



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

저기압 통과 시 호우사례별 레이더
강우강도와 지상강수량 비교

濟州大學校 産業大學院

環境工學科

李永哲

2016 年 8 月

저기압 통과 시 호우사례별 레이더 강우강도와 지상강수량 비교

指導教授 許 喆 九

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2016年 8月

濟州大學校 産業大學院

環境工學科

李永哲

李 永 哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2006年 月

審査委員長 李 記 浩 (印)

委 院 趙 恩 一 (印)

委 院 許 喆 九 (印)



목 차

Summary	viii
1. 서 론	1
2. 이론적 고찰	3
2.1. 기상레이더	3
2.1.1. 기상레이더 관측원리	3
2.1.2. 기상레이더 강우량 추정	4
2.1.3. 우리나라 기상레이더 현황	7
2.2. 강우량 예보	9
2.2.1. 수치모델과 강우량 예보	9
2.2.2. 제주도 강우량 예보	14
2.2.3. 기상특보 종류와 기준	16
3. 연구자료 및 방법	24
3.1. 연구자료	24
3.1.1. 연구대상지역	24
3.1.2. 연구대상기간	24
3.1.3. 연구대상자료	25
3.2. 연구방법	25
3.2.1. 강우특성분석	25
3.2.2. 호우특보 적중률과 레이더 추정값 비교	26

4. 결과 및 고찰	27
4.1. 제주도 강우 특성	27
4.1.1. 월별 계절별 강우 특성	27
4.1.2. 지역별 강우특성	31
4.2. 제주도 호우특보 분석	38
4.2.1. 호우현황	38
4.2.2. 종관 기압계 특성	41
4.2.3. 호우시 기상조건	44
4.3. 호우특보 시 기상레이더 추정강우량과 관측값 비교	49
4.3.1. 호우특보 시 기상레이더 강우에코 이동속도	49
4.3.2. 호우특보 시 예상강우량과 지상강우량의 상관관계 분석	51
4.3.3. 레이더 강우강도와 지상강우량의 비교	56
5. 결론	61
참고 문헌	63

List of Tables

Table 1. Various Z-R Relationship with reflectivity and rain intensity	6
Table 2. The a and b values in R-Z Relationship obtained the various area of the world	7
Table 3. The a and b values in R-Z Relationship obtained the various area of the world	8
Table 4. Location of the weather radar sites in Jeju Island	8
Table 5. The kind of the numerical model and the operating equipment used from 1991 in Korea	11
Table 6. The regional forecasting area of the inland in Jeju Island	14
Table 7. The local forecasting area of the inland in Jeju Island	15
Table 8. Criteria of heavy rain advisory transition process established by Korea Meteorological Administration	16
Table 9. The kind of weather advisory/warning in Korea	18
Table 10. Criteria for heavy rain special report statement in Korea	18
Table 11. The kinds of weather advisory/warning in Japan ¹⁹	19
Table 12. Criteria for heavy rain special report statement in Japan	19
Table 13. The kinds of weather advisory/warning in United Kingdom	21
Table 14. Criteria for heavy rain special report statement in United Kingdom	21
Table 15. The kinds of weather advisory/warning in China	23
Table 16. Weather Impact Metrix of China	23

List of Figures

Fig. 1. The history of the meteorological numerical model and the Super computer in Korea	10
Fig. 2. Example of the numerical weather chart (a: Geopotential high, relative vorticity and temperature at 500 hPa, b: Streamline and Isotach(>25kts) at 700 hPa, c: T-Td, Td and wind at 850 hPa, d: Precipitation and sea level pressure at Surface)	12
Fig. 3. Satellite image sample	12
Fig. 4. Weather radar image sample	12
Fig. 5. The forecasting procedure produced by Korea Meteorological Administration	13
Fig. 6. The map of forecasting area in Jeju Island(North, West, South, East and Mt area)	15
Fig. 7. The weather forecasting and the special report statement sample in Japan Meteorological Administration)	20
Fig. 8. The weather forecasting and the special report statement sample in United Kingdom Meteorological Administration(http://www.metoffice.gov.uk)	20
Fig. 9. Weather Impact Metrix of United Kingdom	21
Fig. 10. The weather forecasting and the special report statement sample in China Meteorological Administration (http://www.cma.gov.cn)	22
Fig. 11. The special report statement sample and the three step for frost in China Meteorological Administration (http://www.cma.gov.cn)	22
Fig. 12. The location of Jeju Island and the weather observation station	24
Fig. 13. Average annual rainfall based on 1981-2010 normals in Korea	28
Fig. 14. Average annual rainfall from 2011 to 2015 in Jeju Island	28
Fig. 15. Annual number of rainy days from 2011 to 2015 in Jeju Island	29
Fig. 16. Average of monthly rainfall in Jeju Island	29

Fig. 17. Average monthly number of rainy days in Jeju Island	30
Fig. 18. Average seasonal rainfall in Jeju Island	30
Fig. 19. Average seasonal number of rainy days in Jeju Island	31
Fig. 20. Average annual rainfall according to the local zone in Jeju Island	32
Fig. 21. Annual number of rainy days for the local zone in Jeju Island	33
Fig. 22. Annual rainfall for the local zone in Jeju Island	34
Fig. 23. Average seasonal rainfall from 2011 to 2015 for the local zone in Jeju Island	35
Fig. 24. Average seasonal number of rainy days from 2011 to 2015 for the local zone in Jeju Island	36
Fig. 25. Average monthly rainfall for 6 automatic weather sites and 4 surface observation stations from 2011 to 2015	37
Fig. 26. The comparison of monthly average rainfall with the elevation	37
Fig. 27. The frequency of special weather reports issued from 2011 to 2015 in Jeju Island	39
Fig. 28. The frequency of the pressure patterns occurred when special heavy rain reports was issued from 2011 to 2015 in Jeju Island	39
Fig. 29. The number of the heavy rain special reports news flashed forecasting area in Jeju Island from 2011 to 2015	40
Fig. 30. The number of the occurrences and the hitting cases of the special heavy rain reports according to the pressure patterns occurred from 2011 to 2015 in Jeju Island	40
Fig. 31. The rainfall resulted from the 12th typhoon 'Nakri' landed on Jeju Island on August 2, 2014	40
Fig. 32. The number of the special heavy rain reports according to the pressure patterns occurred in Jeju Island	42
Fig. 33. The number of the special heavy rain reports according to the pressure patterns occurred form 2011 to 2015 in Jeju Island	42
Fig. 34. The rainfall duration averaged for the pressure patterns during the period of special heavy rain reports issued from 2011 to 2015	43

Fig. 35. The frequency of the prevailing wind direction at the isobaric surface of 850 hPa according to the pressure patterns during the period of special heavy rain reports issued from 2011 to 2015 in Jeju Island	44
Fig. 36. The frequency of the prevailing wind direction at the isobaric surface of 850 hPa according to the local zone during the period of the special heavy rain reports issued for 2011 to 2015 (a: mT, b: Ty, c: Station-front, d: Trough, e: Low pressure)	45
Fig. 37. The frequency of the prevailing wind direction at the isobaric surface of 850 hPa according to the pressure patterns for during the period of special heavy rain reports issued form 2011 to 2015 in Jeju Island(a: Jeju City, b: Gosan, c: Seogwipo City, d: Seongsanpo, e: Mt. Hallasan)	46
Fig. 38. Surface weather chart(00UTC, Apr. 6, 2013)	47
Fig. 39. Total precipitable water averaged for the pressure patterns during the period of special heavy rain reports issued	48
Fig. 40. Unstability index estimated from the numerical weather model during special heavy rain reports issued from 2011 to 2015 in Jeju Island	48
Fig. 41. The frequency of the moving velocity of radar echo within the effective detection range of 240 km	50
Fig. 42. The moving velocity of radar echo averaged for pressure patterns during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island	50
Fig. 43. The number of appearance in each class of actual rainfall during heavy rainfall events occurred from 2011 to 2015 in Jeju Island	52
Fig. 44. The number of appearance in the class of actual rainfall during heavy rain events occurred from 2011 to 2015 in Jeju Island	52
Fig. 45. The number of appearance in the classes of real rainfall according to pressure patterns during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island	53
Fig. 46. The correlation between predicted and measured rainfall during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island	54
Fig. 47. The correlation between predicted and measured rainfalls with the local zone during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island	55

Fig. 48. The correlation between the predicted and the measured rainfalls with the elevation during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island … 56

Fig. 49. Compare of the rainfall intensity Between rain gauge and weather radar on July 11. 2015 … 57

Fig.50. Comparison of the rainfall intensities between rain gauge of weather radar echo on July 8, 2015(a:Jeju City, b:Seogwipo City, c:Sunheul, d:Eurimok, e:Sungpanak, f:Wesseoleum) … 59

Fig.51. Comparison of the rainfall intensities between rain gauge of weather radar echo on August 8, 2015(a:Jeju City, b:Seogwipo City, c:Sunheul, d:Eurimok, e:Sungpanak, f:Wesseoleum) … 60

A Comparison of Radar Rainfall Intensity with Ground Rainfall in Heavy Rainfall Cases occurred by Low Pressure System

Young-Cheol Lee

Department of Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University

Supervised by Professor Chul-Goo Hu

Summary

The Korean Peninsula located in the mid-latitudes is under the influence of westerlies. The low pressure trough and the low-pressure approaching from south-west often pass through the Korean Peninsula. Jeju Island, positioned to the southwest of the Korean Peninsula, is the first to be affected by the low pressure trough and/or the low-pressure.

This study was performed to analyze the average annual rainfall for 1981-2010 normal and rainfall and the issuing situations of the special weather reports for the last five years (2011-2015) in Jeju Island. In this study, we try to investigate the relationship between the predicted rainfall, the estimated rainfall by weather radar echo and the observed rainfall and to understand the characteristics of local rainfall on Jeju Island when the special weather reports were issued.

Jeju Island is one of the pluvial sites in Korea. Compared with normals, the average annual rainfall for the last five years were increased and the number of rainy days were decreased in Jeju Island. During the last five years, special weather reports for heavy rain were issued totally 288 times and were most frequently issued at a mountainous area.

Based on the data of actual rainfall during the period of special heavy rain reports, it could be concluded that the predicted rainfall were overestimated in the case of the actual rainfall of below 50 mm, while those were underestimated in the case of above 100 mm. In the eastern part of Jeju Island, there was a relatively good relationship between the predicted and actual rainfalls. When the special heavy rain reports were issued, correlation between the predicted and actual rainfalls was very low in Jeju Island.

It could be found that the very weak correlation between the actual rainfall and the estimated rainfall by radar echo in this study. Therefore, it is necessary to improve the conventional equation, $Z = 200 R^{1.6}$, by considering the geographic features of Jeju Island in order to exactly estimate the rainfall by using weather radar echo.

I. 서 론

끊임없이 변화하는 대기는, 일반적으로 대기현상의 크기 즉 규모에 따라 대규모(Macroscale, 2000 km 이상), 중규모(Mesoscale, 2~2000 km), 미규모(Microscale, 2 km 이하)로 구분할 수 있다^{1,2,3,4,5}. 중규모는 다시 200~2,000 km의 범위를 중(meso)- α , 20~200 km 범위를 중(meso)- β , 그리고 2~20 km 범위를 중(meso)- γ 규모로 세분화 한다^{1,2,3,4,5}. 중규모에 비해 시·공간적으로 규모가 작은 중규모 기상현상(태풍, 집중호우, 우박, 돌풍, 뇌우, 번개 등)은 예측이 어렵고 불확실성이 커 막대한 재산피해와 함께 인명피해를 가져오기 때문에 세밀하고 정확도 높은 예보기술이 요구되고 있다.

중규모 기상현상에 대한 선행연구는 중규모시스템의 발생 및 발달, 이동에 관하여 기상관련 종사자, 학계 등에서 많이 이뤄져 왔고 앞으로도 계속 연구가 이루어질 것이다.

호우는 중규모 요란에 의한 구름과 지형으로 인해 발생된 구름과의 상호작용, 대기안정도, 바람의 세기, 산의 높이, 상승응결고도 등과 관련이 깊으며, 대기의 풍상측과 풍하측 수렴이 있는 지역에서 강수대가 형성된다^{2,5}. Corfidi는 Mesoscale convective system (MCS)의 이동 전파성분은 하층제트의 방향과 속도에 의해 결정되고, 벡터를 사용하여 현업에서 쉽게 활용될 수 있음을 제시하였다³⁹. 우리나라의 호우 발생 시스템은 여러 가지 요인에 의해 형성되는데 발달한 저기압에 의해서, 태풍의 직·간접영향⁷, 지상저기압과 상·하층제트의 상호작용⁸, 북태평양 고기압 가장자리로부터 다량의 수증기 유입 등과 같이 호우 발생요인은 다양하고 복합적으로 나타난다^{7,8}.

지리적으로 중위도에 위치한 한반도는, 남서쪽에서 다가오는 저기압과 북상하는 태풍이 동경 125도를 전후하여, 북위 25도에서 30도 사이에서 전향해 북상하면서, 위험기상이 자주 나타난다. 특히, 제주도는 한반도의 남서쪽 끝에 위치하여, 가장 먼저 위험기상을 맞이하고 있다.

제주도는 중앙에 한라산이 위치하여, 저기압이 접근 할 때 남동에서 남서풍을 정면으로 받게 되는, 한라산의 경사면을 따라 강제상승, 불안정화 된 습윤공기 또는 조건부 불안정의 상태가 절대불안정으로 발전하여, 형성된 대류운에서 특정지역에 호우를 내리는 경우가 많다고 하였다²⁵. Corfidi가 제시한 벡터법을 제주도의 호우 사례에 적용하여 호우셀의 이동방향에 적용, 높은 예측 결과를 얻기도 했다⁴⁰.

제주지역은 하층에 강한 남서류가 유입될 때, 한라산 정상부근과 남쪽으로 호우가 발생한다. 대기가 매우 불안정한 지표면 부근에서 15 knots이하의 약한 바람이

부는 경우, 한라산을 경계로 한쪽은 저기압성 소용돌이, 다른 한쪽은 고기압성 소용돌이가 발생한다. 저기압성 소용돌이가 발생한 지역에서, 호우는 무관하지 않은 것으로 나타나고 있다. 남~서풍류가 유입될 때 동부지역으로 저기압성 소용돌이가 발생하고, 이 저기압성 소용돌이는 불안정한 대기가 합쳐지면서 국지성 호우가 나타나고 있다. 국지성 호우로 인한 피해가 많이 발생하고 있다.

본 연구는 제주도 평년 연평균강우량과 최근 5년(2011~2015) 동안 강우량, 호우특보현황을 분석하여 제주도 호우특보 발표 시 예상강우량, 기상레이더의 강우량 추정값, 강우량 관측값과의 상관관계를 알아보고 제주도 고도별, 지역별 강우 특성을 파악하여 향후 초단기예보와 호우특보 운영 시 참고자료로 활용하고자 한다.

Ⅱ. 이론적 고찰

2.1 기상레이더

2.1.1 기상레이더 관측원리^{16,17)}

레이더(Radio Detection and Ranging, RADAR)는 목표물을 향해 전자파를 발사해서 목표물에 부딪혀 후방 산란되어 되돌아오는 전자파를 수신, 목표물의 강도와 목표물까지의 거리를 측정하는 원격 관측 장비이다. 기상관측을 위해 레이더가 처음 이용된 것은, 1944년 캐나다의 Wilson¹⁸⁾에 의해 시작되었으며, 1946년 미국의 뉴저지에서 뇌우관측에 레이더가 사용되면서, 본격적인 기상레이더의 개발이 시작되었다. 특히, 도플러기능을 탑재한 기상레이더의 연구가 1970년대에는 활발하게 진행되었고, 도플러기능으로 우박, 토네이도, 마이크로버스트를 탐지하는 기능을 갖춘 Weather Surveillance Radar with Doppler Capability (WSR-88D, Commissioned in 1988)가 미국에서 1988년 개발되면서, 중규모 위험기상 감시기능에 기상레이더가 중요한 역할을 담당하게 되었다^{16,17)}. 최근에는 목표물의 구성에 대한 특성을 분석할 수 있는 이중편파 레이더(Dual polarimetric radar)가 각광을 받고 있는데, 이중편파 레이더는 수직편파(vertical horizontal)와 수평편파(horizontal polarization)를 교대로 발사하여 관측한다. 미국기상청은 2009년부터 현업용 WSR-88D 레이더에 이중편파 기능을 추가하여 이중편파레이더로 활용하고 있으며, 우리나라에서도 백령도기상레이더를 시작으로 점차 이중편파레이더로 교체를 추진하고 있다.

기상레이더 시스템은 레이더빔을 대기에 방사하여 목표물인 수적에 부딪혀 산란된 일부의 미약한 신호를 받아들이는 안테나(antenna), 송·수신기와 안테나 사이에서 전자파가 이동할 수 있도록 하는 통로역할을 하는 도파관(waveguide), 변조기(modulator), 레이더에 의해 방사되는 전자파가 안테나를 통해 공간으로 방출하는 장치인 송신기(transmitter), 송·수신전환스위치(duplexer), 수신기(receiver) 및 표출시스템(display)으로 구성된다. 수신기는 민감도, 선택도, 신뢰도가 우수한 슈퍼헤테로다인(superheterodyne) 방식을 대부분 사용하고 있다. 표출시스템은 수신된 신호를 모니터에 나타내는 역할을 하는 것인데, x축에 레이더로부터 목표물까지 거리, y축에 강도를 나타내어 레이더로 관측한 목표물의 강도 변화를 나타내는 표출방법이 가장 기본적인 레이더 영상표출 형식이다^{16,17)}. 연속적인 빔이 거리상으로부터 표출되며, 기준선상의 신호의 높이는 수신기와 표출 스크오프의 역학적 범위(dynamic range)에 의해 부여된 제한 조건 내에서 수신신호의 세기에 비례한다.

2.1.2 기상레이더 강우량 추정^{16,17)}

기상레이더는 마이크로파를 발사하여 비구름에 반사되는 강도를 측정하여 강우량을 계산한다. 즉 기상목표물을 탐지하여 정량적으로 계산하는데 이 때 레이더 수신기 내부에서 레이더 방정식이 사용된다.

레이더 방정식은 레이더 에코 값을 얻는데 기초가 되는 방정식으로 기상 레이더로 목표물을 탐지하여 정량적으로 계산하는데 레이더 수신기 내부에서 레이더 방정식이 사용된다. 이 레이더 방정식은 안테나에 수신되는 평균 수신전력, 송신전력, 안테나 크기, 레이더 파장, 펄스 체적 내에 있는 빔방울 입자의 특성에 의해 좌우된다. 식(1)은 이들의 관계를 나타내는 레이더 방정식이다.

$$P_r = \left(\frac{\pi^3 P_t G \theta \phi h}{1024 \lambda^2 \ln 2} \right) \frac{|k|^2 Z}{r^2} \quad (1)$$

여기서 P_r 은 평균수신전력, P_t 는 최대 송신전력, h 는 펄스 폭(m), G 는 안테나 이득, θ 는 빔 폭(radian), λ 는 파장(cm), k 는 유전률(물인 경우 0.93, 얼음인 경우 0.23), Z 는 수상입자에 의한 레이더 반사도 인자(radar reflectivity factor), r 은 목표물까지 거리, 즉 범위(range)이다^{16,17)}. 이 식에서 괄호 안에 있는 값은 레이더 종류와 기능에 따라 결정되고, 유전률 $|k|^2$ 값을 가변적으로 채택할 수 있지만 대부분 얼음보다 물 현상을 목표로 하기 때문에 물에 대한 굴절지수이므로 레이더 상수 C 로 대체시킬 수 있다^{16,17)}. 따라서 식(1)은 다음과 같이 간단한 레이더 방정식으로 바꿔 쓸 수 있다.

$$P_r = \frac{CZ}{r^2} \quad (2)$$

이 레이더 방정식은 Marshall Palmer(M-P)에 의해서 제창되었다.

Automated Surface Observing System (ASOS)이나 Automatic Weather System (AWS)는 지상에서 관측되는 강우량계로 정확한 강우량 정보이다. 지상에서 관측되는 강우량은 어느 한 지점에 대한 강우량 정보로, 넓은 지역에 대한 강우량 정보를 얻기에는 무리가 있다. 지상의 강우량 정보는 고도와 지형 등 국지적 특성에 따라 편차가 심하게 나타나 국지예보구역 또는 특정지역 강우량을 정확하게 파악하기에는 어려움이 있다.

기상레이더는 이러한 단점을 보완하여 면적강우량을 산출한다. 기상레이더 관측을 통하여 얻어지는 강우량 정보는, 기상예보의 재난, 방재 등 자연재해 최소화 뿐

만 아니라 지하수확보, 산업용수, 강우연구 등 폭넓게 사용되고 있다.

기상레이더에 의한 강우량 추정은, 구름에 덮여있는 강우입자에서 반사되는 강도를 측정하여 환산하는 간접 강우량이므로, 지상에서 관측되는 강우량과는 오차가 발생한다. 이러한 오차를 최소화하기 위해 강우강도(R)와 레이더 반사도 인자(Z)의 관계에 대한 다양한 경험식들을 제시하고 있다(Table 2). 보편적으로는 실험적 반사도 측정치(Z)가 강우량(R)과 관계되는 것을 볼 수 있다.^{16,17)}

$$Z = aR^b \quad (3)$$

여기서 a 및 b는 실험적으로 선정된 상수이며, Z는 mm^6 / m^3 이고, R은 mm/h 이다. 널리 사용되는 공식(4)의 한 가지 형태는 $Z=200 R^{1.6}$ 이다. 이는 층상형 강우형태에 대해서 얻어진 경험식이다. 산악지역에 있어서 얻어진 관계식은 $Z=31 R^{1.71}$, 심한 뇌우성 비에 대한 관계식은 $Z=486 R^{1.37}$ 이고 강설에 대한 관계식은 $Z=2000 R^{2.0}$ 이다. R-Z 관계식의 선택은 기상레이더의 관측에서 비의 형태를 기초로 해 이루어진다. 일반적으로 대류성 강도가 증가하면 계수 a는 증가하고 지수 b는 감소한다. 상수를 잘 선택한다는 것은 Table 3에서도 알 수 있듯이 강우량 측정에 있어서 중요한 문제이다. 모든 강수는 $Z=200 R^{1.6}$ 을 사용하는 것이 무난하고, 상수는 강수 유형에 맞도록 조정되는 것이 타당하다. Table 1은 R-Z관계식에 의한 강우량 값이다.

Table 1. Various Z-R Relationship with reflectivity and rain intensity³⁶⁾

(Unit = mm/hr)

Reflectivity (dBZ)	$Z=2000 R^{2.0}$	$Z=486 R^{1.37}$	$Z=200 R^{1.6}$	$Z=31 R^{1.71}$	비 고
23	0.3	0.5	1.0	2.9	
24	0.3	0.6	1.2	3.4	
25	0.3	0.7	1.3	3.9	
26	0.4	0.8	1.5	4.4	
27	0.5	1.0	1.7	5.0	
28	0.5	1.2	2.0	5.8	
29	0.6	1.4	2.3	6.6	
30	0.7	1.7	2.7	7.6	
31	0.8	2.0	3.2	8.7	
32	0.9	2.3	3.6	9.9	
33	1.0	2.8	4.2	11.4	
34	1.1	3.3	4.7	13.0	
35	1.2	3.9	5.6	14.9	
36	1.4	4.6	6.4	17.1	
37	1.6	5.5	7.5	19.5	
38	1.8	6.5	8.6	22.3	
39	2.0	7.7	10.6	25.6	
40	2.2	9.0	11.5	29.3	
41	2.5	10.8	13.3	33.5	
42	2.8	12.7	15.4	38.3	
43	3.1	15.0	17.8	43.9	
44	3.5	17.8	20.5	50.2	
45	3.9	21.0	23.6	57.4	
46	4.4	24.9	27.3	65.7	
47	5.0	29.4	31.6	75.2	
48	5.6	34.8	36.4	86.0	
49	6.3	41.2	42.1	98.4	
50	7.0	48.8	48.6	112.6	

이처럼 기상레이더의 R-Z 관계식으로 강우강도를 추정할 수 있다. 강수시스템의 강우강도를 결정하기 위한 R-Z 관계식은 국내·외에서 다양하게 연구가 진행되고 있다.

외국에서는 여러 연구자들에 의해 제안된 다양한 형태의 기상레이더 R-Z 관계식이 사용하고 있다. Table 2는 세계 여러 지역에서 사용하고 있는 R-Z 관계식이다.

