

기술논문

국내 전리권 스포래딕 E층 발생 경향 분석

최규철[†], 신대규, 오승준, 김용하

(주)에스이랩

Occurrence Tendency Analysis of Sporadic E-Layer in Korea

Kyu-Cheol Choi[†], Dae-Kyu Shin, Seung-Jun Oh, Yong-Ha Kim

SELab, Seoul 06049, Korea



Received: September 20, 2024

Revised: October 17, 2024

Accepted: October 31, 2024

[†]Corresponding author :

Kyu-Cheol Choi

Tel : +82-2-3447-9714

E-mail : kcchoi@selab.co.kr

Copyright © 2024 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Kyu-Cheol Choi

<https://orcid.org/0000-0002-0056-5293>

Dae-Kyu Shin

<https://orcid.org/0000-0003-3774-2131>

Seung-Jun Oh

<https://orcid.org/0009-0006-7969-283X>

Yong-Ha Kim

<https://orcid.org/0000-0003-0200-9423>

요약

스포래딕 E층(sporadic E layer, Es층)은 전리권 E층에서 발생하는 일시적이고 국지적인 전자밀도 증가 현상으로, 고도 90–120 km에서 나타난다. 이는 HF(high-frequency) 및 VHF(very-high frequency) 대역의 무선 전파통신에 영향을 미치는 요소이다. 본 연구에서는 Es층의 일별, 월별 발생 빈도를 분석하고 태양 활동, 지자기 교란 등과의 상관관계를 연구하였다. 분석 결과, Es층 임계 주파수(critical frequency of Es, foEs)는 여름철 정오 부근에서 가장 높게 발생하였으며, Es층 가상 높이(virtual height of Es, h'Es)는 오전 6시에서 최대값을 보이고 이후 정오까지 감소한 뒤, 16시에 다시 증가하는 경향을 보였다. 계절별로는 4월에 가장 높은 발생률을 보였고, 8월까지 감소한 뒤 다시 증가하였다. 이천 이오노존데에서 관측된 Es층은 12시와 20시 사이에 주로 발생하며, 6월에 가장 높은 발생률이 나타났다. 제주 이오노존데에서 관측된 Es층은 11시에 많이 발생하며, 역시 6월에 발생률이 높다. 태양 극소기의 발생률이 태양 극대기보다 높다. 분석 결과는 Es층의 발생 예보 모델 개발의 입력 자료 선정을 위해, 사용될 예정이다.

Abstract

Sporadic E (Es) Layer refers a thin layer of enhanced electron density in the ionospheric E region, where the electron density can be 2 to 3 times higher than the surrounding areas, reaching up to 10^{12} m^{-3} . The Es layer typically has a thickness of about 1–2 km and extends horizontally over tens to hundreds of kilometers. It is a significant factor influencing radio wave propagation in the high-frequency (HF) and very-high frequency (VHF) bands. The daily and monthly occurrence frequencies were analyzed, and correlation analysis was performed with solar activity and geomagnetic disturbances. The critical frequency of Es (foEs) values were highest near noon in the summer, while h'Es peaked at 06:00, decreased until noon, and then increased again around 16:00. Seasonally, the highest virtual height of Es (h'Es) values were observed in April, followed by a decrease until August, after which they began to rise again. At Icheon station, the occurrence of Es layer was more frequent at 12:00 and 20:00, with the highest seasonal frequency observed in June. In contrast, the Jeju station showed a peak occurrence around 11:00, and also recorded the highest seasonal frequency in June. The incidence of Es layer was generally higher during solar minimum compared to solar maximum. This results will be used to develop a machine learning model for predicting for occurrence of Es layer.

