

기후 요소가 해파리 출현에 미치는 영향 분석

김봉태*† · 엄기혁** · 한인성** · 박혜진*

(*한국해양수산개발원 · **국립수산과학원)

An Analysis of the Impact of Climatic Elements on the Jellyfish Blooms

Bong-Tae KIM*† · Ki-Hyuk EOM** · In-Seong HAN** · Hye-Jin PARK*

(*Korea Maritime Institute · *National Institute of Fisheries Science)

Abstract

The objective of this study is to empirically analyze the relationship between sea temperature and jellyfish blooms. Ever since the 2000s, jellyfish population has been dramatically increased, which brought negative influence on the national health and the fisheries activities. Jellyfish blooms have been recognized as an effect of climate change, but there has been no empirical evidence to support such relationship. In this paper, the relationship between sea temperature and jellyfish blooms has been analyzed by using the regional jellyfish monitoring data and coastal stationary observing data of National Institute of Fisheries Science. Since the dependant variable carries left censoring issues, we used the panel tobit model. Our results indicate that there are statistically significant positive relationship between sea temperature and jellyfish blooms.

Key words : Jellyfish blooms, Sea temperature, Climate change, Panel tobit model

I. 서론

해파리는 생식능력과 환경적응능력이 뛰어나 포식자가 없거나 먹이생물이 풍부할 경우 다른 생물과의 생존경쟁에서 쉽게 우위를 점하며 개체수가 기하급수적으로 증가한다(MLTM, 2012). 해파리의 대량 발생은 1960년대 이후 전 세계적으로 보고되고 있으며, 우리나라에서도 1990년대 후반부터 보름달물해파리가 대량으로 나타나기 시작하였고 2000년대 이후에는 노무라입깃해파리까지 발생 빈도가 급격하게 증가하고 있다.

이러한 해파리의 출현은 주로 해수욕객과 어업인에 대한 피해, 발전소 가동 중단 등의 피해로

이어지는데, 2003년 이후 해수욕객 피해가 매년 500건 이상 보고되고 있으며, 어업인에 대한 피해도 모든 어구·어법에서 발생하고 있다(NFRDI, 2013). 해파리에 의한 경제적 피해는 수산업 피해, 국가기간산업 피해 등으로 연간 1,523억~3,049억 원이 발생하는 것으로 조사되기도 하였다(MLTM, 2009). 이에 정부는 노무라입깃해파리, 보름달물해파리 등을 「해양생태계 관리 및 보전에 관한 법률」로써 유해해양생물로 지정·관리하고 있다.

우리나라 주변 해역의 해파리 대량 출현 원인으로서는 수온 상승에 따른 서식처 증가, 수산자원 남획 또는 연안역의 오염에 따른 천적 및 경쟁

† Corresponding author : 051-797-4592, btkim@kmi.re.kr

* 이 논문은 2015년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2015054)의 지원으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

생물 감소, 항만·방조제 등 해파리 폴립(polyp)이 부착할 수 있는 인공구조물의 증가 등으로 추정되고 있다. 그러나 해파리의 대량 발생에 대해서는 전 세계에 걸쳐 문제가 되기 시작하면서 연구되고 있으나 상대적으로 다른 생물군에 비해 연구 기간이 짧아 대량 발생의 원인에 대해서는 잘 규명되지 않고 있다. 예를 들어 영국에서는 1980년대 이후 해파리 발생으로 연어 양식 등에 피해를 야기하고 있으나 지구온난화, 기후순환, 연안 오염, 수산자원 남획 등 여러 가지가 연관되어 있을 것으로 추정되고 있다. 그러나 실제로 해파리 발생이 증가했는지조차 자료 구축의 어려움으로 입증되지 못하고 있다(Nickell et al., 2010). 또 다른 연구는 전 세계적인 해파리 증가를 뒷받침하는 확실한 증거는 없으며 20년 주기로 증감을 반복하는 주기가 있으므로 이에 대응할 필요성을 제기하기도 하였다(Condon et al., 2013).

이처럼 해파리의 대량 발생의 원인이 명확하게 규명되지 않고 있으나 기후변화와 관련하여 해파리가 유해생물로서 수산분야의 기후변화 취약성 평가에서 주요 지표로 거론되고 있다(Lee et al., 2011). 여름철 수온 상승기에 해파리가 대량으로 출현한다는 점에 근거할 때 수온과 해파리 발생이 밀접한 관련이 있으며 기후변화에 따른 수온 상승으로 해파리 발생이 증가할 것이라는 점이 예상되기 때문이다. 그러나 기후변화 취약성 지표로 활용하기 위해서는 한층 더 과학적인 근거가 필요하다고 판단된다. 수온과 해파리 발생을 다룬 기존 연구로 NFRDI(2013) 이외에는 찾아보기 힘든데, 이 연구는 노무라입깃해파리 기원지로 추정되는 황해 연안 5개 지역의 표층수온 변동과 해파리 출현량의 상관성을 확인하였으나 통계적으로 유의한 결과를 얻지 못하였다.

