

현업예보 관점에서 태풍의 온대저기압화 판단 과정에 대한 고찰

차은정¹ · 심재관¹ · 권혁조^{2,*}

¹기상청 국가태풍센터, 697-942, 제주특별자치도 서귀포시 남원읍 한남리 산76-2

²공주대학교 대기과학과/태풍연구센터, 314-701, 충남 공주시 신관동 182

A Review on the Decision-making Process for Extratropical Transition of Typhoon from an Operational Forecast Point of View

Eun-Jeong Cha¹, Jae-Kwan Shim¹, and H. Joe Kwon^{2,*}

¹National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju 697-942, Korea

²Department of Atmospheric Science/Typhoon Research Center, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

Abstract: The extratropically transitioning cyclones have been shown to have a large effect on weather system in the midlatitudes and cause sometimes the severe weather phenomena. However, both operational forecasting and research aspect of ET remain a significant challenge. Because it is difficult to distinguish ET stage due to obscure configuration of the cyclone itself. Furthermore, any definition of ET should not only be precise enough to satisfy the needs of the operational and research communities. Therefore, the “operational deterministic process for ET” was proposed and has been used to diagnose both structure and subsequent process of ET in 2007. In this study, it has been examined the maximum wind and SST in the 1st step, satellite image in the 2nd step, sounding in the 3rd step, surface weather chart analysis in the final step. This operational manual has allowed better monitoring and understanding of the changes in the structure as ET occurs.

Keywords: extratropical transition, sea surface temperature, maximum wind, satellite image, sounding chart, weather map

요약: 온대저기압화는 중위도 기압계에 큰 영향을 주고 때로는 악기상의 원인이 되기도 한다. 그러나 온대저기압화에 대한 예보와 연구 양쪽 모두 많은 과제가 남아있다. 왜냐하면 태풍으로부터 변질된 온대저기압 자체의 모호한 형태 때문이다. 또한, 온대저기압화의 정의가 예보나 연구 양쪽 모두 만족시켜줄 만큼 정확하지도 않다. 따라서 기상청은 2007년에 “온대저기압화 현업매뉴얼”을 개발하여 온대저기압화의 일련의 과정과 구조 변화 진단에 사용하였다. 이 매뉴얼에서는 1단계 최대풍속과 해수면온도, 2단계 위성영상, 3단계 단열선도, 그리고 최종단계인 4단계에서 지상일기도를 분석하였다. 이 현업매뉴얼은 온대저기압화가 일어날 때 구조변화의 이해와 감시에 도움이 될 것이다.

주요어: 온대저기압화, 해수면온도, 최대풍속, 위성영상, 단열선도, 일기도

서론

태풍은 일반적으로 따뜻한 열대해양상에서 발생하고 점차 발달하면서 북상한다. 그 후 중위도 편서풍대에서 온대저기압화 과정을 거쳐 변질·소멸되는 태풍과 열대저압부로 약화되어 소멸되는 태풍으로 구분

할 수 있다. 북서태평양에서는 30년 평균(1971~2000) 매년 약 27개 태풍이 발생하고 이중 상당수가 중위도로 이동하여 점차 태풍의 구조변화가 일어난 후 열대저기압의 성질을 잃고 온대저기압이 된다. 이 과정을 온대저기압화(Extratropical Transition, ET)라 부르며 기상청에서는 열대저기압인 태풍이 온대저기압이 되면 태풍으로서 일생을 마친 것으로 보고 태풍의 소멸정보를 발표한다.

하지만 온대저기압화 된 후에도 집중호우, 돌풍, 큰 파도 등 악기상 발생의 원인이 되기도 하고 인

*Corresponding author: hjkwon@kongju.ac.kr

Tel: 82-41-850-8527

Fax: 82-41-856-8527

적·경제적 피해를 유발하기도 한다. 이와 같이 태풍이 온대저기압으로 변질된 후에도 많은 피해를 줄 수 있지만 더 이상 태풍으로서 성질을 유지하지 않기 때문에 태풍의 종료를 선언하는 절차, 즉 온대저기압화로 변질되었는지의 여부를 판단하는 것은 태풍 업무에 있어 매우 중요한 사항이다. 현재 태풍예보 관점에서 온대저기압화에 대한 객관적 정의는 정비되어 있지 않으며, 연구의 목적에 따라서는 연구자가 스스로 정의하여 사용하고 있다. 따라서 태풍의 온대저기압화 과정에 대한 이해는 아직까지 충분하지 못한 실정이다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서는 온대저기압화에 대한 합리적인 근거를 바탕으로 한 객관적 판단절차가 요구된다. 이에 따라 기상청은 일본과 미국의 온대저기압화 사례 및 2006년에 발생한 23개 태풍 중 온대저기압화 된 7개 사례를 상세분석하여 2007년에 ‘온대저기압화 현업매뉴얼’을 개발하였다.

권혁조와 김지영(2005)은 2004년 제7호 태풍 ‘민들레(MINDULLE)’에 대하여 성숙기(2004년 6월 28일 09:00 LST)와 온대저기압화 과정(2004년 7월 4일 03:00 LST)의 특징을 비교하였다. 성숙기에는 태풍 중심에 온난핵 존재, 소용돌이도 중심이 고도에 따라 똑바로 서있고, 지위고도의 편차가 태풍 하층에서 큰 값을 보이고, 고도가 증가함에 따라 온난핵 구조가 나타나는 등 성숙기에는 대칭구조가 뚜렷하다. 그러나, 온대저기압화 과정 중에는 태풍의 북쪽에 위치한 한랭한 공기가 태풍 서쪽으로 파고들어 온난핵 구조가 약화되고, 소용돌이도 중심이 고도에 따라 서쪽으로 기울어진다. 또한 지위고도의 편차가 태풍 상층에서 큰 값을 보이고, 고도가 증가함에 따라 한랭핵이 나타났다. 이와 같이 태풍의 대칭구조는 온대저기압화 과정을 거치면서 비대칭구조로 바뀌는 것을 알 수 있다.

1998년 제7호 태풍 ‘비키(VICKI)’와 2004년 제18호 태풍 ‘송다(SONGDA)’가 온대저기압화 되면서 비대칭구조로 되는 것을 보았다(Kitabatake, 2002; Kitabatake et al., 2006). 특히, 일본 기상청은 ‘송다’가 온대저기압으로 변질된 후 북해도에서 50 m/s 이상의 최대순간풍속이 관측되는 등 큰 피해를 준 것을 계기로 「태풍정보의 표현방법 등에 관한 간담회」 개최하였다(일본 기상청, 2005). 이 간담회의 결과에 따라 일본 기상청에서는 태풍과 온대저기압 차이에 착안하여 전선유무, 폭풍영역 분포, 위성영상과 자동 기상관측망(Automated Meteorological Data Acquisition

System, AMeDAS)의 풍속 분포 등을 근거로 온대저기압을 판단하기로 결정하였다.

Harr et al.(2000)은 상층 기압골 위치에 따라 태풍의 온대저기압화가 강화 또는 약화 여부를 분석하였다. 북서형은 중위도 상층 기압골이 진행하는 태풍보다 서쪽에 위치하는 형태로 북동형보다 온대저기압화된 후 재발달 가능성이 있고 빠른 시간 내에 강해진 다. 북동형은 중위도의 상층 기압골이 태풍보다 동쪽에 위치하여 태풍이 그 성질을 좀 더 유지할 수 있도록 한다. 또한 북서형보다 좀 더 느리게 이동하며 태풍경로가 동서로 길게 늘어지는 형태가 많다.

