

## 일본 후쿠시마 근해에서 방출된 오염물질에 미치는 태풍의 영향

홍철훈\* · 김진표

부경대학교 해양생산시스템관리학부

### Effect of Typhoons on Contaminants Released from the Southern Sea around Fukushima of Japan

Chul-Hoon Hong\* and Jinpyo Kim

Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

We examined the diffusion of contaminants released from the southern coast around Fukushima, Japan, during the passage of typhoons using a three-dimensional numerical model (POM) to track diffusing radioactivity (RA) released from the nuclear power plant at Fukushima following the accident caused by the giant tsunami event in March 2011. Radioactive contaminants released during the passage of typhoons may have significantly affected not only Japanese but also Korean coastal waters. The model domain covered most of the northwestern Pacific including marginal seas such as the East/Japan Sea and the Yellow Sea. Several numerical experiments were conducted case studies focusing on the westward diffusion from the southern coast of Japan of contaminants derived from the source site (Fukushima) according to various attributes of the typhoons, such as intensity, track, etc. The model produced the following results 1) significant amounts of contaminants were transported in a westward direction by easterly winds favorable for generating a coastal air stream along the southern Japanese coast, 2) the contaminants reached as far as Osaka Bay with the passage of typhoons, forced by a 5-day positive sinusoidal form with a (right-) northward track east of Fukushima, and 3) the range of contamination was significant, extending to the interior of the East/Japan Sea around the Tsugaru Strait. The model suggests that contaminants and/or radioactivity released from Fukushima with the passage of typhoons can affect Korean waters including the northeastern East/Japan Sea around the Tsugaru Strait, especially when the typhoon tracks are favorable for generating a westward coastal air stream along the southern Japanese coast.

Key words: Typhoon, POM, Fukushima, Contaminant, Coastal Jet

### 서론

주지하듯이, 2011년 3월11일, 쓰나미 내습으로 인한 일본 동남부 후쿠시마(Fukushima) 원자력 발전소에서 막대한 양으로 추정되는 방사능 물질이 방출되어 북태평양 전역에 확산되었다. 당시 한반도 해역에도 그 방사능 영향이 미칠까가 큰 이슈가 된 바 있었고, 고기압성 북태평양 해류순환을 고려하여, 한반도 주변해역의 피해는 없을 것으로 보도되었다(ChosunIlbo, 2011). 한편, Hong (2011)은 태풍통과시에는 그 영향이 한반도 부근해역에도 미칠 수 있다는 주장을 제기하였다. 즉, 저위도에서 발생한 태풍은 후쿠시마 해역 부근에 접근하는 동안 이 해역에 동풍계열의 풍계를 형성하므로 일본남부 연안을 따라 빠

른 연안제트류(Coastal Jet; 이하 제트류라 함)(Hong and Yoon, 2003; 이후 HY03이라 함)를 발생하여 이 흐름에 수반되어 방사능 물질이 큐슈서방해역 및 한국남부해역까지 전파될 수 있다는 것이었다. 물론, 후쿠시마로부터 큐슈서방까지는 매우 멀어져 있어(대략 1,000 km), 이러한 제트류(약 1 m/s)가 발생한다 하더라도 10일 이상 지속되기는 어려워 현실적으로 방사능 물질이 큐슈서방까지 직접적으로 영향을 미치기는 용이치 않을 것이다. 그러나 수개의 태풍이 일정주기로 후쿠시마 해역을 연속적으로 통과한다고 가정한다면 오염물질이 큐슈서방 및 한반도 주변해역까지 확산될 가능성을 전혀 배제하기는 어렵다고 사료된다. 더구나 동경만 부근을 상륙해 북상한 태풍 Abby가 통과할 때 (Fig. 1) 혼슈남단을 따라 강한 제트류(1-2 m/s)가 형

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2016.0234>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Korean J Fish Aquat Sci 49(2) 234-240, April 2016

Received 18 February 2016; Revised 23 February 2016; Accepted 9 March 2016

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5885-6 Fax: +82. 51. 629. 5890