이에 본고는 크게 두 가지 점에서 기존 연구를 보완하고자 시도한다. 첫째, 본고는 국립수산과학원을 통해 2006년부터 구축되어 운영되고 있는 해파리 모니터링 자료와 연안정지관측 자료를 이용하여 분석한다. 전자는 지역별로 주간 단위로

노무라입깃해파리, 보름달물해파리, 기타해파리로 구분하여 출현율이 조사되어 있고, 후자는 전국 연안의 34개 정점에 대해 일간 단위로 수온, 기온, 천기 등이 관측되고 있다. 이 자료를 활용하면 해파리 종류별·지역별로 주간 단위의 분석이 가능하여 연도별 자료를 사용할 경우 시계열이 짧다는 문제와, 전국 집계 단위를 사용할 경우 지역별 특성을 반영하지 못한다는 단점을 해소할 수 있다.

둘째, 본고는 해파리 출현율과 수온 간의 관계를 분석함에 있어 지역별 시계열 자료에 기초한 패널 모형(Panel Model)을 사용하는데, 지역별 집계 자료라는 점에서 확률효과(random effects) 모형보다는 고정효과(fixed effects) 모형을 사용한다. 또한 자료가 주간 단위이므로 상당수의 관측치가 0으로 나타나는 데 이 경우 통상적인 회귀분석을 적용하면 추정치의 편이가 발생하고 일치성(consistency)이 상실된다는 것은 잘 알려져 있다. 이를 해결하기 위해 흔히 토빗(Tobit)이라 불리는 방법을 사용하는데, 본고는 패널 모형에 이를 적용한 패널 토빗 모형(Panel Tobit Model)으로 분석한다.

본고의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장 분석 자료와 방법에 대해 설명하고, 제Ⅲ장은 추정결과를 제시하며, 마지막 제Ⅳ장은 결과를 요약하고 결론을 내린다.

Ⅱ. 분석 자료 및 방법

1. 분석 자료

본고의 분석을 위해 사용하는 자료는 국립수산과학원의 해파리 모니터링 자료와 연안정지관측 자료이다. 해파리 모니터링 자료는 전국 연안의 약 300명의 어업인, 70명의 공무원으로 구성된 모니터링체제를 통해 해파리 종류별·지역별로 주간 단위로 집계된 것으로 매년 5월부터 12월까지의 자료가 구축되어 있다. 해파리의 종류는 노무

라입깃해파리, 보름달물해파리, 기타해파리로 구분되어 있으며 지역은 광역시·도 단위이다. 기타해파리는 라스톤입방해파리, 커튼원양해파리, 유령해파리 등이 있는데 노무라입깃해파리, 보름달물해파리에 비해 소량 출현하며 집계 자료에서 구분되지는 않는다.

해파리 모니터링은 2006년부터 시작되었으나 지역별로 주간 단위로 집계된 것은 2010년부터이고 모니터링체제가 안정화되는 기간을 감안하여 실제 분석에는 2010년부터 최근(2015년 9월)까지의 자료를 이용한다. 해파리 모니터링 자료의 관측 값은 해파리의 출현율(%)로 이는 전체 모니터링 요원 중 해파리를 관측한 모니터링 요원 수의 비율로 산정된다. 따라서 이는 해파리의 개체수에 대한 정보라기보다는 공간적으로 확산된 정도에 대한 정보로 이해할 수 있다.

연안정지관측 자료는 전국 연안의 34개소 정점에 대해 1933년부터 현재까지 매일의 표층수온, 기온, 운량, 천기 등을 관측한 것으로 장기간 연안 해황 변동의 기초 자료이다. 이 자료는 표층수온뿐만 아니라 풍속, 기상 상태에 대한 정보가 있어 해파리 모니터링에 영향을 주는 다른 요소를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 강풍이 불거나 비가 내리는 날은 해파리가 출현했음에도 불구하고 모니터링 요원이 현장에 있기 어렵고, 현장에 있더라도 관측이 어려울 수 있는데, 이러한 상황을 이들 변수로써 통제할 수 있다. 연안정지관측 자료를 해파리 모니터링 자료와 연결하기 위해 일간 단위를 주간 단위로, 조사 정점이 속한 광역시·도 단위로 평균치를 산정하였다. 2010~2015년(9월까지)의 자료가 거의 누락 없이 잘 구축되어 있는 조사 정점은 8개이고 광역시·도로는 강원, 경남, 경북, 부산, 인천, 전북의 6개에 해당한다. 즉 실제 분석에 사용된 자료는 연안정지관측 자료의 제약으로 6개 광역시·도에 국한된다.