핵심어 : 전리권, 우주기상, 스포래딕 E층, 기계학습, 이오노존데, 단파 통신

Keywords : ionosphere, space weather, sporadic E-layer, machine learning, ionosonde, high-frequency (HF)

1. 서론

전리권은 태양 복사에 의해 중성 대기가 이온화되어 생성되는 플라즈마 영역으로, 태양 활동과 밀접한 관련되어 있으며, 단파통신의 중요한 매개체 역할을 한다. 전리권 내 전자밀도 교란은 단파 및 위성 통신 환경에 영향을 미칠 수 있다. 전리권 E층에서는 일시적이고 국지적인 전자밀도 증가 현상이 발생하는데, 이를 스포래딕 E층(sporadic E layer, Es층)이라고 한다.

Es층은 주로 고도 90-120 km에서 관측되며 지속 시간은 수십 분-수 시간, 두께는 수 km 그리고 수십-수백 km 범위에 걸쳐 나타난다. 주변 E층 전자밀도에 비해 2-3배 높은 밀도를 보이는 것이 특징이며, 지형 및 위도에 따라 매우 다양한 지역적 특성을 지닌다. 특히, 북반구 중위도에서의 Es층은 여름철에 빈번하게 발생하는 계절적 경향이 있다.

Es층이 생성되면 HF(high-frequency)와 VHF(very-high frequency) 대역의 무선 전파 통신에 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 E층은 10 MHz 이하의 전파를 반사하거나, 10 MHz 이상의 전파 중 일부를 흡수한다. 그러나 Es층이 발생할 경우, 50 MHz까지, 때로는 최대 450 MHz 영역 전파까지 반사하여 HF 통신 및 VHF 통신에 심각한 교란을 일으킬 수 있다. 또한, GHz 대역의 위성 통신 주파수에서도 진폭 섬광(amplitude scintillation)을 유발하는 원인이 되기도 한다. Es층의 전자 밀도가 일반적으로 관측되는 전리권 E층보다 더 높기 때문에, 송신국에서 송출한 전파가 Es층을 통과하지 못하고 반사되어 F층에 도달하지 못하여 원하는 수신국에 전파가 도달하지 못하는 전파교란이 발생한다[1].

Es층의 발생 기작에 대한 이해는 완벽하지 않지만, 일반적으로 받아들여지는 몇 가지 현상들이 있다. 첫 번째는 유성에 의한 것으로 전리권 E층을 지나가는 유성에서 방출된 금속 양 이온들이 Es층 발생에 영향을 미칠 수 있다. 두 번째는 오로라에 의한 것으로, 고에너지 전자가 자기권으로부터 유입되어 고층대기를 이온화하여 전자밀도를 증가시킨다. 이렇게 형성된 영역을 오로라 Es층이라고 부른다. 세 번째는 중성대기 바람 시어(wind shear)이다. E층 고도에서는 중성대기의 밀도의 높아 양이온-중성대기 사이의 충돌이 빈번하게 발생하는데, 만약 고도에 따라 중성대기의 바람 시어가(예: 동-서 방향의) 발생하면 양이온은 표류 운동을 하게 된다. 이로 인해 바람의 방향이 바뀌는 고도를 중심으로 양이온의 밀도가 증가하고, 이는 전자밀도 증가를 초래하여 Es층을 발생할 수 있다[2-4].

많은 연구를 통해 위도별 발생 빈도가 다르다는 것이 확인되었다. 중위도 지역에서는 일반적으로 여름철에 Es층의 발생 빈도가 높고, 봄과 가을에 발생 빈도가 낮은 경향을 보인다. 고위도 지역에서는 오로라 발생 지역에서 관측되며 계절에 따른 발생 빈도 차이는 적은 편이다. 적도 지역에서는 주로 낮에 발생 빈도가 높고 계절에 따른 차이는 상대적으로 적다[5,6].

제주 우주환경센터에서는 이천과 제주에서 이오노존데(ionosonde)를 운용하여 실시간으로 전리권 변화를 모니터링하고 있다. 또한 전리권 F층의 전자밀도 변화를 예측할 수 있는 모델을 운영 중이다. 그러나 모델 결과를 통해 일시적이고 국지적으로 나타나는 Es층의 발생 여부를 예측하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 국내에서 관측된 전리권 자료를 사용하여 Es층의 통계적인 발생 경향(계절, 지역, 시간 등)과 Es층 발생에 영향을 줄 수 있는 변수(태양 활동, 중성대기 변화 등)를 조사하여, 향후 머신러닝 기법을 활용해 Es층 발생을 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것이다.