Table 2. The a and b values in R-Z Relationship obtained the various area of the world^{36,38)}

Research	Area	Z = a · R b	
		a	b
Blanchard(1953)	Hawaii	31	1.71
Mai(1960)	Japan	700	1.6
		80	1.5
Wilson(1963)	Norman, Oklahoma	45	1.43
		241	1.45
		141	1.72
Doherty(1963)	Ottawa, Canada	70	1.42
		38.4	1.63
Aoyagi(1964)	Tokyo	100	1.4
Diem(1966)	Karlsruhe, Germany	227	1.31
Berjul Jew(1966)	Valday, USSR	340	1.4
Mueller and Sims(1966)	Florida	286	1.43
Fujiwara(1967)	Hawaii	80	1.39

2.1.3 우리나라 기상레이더 현황

기상레이더는 우리나라 전역을 감시하고 여름철 중규모 악기상의 조기감시에 중요한 역할을 하고 있으며, 사면이 해양으로 둘러싸인 제주도는, 해양에서 급격히 발달하는 대류셀, 호우감시 등 매우 유용하게 활용하고 있다. 현재, 기상청에서는 기상레이더 10개소(백령도, 관악산, 오성산, 진도, 고산, 광덕산, 강릉, 면봉산, 구덕산, 성산)를 운영 중에 있다. 현재 성산과 고산에서 운영되고 있는 기상레이더 특성은 Table 3과 같다.

기상청에서 운영하고 있는 기상레이더의 위치와 해발고도를 살펴보면, 관악산기상레이더는 경기도 과천시 중앙동 641 m, 백령도기상레이더는 인천시 옹진군 백령면 187 m이며, 광덕산기상레이더는 강원도 화천군 사내면 1,064 m이다. 동해기상레이더는 강원도 강릉시 사천면 98 m이고, 오성산기상레이더는 전라북도 군산시 성산면 234 m이며, 진도기상레이더는 전라남도 진도군 의신면 500 m이다. 그리고 면봉산기상레이더는 경상북도 청송군 현서면 1,122 m이며, 구덕산기상레이더는 부산광역시 서구 서대신동 549 m에 위치하고 있다.

제주도 기상레이더 설치 위치는 Table 4와 같다.^{1,2)} 특히 제주도는 동서로 기상레이더가 위치하여 해상으로 급격히 발달, 북상하는 위험기상을 조기에 탐지하여, 재

해예방에 선제적 대처를 하기 위함이다. 또한, 제주도 중앙에 한라산이 영향으로 기상레이더의 빔 차폐 현상이 나타나, 제주도서쪽에서는 제주도동쪽, 제주도동쪽에서는 제주도서쪽으로 기상레이더 빔차폐 영향을 최소화하여 제주도 동쪽과 서쪽에서 북상하는 중규모 요란 감시에 용이하기 때문이다.

Table 3. The a and b values in R-Z Relationship obtained the various area of the world

Item	Performance		
Transmitter	Modulation Tube		Klystron
	Frequency(MHz)		2,890
	Pulse width	short	1.0 μ s
		long	2.5 μ s
	Dual PRF	short pulse	600, 400Hz
		long pulse	250Hz
Possession Frequency Width		8 M	
Receiver	Dynamic range		95 dB
	MDS		-110 dBm
Antenna	Antenna diameter		8.5 m
	Beam width		1°
	Antenna Gain		44 dB
Manufacture Co.	Gematronik(Germany)		

Table 4. Location of the weather radar sites in Jeju Island

Radar site name	Location		Address	Height above the sea	Antenna height
	North latitude	East longitude			
Seongsan	33.23°	126.52°	Seogwipocity Seongsan-eup Sinsanri Jejucity	17.8m	59.0m
Gosan	33.17°	126.09°	Hangyeong-myeon Gosanri	71.5m	91.0m

2.2 강우량 예보

2.2.1 수치모델과 강우량 예보¹⁹⁾

수치모델예보는 1904년 빌헬름 비야크니스가 컴퓨터를 이용하여 계산하면서, 수치예보의 가능성을 이론적으로 제안하였고, 1922년 수작업 수치계산에 의한 일기예보를 영국의 L.F.리처드슨이 시도하였다¹⁹⁾. 1950년에는 폰 노이만, C.A.로즈비, G.J.차니, A.엘리아센 등이 최초의 수치예보에 컴퓨터를 이용하였고, 1954년 세계 최초로 수치예보를 기상업무에 도입한 국가는 스웨덴 기상청이다. 이후 1957년 미국과 일본 기상청에서 수치예보를 기상업무에 도입하면서, 세계 여러 나라로 수치예보가 전파되었다¹⁹⁾.

1950년대 후반부터 기상 선진국들은 수치예보를 기상업무에 적용하였고, 우리나라는 이보다 30년 가까이 늦은 1980년대 후반에 수치예보를 도입하였다. 1985년 수치예보 현업화를 위한 '전산예보 도입 계획'을 수립하고, 아일랜드, 스웨덴 등 유럽 중견국의 수치모델을 도입하여, 우리나라에 맞게 변환하기 위한 연구과제에 착수하여, 1991년부터는 우리나라 최초의 현업용 모델인 아시아지역모델(ALAM)과 극동아시아지역모델(FLAM)을 운영하고, 1990년 말에는 수치예보 업무를 전담할 수치예보과를 신설하여 본격적인 수치예보 업무 및 서비스에 착수하였다¹⁹⁾.

기상청은 1988년 수치예보모델의 운영을 위해 최초의 수치계산용 서버로 CDC사의 Cyber 932 기종을 도입하여, 한국과학기술연구원(KIST)이 도입한 슈퍼컴퓨터 Cray-2S 장비도 활용하였다. 1995년에는 고성능 수치계산용 서버인 Fujitsu사의 VPX 220 장비를 도입하였고, 1997년 전지구예보모델 운영을 시작함으로써 우리나라 독자적 수치예보의 시대가 개막되었다. 슈퍼컴퓨터 1호기 도입이 시작된 1999년부터는, 슈퍼컴퓨터 기반의 고해상도 수치예보모델을 예보 업무에 활용하고 있다.

현재 기상청에서는 슈퍼컴에서 Met Office Unified Model (UM전구모델, UM지역모델) 그리고 국지모델 등을 종합하여 동네예보, 중기예보 등을 생산하고 있다. 전세계 00, 12 Coordinated Universal Time (UTC) 관측된 지상관측자료와 상층관측(기준고도 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, 300 hPa, 200 hPa, 100 hPa)자료를 기반으로 생산된 실황일기도와 수치모델자료를 검토하고, 위험기상에 대한 과거 일기패턴에서 발생했던 기상요소값과 위험기상지역, 예보경험 등 복합적 고려를 통한 일기예보를 생산한다. 200 hPa, 300 hPa 일기도는 jet 위치, 500 hPa는 기온과 단파골의 이동, 700 hPa에선 단파골과 저습수, 기온, 바람, 850 hPa는 저습수와 하층바람, 기온, 전선의 위치, 925 hPa에서는 기온, 저습수, 바람 등을 분석한다. 수치모델에서 생산된 자료는 고도와 기온, 유선, 풍속, 강수, 습수, 수분속, 수렴, 발산, 전

선, 역학적강제력, 기타 등의 순으로 표출되어 이용하고 있다. Fig. 2는 우리나라 슈퍼컴퓨터 도입 및 수치모델 변천사를 나타내고 있다.

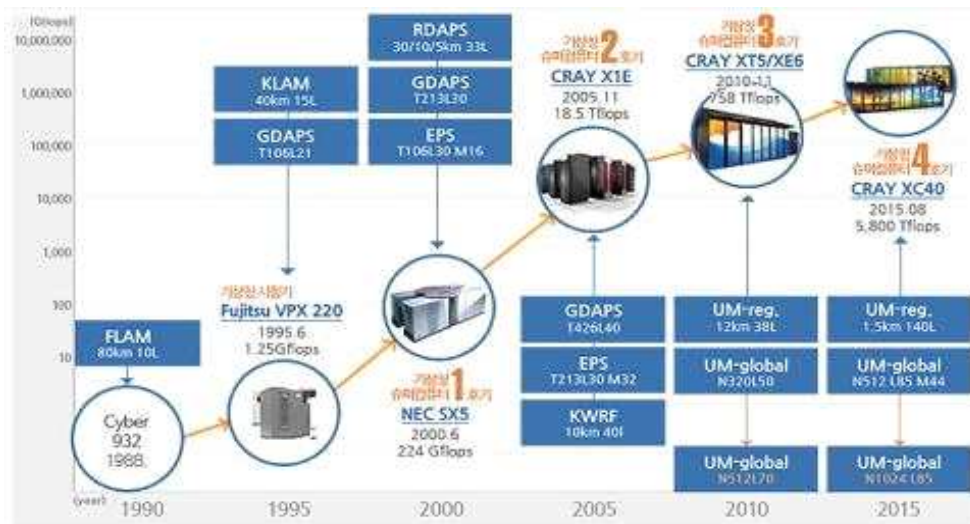


Fig. 1. The history of the meteorological numerical model and the Super computer in Korea¹⁹⁾.

Table 5은 우리나라의 수치모델 종류와 운영장비의 변천과정을 알려주고 있다.

Table 5. The kind of the numerical model and the operating equipment used from 1991 in Korea¹⁹⁾

Year	Model	Resolution (km)	Vertical (layer)	Operating equipment
1991	Asian Prediction model (ALAM)	160	10	CDC Cyber 932
	Far East Prediction Model (FLAM)	80	10	KIST(SERI) Cray-2S
1993	Korea Local Analysis and Prediction System(KLAM)	40	16	KIST(SERI) Cray Y-MP
1997	Global Prediction Model (GDAPS) T106L21	110	21	Fujitsu VPX-220
1999	Regional Prediction Model (RDAPS)	30	33	No1 Supercomputer
	Global Prediction Model (GDAPS) T213L30	55	30	No1 Supercomputer
2001	T106-based Ensemble model(EPS)	110	30	No1 Supercomputer
	Global Prediction Model (GDAPS) T426L40	30	40	No2 Supercomputer
2005	T213-based Ensemble model(EPS)	55	40	No2 Supercomputer
	Global Prediction Model (GDAPS) N512L70	25	70	No3 Supercomputer
2011	Regional Prediction Model (RDAPS)	12	70	No3 Supercomputer
	N3206-based Ensemble model(EPS)	40	70	No3 Supercomputer

수치모델 자료는 계절 및 위험기상의 종류에 따라 이용하는 분석자료가 다르다. 보편적으로 분석하는 자료로, 여름철에는 기온이 높고, 다량의 수증기가 지상에 머물러 대류불안정에 의한 소낙성강우를 분석하는데, 500 hPa의 고도와 기온, 850 hPa의 상당온위와 바람, 대류의 안정도를 이용하고, 겨울철은 대륙고기압의 확장에 따른 서해안지역의 대설에 이용하는 자료로, 500 hPa의 고도, 기온 1000 hPa-700 hPa의 층후, 850 hPa 기온, 바람, 해수면온도 등이 이용된다.

Fig. 2는 현재 기상청 슈퍼컴퓨터에서 일기예보생산에 활용되고 있는 UM수치모델 자료이다 a는 500 hPa에서 고도, 온도, 상대와도, b는 700 hPa의 유선 c는 850 hPa에서 습수 d는 지상에서 해면기압, 강우량을 나타내고 있다.

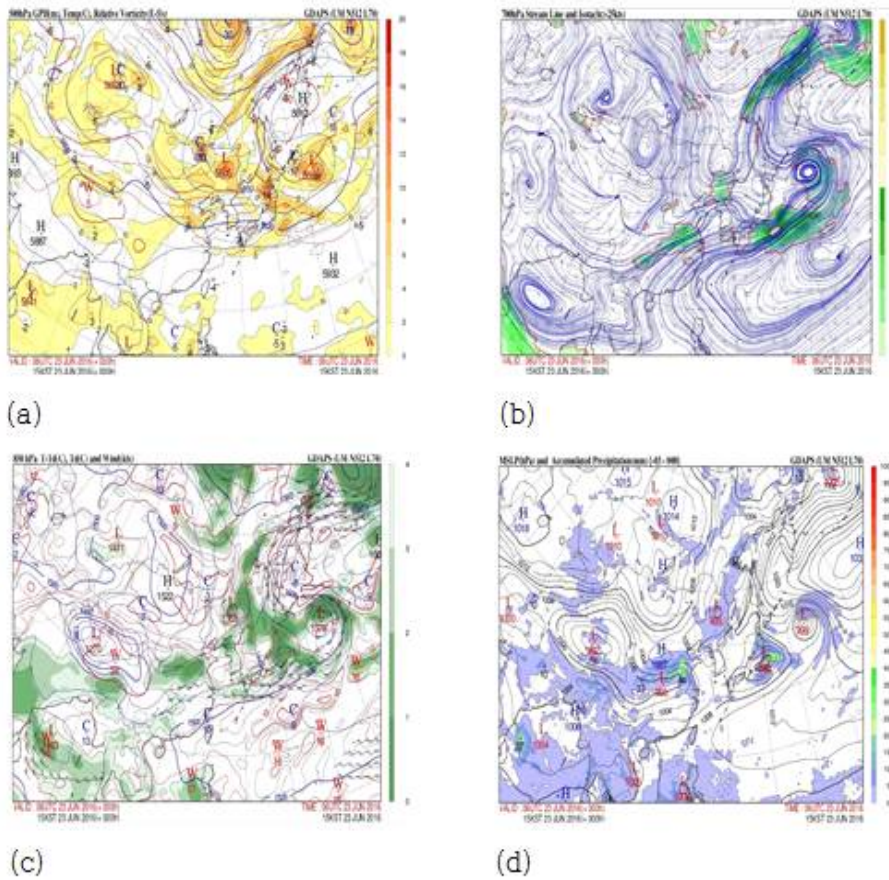


Fig. 2. Example of the numerical weather chart (a: Geopotential high, relative vorticity and temperature at 500 hPa, b: Streamline and Isotach(>25kts) at 700 hPa, c: T-Td, Td and wind at 850 hPa, d: Precipitation and sea level pressure at Surface).

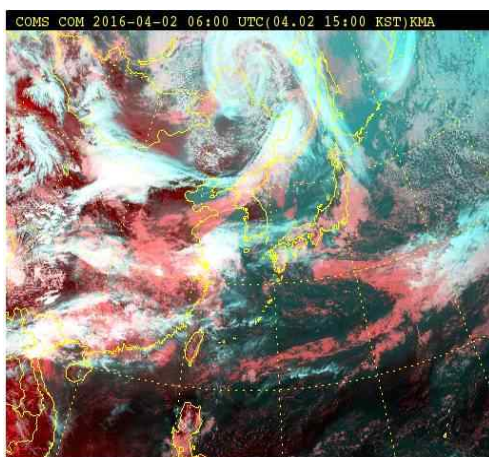


Fig. 3. Satellite image sample

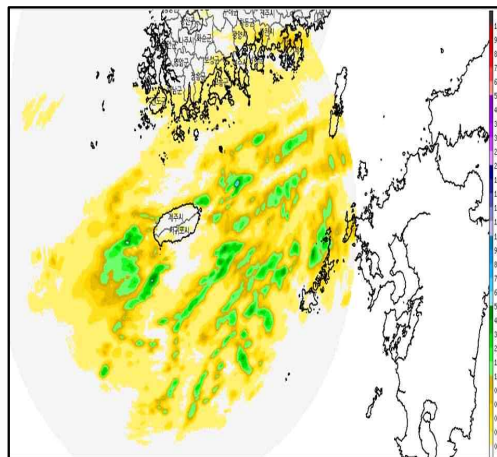


Fig. 4. Weather radar image sample.

현재 일기(강우)예보에 이용되는 자료는, 기상청 슈퍼컴에서 UM전구모델, UM지역모델 그리고 국지모델을 분석하고, 천리안 위성영상에서 구름대의 이동방향과 속도, 건조역의 침투, 기상레이더영상 강우에코의 이동과 속도, 해양 및 지상 자동기상관측장비의 관측자료, 외국의 수치모델, 과학적인 이론과 지식, 다년간 풍부한 예보경험 등 종합적으로 분석하여 일기예보(예상강우량 포함)를 생산하고 있다. Fig. 3은 천리안 위성영상 이미지이며, Fig. 4는 기상레이더 영상이미지의 예를 보였다.

전세계 표준시에 관측(00, 12UTC)된, 지상기상관측자료와 상층기상관측 자료를 기반으로 생산된 실황일기도와 기상청 슈퍼컴퓨터에서 생산된 수치모델자료를 검토하고, 과거 유사일기패턴에서 발생했던 위험기상, 기상요소값과 위험기상지역, 예보경험 등 복합적 요소 등을 고려하여 일기예보를 생산하고 있다. 특히, 제주도는 사면이 바다로 둘러싸여 있고, 중앙에 한라산이 위치하여 지형효과에 따른 기상현상이 두드러지게 나타나고 있다.

일기예보에는 보통 500 hPa에서 고도, 기온, 와도, 700 hPa는 상승속도, 저습수, 850 hPa에서 고도, 상당온위, 유선, 풍속, 저습수, 지상에서는 해면기압, 누적강우량 등도 이용된다.

Fig. 5는 현재 기상청에서 일기예보를 생산하는 과정을 나타내고 있다.

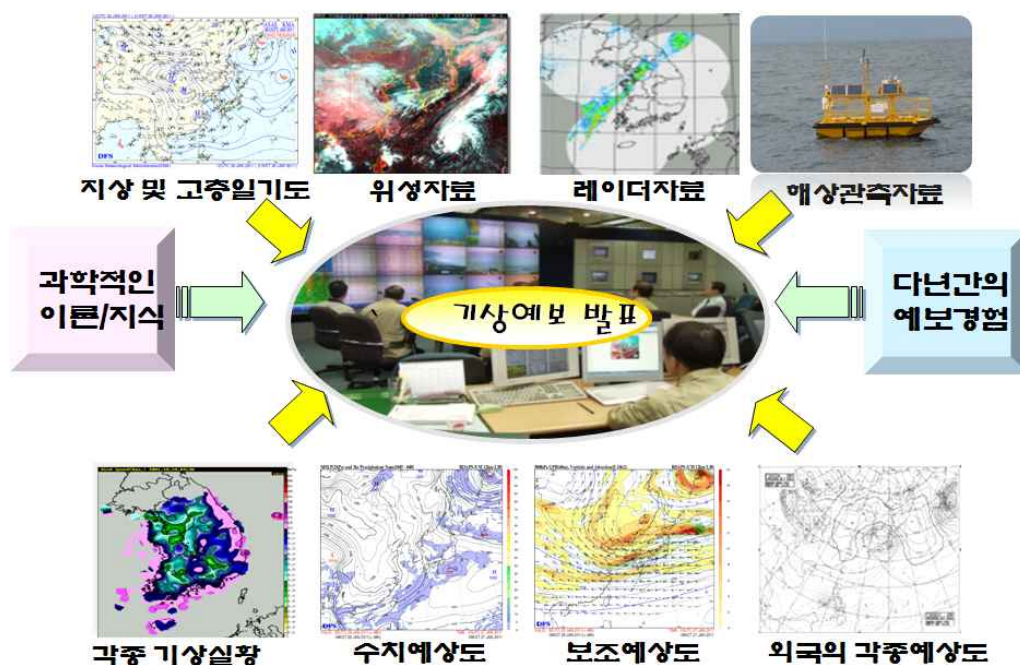


Fig. 5. The forecasting procedure produced by Korea Meteorological Administration.

2.2.2 제주도의 강우량예보^{20,21)}

제주도의 강우량 예보는 기압골 또는 저기압이 접근하면서 그 중심위치에 따라 강우량이 달라진다. 즉, 제주도남쪽으로 통과하는 경우와 제주도를 관통하는 경우, 그리고 제주도북쪽으로 통과하는 경우에 따라 강우량이 차이가 나타나는데, 제주도북쪽과 제주도를 통과하는 경우가 상대적으로, 제주도남쪽으로 통과하는 경우보다 강우량이 많이 관측되고 있다. 제주도의 평년강우량은²⁰⁾ 제주시 1,497.6 mm, 고산 1,142.3 mm, 서귀포시 1,923.0 mm, 성산 1,966.8 mm로 제주도남부와 제주도동부는 제주도북부와 제주도서부에 비하여 상대적으로 강우량이 많이 나타나, 기압골과 저기압이 통과하면서 지형적인 영향도 강우량이 증가하는 한 요인으로 사료된다. 이는 풍하측보다 풍상측에서 강우지속시간 길고 풍속(습기)이 강하게 유입되어. 지형적 요인으로 강우량이 증가하고 있음을 알 수 있다.

기상청 예보업무규정(2015. 12. 28 기상청훈령 제816호) 제14조 제1항과 제2항에서는 우리나라의 육상광역구역 중 제주특별자치도 광역예보구역(Table 6)과 제주특별자치도 육상국지예보구역(Table 7)을 상세하게 정하고 있다.

Fig. 6은 제주도 예보구역과 예보발표 기상관서를 나타내고 있다.

Table 6. The regional forecasting area of the inland in Jeju Island

District Name	Play area	Division
Jeju Island	Jeju Special Self-Governing Province	Jeju Regional Meteorological Administration

Table 7. The local forecasting area of the inland in Jeju Island

District Name	Play area	Division
North of Jeju island	Jeju city (excluding Gujwa-eup, Hanlim-eup, Udo-myeon, Hangyeong-myeon, Chuja-myeon and Mt area.)	Jeju Regional Meteorological Administration
Mt area of Jeju island	mountainous area (Mt area)	
West of Jeju island	Hanlim-eup, Hangyeong-myeon, Daejeong-eup	
South of Jeju island	Seogwipo city (excluding Daejeong-eup, Seongsan-eup, Pyoseon-myeon and Mt area.)	
East of Jeju island	Gujwa-eup, Udo-myeon, Seongsan-eup, Pyoseon-myeon	
Chujado	Jeju city Chuja-myeon	



Fig. 6. The map of forecasting area in Jeju Island(North, West, South, East and Mt area).

2.2.3 기상특보 종류와 기준

기상청에서는 기상특보를 기상현상의 종류에 따라, 11개 종류의 기상특보가 세분화 운영되고 있으며, 안개로 인한 인적 물적 피해가 심각하게 대두되고 있어, 현재 안개특보를 시험운영 중에 있다^{22,28)}.

우리나라의 호우특보기준은 2번 변경되었는데 2002년 2월 호우주의보를 일강우량 80 mm이상 예상될 때에서, 12시간에 80 mm이상 예상될 때로, 호우경보는 일강우량 150 mm이상 예상될 때에서, 12시간에 150 mm이상으로 호우기준 발표시간을 12시간 앞당기도록 변경했다.

그런데 2010년 9월 21일 서울, 인천 등 지역을 중심으로, 경기 지방과 영서 지방에 내린 폭우는, 시간당 100 mm가 넘는 비를 기록했다. 특히, 서울관측소의 일강우량은 259.5 mm로, 9월 하순 강우량으로는 1908년 관측시작 이래 가장 많은 비가 내렸다. 주택이 침수되거나 지하철 운행이 중단되는 등 많은 피해가 발생했으며, 중앙재난안전대책본부 집계결과 야영객 2명 실종의 인명 피해가 발생하였고, 이재민 13,900명 침수가구 6,400여 가구가 발생하였다²³⁾. 이를 계기로 2011년 6월 기상청에서는 호우특보 기준에 강우강도 개념을 도입하여 호우특보를 강화시켰다. 강화된 호우주의보는 6시간 동안 내린 강우량을 기준으로 70 mm이상 예상될 때, 또는 12시간에 110 mm이상 예상될 때이며, 호우경보는 6시간에 110 mm이상 예상될 때, 또는 12시간에 180 mm이상 예상될 때로 설정하였다^{22,28)}. Table 8은 기상청에서 수행하고 있는 호우특보 변천과정을 나타내고 있다.

Table 8. Criteria of heavy rain advisory transition process established by Korea Meteorological Administration²²⁾

Period	Advisory	Warning
~2002. 1.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ The precipitation for 24 hours is expected to be more than 80mm 	<ul style="list-style-type: none"> • The precipitation for 24 hours is expected to be more than 150mm
2002. 2. ~2011. 5.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ The precipitation for 12 hours is expected to be more than 80mm 	<ul style="list-style-type: none"> • The precipitation for 12 hours is expected to be more than 150mm
2011. 6. ~ Now	<ul style="list-style-type: none"> ▪ The precipitation for 6 hours is expected to be more than 70mm or the precipitation for 12 hours to be over 110mm 	<ul style="list-style-type: none"> • The precipitation for 6 hours is expected to be more than 110mm or the precipitation for 12 hours to be over 180mm.

최근의 호우는 일 누적강우량 뿐만 아니라, 시간당 강우량 즉 강우강도가 과거와 다르게 매우 강하게 나타나는 경향을 보이면서, 가옥 및 도로침수, 지반붕괴, 산사태 등 심각한 자연재해로 이어지고 있다.

호우가 내리는 동안 대기의 상태를 판단하기 위하여 수치모델 종합기상정보시스템 일기도분석장에서 불안정지수를 분석하게 된다. 불안정지수는 두 개 이상의 임의의 기압면의 온도, 이슬점 온도 등을 차로 표현하여 대기의 불안정한 정도를 나타낸다. 불안정지수에는 K-index (KI), Showalter Stability Index (SSI), Cross Totals (CT), Total Totals (TT), Convective Available Potential Energy (CAPE) 등이 있다.^{2,22,24,40}.

