 약 15일 이전의 강우기록에 의한

것이다. 이 결과만으로 강우량이 적조 발생에 미치는 영향을 명확하게 알 수는 없으나, 적조 발생 30일 전 약 50mm 이하의 강우발생으로 상류로부터의 적당한 영양염류 공급이 적조 발생에 도움이 되는 것으로 추론할 수 있고, 큰 강우가 발생하지 않아야 하며, 적조 발생 10일 전에는 강우량이 적어야 하는 것으로 나타났다.

3.1.2. 조위-수위-유량

Table 1에서와 같이 적조발생 시점의 P1 지점의 유량을 검토한 결과, 평균유량은 3.31m<sup>3</sup>/s이며 이는 P1 지점의 저수량 2.44m<sup>3</sup>/s와 비슷한 것으로 나타났다. 또한 유량이 크게 나타난 2009년 9월 22일과 12월 24일의 10일은 선행강우량이 각각 1.0mm, 14.0mm로 하천의 유량을 증가시키기에 적은 양인 점과 P3 지점의 조위차가 큰 점, 방사보 철거 이후인 점을 고려할 때, 조위에 의하여 유량이 크게 산정된 것으로 판단할 수 있다. 2009년 9월 22일과 12월 24일

Table 1. Changes in Hydraulic Condition

연도	발생 월일	AR <sub>30</sub> (mm)	AR <sub>10</sub> (mm)	P1-Q (m <sup>3</sup> /s)	D(일)	P3>P2 <sub>30</sub>	P3>P2 <sub>10</sub>	TR <sub>10</sub> (cm)	비고
2004	2/2	10.7	0.0	2.19	30	○	○	58	
2005	2/14	37.1	0.9	3.00	5	○	○	64	
	4/27	48.1	12.1	3.08	3	×	×	57	
	11/8	16.0	9.0	3.70	1	○	○	51	
	12/20	1.1	0.6	3.10	19	○	○	48	
2006	1/23	17.1	17.1	1.20	6	○	○	48	
	3/9	24.0	9.5	1.00	5	○	○	67	
	4/26	135.0	16.0	3.20	4	○	○	50	
	12/19	17.0	4.5	1.10	10	○	○	41	
2007	1/9	4.5	3.0	4.00	3	○	○	52	
2008	12/18	10.7	0.0	2.63	4	○	○	56	
2009	9/22	1.0	1.0	8.00	3	○	○	61	
	12/4	31.0	14.0	7.42	2	○	○	53	
2010	1/4	15.0	0.0	4.21	1	○	×	61	
	2/9	24.0	5.0	-	-	○○	○	71	유량결측
	3/31	77.0	6.0	1.83	2	×	×	63	

\* AR<sub>30</sub> : 30일선행강우량, AR<sub>10</sub> : 10일선행강우량,

\* P3>P2<sub>30</sub> : P3-P2 수위역전여부(30일), P3>P2<sub>10</sub> : P3-P2 수위역전여부(10일)

\* P1-Q : P1지점 유량, D : P1지점 일정유량 지속기간, TR<sub>10</sub> : 최대 일조위차(10일)

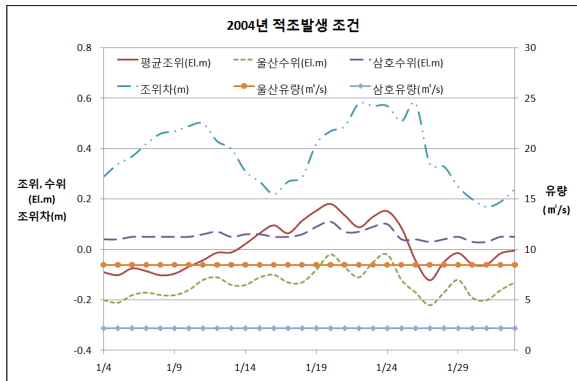


Fig. 2-1. Condition of Rad tide bloom(2004. 2.)

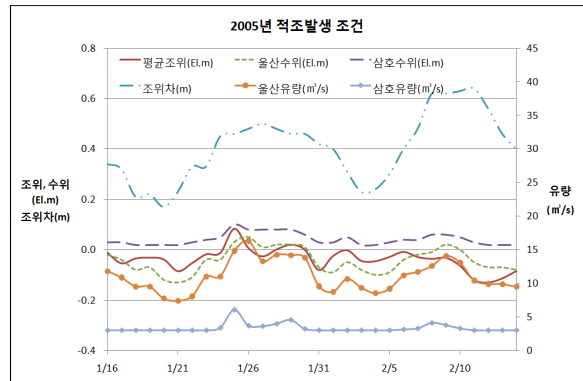


Fig. 2-2. Condition of Rad tide bloom(2005. 2.)