이에 따라 분석에 사용된 자료는 6개 집단(광역시·도)의 300개(주간)의 시계열로 구성되며 전

체 관측치 수는 집단별로 일부 결측치가 있어 1,777개이다.

패널 자료이므로 광역시·도별로 기초 통계량을 정리하면 <Table 1>과 같다. 해파리 종류별로 전체적으로 보면 보름달물해파리의 평균 출현율이 가장 높고, 노무라입깃해파리, 기타해파리의 순이었다. 지역별로 노무라입깃해파리의 평균 출현율은 인천·경북·전북에서 높았고 다른 지역은 낮았는데 강원에서 특히 낮게 나타났다. 인천·전북이 높은 것은 노무라입깃해파리가 황해의 중국 또는 우리나라 연안에서 기원하기 때문으로 풀이된다. 이에 반해 보름달물해파리는 경남이 가장 높았고 경북, 전북, 부산 등의 순이었으며 인천은 특히 낮았다. 기타해파리는 경남에서 가장 높았고 경북, 부산, 강원 순이었으며 인천·전북은 미미하게 나타났다. 이상의 결과로 볼 때 해파리 종류별로, 지역별로 특성이 있음을 알 수 있다.

해파리 출현율에 영향을 미치는 변수로는 표층수온, 풍속, 우천일수를 들 수 있다. 이 가운데 풍속, 우천일수는 해파리의 생태보다는 모니터링에 영향을 미쳐 출현율에 영향을 주는 변수로 고려하였다. 평균 표층수온은 부산·경남이 높았고, 전북, 경북, 강원, 인천의 순이었다. 평균 풍속등급은 경북·경남이 높았고 전북, 강원, 인천, 부산의 순이었다.¹⁾ 평균 우천일수는 강원·인천·경남·전북이 높았고 경북·부산이 낮았다.

한편 주간 단위의 표층수온과 해파리 출현율을 지역별로 그림으로 표시하면 [Fig. 1]과 같다. 수온 상승기에 해파리 출현율이 뚜렷하게 상승하나, 지역별로 수온의 변동폭과 해파리 종류별 출현율이 다소 다른 경향을 보이고 있다.

2. 분석 방법

분석에 사용되는 자료는 6개 집단(광역시·도)의 1~300차주에 해당하는 패널 자료이다. 패널 자료

1) 풍속등급은 연안정지관측 자료에서 0부터 9까지 등급화한 지수로 풍속이 강할수록 높은 값을 지닌다.

는 횡단면 및 시계열 자료의 특성을 모두 지니고 있어 추정의 효율성이 제고되고, 집단의 관찰되지 않는 이질성을 모형에서 통제할 수 있어 내생성으로 인한 편의를 상당 부분 해소할 수 있다. 패널 자료를 이용한 분석 모형은 다음 식 (1)과

같이 표현된다.