E-mail address: hongch@pknu.ac.kr

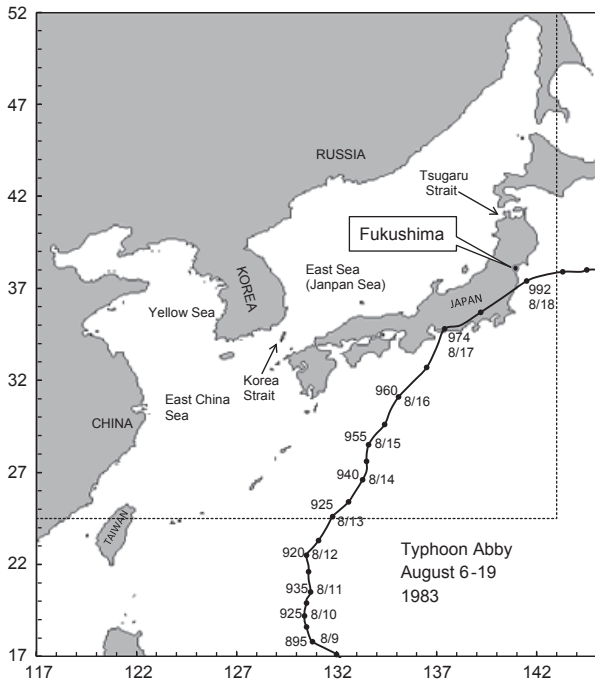


Fig. 1. Map of the western North Pacific. A track of Typhoon Abby (1983), which passed through the south of Fukushima, is depicted by thick line with its center (solid circles), central pressure (hpa), and arrival time at 09:00 every day. The model domain is given by a rectangle, and dashed lines show the open boundaries.

성되고 동시에 서향 켈빈파(Kelvin wave)에 수반된 흐름이 큐슈서방을 통과하여 대한해협을 거쳐 동해로 진입, 일본 동해 북부연안에 까지 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있고 (HY03), 동중국해에서 대한해협으로 진입한 태풍 Holly (1984)의 경우에도 유사한 결과가 보고된 바 있어(Hong and Yoon, 1992) 제트류의 영향을 충분히 조사해 볼 필요가 있다고 생각된다. 또 실제로 북서태평양에서 발생하는 태풍이 해마다 약 25개 정도 (Fig. 2)인 점을 감안하더라도 태풍의 영향을 무시하기는 어려울 것이다.

Hirose (2011)는 후쿠시마 원전사고와 관련하여, 3차원 원시방정식 수치모델을 이용, 일본 카고시마(Kagoshima) 원전에서 방류된 오염물질이 일본남부역 및 큐슈서방을 거쳐 동해 일본 북부연안에까지 확산됨을 보였다. 그의 결과는 후쿠시마 서쪽의 일본남부서방해역에서 방사능과 같은 오염물질이 연안에 배출된다면 수일 내로 한반도 주변해역을 오염시킬 수 있음을 보여주었다. 이러한 제 논란에도 불구하고 후쿠시마 방사능이 한반도 주변해역에 미치는 영향에 관한 연구는 현재까지 거의 수행된 바가 없는 것 같다.

본 연구의 목적은 3차원 원시방정식 수치모델(POM)을 이용하여, 일본 후쿠시마연안에서 오염물질(또는 방사능)이 방류되었을 때 실제로 한반도 근해에는 영향을 미칠 수 있는가를 조사

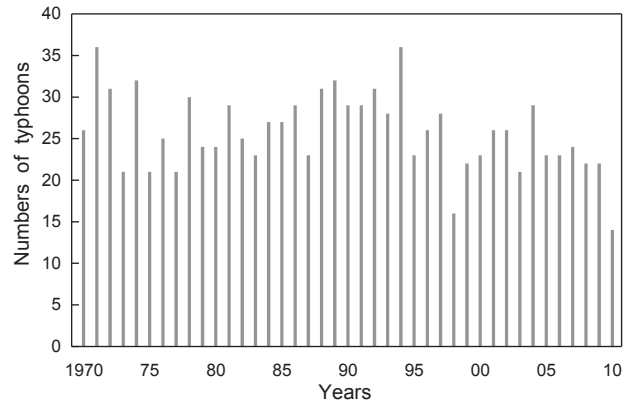


Fig. 2. Numbers of typhoons in the west North Pacific during 1970-2010.

하는 것이다. 비록 본연구가 이에 관한 국내의 실측자료 및 검증 자료가 거의 공개되지 않아 실험상 난점이 커 제한적 조사결과가 될 수밖에 없다 하더라도 향후 이에 관한 연구에 기초자료를 제공할 것으로 사료된다.