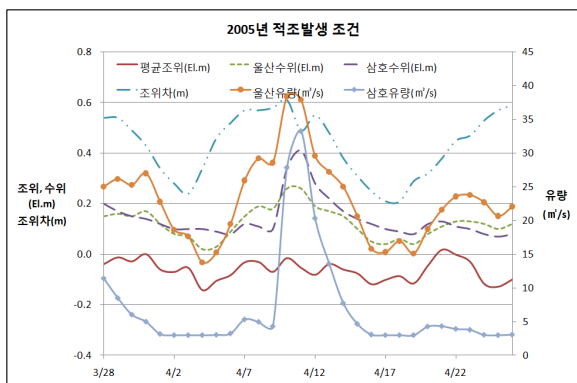


Fig. 2-3. Condition of Rad tide bloom(2005. 4.)

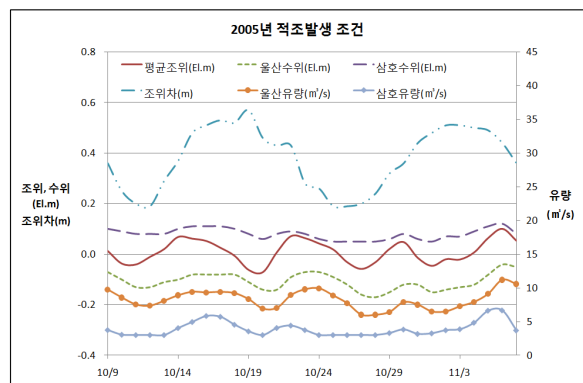


Fig. 2-4. Condition of Rad tide bloom(2005. 11.)

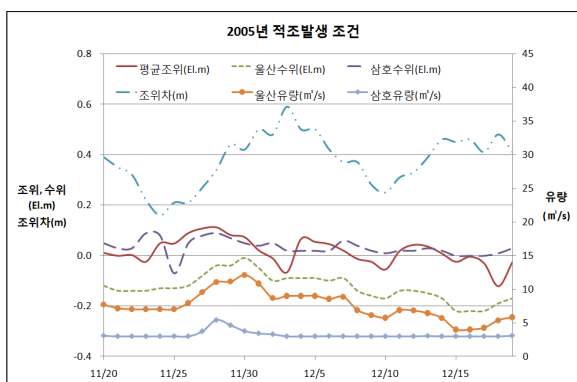


Fig. 2-5. Condition of Rad tide bloom(2005. 12.)

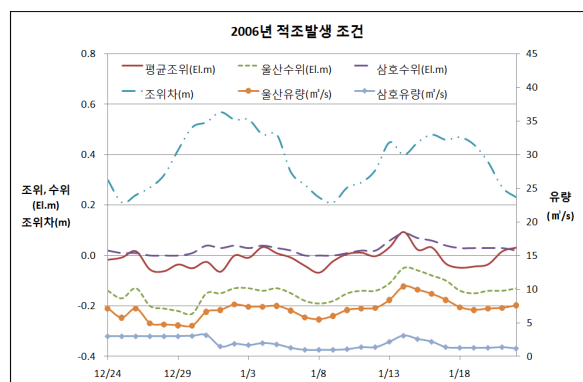


Fig. 2-6. Condition of Rad tide bloom(2006. 1.)

의 유량 자료를 제외하면 평균유량이 2.63m<sup>3</sup>/s로 저수량에 아주 근접한 것을 알 수 있으므로 태화강에서 발생하는 적조는 상류로부터 유입되는 유량의 크기에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있으며, 적조 발생 시점에서 저수량과 가까운 적은 유량에서 주로 발생하는 것으로 판단된다.

P1, P2, P3 지점의 조위-수위-유량자료를 검토한 결과, Table 1과 Fig. 2-1 ~ 2-12에 나타난 바와 같이 2007년 이전의 대부분의 경우 P1 지점의 유량이 5일 이상 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었고, 2005년 4월과 2010년 3월을 제외한 모든 경우에서 적조발생일 전 30일 동안

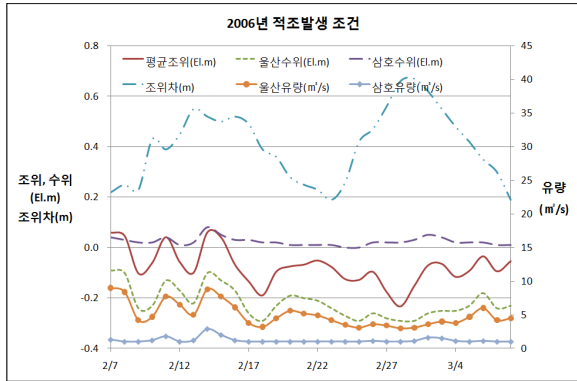


Fig. 2-7. Condition of Rad tide bloom(2006. 3.)

