

GK-2A 위성자료 활용을 위한 태풍 및 장마 개념모형의 도안

문수연¹⁾ · 하경자^{1)*} · 문민철¹⁾ · 전종갑²⁾ · 문자연³⁾

¹⁾부산대학교 지구환경시스템학부, ²⁾서울대학교 지구환경과학부, ³⁾하와이대학교 국제태평양연구소

(접수일: 2015년 11월 2일, 수정일: 2016년 3월 30일, 게재확정일: 2016년 3월 30일)

Designing of Conceptual Models on Typhoon and Changma Utilizing GK-2A Satellite Data

Suyeon Moon¹⁾, Kyung-Ja Ha^{1)*}, Mincheol Moon¹⁾, Jong-Ghap Jhun²⁾, and Ja-Yeon Moon³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

²⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

³⁾International Pacific Research Center, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI, USA

(Manuscript received 2 November 2015; revised 30 March 2016; accepted 30 March 2016)

Abstract Conceptual models to analyze both typhoon and Changma using products extracted by the GEO-KOMPSAT-2A (GK-2A) are suggested in this study. The GK-2A which is scheduled to be launched in 2018 has a high resolution, 16 channels, and 52 products. This means GK-2A is expected to obtain high quality images and products, which can detect severe weather earlier than the Communications, Ocean and Meteorological Satellite (COMS). Since there are not enough conceptual models for typhoon and Changma using satellite images and products, our conceptual model can increase both the applicability of satellite data and the accuracy of analysis. In the conceptual model, typhoons are classified as three types by prevailing factors; 1) heavy-rainfall type, 2) wind type, and 3) complex type. For Changma, two types are divided by the characteristics; band type and heavy-rainfall type. Among the high resolution 52 products, each type of typhoon and Changma are selected. In addition, the numerical products and dynamic factors are considered in order to improve conceptual models.

Key words: GK-2A, satellite, Changma, typhoon, conceptual model

1. 서 론

대한민국 국민안전처에서 발표한 자연재난 특별재난 지역 선포현황(Ministry of Public Safety and Security, 2014)에 따르면 2014년 8월 25일 부산, 경남지역을 중심으로 1,342억원의 재산피해와 인명피해를 가져온 호우를 비롯하여 최근 13년(2002년~2014년) 동안 여름철 집중호우에 의한 특별재난지역 선포 횟수가 전체 특별 재난지역 선포 횟수 24건 중 11건(46%)이며, 태

풍으로 인한 재난지역 선포 횟수는 8건(33%)으로 13년 동안 호우 및 태풍으로 인해 12조 7,520억원의 재산피해와 469명의 인명피해가 발생하였다. 한반도의 강수 집중은 인간 활동에 막대한 피해를 끼치고 있으며 특히 여름에 연강수량의 반 이상이 내려서 여름철에 집중하는 형태를 보인다(Ho and Kang, 1988). 그러므로 한반도 호우 발생 요인들을 분석하여 악기상에 대한 빠른 대처가 필요한 실정이다. 한반도 호우는 전선 상에서 발달하는 요란, 북태평양 기단 연변을 따라 오는 수증기의 수송, 태풍의 직·간접 영향, 지상저기압과 상·하층 제트의 상호작용, 중규모 대류계의 발달 등 복합적인 원인으로 발생한다(Ha et al., 2003; Lee et al., 2010; Yun et al., 2012). 더불어 복잡한 산악의 지형적 요인에 의해 수시로 변화하는

*Corresponding Author: Kyung-Ja Ha, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 30 Jangjeondong, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea
Phone: +82-51-510-2177, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: kjha@pusan.ac.kr

Table 1. Comparison of efficiency between COMS and GK-2A (www.kma.go.kr).

		COMS	GK-2A	Improvement of GK-2A compared to COMS
Spatial resolution	VIS	1 km	0.5~1 km	4 times
	IR	4 km	2 km	
Frequency of observation (per 1 hour)	Global	1	4	4 times
	Regional	2	over 10	
	Korea	4 (per 15 min)	30 (per 2 min)	
The number of channel	VIS	1 (black)	4 (color)	3 times
	NIR	-	2	
	IR	4	10	
Products	Cloud/precipitation	5	19	3.5 times
	Radiance/aerosol	5	16	
	Movement of atmosphere/condition	3	6	
	Information of land cover	3	11	

대류현상 때문에 실시간 강우 예측에 어려움이 있다. 따라서 실시간 예보 정확도를 높이기 위하여 짧은 관측 주기를 갖는 고해상도 기상 위성을 통하여 관측의 정밀도를 높여 노력하고 있다(Ebert et al., 2007).

국내에서 개발된 최초의 정지궤도 위성인 천리안 (Communication Ocean Meteorological Satellite, COMS)은 통신, 해양, 기상의 세 분야를 복합적으로 담당하고 있는 위성이다. COMS의 후속 정지궤도 위성으로는 2018년에 발사 예정인 Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite 2A (GK-2A)가 있다. Table 1은 기상청에서 발표한 COMS와 GK-2A의 성능을 비교한 표이다. 2011년 4월부터 운영되고 있는 COMS는 1개의 가시 채널과 4개의 적외 채널을 보유하고 있으며 16종의 분석자료를 생산하고 있다. 그러나 채널 수와 산출되는 위성 변수의 부족으로 COMS 자료로 악기상을 충분히 모의하는 데에는 한계가 있다. 이에 반해 새로운 정지궤도 위성 GK-2A는 COMS 채널의 3배에 달하는 16개의 채널을 보유하고 있으며 총 52종의 산출물을 생산하므로 미래에는 GK-2A 산출물을 적극 활용할 필요가 있다(Table 1). 본 연구에서는 GK-2A 산출물의 활용 방법으로 개념모형을 제시하고자 한다. Yang et al. (2005)은 개념모형을 기본 개념과 발생원인에 기반한 모형이라고 정의하였으며, European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)가 지원하는 교육 프로그램인 EUMETRAIN (<http://www.eumetrain.org/satmanu/index.html>)에서는 기상현상의 주요 특징을 설명하고 발생하는 주요 프로세스를 식별하는 것으로 개념모형을 정의하였다.

“구글 신은 모든 것을 알고 있다”(Jeong et al., 2013)에서 빅 데이터를 얼마나 잘 사용하느냐에 따라 정보

활용도가 다양해질 수 있음을 지적하였다. 구글 트렌드는 사람들이 구글 웹에서 검색한 검색어의 빈도 수와 뉴스 기사 등을 통해 검색어에 대한 관심도 및 인기도를 그래프화하여 보여주고 있다. 실제로 구글 트렌드(Google Trends, <https://www.google.com/trends/>) 웹을 이용한 검색어에 근거하여 미국의 질병통제예방센터보다 정확하고 빠르게 독감 환자 수를 예측한 사례가 있다(Ginsberg et al., 2009). Figure 1은 최근 4년간(2011년~2014년) 구글 트렌드에서 제공하는 빅 데이터를 이용하여 우리나라 국민들의 기상 자료에 대한 수요를 상대적으로 나타낸 그래프이다. 예를 들어 한반도에서 특정 기간 동안 수행한 검색 중 20%가 ‘장마’에 대한 검색이며 이 수치가 최대값일 경우, 구글 트렌드에서는 이를 100으로 나타내었다. 따라서 이 수치는 절대적인 검색 량을 반영한 것은 아니다. 호우와 장마, 그리고 태풍을 시간 흐름에 따른 관심도의 4년 평균한 결과, 호우와 장마만을 비교한 Fig. 1a에서는 호우에 비해 장마가 여름철 피크를 갖고 높은 관심도를 보였다. 그러나 Fig. 1b에서 호우에 비해 관심도가 높았던 장마가 태풍과 비교하였을 경우에 태풍이 월등히 높은 관심도를 보였다. 그래프의 피크가 나타나는 시기를 통하여 장마는 연도 별 장마기간을 전후로 하여 관심도가 높음을 알 수 있다. ‘장마시작 일’, ‘장마기간’이 장마에 대한 주 검색어였으며, 타 검색어에 비하여 월등히 높은 관심도를 갖는 태풍은 ‘태풍진로’와 ‘태풍정보’ 및 ‘태풍피해’에 대한 수요자들의 관심이 우세하게 나타났다. 즉, 수요자는 기상 현상들 중에서도 태풍, 장마, 집중 호우 순으로 그에 대한 정보를 요구하고 있음을 알 수 있다.

