

위성망 이중화를 위한 국내 강우율 공간분포 분석

Analysis of Spatial Distributions of Rainfall Rate for Satellite Site Diversity in Korea

권용기 · 박정규 · 윤대환 · 노현준 · 박성천 · 이황재

Yong-Ki Kwon · Jung-Kyu Park · Dae-Whan Yoon · Hyunjun Nho · Sungchun Park · Whangjae Lee

요 약

본 논문에서는 한반도 지역 내에서 안정적인 위성통신 서비스를 위한 최적의 망 이중화 지점을 제안한다. 이를 위해 기상청에서 측정한 88개 지점, 5년간의 강우량 데이터를 분석하였으며, 상관관계를 이용하여 두 지점간 강우가 동시에 발생할 확률 변화를 분석하였다. 국내 위성통신 관련 4개 주요 지점을 중심으로 강우 발생 상관도 변화를 등고선 맵으로 분석하였으며, 송신 지구국 이중화 지점으로 가장 적합한 지점/지역에 대한 정보를 제안하였다.

Abstract

This paper proposes appropriate locations for site diversity to provide stable satellite communication service in Korea. For this purpose, we analyzed rainfall rate data measured by KMA for 5 years at 88 sites, and the variations of simultaneous occurrence of rainfall rate in pairs of sites using the correlation coefficient. This paper provided contour maps of the spatial distribution of rainfall rate correlation, and proposed information on the optimum sites/regions for the operation of multi-uplink satellite systems, in 4 cities which were principal in field of satellite communication in Korea.

Key words: Site Diversity, Satellite Communication, Rainfall Rate, Correlation Coefficient, Correlation Map

I. 서 론

10 GHz 대역 이상의 높은 주파수를 이용하는 무선통신망은 강우에 직접적인 영향을 받는다. 최근 위성통신에서 이용 중인 Ku 대역(12~14 GHz) 및 Ka 대역(20~30 GHz) 전파는 강우에 특히 취약하며, 이 주파수 대역을 이용하여 위성통신망을 구축할 경우, 지역별 강우 특성을 충분히 고려하여 통신망을 설계하여야만 안정적인 위성통신 서비스를 제공할 수 있다.

일반적으로 위성 통신에서는 강우에 의한 위성신호 감

쇠 영향을 최소화하기 위하여 송신 지구국이나 주요 수신 지구국을 다중화하는 사이트 다이버시티(site diversity) 기법을 이용하거나, 강우상태에 따라 송신 지구국 출력을 가변적으로 운영하는 상향링크 출력 조정(UPC: Uplink Power Control) 기능을 이용한다. 그러나 현재 위성통신을 위한 국내 송신 지구국은 최대 출력에 근접되게 송신출력을 유지하고 있어 상향링크 출력조정(UPC)이 가능한 범위는 최대 10 dB 정도로 제한되고 있다. 따라서 최악의 강우 상황에서도 안정적인 위성통신 서비스를 보장하기 위해서는 지구 송신국의 상향링크 출력조정(UPC) 기능과

국립전파연구원(Technical Regulation Division, National Radio Research Agency)

· Manuscript received September 8, 2015 ; Revised October 19, 2015 ; Accepted November 9, 2015. (ID No. 20150908-066)

· Corresponding Author: Yong-Ki Kwon (e-mail: ygkwon@msip.go.kr)

함께 송신 지구국을 이중화하는 사이트 다이버시티 기법을 병행하여 적용하는 것이 최선의 방법이다.

강우에 의한 위성신호 감쇠 효과를 최소화하기 위하여 송신 지구국을 이중화할 두 지점을 선정할 때는 한 지점에서 비가 내리더라도 다른 지점에서는 비가 내리지 않은 2개 지점을 선정하는 것이 가장 바람직하다. 즉, 강우에 의한 영향을 최소화하기 위하여 사이트 다이버시티 기법을 이용할 경우, 동일한 시간에 비가 내릴 확률이 가장 낮은 두 지점을 송신 지구국으로 선정하는 것이 필요하다.