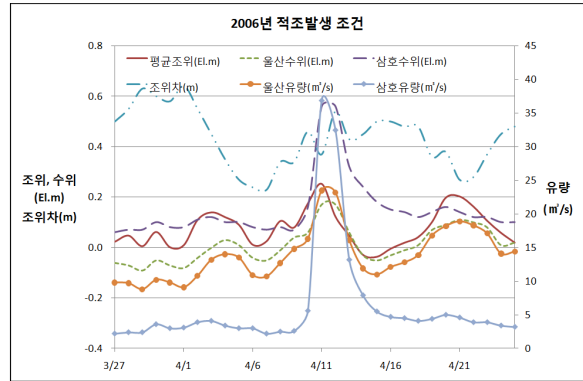


Fig. 2-8. Condition of Rad tide bloom(2006. 4.)

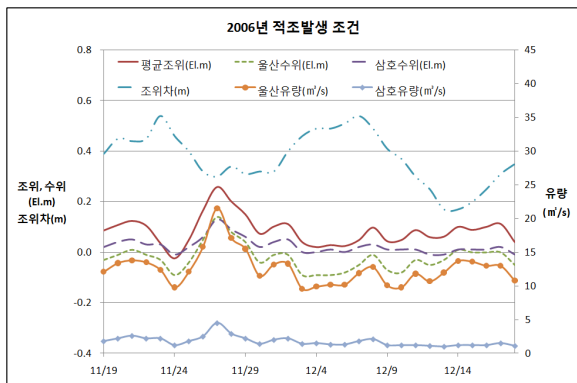


Fig. 2-9. Condition of Rad tide bloom(2006. 12.)

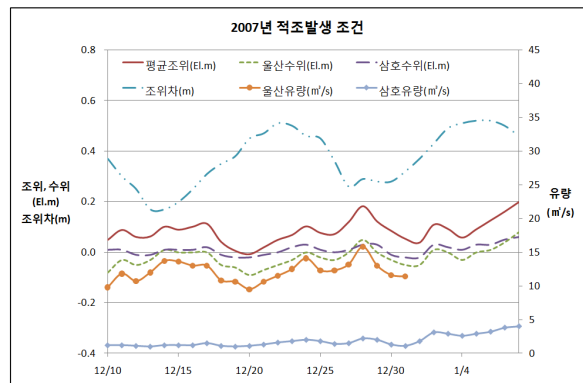


Fig. 2-10. Condition of Rad tide bloom(2007. 1.)

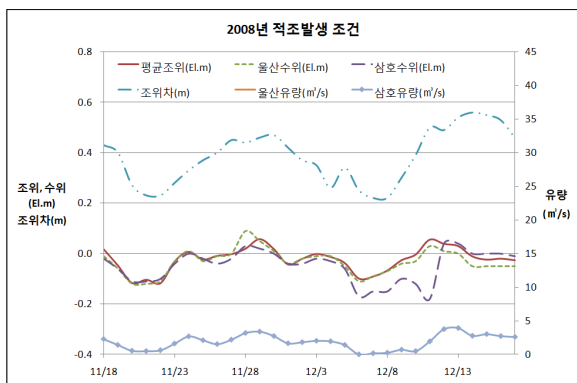


Fig. 2-11. Condition of Rad tide bloom(2008. 12.)

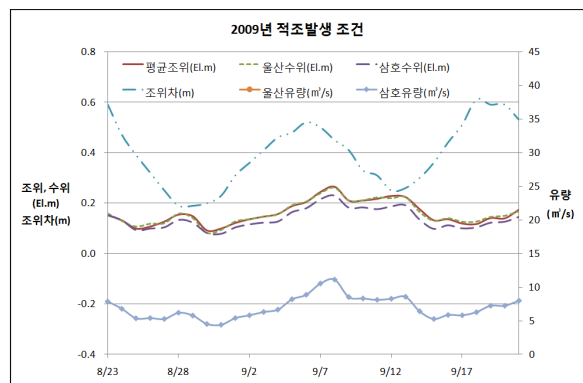


Fig. 2-11. Condition of Rad tide bloom(2009. 9.)

P3 지점과 P2 지점의 수위가 역전되는 현상이 나타나는 것을 확인하였으며, 적조발생일 전 10일 동안은 2010년 1월 만 추가되는 것을 확인하였다. 또한 적조발생일 전 10일 동안 P3 지점의 일최대 조위차를 검토한 결과 P3 지점의 대조차 48.2cm보다 큰 평균 56.3cm의 조위차를 보였으며, 최

대 조위차는 2010년 2월의 71cm이고 최소 조위차는 2006년 12월의 41cm이다. 따라서 태화강에서 발생하는 적조는 큰 조위차에 의해 하류로부터 바닷물이 유입된 후 수위-유량변화가 거의 없는 안정된 상태에서 발생하는 것으로 판단된다.

검토시, P2 지점의 수위-유량자료는 강우량보다는 P3 지점의 조위영향을 많이 받으므로 검토에서 제외하였고, Table 1과 Fig. 2-9 ~ 2-12에 나타난 바와 같이 2006년 12월 이후 P1 지점의 수위-유량이 조위에 영향을 크게 받는 것은 태화강 하구의 방사보를 철거한 것과 P2 지점에서 P3 지점까지를 준설하여 바닷물의 출입의 전보다 원활해진 것이 원인으로 판단된다.