Klein et al.(2000)은 전형적인 온대저기압화 형태를 개념화하였다. 1단계는 태풍의 남쪽에서부터 건조역 유입, 서쪽에서 대류운 약화, 북동쪽으로 권운의 이동이 특징이다. 2단계에는 태풍의 남서쪽 사면에서 대류 약화, 건조역 확장, 온난전선 발달 시작된다. 또한, 3단계는 발달한 온난전선, 태풍의 눈 소멸, 찬 공기 이류가 뚜렷하다. 그리고 온난핵이 소멸되고 전선의 특징 뚜렷하게 나타나다. 1단계에서 3단계까지 보통 24~72시간(평균 46시간 걸림)이 소요된다. Hart(2003)는 저기압위상공간도(Cyclone phase space diagram, CPSD)를 개발하여 시간 경과에 따라 태풍의 상·하층 구조 변화에 의한 온대저기압화를 분석하였다.

이 논문의 목적은 예보차원에서 온대저기압화 판정 근거를 설정하고, 2006년 사례에 적용하여 타당성을 검토하는 것이다. 2장에는 국내·외 사례, 3장에는 온대저기압화 판정 근거 설정 이유를, 4장에는 2006년 사례 분석결과, 그리고 5장에는 요약과 향후 계획에 대하여 정리하였다.

연구방법

국내·외 사례를 보면, 주로 연구차원에 중점을 두고 있어서 현업예보에서 활용할 수 있는 온대저기압화 판정 절차를 개발하였다.

태풍예보에서 온대저기압화 판정 절차

북서태평양에 인접한 국가들은 태풍 발생시각을 Regional Specialized Meteorological Center(RSMC) Tokyo의 객관분석에 따라 실시한다. 따라서 이들 국가에서 태풍 발생시각은 어디서나 동일하다. 그러나 태풍의 소멸시각은 자국에 영향 여부, 즉 방재차원에서 RSMC Tokyo에서 판단한 소멸시기보다 빨리 또

는 늦게 소멸시키기도 한다. 그러므로 태풍 소멸시기에는 객관적 판단 기준이 필요하게 된다.

온대저기압화를 판정하는 주요요소 및 기준

온대저기압화 판정을 위하여 4단계, 5가지 요소로 구성하였다(Fig. 1).

[1단계] 태풍의 정의에 따라 중심부근 최대풍속이 17 m/s 이하와 태풍이 해상에서 온대저기압화가 될 경우를 예상하여 해수면 온도(Sea surface temperature, SST) 가 21°C 이하의 2개 조건을 설정하였다. 최대 풍속의 근거 자료는 기상청 지상관측망, 자동기상관측망(Automated Weather System, AWS), 해상 브이(buoy) 자료, 이어도 해상기지 자료와 일본 기상청 AMeDAS 바람 자료, Quick Scatterometer(QuikSCAT) 자료 등 입수 가능한 모든 자료를 사용한다. SST 분석에는 기상청에서는 1일 1회 09:00 LST시에 제공하는 자료를 우선적으로 사용한다. 태풍 중심으로부터 100 km를 반경으로 하는 원을 가정하여 그 범위 내의 해수면 온도 분포를 살펴보고 결정한다.

[2단계] 일기도에 비하여 준실시간으로, 넓은 지역에서 자료 획득이 가능한 위성영상을 선정하였다. 위성영상 중에서 수증기(water vapor, WV) 영상에서

암역(暗域, dry slot) 침투(intrusion)여부를 최우선 순위로 하였다. 왜냐하면, 암역은 위성영상분석에 대한 전문지식이 다소 부족하더라도 육안으로 선명하게 파악하기 쉽기 때문이다. 암역(또는 건조역)은 수증기 영상에서 주위보다 차고 건조한 영역을 의미하며 어둡게 보인다. 적외(infrared, IR) 영상에서는 bulge, Ci streak, cloud street 여부를 파악하게 된다. 이 3가지 형태는 주로 온대저기압시에 자주 나타난다. bulge는 태풍 중심에서 북서쪽으로 볼록한 모양을 하고 있으며 대류가 활발한 곳이다. bulge는 위성영상에서 보이는 구(球)의 모습이 태풍 중심의 북서쪽으로 볼록하게 형성된 모습을 말한다. Ci streak는 태풍이 중위도로 북상하여 상층 제트기류와 만날 때, 태풍의 북동쪽으로 상층 권운이 퍼져나간 모양을 의미한다. cloud street는 대류운열이라고 하는데, 적도쪽으로 적운들이 나란히 배열되어 있는 모양을 하고 있으며 대류가 활발한 곳이다.

[3단계] 수평 이미지인 위성영상에 파악하기 어려운 대기의 연직구조를 파악하기 위하여 고층관측 자료를 분석한다. 400~700 hPa의 대기 중·상층에서 건조역 침투여부를 판단하기 위하여 태풍 중심으로부터 가장 가까운 고층관측소의 실황 단열선도를 활용한다

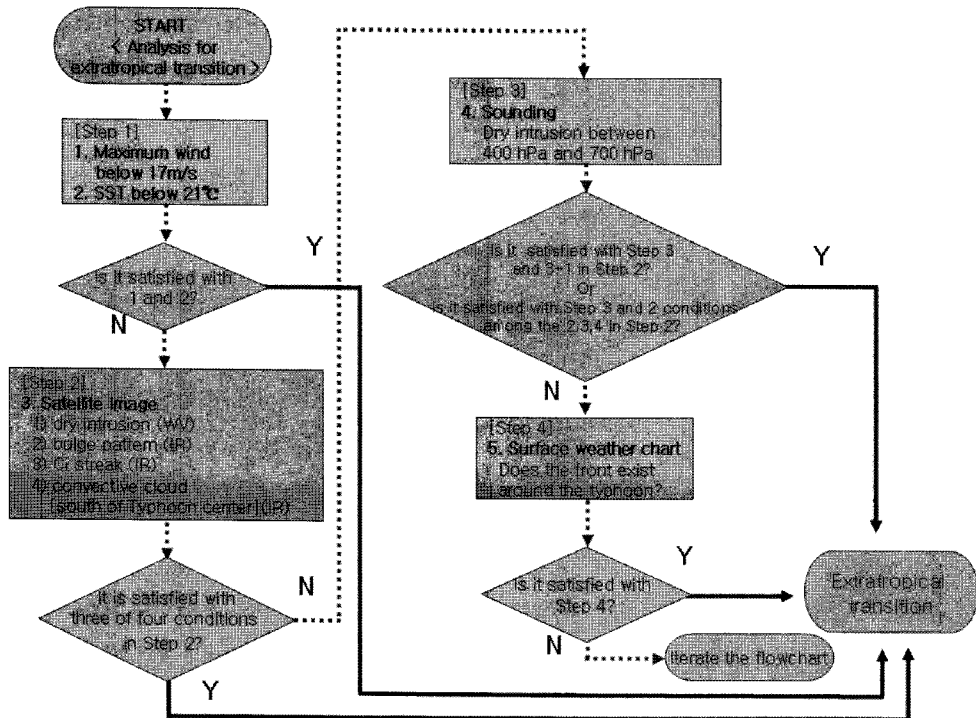


Fig. 1. The decision tree for determining an extratropical transition.