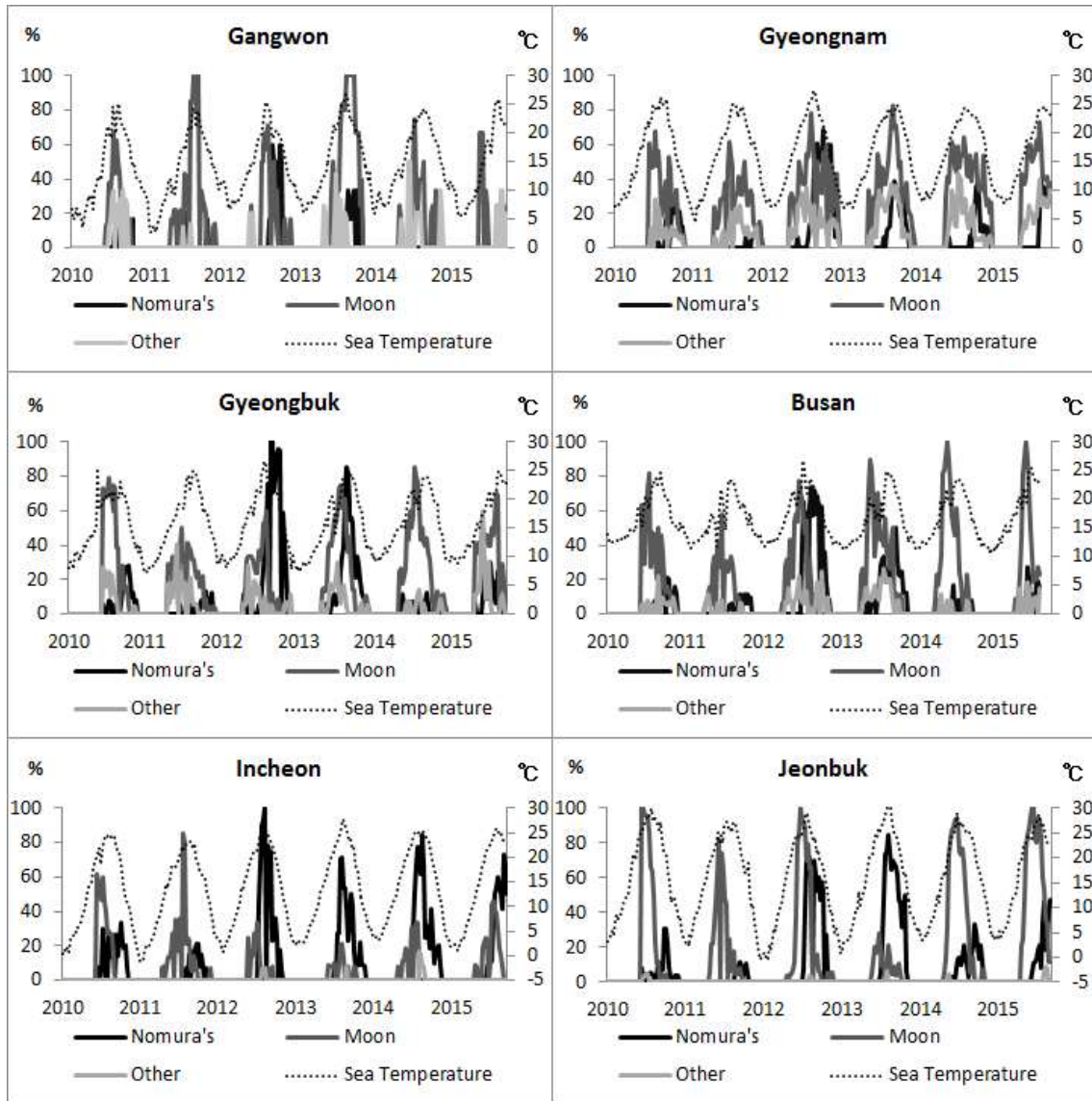
$$y_{it}^* = \alpha + \beta x_{it} + \eta_i + \epsilon_{it} \quad (1)$$

여기서 i 는 6개 광역시·도를, t 는 시간을 나타내는 아래첨자이다. 종속변수인 y_{it}^* 는 해파리

<Table 1> Basic Statistics

Region	Variables	Mean	Std. Dev.	Min	Max	N	N(y=0)
Gangwon	Nomura's Jellyfish	2.587	9.110	0	60	298	270
	Moon Jellyfish	14.519	26.254	0	100	298	204
	Other Jellyfish	2.925	8.635	0	50	298	263
	Sea Temperature	14.421	6.166	2.72	26.82	298	
	Wind Speed Ratings	2.098	0.820	0	6.567	298	
	Rainy Days	0.088	0.155	0	0.8	298	
Gyeongnam	Nomura's Jellyfish	6.262	13.072	0	69	298	215
	Moon Jellyfish	22.596	22.972	0	82.4	298	126
	Other Jellyfish	8.551	10.903	0	42.9	298	145
	Sea Temperature	16.294	6.141	4.433	27.35	298	
	Wind Speed Ratings	3.075	1.038	0.6	8.556	298	
	Rainy Days	0.078	0.122	0	0.625	298	
Gyeongbuk	Nomura's Jellyfish	8.175	18.724	0	100	298	187
	Moon Jellyfish	17.270	22.749	0	85.7	298	146
	Other Jellyfish	4.270	8.270	0	60	298	204
	Sea Temperature	15.641	5.178	7.35	26.5	298	
	Wind Speed Ratings	3.241	0.752	1.317	5.608	298	
	Rainy Days	0.021	0.049	0	0.333	298	
Busan	Nomura's Jellyfish	6.420	14.084	0	74.1	289	203
	Moon Jellyfish	16.620	24.926	0	100	289	158
	Other Jellyfish	3.128	5.608	0	26.7	289	203
	Sea Temperature	16.690	4.030	10.5	26.82	289	
	Wind Speed Ratings	0.980	1.145	0	4.25	289	
	Rainy Days	0.027	0.085	0	0.5	289	
Incheon	Nomura's Jellyfish	10.780	20.918	0	100	298	202
	Moon Jellyfish	6.269	13.407	0	85.7	298	214
	Other Jellyfish	0.255	1.664	0	16.7	298	290
	Sea Temperature	13.450	8.168	-1.18	27.84	298	
	Wind Speed Ratings	1.939	0.963	0	7	298	
	Rainy Days	0.088	0.151	0	0.8	298	
Jeonbuk	Nomura's Jellyfish	8.577	18.319	0	84.2	296	200
	Moon Jellyfish	17.039	30.257	0	100	296	176
	Other Jellyfish	0.196	1.067	0	9.1	296	285
	Sea Temperature	15.828	8.750	-0.5	31.14	296	
	Wind Speed Ratings	2.516	1.917	0.525	22.58	296	
	Rainy Days	0.063	0.140	0	0.6	296	