한반도 지역에서 비구름 발생 지점이나 이동 경로 등은 일정하지 않으며 임의로 변화한다. 따라서 국내 기상 자료를 이용하여 국내 지역별 강우 발생 상관성을 분석하기 위해서는 많은 지점에서 장기간 측정된 강우량 데이터를 이용하여 통계적으로 분석하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 전국 88개 지점에서 최근 5년간('10~'14) 1시간 간격으로 누적 측정된 강우량 자료를 이용하여 각 지점들간의 강우 발생 상관관계를 분석하였다.

제2장 제1절에서는 강우 발생 상관관계 분석을 위한 강우량 데이터와 데이터 처리 방법에 대하여 기술하였으며, 제2장 제2절에서는 본 논문에서 분석하는 상관계수가 갖는 물리적 의미에 대하여 분석하였다. 제2장 제3절에서는 두 지점간 이격거리에 따라 강우 발생 상관관계 변화를 분석하였다. 한편, 제2장 제4절에서는 국내 위성통신과 관련하여 관계국이 위치하거나, 위성관련 서비스 송신국이 위치하는 주요 지점을 중심으로 강우 발생 상관관계 변화를 분석하여 송신 지구국을 이중화할 경우, 최적의 지점/지역이 어디인지를 살펴보았다. 그리고 마지막 제3장에서는 분석결과를 종합 정리하였으며, 본 논문의 의의 등을 기술하였다.

II. 강우 발생 상관관계 분석

2-1 강우 데이터 분석 및 처리

국내 지역별 강우 발생 상관관계를 분석하기 위하여 기상청으로부터 전국 88개 지점에서 최근 5년간('10. 1. 1~'14. 12. 31) 1 간격으로 24시간 누적 측정된 강우량 자료를 제공받아, 이를 시간대별 강우량 데이터로 변환하였

다. 이를 통해 각 지점별로 각각 43,824개(=24시간×365일×5년+24시간(윤달))의 시간 순으로 정렬된 1시간 누적 강우량 자료를 산출하였으며, 이를 이용하여 88개 지점 간 강우 발생 상관관계를 각각 통계적으로 분석하였다.

개별 지점간 강우 발생 상관관계를 분석하기 위하여 먼저 기상청에서 제공받은 기상자료는 다음과 같은 절차에 따라 2진 시계열 데이터(x_i)로 변환하였다^{[3][4]}.

$$x_i[n] = \begin{cases} 1 & \text{if } R_i \geq r_i \\ 0 & \text{if } R_i < r_i \end{cases} \quad (1)$$

여기서 i 는 강우량을 측정된 전국 88개 지점중 한 지점이며, n 은 특정 지점에서 측정된 43,824개 강우량 데이터중 n 번째 데이터를 말한다. 한편, R_i 는 i 지점에서 측정된 n 번째 실제 강우량 데이터이며, r_i 임계 강우량이다. 실제 강우량이 임계 강우량보다 높거나 같을 때는 "1"로 변환하였으며, 임계 강우량보다 낮을 때는 "0"으로 변환하였다. 이에 따라 특정 지점에서 측정된 실제 강우량 시계열 데이터는 식 (1)에 따라 "0"과 "1"의 이진 형태의 시계열 데이터로 변환하였다.

강우량을 측정된 두 지점 간 강우 발생 관련성을 분석할 때는 주로 상관 계수(correlation coefficient)나 통계적 의존지수(SDI)를 주로 이용한다^{[3][4]}. 그러나 본 논문에서는 상관계수만을 이용하여 88개 지점간의 강우 발생 상관관계를 분석하였다. 상관계수(ρ)는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\rho = \frac{cov(x_1[n], x_2[n])}{(\sigma_1 \times \sigma_2)} \quad (2)$$

여기서 cov 는 공분산(covariance)이고, $x_1[n]$, $x_2[n]$ 은 식 (1)에 따라 변환된 이진 시계열 데이터이며, σ_1 , σ_2 는 각 이진 시계열 데이터의 표준편차이다.

이와 같이 정의된 상관계수(ρ)는 항상 -1 ~ +1범위의 값을 가진다. 여기서 $\rho=1$ 이란 강우량을 측정하는 두 지점은 언제나 임계 강우량 이상의 비가 동일한 시간에 내림을 의미하며, $\rho=0$ 이란 두 지점의 강우 발생은 서로 관련이 전혀 없음을 의미한다.