### 3.2 수질현황 검토

2009년 이후의 적조 발생 시의 수질특성을 파악하기 위하여 2009년 이후 적조가 가장 많이 발생하는 태화강전망대 지점(S1)과 십리대밭교 지점(S2)의 수질을 조사하였으며, 간조 시와 만조 시로 구분하여 Cryptomonas와 Euglena의 생물종에 대하여 분석하였다. 수질분석 항목은 적조생물 개체수(cell/ml), 염분(‰), BOD(mg/l), COD(mg/l), T-N(mg/l), T-P(mg/l) 등이며 조사기간은 2009년 10월 7일부터 2010년 4월 15일까지이다.

#### 3.2.1. 간조 측정결과

간조 시 S1 지점과 S2 지점에서의 수질변화를 살펴보았으며, 각 측정항목을 Table 2에 요약하여 나타내었다.

염분의 경우 상류에 위치한 S1 지점이 S2 지점보다 항상 낮게 분석되었으며, 변동범위는 S1지점에서 0.14~16.3‰(평균 10.65‰)으로 나타났으며 생물종별로 Cryptomonas가 0.02~13.1‰(평균 5.79‰), Euglena가

6.3~13.1‰(평균 9.87‰)로 나타났다. S2지점에서는 0.14~16.3‰(평균 10.65‰)으로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas가 0.14~16.3‰(평균 9.31‰), Euglena가 9.7~16.3‰(평균 13.53‰)로 나타나 S2지점에서 염분이 높게 분석되었으며, Euglena에 의한 적조 발생 시 염분이 높게 나타났다. 염분 농도는 S1, S2 지점 모두 2010년 1월 6일에 가장 높게 나타났고 2010년 2월까지는 염분 농도가 낮을 때에도 적조생물 개체수가 많은 경우가 발생하였으므로, 염분의 변화와 적조생물 개체수의 변화와는 상관도가 크지 않음을 알 수 있었다.

BOD는 S1지점에서 0.4~25.4mg/l(평균 5.92mg/l)로 나타났으며 생물종별로 Cryptomonas가 0.6~36mg/l(평균 11.8mg/l), Euglena가 1.1~18.2mg/l(평균 8.87mg/l)로 나타났다. S2지점에서는 1.6~22.7mg/l(평균 7.21mg/l)로 나타났으며, Cryptomonas 1.2~30.7mg/l(평균 7.97mg/l), Euglena 1.9~19.5mg/l(평균 6.29mg/l)로 분석되었다. S1지점에서 2월 17일에 36.0mg/l로 가장 높게 나타났으며, S2지점에서는 3월 31일에 30.7mg/l로 가장 높게 나타났다.

COD는 S1지점에서 3.3~23.4mg/l(평균 8.90mg/l)로 나타났으며 생물종별로 Cryptomonas가 3.3~23.4mg/l(평균 9.43mg/l), Euglena가 3.3~14.9mg/l(평균 7.60mg/l)로 나타났다. S2지점에서는 3.3~20.3mg/l(평균 6.06mg/l)로 나타났으며, Cryptomonas 3.5~20.3mg/l(평균 6.6mg/l), Euglena 3.3~9.4mg/l(평균 4.91mg/l)

Table 2. Water quality variation(ebb tide)

위 치	적조생물	개체수 (cell/ml)	염분 (‰)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	
S1 (태화강전망대)	Cryptomonas (크립토모나스)	max	37,840	13.10	36.00	23.40	6.87	3.93
		min	480	0.02	0.60	3.30	1.24	0.02
		average	10,746	5.79	11.80	9.43	2.91	0.37
	Euglena (유글레나)	max	18,160	13.10	18.20	14.90	4.26	0.25
		min	0	6.30	1.10	3.30	1.31	0.02
		average	3,914	9.87	8.87	7.60	2.34	0.11
S2 (십리대밭교)	Cryptomonas (크립토모나스)	max	17,600	16.3	30.70	20.30	6.65	2.38
		min	240	0.14	1.20	3.50	1.21	0.05
		average	5,753	8.80	8.65	6.84	2.35	0.28
	Euglena (유글레나)	max	11,840	16.30	19.50	9.40	3.53	2.38
		min	0	3.20	1.90	3.30	0.99	0.04
		average	3,138	12.24	6.11	5.19	1.79	0.33

로 분석되었다. S1지점에서 2월 17일에 23.4mg/l로 가장 높게 나타났으며, S2지점에서는 3월 31일에 20.3mg/l로 가장 높게 나타났다.

T-N의 변화는 다음과 같다. S1지점에서 1.24~6.87mg/l (평균 2.75mg/l)로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas 1.24~6.87mg/l (평균 2.75mg/l), Euglena가 1.24~6.87mg/l (평균 2.75mg/l)로 나타났다. S2지점에서는 0.99~6.65mg/l (평균 1.98mg/l)로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas 1.24~6.87mg/l (평균 2.75mg/l), Euglena가 1.24~6.87mg/l (평균 2.75mg/l)로 분석되었다. S1지점에서 2월 17일에 6.87mg/l로 가장 높게 나타났으며, S2지점에서는 3월 31일에 6.65mg/l로 가장 높게 나타났다.