2. 우주환경센터 관측자료 가용성 검토

이천과 제주의 이오노존데 자료를 사용하여 Es층의 발생 경향을 분석하였다. 이오노존데는 변동 주파수 전파를 송수신하여 전리층의 특징을 산출하는 레이더이다. 다양한 범위의 주파수를 차례로 송신하고 전리권에서 반사된 전파를 수신하여 주파수에 따른 도달시간(time of flight)을 그래프로 나타낸다. 이를 이오노그램(ionogram)이라 한다. 이오노그램의 정보는 ARTIST(Automatic Real-Time Ionogram Scaler With True Height) 프로그램을 통해 자동으로 가공되어 전리권의 여러 변수들이 추출된다.

ARTIST 자체적으로 몇 가지 기준을 두어 전리권 변수들의 신뢰도가 계산된다[7]. 신뢰도는 11 부터 55 사이의 두 자릿수 정수로 제공되고 값이 커질수록 신뢰도가 높아짐을 의미한다. 본 연구에서는 신뢰도가 44 이상인 값들은 신뢰할 수 없다고 판단하여 Es층 분석에서 제외하였다.

Fig. 1은 2009년부터 2022년까지 이천과 제주 이오노존데 자료의 월별 가용성을 나타낸다. 파란색과 주황색 실선은 각각 이천과 제주의 월별 가용성을 나타내며, 월별 자료 가용성은 식 (1)로 정의된다.

$$\text{월별자료 가용성} = \frac{\text{월별 관측 횟수}}{\text{월별 정상상태 관측 횟수}} \times 100\% \quad (1)$$

식 (1)의 오른쪽 항 분모인 월별 관측 횟수는 해당 월에 신뢰도 44 미만으로 관측된 횟수를 의미하고, 월별 정상 상태 관측 횟수는 매 시 0, 15, 30, 45분에 빠짐없이 관측이 수행되었을 경우 해당 월의 관측 횟수를 의미한다(정상적으로 운용될 경우 이오노존데 직입사 관측은 시간 당 4회 수행). 제주 관측소는 2009년과 2021년에 전반적으로 자료 가용성이 낮고, 이천 관측소는 2020년 후반부터 2021년까지 월별 자료 가용성이 매우 낮다.

Fig. 2는 이천과 제주의 월 평균 foEs(critical frequency of Es)의 변화를 나타내며, 위 그림은 이천 관측소의 결과, 아래 그림은 제주 관측소의 결과이다. 붉은 상자로 표시된 부분은 월 평균 foEs의 변화가 부자연스럽거나 월별 자료 가용성이 낮은 기간을 나타낸다. 해당 기간의 자료를 통계 분석에 사용할 경우 편향된 결과가 도출될 수 있으므로, 본 연구에서는 붉은색 상자로 표시된 기간의 자료를 분석에서 제외하였다.

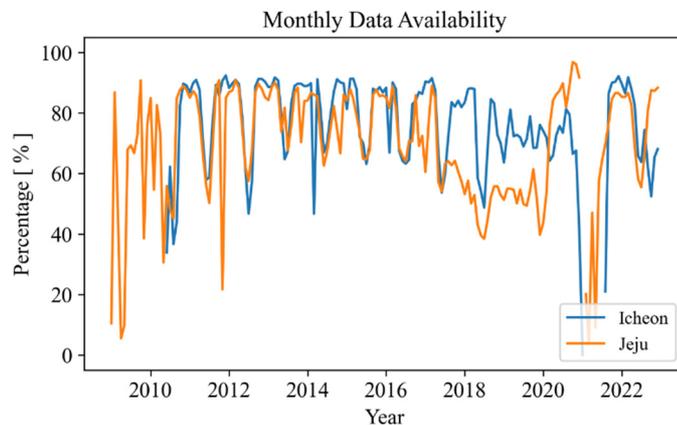


Fig. 1. Monthly availability of Icheon and Jeju ionosonde measurements.