2-2 상관계수(ρ) 의미

본 논문에서는 강우 발생 상관계수(ρ)를 분석하여 위

성통신과 관련한 최적의 이중화 지점 등에 대하여 논의한다. 그러나 상관계수는 강우가 동일한 시간에 발생할 관련성만을 정성적으로 기술할 뿐 실제 강우 발생 확률에 대한 정량적 정보는 제공하지 않는다. 따라서 여기서는 상관계수(ρ) 값이 강우 발생 확률과 어떠한 관계에 있는지를 분석한다.

식 (2)로 정의된 상관계수는 식 (3)과 같이 정리할 수 있다⁵⁾.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\sum(x_1[n] - \bar{x}_1)(x_2[n] - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum(x_1[n] - \bar{x}_1)^2 \sum(x_2[n] - \bar{x}_2)^2}} \\ &= \frac{N\sum(x_1[n] \cdot x_2[n]) - \sum x_1[n] \cdot \sum x_2[n]}{\sqrt{N\sum(x_1[n])^2 - (\sum x_1[n])^2} \sqrt{N\sum(x_2[n])^2 - (\sum x_2[n])^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $x_1[n]$ 과 $x_2[n]$ 은 식 (1)에 따라 변환된 이진 시계열 데이터이며, \bar{x}_1 , \bar{x}_2 는 $x_1[n]$, $x_2[n]$ 의 평균이며, N 은 이진 시계열 데이터의 총 개수로서 본 논문에서는 43,824에 해당한다.

먼저 상관계수(ρ)가 무엇을 의미하는지를 알아보기 위하여 일정 강우량 이상 비가 내린 횟수가 두 지점에서 같다고 가정할 경우 식 (3)을 식 (4)와 같이 단순화할 수 있다. 한편, $N\sum(x_1[n] \cdot x_2[n]) \gg \sum x_1[n] \cdot \sum x_2[n]$ 이고, $N\sum(x_1[n])^2 \gg (\sum x_1[n])^2$ 이며, $x_i[n]$ 은 “0” 또는 “1” 값만을 가지므로 $\sum(x_1[n])^2 = \sum(x_1[n])$ 이므로 식 (4)를 식 (5)와 같이 재정리할 수 있다.

$$\rho = \frac{N\sum(x_1[n] \cdot x_2[n]) - \sum x_1[n] \cdot \sum x_2[n]}{N\sum(x_1[n])^2 - (\sum x_1[n])^2} \quad (4)$$

$$\approx \frac{\sum x_1[n] \cdot x_2[n]}{\sum(x_1[n])} \quad (5)$$

식 (5)에서 분모는 지점 1에서 임계강우량 이상 비가 내린 횟수를 의미하며, 분자는 두 지점에서 동시에 임계강우량 이상 동시에 비가 내린 횟수를 의미한다. 즉, 상관계수(ρ) 값은 한 지점에서 임계 강우량 이상의 비가 올 경우, 동일한 시간에 다른 지점에서 임계 강우량 이상의 비가 내릴 확률로 해석할 수 있다. 상관계수 값이 이와 같이 해석되는 이유는 실제 강우량을 식 (1)에 따라 “0” 또는

“1”의 이진형태로 변환하였기 때문에 나타나는 현상이다.

앞에서 식 (4)로 수식을 단순화할 때 일정 강우량 이상 비가 내린 횟수가 두 지점에서 같다고 가정했는데, 분석 데이터가 충분하여 비 내린 횟수가 충분히 많으면 실제 비 내린 횟수가 다르더라도 동일한 결과를 나타낸다. 즉, 실제 비 내린 횟수에 다르더라도 식 (5)의 분모를 두 지점에서 임계강우량 이상 비 내린 평균 횟수로 계산할 수 있으며, 실제 그 차이가 크지 않을 경우 상관계수(ρ) 값은 한 지점에서 임계 강우량 이상의 비가 올 때 다른 지점에서도 임계 강우량 이상의 비가 내릴 확률로 해석해도 실제 계산값과 큰 차이가 발생하지 않는다.