Lee et al. (2010)은 위성 영상과 위성 자료를 활용하여 사례를 위주로 한반도 호우에 대한 개념모형을

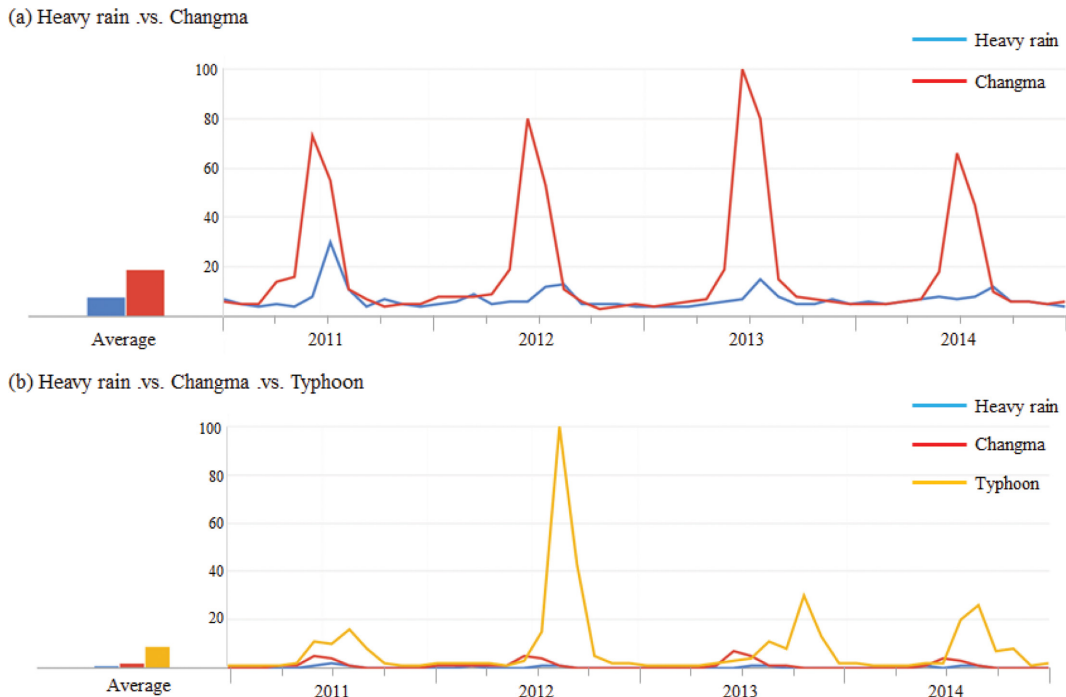


Fig. 1. Time series of public interest in heavy rain (blue) and Changma (red) (a) without and (b) with typhoon (yellow) obtained from Google trends during the period of January 2011 to December 2014 (Google Trends). The vertical axis shows a relative interest rate of each factor according to other factors.

개발하였으나 개념모형에 대한 후속 연구는 활발히 이루어지지 않았다. 따라서 새롭게 산출되는 GK-2A 위성 변수와 현재 사용하고 있는 모델의 역학 변수 및 레이다 변수를 고려하여 한반도 여름철에 막대한 피해를 입히며 국민들의 수요가 가장 높은 태풍과 장마의 한국형 개념모형 도안을 제시하고자 한다. 여기서 한국형이란 한국의 기상학적·지형적 요인 등을 고려하여 태풍과 장마 분석에 최적화된 개념모형을 의미한다. 각 목적에 따른 위성 산출 변수들의 분류는 Geostationary Operational Environmental Satellite R-Series (GOES-R)에서 제공하는 정보를 바탕으로 분류하였다(<http://www.goes-r.gov>). 2장에서는 국내 위성 자료 활용 현황에 대해 설명하고, 3장과 4장에서는 태풍과 장마의 주 발생 메커니즘을 설명하고 GK-2A에서 산출되는 기상 변수들을 이용한 새로운 개념모형 도안을 제시한다. 그리고 5장에서는 주요 결과를 요약한다.

2. 국내 위성 자료 활용 현황

지리적·지형학적으로 복잡한 특성을 갖는 우리나라는 국지성 집중호우·태풍·폭설 등의 위험기상현상이 빈번하게 나타나는데, 이를 예측하고 분석하기

위해 고해상도의 관측자료가 요구된다(Choi et al., 2013). 특히 태풍은 이동속도가 빨라 수치모델만으로 태풍의 경로 및 풍속을 예상하는 데에 한계를 가지고 있으며, 대부분 해양에서 발생하고 성장하며 이동하기 때문에 항공관측이 없는 한 실시간으로 태풍의 정보를 얻을 수 있는 방법은 위성을 통한 원격관측이 유일한 방법이다. 기상청 보도자료에 따르면 가시영상과 적외영상의 해상도가 각각 1 km, 4 km이었던 COMS보다 공간 해상도가 약 4배 향상되어 0.5~1 km의 가시영상과 2 km의 적외영상 해상도를 갖고, 시간당 관측 횟수가 약 4배 증가한 GK-2A는 중소규모의 대류 활동 탐지뿐만 아니라 태풍의 위치 분석 향상으로 약 기상 감시를 강화시킬 수 있을 것으로 전망된다(Table 1).

장마의 경우, 현재 COMS가 제공하는 고해상도 공간 분해능의 운상, 운정고도 및 대류운 정보를 이용하면 장마전선을 따라 생성되는 중규모 대류복합체의 구조분석이 가능하다. 아울러 수증기 영상을 활용한 건조역 분석도 할 수 있으며 장마전선 내의 가강수량(Total Precipitable Water, TPW)과 강우강도(Rainfall Rate, RR)를 통한 호우역 구분이 가능하다. 그러나 수증기의 국지적 수렴으로 인한 강우강도 및 강우역을 분석하는 데에는 어려움이 있기 때문에, 강우강도는

Table 2. Products extracted by GK-2A and those abbreviations. The mark ‘*’ denotes products extracted from COMS.