T-P의 변화는 다음과 같다. S1지점에서 0.015~3.931mg/l (평균 0.295mg/l)로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas 0.015~3.931mg/l (평균 0.371mg/l), Euglena가 0.024~0.251mg/l (평균 0.0110mg/l)로 나타났다. S2지점에서는 0.041~2.378mg/l (평균 0.220mg/l)로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas 0.046~2.378mg/l (평균 0.282mg/l), Euglena가 0.0414~2.378mg/l (평균 0.333mg/l)로 분석되었다.

개체수(cell/ml)와 수질측정항목 염분(‰), BOD(mg/l), COD(mg/l), T-N(mg/l), T-P(mg/l) 간의 상관성을 알아보기 위해 회귀분석을 통해 구한 결정계수를 Table 3에 나타내었다.

회귀분석 결과 S1지점에서는 염분의 결정계수는 Cryptomonas 0.014, Euglena 0.326, S2에서는 Cryptomonas 0.101, Euglena 0.255로 분석되어

Euglena가 보다 높은 연관성을 보이고는 있지만, 전체적으로 적조생물 개체수와 염분의 상관도는 거의 없는 것으로 나타났다. BOD의 경우 S1지점에서 결정계수는 Cryptomonas 0.493, Euglena 0.416, S2지점에서는 Cryptomonas 0.510, Euglena 0.836으로 나타나 비교적 상관도가 크게 나타났으며, COD의 경우에도 S1지점에서 COD의 결정계수는 Cryptomonas 0.489, Euglena 0.320, S2지점에서는 Cryptomonas 0.499, Euglena 0.817로 나타나 적조 개체수와 상관성이 있는 것으로 판단되며, Euglena의 경우 높은 상관도를 보였다. T-N은 S1지점에서의 결정계수가 Cryptomonas 0.296, Euglena 0.267, S2지점에서는 Cryptomonas 0.345, Euglena 0.012로 나타났으며, T-P의 경우 S1지점에서 Cryptomonas 0.298, Euglena 0.267, S2지점에서는 Cryptomonas 0.385, Euglena 0.066으로 나타나 T-N, T-P의 경우 BOD, COD와 비교하여 상대적으로 상관도가 작게 나타났다.

분석결과의 P-Value를 통해 간조 시 유의 수준을 확인하였다. 적조 생물종별로 Cryptomonas의 경우 염분을 제외한 항목에서 대부분 0.05 이하의 값으로 유의한 것으로 나타났으며, Euglena의 경우 염분, T-N, T-P의 항목에서 0.05이상의 값을 가져 유의성이 없는 것으로 분석되었다.

### 3.2.2. 만조 측정결과

만조 시 S1 지점과 S2 지점에서의 수질변화를 살펴보았으며, 각 측정항목을 Table 4에 요약하여 나타내었다.

염분의 경우 상류에 위치한 S1 지점이 S2 지점보다 항상 낮게 분석되었으며, 변동범위는 S1지점에서 0.09~14.5%

Table 3. A correlation analysis(ebb tide)

위 치	적조생물	염 분	BOD	COD	T-N	T-P
S1 (태화강전망대)	Cryptomonas (P-value)	0.014 (0.654)	0.493 (0.002)	0.489 (0.002)	0.296 (0.024)	0.298 (0.023)
	Euglena (P-value)	0.326 (0.180)	0.416 (0.118)	0.320 (0.185)	0.267 (0.235)	0.671 (0.024)
	전체 (P-value)	0.000 (0.960)	0.487 (0.000)	0.686 (0.470)	0.313 (0.005)	0.298 (0.006)
S2 (십리대밭교입구)	Cryptomonas (P-value)	0.101 (0.289)	0.510 (0.006)	0.499 (0.007)	0.345 (0.035)	0.385 (0.194)
	Euglena (P-value)	0.255 (0.166)	0.836 (0.001)	0.817 (0.001)	0.012 (0.777)	0.066 (0.506)
	전체 (P-value)	0.038 (0.383)	0.591 (0.000)	0.559 (0.000)	0.289 (0.010)	0.099 (0.153)



Table 4. Water quality variation(high tide)

위 치	적조생물	개체수 (cell/ml)		염분 (‰)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)
S1 (태화강전망대)	Cryptomonas (크립토모나스)	max	24,000	14.50	25.40	15.30	5.96	0.59
		min	0	0.09	0.40	3.10	0.29	0.04
		average	5,369	6.27	6.26	5.76	2.19	0.11
	Euglena (유글레나)	max	6,800	14.50	18.50	12.60	3.37	0.19
		min	0	6.10	1.30	3.20	1.36	0.04
		average	1,851	9.81	6.51	6.03	2.03	0.08
S2 (십리대밭교)	Cryptomonas (크립토모나스)	max	18,400	16.60	22.70	10.90	4.03	0.322
		min	0	0.14	1.60	3.10	0.12	0.035
		average	4,480	9.13	6.98	6.09	1.97	0.12
	Euglena (유글레나)	max	51,200	16.60	12.30	8.10	3.72	0.27
		min	600	4.50	1.60	3.10	0.12	0.04
		average	11,444	12.39	8.14	6.04	1.80	0.13