따라서 본 논문에서 분석할 상관계수(ρ) 값은 한 지점에서 임계 강우량 이상의 비가 올 때 동일한 시간에 다른 지점에서도 임계강우량 이상의 비가 내릴 확률로 해석할 수 있다.

2-3 이격 거리에 따른 강우 발생 상관성 분석

본 절에서는 강우량을 측정하는 2개 지점간 이격거리에 따라 강우 발생 상관관계가 어떻게 변하는지를 알아 보았다. 88개 지점간 이격거리는 총 3,828개에 해당하며, 이에 대한 상관계수 분석 결과는 그림 1과 같이 나타났다.

그림 1에서 붉은색 원은 임계 강우량이 1 mm/h일 때 강우량 측정지점 간의 이격거리에 따른 상관계수 변화를 나타내며, 푸른색 원은 임계 강우량이 10 mm/h일 때 상관

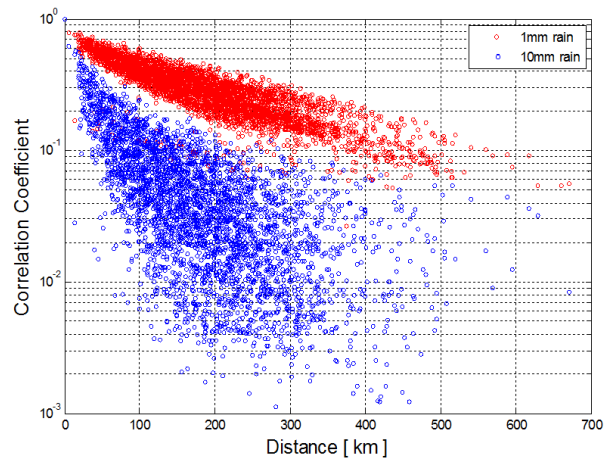


그림 1. 이격거리에 따른 상관계수 변화
Fig. 1. Variations of correlation coefficient for distance.

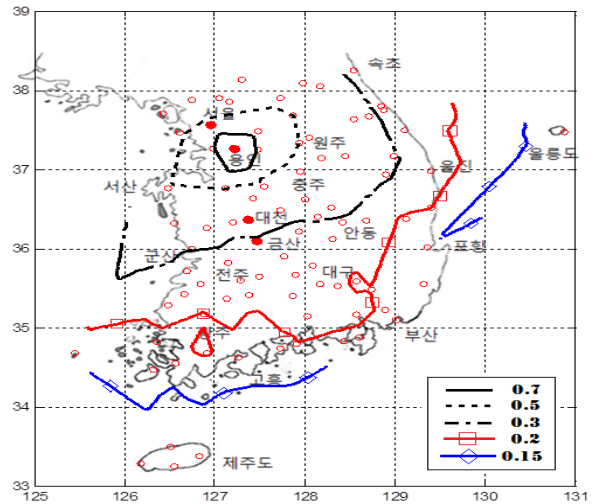
계수 변화를 나타낸다. 그림 1에서는 이격 거리가 멀어질수록 두 지점간 강우 발생 상관성이 낮아짐을 보여주며, 임계 강우량이 높아질수록 상관관계는 급격히 낮아짐을 보여준다. 즉, 두 지점간 거리가 멀어짐에 따라 동시에 비가 올 확률은 낮아지며, 임계 강우량을 높게 설정하면 두 지점에서 동시에 임계 강우량 이상의 비가 올 확률은 급격히 낮아짐을 의미한다. 임계 강우량이 1 mm/h인 경우, 200 km 이격거리에서 상관계수는 평균 0.27이며, 지역에 따라 0.37~0.18(±95 % 범위)까지 변화를 보이며, 임계 강우량이 10 mm/h인 경우, 동일한 이격 거리에서 상관계수는 평균치가 0.037이며, 0.092~0.004(±95 % 범위)까지 큰 변화를 보인다. 본 절에서는 국내 환경에서 공간 다이버시티를 위한 최적 이격거리를 분석할 예정이었으나, 위에서 살펴본 바와 같이 지역별 편차가 상당히 커서 최적의 이격거리를 일률적으로 기술할 수 없음을 알 수 있다. 이는 이격거리가 동일하더라도 두 지점이 각각 서로 다른 지리적/지형적 환경에 위치하기 때문으로 판단된다.