## 재료 및 방법

### 수치모델

본 연구에서는 3차원 원시방정식 모델(Blumberg and Mellor, 1987) (the Princeton Ocean Model; POM)을 이용하며, 북서태평양에서 태풍Holly 통과시 해수반응을 조사한 HY03과 기본적으로 같다. 다만, 본 연구목적에 맞게, 연구해역, 모델태풍, 연직 레벨 수 등을 수정하여 사용하였고, 특히 모델에 오염물질 순환계산부분이 추가되었다. 모델의 주요 부분만 간략히 정리하면, 연직 레벨 수는 26개의 시그마 층으로서, x, y 방향 격자간격은 각각 20 km (약 1/5°)이다. 초기조건에서, 연직수온은 표면수온(28℃)로부터 지수함수적으로 감소하고, 염분은 편의상 34.5 psu로 일정하게 하였다. 오염물질(방사능)의 초기조건(Fig. 3)은 외력(쓰나미)에 의해 이미 후쿠시마 근해 및 외해역에 충분히 오염물질이 방류된 상태로 가정하였으며, 특히 동해의 쓰가루해협(Tsugaru Strait) 부근은 이 해협을 통해 유입된 소량의 오염물질이 확산되어 있을 것으로 가정하였다. 그 분포는 모델상 후쿠시마의 연안경계 배출구를 기점으로 하여 외해 쪽으로 지수함적 분포로 주어졌다. 경계에서의 오염물질은 계산초기부터 종료시까지 초당 일정량(200 Sv x 10<sup>6</sup>)이 배출되도록 설정하였으며, 그 값은 편의상 임의적으로 설정하였다. 이에 관하여는 뒤에 다시 논의할 것이다.

남쪽 및 동쪽 개방경계에서, 내부 법선속도는 Sommerfeld 방사조건, 수위는 외부개방경계조건, 수온, 염분 및 오염물질은 slippery 조건에 의해 결정된다. 모델해역은 후쿠시마 근해역은

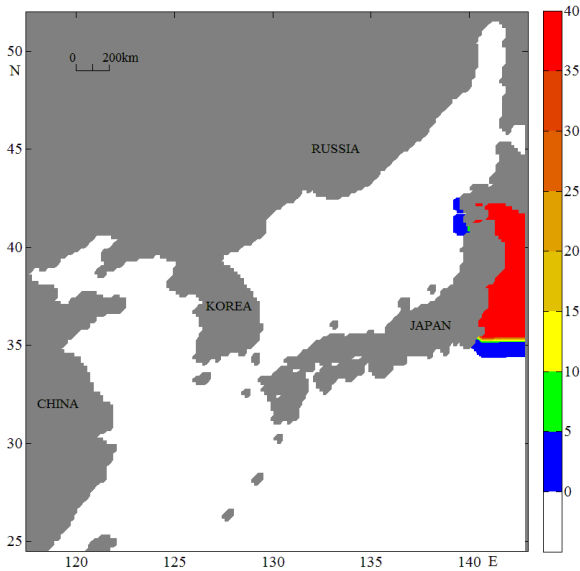


Fig. 3. Initial distribution of contaminant (radioactivity). Unit is in  $Sv \times 10^{-6}$ .

물론 한반도 주변해역 및 북서태평양 대부분을 차지한다(Fig. 1). 한편, 모델의 단순화를 위해 해면을 통한 열 교환이나 조석 등은 무시하였으며, 또 쿠로시오, 오야시오 및 대마난류와 같은 기본류 등도 고려하지 않았다. 이에 관하여는 뒤에 논의할 것이다(POM 모델구성에 대한 보다 상세한 것은 Mellor (2004)를 참고할 것). 태풍모사에 사용된 기압과 바람은 전통적으로 흔히 사용되어 온 식으로서, 기압은 Fujita (1952) 식, 바람은 Miyazaki et al. (1961)의 식을 적용하였다(보다 상세한 설명은 HY03참조).

## 결 과

Fig. 4는 태풍 Abby 통과시(Fig. 1) 오염물질의 시공간변화를 보여준다. 태풍이 저위도에 위치할 시(Fig. 4a)는 후쿠시마에서 약한 남동풍(Fig. 5; 약 1 m/s)의 영향으로 오염물질의 서방이동은 발생하지 않는다. 태풍이 일본 본토에 접근하고(Fig. 4b) 근접하면서(Fig. 4c) 서방확산 징후가 확인되나 상륙하여 후쿠시마 부근해역에서 사라진 뒤에도(Fig. 4d) 유의할 정도의 오염물질의 서방이동은 거의 발생하지 않았다.