다. 또한 기상청에서 예보에 활용하는 기상분석 시스템(Forecaster's Analysis System, FAS)에서 모델 분석장으로부터 계산된 단열선도도 판단자료로 활용 가능하다. 단열선도는 대기 중·상층에서 차고 건조한 공기가 태풍으로 침투하는지 판단이 용이하지만, 전 세계적으로 고층관측 지점과 관측회수가 많지 않고 해상에서 온대저기압으로 변질되는 태풍에 활용이 어려운 단점이 있다.

[4단계] 일기도로 지상일기도에서 태풍주변에서 전선 유무를 파악한다. 전선 여부를 확인하기 위한 일기도는 기상청 혹은 일본 기상청 등 외국의 일기도도 활용 가능하다. 그러나 일기도 분석은 정시보다 늦어진다. 예를 들면, 기상청의 3시간 지상일기도는 정시보다 약 1 시간 늦게 생산된다. 즉 09:00 LST 3시간 지상일기도는 10:00 LST 시에 분석가능하다. 따라서 온대저기압화 판단에 지상일기도를 활용하기에는 시간상의 제약이 있다.

위의 4단계 분석에서도 온대저기압화를 결정하지 못할 때는 태풍으로 유지하고, 예보관은 다음 예보시간에 동일한 방법으로 분석을 실시한다.

연구결과 및 토의

2006년에는 23개 발생 태풍 중 온대저기압화된 7

개 사례에 대하여 <온대저기압 판정>을 적용하여 검증하였다. 본 논문에서는 7개 중에서 우리나라에 영향을 준 제3호 '에위니아(EWINIAR)'와 제13호 '산산(SHANSHAN)'에 대한 결과를 제시하였다.

에위니아(EWINIAR)

제3호 태풍은 7월 1일 03:00 LST에 괌섬 남서쪽 약 1010 km 부근 해상(7.6 N, 137.8 E)에서 발생하였다(Fig. 2). 이 태풍은 7월 3일 09:00 LST에 강한 열대폭풍(severe tropical storm, STS)으로 발달하였고, 15:00 LST에는 강도는 '강', 크기는 '중형', 중심기압 970 hPa이 되었다. 5일 15:00 LST에 태풍은 중심기압이 920 hPa로 발달하면서 최성기를 이루었고, 20 km/h의 속도로 지속적으로 북북서~북진하여 9일 03:00 LST에는 일본 오키나와 서쪽 약 180 km 부근에 위치하였다. 이후 이 태풍은 약 20~30 km/h의 속도로 북진하여 10일 11:00 LST에 전남 진도 부근으로 상륙하였다. 상륙 후에는 10일 18:00 LST까지 서해안을 따라 북진한 후 점차 북동진하여 22:00 LST에 강원도 홍천부근에서 온대저기압으로 변질되어 태풍으로서의 일생을 마쳤다(차은정 외, 2007).

3호 태풍에 대한 단계별 판단기준과 근거가 된 자료를 요약하였다. 이 태풍은 22:00 LST에 온대저기압으로 변질되었기 때문에 이 시각을 기준으로 전후

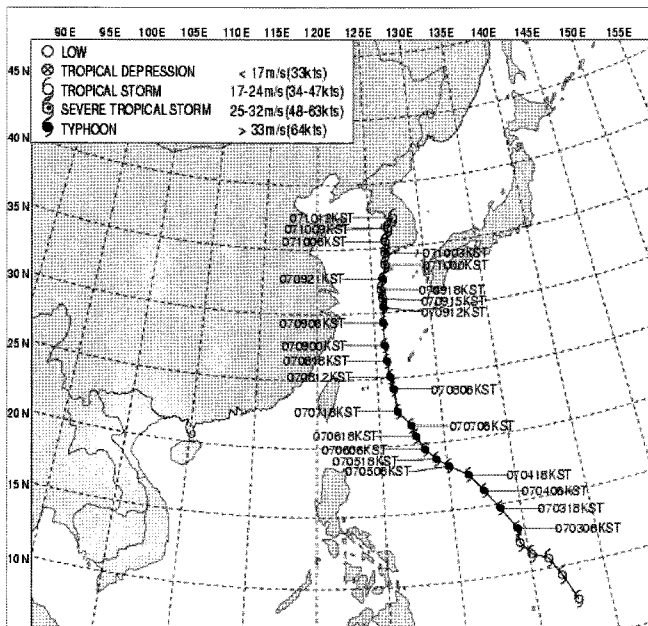


Fig. 2. Track of 0603 (EWINIAR).

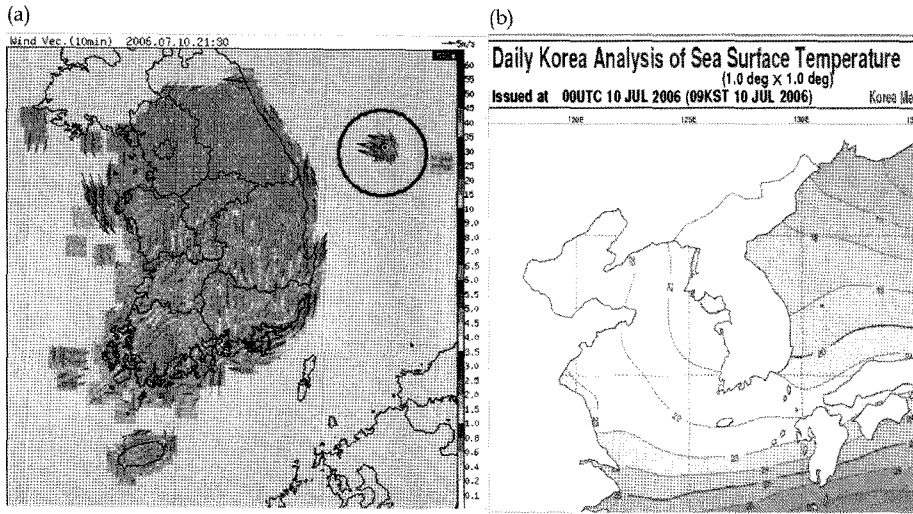


Fig. 3. Distribution of (a) wind speed observed by AWS, 21:30 LST 10 July, and (b) SST, 09:00 LST 10 July, respectively.

자료를 비교하였다. 21:30 LST AWS 바람분포에 의하면, 검정 원으로 표시된 울릉도에서 최대풍속이 13.0 m/s 으로 관측되었다(Fig. 3a). 이 시각에는 태풍이 육상에 위치하기 때문에 해수면 온도는 온대저기압화 판단 근거에 해당되지 않았다(Fig. 3b). 따라서 [1단계] 2개의 조건 중에서 1개만 만족하기 때문에 온대저기압화 선언이 불가능하여 다음 단계의 위성영상 분석을 실시하였다.