2.4 주요 지점별 강우 발생 상관성 분석

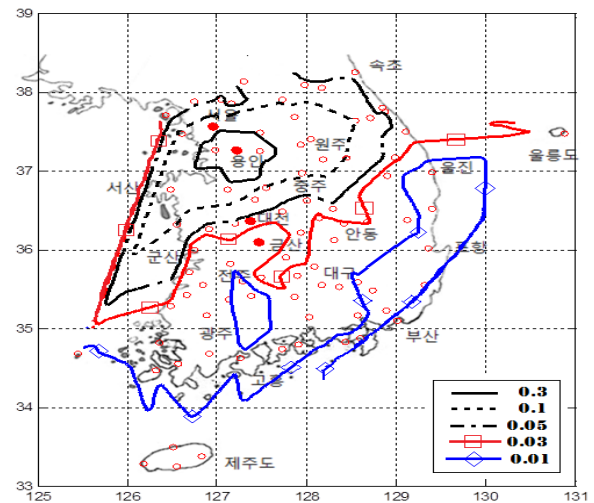
안정적인 위성통신 서비스를 제공하기 위해서는 위성 관제국이나 서비스 송신 지구국이 어떤 상황에서도 안정적으로 운영될 수 있어야 한다. 강우에 의해 위성 관제나 서비스 송출이 중단되지 않도록 하기 위하여 위성 관제국이나 송신 지구국은 이중화하는 것이 바람직하다.

국내 주요 위성통신과 관련한 위성관제국이나 주요 서비스 송신 지구국은 용인, 금산, 대전, 서울에 위치한다. 따라서 본 절에서는 국내 위성 통신/방송 서비스와 관련하여 위성관제국이나 주요 서비스 송신 지구국이 위치하는 국내 주요 4개 지점(용인, 금산, 대전, 서울)을 중심으로 강우 발생 상관관계를 분석하여 망 이중화를 위한 최적의 위치가 어디인지를 살펴본다. 이를 위해 위에서 기술한 바와 같이, 식 (1), 식 (2)를 이용하여 국내 주요 4개 지점에서 강우 발생 상관관계를 구하였으며, 이를 한반도 지도에서 등고선 형식으로 표현하였다.

그림 2(a), (b)는 용인을 중심으로 임계 강우량이 1 mm/h일 때와 10 mm/h일 때의 강우 발생 상관관계 변화를 각각 보여준다. 용인은 무궁화 위성 주 관제국이 위치하는 지점으로 무궁화 위성 부 관제국이 위치하는 금산과



(a) Threshold rain : 1 mm/h



(b) Threshold rain : 10 mm/h

그림 2. 상관도 맵(용인)

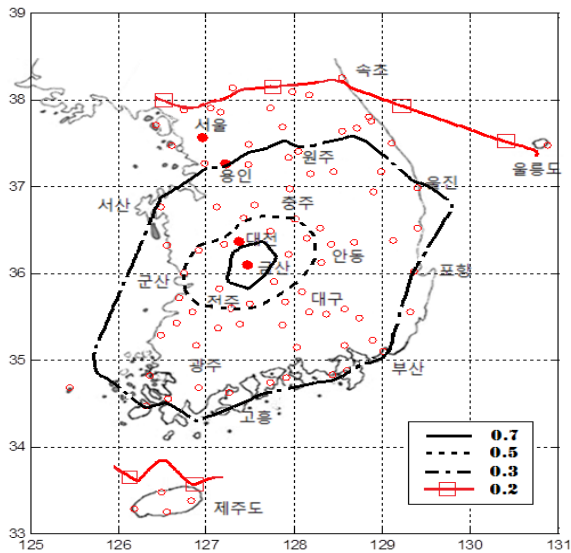
Fig. 2. Correlation map(Yong In).