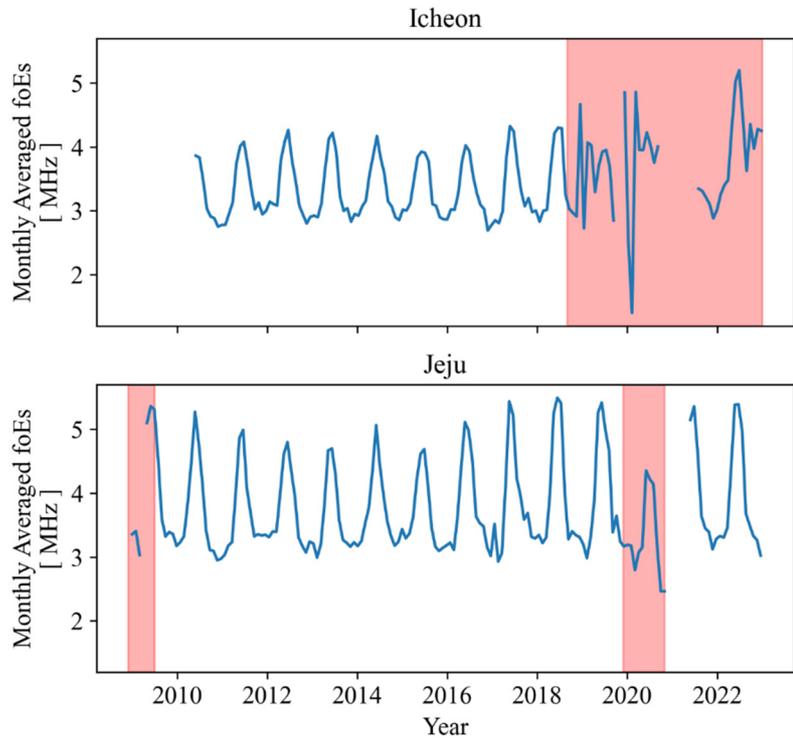


Fig. 2. Variation of monthly average foEs. foEs, critical frequency of Es.

3. Es층 발생 경향성 분석

3.1 월별, 지방시별 foEs(Critical Frequency of Es) 분포

Fig. 3은 계절과 지방시에 따른 평균 foEs의 변화를 나타낸다. Fig. 3의 위 그림의 월 간격은 1개월, 지방시 간격은 1시간이다. 가운데 그림은 지방시별 평균 foEs의 변화를 보여주며, 평균 foEs는 11시 부근에서 최대값을 나타낸 후 점차 감소하다가 자정 부근에서 약간 증가하는 경향을 보인다. 아래 그림은 월별 평균 foEs의 변화를 나타내며, 6월에 평균 foEs가 최대값을 기록하고 12월까지 점차적으로 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 4는 이천 이오노존데에서 관측된 foEs 변화를 나타내며, Fig. 3과 동일한 형식이다. 이천의 결과는 제주 이오노존데와 유사한 경향을 보이지만, 전반적으로 평균 foEs가 제주보다 낮다. 제주는 평균 foEs 최대값이 지방시와 계절 별로 각각 4.7 MHz와 5.2 MHz인데 반면, 이천에서는 foEs 최대값이 각각 4.0 MHz, 4.1 MHz이다.