Product	Abbreviation	Product	Abbreviation
Cloud Mask*	CLD	Rainfall Potential	RP
Fog*	FOG	Aerosol Detection Product*	ADP
Sea Surface Temperature*	SST	Dust Aerosol Detection Product	DADP
Land Surface Temperature*	LST	Volcanic Ash Product	VAP
Snow Cover*	SC	Aerosol Optical Depth*	AOD
Sea Ice*	SI	Dust Aerosol Optical Depth	DAOD
Forest Fire	FF	Radiation	RAD
Vegetation Index	VI	Angstrom Exponent Product	AEP
Fractional Vegetation Cover	FVC	Visibility	VIS
Land Surface Emissivity	LSE	Reflected Shortwave Radiation (TOA)	RSR
Surface Albedo	SAL	Downward Shortwave Radiation (surface)*	DSR
Snow Depth	SD	Absorbed Shortwave Radiation (surface)	ASR
Ocean Current	OC	Downward Longwave Radiation (surface)	DLR
Cloud Top Temperature*	CTT	Upward Longwave Radiation (surface)	ULR
Cloud Top Pressure	CTP	Outgoing Longwave Radiation (TOA)*	OLR
Cloud Top Height*	CTH	Convective Initiation	CI
Cloud Phase	CP	Total column Ozone	TOZ
Rainfall Rate	RR	Atmospheric Motion Vector*	AMV
Cloud Type	CT	Vertical Temperature Profile	VTP
Cloud Amount	CA	Vertical Humidity Profile	VHP
Cloud Optical Thickness	COT	Atmospheric Instability Indices	AII
Cloud Effective Radius	CER	Icing	Icing
Liquid Water Path	LWP	Overshooting Top	OT
Ice Water Path	IWP	SO2 Detection	SO2D
Cloud Type*	CT	Total Precipitable Water*	TPW
Probability of Rainfall	PoR	Tropopause Folding Turbulence Detection	TFTD

과소평가되고 강우역은 과대하게 모의되는 경향이 있으므로 이를 극복할 필요가 있다. 또한 국내 위성 영상에 대한 객관적 분석 기술의 경우, 위성자료와 수치모델 및 역학 자료 등을 종합적으로 활용한 위험기상 분석이 이루어지지 않고 있으므로 예보관 혹은 현업 담당자가 활용할 수 있는 가이드스가 제시될 필요성이 대두되고 있다.

현재 운행되고 있는 COMS는 5개의 채널(가시1, 적외4)을 이용하여 총 16종의 변수를 산출하는 반면, GK-2A는 채널 수가 3배 증가한 16개의 채널(가시4, 근적외2, 적외10)을 이용하여 고해상도를 갖는 총 52종의 변수를 산출한다(Table 1과 Table 2). Table 2는 GK-2A의 산출물을 정리하여 나타낸 표이며, 첨자 ‘*’는 현재 사용중인 COMS에서 산출되는 변수들을 표시한 것이다. GK-2A를 통하여 기존에 산출된 변수들이 보다 고해상도로 산출됨에 따라 고해상도의 수치모델에 외삽이 가능하며, 초단기 예보과정에서 소규모 대류운의 발달을 모의할 수 있게 된다. 특히, 구름/강수 관련 산출물이 5종에서 19종으로 늘어남에 따라 공기의 상승운동을 나타내는 변수와 안정도 지수가 추가되었다(Table 2). 그러나 모든 변수들을 고려하여

예보할 경우, 처리과정에서 많은 시간이 소요되며 오히려 큰 오차가 생길 위험성이 있으므로 최소한의 변수를 선정한 효율적인 분석이 요구된다.

기상 위성으로 단시간 고해상도의 관측이 가능하지만, 위성의 가시자료와 적외자료를 사용하여 강수량을 추정하는 방법에는 고유한 한계가 있음이 지적되었다(Gruber, 1973; Atlas and Thiele, 1982; Lee et al., 1994). 특히 강수의 경우에 기상 위성이 적도 해양 강수를 잘 모의하는 반면, 중위도와 고위도 강수는 수치 모델이 잘 모의하며(Arpe, 1991), Grassotti and Garand (1994)는 일본의 여름철 강수를 연구한 결과, 위성이 6월은 잘 모의하지만 7월과 8월은 과대 모의하는 경향이 있음을 보였다. 따라서 위성 변수와 더불어 기존에 사용하고 있는 수치역학 변수를 추가로 선정한다면 더 높은 정확성을 기대할 수 있을 것이다(Xie and Arkin, 1997).

3. 태 풍

3.1 태풍의 발생 및 발달 메커니즘

최근 10년간 한국과 일본에 상륙한 강한 태풍의 경

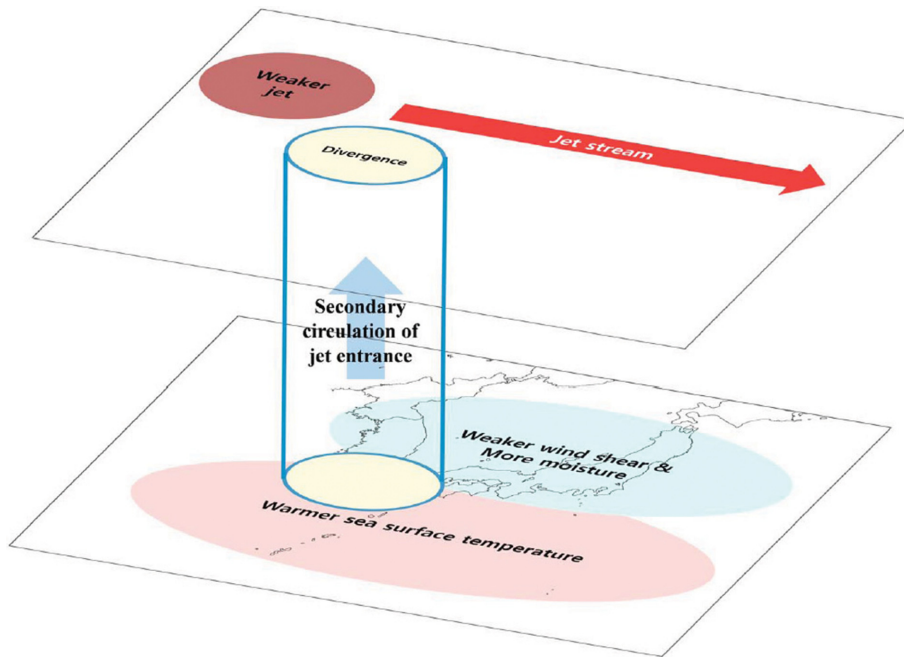


Fig. 2. Conceptual model of typhoon activity over the western North Pacific (Park et al., 2011).

우, 그 특징을 한반도에서 약한 바람의 연직 시어와 많은 수증기의 유입, 상층 제트류의 약화와 그에 따른 2차 순환, 그리고 한반도와 일본 이남 해양에서의 따뜻한 해수면 온도분포 등으로 요약된다(Park et al., 2011). Park et al. (2011)은 최근 십 년 동안 태풍이 강화되는 요인을 도식화하여 Fig. 2로 나타내었다.

본 연구에서는 태풍 발생과 발달의 주 요인으로 수증기 형성, 대칭성, 열원으로 정의하였다(Yun et al., 2012; Choi et al., 2013). 태풍의 강도에 있어서 태풍의 열 공급의 지속성 여부와 대칭성 여부가 중요하게 작용한다(Choi et al., 2013). 경험적으로 수증기영상 분석을 해보면 건조역이 태풍의 진로에 영향을 주며 태풍이 중위도에서 온대 저기압화되는 과정에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 태풍 영역으로의 건조역 침투 여부가 태풍 발달 여부에 중요하며, 연직 바람 시어가 발달하면 연직적으로 기울어진 구조를 가지면서 대칭성이 깨짐에 따라 태풍이 급속도로 약화된다. 태풍의 진로는 Fig. 2에서 보이듯이 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST)의 분포와 500 hPa 지위고도 등의 영향을 받으므로(Yun et al., 2012), 정확한 진로 예측을 위해서는 주변 배경장에 대한 높은 정확도를 갖는 자료가 요구된다. 특히 구름의 이동을 벡터 형태로 산출하는 대기운동벡터(Atmospheric Motion Vector, AMV)의 경우 표적 간 유사성을 기반으로 산출되는 위성 변수이다. 연속된 위성영상들에서 영상

간 상관도가 높은 영역을 찾고 그 변위를 계산하는 과정으로 산출되는 AMV는 추적에 이용되는 표적의 크기, 중심위치 및 표적 간 간격이 주요 변수이다(Kim et al., 2012). 좁은 영역을 짧은 시간 간격으로 관측하는 고속 스캔 모드의 5~10분 간격 영상을 이용하여 AMV를 산출하는 알고리즘이 개발되었으며(Carranza et al., 2010), 고분해능의 AMV가 아닐 때에는 오히려 큰 오차를 갖게 되므로 고분해능의 AMV 산출을 위하여 짧은 시간 간격의 영상과 작은 표적의 필요성이 꾸준히 제기되고 있다(Forsythe and Saunders, 2008).