함께 국내 위성 통신/방송과 관련한 주요 지점으로 분류된다. 용인과 금산은 지리적으로 멀지 않은 거리(약 112 km)에 위치함에도 불구하고, 동일한 시간대에 강우가 발생할 확률이 상당히 낮은 지역에 각각 해당함을 알 수 있다. 임계 강우량이 1 mm/h일 때 상관계수는 0.29이며(그림 2(a)), 임계 강우량이 10 mm/h일 때는 상관계수가 0.013(그림 2(b))으로 타 지역에 비해 상대적으로 낮은 값을 보이고 있어 위성 관제를 위한 이중화 지점으로 용인과 금산을 선정하는 것은 상당히 적절한 것으로 판단된다.

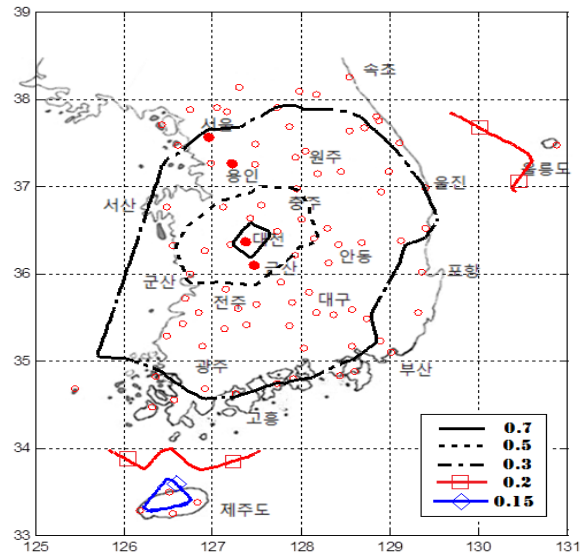
다만 용인지역과 강우 발생 상관성이 가장 낮은 내륙지역으로는 경북 동해안 일부 지역이나 경남 일부 지역이 해당한다. 용인과 경북 동해안 또는 경남 일부 지역과 동시에 1 mm/h 이상 비가 내릴 확률은 20 % 이하이며, 10 mm/h 이상 비가 동시에 내릴 확률은 1 % 이하로 나타난다. 한편 그림 3(a), (b)는 금산을 중심으로 임계 강우량이

1 mm/h일 때와 10 mm/h일 때의 강우 발생 상관관계 분석 결과를 각각 보여준다.

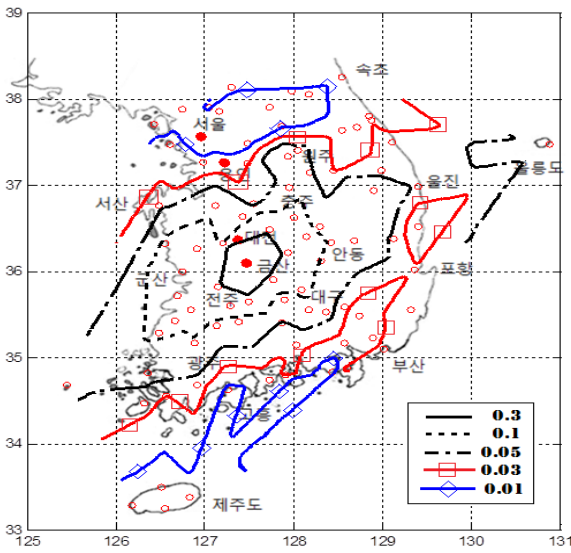
그림 4(a), (b)는 대전 지역을 중심으로 임계 강우량이 1 mm/h일 때와 10 mm/h일 때의 강우 발생 상관성 분석 결과를 각각 보여준다. 대전은 현재 천리안 위성의 관계국이 위치한 지역이며, 한반도 지역의 중앙 부분에 위치하