후쿠시마의 바람시계열(Fig. 5a)에서 볼 때, 태풍이 접근하는 동안 약 1 m/s 정도의 동풍계열의 풍계를 보였으나 동기간 흐름(Fig. 5b)은 약 1-3 cm/s로 미미하여 오염물질의 서방확산을 유도할 정도의 강한 Jet를 형성하지 못했다. 다만, 태풍통과시기를 전후하여 약 1 m/s 정도의 동향류 또는 남향류를 보였다. 한편, 동해 쓰가루 해협 부근해역은 현저하지는 않으나 동해 내부역으로 보다 확산되는 경향을 보였다(Fig. 4d). 이는 해협부근의

바람 및 흐름에서 알 수 있듯이(Fig. 6), 태풍 통과 전후의 강한 동풍(또는 북동풍)계열 풍계의 영향(Fig. 6a)으로 동해쪽으로 유입되는 수송량이 증가(Fig. 6b)한 결과로 해석된다.

Fig. 7은 후쿠시마 동쪽 외해를 통해 3개의 슈퍼급 태풍이 저위도로부터 정북으로 통과한 것으로 가정했을 때의 오염물질의 시공간변동을 보여준다. 바람은 동기간 동안 정상적 북서풍이고 그 세기는 편의상 양의 sinusoidal 형태(5일 동안)로 주어졌으며 풍력 최대치는 2.5일 경과시  $14 \text{ dyne/cm}^2$  (최대풍속 약 80 m/s에 상당)로 되도록 하였다. 본 실험은 오염물질의 서방이동에 동풍계열의 영향이 주효함과 태풍의 지속적 통과시의 상황을 동시에 고려한 것이다. 1개의 태풍 통과시(Fig. 7a-7b) 이미 동경만 이서해역까지 오염물질이 확산되었고, 3개의 태풍이 모두 통과했을 때(Fig. 7c)는 오염물질이 오사카 만까지 확산되었음을 보여준다. 후쿠시마 근해역에서의 흐름 시계열(Fig. 8a)에서도 알 수 있듯이, 이러한 조건의 태풍통과시는 주기적, 지속적 서향류가 발전 소멸하면서 오염물질의 서방확산을 도모하고 있음을 알 수 있다. 한편, 쓰가루해협을 통해 동해 내부로의 확산은 더욱 현저하여 발전하였고(Fig. 7), 흐름 시계열에서도 알 수 있듯이(Fig. 8b), 동해내부로 유입되는 서향류의 발달로 이러한 확산이 유도되고 있음을 보여 주었다.

이상의 2개의 실험결과에서도 알 수 있듯이, 일본 후쿠시마 연안에서 배출된 오염(방사능)물질은 태풍통과시 동풍(또는 북동풍)계열의 서향 제트류의 영향으로 일본 남부연안을 따라 큐슈 서방 해역으로 확산될 개연성이 충분히 있음을 알 수 있었다. 본 실험결과는 오염물질의 발생위치 및 태풍경로, 세기 등에 따라 그 시공간적 정도가 변동될 수 있음을 시사한다.

Fig. 9는 3개의 태풍이 모두 통과하고 30일(실험최종시간) 경과 후 오염물질의 확산을 보여준다. 비록 동풍계열의 외력이 사라져 서방확산은 미미하나 외해로의 확산이 크게 늘어났음을 보여준다. 북서태평양의 경우는 쿠로시오 등이 한반도 주변역으로의 오염물질 확산을 일정부분 억제할 것으로 보이거나 동해의 경우는 대마난류와의 상관성을 고려할 때 매우 복잡한 분포로 변동할 것으로 사료된다.

## 고 찰

3차원 원시방정식 모델(POM)을 이용하여 실제 태풍(Abby, 1983)과 가상적 태풍 통과시의 각 경우에 대해 일본 후쿠시마에서 발생한 오염물질(방사능)의 시공간 분포변동을 조사하였다. 그 결과, 1) 후쿠시마에서 방류된 오염물질은 지속적인 동풍계열의 풍계시 서방확산이 발전됨을 알 수 있었고, 2) 후쿠시마 동방 외해역을 3개의 이상적 태풍이 통과한 것을 가정한 조건에서는 오사카 만까지 충분히 발전함을 보여주었으며, 3) 이들 태풍통과시 동해내 일본 북동부 쓰가루해협 부근은 오염물질이 내부역으로 현저하게 확산됨을 알 수 있었다.