Figure 3은 태풍의 개념모형에 필요한 기상 위성, 레이더 및 수치역학 자료로부터 산출 가능한 변수들을 관측 간격과 공간 해상도에 따라 구분한 그래프이다. 연두색, 붉은색, 주황색은 각각 유효 수분, 대칭성, 열원에 고려되는 변수들을 구분한 것이고, 원의 크기는 각 메커니즘과 변수 사이의 상관관계를 상대적으로 나타낸 것인데 크기가 클수록 해당하는 메커니즘을 고려함에 있어서 더 중요하게 사용되는 변수임을 의미한다.

3.2 태풍 개념모형

태풍은 태풍의 바람과 강우량을 고려하여 (a)바람형, (b)호우형, (c)복합형의 3가지 유형으로 구분하였다. 바람형은 강풍에 의한 피해가 주를 이루는 태풍의 경우를 말하며, 폭우에 의한 피해가 주를 이룰 경우는 호

※ Predictor group of typhoon : f (Available moisture, Symmetry, Heat source)

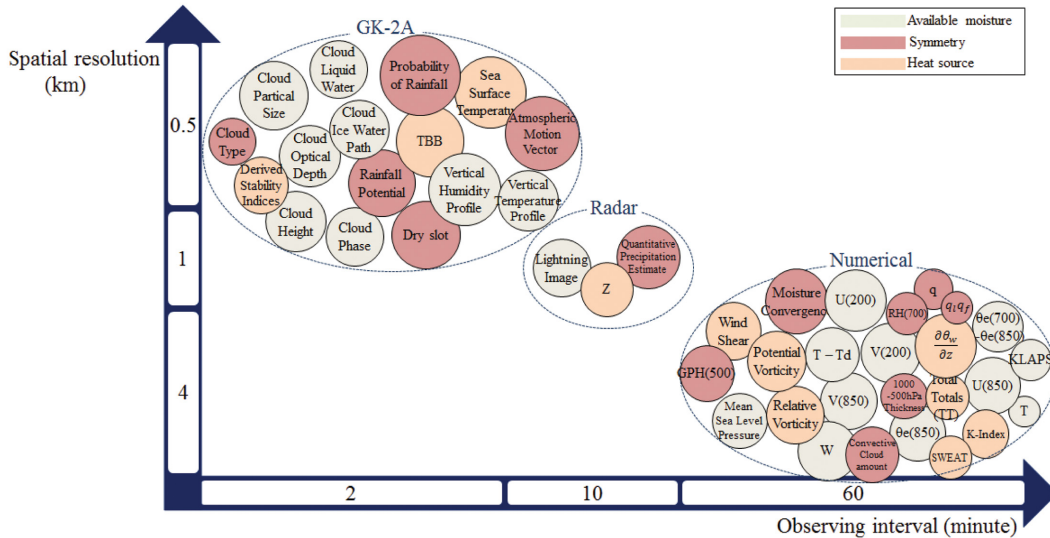


Fig. 3. Scatter plot of products obtained from GK-2A, radar, and numerical model between spatial resolution (km) and observing time interval (minute) for typhoon. Green, red, and orange colors indicate available moisture, symmetry, and heat source, respectively. Circle size represents the relative importance related to the predictor group.

Table 3. Key factors classifying typhoon into three types in Fig. 4. The mark ‘*’ denotes factors extracted from the satellite.

Wind type	Heavy-rainfall type	Complex type
Atmospheric Motion Vector (AMV)*	Rainfall Rate (RR)*	Cloud Top Pressure (CTP)*
Radius of Maximum Wind (RMW)*	Total Precipitation Water (TPW)*	Dry slot*
Maximum Instantaneous Wind (MIW)*	Rainfall Potential (RP)*	SST gradient*
Vorticity	Vertical Humidity Profile (VHP)*	SST distribution*
Helicity	SST gradient*	Previous tropical cyclone track*
	CAPE*	Vertical wind shear
	K-index*	Ocean heat content*
	Moisture transport	

우형으로 구분하였다. 복합형은 바람형과 호우형의 복합적인 형태로서 바람에 의한 피해뿐만 아니라 강수에 의한 피해 또한 한반도에 많은 영향을 주는 태풍 유형을 말한다. 현재 기상청에서 태풍을 예보할 때 사용하는 경계구역(Warning Zone, [25°N, 135°E]의 북서구역)과 비상구역(Emergency Zone, [28°N, 132°E]의 북서구역)을 개념모형에서 고려해야 할 태풍이 한반도에 영향을 미치는 영역으로 설정하였다. 태풍의 3가지 유형을 분류하기 위하여 태풍백서(KMA, 2011)에 있는 1981년~2010년의 30년간 한반도에 영향을 준 태풍의 순간 최대풍속(Maximum Instantaneous Wind, MIW)과 일 강수량 자료를 이용하였다. MIW와 일 강수량의 자료로부터 구한 MIW의 평균 30 m s^{-1} 와 일 강수량의 평균 165 mm d^{-1} 을 기준으로 하여 태풍을 분류하였다. Table 3은 태풍의 각 유형별 주요 위성 변수와 역학 변수들

을 분류한 표이고 이를 위성영상을 이용하여 개념모형으로 도식화한 것이 Fig. 4이다. Table 3에서 ‘*’은 기상 위성을 통해 산출된 변수들을 나타낸다.

바람형 태풍은 MIW가 30 m s^{-1} 이상이고 일 강수량은 165 mm d^{-1} 미만인 태풍을 말하고 호우형 태풍은 MIW가 30 m s^{-1} 미만이고 일 강수량이 165 mm d^{-1} 이상인 태풍을 말하며 복합형 태풍은 MIW가 30 m s^{-1} 이상이고 일 강수량도 165 mm d^{-1} 이상인 태풍을 말한다. 총 태풍 발생 중 바람형, 호우형, 복합형이 각각 20.2%, 7.9%, 27.0%를 차지하여 1981년~2010년의 30년간 한반도에 영향을 준 태풍은 복합형과 바람형이 더 빈번하게 나타났음을 알 수 있다. 바람형 태풍의 대표적인 예로는 2010년 북서태평양에서 발생한 태풍 곤파스가 있다. 바람형은 MIW가 강하고, 최대 풍속반경(Radius of Maximum Wind, RMW)이 대칭