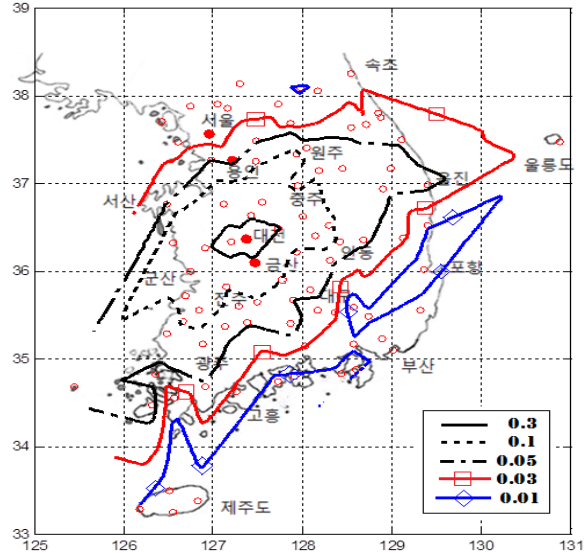
(a) Threshold rain : 1 mm/h



(a) Threshold rain : 1 mm/h



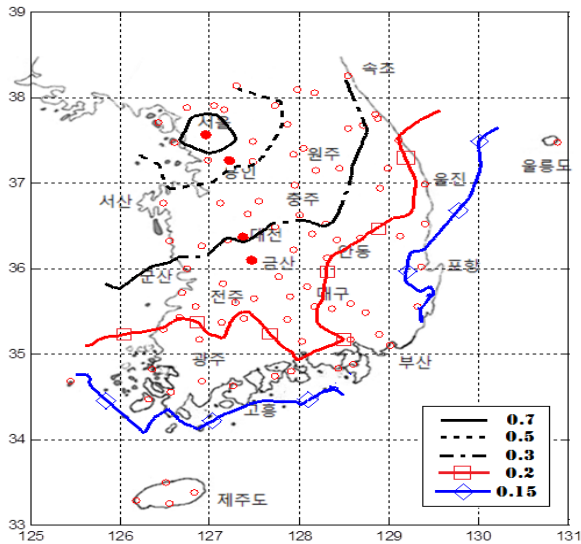
(b) Threshold rain : 10 mm/h



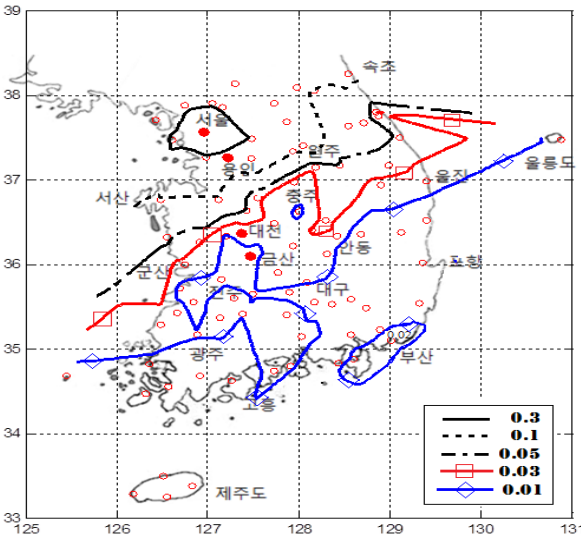
(b) Threshold rain : 10 mm/h

그림 3. 상관도 맵(금산)
Fig. 3. Correlation map(Kum San).

그림 4. 상관도 맵(대전)
Fig. 4. Correlation map(Dae Jeon).



(a) Threshold rain : 1 mm/h



(b) Threshold rain : 10 mm/h

그림 5. 상관도 맵(서울)
Fig. 5. Correlation map(Seoul).

고 있어 강우 발생 상관계수가 한반도 전체에서 균일한 특성을 보이고 있다. 천리안 위성 관제국의 이중화를 위해 대전 이외의 지역을 검토할 경우, 경북 포항 지역이나 경남 일부지역을 선정하는 것이 가장 적합할 것으로 판단된다. 대전에서 1 mm/h 이상 비가 올 경우, 경북 포항 지역이나 경남 일부 지역에서 동시에 동일한 강우량이

상의 비가 내릴 확률은 30 % 이하이며, 10 mm/h 이상 비가 동시에 내릴 확률은 1 % 이하이다.

그림 5(a), (b)는 서울을 중심으로 임계 강우량이 1 mm/h일 때와 10 mm/h일 때의 강우 발생 상관관계 분석 결과를 나타낸다. 국내 위성방송을 위한 송신 지구국은 용인, 금산으로 이중화하여 운영하고 있으며, 비상시에는 서울에서도 위성방송 서비스를 송신할 수 있도록 운영하고 있다. 서울지역과 강우 발생 상관성이 가장 낮은 지역으로는 전남, 경북 및 경남 지역이 이에 해당한다.