기후 요소가 해파리 출현에 미치는 영향 분석



[Fig. 1] Sea Temperature and the Rate of Jellyfish's Appearance by Region

출현율이고, x_{it} 는 표층수온, 풍속등급, 우천일수, 모니터링체제 가동 여부 등과 같은 설명변수이다. 실제 분석에서 표층수온의 경우 선형적인 효과 이외에 체감·체증 효과를 함께 보기 위해 제곱 변수를 포함하였다.

설명변수에는 해파리 발생 주기가 1년이고 발생에 영향을 미치는 시점의 특성을 고려하기 위

해 연도별 더미변수를 포함하였다. η_i 는 시간불변적인(time-invariant) 설명변수로 해파리 기원 지역의 거리 등 해당 지역의 고유한 특성을 나타낸다. ϵ_{it} 는 개별 지역의 해파리 출현율에 대해 관찰되지 않는 특성을 의미하는 오차항으로 추정을 위해 설명변수와 서로 독립적이라고 가정한다.

패널 모형에서는 η_i 를 일종의 상수항이나 더미

변수처럼 처리하는 고정효과 모형과 일종의 확률 변수로 보는 확률효과 모형 중 하나를 선택하게 되는데, 후자의 경우 η_i 와 다른 설명변수들 간에 독립성이 확보되지 않으면 추정결과의 일치성을 잃게 된다. 본고의 분석 대상인 6개 지역은 확률적으로 선택된 표본이 아니므로 지역의 관찰되지 않은 특성이 다른 설명변수와 상관되어 있다고 보는 것이 타당하다. 따라서 본고는 고정효과 모형으로 분석한다.

한편 종속변수인 해파리 출현율은 최대 100% 까지 수치가 나타나지만 모든 기간에서 관측되는 것은 아니다. 해파리 종류별로, 지역별로 차이는 있으나 0인 관측치 수가 상당히 많이 나타난다. 이렇게 상당수 관측치가 0인 경우 해파리 모니터링에서 해파리 출현 유무가 기록되는 메커니즘과 해파리가 출현할 경우 그 규모가 결정되는 메커니즘은 다르다고 볼 수 있다. 예를 들어 모니터링에 기록되는 해파리의 출현 여부는 모니터링체제의 가동 여부, 당일의 기상 상황 등에 의존하는 부분이 크지만 일단 해파리 출현이 기록되는 날은 이러한 요소보다는 수온에 더 영향을 받을 수 있다.

이처럼 해파리 출현율이 0에서 중도절단된(censored) 형태가 되면 식 (1)의 y_{it}^* 는 잠재된 종속변수이고, 실제로는 식 (2)에서와 같이 y_{it} 가 관측된다고 볼 수 있다.

$$y_{it} = \begin{cases} 0 & \text{if } y_{it}^* < 0 \\ y_{it}^* & \text{if } y_{it}^* \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

종속변수가 절단된 경우 최소제곱 추정량은 편의가 있으며 불일치하게 된다. 이 경우 종속변수의 제한적 특성에 대해 정규적인 최우추정법을 변형한 방법인 토빗(Tobit)이라고 하는 대안적인 추정 방법을 적용할 수 있다(Tobin 1958).