Fig. 4는 온대저기압화 시점을 기준으로 6시간 전(Fig. 4a), 3시간 전(Fig. 4b), 온대저기압 시기(Fig. 4c), 그리고 3시간 후(Fig. 4d) 수증기 영상이다. 그림에서 빨간색 점은 태풍 중심이고, 화살표는 암역이 태풍중심으로 침투해 가는 모습을 의미한다.

온대저기압화 6시간 전(Fig. 4a)에는 태풍중심을 기준으로 제1사분면과 4사분면에 태풍이, 제2와 3사분면에 암역이 위치하고 있다. 시간이 지나면서 4사분면에서 암역이 파고들어(Fig. 4b) 50% 이상을 차지하였다. 온대저기압화 시점(Fig. 4c)에는 1사분면에만 태풍이, 나머지는 암역이다. 3시간이 경과한 뒤(Fig. 4d)에는 태풍중심도 사라지고 1사분면에만 태풍의 잔여 구름만 남아있다. 또한 시간 경과와 함께 대류가 활발한 구름역, 즉 흰색의 농도가 점점 열어지고 축소되었다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일 시간대별 적외영상이다. 그림에서 빨간 색 호는 bulge, 녹색 타원은 Ci streak, 주황색 타원은 cloud street를 의미한다. bulge는 시간 경과에 따라 큰 변화는 없었다. Ci streak는 시간의

경과와 함께 뚜렷해지는 특징을 보여준다. Fig. 5d에는 전 시간에 비하여 훨씬 넓은 지역에서 Ci streak가 나타나는데 이것은 상층 제트류와 태풍이 만나서 불연속면이 형성된 것이다. cloud street는 시간이 지남에 따라 점차 약화되어 온대저기압 시점(Fig. 5c)과 3시간 후(Fig. 5d)에는 구별하기 어려울 정도이다.

따라서, 위성영상 분석결과 [2단계] 기준 4개를 모두 만족하여 태풍예보관은 온대저기압화 선언이 가능하다. 온대저기압 시점에서 대기 중·상층의 건조역 침투 여부를 판단하기 위하여 [3단계] 단열선도를 분석하였다.

온대저기압화 시점을 기준으로 1시간 전과 11시간 후의 단열선도를 비교하였다(Fig. 6). 태풍과 가장 가까운 곳에 위치한 속초의 단열선도 자료 중 온도선과 이슬점 온도선을 이용하였다. 이슬점온도선은 현재의 수증기압을 포화수증기압으로 하는 온도선으로 연속적으로 습윤한 정도를 나타내는 지표로써 이용된다. 속초는 매일 09:00 LST와 21:00 LST 2회 고층관측을 실시한다. 온대저기압화 1시간 전인 7월 10일 21:00 LST에는 온도선(파란색 실선)과 이슬점온도선(파란색 점선) 사이의 폭이 좁았다. 즉, 습윤한 상태이다. 그러나 11시간 후에는 7월 11일 09:00 LST에는 온도선(빨간색 실선)과 이슬점온도선(빨간색 점선) 사이의 폭이 넓어졌다. 특히 400~500 hPa에서 두 선 사이의 폭이 커졌는데 이것은 주변의 차고 건조한 공기가 중·상층부터 태풍쪽으로 유입되는 증거이다. 단열선도 비교 결과 태풍은 7월 10일 21:00 LST부

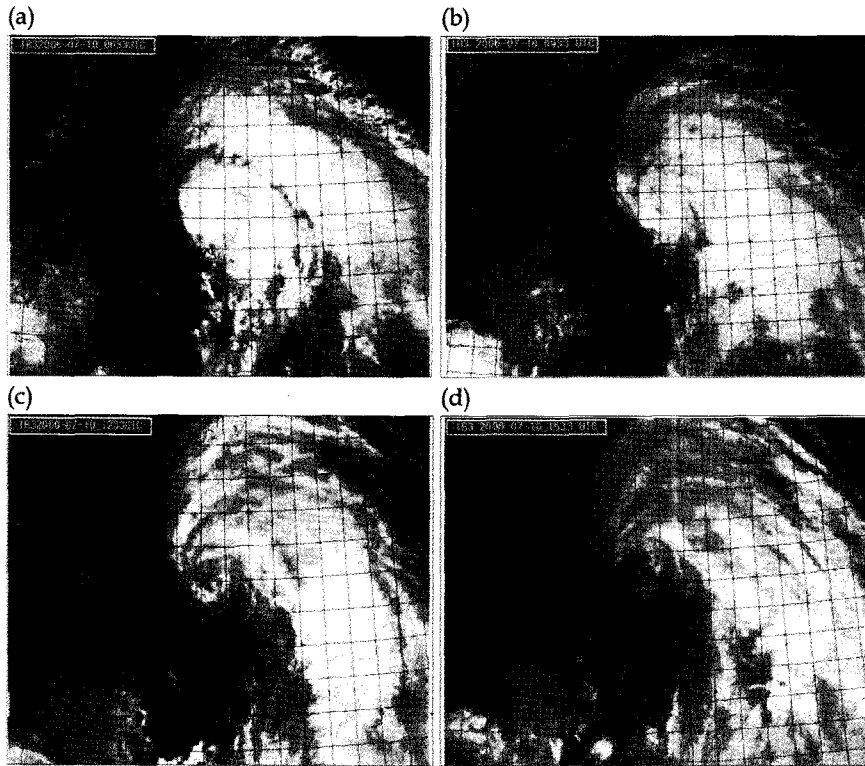


Fig. 4. WV imagery for (a) 15:33 LST 10 July(before 6 hours), (b) 18:33 LST 10 July (before 3 hours), (c) 21:33 LST 10 July(ET onset), and (d) 00:33 LST 11 July (after 3 hours) ET onset, respectively. The red circles denote the central position of typhoon and arrows present the dry area, respectively.

터 11일 09:00 LST 사이에 온대저기압화가 완료되었음을 알 수 있었다.

[4단계]는 지상의 전선 유무 판단이다. 현재 기상청은 동아시아 지상일기도를 09:00 LST부터 3시간 간격으로 1일 8회 생산한다. 지상전선의 유무를 판단하기 위하여 온대저기압 시점보다 4시간(Fig. 7a)전과 1시간(Fig. 7b)후를 비교하였다. 7월 10일 18:00 LST에는 태풍 주변으로 전선이 나타나지 않았으나, 10일 21:00 LST에는 동해상에 전선이 나타나서 태풍은 7월 10일 22:00 LST에 온대저기압으로 선언되었다. 지상전선이 태풍중심에서부터 이어질 필요는 없다. 그러나 일본 기상청 지상일기도와는 달리(그림 생략) 우리나라의 편집일기도는 지상전선의 표시가 점차 조정되는 것이 아니라 3시간 만에 갑자기 전선을 표시하고 있다. 향후 온대저기압화시 전선 유무의 판단을 위해서는, 우리 편집일기도 작성시 태풍 내부와 주변에서 시간에 따른 보다 연속적인 전선의 표시가 요구된다.

제3호 태풍 ‘에위니아(EWINIAR)’는 이와 같은 온

대저기압화 판단절차에 따라 7월 10일 22:00 LST에 온대저기압으로 변질되어 태풍의 일생을 마쳤다.