본 연구에서는 주위온도와 이슬점온도만을 사용하는 간단한 지수로 TT와 KI를 적용하였다. KI는 연직기온감률과 대기하층의 습기의 양, 습기의 연직분포를 나타내는 지수로써 KI가 25~30 이면 약한 뇌우, 30~40 보통 뇌우, 40이상 강한뇌우로 판단할 수 있다.

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + D_{850} - (T_{700} - D_{700})$$

여기서 T_{850} : 850 hPa 온도, T_{500} : 500 hPa 온도, D_{850} : 850 hPa 이슬점온도, T_{700} : 700 hPa 온도, D_{700} : 700 hPa 이슬점온도를 말한다.

TT는 하층대기(850 hPa)의 기온이 고려되지 않는 CT를 보완하여, 뇌우의 범위와 강도를 예측하기 위해 개발되었으며, 장점으로는 850 hPa과 500 hPa의 기온차이가 추가되어 대기 중·하층의 불안정 판단이 가능하다. TT가 42~48인 경우에는 약한 뇌우, 48~54이면 보통 뇌우, 54~60은 강한 뇌우, 60이상은 격렬한 뇌우로 판단된다.

그리고 CT는 하층의 수증기와 중층의 기온으로 만들어진 지수로 간단하게 불안정 강도를 예측할 수 있다. CT의 경우 16~18은 약한 뇌우, 18~22은 보통 뇌우, 22이상은 강한 뇌우로 분류할 수 있다.^{2,22,24,40}.

$$TT = VT + CT$$

여기서, TT(Vertical Totals) = $T_{850} - T_{500}$, CT=Cross Totals를 의미한다.

$$CT = D_{850} - T_{500}$$

여기서, T_{500} : 500hPa 기온, D_{850} : 850hPa 이슬점온도를 말한다.

Table 9는 현재 기상청에서 발표하고 있는 기상특보의 종류를 나타내고 있으며, 안개특보도 시험운영 중에 있다. 그리고 현재 기상청에서 운영중인 호우특보에 대한 상세 내용은 Table 10에 제시하였다.

Table 9. The kind of weather advisory/warning in Korea^{2,22,28)}

Class of Weather Statement	Kind of advisory/warning
Exam Newsflash	Fog
Preliminary Newsflash	Typhoon, Heavy rain, Strong wind, Heavy snow, Cold wave, Wind wave, Storm surge, Heat wave, Asian dust
Advisory	Typhoon, Heavy rain, Strong wind, Heavy snow, Cold wave, Wind wave, Storm surge, Tsunami, Dry air, Heat wave, Asian dust
Warning	Typhoon, Heavy rain, Strong wind, Heavy snow, Cold wave, Wind wav, Storm surg, Tsunami, Dry air, Heat wave, Asian dust

Table 10. Criteria for heavy rain special report statement in Korea^{2,22,28)}

newsflash	Advisory	Warning
Heavy rain	The precipitation for 6 hours is expected to be more than 70mm or the precipitation for 12 hours to be over 110mm	The precipitation for 6 hours is expected to be more than 110mm or the precipitation for 12 hours to be over 180mm.

일본기상청은 각 도부현을 일부 나누어 1차 세분화 지역단위로 일기예보를 발표하고, 2차 세분 지역단위로 기상 특성, 재해 특성 및 지리적 특성에 따라 기상특보(경보·주의보)를 발표하고 있다. 일본기상청에서는 기상현상의 종류와 재해의 내용에 따라, 6종류의 특별경보와 7종류의 경보, 16종류의 주의보를 발표하고 있다. 우리나라와 다르게 일본기상청에서는 호우경보가 발표된 후 토사재해 경계정보를 발표하는데, 강우에 의해 토사재해의 위험도가 높아진 경우 기상청(지역기상대)과 도부현시가 공동으로 발표한다. 토사재해 경계판정 메쉬정보는, 5 km 사방의 영역(메쉬)마다 토사재해 위험 발생을 5단계로 판정하고, 재해대피 2시간을 고려하여 발표하고 있다⁴¹⁾.

Table 11은 일보기상청의 기상현상에 대한 기상특보 발표종류를 나타냈는데, 우리나라와 달리 주의보가 착빙과 착설 눈사태 해설(눈이 녹아 풀리는 현상)도 알려주고 있다. Table 12는 일본(오사카)의 호우특보 발표기준을 알려주고 있는데, 각

지역마다 호우특보 기준을 차등을 두어, 기후특성과 지형적 영향을 반영하고 있다. Fig. 7은 일본의 기상특보 상황과 지명을 나타냈다^{23,41)}.

Table 11. The kinds of weather advisory/warning in Japan⁴¹⁾

Class	Kind of advisory/warning
Advisory	Heavy rain, Flood, Strong wind, Blizzard, Heavy rain, Wind wave, Heightened, Lighting, snow melting, Fog, Dry air, Avalanche, Cold wave, Frost, The icing, snow accretion
Warning	Heavy rain, Flood, Strong wind, Blizzard, Heavy snow, Wind wave, Heightened Tsunami
Special Warning	Heavy rain, Wind wave, Blizzard. Heavy snow, Wind wave, Heightened

Table 12. Criteria for heavy rain special report statement in Japan(Osaka)^{23,41)}

Class	Criteria
Advisory	The precipitation for 1 hours is expected to be more than 25mm or the precipitation for 3 hours to be over 40mm Soil rainfall index 86~126
Warning	The precipitation for 1 hours is expected to be more than 40~45mm or the precipitation for 3 hours to be over 70mm Soil rainfall index 122
Coverage	By applying a differential regional rainfall

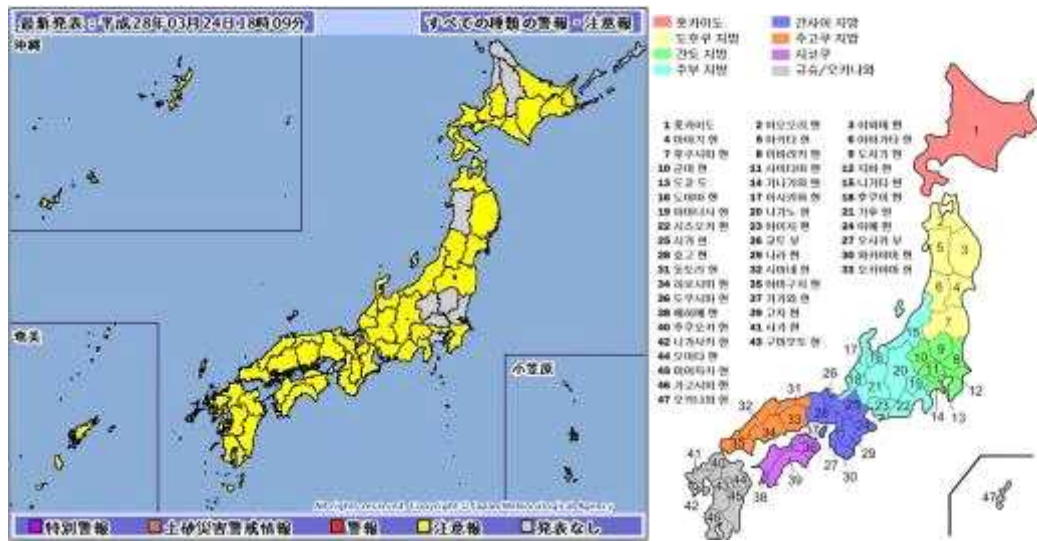


Fig. 7. The weather forecasting and the special report statement sample in Japan Meteorological Administration^{23,41)}.

영국기상청에서는 날씨분석을 통한 앞으로 7일간 기상현상이 나타날 수 있는 조건과 가능성을 종합 분석하여, 4~5일전부터 5종류(비 눈 바람 안개와 얼음)에 대하여 날씨영향 판단표를 인터넷 홈페이지에 표출하고 있다²⁶⁾.

5종류의 주의보에 대한 단계(노랑, 황색, 빨강)별 설명으로, 여가활동, 비즈니스 등 국민들이 날씨로 인한 불편이 없도록, 사전에 단계별 행동요령을 알려주어 대처할 수 있도록 하고 있다. Fig. 8은 영국기상청 인터넷 홈페이지 날씨예보와 날씨영향 판단표를 표출하고 있다. 영국기상청 날씨 영향 판단표를 색으로 표시하여 국민 누구나 쉽게 알 수 있도록 하고 있다(Fig.9)²⁶⁾.

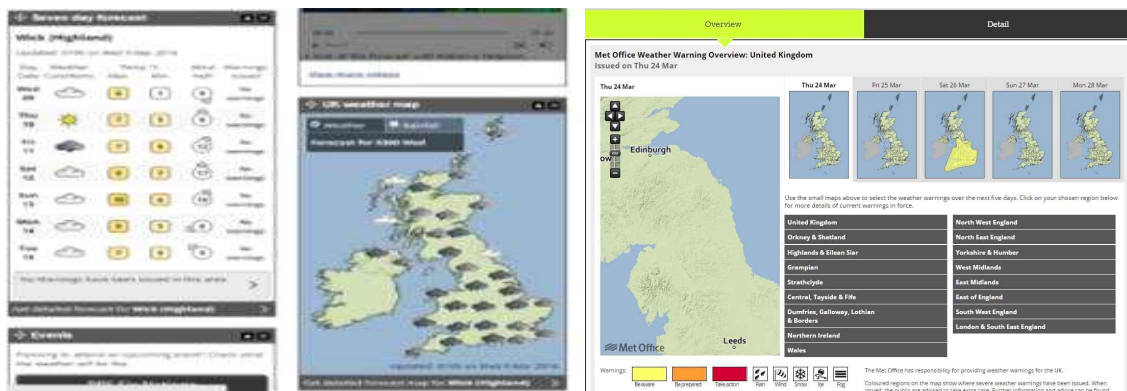


Fig. 8. The weather forecasting and the special report statement sample in United Kingdom Meteorological Administration(<http://www.metoffice.gov.uk>)²⁶⁾.

The basic messages associated with each of the colours are:

No Severe Weather	Be Aware	Be Prepared	Take Action

The basic message associated with each warning level is:

Likelihood	
High	<ul style="list-style-type: none"> You may need to take action as we are expecting ... There will be ...
Medium	<ul style="list-style-type: none"> We should be prepared for ... There is likely to be ...
Low	<ul style="list-style-type: none"> Be aware of the potential/possibility ... There is the small chance of ...
Very Low	<ul style="list-style-type: none"> Be aware that there is a very small risk of ...

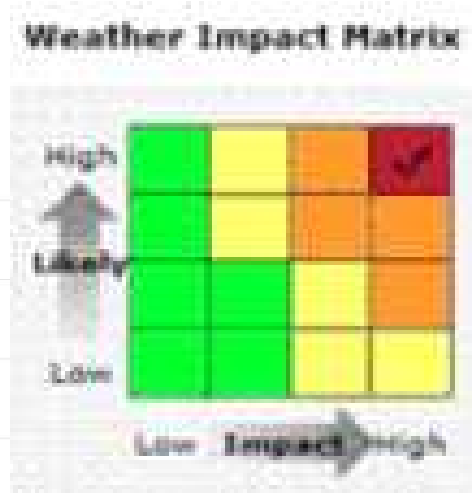


Fig. 9. Weather Impact Matrix of United Kingdom²⁶⁾.

영국기상청에서는 Table 13에서처럼 5종류의 특보를 발표하고 있으며, 호우특보는 Table 14에서 보는 바와 같이 2시간이상 지속적인 비가 내리고 3시간 강우량이 15mm 이상 내릴 때 발표하고 있다.

Table 13. The kinds of weather advisory/warning in United Kingdom²⁶⁾

Class	Kind of advisory/warning
advisory	Heavy rain, Strong wind, Heavy snow, The icing, Fog

Table 14. Criteria for heavy rain special report statement in United Kingdom²⁶⁾

Class	Criteria
advisory	- Continuous rain for 2 hours
Warning	- The precipitation for 3 hours is expected to be more than 15mm

중국기상청에서는 단기예보(3일)를 통하여 예상 강우지역과 예상강우량을 알려주고 있으며, 14종류의 주의보(도로, 대기질, 안개, 서리, 우박, 뇌전, 가뭄, 폭염, 먼지(모레)폭풍, 황사, 태풍, 한파, 폭설, 폭풍우, 강풍)를 표출하며, 주의보에 대한 각 기상현상을 2~4단계(파랑, 노랑, 오렌지, 레드)로 구분하여, 국민들이 자연재난에 대처할 수 있도록 하고 있다²⁷⁾.

Fig. 10에는 중국기상청 인터넷 홈페이지 날씨와 경보지역을 나타냈으며, Fig. 11에는 중국기상청 인터넷 홈페이지에 수록된 기상특보의 종류와 서리의 3단계 판단표를 제시하고 있다²⁷⁾.



Fig. 10. The weather forecasting and the special report statement sample in China Meteorological Administration (<http://www.cma.gov.cn>)²⁷⁾.







Fig. 11. The special report statement sample and the three step for frost in China Meteorological Administration (<http://www.cma.gov.cn>)²⁷⁾.

중국의 특보종류는 Table 15에서 보는 바와 같고, Table 16에서 보는 것처럼 호우특보에 대한 영향판단표를 나타내고 있다.

Table. 15 The kinds of weather advisory/warning in China²⁷⁾

Newsflash	Kind of advisory/warning
Warning	Black-ice, Mist, Fog, Hail, Lightning, Drought, Heat wave, Dust, Cold wave, Heavy snow Strong wind, Typhoon, strong wind, Frost

Table. 16 Weather Impact Metrix of China²⁷⁾

Class	Criteria
Warning	 The precipitation for 12 hours is expected to be more than 50mm
	 The precipitation for 6 hours is expected to be more than 50mm
	 The precipitation for 3 hours is expected to be more than 30mm
	 The precipitation for 3 hours is expected to be more than 100mm

Ⅲ. 연구자료 및 방법

3.1 연구자료

3.1.1 연구대상 지역

한반도는 지리적으로 극동아시아에 해당하며, 위도 30도에서 40도 사이에 동경 120도에서 130도에 위치하고 있다. 저기압 또는 태풍이 길목에 위치하여, 남서쪽에서 북상하는 위험기상을 가장 먼저 영향을 받는 지역이 제주도이다. 제주도는 중국 상해에서 540 km, 일본 큐슈에서 300 km, 우리나라 진도에서 82 km, 부산에서 270 km 떨어져 있다. 중위도에 위치한 한반도와 제주도의 기상관측지점을 Fig. 12에 나타냈다.

제주도는 한반도의 남단에 위치하고 모양은 타원형이며 중앙에 한라산과 크고 작은 기생화산이 368개, 지상의 기류 수렴과 발산에 어느 정도 영향을 주는 것으로 판단되고 있다. 제주도는 제주도북부와 제주도서부, 제주도남부와 제주도동부, 제주도산간, 그리고 중앙에 위치한 한라산을 기준으로 한라산남쪽과 한라산북쪽으로 기상이 상이하게 나타날 때가 종종 있다. 특히, 한라산의 사면을 따라서 풍향과 풍속에 따른 강우현상과 강우량이 편차가 심하여 위험기상 또한, 상이하게 나타난다.

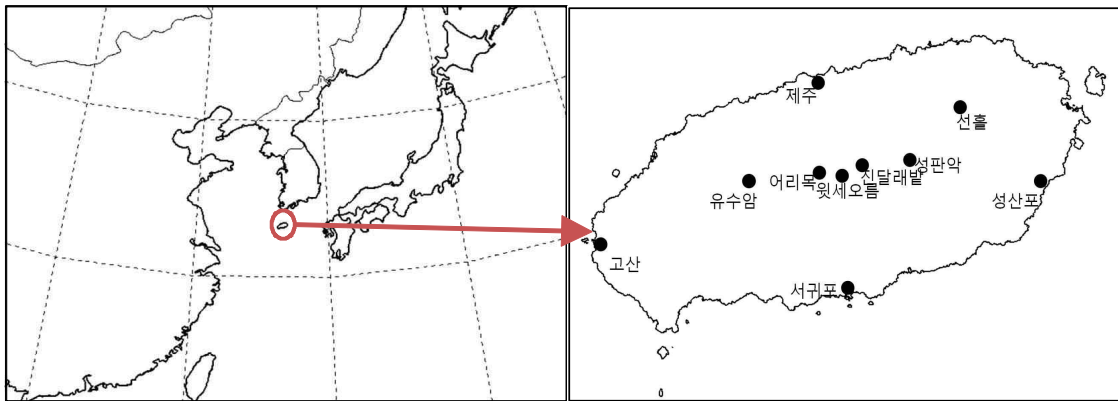


Fig. 12. The location of Jeju Island and the weather observation station.

3.1.2 연구대상 기간

본 연구에서 강우특성 분석에 있어서는 1981년부터 2010년까지 30년간 평년자료를 이용하였다¹⁰⁾. 제주와 서귀포는 관측시작이 각각 1923년과 1961년으로 30년이 넘

계 기상관측을 수행하고 있어 평년자료를 이용하였으나, 고산과 성산은 관측기간이 짧거나 관측장소 이전에 따라 23년과 20년 자료를 사용하였다. 또한, 방재기상관측 장비인 선홍, 유수암, 어리목은 1997년부터 2010년까지 14년간, 성판악은 1998년부터 2010년까지 13년 자료 진달래밭과 윗세오름은 2003년부터 2010년의 8년간의 자료를 누적 평균한 평년값과 연구대상기간인 2011년부터 2015년까지 최근 5년 동안 제주도 5개 예보구역(제주도북부, 제주도서부, 제주도동부, 제주도남부, 제주도산간)에 호우특보가 발표된 날의 강우량을 사용하였다^{22,28)}.

3.1.3. 연구대상 자료

본 연구를 위해 제주도 유인 기상관서 4개소와 방재기상관측장비 6개소의 기상월보^{13,14)}, 기상연보^{11,12)}, 한국기후표(평년값)¹³⁾, 상세강수정보²⁸⁾, 제주고산 고층관측자료, 레이더영상표출시스템의 레이더영상 constant altitude plan position indicator (CAPPI)^{22,28)}, 지점별(184, 185, 188, 189, 727, 751, 753, 782, 870, 871) 10분 누적강우량 그리고 슈퍼컴퓨터에서 생산된 수치모델(UM전구, UM지역) 자료의 기본예상도, 종합기상정보시스템에서 일기도, Korea Local Analysis and Prediction System (KLPS) 세가지 자료 중 불안정지수, 가강수량, Mean Sea Level Pressure (MSLP)를 사용하였다.

호우특보 적중률을 평가하기 위해서 선진예보시스템에서 예보 정확도 자료를 이용하였다.

3.2 연구방법

3.2.1 강우특성분석

본 연구를 수행하기 위해 최근 2011년에서 2015년까지 5년 동안의 제주도 월강우량, 계절별 강우량, 예보구역별 강우량, 예보구역별 계절강우량, 제주도 월강우일수, 계절별 강우일수, 예보구역별 강우일수, 예보구역별 계절강우일수를 평년과 비교하였다. 본 연구에서는 평년은 한국기후표의 정의에 따라 1981년부터 2010년으로 하였다. 평년기간의 마지막 연도 2010년을 기준으로, 방재기상관측장비가 설치된 연도로부터 2010년까지 자료를 평년기간으로 선정하였다. 다시 말해, 선홍, 유수암, 어리목은 1997년부터 2010년까지 14년간의 평균한 값, 성판악은 1998년부터 2010년까지 13년 자료를 평균한 값, 진달래밭, 윗세오름은 2003년부터 2010년의 8년 평균한 값을 이용하여 평년값으로 사용하여 평년 연 강우량과 월 강우량, 평년 연 강우일수

와 월 강우일수를 산출하였다.

기상청 발행하는 기상연보와 기상월보, 한국기후표를 이용하여 제주도 2011년에서 2015년까지의 국지예보구역별 연 강우량과 강우일수, 계절별 강우량과 강우일수 자료를 이용하였다.

제주도는 한라산에 의한 고도가 급격하게 상승하여 고도별 강우량 특성을 알아보기 위하여 해발고도 200 m이하를 해안지역, 해발고도 200 m에서 600 m미만을 중산간지역, 해발고도 600 m이상을 제주도산간지역으로 구분하였다. 고도별 월 강우량은 해안지역 기상관측소가 위치한 4개 지점(제주, 서귀포, 성산포, 고산)과 중산간지역 2개 지점(선흘 252 m, 유수암 423 m) 제주도산간지역 4개 지점(성판악 763 m, 어리목 763 m, 진달래밭 1489 m, 윗세오름 1673 m) 자료를 이용하였다.

3.2.2 호우특보 적중률과 레이더 추정값 비교

기상청의 호우특보는 6시간에 70 mm이상, 또는 12시간에 110 mm이상 예상될 때 호우특보를 발표한다. 호우특보 적중률은 선진예보시스템의 훈련/평가, 예특보평가, 특보, 평가, 종합요약, 예보관정확도 자료를 이용하여 기압패턴별 예보구역별로 알아보았다.

기상레이더는 10분 간격의 볼륨관측을 수행하여 관측자료를 생산하고 있다. 기상레이더 강우정보는 넓은 영역정보로 기상레이더의 시스템 특성상 이미지영상으로 기상정보시스템에 표출 제공된다. 그래픽 강우정보자료는 10분 관측 자료를 1시간 강우정보로 변환하여 넓은 영역에 걸쳐서 표출된다.^{16,17)}

종합기상정보시스템(COMIS4) 내 합성영상표출시스템에서 제공되는 지형클러스터의 영향이 적은 1.5 km 고도 CAPPI 자료를 이용하여 반사도(레이더센터, 2015년 7월 8일, 2015년 7월 11일, 2015년 8월 21일)를 추출하였다. 지상강우량계에서 측정된 1분 누적강우량으로부터 10분 이동누적강우량으로 각각 환산된 10분 지상강우량 강우강도를 10분 최대 지상강우량, 레이더 합성영상 10분 강우강도 자료와 비교하였다.

원격탐사자료인 기상레이더의 강우에코(강우구름) 이동속도는 기상레이더의 유효탐지거리 240 km내에서 강우구름을 탐지한 후 그 구름이 제주도에 도달하는 것을 레이더영상 합성장을 이용하여 계산하였다. 또한, 제주도 국지예보구역에 위치하는 4개소의 기상관측소(제주지방기상청, 서귀포기상서비스센터, 성산기상서비스센터, 고산기상서비스센터)와 제주도산간(성판악, 어리목, 진달래밭, 윗세오름)에서의 지상 10분 강우량과 1시간 최대 강우량의 상관관계를 비교하였으며, 또한 호우특보가 발표되었을 때 예상강우량과 지상강우량을 예보구역별로 회귀분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1 제주도 강우특성

4.1.1 월별 계절별 강우 특성

중위도 극동아시아에 위치한 한반도는, 지리적으로 남동쪽에 일본열도, 북서쪽으로 대륙이 위치하여, 여름철 태풍과 봄, 가을철, 저기압, 겨울철 대륙고기압의 영향을 받는 길목에 위치하고 있다. 한반도의 기상관측지점 73개 지점에서 관측된 평년 강우량을 평균한 연 평균강우량은 1350 mm이다^{22,28)}.

우리나라의 평년 강우량분포는 Fig. 13에 나타내고 있다^{9,10,22,28)}. 우리나라의 다우지역은 제주도 1,632.6 mm, 울릉도 1,383.4 mm, 남해안~섬진강유역 1,400 mm이상으로 나타나고 있다.

Fig. 13에서 보는 것처럼 제주도는 우리나라의 다우지역 중에 한 곳이며, 면적이 1.8%에 해당하지만, 유인관측소 4개 지점이 평년 평균 연강우량은 1,632.6 mm이다. 지역별 강우량은 제주도북부 1,497.6 mm, 제주도서부 1,142.8 mm, 제주도남부 1,923 mm, 제주도동부 1,966.8 mm로 큰 편차를 보인다. 또한, 제주도산간의 강우량은 5,031 mm로 유인관측소 평균보다 3.1배 많다^{9,10,22,28)}.

평년 연 강우량과 연구기간(2011~2015년)의 연 강우량을 비교해 나타낸 Fig. 14에서 보면 연 강우량은 2012년과 2015년이 많고 2013년은 적게 나타났다. 2012년은 제14호 태풍 ‘덴빈(TENBIN)’과 제15호 태풍 ‘볼라벤(BOLAVEN)’, 제16호 태풍 ‘산바(SANBA)’이 연이은 태풍 3개 영향과 2015년 제12호 태풍 ‘할롤라(HALOLA)’의 영향으로 많은 강수를 기록하였다. 2013년은 7월초부터 북태평양고기압이 평년보다 빠르게 확장하여, 정체전선의 제주도부근해상에서 활성화되지 못하고, 우리나라 중부지방에 위치하면서, 제주도는 북태평양고기압의 영향을 받아 강우량이 적었다.