(평균 7.30‰)으로 나타났으며 생물종별로 Cryptomonas가 0.09~14.5‰(평균 6.27‰), Euglena가 6.1~14.5‰(평균 9.81‰)로 나타났다. S2지점에서는 0.14~16.60‰(평균 10.82‰)으로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas가 0.14~16.60‰(평균 9.13‰), Euglena가 4.50~16.60‰(평균 12.39‰)로 나타나 S2지점에서 염분이 높게 분석되었으며, Euglena에 의한 적조 발생 시 염분이 높게 나타났다. 염분 농도는 S1, S2 지점 모두 2010년 1월 6일에 가장 높게 나타났고 2010년 2월까지는 염분 농도가 낮을 때에도 적조생물 개체수가 많은 경우가 발생하였으므로, 염분의 변화와 적조생물 개체수의 변화와는 상관도가 크지 않음을 알 수 있었다.

BOD는 S1지점에서 0.4~25.4mg/l(평균 6.34mg/l)로 나타났으며 생물종별로 Cryptomonas가 0.4~25.4mg/l(평균 6.26mg/l), Euglena가 1.3~18.5mg/l(평균 6.51mg/l)로 나타났다. S2지점에서는 1.6~22.7mg/l(평균 7.15mg/l)로 나타났으며, Cryptomonas 1.6~22.7mg/l(평균 6.98mg/l), Euglena 1.6~12.3mg/l(평균 8.14mg/l)로 분석되었다. S1지점에서 3월 31일에 25.4mg/l로 가장 높게 나타났으며, S2지점에서는 3월 31일에 30.7mg/l로 가장 높게 나타났다.

COD는 S1지점에서 3.1~15.3mg/l(평균 5.84mg/l)로 나타났으며 생물종별로 Cryptomonas가 3.1~15.3mg/l(평균 5.76mg/l), Euglena가 3.2~12.6mg/l(평균 6.03mg/l)로 나타났다. S2지점에서는 3.1~10.9mg/l(평균

5.91mg/l)로 나타났으며, Cryptomonas 3.1~10.9mg/l(평균 6.09mg/l), Euglena 3.10~8.10mg/l(평균 6.04mg/l)로 분석되었다. S1지점에서 2월 17일에 23.4mg/l로 가장 높게 나타났으며, S2지점에서는 3월 31일에 20.3mg/l로 가장 높게 나타났다.

T-N의 변화는 다음과 같다. S1지점에서 0.29~5.96mg/l(평균 2.15mg/l)로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas 0.29~5.96mg/l(평균 2.19mg/l), Euglena가 1.36~3.37mg/l(평균 2.03mg/l)로 나타났다. S2지점에서는 0.116~4.029mg/l(평균 1.86mg/l)로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas 0.116~4.029mg/l(평균 1.967mg/l), Euglena가 0.116~3.719mg/l(평균 1.796mg/l)로 분석되었다. S1지점에서 2월 17일에 6.87mg/l로 가장 높게 나타났으며, S2지점에서는 3월 31일에 6.65mg/l로 가장 높게 나타났다.

T-P의 변화는 다음과 같다. S1지점에서 0.036~0.586mg/l(평균 0.102mg/l)로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas 0.04~0.59mg/l(평균 0.11mg/l), Euglena가 0.04~0.19mg/l(평균 0.008mg/l)로 나타났다. S2지점에서는 0.035~0.322mg/l(평균 0.124mg/l)로 나타났으며, 생물종별로 Cryptomonas 0.035~0.322mg/l(평균 0.119mg/l), Euglena가 0.035~0.271mg/l(평균 0.129mg/l)로 분석되었다. 선형회귀분석 결과에서는 S1지점에서 T-P의 결정계수는 Cryptomonas 0.638, Euglena 0.650, S2지점에서는 Cryptomonas 0.664,



Table 5. A correlation analysis(high tide)

위 치	적조생물	염 분	BOD	COD	T-N	T-P
S1 (태화강전망대)	Cryptomonas (P-value)	0.044 (0.421)	0.676 (0.000)	0.621 (0.000)	0.333 (0.015)	0.638 (0.000)
	Euglena (P-value)	0.000 (0.982)	0.829 (0.004)	0.796 (0.007)	0.611 (0.038)	0.650 (0.029)
	전체 (P-value)	0.075 (0.194)	0.592 (0.000)	0.529 (0.000)	0.338 (0.003)	0.628 (0.000)
S2 (십리대밭교입구)	Cryptomonas (P-value)	0.247 (0.084)	0.835 (0.000)	0.699 (0.000)	0.312 (0.047)	0.664 (0.001)
	Euglena (P-value)	0.079 (0.464)	0.191 (0.239)	0.033 (0.641)	0.069 (0.495)	0.046 (0.581)
	전체 (P-value)	0.003 (0.814)	0.213 (0.030)	0.103 (0.146)	0.001 (0.899)	0.121 (0.113)

Euglena 0.046으로 나타나 BOD, COD와 비교하여 상대적으로 상관도가 작게 나타났다.