산산(SHANSHAN)

제13호 태풍은 9월 10일 21:00 LST에 미국 팜 서북서쪽 약 1140 km 부근 해상(16.8 N, 134.8 E)에서 발생하였다(Fig. 8). 이 태풍은 16일 03:00 LST부터 16일 21:00 LST까지 대만 동쪽해상에서 최대로 발달하여 강도는 매우 강, 크기는 중형으로 유지되었다. 이후 점차 약화되어 대한해협을 통과할 당시는 중심기압 950~970 hPa를 보였다. 이 태풍의 이동속도는 발생초기~전향까지 약 10 km/h의 이동속도를 보였다. 전향 이후에는 점차 이동속도가 증가하여 약 30 km/h로 이동하였다. 이 태풍은 19일 15:00 LST 일본 삿포로 서쪽 약 340 km 부근 해상에서 소멸하였다(차은정 외, 2007).

13호 태풍은 9월 19일 15:00 LST에 온대저기압으로 변질되었기 때문에 이 시각을 기준으로 전후 자료를 비교하였다. 해상에 태풍이 있었기 때문에 기상

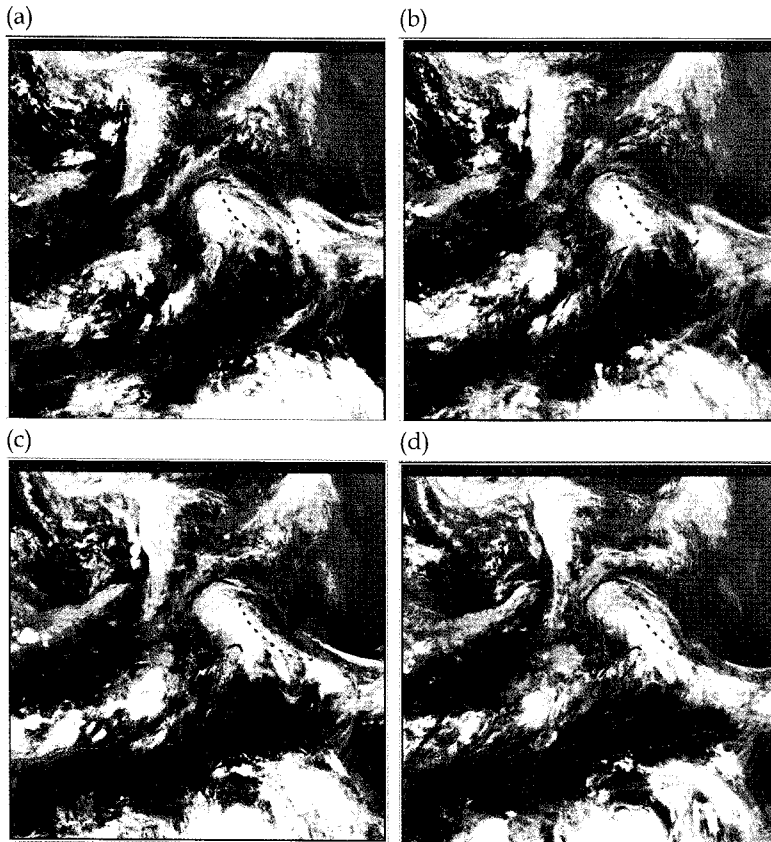


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for IR imagery. The red arc denotes the bulge, green ellipsoid means Ci streak, and orange ellipsoid represents cloud street, respectively.

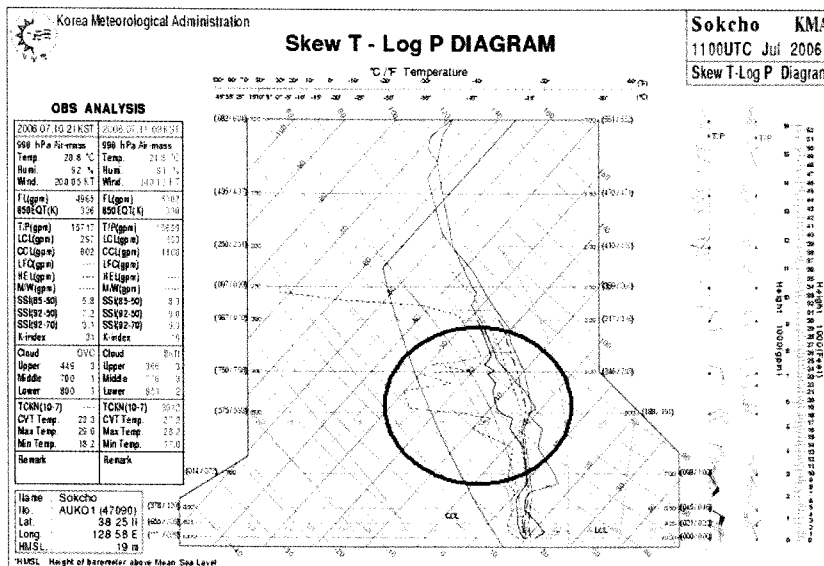


Fig. 6. Sounding at Sokcho for 21:00 LST 10 July (before 1 hour, blue), 09:00 LST 11 July (after 11 hours, red) ET onset, respectively. The solid lines indicate temperature line and dotted line represent dew point temperature line, respectively.

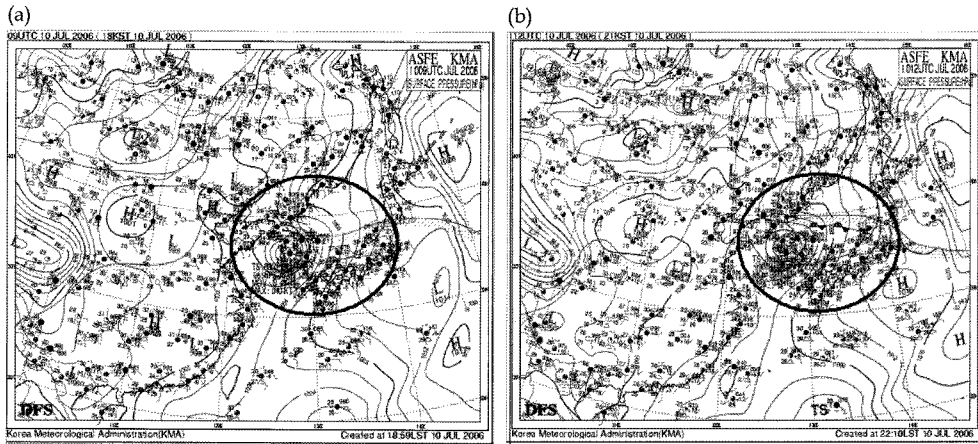


Fig. 7. Surface weather chart for (a) 18:00 LST 10 July (before 4 hours), and (b) 21:00 LST 10 July (before 1 hour), respectively.