이상을 종합하면 본고는 패널 모형 분석 방법 중 고정효과 모형을 채택하고 중도절단된 형태를 고려하기 위해 토빗 모형을 적용하여 고정효과 패널 토빗 모형으로 분석한다. 이 경우 비선형

모형이므로 선형 패널 모형에서 보편적인 평균편차(mean deviation) 방식으로는 고정효과가 사라지지 않는다. Honore(1992)가 이를 분석할 수 있는 방법을 제시하였는데 본고는 이를 적용하였다.²⁾ 비선형 패널의 경우 패널 시계열이 충분히 길지 않으면 고정효과 추정치의 일치성에 문제가 발생하는 것으로 알려져 있으나(Cameron and Trivedi, 2005), 본고의 분석 대상은 패널 시계열이 300개에 이르기 때문에 이러한 문제에서 벗어날 수 있다고 판단된다.

III. 분석 결과

본고의 회귀분석에 사용되는 종속변수는 중도절단된 형태이므로 패널 토빗 모형의 분석 결과를 채택하되 일반적인 선형 패널 모형과 0이 아닌 관측치에 대해서만 분석한 선형 패널 모형의 추정 결과를 참고적으로 제시하였다.

노무라입깃해파리의 출현율에 대한 모형 추정 결과는 <Table 2>에 나타나 있다. 패널 토빗 모형을 기준으로 하면 표층수온에 대해서는 양(陽)의 값이지만 표층수온 제곱에 대해서는 계수가 유의하지 않아 표층수온에 대해 체증 또는 체감하기보다는 양의 방향으로 선형적인 관계가 있음을 나타낸다. 풍속등급은 유의하지 않은 반면 우천일수는 음(陰)의 값으로 유의하여 기상이 좋지 않은 날에 관측하기 어려운 것으로 확인되었다. 이는 노무라입깃해파리가 출현했음에도 불구하고 기상 조건이 좋지 않아 관측되지 않을 개연성이 크다는 점으로 해석된다. 연도별 더미는 2010년에 대비한 특정 연도의 특성을 고려한 것으로 2011~2013년의 계수가 유의하였는데, 2011년은 2010년 대비 해파리 발생을 감소시키는 요인이 작용한 반면, 2012~2013년은 증가시키는 요인이

2) 본고는 Honore(1992)가 제시한 방법에 따라 개발된 Stata 프로그램인 pantob.ado를 사용한다. 자세한 내용은 관련 홈페이지(<http://www.princeton.edu/~honore/stata/index.html>)를 참조할 수 있다.

기후 요소가 해파리 출현에 미치는 영향 분석

<Table 2> Regression analysis results for Nomura's Jellyfish

Variables	Linear Panel Model		Linear Panel Model(y>0)		Panel Tobit Model	
	Coef.	Std. Error	Coef.	Std. Error	Coef.	Std. Error
Sea Temperature	-1.007	0.253***	3.347	1.520**	5.353	3.167*
Sea Temperature(squared)	0.063	0.008***	-0.045	0.038	-0.045	0.095
Wind Speed Ratings	0.335	0.280	0.275	0.627	0.476	1.383
Rainy Days	-2.804	2.630	1.387	7.497	-18.553	9.865*
Year 2011	-2.311	1.110**	-3.992	2.985	-17.963	2.423***
Year 2012	9.471	1.104***	29.989	2.583***	32.389	4.113***
Year 2013	6.627	1.105***	13.695	2.464***	17.583	6.665***
Year 2014	0.426	1.112	2.308	2.738	-1.813	7.115
Year 2015	1.534	1.178	5.255	3.015*	0.212	3.606
Monitoring Period	-4.216	0.972***			-114.320	10.468***
N	1777		500		1777	
Censored N(y=0)					1277	

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

<Table 3> Regression analysis results for Moon Jellyfish

Variables	Linear Panel Model		Linear Panel Model(y>0)		Panel Tobit Model	
	Coef.	Std. Error	Coef.	Std. Error	Coef.	Std. Error
Sea Temperature	-3.275	0.327***	2.249	1.648	6.374	3.354*
Sea Temperature(squared)	0.149	0.010***	0.006	0.042	-0.056	0.102
Wind Speed Ratings	-0.838	0.362**	-1.365	0.931	-2.188	1.078**
Rainy Days	3.593	3.400	5.129	6.692	9.773	9.966
Year 2011	-2.519	1.435*	-6.672	2.794**	-6.668	5.963
Year 2012	-2.153	1.428	-3.291	2.867	-6.004	5.624
Year 2013	-0.238	1.429	-2.587	2.795	-1.636	8.908
Year 2014	1.169	1.438	2.802	2.848	0.005	4.584
Year 2015	3.096	1.524**	6.878	3.034**	5.333	4.438
Monitoring Period	-16.893	1.257***			-119.305	7.205***
N	1777		753		1777	
Censored N(y=0)					1024	

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

작용한 것으로 풀이된다. 그리고 당연하게도 모니터링 기간 여부는 해파리 출현율에 절대적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.)