개체수(cell/ml)와 수질측정항목 염분(%), BOD(mg/l), COD(mg/l), T-N(mg/l), T-P(mg/l) 간의 상관성을 알아보기 위해 회귀분석을 통해 구한 결정계수를 Table 5에 나타내었다.

회귀분석 결과 S1지점에서는 염분의 결정계수는 Cryptomonas 0.044, Euglena 0.000, S2에서는 Cryptomonas 0.247, Euglena 0.079로 분석되어 간조 시와는 달리 Cryptomonas가 보다 높은 연관성을 보이고는 있지만, 전체적으로 적조생물 개체수와 염분의 상관도는 거의 없는 것으로 나타났다. BOD의 경우 S1지점에서 결정계수는 Cryptomonas 0.676, Euglena 0.829, S2지점에서는 Cryptomonas 0.835, Euglena 0.191으로 나타나 비교적 상관도가 크게 나타났으나 S2지점에서 Euglena의 경우 상관도가 거의 없는 것으로 나타났다. COD의 경우에도 S1지점에서 COD의 결정계수는 Cryptomonas 0.621, Euglena 0.796, S2지점에서는 Cryptomonas 0.699, Euglena 0.033로 나타나 적조 개체수와 상관성이 있는 것으로 판단되며, Euglena의 경우 S1지점에서는 높은 상관도를 보였으나 S2지점에서는 상관도가 거의 없는 것으로 나타났다. T-N은 S1지점에서의 결정계수가 Cryptomonas 0.333, Euglena 0.611, S2지점에서는 Cryptomonas 0.312, Euglena 0.069로 나타났으며, T-P의 경우 S1지점에서 Cryptomonas 0.683, Euglena 0.650, S2지점에서는 Cryptomonas 0.664, Euglena 0.046으로 나타나 T-N, T-P의 경우 BOD, COD와 비교하여 상대적으로 상관도가 작게 나타났으며, S2지점에서는 Euglena의 상관도가 거의 없는 것으로 나타났다.

만조 시 분석결과와 유의수준은 다음과 같다. 적조 생물 종별로 Cryptomonas의 경우 염분을 제외한 항목에서 모두 0.05 이하의 값으로 유의한 것으로 나타났으며, Euglena의 경우 S2 지점의 분석값이 0.05이상의 값을 가져 유의성이 없는 것으로 분석되었다.

### 3.2.3. 결과 분석

염분의 경우 간조, 만조 시 모두 상관성이 낮은 결과 분석되었으며, 간조 시 염분이 0.02% 인 2010년 4월 8일에는 S1, S2지점에서 Cryptomonas 적조생물의 개체수가 각각 560cell/ml, 240cell/ml로 나타나 거의 소멸된 것으로 나타났으나, S1 지점에서 염분이 0.19% 로 나타난 2010년 3월 31일에는 적조생물 개체수가 약 23,200cell/ml 로 나타나 바닷물의 유입이 거의 없을 경우에도 적조가 발생하는 것으로 나타났으며, 만조 시에도 0.09% 인 2010년 4월 8일에는 S1, S2지점에서 Cryptomonas 적조생물의 개체수가 각각 560cell/ml, 400cell/ml로 나타나 거의 소멸된 것으로 나타났으나, S1 지점에서 염분이 0.78 % 로 나타난 2010년 3월 31일에는 적조생물 개체수가 약 24,000cell/ml 로 나타나 바닷물의 유입이 거의 없을 경우에도 적조가 발생하는 것으로 나타나 염분의 농도와 적조생물 개체수의 상관없이 없다는 것을 확인 하였다.

BOD, COD의 경우 상관성이 높은 것으로 분석 되었으며, 간조 시와 만조 시 모두 BOD, COD의 농도와 개체수의 증감이 동일한 시기에 발생하는 것으로 나타나 적조 생물 개체수와 BOD와 COD의 상관성을 높은 것을 확인하였다. 이러한 결과는 적조 생물의 번성과 소멸이 유기물의 농도에 반영된 결과로 판단된다.

T-N, T-P의 상관도 분석 결과는 식물성 플랑크톤이 질

소, 인 중 어느 한쪽의 영양염이 과량 존재 할 경우 과량 존재하는 영양염을 과잉흡수하고(Goldman 등, 1979), T-N의 경우 조류가 증식하면 PON 형태로, 조류가 적을 때는 DIN 형태로 존재하기 때문에, 본 연구에서 선정된 수질측정 항목이 적절하지 않았던 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

감조하천인 태화강 하류지역의 적조발생 원인을 파악하기 위하여 실측 적조발생자료를 바탕으로 적조 발생일의 10일, 30일 선행강우자료를 조사하고 삼호교 지점과 태화교 지점, 울산항의 수위 및 유출현황을 검토하였고, 적조발생 기간 동안의 수질변화 특성을 검토하여 다음의 결론을 도출하였다.