2015년 특이사항은 태풍 ‘할롤라(HALOLA)’가 7월 13일 13.1N 179.5E에서 중심부근 최대풍속 24m/s, 중심기압 990hPa, 강풍반경 200km의 약한 소형 태풍으로 중앙태평양에서 발생하여, 매시 21 km속도로 서~서북서진하다가 25일 03시 일본 오키나와 동남동쪽 약 290 km부근해상에서 북북서진으로 방향을 전향하여, 우리나라에 영향을 주었다. 1997년 태풍 ‘올리와(OLIWA)’이후 18년 만에 중앙태평양에서 발생한 태풍의 영향을 받았다.

그리고 Fig. 15에서 보는 바와 같이 제주지역의 평년 연 강우일수는, 130일로 서울 109일, 부산 98일, 대구 94일 등 타지역에 비해 많은 강우일수를 나타냈다^{9,10,22,28)}.

최근 5년간의 강우일수는 평년보다 2012년은 많고, 2013년은 적게 나타났다. 이것은 2012년 3개의 태풍 영향과 여름철 강우일수가 평년보다 2.9일 많았기 때문이며, 서귀포 여름철 강우량은 관측 이래 최다 3위를 기록하였다. 2013년은 6월 중순이후 크게 확장한 북태평양고기압(해양성열대기단, Maritime tropical air mass: mT)의 영향으로, 8월까지 무더운 날씨가 자주 나타나면서, 폭염과 열대야가 지속되었다. 또한, 정체전선의 북한과 중부지방에 위치하여, 여름철 강수일수는 33.5일로 평년보다 6.1일이 적었다. 연구기간의 연 강우일수는 평년 130일보다 4일 줄어든 126일로 줄어드는 경향을 보였다.

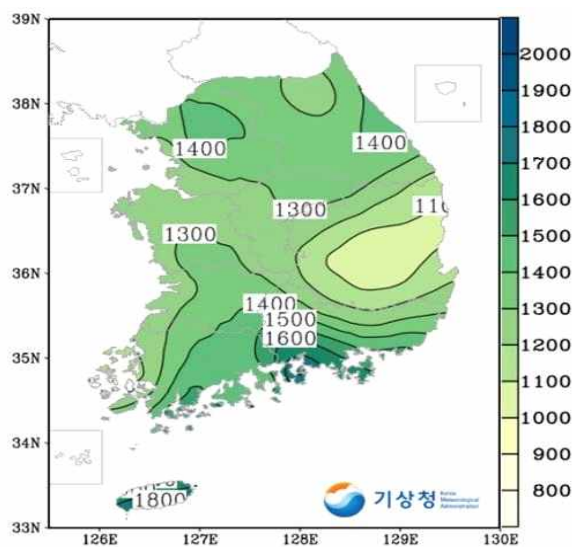


Fig. 13. Average annual rainfall based on 1981-2010 normals in Korea.

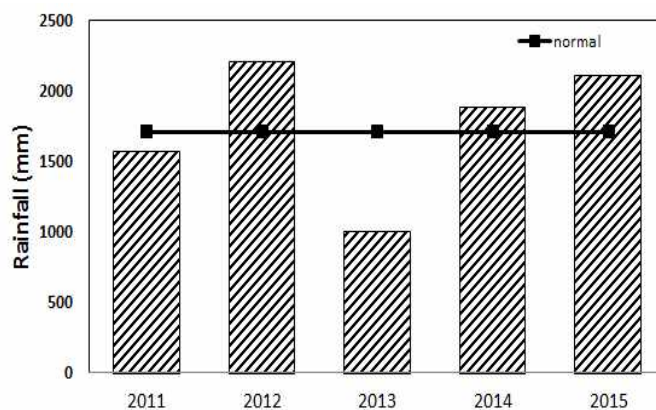


Fig. 14. Average annual rainfall from 2011 to 2015 in Jeju Island.

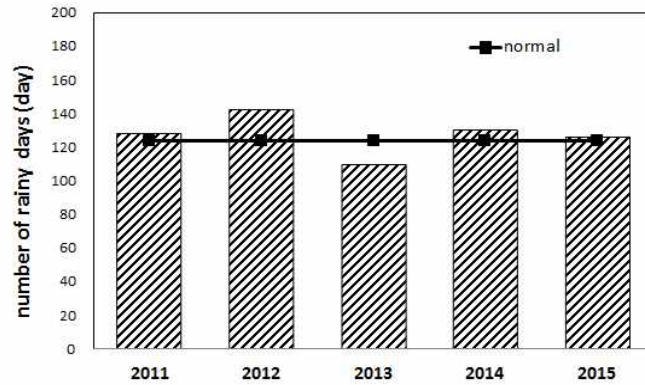


Fig. 15. Annual number of rainy days from 2011 to 2015 in Jeju Island.

Fig. 16은 월 강우량 변화로, 평년과 비교하면 3월과 5월은 비슷하였고, 2월, 4월, 8월, 11월, 12월은 많았고, 1월과 6월, 7월, 9월, 10월은 적게 관측되었다. 특히, 가을로 접어드는 9월과 10월, 강우량이 크게 줄어들어 북태평양고기압과 이동성고기압이 영향을 받는 날이 많아지면서, 상대적으로 기압골의 영향을 받는 날이 적어졌음을 의미한다. 최근 월 강우량은 평년과 비교하였을 때, 11월과 12월, 동절기로 접어들면서 강우량이 많아지고 있다. 특히, 11월 강우량은 평년의 2배가 넘게 관측되고 있다. 이는 11월에도 기압골과 저기압의 영향을 받아 강우가 많아지고 있음을 나타내고 있다. 전지구 온난화와 관계가 있는 것으로 판단되지만, 짧은 기간의 변화로 쉽게 단정 짓기에는 무리가 있고, 향후 기후학 연구가 더 필요하다.

2011년부터 2015년까지 최근 5년 동안의 연구대상기간 월 강우일수와 평년 월 강우일수를 비교해 나타낸 Fig. 17을 보면, 4월과 8월은 평년과 비슷하나 2월, 6월, 11월, 12월은 평년보다 많은 강우일수를 보여주고 있다. 특히 11월과 12월의 강우일수 증가가 두드러져, 월 강우량 증가와 무관하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 1월과 3월, 5월, 7월, 9월과 10월은 강우일수가 줄어드는 경향을 보이고 있다.

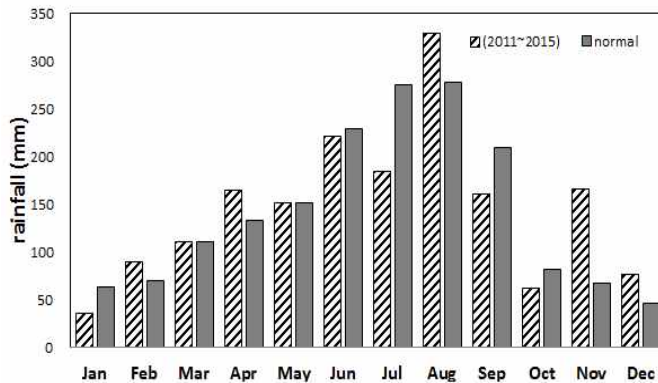


Fig. 16. Average of monthly rainfall in Jeju Island.

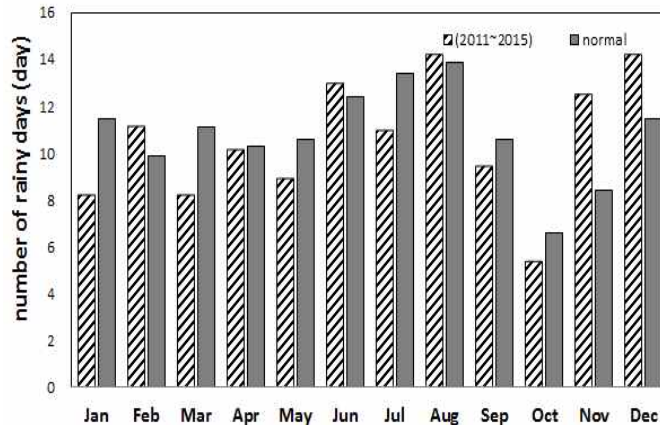


Fig. 17. Average monthly number of rainy days in Jeju Island.

계절별 강우량은 Fig. 18에서처럼 평년과 최근이 계절 강우량은 양적으로는 차이가 있으나, 유사한 경향을 보였다. 계절강우량은 여름철에 가장 많은 비가 내렸고, 다음으로 봄, 가을, 겨울 순으로 관측되었다. Fig. 19에서 보는 바와 같이 계절별 강우일수를 보면, 평년과 비교하면 여름철과 겨울철은 증가하고 봄철과 가을철은 감소하는 경향을 보이고 있다. 여름철은 정체전선의 활성화와 태풍(Typhoon: Ty)의 영향에 따라, 강우일수와 강우량의 변동 폭이 나타나고 있다. 겨울철 기온이 평년보다 따뜻하여, 우리나라부근으로 기압골과 저기압이 통과하면서, 강우일수가 증가한 것으로 판단되었다. 봄철과 가을철 그리고 초겨울에 강수일수가 줄어든 것은, 우리나라부근으로 이동성고기압 또는 북태평양고기압의 영향으로, 기압골과 저기압, 정체전선의 영향을 받는 것이 평년에 비해 점차 줄어들고 있음을 나타내고 있다.

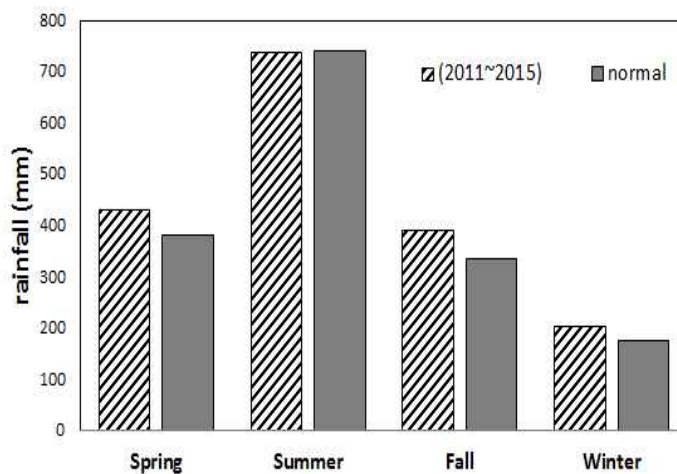


Fig. 18. Average seasonal rainfall in Jeju Island.

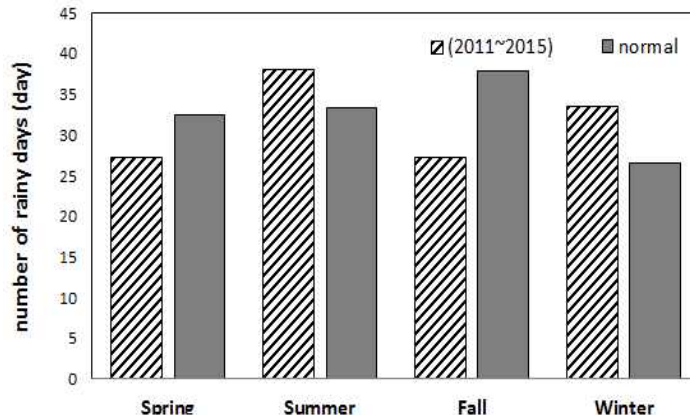


Fig. 19. Average seasonal number of rainy days in Jeju Island.

4.1.2 지역별 강우 특성

제주도의 강우량은 중앙에 한라산을 기준으로, 제주도동부와 제주도서부, 제주도 북부와 제주도남부, 제주도산간으로 편차가 심하다. 평년강우량을 기준으로, 한라산 남쪽인 제주도남부와 제주도동부는 연 강우량이 2,000 mm에 근접하고 있으나, 한라산북쪽인 제주도북부는 1,500 mm, 제주도서부는 1,100 mm가 관측되어 큰 편차를 나타내고 있다. 또한 제주도는 해발고도에 따라 강우량 편차가 많이 나타나는데, 해발고도 600 m 이상인 제주도산간은 5,000 mm 이상이 관측되고 있다. 이렇듯 제주도는 제주도동부와 제주도서부, 제주도남부와 제주도북부, 제주도산간, 그리고 고도에 따른 강우량 편차도 심하여 강우량 예보에 어려움이 많다. 특히 봄철과 가을철, 북동류에 의한 강우는, 제주도동부, 그리고 제주도북부와 제주도남부 일부만 강우현상이 나타나고, 비 구름대 고도가 낮아 기상레이더 영상에도 표출되지 않는 경우가 종종 있다. 또한, 이러한 강우는 지속적으로 비가 내리면서, 시정 장애현상도 함께 나타난다. 이러한 국지적인 날씨변화는 제주도를 찾은 관광객들이 레저활동과 교통 불편을 초래하고, 제주도 일부지역에는 농작물 피해를 입히기도 한다. 이와는 대조적으로 제주도서부, 제주도북부와 제주도남부 일부에는 구름많은 날씨로 제주도를 찾은 많은 관광객들에게, 제주도의 변화무쌍한 날씨와 예보의 어려움을 몸소 체감케 한다. 또한, 4월에서 5월, 제주도의 특성인 일명 '고사리장마'가 있다. 기압골 또는 저기압의 주기적인 통과로, 제주도는 잦은 비 날씨가 이어져 6월과 7월, 우리나라에 영향을 주는 정체전선의 영향을 받을 때와 비슷한 날씨가 이어져 제주도민들은 일명 '고사리장마'라고 한다.

Fig. 20에서 보면 제주도 최근 연 강수량은, 제주도북부 1,575.5 mm, 제주도서부 1,178.9 mm, 제주도동부 2,094.2 mm, 제주도남부 2,177.8 mm, 제주도산간 6,120 mm로 평년과 비교하면, 적게는 20.6 mm, 많게는 1,088.9 mm로 편차가 크게 나타났다. 특히, 제주도산간은 평년 강수량 5000 mm보다 1000 mm이상의 많은 강수량이 관측되어, 제주도산간으로의 강수량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

예보구역별 연 강우일수는, Fig. 21에서 보는 바와 같이 전반적으로 평년보다 줄어드는 경향을 보이고 있으나, 제주도동부는 2013년을 제외하고 평년보다 증가하였다. 이러한 현상은 동풍에 의한 강우가 내리면서 강우일수가 증가한 것으로 판단된다. 제주도산간은 2011년과 2013년 연 강우일수는, 평년보다 적게 나타났으나 2012년과 2014년, 2015년은 연 강우일수가 증가하여, 제주도산간의 지형적인 요인과 함께 기류의 수렴, 불안정요인, 산악효과 등 복합적 작용으로 강우일수가 증가한 것으로 사료된다.

제주도 예보구역별 평년강수량과 최근 연 강수량을 Fig. 22에서 살펴보면, 2013년을 제외한 대부분의 연도에서 비슷하거나 증가하는 경향을 보였다. 2011년 국지예보구역인 제주도서부와 제주도동부에서 평년보다 적은 강수량을 기록하였으나, 2012년 연이은 태풍과 2014년과 2015년 봄철과 겨울철, 기압골과 저기압의 잦은 통과로 강수량이 증가하였다.

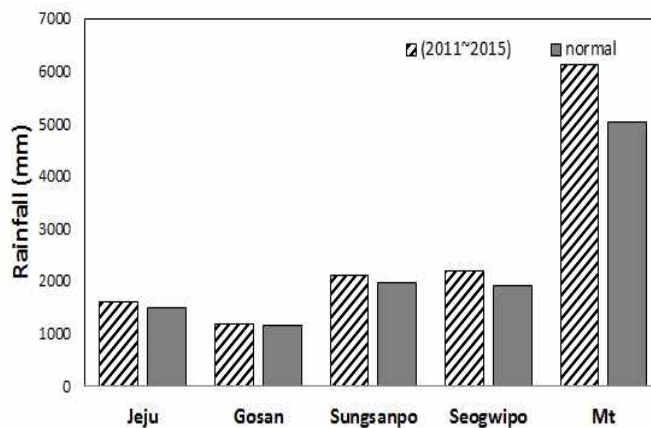


Fig. 20. Average annual rainfall according to the local zone in Jeju Island.

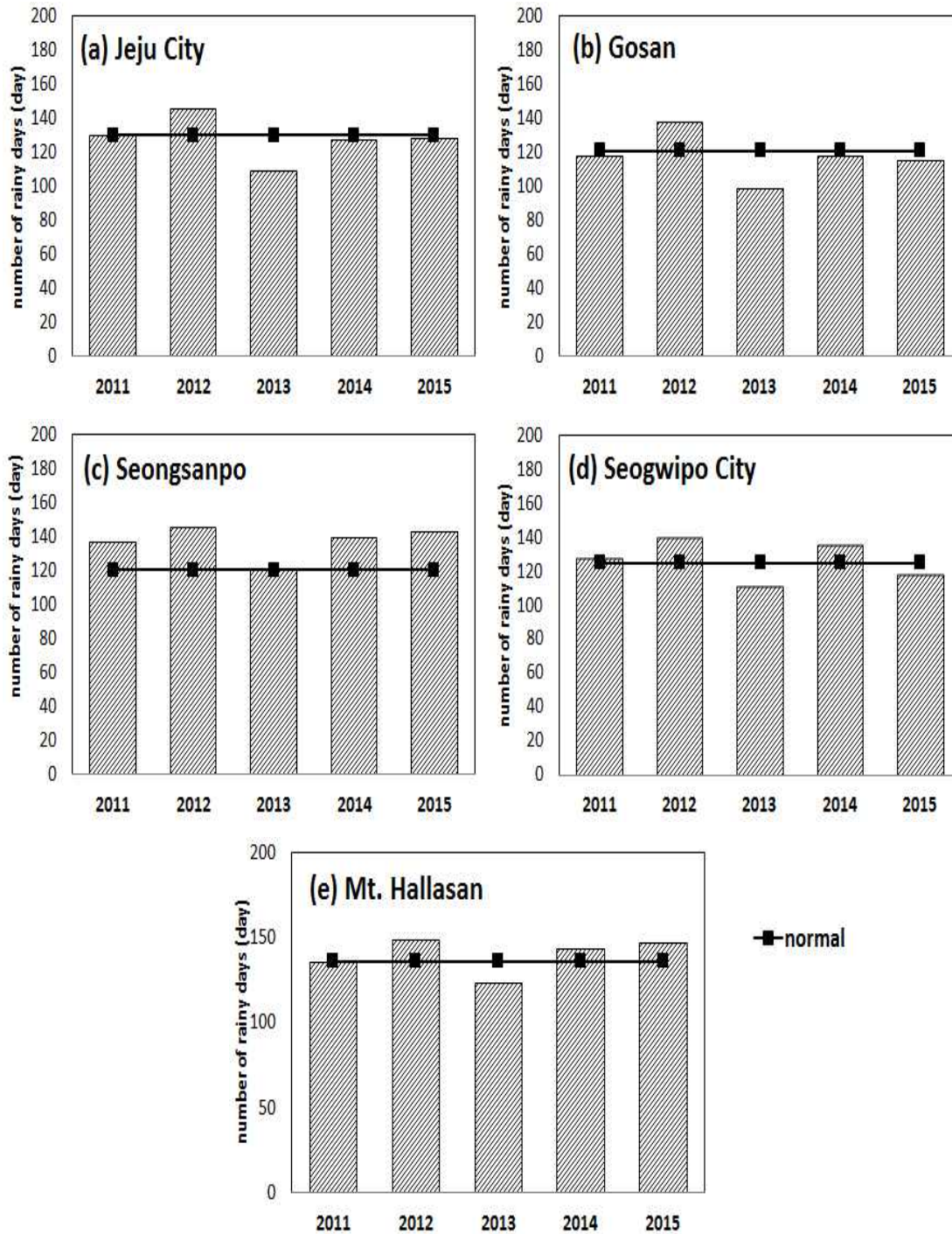


Fig. 21. Annual number of rainy days for the local zone in Jeju Island.

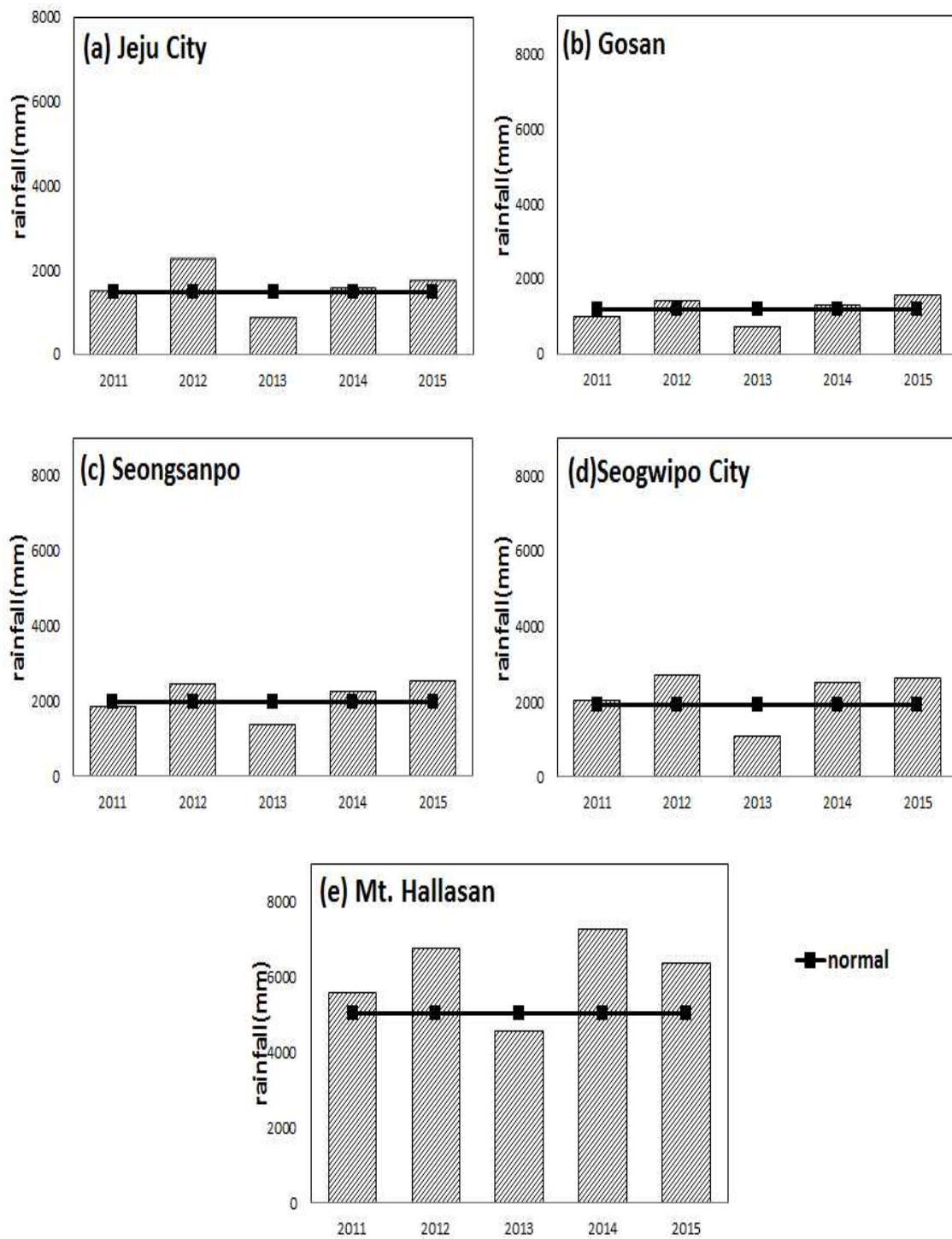


Fig. 22. Annual rainfall for the local zone in Jeju Island.

Fig. 23은 평년 계절 강우량과 최근 5년 동안의 계절 강우량을, 국지예보 구역별로 나타냈다. 최근 5년 동안의 봄철 강우량은 평년보다 크게 증가하였으며, 특히, 제주도남부 3.3배, 제주도동부 2.2배 증가하였다. 최근 기압골과 저기압에 의한 강우가 평년보다 많아지고 있음을 알 수 있다. 여름철과 가을철, 겨울철은 평년과 유사한 경향을 나타내면서 강우량이 증가하고 있으나, 증가 폭이 봄철에 비하여 적다. 그러나 제주도산간은 증가하는 것이 뚜렷하게 나타나고 있다.

국지예보구역 계절별 강우일수는 Fig. 24에 나타난 것과 같이 봄철은 평년보다 적어지고, 여름철은 평년과 유사한 경향을 나타냈다. 가을철은 평년보다 강우일수가 많아졌고, 겨울철은 평년과 비슷하거나 조금 많아지고 있다. 가을철과 겨울철이 강우일수가 많아지는 것은, 이동성고기압과 대륙고기압이 활성화되지 못하여, 저기압과 기압골이 통과하면서 증가한 것으로 사료된다. Fig 23와 Fig 24에서 봄철 강우일수가 감소하고, 강우량이 증가하는 것은 비가 시작되어 평년보다 많은 양의 강우량이 관측되고 있음을 알 수 있다.