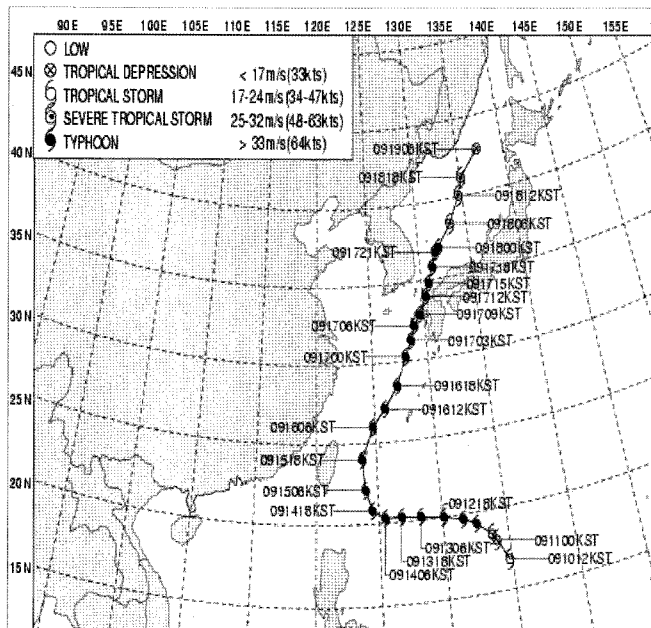


Fig. 8. Track of 0613 (SHANSHAN).

청에서 1일 2회 제공하는 QuikSCAT 해상풍 자료를 분석하였다. QuikSCAT 바람분포를 보면, 태풍을 중심으로 남·북쪽에 최대풍속이 20.0 m/s(Fig. 9a) 인 곳이 나타나서 17 m/s 이하 조건을 만족하지 못하였다. 해수면 온도는 태풍 중심으로부터 100 km 범위 내에서 20~21°C가 관측되어 21°C 이하 조건을 만족하였다(Fig. 9a). 따라서 [1단계] 기준 2개중 1개만 만족하기 때문에 온대저기압화 선언이 불가능하여 다음 단계인 [2단계] 위성영상 분석을 실시하였다. 기

상청에서 제공하는 QuikSCAT 자료는 바람분포 스케일을 별도로 제공하지 않고 있으나 색깔별로 등급별 풍속을 구분하여 사용하고 있다. 청록색 0~5, 파란색 5~10, 초록색 10~15, 노란색 15~20, 빨간색 20~25, 보라색 25~30, 검정색 30 이상이고 단위는 knots이다.

온대저기압화 시점을 기준으로 6시간 전(Fig. 10a), 2시간 전(Fig. 10b), 온대저기압 시기(Fig. 10c), 그리고 3시간 후(Fig. 10d) 수증기 영상을 나타내었다. 이 태풍은 온대저기압화 6시간 전(Fig. 4a)에 이미 압력

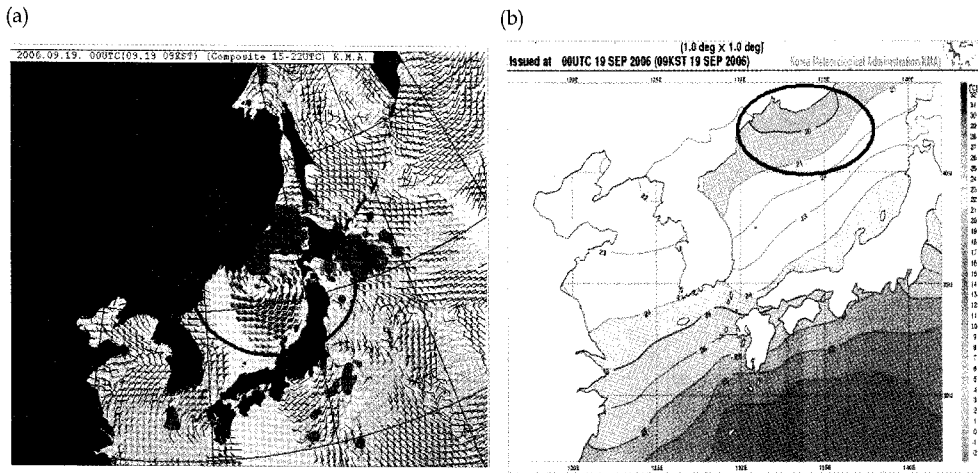


Fig. 9. Distribution of (a) wind speed observed by QuikSCAT (09:00 LST 19 September), and (b) SST (09:00 LST 19 September), respectively.

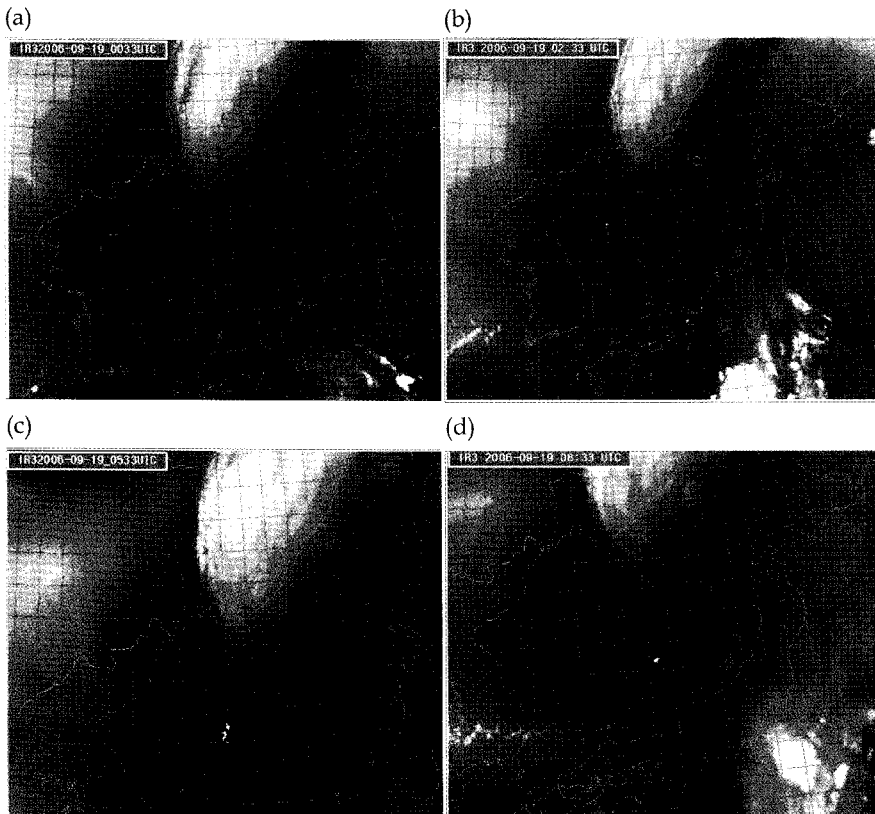


Fig. 10. WV imagery for (a) 09:33 LST 19 September (before 6 hours), (b) 11:33 LST 19 September (before 2 hours), (c) 14:33 LST 19 September (ET onset), and (d) 17:33 LST 19 September (after 3 hours) ET onset, respectively.