3.2 월별, 지방시별 h'Es(Virtual Height of Es) 분포

Fig. 5는 제주 관측소의 월별, 지방시별 평균 h'Es의 변화를 나타낸다. foEs 변화는 제주와 이천 관측소 모두 12시 부근에서 foEs가 최대가 되는 일주기 변화를 보인다. 그러나 h'Es의 경우 일출(sunrise) 시점 이후에 증가하기 시작하여 6시경에 최대값을 기록한 후 정오까지 점차 감소하다가 16시경 두 번째 최대값을 보이는 반일주(semi-diurnal) 변화를 보인다. 이후

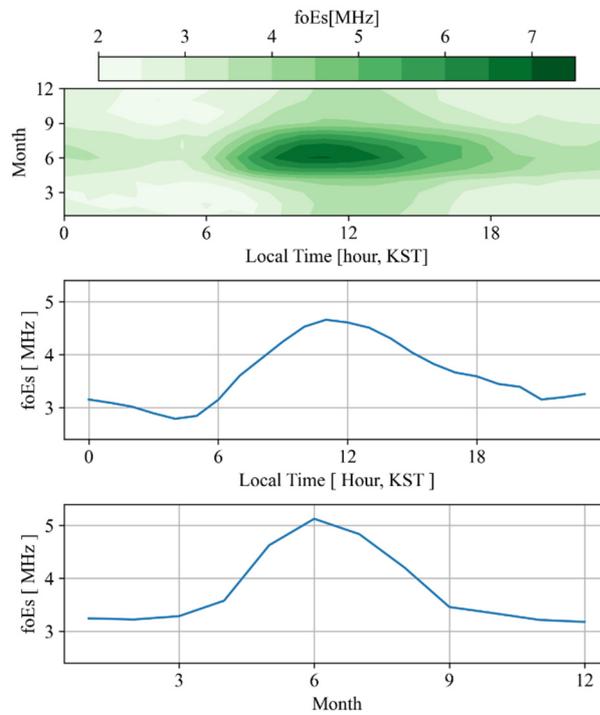


Fig. 3. Average foEs as functions of season and local time at Jeju station (top) Average foEs variations with local time (middle) and month (bottom). foEs, critical frequency of Es; KST, Korean Standard Time.

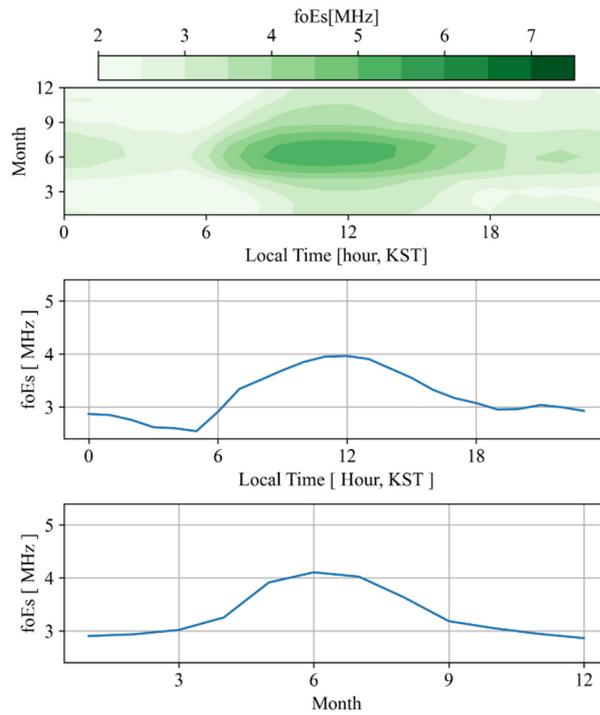


Fig. 4. Same as in Fig. 3 except for Icheon station. foEs, critical frequency of Es; KST, Korean Standard Time.