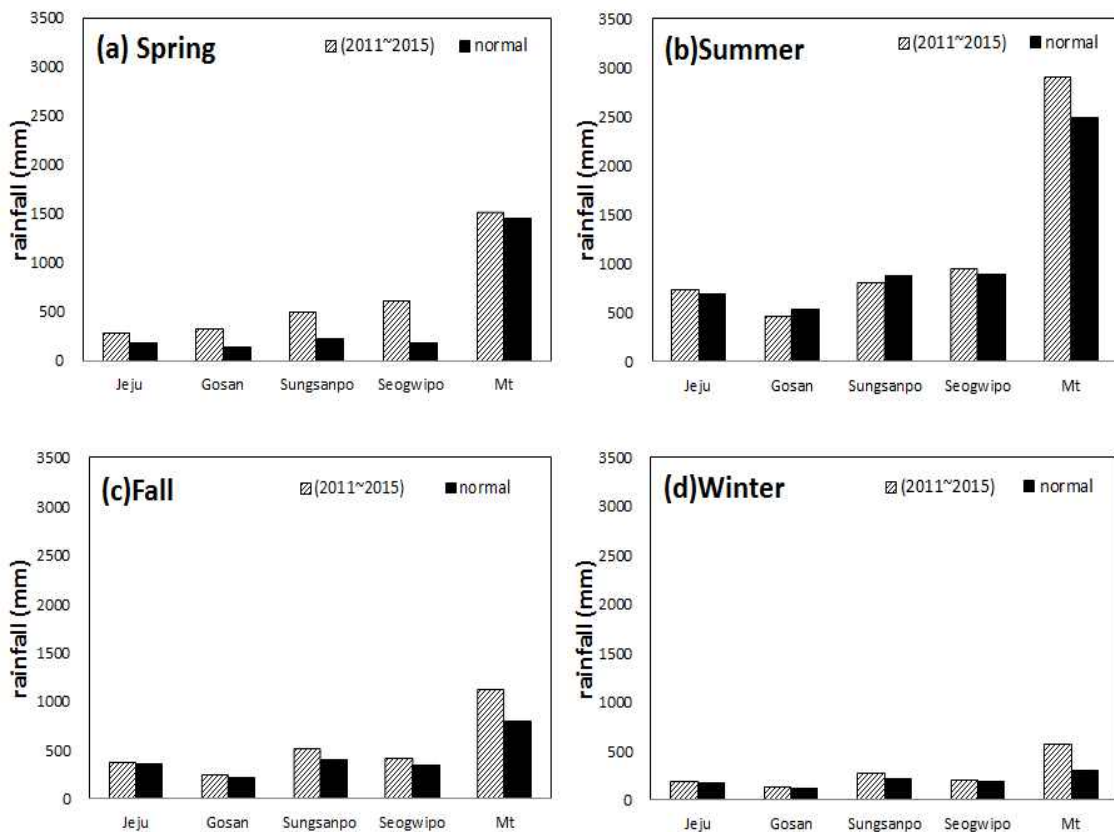


Fig. 23. Average seasonal rainfall from 2011 to 2015 for the local zone in Jeju Island.

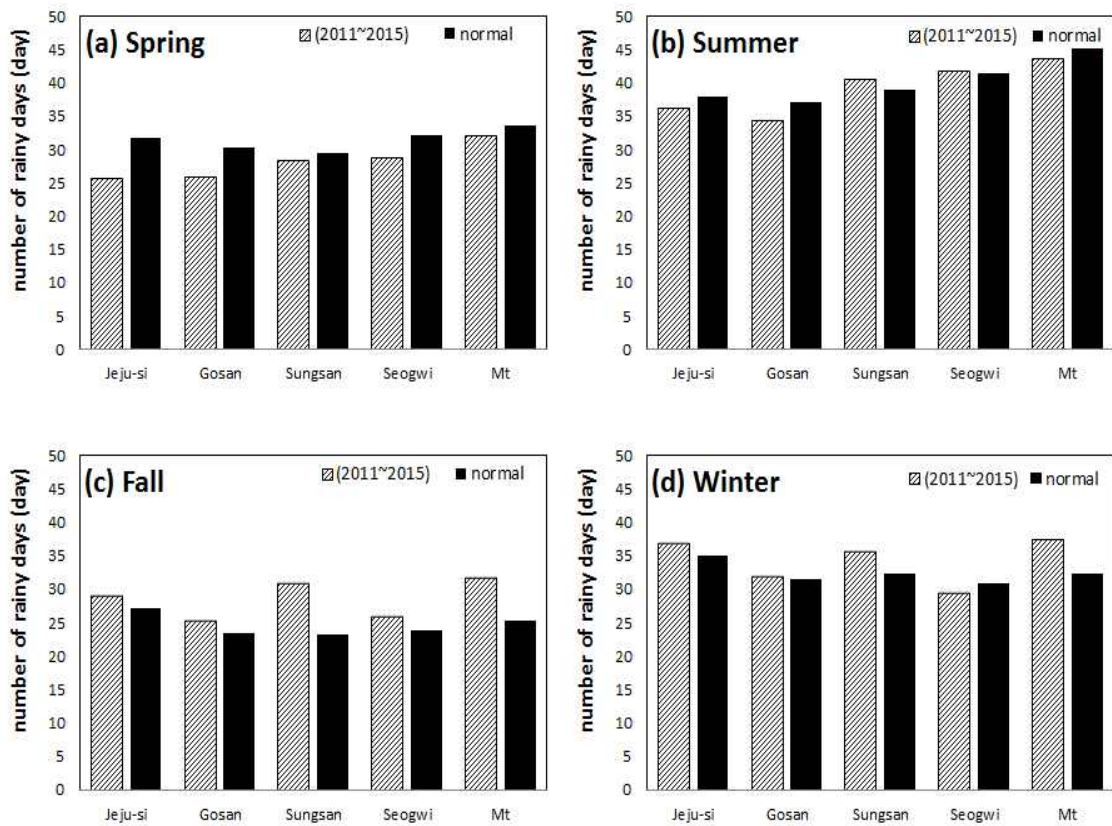


Fig. 24. Average seasonal number of rainy days from 2011 to 2015 for the local zone in Jeju Island.

제주도는 1,849.2 km²의 적은 면적임에도 불구하고 우리나라의 대표적 다우지역 중 한 곳으로, 강우량은 고도와 지형에 따라 편차가 나타나고 있다.

2011년부터 2015년까지 최근 5년 고도별 강우량은, Fig. 22에서 나타난 것과 같이 고도 200 m미만지역 기상관서 4개 지점의 누적 연 강우량 평균값은 1756.6 mm인 반면, 중산간지역인 선흘 2436.9 mm, 유수암은 2090.7 mm이며, 제주도산간지역인 성관악은 4680.6 mm, 어리목은 3715.1 mm, 윗세오름은 6120.0 mm, 진달래밭에서는 6333.6 mm가 관측되어, 제주도 강우특성을 잘 나타내고, 고도가 상승할수록 강우량이 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 25는 제주도 고도별 누적 월 강우량은, 여름철인 6월부터 강우량이 증가하여 8월에 월 강우량 최다를 기록하고, 9월 이후부터 점차 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 이것은 고온과 함께 태풍, 정체전선 등 북태평양고기압의 영향을 받아 대기중에 많은 수증기가 분포하여, 방아쇠역할을 하는 조건만 충족되면 언제든지 강우가 내릴 수 있음을 보여주고 있다. 중산간지역을 기준으로 고도별 월 강우량을 보면(Fig. 26), 제주도산간지역에서는 중산간지역보다 강우량이 많고, 해안지역에서는 중산간지역보다 적게 나타나, 고도별 강우량 편차 구

분이 뚜렷하게 나타나고 있다.

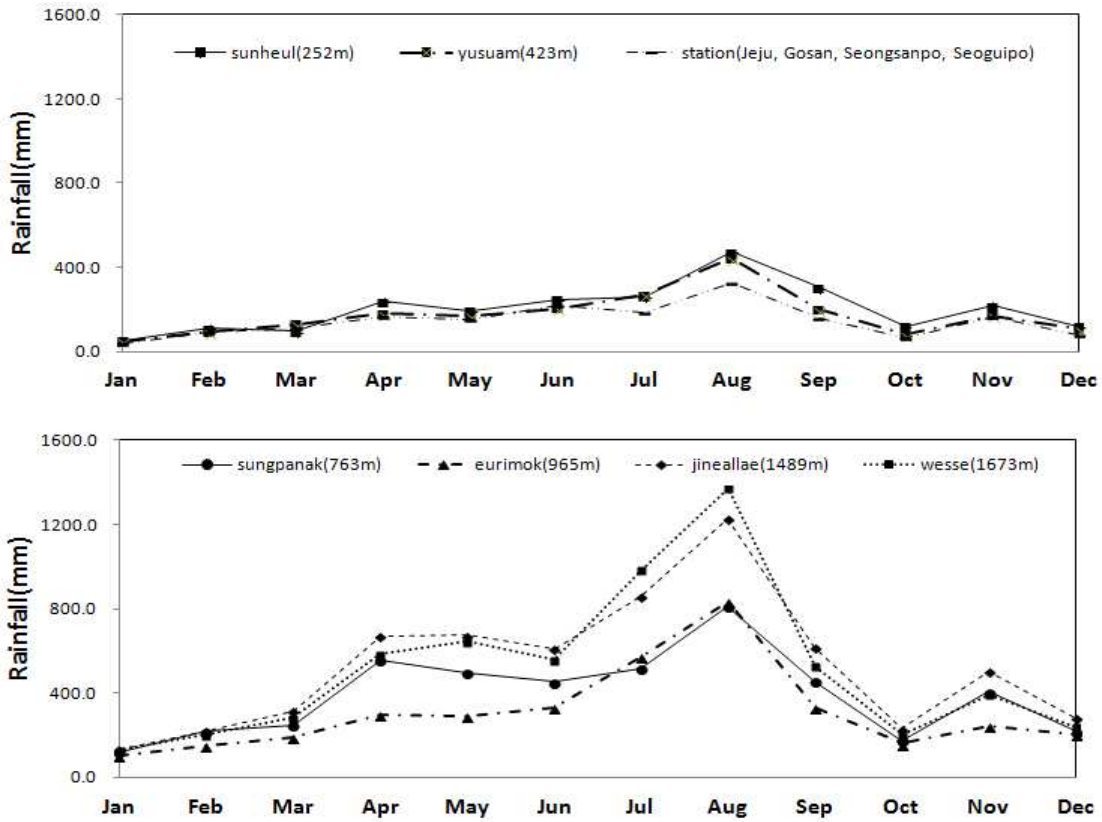


Fig. 25. Average monthly rainfall for 6 automatic weather sites and 4 surface observation stations from 2011 to 2015.

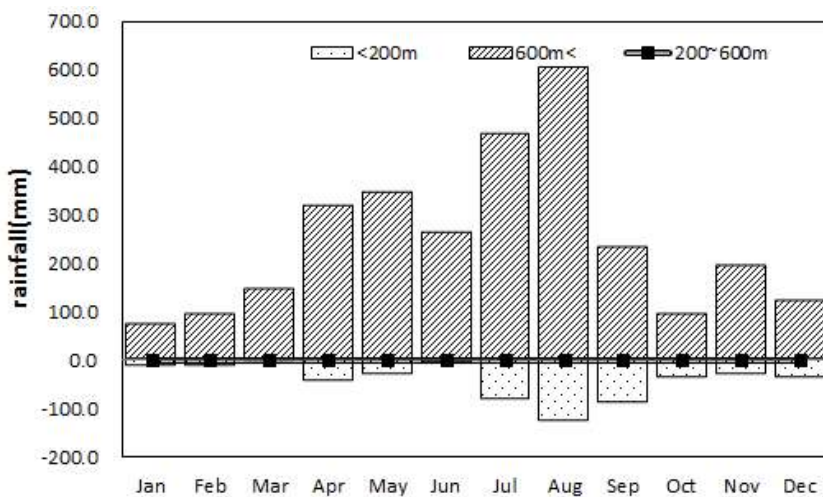


Fig. 26. The comparison of monthly average rainfall with the elevation.

4.2 제주도 호우특보 분석

4.2.1 호우현황

우리나라의 기상특보는 중규모 현상인 태풍을 제외한, 중관규모의 기상특보는 풍랑, 호우, 강풍, 대설, 한파, 건조, 황사 순으로 특보가 많이 발표되고, 국지예보구역에 따라 다소 차이가 있으나, 비슷한 경향으로 발표되고 있다. 제주도 역시 풍랑과 호우, 대설, 강풍 등 순으로 발표되고 있다. 제주도의 최근 5년간 특보 발표현황은 Fig. 27에서 보는 바와 같이, 풍랑특보 645회, 호우특보 288회, 대설특보 99회, 강풍특보 81회 건조특보 32회, 폭염특보 25회, 황사특보 2회로 조사되었다. Fig. 28에서 처럼 제주도의 기압패턴에 따른 최근 5년간 국지예보구역 특보생산 현황은 저기압 128회, 기압골 74회, 정체전선 54회, 태풍영향 32회, 북태평양고기압 가장자리 14회이며, 기압골과 저기압에 의한 특보가 전체 66%(저기압 42%, 기압골 24%)를 차지하고, 그 다음 정체전선 18%, 태풍영향 11%, 북태평양고기압 가장자리 5%로 조사되었다. 제주도의 특보 발표현황은 Fig. 29에서 보는 것과 같다. 호우특보가 가장 적은 제주도서부와 제주도산간을 비교하면, 제주도산간은 4.3배, 제주도남부는 2.3배, 제주도북부와 제주도동부는 1.5배 이상 많게 나타났다. 그리고 Fig. 30은 특보발표에 따른 적중률을 보여주고 있는데 북태평양고기압 가장자리에서 특보발표에 따른 적중률이 78%, 기압골과 저기압에서는 69%, 태풍영향은 63%, 정체전선에서는 48%로 북태평양고기압 가장자리에서 발표된 특보가 적중률이 높게 나타났다.

우리나라 남쪽에 위치한 제주도는, 내륙지역과 다르게 봄과 가을에 제주도 남쪽해상으로 지나는 기압골과 저기압의 영향을 받고, 여름에는 북태평양고기압이 수축하면서 우리나라로 통과하는 저기압의 영향으로 많은 강수와 함께 호우특보가 발표되고 있다.

2014년 제12호 태풍 ‘나크리(NAKRI)’는 제주도의 지형특성과 고도별 강우량 특성을 보여주는 좋은 사례이다. Fig. 31은 태풍 ‘나크리(NAKRI)’의 영향을 받은 제주도 일 강우량 분포를 나타낸 것으로, 제주 112.3 mm, 서귀포 147.5 mm, 성산 80.5 mm, 고산 35.8 mm가 나타났다. 제주도는 제주도동부와 제주도서부, 제주도남부와 제주도북부, 제주도산간으로 큰 강우량편차를 보였다. 특히, 제주도산간인 성판악 430.5 mm, 어리목 620.0 mm, 진달래밭 840.5 mm, 윗세오름 1182.0 mm로 집중호우가 내려, 제주도 지형 및 고도별 강우 특성을 잘 나타내고 있다. 또한, 기상관서의 강우량과 10~20배 이상의 매우 큰 편차를 보였다. 특히, 윗세오름은 방재기상관측장비(AWS) 설치된 이후 일 강우량으로는 최고를 기록하였다.

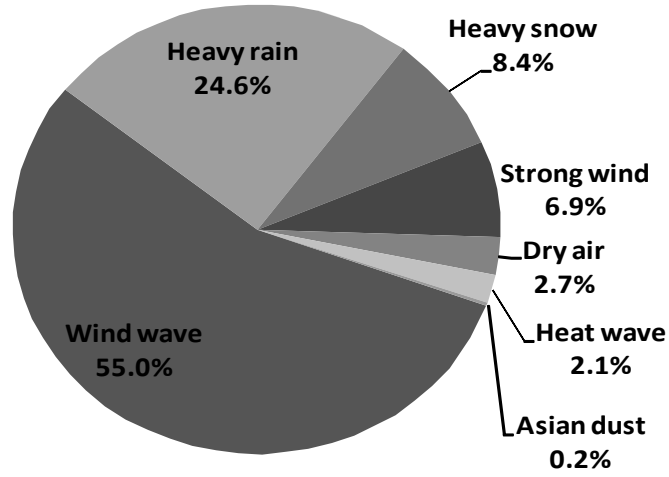


Fig. 27. The frequency of special weather reports issued from 2011 to 2015 in Jeju Island.

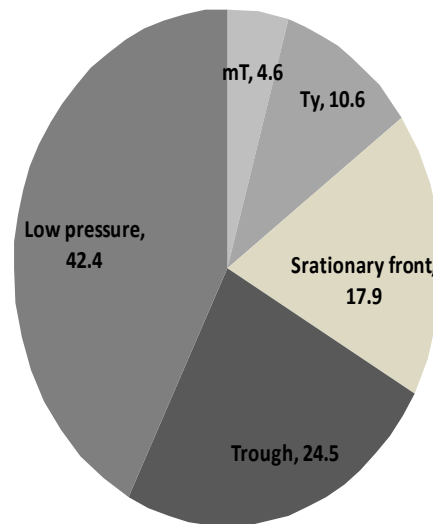


Fig. 28. The frequency of the pressure patterns occurred when special heavy rain reports was issued from 2011 to 2015 in Jeju Island.

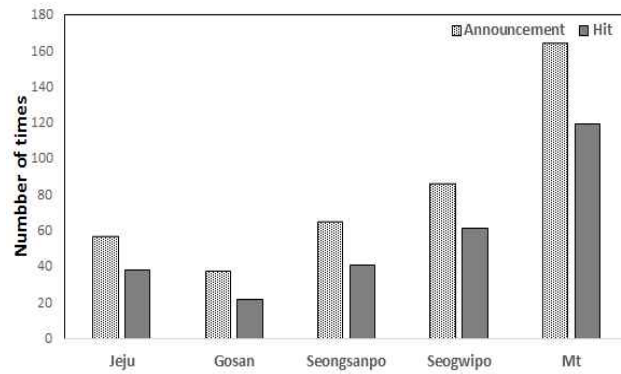


Fig. 29. The number of the heavy rain special reports news flashed forecasting area in Jeju Island from 2011 to 2015.

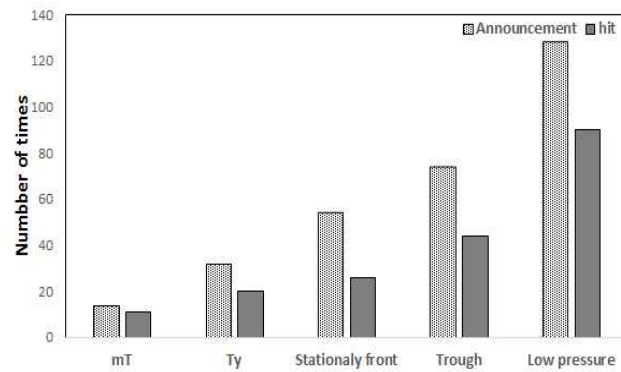


Fig. 30. The number of the occurrences and the hitting cases of the special heavy rain reports according to the pressure patterns occurred from 2011 to 2015 in Jeju Island.

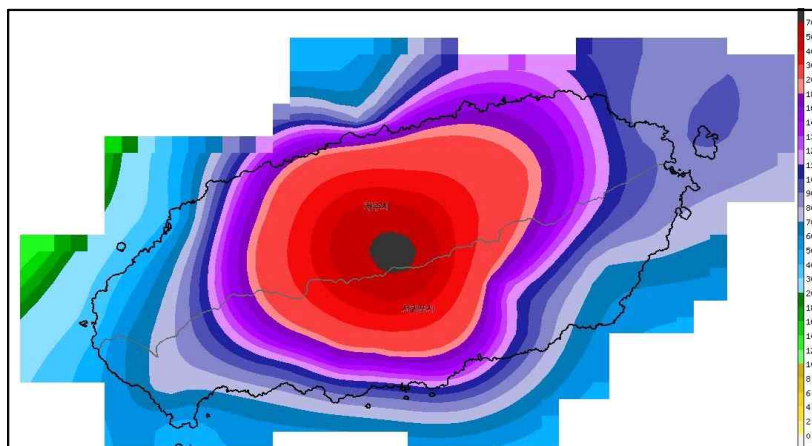


Fig. 31. The rainfall resulted from the 12th typhoon 'Nakri' landed on Jeju Island on August 2, 2014.

4.2.2 종관 기압계 특성

우리나라에 위험기상을 유발하는 기상인자를 특징적으로 단정하기 어렵고, 위험기상의 종류와 지역, 계절에 따라 다양한 위험기상이 발생하고 있다. 겨울에 대표적인 위험기상은 대설과 한파, 여름철은 대표적으로 태풍이다. 최근에 호우는 계절과 관계없이 나타나는 기상 요소이다. 호우는 대규모순환과 중규모순환에서 나타나지만, 사전에 특정지역을 구분하여 예상 강우량을 판단하여, 호우예비특보를 발표하기에는 상당한 어려움이 있다. 동네예보를 시행하고 있는 기상청에서는, 호우예비특보는 광역예보구역으로 발표하고 있다.

Fig. 32는 최근 5년 간 기압계 패턴별에 따른 제주도 호우특보 발표현황을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 태풍과 북태평양고기압의 활성화 유무에 따라 호우특보 생산횟수가 달라지지만, 대체로 유사한 경향으로 특보가 생산되고 있다. 저기압에 의한 호우는 2015년 가장 많았고, 2012년에서 2014년은 비슷하였으나, 2011년은 적었다. 기압골에 의한 호우는 2011년 가장 많았고, 그 다음으로 2012년과 2014년 2015년이 적었다. 태풍영향에 의한 호우특보는, 2011과 2014년 비슷하게 발표하였고, 그 다음으로 2015년이었다. 북태평양고기압가장자리에서 호우특보는 2013년과 2014년 없었다. 2013년 제주도는 북태평양고기압권 내에 들어 폭염경보와 폭염주의보가 발표되어, 덥고 무더운 날씨가 지속되면서 호우특보는 발표되지 않았다.

Fig. 33은 계절에 따른 기압패턴별 호우특보 발효현황을 봄, 가을은 기압골과 저기압, 겨울은 저기압에 의한 호우가 많았으며, 여름은 다섯종류의 기압패턴 골고루 호우특보가 발표되었다. 특히, 여름은 계절적 요인으로 몬순에 의한, 정체전선의 영향을 받아 특보가 많이 생산된 것으로 판단되었다. 계절별 호우특보 발표에 대한 적중률은 봄철 75%, 여름철 67%, 가을철 59%, 겨울철 46%로 나타났다. 최근에 들어 겨울철 저기압이 우리나라로 접근하면서, 제주지역은 호우특보가 발표되는 등 많은 강우가 내리고 있다. 겨울철 대륙고기압이 크게 활성화되지 못하고, 저기압이 우리나라로 통과하면서 겨울철 호우특보가 증가하는 경향을 보이고 있다. 대기의 흐름과 엘니뇨와 라니냐의 발달과 쇠퇴에 따라, 태풍의 강도가 달라지며, 또한, 태풍의 이상 진로로 인해 우리나라의 강우량 변동 폭이 크게 나타나고 있다.

제주도가 북태평양고기압 가장자리에 위치할 때, 해상으로부터 급격하게 발달한 호우셀이 유입되어, 제주도 해안지역을 거쳐 제주도산간지역으로 더욱 발달, 정체하면서 단시간에 많은 강우량을 기록하는 경우가 종종 나타나, 호우특보를 운영하는 데 어려움이 많다.

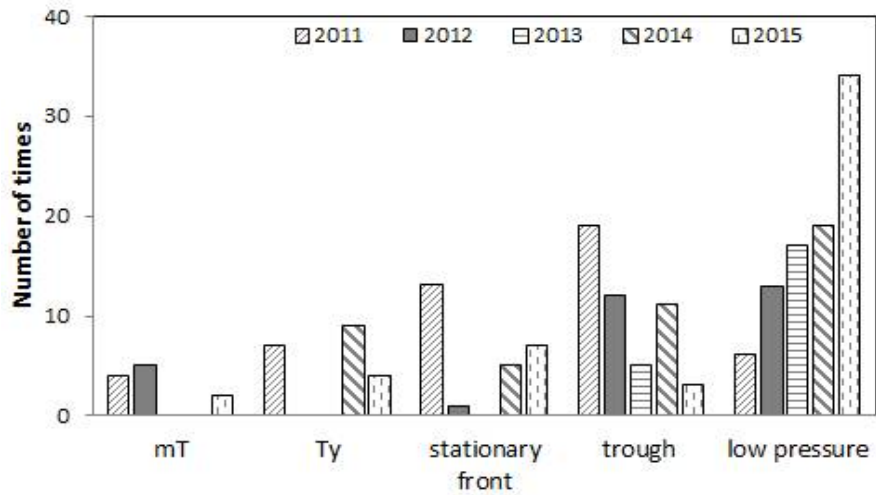


Fig. 32. The number of the special heavy rain reports according to the pressure patterns occurred in Jeju Island.