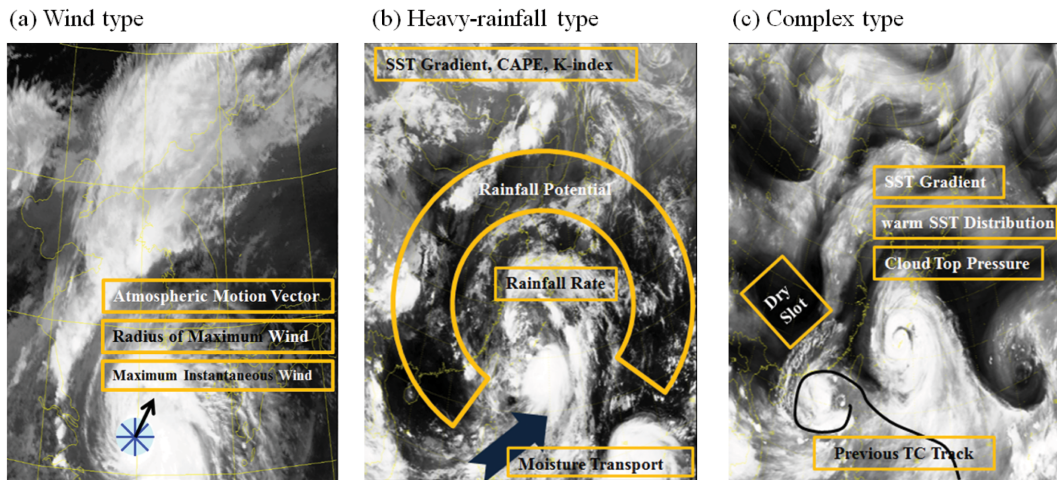


Fig. 4. Conceptual models for (a) wind, (b) heavy-rainfall, (c) complex type of typhoon. COMS IR infrared images are used in (a) and (b) and the COMS WV water vapor image is used in (c). Elements in yellow boxes indicate products analyzed by GK-2A.

적이며 작고 강한 소용돌이도를 갖는 경우에 주로 형성된다. 따라서 개념 모형 작성에서 위성 변수로 AMV, RMW, 그리고 MIW를, 역학 변수로 소용돌이도와 헬리시티를 선정하였다(Fig. 4a). 호우형 태풍으로는 2014년에 발생했던 태풍 나크리가 대표적이다. 이 유형에서는 한반도 남쪽으로부터의 수증기 수송으로 인하여 가장수량(TPW)이 많으며, 강우강도(RR)가 강하게 나타난다. TPW와 RR은 COMS에서도 산출되고 있는 변수이지만 COMS에 비하여 약 4배의 해상도를 갖는 GK-2A를 통해 보다 정확한 태풍 감시를 기대할 수 있다. 이와 더불어 호우형에서는 새롭게 산출되는 변수인 잠재강수량(Rainfall Potential, RP), 연직 습도 프로파일(Vertical Humidity Profile, VHP), Convective Available Potential Energy (CAPE) 등을 추가로 고려해야 할 인자로 선정하였다(Fig. 4b). 호우형 태풍을 구분하기 위한 역학 변수로는 SST 경도와 수증기의 이동 및 수렴이 있다. 한편 2012년에 발생한 태풍 볼라벤은 복합형 태풍에 속한다. 복합형 태풍은 바람형과 호우형 태풍의 특성이 모두 나타나는 태풍으로, 바람형과 호우형 태풍의 구분을 위한 주요 변수들을 살펴보는 것도 중요하지만, 그 외에도 운정기압(Cloud Top Pressure, CTP), warm SST의 분포, 이전 태풍의 경로, 건조역 유입 유무를 살피고 역학 변수로는 연직 바람 분포와 해양의 열용량을 파악해야 한다(Fig. 4c).

4. 장 마

4.1 장마 메커니즘

장마는 우리나라 호우 유형 중 하나로, 한랭 습윤

한 오호츠크해 기단과 온난 습윤한 북태평양 기단 사이에서 생성되는 정체전선에 의해 장기간 지속되는 강수현상이라고 정의되었다(Kim, 1992; Ryu, 2001; Cha, 2006; Seo et al., 2011). 장마는 중국의 메이유와 일본의 바이유와 비슷한 특징을 가진다고 인식하지만 실제로는 대륙의 영향까지 포함되는 복잡한 중위도 현상이다(Lim and Park, 1991; Oh et al., 2014).

장마를 분류한 선행연구로 Ha et al. (2003)은 계절 평균한 중관 규모에서 수치적 변수를 이용하여 장마를 강장마와 약장마로 분류하고 그 특성을 살펴 보았으며, Ha and Lee (2007)에서는 Bonin high와 관련 지역 강장마와 약장마를 구분하였다. Figure 5는 Ha et al. (2003)과 Ha and Lee (2007)을 바탕으로 강장마와 약장마를 도식화하여 나타낸 것이다. Bonin high, 850 hPa 및 200 hPa 제트류, 850 hPa 풍속, 12550 gpm 및 5880 gpm의 지위고도, 그리고 850 hPa 비습의 총 7가지를 변수로 설정하고 강장마와 약장마를 구분하였다. Ha and Lee (2007)에 따르면 Bonin high의 위치를 140°~145°E, 25°~30°N 영역으로 정의하였는데, 강장마의 경우에는 Bonin high가 강하게 나타나며 상·하층의 제트류가 각각 30 m s⁻¹, 8 m s⁻¹ 이상으로 강한 남서풍이 분다. 또한 약장마에 비하여 12550 gpm 영역과 5880 gpm 영역이 한반도의 남쪽으로 더 확장된 형태임을 볼 수 있다. 그리고 강장마일 경우, 850 hPa 고도에서 11 g kg⁻¹ 이상의 비습 영역이 한반도 남해안까지 확대되는 것을 알 수 있다.

장마 생성의 물리적 메커니즘의 주 요인으로는 수증기 형성, 상승 운동, 안정도 지수가 있다(Park et al., 1986; Ha et al., 2003, 2005; Seo et al., 2011). 장마

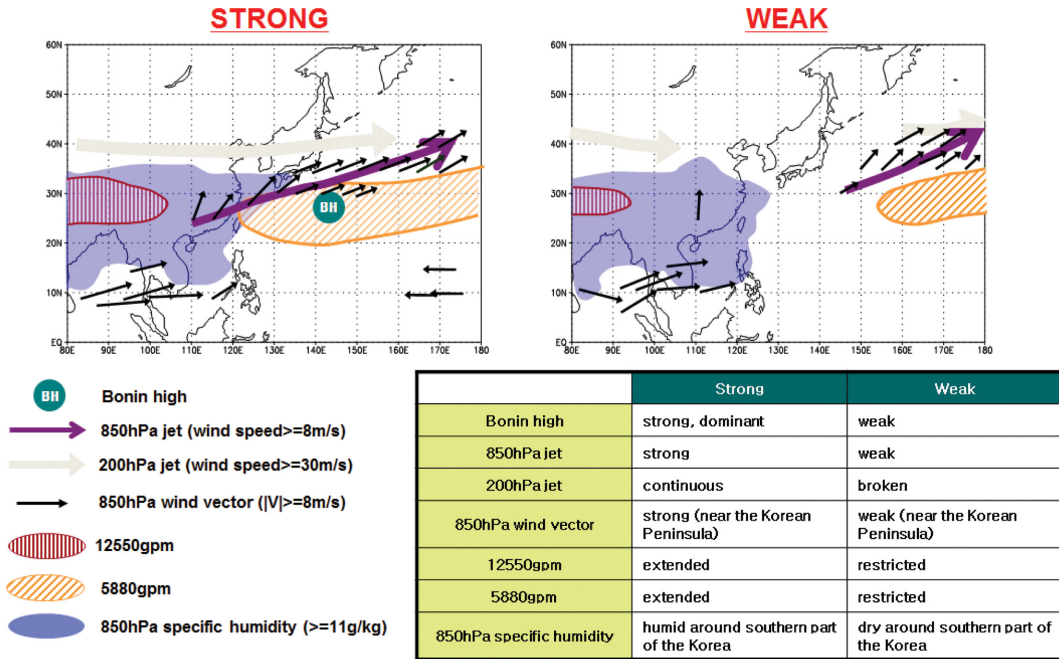


Fig. 5. Conceptual model of strong and weak Changma.