Hirose (2011)에 의하면 일본 큐슈남부해역에서 방류된 오염물질이 큐슈서방을 따라 대한해협을 거쳐 동해에 빠르게 전파

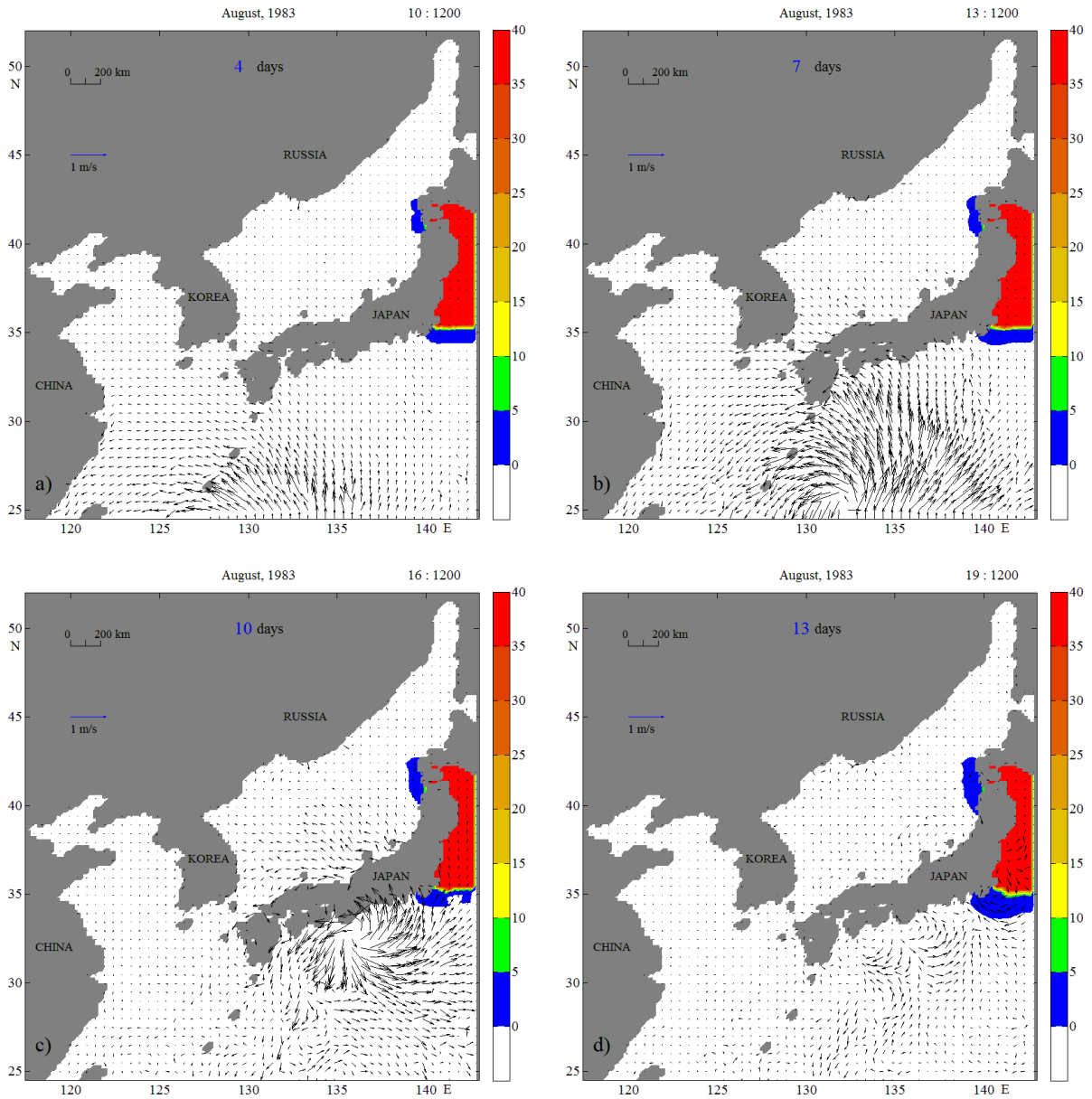


Fig. 4. Calculated velocity and contaminant distribution with the passage of Typhoon Abby at 12:00 during August 10–19, 1983 (Fig. 4a–4d). Crosses represent the center of Abby. Units of the contaminant (radioactivity) is in  $Sv \times 10^{-6}$ .