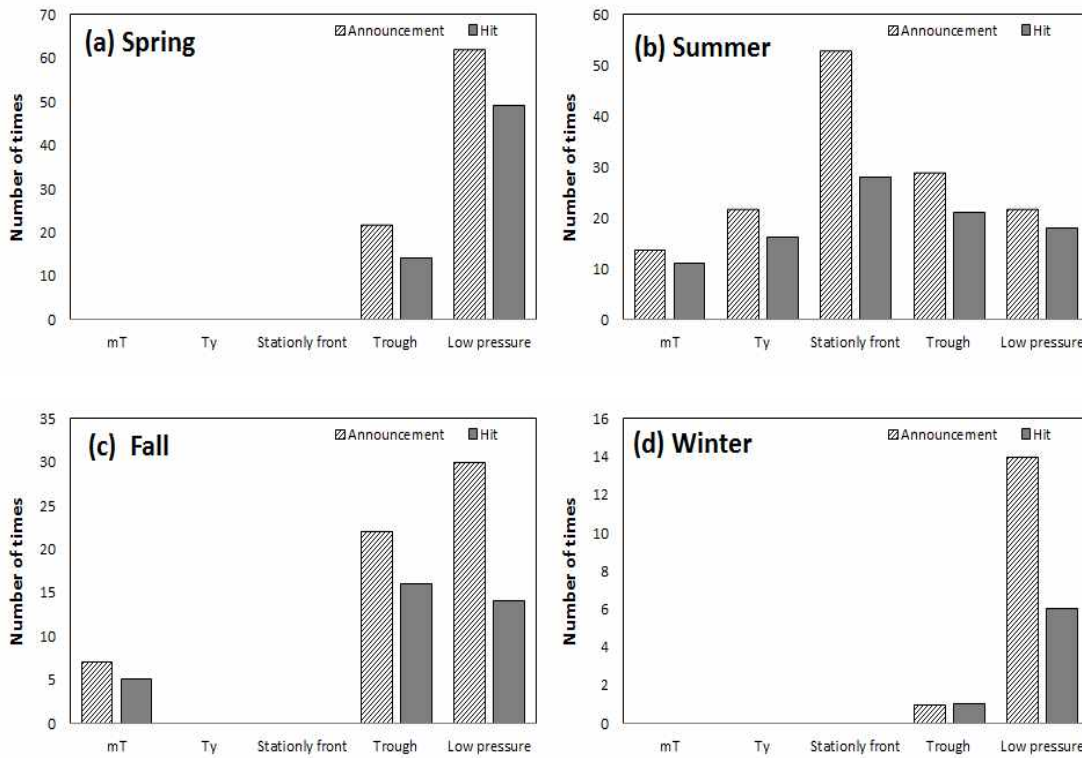


Fig. 33. The number of the special heavy rain reports according to the pressure patterns occurred form 2011 to 2015 in Jeju Island.

Fig. 34에서 보는 것처럼 기압계별 최근 5년 동안 호우특보가 발표된 날의 강우지속시간을 평균하면, 북태평양고기압 가장자리에서 9.6 h, 태풍영향 17.8 h, 정체전선 15.5 h, 기압골 12.6 h, 저기압 15.7 h로 조사되었으며, 정체전선에 의한 강우지속시간이 가장 길게 나타났다. 여름철로 접어들면서 북태평양기단과 오츠크해 기단 사이에 위치한 우리나라는, 대기 중에 수증기가 많아져 조건부 불안정 상태인 불안정이 가속되어 불안정을 해소하면서 강우시간이 길어진 것으로 판단된다. 정체전선의 활성화 유무에 따라 연도별 강우시간에 차이가 있지만, 기압계패턴에 따른 제주도 강우지속시간은 태풍영향을 받을 때가 가장 길게 나타났다. 이러한 결과는 태풍전면에 위치한 전면수렴대의 강우시간과 태풍의 직접영향을 받으면서 나타난 강우시간이 누적되면서, 강우지속시간이 길어진 것으로 판단된다. 북태평양고기압 가장자리에서 강우지속시간은 해상에서 급격한 발달과 제주도로 유입되어 불안정이 해소되어 짧은 시간에 많은 강우량을 기록하는 것이 특징이다. 그러나 2011년 8월 13일 제주도에 강우시간은 국지예보구역별로 차이가 있다. 국지예보구역별 강우시간을 보면 제주도북부 2.5 h, 제주도남부 8.7 h, 제주도동부 7.3 h, 제주도서부 2.6 h, 제주도산간 15.7 h로 제주도산간에서 길게 나타났다. 이러한 까닭은 발해만부근으로 약한 기압골이 위치하면서, 오츠크해~발해만으로 기압골의 통로가 되어 기압계 이동속도가 느리고, 지상 기압경도력에 의한 남풍류가 지속적으로 강하게 유입되면서, 제주도산간과 제주도남부, 제주도동부로 강우지속시간이 길어진 것으로 판단된다. 이 때 기압계패턴은 우리나라 내륙지방은 기압골의 영향을 받았지만, 제주도는 북태평양고기압 가장자리에 위치하였기 때문이다.

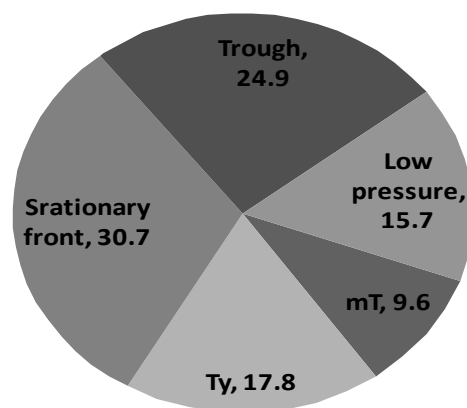


Fig. 34. The rainfall duration averaged for the pressure patterns during the period of special heavy rain reports issued from 2011 to 2015.

4.2.3 호우시 기상조건

우리나라의 호우는 대부분 여름철에 집중되고 있으며, 여름철 호우예측을 위하여 수치자료를 기반으로 한 호우체크리스트가 있다. 주요내용은 850hPa 유선과 습윤역, 하층 jet, 200hPa jet의 위치, 불안정지수 등이다. 앞에서 기술한 것처럼 기상변화를 예측, 분석하는데, 850hPa(1500 m) 고도는 매우 중요하다. 기류변화, 습기이동 등 기상변화에 따른 분석, 예측, 판단에 유용하기 때문이다. Fig. 35와 Fig. 36은 기압패턴에 따른 850hPa 풍향을 나타내고 있는데, 호우특보가 발표된 날 850hPa 풍향은 북태평양고기압가장자리에서는 남~서, 태풍영향은 동~남동, 정체전선에서는 남서~서, 기압골은 남~서, 저기압에서는 남동~남서풍이 주 풍향으로 분석 되었다. 태풍영향에서 다른 기압패턴에서는 잘 나타나지 않았던, 호우가 동풍계열 바람에서 발생한 것이 특이한 점으로 조사되었다. 중규모현상인 태풍이 열대지방으로부터 따뜻한 기류와 많은 수증기를, 중위도지방으로 이동시키면서 상대적으로 차가운 기류가 합류되어, 동풍류의 바람에서도 호우가 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 37에서 제주도 예보구역별 850hPa 풍향을 살펴보면, 제주도산간과 제주도동부(성산포) S풍계열, 제주도북부(제주)와 제주도남부(서귀포) 남~남서풍이 두드러졌다. 또한, 저기압의 영향을 받아 북서풍에 의한 호우특보가 제주도북부 2회, 제주도남부 1회, 제주도동부 2회, 제주도산간 1회 호우특보가 발표되었다. 북서풍에 의한 대기는 차고 건조한 공기가 유입되어, 강우량이 많지 않고 호우특보가 발표되기 어렵다. 또한, 제주도서부는 정체전선 영향으로 동풍에서 2회 호우특보가 발표되고 있었다, 제주도서부는 동풍이 유입될 때, 지형적으로 풍하측에 해당되어 습윤한 공기가 한라산을 넘으면서 탈락되어, 상대적으로 건조해 호우가 예상될 정도의 많은 강우를 예상하기는 어렵다.

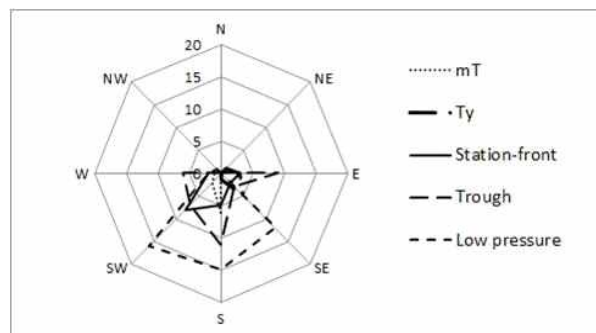


Fig. 35. The frequency of the prevailing wind direction at the isobaric surface of 850 hPa according to the pressure patterns during the period of special heavy rain reports issued from 2011 to 2015 in Jeju Island.

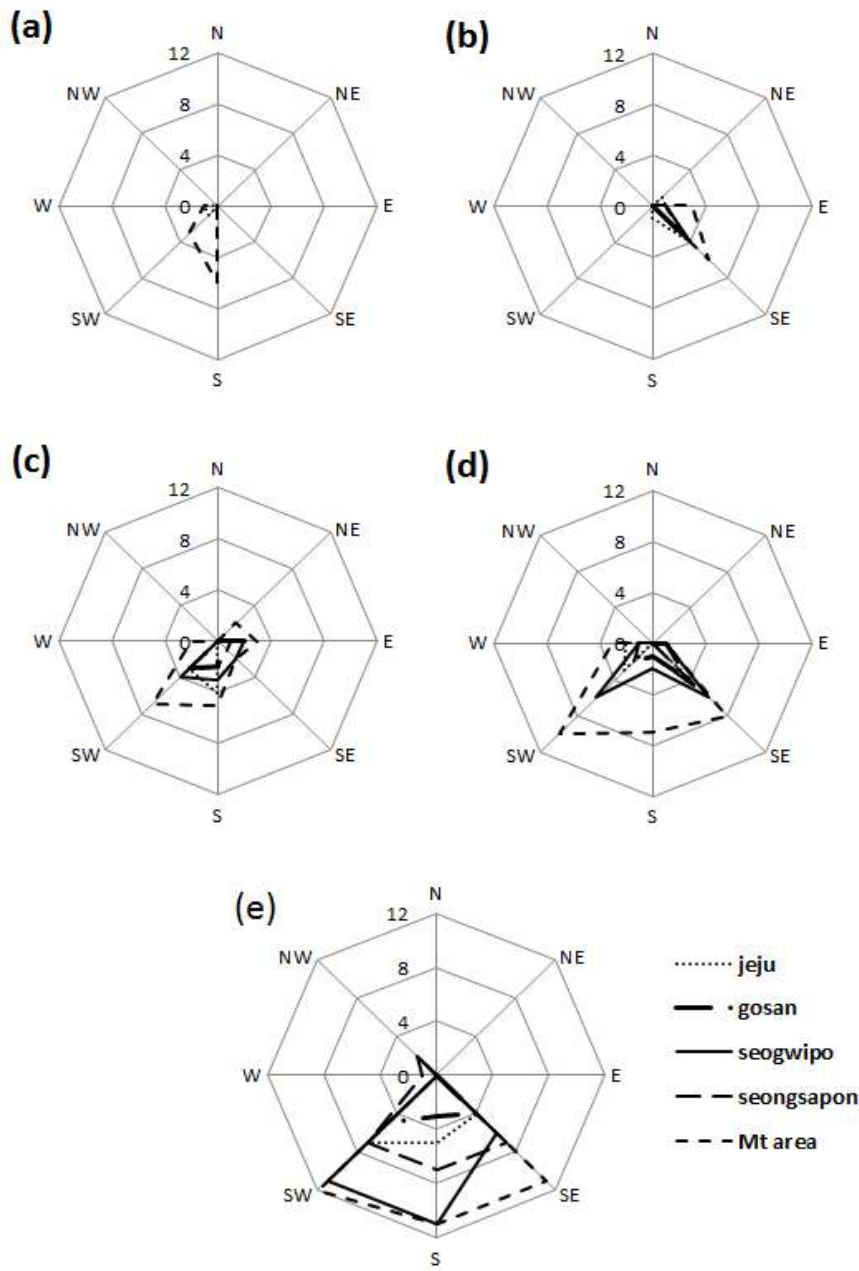


Fig. 36. The frequency of the prevailing wind direction at the isobaric surface of 850 hPa according to the local zone during the period of the special heavy rain reports issued for 2011 to 2015 (a: mT, b: Ty, c: Station-front, d: Trough, e: Low pressure).

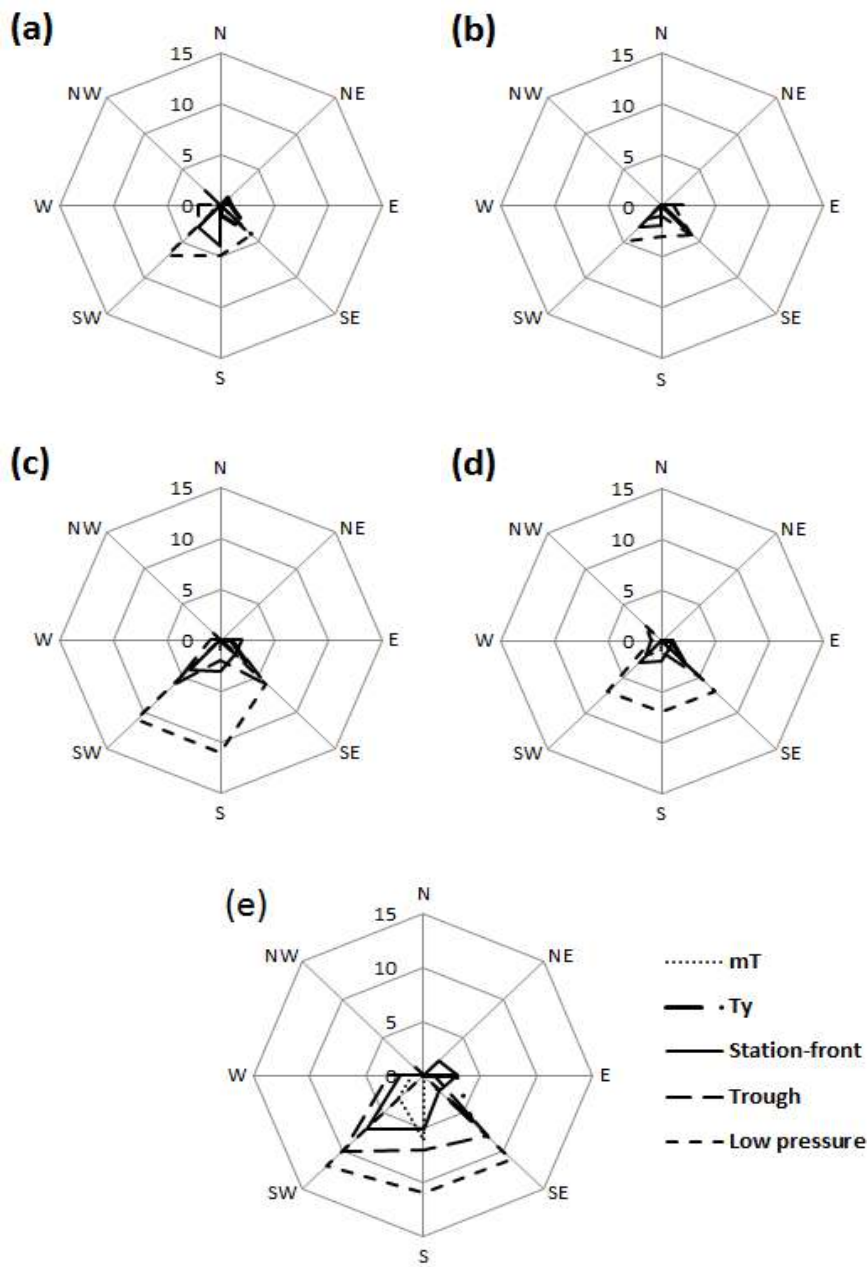


Fig. 37. The frequency of the prevailing wind direction at the isobaric surface of 850 hPa according to the pressure patterns for during the period of special heavy rain reports issued form 2011 to 2015 in Jeju Island(a: Jeju City, b: Gosan, c: Seogwipo City, d: Seongsanpo, e: Mt. Hallasan).

Fig. 38은 2013년 4월 6일 지상일기도로 서고동저형인 겨울철 일기도패턴을 보이고 있으며, 일기도를 분석하면 제주도 부근에 위치한 저기압이 일본열도를 따라서 동진하다가 동해상에서 북동진하여, 우리나라는 기압경도력이 강하게 발달하여 강우가 지속되었다. 일강수량은 제주 70.1 mm, 성산 60.7 mm, 성판악 96.5 mm, 진달래밭 111.5 mm 등 주로 제주도산간으로 1000 mm내외의 많은 비가 내렸다. 일 최대순간풍속은 제주 21.6 m/s, 서귀포 15.6 m/s, 고산 30.0 m/s 등 강풍이 불었다.

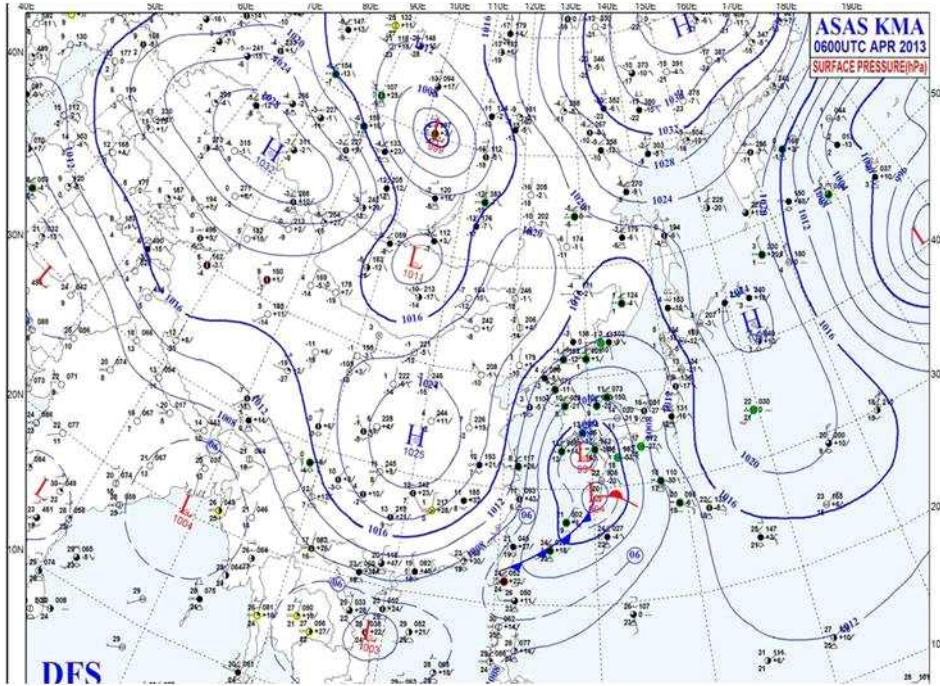


Fig. 38. Surface weather chart (00UTC, Apr. 6, 2013).

총 강수량은 Fig. 39에서 보는 바와 같이 북태평양고기압가장자리와 태풍, 정체전선영향에서 55 mm내외를 나타냈고, 기압골 45 mm내외, 저기압은 40 mm로 분석 되었다. 총강수량이 북태평양고기압가장자리와 태풍, 정체전선에서 높게 나타난 것은, 계절적인 요인과 상대적으로 따뜻한 기단에서 북쪽으로 열 수송에 기인하는 것으로 분석되었다. 기압골과 저기압에서 상대적으로 총강수량이 낮게 나타난 것은, 종관규모의 시스템상, 상층구름이 먼저 유입되고, 점차 중층운, 하층운 순으로 구름이 유입되며, 또한, 계절적으로 봄과 가을철에 기압골과 저기압이 주로 통과하나, 여름철 북태평양고기압의 영향을 받는 고온다습한 대기보다 총강수량이 낮기 때문이다.

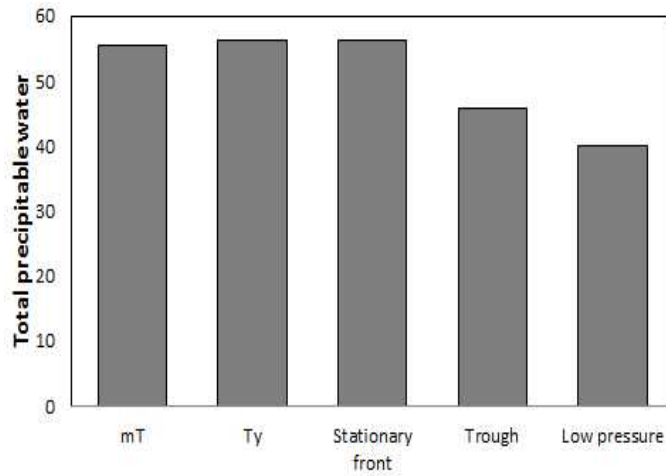


Fig. 39. Total precipitable water averaged for the pressure patterns during the period of special heavy rain reports issued.

Fig. 40은 불안정수를 나타내고 있는데, 호우특보를 발표한 날의 불안정지수 K-index는 25 K 이상 76 %, TT는 36 K 이상 84 %로 조사되었다. 제주도가 수치 모델 불안정지수 K-index 25 K이상의 구역과 TT 36 K 이상에 위치하였을 때, 호우특보 가능성이 높게 나타나, 호우특보 발표 시 고려할 수 있고, 앞으로 더 많은 연구를 통하여, 제주도 지형과 고도에 알맞은 맞춤형 불안정지수를 개발할 필요성이 있다.

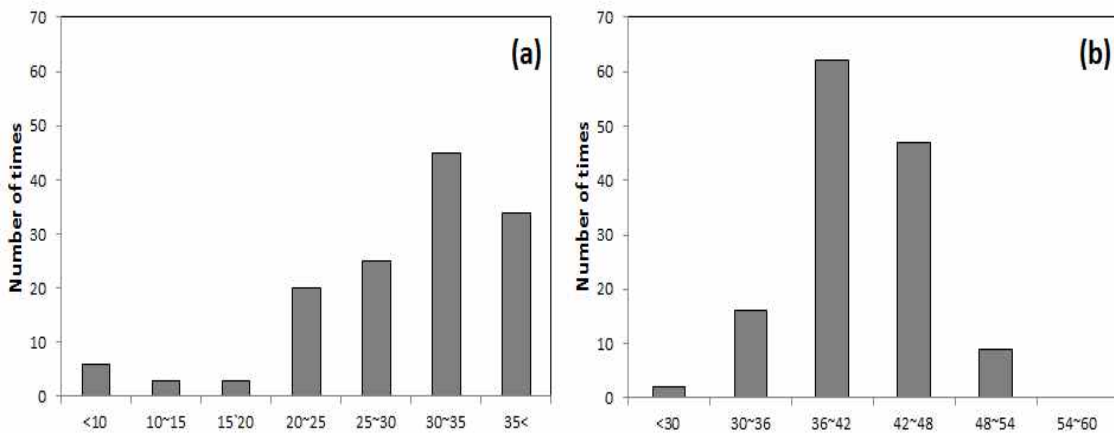


Fig. 40. Unstability index estimated from the numerical weather model during special heavy rain reports issued from 2011 to 2015 in Jeju Island (a: KI, b: TT).

4.3 호우특보 시 기상레이더 추정강우량과 관측값 비교

4.3.1 호우특보 시 기상레이더 강우에코 이동속도

중국남부지역으로부터 이동하는 구름대는 동진내지 북동진하면서 먼저 제주지역에 영향을 미치며, 우리나라의 서해상으로 진출하면서 수증기를 함유하는 구름대로 발달한다. 따라서 레이더 강우에코의 이동속도를 파악함으로써 위험기상에 대한 사전 대비는 물론이고 유관기관과 협업으로 피해를 최소화 할 수 있다.