이 태풍의 대부분을 차지하였다. Fig. 11은 Fig. 10과 동일한 시간대의 적외영상이다. bulge는 시간경과에 따라 큰 변화는 없으나, 3시간 후(Fig. 11d)에는 명확

해졌다. Ci streak는 시간의 경과와 함께 뚜렷해지는 특징을 보여준다. Fig. 11d에는 전 시간에 비하여 훨씬 넓은 지역에서 Ci streak 가 나타나는데 이것은

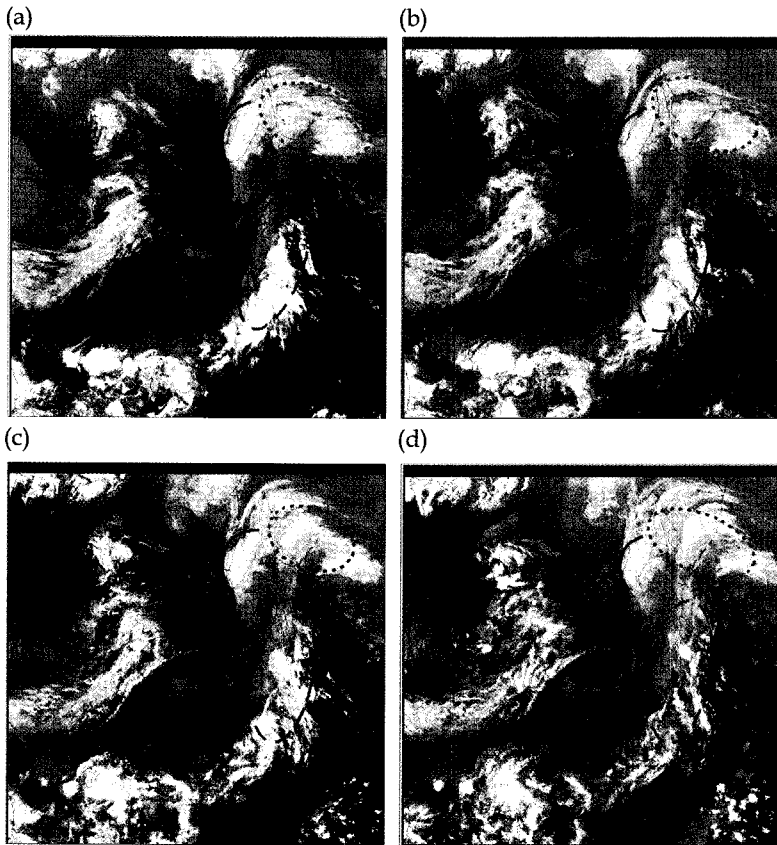


Fig. 11. Same as Fig. 10 except for IR imagery.

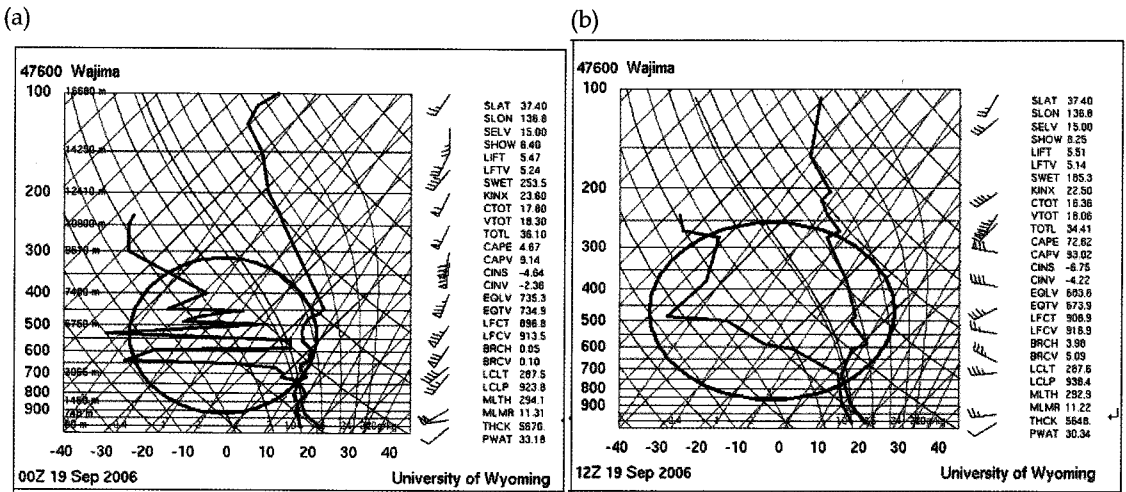


Fig. 12. Sounding at Wajima, Japan (a) 09:00 LST 19 September (before 6 hours), and (b) 21:00 LST 19 September (after 6 hours) ET onset, respectively.

상층 제트류와 태풍이 만나서 불연속면이 형성된 것이다. 대류운열은 시간이 지남에 따라 점차 약화되어

온대저기압 시점(Fig. 11c)과 3시간 후(Fig. 11d)에는 구별하기 어려울 정도이다.

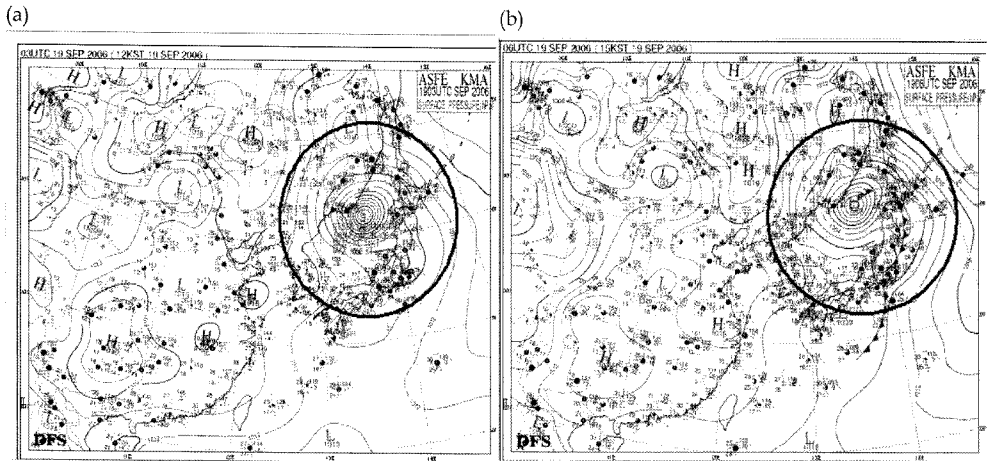


Fig. 13. Surface weather chart for (a) 12:00 LST 19 September (before 3 hours), and (b) 15:00 LST 19 September (ET onset), respectively.

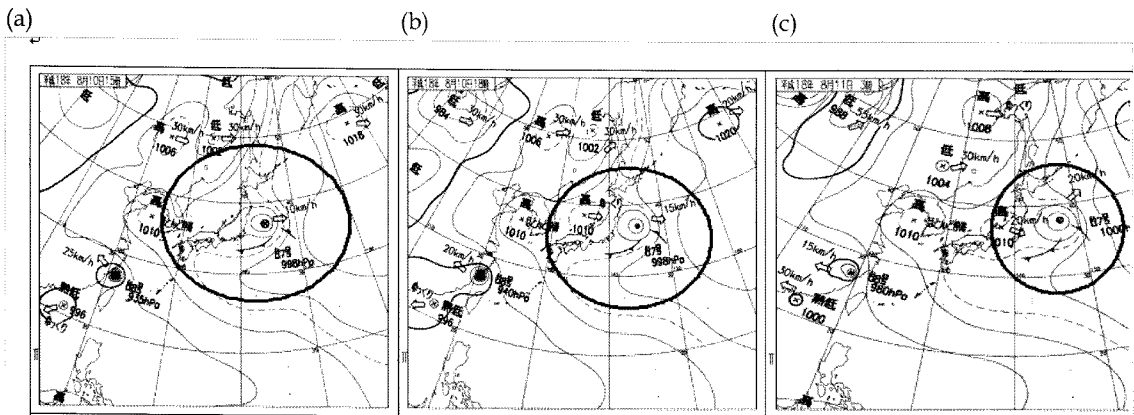


Fig. 14. Surface weather chart for (a) 15:00 LST 10 August (before 18 hours), (b) 18:00 LST 10 August (before 12 hours), and (c) 03:00 LST 11 August (before 6 hours), respectively (on the courtesy of Japan Meteorological Agency).