되고 있음을 알 수 있다. 그가 사용한 수치모델은 태풍은 고려되지 않았다 하더라도 자료동화에 의한 기본장 흐름(대마난류, 쿠로시오, 조석 등)은 충분히 반영되었다. 한편, Hong and Yoon (1992) 또는 HY03은 태풍의 영향만을 고려하여 제트류와 켈빈 파에 의해 동해로 유입되는 큐슈서방역 흐름을 보여주었다. 따라서 이들의 결과를 참고할 때, 기본장의 흐름을 고려하지 않더라도 태풍이 통과한다면 이 해역에서 발생한 오염물질은 빠르게 동해로 유입될 수 있음을 추측할 수 있다.

2013년 후쿠시마에서 방류된 오염물질(방사능)이 북서태평양은 물론 한반도 주변 해역에 어떤 영향을 미쳤는지에 대한 실제적인 조사결과는 거의 보고된 바 없는 것 같다. 본 연구를 근거해 볼 때, 사고 당해 년, 쿠로시오의 주된 경로 및 1회 순환소요 추정시간(약 2.5년~3년)을 고려하여 후쿠시마 방사능 물질이 한반도에는 피해가 없을 것으로 추정된 주장은 수정되어야 할 것이다.

참고로, 2011년 발생한 태풍경로(Fig. 10)와 본 연구결과를 근

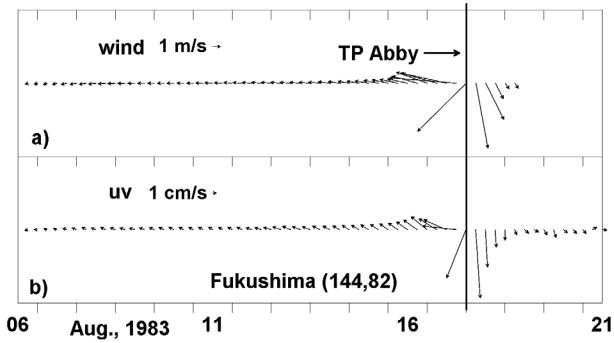


Fig. 5. Time series of a) wind and b) velocity vectors at Fukushima. Vertical thick line represents a passing time of Abby through the proximity of Fukushima.

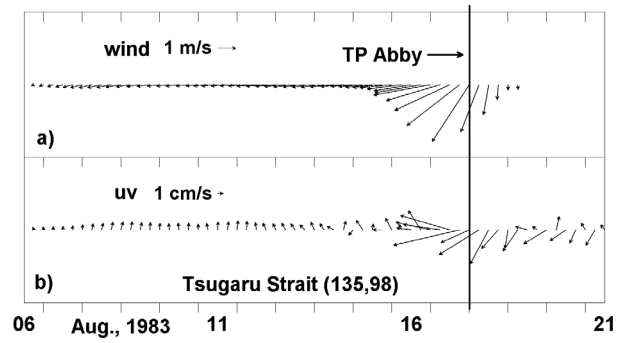


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for a station within the Tsugaru Strait.

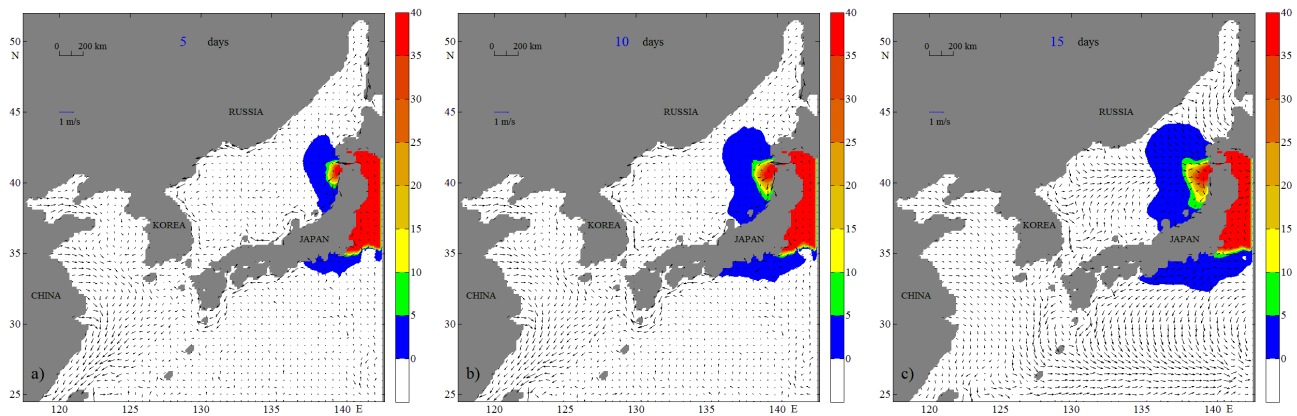


Fig. 7. Calculated velocity and contaminant distribution during 15 days (Fig. 7a-7c) with the passage of three typhoons forced by consecutive five-day-positive sinusoidal form each assumed via a right-northward track east of Fukushima. A steady northwest wind is given by the maximum wind stress (14 dyne/cm<sup>2</sup>; corresponding to 80 m/s) at 2.5 days.