※ Predictor group of Changma : f (Available moisture, Lift, Instability)

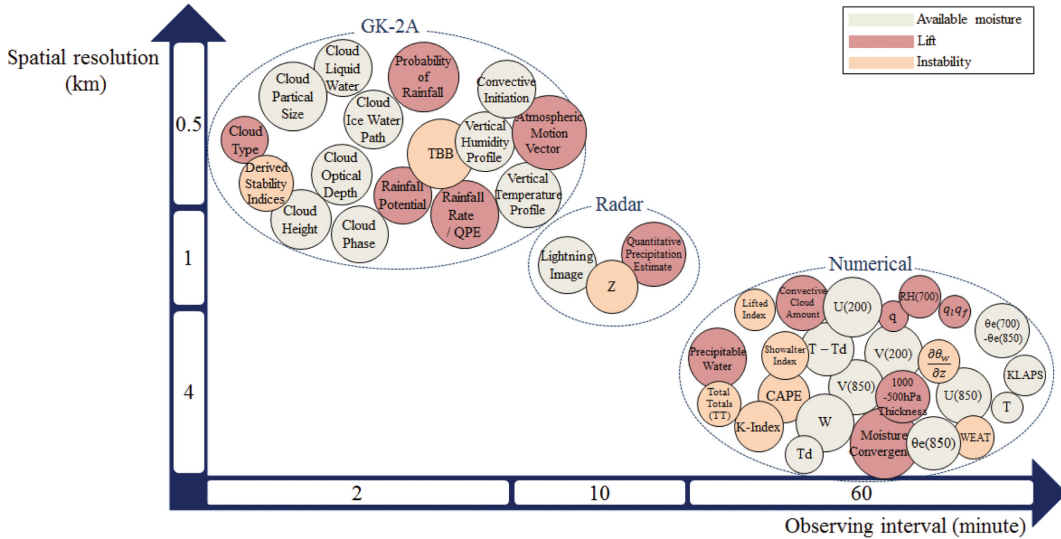


Fig. 6. Same as Fig. 3, but for the Changma.

기간 동안의 강수의 대부분은 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 전선으로 유입되는 다량의 수증기로부터 생성되므로 장마 생성은 수증기의 유입과 형성이 중요하다. 장마 생성에는 대기의 수평 구조뿐만 아니라 연직 구조도 중요한 역할을 한다. 중위도 지역의

상승 운동은 중위도 제트를 강화시키는 역할을 한다. 제트의 출구에 한반도가 위치해 있을 경우, 간접 순환의 상승류가 발생하는 구역에서 장마기간에 연직 속도가 증가함을 알 수 있다(Seo et al., 2011). 이와 더불어 안정도 지수도 주요 메커니즘으로 선정하였다.

Table 4. Key factors classifying Changma into two types in Fig. 7. The symbol ‘*’ denotes factors extracted from the satellite.

Band type	Heavy-rainfall type
Atmosphere Wind Vector (AWV)*	Atmosphere Wind Vector (AWV)*
Total Precipitable Water (TPW)*	Convective Initiation (CI)*
Probability of Rainfall (PoR)*	Total Precipitable Water (TPW)*
Moisture convergence	Rainfall Rate (RR)*
Geopotential height	Dry slot
Low-level wind	Low-level wind
Upper-level wind	Upper-level wind

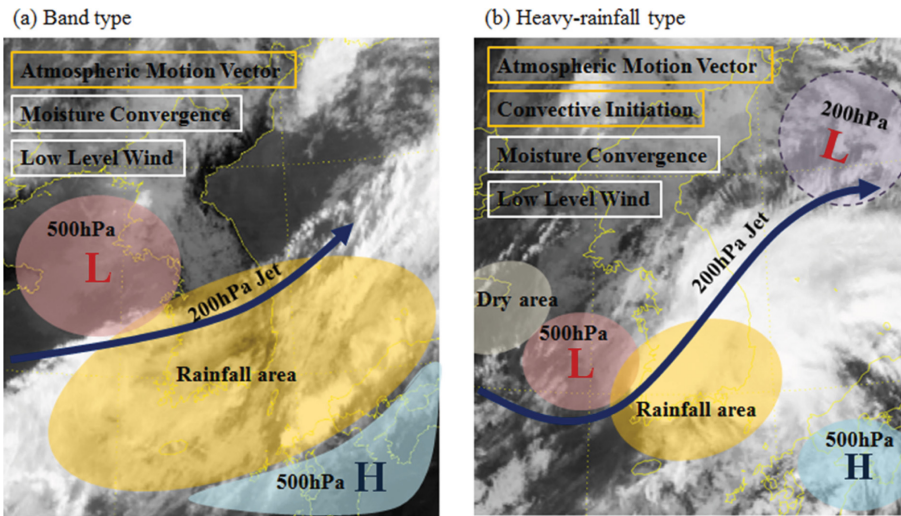


Fig. 7. Conceptual models for (a) band and (b) heavy-rainfall types of Changma. COMS WV images are used. Yellow and white boxes denote products obtained from satellite and numerical model, respectively.

이렇게 선정한 세 가지 주요 메커니즘을 기반으로 기상 위성 변수와 수치 역학자료 및 레이더를 통해 산출 가능한 변수들을 관측 간격과 공간 해상도에 따라 분류하였다(Fig. 6). 연두색, 붉은색, 주황색은 각각 수증기 형성, 상승운동, 안정도와 관련된 변수들을 의미하며 여기서 원의 크기는 각 메커니즘과 변수들 사이의 상관관계를 상대적으로 나타낸다.

4.2 장마 개념모형

Rha et al. (2005)은 호우가 발생하는 중관 패턴을 태풍형, 전선형, 저기압형, 태풍변질형 등으로 나누었고 Lee and Kim (2007)은 고립형 뇌우, 대류밴드, 스킨선, 그리고 구름무리로 구분하였다. 이 중 장마는 Rha et al. (2005)의 전선형 혹은 Lee and Kim (2007)의 대류밴드와 구름무리에 가깝다. 선행연구에서 보인 한반도에 영향을 주는 호우의 분류에서 나아가서 한반도의 호우 메커니즘 중 하나인 장마도 유형분류가 가능하다. 본 연구에서는 기상위성 영상과 자료를

기반으로 장마의 구름 및 강수의 패턴에 따른 정성적인 구분을 하였다. 각 패턴 및 발생 메커니즘에 따라서 장마의 다양한 유형이 존재할 수 있지만 기상위성 영상과 자료의 활용 극대화를 위하여 장마를 밴드형과 호우형으로 구분했다. 여기서 밴드형과 호우형은 서로 대치되는 개념의 장마 유형이 아니며 많은 장마 유형들 중 대표적인 두 가지 유형이다.