1) 적조발생 시점에서 10일, 30일 선행강우량 자료를 검토한 결과, 적조 발생 30일 전 약 50mm 이하의 강우발생으로 상류로부터의 적당한 영양염류 공급이 적조 발생에 도움이 되는 것으로 추론할 수 있고, 큰 강우가 발생하지 않아야 하며, 적조 발생 10일 전에는 강우량이 적어야 하는 것으로 나타났다.

2) 적조발생 시점에서 P1 지점의 평균유량은 3.31m<sup>3</sup>/s로, P1 지점의 저수량 2.44m<sup>3</sup>/s와 비슷하게 분석되었고, 조위의 영향으로 유량이 크게 산정된 것으로 판단되는 2009년 9월 22일과 12월 24일의 유량 자료를 제외하면 2.63m<sup>3</sup>/s로 분석되어 유량의 크기가 적조 발생에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 적조 발생시점에서 저수량에 가까운 적은 유량에서 주로 발생하는 것으로 판단된다.

3) P1, P2, P3 지점의 조위-수위-유량자료를 검토한 결과, 대부분의 경우 P1 지점의 수위-유량이 일정기간 지속적으로 유지되고, P3 지점의 조위차가 대조차 48.2cm보다 큰 평균 56.3cm를 나타내므로 태화강 하류에서 발생하는 적조는 큰 조위차에 의해 하류로부터 바닷물이 유입된 후 수위-유량변화가 거의 없는 안정된 상태에서 발생하는 것으로 판단된다.

4) 적조발생 기간동안 수질변화 특성을 분석한 결과, 염분의 경우 적조생물 개체수와 상관도가 거의 없으며, 염분이 0‰에 가까울 경우 적조생물이 거의 소멸한 것으로 나타났으나, 염분이 1‰ 이하일 때 적조생물 개체수가 크게 발생한 경우가 있으므로, 최(2001)와 서 등(2003)의 고염이 적조의 원인이라는 결론과 차이가 있으며, 이는 연안해역과 다른 하천 하류만의 특징인 것으로 판단된다.

5) BOD와 COD 변화는 적조생물 개체수 변화와 상관도가 상대적으로 큰 것으로 보이며, 이는 적조생물의 번성과 소멸이 유기물의 농도에 적절히 반영된 결과로 판단된다.

T-N, T-P의 경우 수질측정 시점과 지점 등의 조건변화와 조류의 번성과 소멸에 따른 형태의 변화로 인해 적조생물 개체수와 상관도가 크지 않은 것으로 분석되었다.

#### 참고문헌

- 서영상, 장이현, 김학균. (2003). *C. polykrikoides* 적조의 시공간적 분포와 중규모 해양환경 변동과의 관계성, *한국지리정보학회지*, **6**(3), 139-150
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박종수. (2001). 광양만에서 식물플랑크톤증식의 제한영양염, *한국해양학회지*, **6**(3), 201-210
- 이영식, 문성용. (2006). 가막만 소호해역에서 태풍 전후 수질 변동특성, *한국해양학회지*, **11**(3), 117-123
- 이영식, 임일애, 이삼근. (2007). *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생하는 해역에서 호우에 의한 담수유입 범위와 질소, 인의 농도변화, *한국환경과학회지*, **16**(10), 1119-1125
- 이창수. (2009). 형산강 하류 적조발생시 수질 및 수문학적 특성 검토, *한국환경과학회지*, **18**(10), 1155-1162
- 최현용. (2001). 한국 남해 나로도도와 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계, *한국해양학회지*, **6**(2), 49-62
- Fisher, T.R., E.R. Peele, J.W. Ammerman and L. Harding. (1992). Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay, *Mar.Ecol.Prog.Ser.*, **82**, 51-63
- Goldman, J.C., J.J. McCarthy and D.G. Peavey. (1979). Growth rate influence on the chemical composition of phytoplankton in oceanic waters, *Nature*, **279**, 210-215
- Hecky, R.E. and P. Kilham. (1988). Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment, *Limnol. and Oceanogr.*, **33**, 796-822
- Mahoney, J.B.. (1989). Algal assay of relative abundance of phytoplankton nutrients in northeast United States coastal and shelf waters, *Wat.Res.*, **30**, 1490-1494
- 건설교통부. (2007). 태화강하천정기기본계획  
국가수자원관리종합정보시스템([www.wamis.go.kr](http://www.wamis.go.kr))  
국립해양조사원(<http://www.khoa.go.kr>)  
기상청(<http://www.kma.go.kr>)  
낙동강홍수통제소(<http://www.nakdongriver.go.kr>)