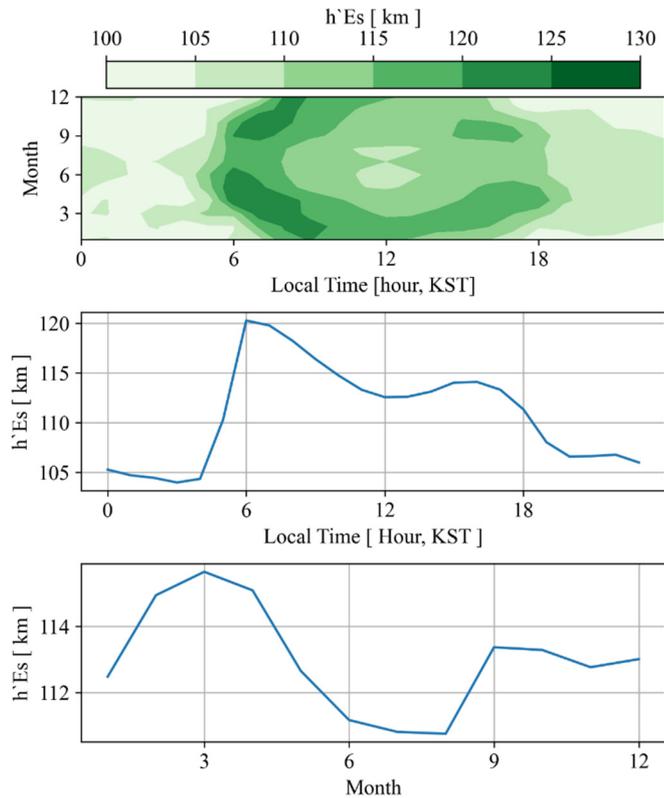


Fig. 5. Average h'Es as functions of season and local time at Jeju station (top) Average h'Es variations with local time (middle) and month (bottom). h'Es, virtual height of Es; KST, Korean Standard Time.

h'Es는 일출 시점까지 감소하는 경향을 나타낸다. 계절별로는 봄과 가을에 평균 h'Es가 높게 나타나고, 여름과 겨울에 상대적으로 낮은 h'Es 분포를 보인다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 형식으로 이천 관측소에서의 평균 h'Es 변화를 나타낸다. 지방시 별 h'Es의 반일주 변화는 제주와 유사한 경향을 보이며, 계절별 변화에서도 봄에 높은 h'Es가 나타나는 것이 유사하다.

3.3 월별, 지방시별 Es(Sporadic E Layer)층 발생률 분포

본 연구에서는 foEs가 7 MHz 이상인 경우와 10 MHz 이상인 경우의 Es층 발생률을 식 (2)로 정의하였다.

$$Es_{>7\text{ MHz}} \text{ 층 발생률} = \frac{Es_{>7\text{ MHz}} \text{ 층 발생 횟수}}{\text{관측 횟수}} \times 100\% \tag{2a}$$

$$Es_{>10\text{ MHz}} \text{ 층 발생률} = \frac{Es_{>10\text{ MHz}} \text{ 층 발생 횟수}}{\text{관측 횟수}} \times 100\% \tag{2b}$$

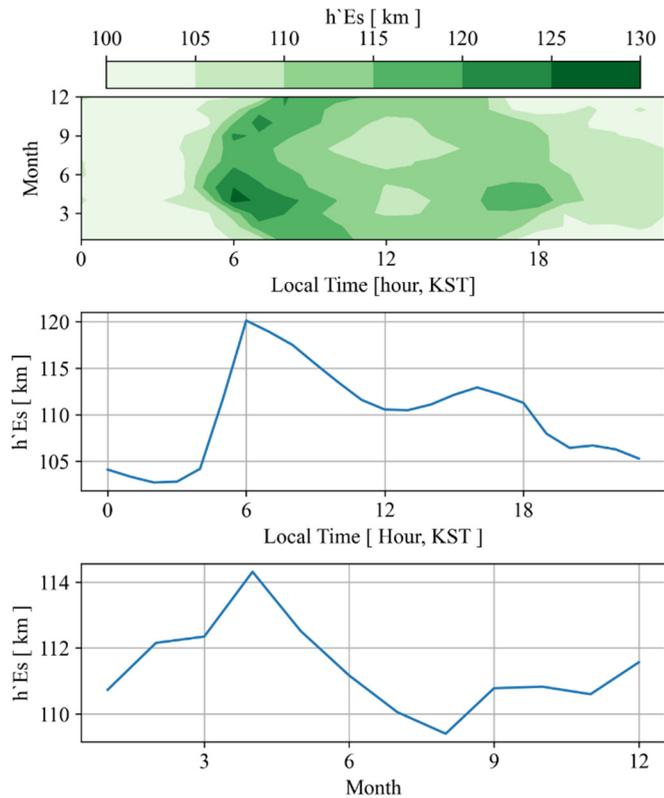


Fig. 6. Same as in Fig. 4 except for Icheon station. $h'Es$, virtual height of Es; KST, Korean Standard Time.