III. 결 론

본 논문은 강우 발생 상관성 분석을 이용하여 안정적인 위성통신 서비스 운영을 위한 위성 관제국이나 송신 지구국의 이중화 지점 등을 선정하는 방안을 제시하였다. 이를 위해 전국 88개 지점, 5년간 강우량 자료를 이용하여 이중화 국의 이격거리에 따른 강우 발생 상관관계 변화를 분석하였으며, 위성 관제국이나 주요 서비스 송신 지구국이 위치하는 국내 주요 4개 지점(용인, 금산, 대전, 서울)을 중심으로 강우 발생 상관관계를 분석하여 망 이중화를 위한 최적의 지점에 대하여 분석하였다.

지금까지 국내에서는 전국을 대상으로 장기간 강우 데이터에 기초하여 위성 관제국이나 송신 지구국의 이중화 지점을 검토한 논문은 보고된 바가 없다. 따라서 본 논문은 장기간 강우량 데이터에 기초하여 위성관련 이중화 지점을 검토한 국내 최초의 논문이라는데 의의가 있으며, 본 논문을 통해 국내 위성통신 서비스가 보다 안정적으로 운영될 수 있는 작은 계기가 되기를 희망한다.

본 논문은 위성망 공간 다이버시티(site diversity) 선정을 위한 중간 연구결과로서, 향후 강우율과 위성 시스템 가용도(system availability)간 관련성을 분석하여 국내 위성통신 시스템 설계에 실질적으로 활용할 수 있는 결과물을 도출할 예정이다. 마지막으로 본 논문을 위하여 국내 강우량 관련 기상자료를 제공해 주신 기상청 관계자분들에게 감사를 드린다.

References

[1] L. Ordano, "Assessment of correlation properties of rain-

fall intensity measured in Italy", *5th International Conference on Antennas and Propagation, ICAP'87*, pp. 334-337, Mar. 1987.

- [2] Contribution Document 3J/175 for the 2007 ITU-R WP 3J meeting from Spain "Spatial distributions of rainfall rate", Swiss, Apr. 2007.
- [3] F. Barbaliscia, G. Ravaoli, and A. Paraboni, "Charac-

teristics of the spatial statistical dependence of rainfall rates over large areas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992.

- [4] H. Fukuchi, "Correlation properties of rainfall rates in the United Kingdom", *IEE Proceedings*, 1988.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_product-moment_correlation_coefficient

권 용 기



1989년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)
 1992년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학석사)
 2010년 2월: 한국과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)
 1996년 9월~현재: 국립전파연구원 공업

연구사

[주 관심분야] 전파전파, 강우감쇠, 우주전파

노 현 준



2015년 2월: 조선대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2015년 4월~현재: 국립전파연구원 연구원
 [주 관심분야] 전파전파, THz, 강우감쇠

박 정 규



1994년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)
 1996년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학석사)
 1996년 9월~현재: 국립전파연구원
 [주 관심분야] 안테나측정, EMC, 전파전달

박 성 천



1992년 8월: 목포해양대학교 통신과 (공학사)
 1999년 2월: 목포해양대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 목포해양대학교 전자과 (공학석사)
 2009년 8월: 인하대학교 국제통상물류대학원 (공학석사)

2012년 12월~현재: 국립전파연구원 방송통신주사보
 [주 관심분야] 전파전자, THz, 드론측정

윤 대 환



2007년 2월: 조선대학교 전자공학과 (공학사)
 2008년 1월: 광주전파관리소 근무
 2015년 1월~현재: 국립전파연구원 방송통신서기
 [주 관심분야] 전파전파, THz, 드론 전파측정

이 황 재



1982년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)
 1996년 6월: 미국 유타주립대학교 물리학 (이학박사)
 1998년 5월~현재: 국립전파연구원 공업연구원, 전파위성기반팀장
 [주 관심분야] 전파전파, 우주전파 및 위성통신