밴드형은 서로 다른 성질을 갖는 기단의 남북 배치로 인하여 한반도의 동서방향으로 길게 늘어진 강수 밴드가 형성된 장마 유형을 말한다. Table 4는 밴드형 장마를 위성 변수와 역학 변수 및 인자들로 분류한 표이고 분류된 변수 중 대표적인 변수만을 사용하여 도식화 하면 Fig. 7a와 같다. Table 4에서 ‘*’ 표시는 위성을 통해 산출 가능한 변수들을 의미한다. Figure 7의 노란 박스는 위성 변수를 나타내고 흰 박스는 역학 변수를 표시한 것이다. 밴드형 장마가 발생할 경우, 대기의 중층 기압장은 한반도 남쪽의 북태평양 지역과 북쪽의 오호츠크해 지역의 기압능이 확장하며

한반도가 두 개의 기압능 사이의 기압골에 위치하게 된다(Ha et al., 2003). 밴드형 장마는 남서풍의 하층 제트류가 강하며 장마의 주 메커니즘 중 하나인 수증기 형성을 위하여 남쪽으로부터의 수증기 유입으로 인한 남풍($v\text{-wind} > 0$)이 필수요소이다. 또한 한반도가 상층 제트기류의 입구에 위치하여 서풍 또는 남서풍과 함께 연직 바람시어가 발생하며 직접순환에 따른 상승운동 영역에 속하게 되어 강수밴드가 형성된다. 따라서 밴드형 장마를 구분하기 위하여 위성 변수로 수증기 수송과 대기의 운동 변화를 보기 위하여 AMV, 강수 분포를 위한 TPW와 Probability of Rainfall (PoR) 변수를, 역학적 척도로 850 hPa의 기압장, 하층 및 상층 제트의 풍속 분포, 그리고 대기 하층의 수증기 수송 및 수렴을 주 변수로 선정한다. 이와 함께 레이더 영상과 K-index (KI)를 고려하여 밴드형 장마를 구분할 수 있다.

호우형은 차갑고 건조한 북서기류의 유입으로 남쪽에서 불어오는 남풍 혹은 남서풍과 만나서 생기게 되는 장마를 말하며 강수의 지속시간이 상대적으로 짧고 강우강도가 강하다. Table 4의 오른쪽은 호우형 장마의 특성을 잘 모의하는 위성 변수와 역학 변수 및 인자들로 분류한 표이며, 대표적인 변수만을 사용하여 도식화하면 Fig. 7b와 같다. 호우형 장마는 북으로부터 건조기류의 유입, 단기간 동안 많은 양의 수증기 형성, 그리고 한반도 주변의 동서간 큰 지위고도차가 특징이다. 건조한 기단이 얼마나 빠르게 유입되는가 혹은 어느 정도의 경사를 가지고 유입되는가에 따라 한반도의 장마에 영향을 주는 저기압의 발달 가능성 및 강도가 달라지므로, 건조역의 형성과정은 강수의 형성에 중요한 영향을 미친다(Tammy and David, 2006). 따라서 위성 영상을 통한 건조역의 유입 및 분포를 살펴야 한다. 또 밴드형 장마에 비하여 호우형은 한반도 주변의 동서간 지위고도차가 크다. 호우형 장마의 구분을 위하여 위성 변수로 AMV를 활용하여 대기의 움직임을 파악하고 GK-2A가 새롭게 산출되는 대류운 발생 탐지(Convective Initiation, CI) 변수를 고려하여 단시간에 발생할 수 있는 대류운을 파악해야 한다. 강수량 추정을 위하여 TPW와 RR도 고려해야 하는 변수이다. 역학 변수로는 북서기류가 유입되는 지역의 건조역 분포를 파악하기 위한 강수분포, 하층 제트류, 수증기 수렴, 상·하층의 지위고도 분포와 상·하층 제트류 분석을 통한 바람장을 고려해야 한다.

5. 요약 및 토의

2018년부터 COMS 후속 위성으로 운영될 GK-2A는 기존의 COMS 위성보다 4배 이상 향상된 고해상

도, 총 16개의 채널 수 및 52종의 산출물을 갖는다. GK-2A의 활용도를 높이고자 본 연구에서는 국민들의 관심도가 가장 높은 악기상인 태풍과 장마의 개념모형을 제안하였다. 개념모형은 어떤 현상의 개념과 발생 원인의 주요 프로세스를 나타내는 것으로(Yang et al., 2005; EUMETRAIN) 태풍과 장마의 개념모형을 발달시키면 한국형 악기상의 예측에 큰 도움을 줄 수 있다.

태풍의 주요 메커니즘으로는 수증기 형성, 대칭성, 열원이 있는데 본 연구에서는 한국형 태풍을 강도와 성질을 고려하여 바람형, 호우형, 복합형의 3가지 유형으로 분류하였다. 바람형은 강풍에 의한 피해가 클 경우를 말하는 것으로 AMV, RMW, MIW를 기상 위성을 통해 관측되는 핵심 변수로 선정하였다. 호우형은 폭우에 의한 피해가 큰 태풍을 말하며 호우형 태풍을 찾기 위해서는 위성에서 산출되는 TPW, RR, RP, VHP 및 SST 경도를 고려해야 한다. 복합형은 바람형과 호우형의 복합적인 성질을 갖는 태풍을 말하며 이를 구분하기 위해 위성 변수 중 CTP, SST 정도, warm SST의 이동 및 이전 태풍의 트랙 등을 주요 변수로 선정하였다.

장마는 수증기 형성, 상승운동, 안정도가 주 메커니즘인데 이를 이용하여 밴드형과 호우형으로 분류하였다. 밴드형은 AMV, TPW, 그리고 PoR이 주요한 위성 변수로 선정되었고, 호우형은 기상 위성 변수 중 AMV, CI, TPW, 그리고 RR과 기상 영상의 건조역 분포를 통하여 분석할 수 있음을 알았다. 밴드형과 호우형은 주요 장마 유형인데, 이 외에도 수증기의 연직 상승을 특징으로 하는 낙뢰형과 저고도 에코형으로 장마 유형을 분류할 수도 있다. 저고도 에코형은 낙뢰형에 비해 수증기의 상승 코어가 하층에 위치하는 장마 유형을 말한다(Kar and Ha, 2003). 따라서 수증기 수송이 활발하게 일어나며 하층 제트가 강할 때 저고도 에코형 장마가 나타날 수 있다. 그러나 낙뢰형과 저고도 에코형은 그 규모가 meso- γ 스케일로 매우 규모가 작으므로 재분석 자료나 Automatic Weather System (AWS)을 통해서만 관측이 불가능하다. 따라서 고해상도의 위성 영상을 통한 관측이 필요하며, 낙뢰형과 저고도 에코형 장마를 연구함에 있어서는 위성 자료를 활용한 사례분석을 통한 후속연구에서 그 메커니즘을 밝힐 필요가 있다. 더불어 더욱 정교한 한국형 장마 개념모형을 만들기 위해서는 위의 변수 선정에서 나아가 한반도의 특성에 맞는 새로운 지수들의 개발이 추가로 이루어져야 한다. 지중해에 위치한 EU 국가들의 경우, KI 대신 대기의 하층과 중층의 상대습도를 추가로 고려한 Mediterranean K-Index 지수를 활용하고 있으며 Rain Dynamic Index를 활용하고 그에 따른 경계값을 개발하여 호우 예측의 정확성을 높인

선례가 있다(Harats et al., 2010). 한국의 경우, Kar and Ha (2003)는 한반도 지형에 맞는 low-echo centroid 개념을 도입하였으며 Seo et al. (2011)은 상당 온위를 장마 분석 시 추가로 고려해야 하는 중요 변수임을 강조하였다. 그 외에도 폭우에 영향을 미치는 밝기온도범위에 대한 연구(Ryu and Sohn, 2012)가 진행되었고, 기상 위성을 통해 산출된 자료를 바탕으로 호우를 온난형과 한랭형으로 나누어 하계 집중 호우가 고도가 낮고 적은 양의 빙정을 동반하는 온난형의 구름에 의해 주로 발생함을 보였다(Song and Sohn, 2015). 따라서 선행 및 후속 연구들을 통하여 제시된 인자들을 추가로 활용하여 체계적인 개념모형을 개발해야 한다. 본 연구에서는 GK-2A를 통해 산출될 위성 변수 및 수치 · 역학 변수들을 이용하여 태풍과 장마의 개념모형을 제안하였다. 현재 운영 중인 COMS보다 뛰어난 성능을 보유한 GK-2A를 통하여 국민들이 보다 정확한 기상정보를 제공받을 수 있을 것으로 기대한다. 더 나아가, 앞으로 본 연구에서 분류한 주요 인자들의 한반도에 적합한 경계값의 설정이 필요하여 다양한 분야에서의 선행 및 후속연구를 적극적으로 활용하고 적용하여 현업에 종사하고 있는 예보관 및 연구원이 사용 가능한 개념모형으로 발전시켜 나갈 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(중합해양과학기지 구축 및 활용 연구 II).