본 연구기간 동안 호우특보가 발표된 기간동안에 강우에코 이동속도를 계산하였다. 강우에코의 이동속도는 기압골과 저기압의 발달에 유무에 따라 다소 차이가 나타났으며, 대체로 3시간에서 7시간 가량이 소요된 것으로 나타났다. 또한, 저기압이 중부지방에 위치하여, 서해상으로 강우에코가 선상으로 나타나면서, 강우대가 남동쪽으로 남하할 때, 강우에코는 20 km/h 속도로 남하하였다. 제주도는 동서길이가 73 km로 길이가 길지 않지만, 중앙에 산이 위치하여 고도가 급격하게 높아진다. 해안지역에 있던 강우에코가 제주도산간지역으로 이동하면서, 레이더 강우강도가 발달하고, 지상 강우량계 강우강도가 강하게 나타난다. 제주도산간지역은 기상레이더의 유효고도를 초과하고, 지형 등 레이더 빔차폐로 한라산 정상부근에 강우에코는 정확하게 나타나지 않는다. 한라산 정상의 강우에코는 진도기상레이더와 고산기상레이더, 성산기상레이더 자료를 합성(CAPPI)해 사용하고 있다. 기상레이더의 한라산 강우에코는 약하게 나타나지만 지상강우량계 강도는 강하게 나타날 때도 종종 나타난다.

Fig. 41은 기상레이더의 유효탐지거리 240 km 이내에서 기상레이더 강우에코의 이동속도를 나타낸 것으로 20~40 km/h가 14%, 40~60 km/h는 74%, 60~80 km/h는 10%를 나타냈다.

Fig. 42에서 보는 것처럼 호우특보 발표 후 1시간 동안 기상레이더의 추정강우량 이동속도를 나타내고 있다. 북태평양고기압이 25 km 미만으로 가장 느렸고, 그 외의 기압계에서는 40 km 내외의 속도로 이동하였다. 레이더 추정강우량 이동속도에서 살펴본 바와 같이, 북태평양고기압의 영향으로 호우특보가 내렸을 때, 레이더 추정강우량의 이동속도가 느리게 이동하면서, 많은 강우량을 기록하고 지역적 편차가 크게 나타났다. 특히, 해상에서 유입되는 강우에코와 열적불안정으로 발생한 강우에코는, 지형특성과 결합하여 한 지역에 정체하면서, 열적불안정이 해소될 때까지 집중적으로 많은 비를 내려 위험기상을 유발하고 있다. 기압패턴별 강우에코의 이동속도는, 저기압과 정체전선이 북태평양 고기압보다 빠르게 나타났으며, 태풍의 이동속도보다도 빠르게 나타나고 있다.

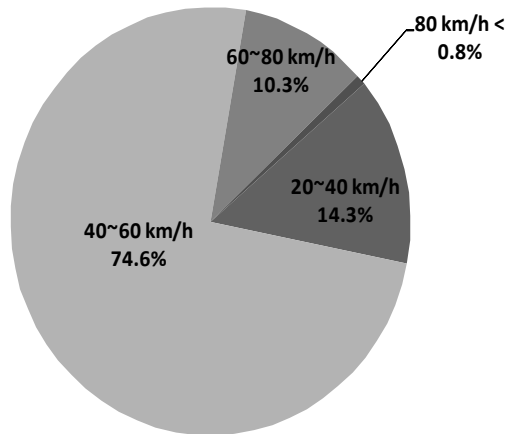


Fig. 41. The frequency of the moving velocity of radar echo within the effective detection range of 240 km.

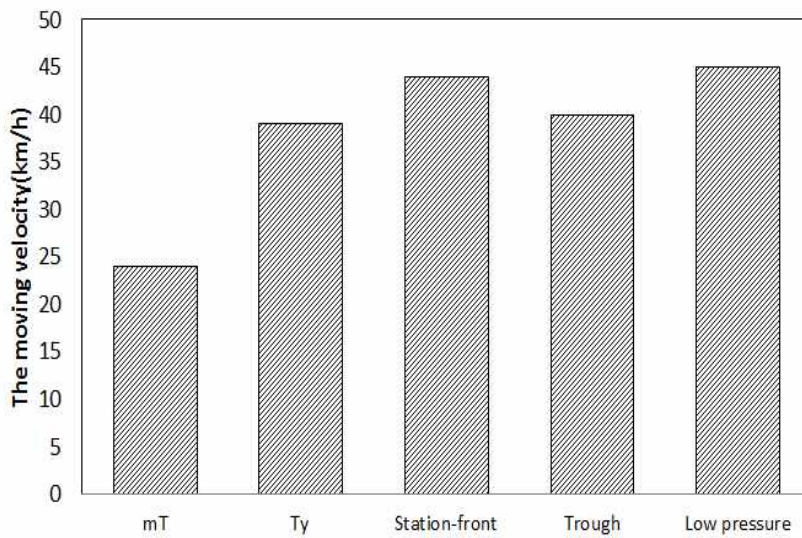


Fig. 42. The moving velocity of radar echo averaged for pressure patterns during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island.

4.3.2 호우특보 시 예상강우량과 지상강우량의 비교

최근의 지구온난화와 그에 따른 기후변화로, 세계 곳곳에서 기상이변에 폭설과 호우, 강풍 등 그에 따른 피해가 종종 매스컴에 이슈가 되어 소식을 접한다. 이를 뒷받침하듯 우리나라에도 폭설과 강풍, 호우가 심심찮게 나타나고 있다. 제주도 역시 예외는 아니다. 본 연구에서 제주도의 일 강우량이 80 mm 이상과 100 mm 이상의 날을 평년과 비교해 보면 최근에 점차 증가하는 경향을 알 수 있었다.

Fig. 43은 최근 특보가 내린 날 특보가 발표된 후, 해제 시까지의 예상강우량을 50 mm미만, 50 mm에서 100 mm미만, 100 mm이상으로 분류하여 기압패턴별로 살펴보면, 예상강우량은 50 mm미만에서 지상강우량 50 mm ~100 mm미만은, 기압골 1회, 저기압 8회가 나타났고, 예상강우량 50 mm에서 100 mm미만에서는 지상강우량 50 mm미만이 북태평양고기압 1회, 태풍 5회, 정체전선 37회, 기압골 14회, 저기압 65회가 나타났고, 100 mm이상은 태풍 3회, 저기압 9회가 나타났다. 또한, 예상강우량 100 mm이상에서는 지상강우량 50 mm미만이 태풍 12회, 정체전선 1회, 기압골 6회, 저기압 16회가 나타났고, 50 mm ~ 100 mm미만에는 태풍 6회, 기압골 3회, 저기압 7회가 나타났으나, 예상강우량 100 mm이상에서 북태평양고기압 영향으로 지상강우량은 관측되지 않았다. 또한, 정체전선은 지상강우량 50 mm이하에서만 관측이 되어, 호우특보 발표에 따른 강우량 예상 시 지역특성과 기상레이더 강우량 추정값, 이동속도 등 보다 면밀한 검토가 필요하다.

Fig. 44는 호우특보가 발표된 후, 해제까지의 지상강우량을 50 mm미만과 50 mm에서 100 mm미만, 100 mm이상으로 구분하여 나타냈다. 호우특보가 발표된 후, 50 mm미만의 전체의 65%를 차지하여, 전체 호우특보 발표의 2/3을 나타냈다. 또한, 지상강우량 50 mm에서 100 mm미만을 기록한 호우특보의 기압패턴을 살펴보면, 북태평양고기압 2회, 태풍 10회, 정체전선 17회, 기압골 22회, 저기압 62회로 기압골과 저기압에 의한 강우량이 74%를 차지하였다. 100 mm이상의 강우량을 기록한 것은 저기압과 정체전선, 그리고 태풍으로 조사되었다.

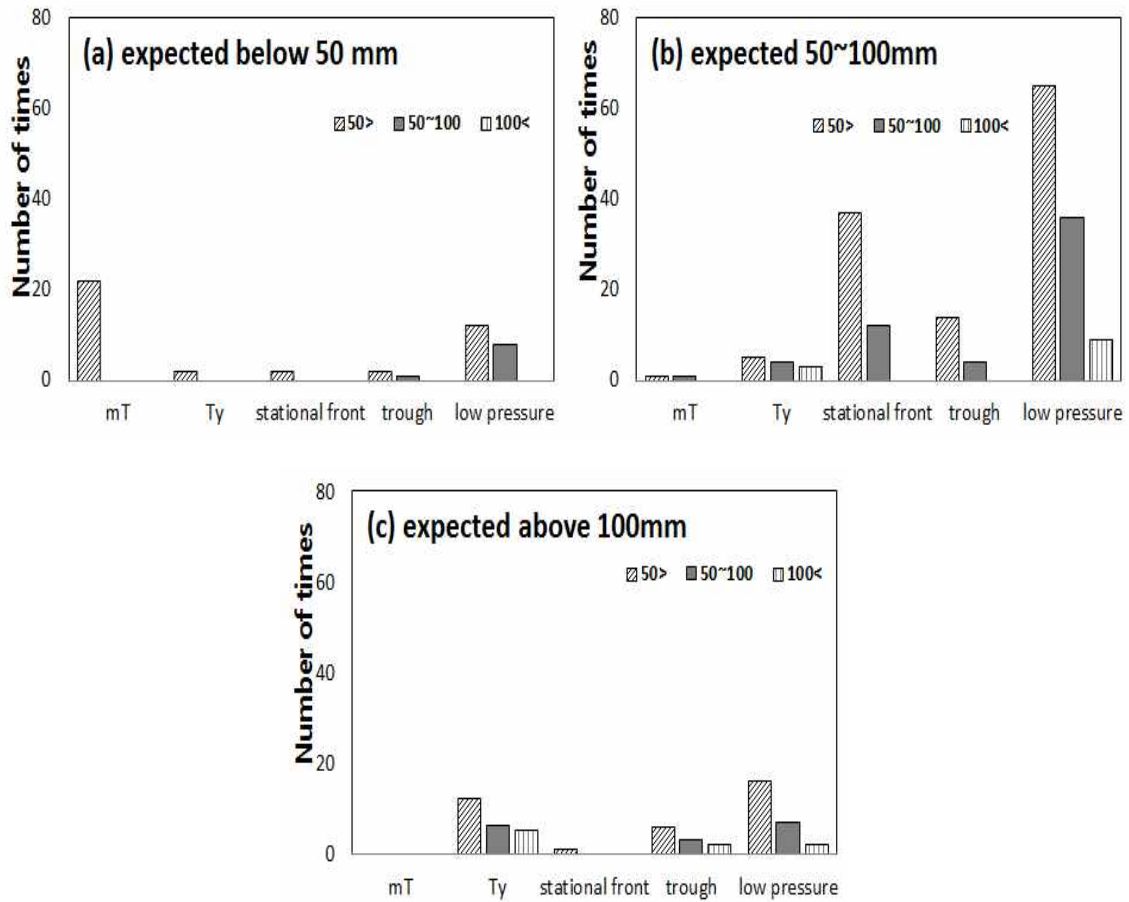


Fig. 43. The number of appearance in each class of actual rainfall during heavy rainfall events occurred from 2011 to 2015 in Jeju Island.

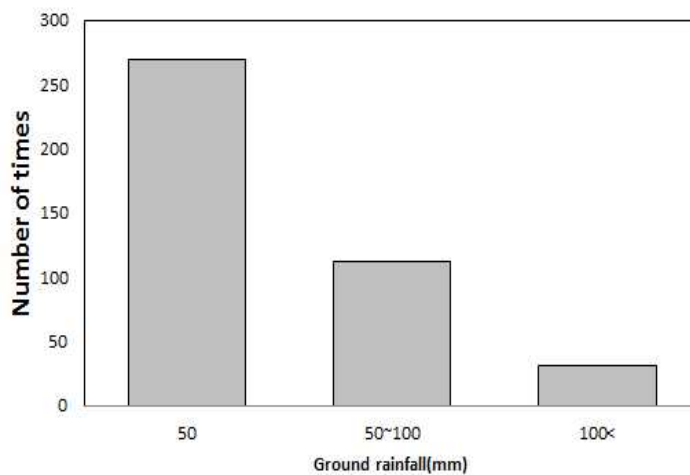


Fig. 44. The number of appearance in the class of actual rainfall during heavy rain events occurred from 2011 to 2015 in Jeju Island.

Fig. 45는 호우특보가 발표된 날의 최근 5년 동안의 기압계패턴에 따라 관측된 지상강우량을 50 mm미만, 50에서 100 mm미만, 100 mm이상으로 분류를 하였다. 기압패턴별 지상강우량 50 mm미만과 50 mm에서 100 mm미만을 조사한 결과 저기압, 기압골, 정체전선, 태풍, 북태평양고기압 순으로 강우량이 많게 조사되었고, 유사한 경향으로 나타났다. 북태평양고기압 영향에서 호우특보가 발표되어 100 mm이상의 지상강우량은 관측되지 않았다. 북태평양고기압 영향에 의한 호우특보는, 강우 지속시간이 짧고, 열적 불안정 해소가 빠르게 진행되어 100 mm이상의 강우량은 기록되지 않았다.

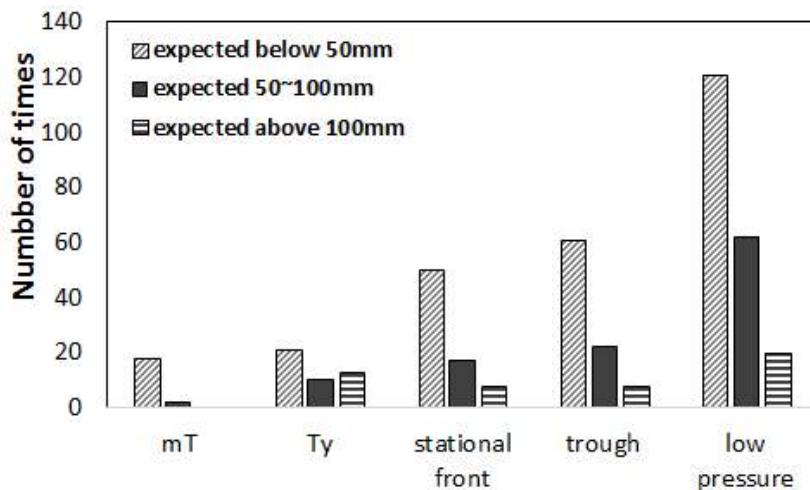


Fig. 45. The number of appearance in the classes of real rainfall according to pressure patterns during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island.

Fig. 46는 최근 5년 동안의 호우특보가 발표된 날, 예상강우량의 최대값을 기준으로 지상강우량과의 상관계수를 나타냈다. 그림에서 보는 것과 같이 예상강우량과 지상강우량과의 상관관계는 낮은 것으로 나타나고 있으며, 지상강우량보다 예상강우량이 과대로 예상하고 있음을 알 수 있다. 호우특보가 발표된 후, 관측된 지상강우량을 50 mm미만, 50 mm~100 mm미만, 100 mm이상의 범위로 구분해 볼 때, 호우특보시에 예상 강우량을 과대 예보하는 경향인 것으로 나타났다.

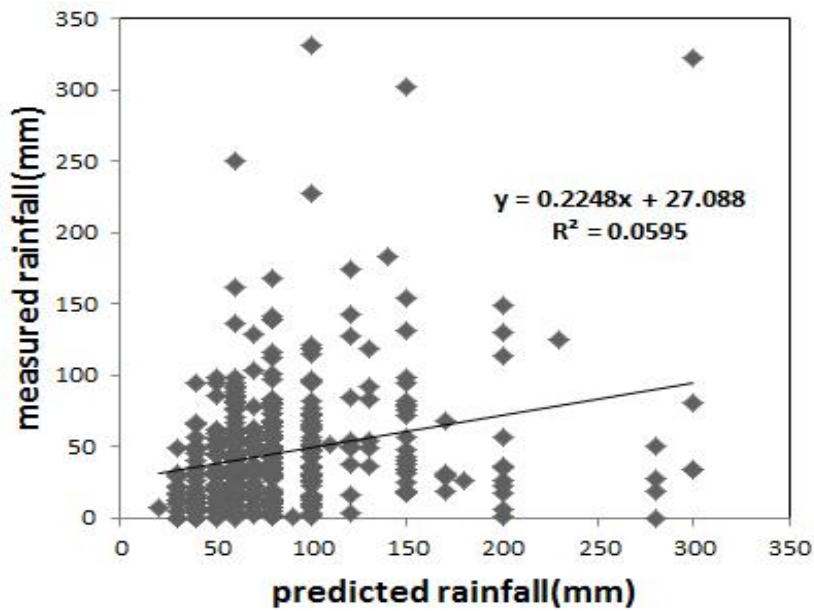


Fig. 46. The correlation between predicted and measured rainfall during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island.

Fig. 47은 2011년부터 2015년까지 5년 동안 제주도 국지예보구역 호우특보 발표일이 호우특보 발표 시 예상강우량의 최대값과 지상강우량과의 상관계수를 나타냈다. Fig. 47에서 보는 것처럼 예상강우량과 지상강우량과의 상관관계는 제주도북부(a)와 제주도서부(b), 제주도남부(d)에서는 지상강우량 50 mm이하에서 상관성이 낮게 나타났고, 제주도동부(c)와 제주도산간(e)은 나머지 지역에 비해 다소 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 지상강우량이 50 mm이하일 때 예상강우량은 과대 예보되는 경향을 보였고, 지상강우량 100 mm이상에서는 과소 예보되는 경향을 나타냈다. 따라서 추후에 제주도 예보구역별 예상강우량과 지상강우량과의 오차에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

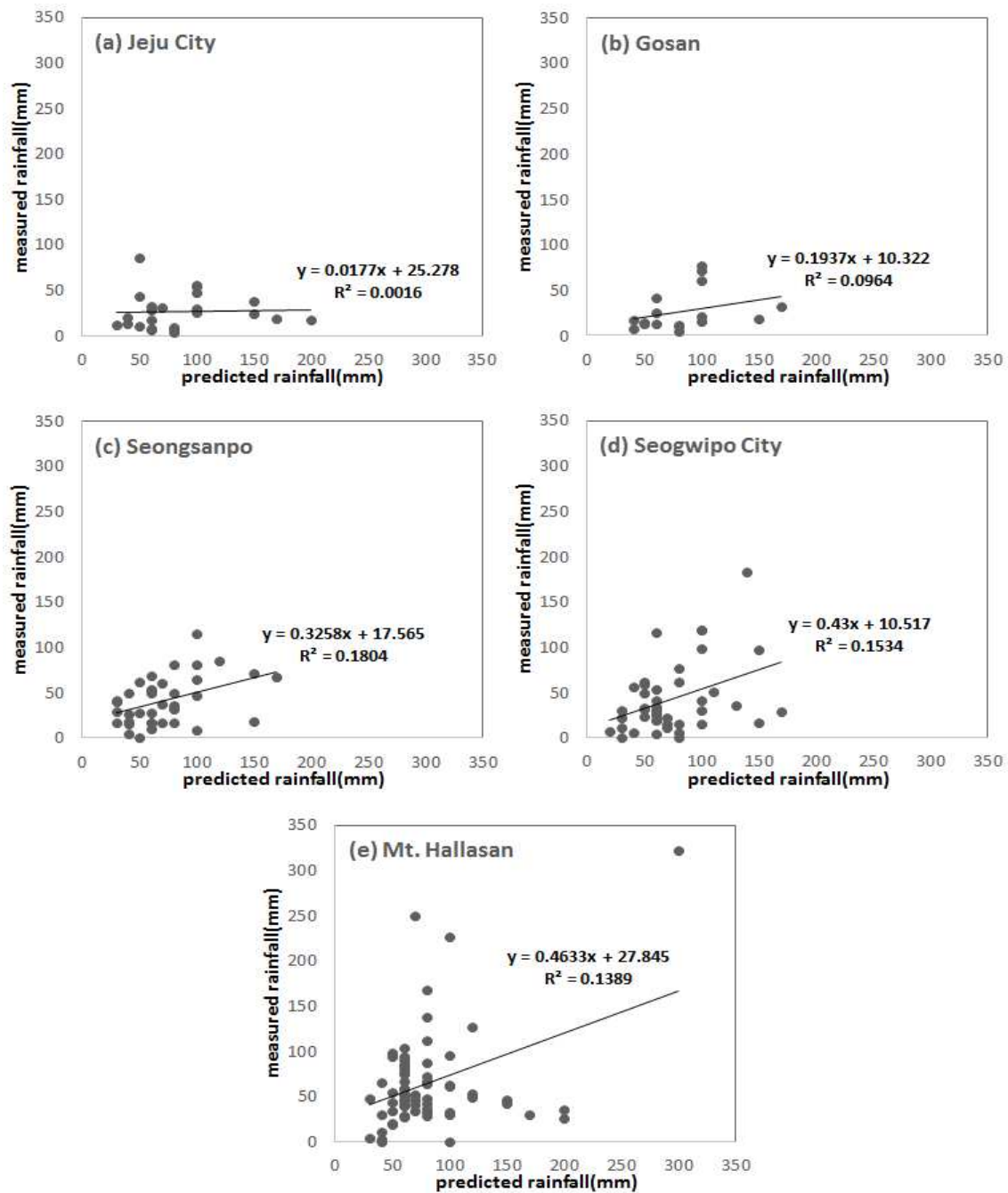


Fig. 47. The correlation between predicted and measured rainfalls with the local zone during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island.

4.3.3 레이더 강우강도와 지상강우량의 비교

Fig. 48 고도별 회귀분석에서 상관관계는, 기상레이더 강우량 추정값과 지상강우량이 낮게 나타났다. 호우특보가 발표된 후, 지상강우량은 1분 강우량이 누적되면서 빠르게 증가하여 10분 이동평균값으로 표출되고 있으나, 기상레이더는 면적강우량 산출로, 고도별 빙을 주사하여 기상레이더 관측스케줄에 의한 10분이 소요되어, 시간적 오차가 발생한다. 기상레이더의 고도별 면적 강우량 산출과 지점별 지상강우량 산출에서 레이더오차가 발생한다. 기상레이더의 면적강우량값이 지상으로 낙하하면서, 증발과 바람에 의한 이동, 지형 등으로 추정강우량(반사도)과 지상강우량이 큰 편차를 보이는 것으로 판단된다. 실제 현업에서 특보생산에 따른 실황감시는 AWS 1분 강우량과 누적강우량(15분, 60분, 6시간)의 변동추이와 강우강도, 천리안 위성영상의 구름대 이동방향과 기상레이더 추정강우량(반사도) 등을 활용한다.

발달한 저기압 또는 수직으로 발달한 대류운이 접근할 때, 천리안 위성영상의 단파적외 강조영상과 수증기영상을 이용하여 건조공기의 침투여부를 판단하게 된다.

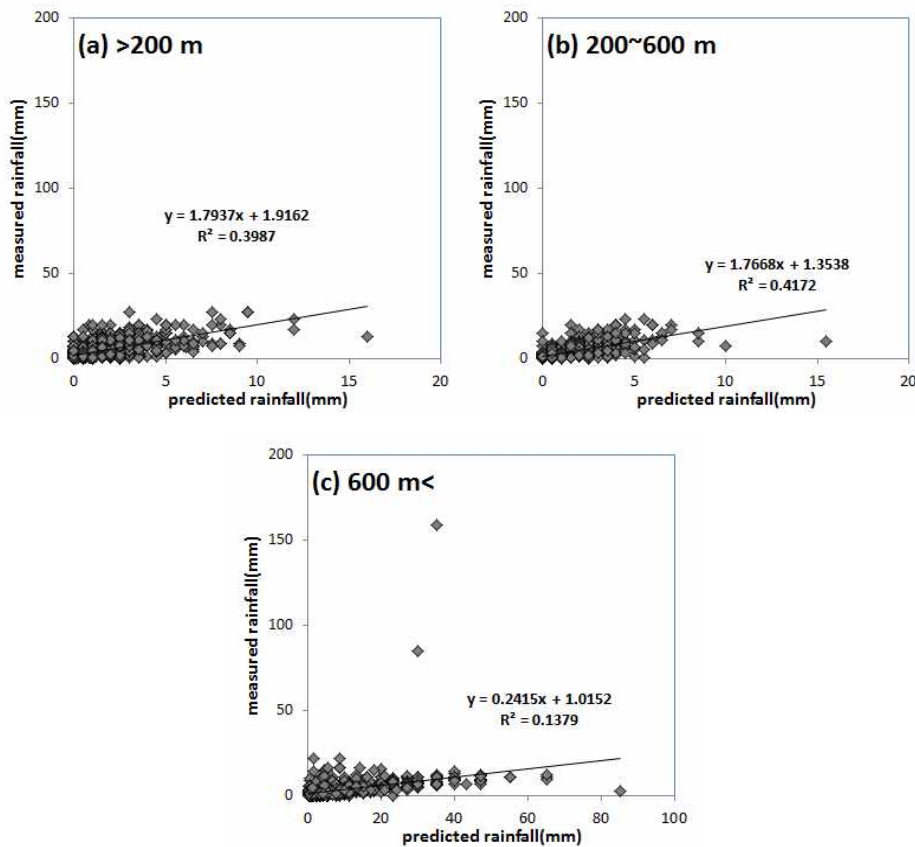


Fig. 48. The correlation between the predicted and the measured rainfalls with the elevation during heavy rain events from 2011 to 2015 in Jeju Island.