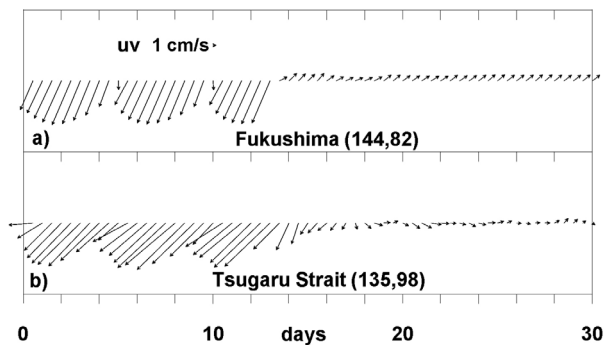


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for time series of velocity vectors at a) Fukushima and b) a position within the Tsugaru Strait.

거로 살펴볼 때, 2011년 3월 방류된 다량의 방사능은, 동해의 북동해역은 제외하더라도, 한반도 주변해역에 거의 영향을 미치지

않았을 것으로 추정된다. 즉 당해 북서태평양에서 발생한 태풍 중, 태풍 Sonca 이외에는 모두가 후쿠시마의 서방 원거리에서 북상하고 또는 북상 중 북동방향으로 이동하여 후쿠시마에서 방출된 방사능물질의 서방 확산에 거의 영향을 주지 못한 것 같다. 더구나 이 태풍마저도 후쿠시마 근해역으로 접근하다 빠르게 북동방향으로 전향하여 사실상 큐슈서방역까지 오염물질 확산에 영향을 미쳤을 것으로 보이는 태풍은 이 해에는 발생하지 않은 것으로 사료된다.

본 연구는 기존 관측자료가 사실상 확보할 수 없는 조건이므로 매우 이상적 계산조건하에서 실험을 수행하였다. 본 연구의 가상적 태풍통과시(Fig. 7)의 실험에서 바람은 편이상 조사전역에 일정하게 제공하였으므로 강풍(최대 14 dyne/cm<sup>2</sup>) 시기는 동해 북동부 오염물질 확산을 과대평가할 수도 있을 것이다. 즉, 동해와 같이 해협을 통해 제한적으로 해수교환이 이루어지는 바다에서는 대한해협부근의 과다한 제트류가 발달하게 되어

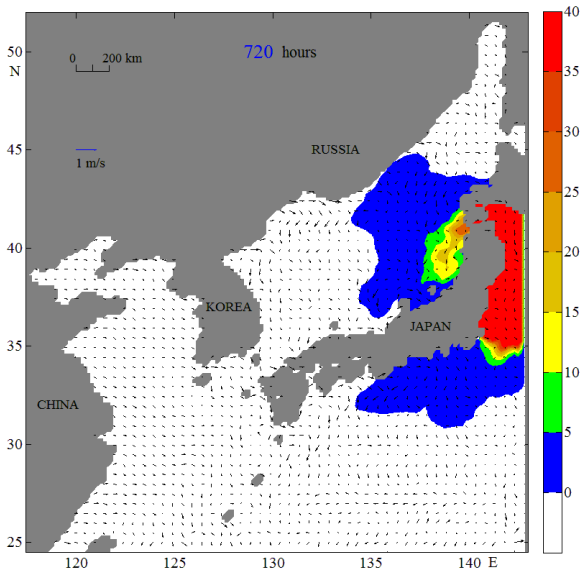


Fig. 9. Same as Fig. 7 except for the distribution of velocity and contaminant at 30 days without the wind forcing.