REFERENCES

- Arpe, K., 1991: The hydrological cycle in the ECMWF short-range forecasts. *Dyn. Atmos. Oceans*, **16**, 33-60.
- Atlas, D., and O. W. Thiele, 1982: Precipitation measurement from space: Workshop summary. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **63**, 59-63.
- Carranza, M., A. De Smet, and J. Gustafsson, 2010: Atmospheric motion vectors derived from MSG rapid scanning service data at EUMETSAT. *Proc. 10th Int. Winds Workshop*, Tokyo, EUM 56, 10 pp.
- Cha, E. J., 2006: The meaning of Changma. *J. Hydro-Environ. Res.*, **39**, 69-72.
- Choi, Y., K.-S. Yoon, and K.-J. Ha, 2013: Effects of asymmetric SST distribution on straight-moving typhoon Ewinar (2006) and recurving typhoon Maemi (2003). *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3950-3967.
- Ebert, E. E., J. E. Janowiak, and C. Kidd, 2007: Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 47-64.
- Forsythe, M., and R. Saunders, 2008: AMV monitoring: results from the 3rd NWP SAF analysis. *Proc. 9th Int. Winds Workshop*, Annapolis, MD, EUM 51, 8 pp.
- Ginsberg, J., M.-H. Mohebbi, R.-S. Patel, L. Brammer, M.-S. Smolinski, and L. Brilliant, 2009: Detecting influenza epidemics using search engine query data. *Nature*, **457**, 1012-1014.
- Grassotti, C., and L. Garand, 1994: Classification-based rainfall estimation using satellite data and numerical forecast model fields. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 159-178.
- Gruber, A., 1973: Estimating rainfall in region of active convection. *J. Appl. Meteor.*, **12**, 110-118.
- Ha, K.-J., and S.-S. Lee, 2007: On the interannual variability of the Bonin high associated with the East Asian summer monsoon rain. *Clim. Dyn.*, **28**, 67-83.
- _____, S.-K. Park, and K.Y. Kim, 2003: Interannual variability in summer precipitation around the Korean peninsula and its associated East Asian summer circulation. *Atmosphere*, **39**, 575-586 (in Korean).
- _____, K.-S. Yun, J.-G. Jhun, and C.-K. Park, 2005: Definition of onset/retreat and intensity of Changma during the boreal summer monsoon season. *Atmosphere*, **41**, 927-942 (in Korean).
- Harats, N., B. Ziv, Y. Yair, V. Kotroni, and U. Dayan, 2010: Lightning and rain dynamic indices as predictors for flash floods events in the Mediterranean. *Adv. Geosci.*, **23**, 57-64.
- Ho, C.-H., and I.-S. Kang, 1988: The variability of precipitation in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 38-48 (in Korean).
- Jeong, H., D. S. Kim, and H. Lee, 2013: *Google god knows everything*. Science books, 400 pp.
- Kar, S. K., and K.-J. Ha, 2003: Characteristic differences of rainfall and cloud-to-ground lightning activity over South Korea during the summer monsoon season. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2312-2323.
- Kim, G.-S., 1992: *The Dictionary of Meteorology*. Hyangmun-sa, 735 pp.
- Kim, S., J.-H. Park, M.-L. Ou, H. Cho, and E.-H. Sohn, 2012: Optimization of mesoscale atmospheric motion vector algorithm using Geostationary Meteorological Satellite Data. *Atmosphere*, **22**, 1-12 (in Korean).
- Lee, K.-J., K.-Y. Heo, A.-S. Suh, J.-S. Park, and K.-J. Ha, 2010: Application of images and data of satellite to a conceptual model for heavy-rainfall analysis. *Atmosphere*, **20**, 131-151 (in Korean).

- Lee, M.-S., K.-L. Kim, A.-S. Suh, and H.-H. Lee, 1994: Estimation of precipitation using radar and satellite data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **11**, 583-595.
- Lee, T.-Y., and Y.-H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean peninsula and their classification. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 367-396 (in Korean).
- Lim, J. S., and S.-U. Park, 1991: The moisture transport and budget over Korea during the 1988 Changma period. *Atmosphere*, **27**, 221-240 (in Korean).
- Ministry of Public Safety and Security, 2014: Current state of Natural Disaster Declarations. [Available online at <http://www.mpss.go.kr/home/policy/statistics/statisticsData>].
- Oh, H., K.-J. Ha, and J.-S. Sim, 2014: Analysis for onset of Changma using Jeodo ocean research station data. *Atmosphere*, **24**, 189-196 (in Korean).
- Park, D.-S., C.-H. Ho, J.-H. Kim, and H.-S. Kim, 2011: Strong landfall typhoons in Korea and Japan in a recent decade. *J. Geophys. Res.*, **116**, D07105, doi:10.1029/2010JD014801.
- Park, S.-U., I.-H. Yoon, and S.-K. Chung, 1986: Heat and moisture sources associated with the Changma front during the summer of 1978. *Atmosphere*, **10**, 1-17 (in Korean).
- Rha, D. K., C. H. Kwak, M.S. Suh, and Y. Hong, 2005: Analysis of the characteristics of precipitation over South Korea in terms of the associated synoptic patterns: A 30 years climatology (1973~2002). *J. Korean Ear. Sci. Soc.*, **26**, 732-744 (in Korean).
- Ryu, G.-H., and B. J. Sohn, 2012: Rain-rate characteristics over the Korean peninsula and improvement of the Goddard profiling (GPROF) Database for TMI rainfall retrievals. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 786-798.
- Ryu, S.-B., 2001: The meaning and etymology of Changma. *Atmosphere*, **11**, 6-12 (in Korean).
- Seo, K.-H., J.-H. Son, and J.-Y. Lee, 2011: A new look at Changma. *Atmosphere*, **21**, 109-121 (in Korean).
- Song, H.-J., and B.-J. Sohn, 2015: Two heavy rainfall types over the Korean peninsula in the humid East Asian summer environment: A satellite observation study. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 363-382.
- Tammy, M. W., and B. P. David, 2006: A review of convection initiation and motivation for IHOP_2002. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 5-22.
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 159-178.
- Yang, Y., H. Lin, Z. Guo, and J. Jiang, 2005: A meteorological conceptual modeling approach based on spatial data mining and knowledge discovery. *Innov. Appl. Artif. Int.*, **3533**, 490-499.
- Yun, K.-S., J. C. L. Chan, and K.-J. Ha, 2012: Effects of SST magnitude and gradient on typhoon tracks around East Asia: A case study for typhoon Maemi (2003). *Atmos. Res.*, **109**, 36-51.