선형 패널 모형에서는 표층수온의 계수가 음(陰)이고 표층수온 제곱의 계수가 양(陽)으로 추정되어 노무라입깃해파리가 표층수온에 대해 체

증하여 출현하는 관계를 나타내지만, 상당수 관측치가 0이라는 점을 고려하지 못하고 있으므로 잘못된 결론으로 유도될 수 있다. 그리고 0이 아닌 관측치에 대해서만 분석할 경우 패널 토빗 모형에서와 같이 표층수온에 대해 양의 선형적인 관계가 확인된다. 그러나 인위적으로 0인 관측치를 배제함에 따라 출현율에 대한 표층수온의 기울기가 과소평가될 가능성이 있다.

3) 그럼에도 불구하고 모니터링 기간에 한정하지 않고 전 기간에 대해 분석하는 것은 모니터링 기간이 아닌 시기의 잠재된 해파리 출현율에 미치는 설명변수의 영향을 고려하기 위함이다.

<Table 4> Regression analysis results for Other Jellyfish

Variables	Linear Panel Model		Linear Panel Model(y>0)		Panel Tobit Model	
	Coef.	Std. Error	Coef.	Std. Error	Coef.	Std. Error
Sea Temperature	-0.673	0.118***	1.754	1.020*	2.925	1.271**
Sea Temperature(squared)	0.025	0.004***	-0.030	0.026	-0.049	0.042
Wind Speed Ratings	-0.357	0.131***	-0.535	0.453	-1.291	1.629
Rainy Days	1.355	1.228	6.343	3.921	8.105	2.191***
Year 2011	-1.175	0.518**	0.592	1.543	-4.201	5.854
Year 2012	-0.047	0.515	1.908	1.394	0.769	6.356
Year 2013	0.668	0.516	4.589	1.386***	3.330	4.481
Year 2014	-0.270	0.519	1.923	1.482	-1.059	4.543
Year 2015	1.296	0.550**	6.981	1.518***	5.989	3.686
Monitoring Period	-5.117	0.454***			-59.008	2.457***
N	1777		387		1777	
Censored N(y=0)					1390	

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

<Table 3>은 보름달물해파리의 출현율에 대한 모형 추정 결과이다. 노무라입깃해파리와 마찬가지로 표층수온에 대해서는 양의 값이지만 표층수온 제곱에 대해서는 계수가 유의하지 않아 표층수온과 양의 방향으로 선형적인 관계가 있는 것으로 나타났다. 풍속등급이 높을수록 출현율이 유의하게 낮아져 보름달물해파리가 강풍이 불 때 관측되기 어려운 것으로 해석된다. 이는 강풍 시기에 모니터링 자체가 어려운 측면이 작용하고 있는 것으로 볼 수 있다. 연도별 더미는 모두 유의하지 않아 2010년과 대비하여 개별 시점의 특성은 없는 것으로 추정된다. 한편 선형 패널 모형의 추정 결과는 표층수온에 대해 체증하는 결과가 얻어졌고, 0이 아닌 관측치만을 분석하면 표층수온에 대해 유의한 계수가 도출되지 않았다.

<Table 4>는 기타해파리에 대한 추정 결과로 패널 토빗 모형에서는 출현율과 표층수온이 양의 선형적인 관계가 있음이 확인된다. 이는 노무라입깃해파리, 보름달물해파리와 같은 결과이다. 풍속등급은 유의하지 않았으나 우천일수에 대해서는 양의 방향으로 유의하여 예상과 달리 비가 오는 날 더 많이 관측되는 특징을 보이고 있다.4)

4) 이러한 결과가 기타해파리의 특성에 따른 것인지는 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

보름달물해파리와 마찬가지로 개별 시점의 특성은 없는 것으로 파악된다. 선형 패널 모형의 추정 결과는 노무라입깃해파리, 보름달물해파리와 같이 표층수온에 대해 출현율이 체증하는 것으로 나타났다.