Es 층 발생 횟수(> 7 MHz)와 Es 층 발생 횟수(> 10 MHz)는 각각 관측 $foEs$ 값이 7 MHz와 10 MHz 이상인 경우를 의미하며, 관측 횟수는 특정 기간 동안 생성된 신뢰도 44 미만의 자료 개수를 나타낸다. 이때 Es 층 발생률은 일별, 월별, 지방시별 발생률 등의 형태로 정의될 수 있다.

Fig. 7은 제주 관측소의 월별, 지방시별 Es 층 발생률 변화를 나타낸다. 왼쪽 세 개의 판넬은 Es 층 발생률(> 7 MHz)에 대한 것이고, 오른쪽 판넬은 Es 층 발생률(> 10 MHz)에 대한 것이다. 월 간격은 1개월, 시간 간격은 1시간이다. Es 층 발생률(> 7 MHz)은 6월 11시 부근에서 가장 높은 값을 보이며, 지방시에 따라 살펴보면 0시부터 6시까지의 발생률이 거의 0에 가깝고, 11시까지 급격히 증가한 후 23시까지 서서히 감소하는 경향을 나타낸다. 계절상으로는 6월에 가장 높으며, 6-7월을 중심으로 서서히 감소하는 추세를 보인다. 발생률의 값의 차이는 있지만, Es 층 발생률(> 10 MHz)도 Es 층 발생률(> 7 MHz)와 유사한 경향을 보인다. Es 층 발생률(> 7 MHz), Es 층 발생률(> 10 MHz) 모두 4월에서 9월까지 7시부터 18시를 제외하면 Es 층 발생률은 매우 낮다.

Fig. 8은 이천 관측소의 Es 층 발생률 변화를 나타내며, Fig. 7과 동일한 형식이다. 지방시별로 Es 층 발생률(> 7 MHz)은 12시에 가장 높고, 20시경에 두 번째 고점을 보인다. 계절적으로는 6월에 발생률이 가장 높으며, Es 층 발생률(> 10 MHz)도 Es 층 발생률(> 7 MHz)와 유사한 경향을 보인다.