Fig. 49는 기상레이더에서의 추정 강우량과 지상에서 관측된 강우량과의 상관관계를 나타냈다. Fig. 49에서처럼 지상강우량이 약하게 관측될 때 예상강우량과 상관관계는 윗세오름을 제외한 관측지점에서 상관성이 비교적 높게 나타는 반면, 지상강우량이 많이 관측되는 경우 레이더 추정강우량이 적게 나타나고, 레이더 추정강우량이 많이 나타난 경우 지상강우량이 적게 관측되어 상관성이 낮게 나타났다. 따라서 많은 강우량이 예상될 때 지상강우량과 레이더 추정강우량을 비교하면서 기상정보와 기상특보 등 적절한 조치를 취해야 할 것으로 사료된다.

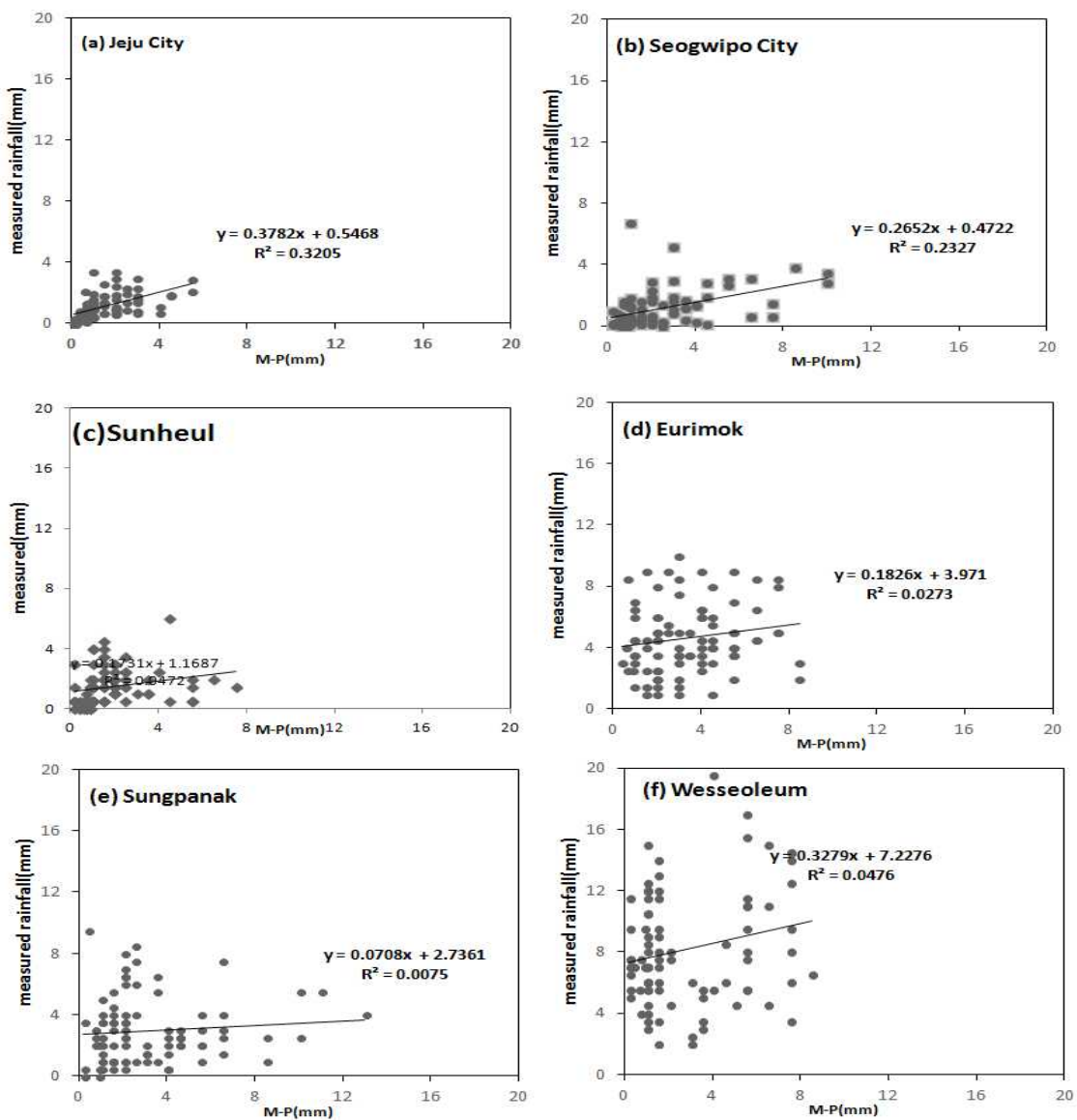


Fig. 49. Comparison of the rainfall between rain gauge and weather radar on July 11, 2015.

Fig. 50과 Fig. 51에서 보는 것처럼 시간대별 지상강우량과 레이더 추정강우량의 추이를 비교하면, 지상강우량보다 추정강우량이 높게 나타나고 있다. 대체로 강우강도가 약하게 나타날 때는 지상강우량계와 레이더 강우량 추정값(반사도)은 비슷하게 나타나고 있으나, 강우강도가 강할 때 레이더 강우강도는 더 강하게 나타나는 경향을 보였다. 방재기상관측장비의 설치지점은 산악이나, 인가와 떨어진 곳에 설치, 운용되어 통신이 원활하지 못하여 자료가 누락되는 경우가 가끔 발생하고 있다. 제주도는 한라산과 오름에 의한 빗 차폐로 인해 성산레이더와 고산레이더에 의한 한라산 정상부의 강우에코를 탐지할 수가 없어 진도레이더 자료와 합성하여 사용하고 있다.

Fig. 50과 Fig. 51은 기상레이더의 강우강도가 지상강우량 강우강도는 유사한 패턴으로 나타났으나, 강우강도 강하게 나타날 때, 지상강우강도보다 먼저 기상레이더 강우강도 강하게 나타남을 알 수 있다. 강우강도가 약한 경우에는 레이더 강우강도와 지상강우량 강우강도가 비슷하게 나타나고 있다. 향후 기상레이더 강우강도와 지상강우량 강우강도에 대한 연구에 고도별 강우강도와 레이더 강우강도의 과대모의에 대한 심층적인 연구가 필요하다.

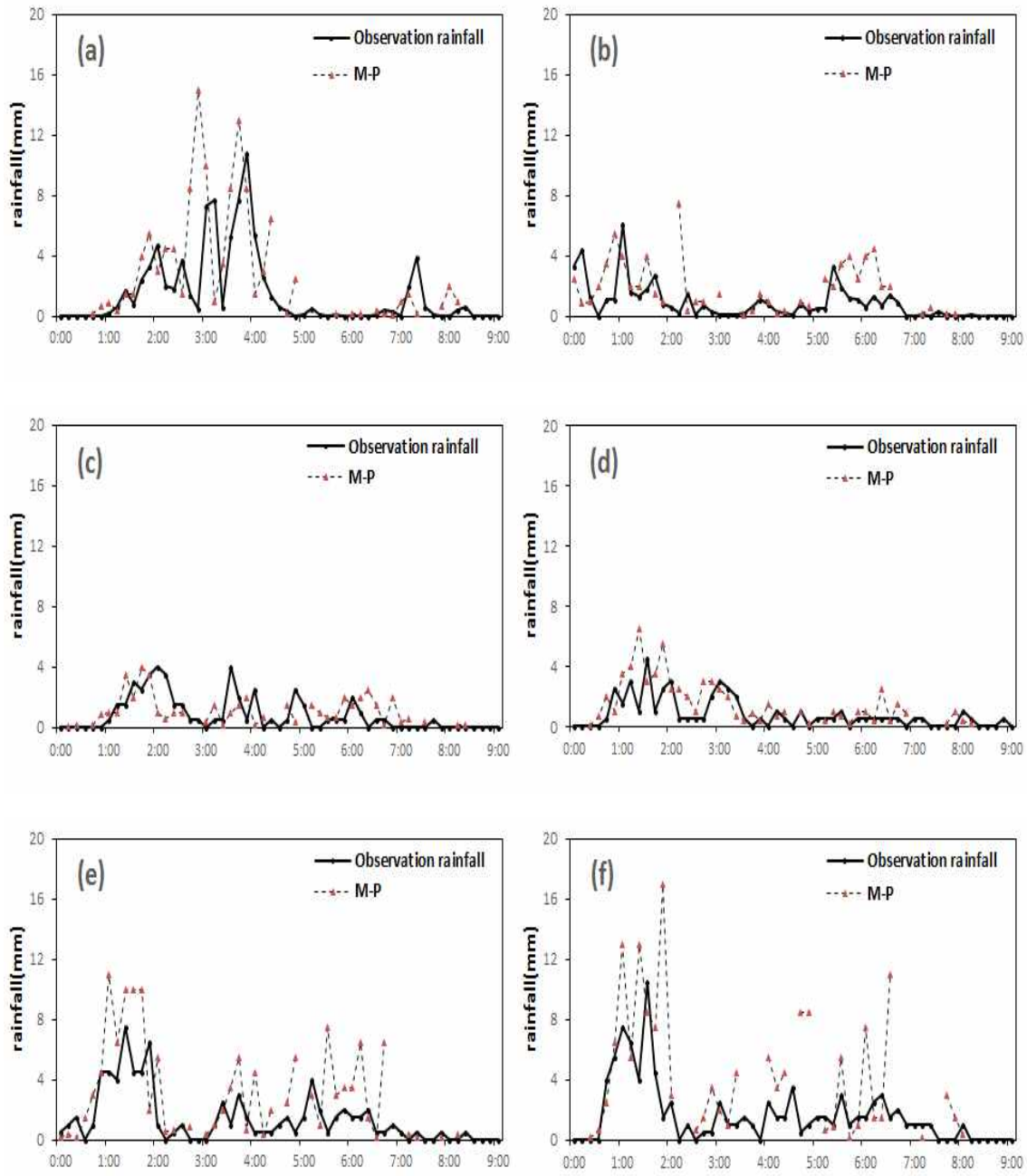


Fig. 50. Comparison of the rainfall intensities between rain gauge of weather radar echo on July 8, 2015(a: Jeju City, b: Seogwipo City, c: Sunheul, d: Eurimok, e: Sungpanak, f: Wesseoleum)

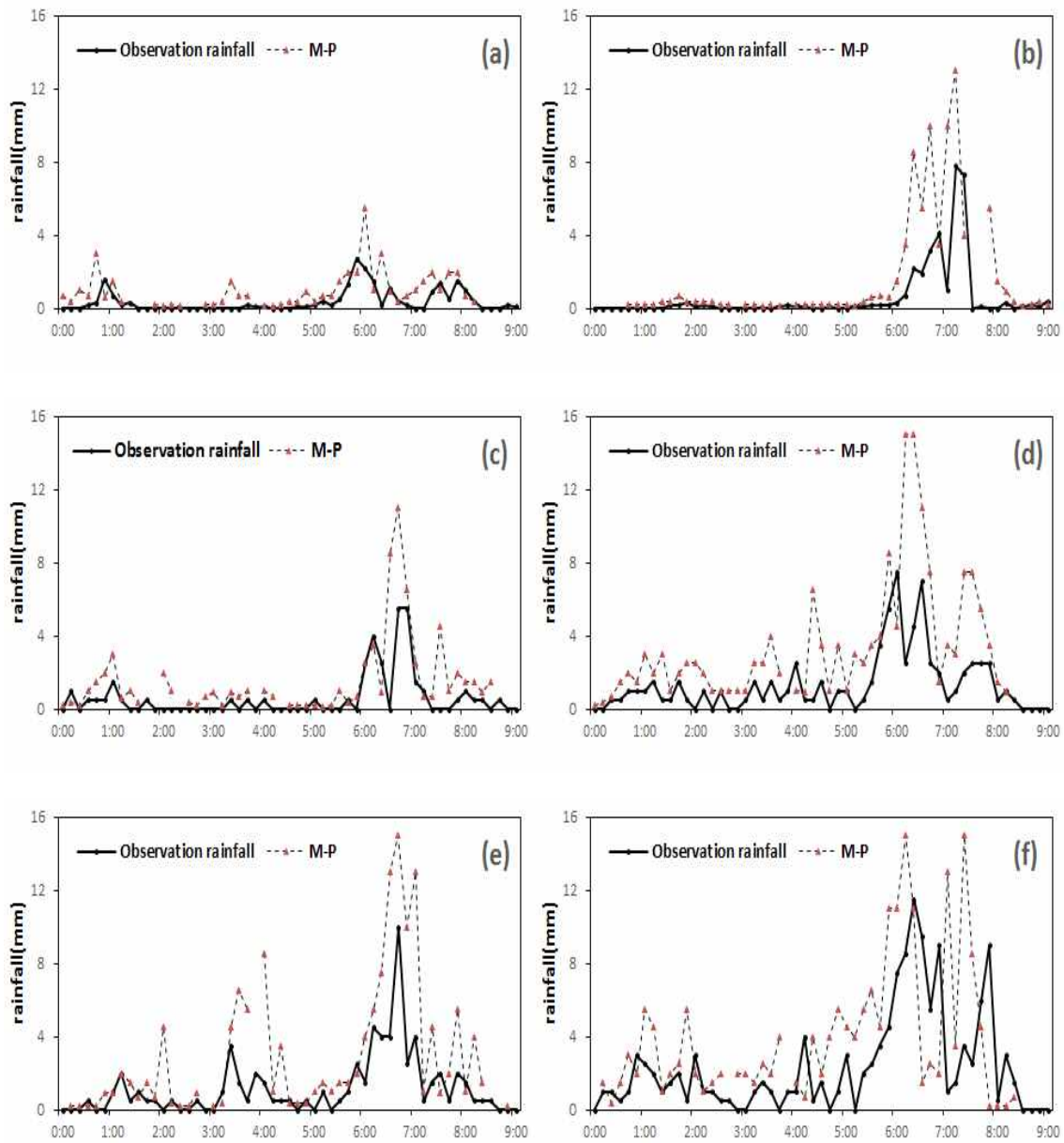


Fig. 51. Comparison of the rainfall intensities between rain gauge of weather radar echo on August 8, 2015(a: Jeju City, b: Seogwipo City, c: Sunheul, d: Eurimok, e: Sungpanak, f: Wesseoleum)

V. 결 론

본 연구는 제주 지역에서 평년(1981-2010)의 연평균 강우량과 최근 5년(2011-2015) 동안의 강우량 그리고 호우특보현황을 분석하여 제주지역에서 호우특보가 발표될 경우 예상강우량, 기상레이더 추정 강우량 그리고 관측강우량사이의 상관성을 알아 보고, 제주지역의 강우특성을 지역별로 구분하여 파악하고자 하였다. 이를 위해 제주도내 위치하는 기상레이더(2개소), 기상관측소(4개소), 그리고 방재기상관측지점(6개소)에서 제공된 각종 기상관측자료와 호우특보발표 자료를 이용하였다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째 제주도는 우리나라의 다우지역 중에 한 곳이며, 최근 5년 동안 연평균 강우량은 제주도북부 1,575.5 mm, 제주도서부 1,178.9 mm, 제주도동부 2,094.2 mm, 제주도남부 2,177.8 mm, 제주도산간 6,120 mm였으며, 지역별로 강우량의 편차가 뚜렷하였다. 그리고 연간 강우일수는 126일로 평년값(130일)보다 적게 나타났다.

둘째 제주도에서는 최근 5년 동안 발표된 288회의 호우특보는 저기압의 영향이 128회, 기압골이 74회, 정체전선이 54회, 태풍 32회, 그리고 북태평양고기압 가장자리의 영향이 14회였으며, 이러한 호우특보에 대한 적중률은 저기압의 경우 70%, 기압골 59%, 정체전선 48%, 태풍 63%, 북태평양고기압 가장자리 78%인 것으로 조사되었다. 또한 지역별로 보면 제주도북부 57회, 제주도서부 38회, 제주도동부 65회, 제주도남부 86회, 제주도산간 164회로써 제주도산간지역에 대한 특보가 가장 많이 발표되었다.

셋째 호우특보가 발표된 때부터 해제될 때까지의 지상강우량을 기준으로 볼 때, 50 mm미만인 강우를 보이는 경우가 전체 호우특보의 65%를 차지하였다. 그리고 지상강우량이 50 mm에서 100 mm미만인 경우는 북태평양고기압(2회), 태풍(10회), 정체전선(17회), 기압골(22회), 그리고 저기압(62회)에 의한 것으로써 이 중 기압골과 저기압에 의한 경우가 74%를 차지하였다. 또한 100 mm이상의 강우가 내리는 경우는 저기압, 정체전선 그리고 태풍 때문인 것으로 분석되었다.

넷째 제주도에서 호우특보기간 중 지상강우량이 50 mm 이하로 적은 경우 예상 강우량은 과대 예보된 경향을 보였고, 지상강우량이 100 mm이상으로 많은 경우에는 예상강우량이 과소 예보된 것으로 나타났다. 제주도 동부지역에서는 지상강우량

과 예상강우량 사이의 상관성이 비교적 양호한 것으로 나타났다.

현재 기상청에서는 기상레이더 강우량추정(반사도)에 있어서는 $Z=200 R^{1.6}$ 을 적용하고 있는데, 현재 사용되고 있는 $Z=200 R^{1.6}$ 에 의한 추정강우량과 지상강우량은 제주도에서 상관성은 낮은 것으로 나타났다. 따라서 제주도는 비교적 좁은 지역이지만 복잡한 지형을 지니고 있으므로 이런 특징이 고려된 보다 실용적인 강우량 추정식을 확보하기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. Orlanski, I., "A rational subdivision of scales for atmospheric processes," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56, 527-530(1975).
2. Kim, K. S., "Encyclopedia of Meteorology," Hyangmoonsa, 735(1992).
3. Korea Meteorological Administration, Korea Meteorological Society. "Atmospheric chemistry Terminology," Sigmaplus, 1032(2015).
4. Korea Meteorological Administration, Korea Meteorological Society. "Glossary of Atmospheric Science," Sigmaplus, 747(2014).
5. Korea Meteorological Administration, Korea Meteorological Society. "Glossary of Atmospheric Science," Gyohagsa, 492(1996).
6. Smolarkiewize, P. K. and Rotunno, Reply, *Journal of Atmosphere Science*, 46, 3614-3617(1989).
7. 양진관, 오주덕, 호우 현상을 초래하는 태풍 전면 수렴대 분석, *대기*, 11(3), 165-168(2001).
- 8 박선기, 이동규, 아시아 동안에서 북동진하며 발달하는 온대저기압의 종관적 특성, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 23.1: 1-25(1987).
9. Jeju Regional Meteorological Administration, "The study of Meteorological Characteristics in Jeju," 1~6, 267~279(1998~2002).
10. Korea Meteorological Administration, *Climatological Normals of Korea*, 688(1981~2010)
- 11 Korea Meteorological Administration, *Annual Climatological Report*, 970~990, (2011~2015).
- 12 10. Korea Meteorological Administration, *Annual Report of Automatic Weather Station Data*, 313~317(2011~2015).
- 13 Korea Meteorological Administration, *Monthly Weather Report(1~12)*, 118~121(2011~2015).
- 14 Korea Meteorological Administration, *Monthly Report of Automatic Weather Station Data*, 141~142(2011~2015).
15. Korea Meteorological Administration., *Forecast business regulations*, 2015
16. Park, G. M., Jung, H. S. " Radar Hardware Calibration," Printing and

- publishing Topamin, 458(2005).
17. Lee, J. H., Ryu, C. S. “Radar Meteorology” Sigmaplus, 260(2009).
 18. Wilson, W.L., and E. A. Brandes, “Radar Measurement of rainfall,” *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60, 1048 ~ 1058(1979).
 19. <http://super.kma.go.kr/index.jsp>
 20. Korea Meteorological Administration, Climatological Normals of Korea, 688(1981~2010)
 21. Korea Meteorological Administration., Forecast business regulations, 2015
 22. <http://www.kma.go.kr>
 23. <http://ko.wikipedia.org/wiki>
 24. Korea Meteorological Administration, “The forecasting technique in hands,” 235(2011).
 25. Jeju Regional Meteorological Administration, “The study of Meteorological Characteristics in Jeju,” 1~6, 267~279(1998~2002).
 26. <http://www.metoffice.gov.uk>
 27. <http://www.cma.gov.cn>
 28. <http://web.kma.go.kr/aboutkma/intro/jeju/index.jsp>
 29. Marshall, T. S., and W.M.K. Palmer, “The distributions of raindrops with size,” *J. Meteor.*, 5, P. 165 ~ 166(1948).
 30. Austin, P.M., “Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall,” *Mon. Wea. Rev.*, 115, P. 1053 ~ 1070(1987).
 31. Atlas. D, D. Rosenfeld, and D. B. Wolff, “Climatologically tuned reflectivity–rain rate relations and links to area time integrals,” *J. Appl. Meteor.*, 29, 1120 ~ 1139(1990).
 32. Lim Y, T., “A study on the moving storm characteristics,” Chonbuk Univer. (1991) Tracking technique(추적기법)
 33. Lim, E. H., Lee, T. Y. “Two–Dimensional Numerical Study of the Terrain Effects on the Development of Cloud and Precipitation for the Middle Part of Korea,” *J. Korean Meteor. Soc.*, 30(4), 565–582(1994).
 34. Kim, D. K., Chun, H. Y. “ A Numerical Study of the Orographic Effects Associated with a Heavy Rainfall Event,” *J. Korean Meteor. Soc.*, 36(4), 441–454(2000).

35. Seo, K. H., Lee, D. K. “ Analysis and Simulation of Orographic Rain in the Middle Part of the Korean Peninsula,” *J . Korean Meteor. Soc.*, 32(4), 511–532(1996).
36. Lim, J. H. “A Comparative Study of the Rainfall Intensity between Ground Rain Gauge and Weather Radar,” Chosun Univer. gradu., (2009).
37. Jeon, S. H. “ON the Comparison of the Observational Error between Rain gauge and Oseongsan weather radar reflectivity,” Chosun Univer. gradu., (2010).
38. Jung. S. H.. Kim. K. E., Ha. K. J. “Real–Time Estimation of Improved Radar Rainfall Intensity using Rainfall Intensity measured by Rain Gauges” *Korean Meteor. Soc.*, 41(5), 751–762 (2005)
39. http://www.spc.noaa.gov/publications/corfid/mcs_mode.htm
40. Jeju Regional Meteorological Administraion, “The study of Meteorological Description in Jeju,” 1, 129~240(2003~2015)
41. <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

감사의 글

입학이란 단어를 낯설게 느끼면서 학업을 시작하였는데, 벌써 학위논문을 제출하게 되어 기쁘게 생각하며, 도움을 주신 분들에게 감사를 드립니다.

먼저 부족한 저를 바쁘신 중에도 많은 관심과 격려, 세심한 배려 등 이 논문이 완성되기까지 아낌없이 지도해주신 허철구 교수님께 깊이 감사를 드립니다. 그리고 논문심사과정에서 제 논문에 대한 면밀한 검토와 가르침을 주신 이기호 교수님, 조은일 교수님, 학기수업마다 열정을 갖고 심도 있는 강의를 해 주신 김진근 교수님, 감상규 교수님, 허목 교수님께 감사드립니다. 또한, 학과사무실 업무만으로도 바쁘게 논문 마무리에 기꺼이 도와준 환경공학과 조교선생들에게도 “고맙다”는 말을 전합니다.

매일같이 반복되는 직장생활이 단조로움에서 벗어나 새로운 지식을 습득하고, 더 좋은 후배가 될 수 있도록 배려와 도움을 주신 현동식 예보과장님, 예보현업에서 고충과 애로점을 청취하여 격려하고 칭찬을 아끼지 않는 송문호, 강태진, 오봉학 예보관님, 레이더센터 석미경연구사님과 각종 기상자료 조사와 조언을 해 준 제주기상청 후배님들, 그리고 제주공항기상대의 장승민 후배에게도 감사하다는 말을 전합니다. 또한, 수업 때마다 관심을 갖고 응원을 해 준 박재욱 학우님과 그 외 여러 학우여러분들에게도 고마움을 전합니다. 재난피해, 상황 전파 등 재난상황실 업무와 민방위 경보통제소 업무로 바쁜 가운데 늘 웃음을 잃지 않고 상세한 설명으로 도움을 준 김성권 주무관에게도 고마움을 전합니다.

바쁘다는 이유 하나로 집안의 애경사에 적극 참석을 못하고, 가족과 함께 놀아주지 못해 미안하다는 말과 자기 일을 스스로 알아 처리해 준 지훈, 현지, 원준에게 사랑하고 고맙다는 말을 전한다. 또한 가까이에서 늘 무언의 격려와 믿음으로 지켜봐주고 이러한 글을 쓸 수 있도록 기회를 제공해 준 아내 김순영님에게 감사하고 사랑한다는 말을 전합니다.

이 논문이 완성되기까지 지켜보고 도움을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다.

2016. 7.

이 영 철