해파리의 종류별로 표층수온에 대한 관계를 살펴보면 패널 토빗 모형에서 모두 양의 방향으로 선형적인 관계를 보이고 있으나 계수 값은 보름달물해파리가 가장 크고 노무라입깃해파리가 그 다음이며 기타해파리가 가장 낮았다. 이는 해파리 출현 시 보름달물해파리가 수온 상승에 가장 민감하게 반응하여 확산하고 노무라입깃해파리가 그 다음이며, 기타해파리가 상대적으로 덜 민감하게 반응하여 확산하는 것으로 풀이할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

해파리는 2000년대 이후 발생 빈도가 증가하면서 해수욕객, 수산업 등에 많은 피해를 일으키고 있다. 해파리의 대량 발생은 연안역 오염, 인공구조물의 증가 등과 함께 기후변화에 따른 수온 상승과 밀접한 것으로 추정되는데, 여러 요인이 복합적으로 작용함에 따라 기후변화와의 인과성을 규명하는 데 어려움이 있다.

이에 본고는 그동안 축적된 해파리 모니터링 자료와 연안정지관측 자료를 이용하여 다른 요인의 영향을 통제할 수 있는 계량경제학적인 방법으로 해파리 출현과 표층수온 간의 관계를 실증적으로 분석하였다. 지역의 고유한 특성을 통제하기 위해 고정효과 패널 모형을 이용하였고 0의 관측치가 많다는 점을 고려하여 패널 토빗 모형을 적용하였다. 설명변수로는 수온뿐만 아니라 해파리 관측에 영향을 주는 기상 요인, 연도별 특이성을 반영하는 더미변수를 포함하였다.

분석 결과, 노무라입깃해파리, 보름달물해파리, 기타해파리 모두 표층수온에 대해 양의 선형적인 관계가 확인되었다. 이는 다른 요인이 동일하다고 가정할 경우 기후변화에 따라 표층수온이 상승하면 해파리 출현이 증가한다는 의미로 해석할 수 있다. 표층수온에 대한 반응 정도는 보름달물해파리, 노무라입깃해파리, 기타해파리의 순으로 나타났는데, 이를 통해서 볼 때 수온 상승에 대한 해파리 종류별 확산 정도를 고려한 대응책 마련이 필요한 것으로 사료된다.

본고의 분석 결과에 기초할 때 수산분야의 기후변화 취약성 평가 시 해파리를 기후노출의 대리 지표로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 자료의 제약으로 분석 대상이 6개 광역시·도로 한정된다는 점은 본고의 한계이다. 이에 대해서는 국립수산과학원의 실시간 어장정보 자료, 기상청의 기상관측 자료 등을 활용하면 이러한 점을 보완할 수 있을 것으로 여겨진다.⁵⁾ 그렇지만 근본적으로는 육안 조사에 의존하여 특정 기간에만 가동되는 현재의 모니터링체제를 영국과 같이 인공위성을 활용한 모니터링으로 보완하여 분석 자료의 정밀도를 제고할 필요가 있다(Nickell et al. 2010). 그리고 장기적으로 정밀한 자료가 구축되어 기후변화에 의한 추세적인 부분과 Condon

et al(2013)이 제기하는 해양의 주기적인 부분의 효과를 가려낸다면 향후 해파리 발생의 예측과 대응에 큰 도움이 될 것이다.

References

- Cameron, A. C. and P. K. Trivedi(2005). *Microeconometrics: Methods and Applications*, Cambridge University Press.
- Condon, R. H.(2013). Recurrent jellyfish blooms are a consequence of global oscillations, *PNAS* 110(3), 1000~1005.
- Honore, B. E.(1992). Trimmed Lad and Least Squares Estimation of Truncated and Censored Regression Models with Fixed Effects, *Econometrica* 60(3), 533~565.
- Lee, Beo-Dul et al.(2011). Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Regional Fisheries of Korea, *The Journal of Fisheries Business Administration* 42(1), 57~70.
- MLTM(2009). Hazardous marine life jellyfish damage prevention research projects.
- MLTM(2012). Hazardous marine life jellyfish damage prevention research projects.
- NFRDI(2013). Study on the causes of and countermeasure against jellyfish bloom.
- Nickell, T. et al.(2010). Developing the capacity to monitor the spatial and temporal distributions of jellyfish in western Scottish waters, *The Crown Estate on behalf of the Marine Estate*.
- Tobin, J.(1958). Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables, *Econometrica* 26(1), 24~36.

-
- Received : 14 October, 2015
 - Revised : 09 November, 2015
 - Accepted : 20 November, 2015

5) 실시간 어장정보 자료를 활용하면 지역을 확대할 수 있으나 다른 기상 정보가 없다는 단점이 있다. 따라서 기상관측 자료까지 활용한다면 개선된 분석이 가능할 것으로 판단된다.