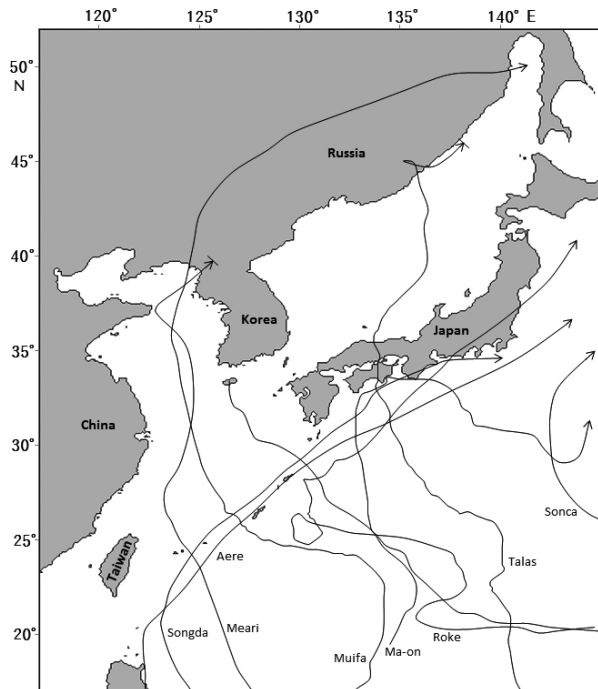


Fig. 10. Tracks of typhoons in the west North Pacific in 2011.

(예로서, Fig. 7a) 쓰가루해협을 통한 해수교환도 실제보다 증가해 그 결과 동해내 오염물질 확산이 증대되도록 영향을 줄 수 있을 것이다. 본 연구의 조사해역, 즉 오염물질의 방출역인 후쿠시마 외해역은 쿠로시오 및 오야시오의 접경지역인 Kuroshio

extension에 해당되는 해역으로서 흐름의 기본장이 매우 복잡하고 이 거대한 두 흐름의 상호작용에 따라 오염물질의 시공간적 변동도 영향을 받을 것으로 사료된다. 이러한 해역을 태풍이 통과한다면 그로 인해 발생된 제트류(또는 파동) 등도 이들 해역의 흐름 기본장에 영향을 받을 것은 당연할 것이다. 또 쿠로시오는 후쿠시마 오염물질의 서방확산을 일정부분 억제하는 효과로 작용할 것이며, 북태평양 평균풍계, 즉 하계의 남풍계열 및 동계의 북풍계열 바람도 이들 오염물질에 일정부분 영향을 미칠 수 있을 것이다. 오염물질의 경계조건설정에 관하여는 후쿠시마 원전에서의 방류물질에 대한 신뢰성 있는 정보를 얻지 못해, 각종 매체로부터 추정된 양만 확보할 수 있었으므로 본 연구에서는 2011년 당시 월스트리트저널의 보도를 참조(Asia Economy, 2011), 토쿄전력에서 발표한 200 마이크로시버트( $Sv \times 10^{-6}$ ;  $1 Sv = 1 J/kg = 1 m^2 \cdot s^{-2}$ )를 초당 연안배출 경계치로 가정하여 설정하였다.

이들 제 조건들은 본 연구에서의 오염물질 확산결과에 정량적으로 일정부분 영향을 미칠 수 있을 것이다. 정성적으로는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다. 향후 다양한 태풍경로 및 세기, 보다 정확한 오염물질의 경계치 등을 확보하고, 동시에 경압파(baroclinic waves)의 전파까지 조사한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의 학술연구비(2014)에 의해 연구되었음.

## References

Asia economy. 2011. <http://www.asiae.co.kr/news/view.htm?idxno=2011032415492062734>.

Blumberg AF and Mellor GL. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Three Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Science, vol. 4, edited by N. S. Heaps, AGU, Washington DC, U.S.A., 1-208.

ChosunIlbo. 2011. No effect of radioactivity released from Fukushima. Article (April 5), A3.

Fujita T. 1952. Pressure distribution within typhoon. Geophys Mag, 23, 437-451.

Hirose N. 2011. Sea water circulation originated around a nuclear power plant in Kyushu of Japan. Japanese Oceanography fall meeting, Abstract, p 233.

Hong CH and Yoon JH. 1992. The effect of typhoon on the coastal sea level variations in the Tsushima Straits. J Oceanography, Uminokenkyu. 1, 225-249.

Hong CH and Yoon JH. 2003. A three-dimensional numerical study of Typhoon Holly in the northern Pacific Ocean. J Geophys Res 108, 3282, 38-1-18.

- Hong CH. 2011. What is the effect of typhoon on radioactivity released from Fukushima in Japan?. ChosunIlbo, Article (April 7), A33.
- Miyazaki M, Ueno T, and Unoki S. 1961. Theoretical investigation of typhoons surges along the Japanese coast. Oceanogr Mag 13, 51-75.
- Mellor G. 2004. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Atmos. Oceanic Sci. Prog Princeton Univ, Newyoke, U.S. A. 1-39.