따라서, 위성영상 분석결과 [2단계] 기준 4개를 모두 만족하여 온대저기압화 선언이 가능하다. [3단계] 단열선도를 분석을 하여 온대저기압 시점에서 대기 중·상층의 건조역 여부를 알아보았다.

태풍위치에서 가장 가까운 일본의 Wajima의 단열선도를 온대저기압화 시점보다 6시간(Fig. 12a)전과 6시간(Fig. 12b)후를 비교하였다. 9월 19일 09:00 LST에는 지상에서 약 650 hPa까지는 온도선과 현재의 수증기압을 포화수증기압으로 하는 온도인 이슬점 온도선의 폭이 좁았다. 650 hPa 이상은 두 선의 폭이 넓은 고도와 좁은 고도가 반복되어 나타났다. 그러나 9월 19일 21:00 LST에는 700 hPa 이상의 대기 중·상층에서 온도선과 이슬점온도선의 폭이 넓어져서, 중·상층으로부터 태풍으로 차고 건조한 공기의 유입

이 뚜렷하였다. 따라서 9월 19일 09:00 LST부터 19일 21:00 LST 사이에 온대저기압화가 완료되었음을 알 수 있었다.

지상전선의 유무를 판단하기 위하여 온대저기압 시점보다 3시간(Fig. 13b)전과 온대저기압 시점(Fig. 13b)을 비교하였다. 9월 19일 11:00 LST에는 태풍 주변으로 전선이 나타나지 않았으나, 19일 15:00 LST에는 일본 삿포로 부근 해상에 전선이 나타났다. 제13호 태풍 ‘산산(SHANSHAN)’은 이와 같은 온대저기압화 판단절차에 따라 9월 19일 15:00 LST에 온대저기압으로 변질되어 태풍의 일생을 마쳤다.

지상일기도 분석 시 전선표시에 대하여 개선이 필요하다. 2006년 제7호 태풍 ‘마리아(MARIA)’의 온대저기압화 시(2006년 8월 11일 09:00 LST) 일본 기

상청의 지상일기도를 원으로 표시하였다(Fig. 14). 일본기상청은 온대저기압화 18시간 전(Fig. 14a)에 처음으로 전선을 표시하였다. 전선은 태풍중심과 연결되지 않은 형태이다. 지상전선의 유무를 판단하기 위하여 온대저기압 시점보다 18시간(Fig. 14a)전, 12시간(Fig. 14b)전, 6시간(Fig. 14c)전을 비교하였다. 8월 10일 15:00 LST부터 태풍 주변으로 전선이 나타났고 11일 03:00 LST까지 지속되었다. 일본 기상청에서는 8월 11일 03:00 LST 일본 기상청의 일기도에서 전선 출현을 확인한 후에 6시간 후인 8월 11일 09:00 LST에 온대저기압으로 선언하였다. 그러나 우리나라는 8월 11일 03:00 LST 온대저기압화를 선언하였다. 점진적인 전선분석 없이 한 번에 전선을 표시하고 있어서 앞으로 개선해야 할 필요가 있다.

결 론

본 연구에서는 현업태풍예보 관점에서 ‘온대저기압화 현업매뉴얼’ 개발과 2006년 사례에 적용하여 검증한 결과를 요약하였다. 분석절차는 4단계이고 관측 자료를 사용하여 태풍과 온대저기압의 구조 차이에 집중하였다. 제3호 태풍은 7월 10일 22:00 LST, 제13호 태풍은 9월 19일 15:00 LST에 온대저기압으로 변질된 것으로 판단하였다.

이번에 개발된 온대저기압 판단절차에서 가장 중요한 부분은 위성영상이다. 왜냐하면 위성영상은 매 30분 간격으로 준실시간으로 입수 가능하고 광범위한 지역 관측이 가능하기 때문이다. 2008년에는 가시영상과 마이크로파 영상을 추가할 예정이다. 그러나 문제점은 위성영상 분석은 분석자의 주관적 판단이 개입될 여지가 많아서 객관적인 위성영상 분석 시스템이 필요하고 전문가 육성이 시급하다.

대기 중·상층 건조역 침투 판별을 위한 단열선도는 위성영상 분석에 비하여 객관적이기는 하나 고층 관측지점 숫자가 적고 관측시간이 6~12시간 간격이라 실시간 자료 이용에는 어려운 점이 있다.

이와 같이 온대저기압화 판단에 있어서, 일본 기상청과 비슷한 부분도 있으나 상세한 분석절차에는 차이가 있다. 예를 들면, 단계별 판단 요소의 임계값을 정확하게 결정하지 않고 있다(RSMC Tokyo Dr. Sasaki 개인적 교신).

본 논문의 의의는 현업예보 차원에서 가능한 많은 관측자료를 준실시간으로 활용하여 온대저기압화에

대한 객관적 판정 절차를 마련한 것이다. 모든 예보는 반드시 정해진 시간에 발표되어야 하고 정확한 관측자료에 근거해야 하는 제약조건이 있다. 이 두 조건을 만족하기 위해서는 앞서 밝힌 바와 같이 온대저기압화에 대한 객관적인 정의가 아직까지도 명확하지 않기 때문에 관련 연구가 절실히 요구된다. 또한, 태풍예보 현업에서 개선점을 찾는 노력이 병행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구의 일부는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2007-2310)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 권혁조, 김지영, 2005, 태풍 민들레의 온대저기압화 과정에 대하여. 대기, 15, 17-25.
- 차은정, 이경희, 박윤호, 박종숙, 심재관, 인희진, 유희동, 권혁조, 신도식, 2007, 2006년 태풍 특징과 태풍 예보의 개선방향. 대기, 17, 299-314.
- Harr, P.A. and Elsberry, R.L., 2000, Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process. Monthly Weather Review, 128, 2613-2633.
- Hart, R.E., 2003, A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. Monthly Weather Review, 131, 585-616.
- Kitabatake, N., 2002, Extratropical transformation of Typhoon Vicki (9807): Structural change and the role of upper-tropospheric disturbances. Journal of Meteorological Society of Japan, 80, 229-247.
- Kitabatake, N., Hoshino, S., Bessho, K., and Fujibe, F., 2006, Structure and Intensity Change of Typhoon Songda (0418) Undergoing Extratropical Transition. Paper of Meteorological Geophysics, 58, 135-153.
- Klein, P.M., Harr, P.A., and Elsberry, R.L., 2000, Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage. Weather and Forecasting, 15, 373-396.
- 일본 기상청, 2005, 태풍정보의 표현방법 등에 관한 간담회. <http://www.jma.go.jp/> (검색일:2008. 2. 10.)

2008년 3월 11일 접수
2008년 4월 6일 수정원고 접수
2008년 10월 6일 채택