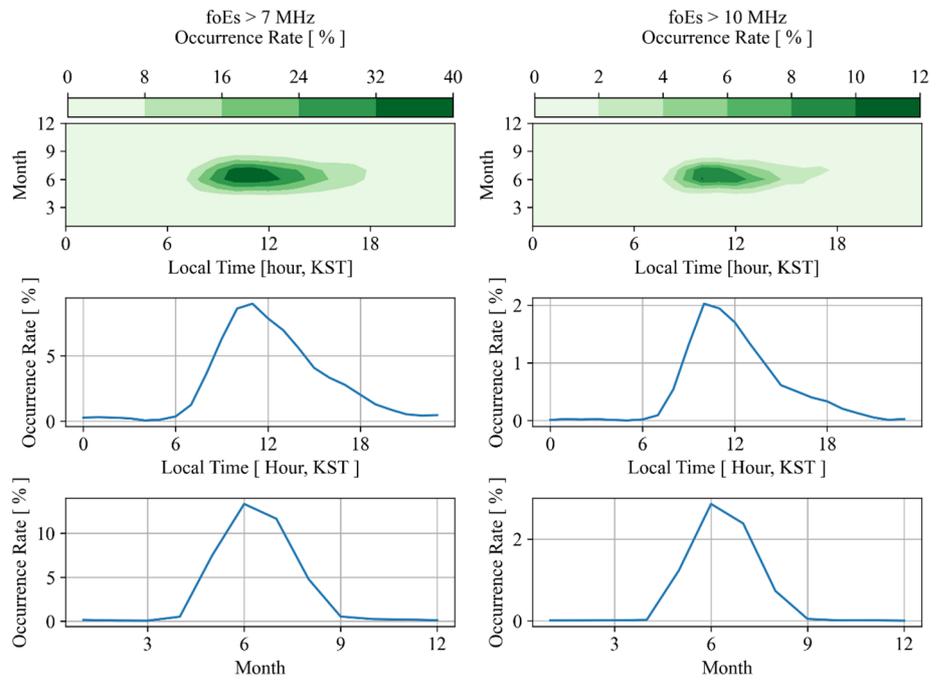


Fig. 7. Occurrence rates of Es layer (> 7 MHz, > 10 MHz) as functions of season and local time at Jeju station (top row). Occurrence rates of Es layer (> 7 MHz, > 10 MHz) by local time (middle row). Occurrence rates of Es layer (> 7 MHz, > 10 MHz) by month (middle row). foEs, critical frequency of Es; KST, Korean Standard Time.

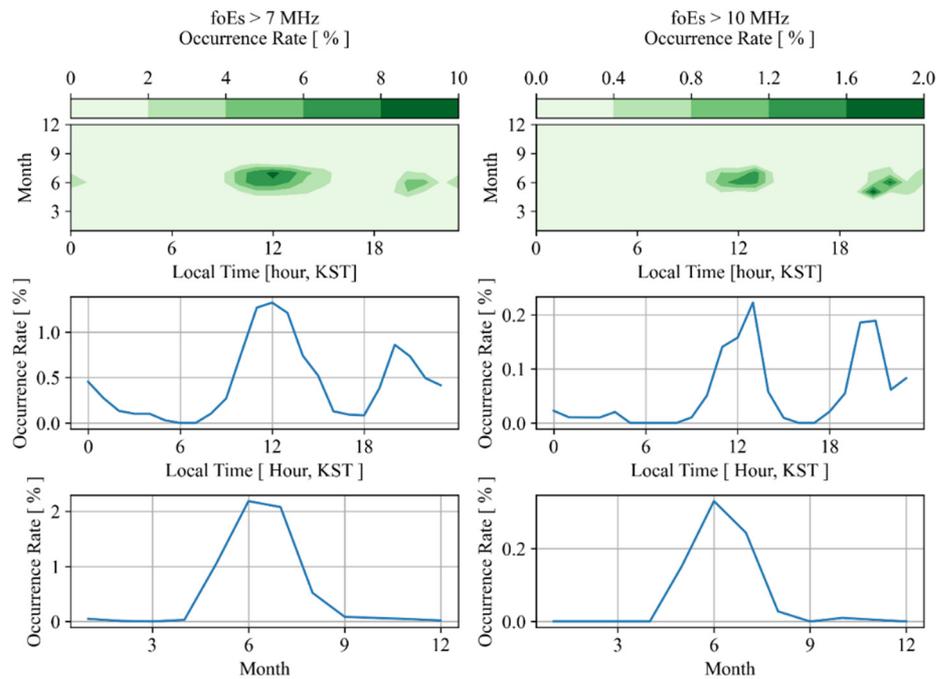


Fig. 8. Same as in Fig. 7 except for Icheon station. foEs, critical frequency of Es; KST, Korean Standard Time.

제주와 이천의 Es층 발생률 분포에는 두 가지 주요 차이가 있다. 첫째, 이천의 발생률은 제주에 비해 약 5배 낮다. 제주에서의 Es층 발생률(> 7 MHz)은(Fig. 7의 왼쪽 위) 최대 40%인 반면, 이천에서는 10% 미만이다. Es층 발생률(> 10 MHz)의 경우, 제주와 이천에서 각각 최대 12%와 2%이다. 둘째, 제주는 11시에 한번의 최고점을 보이지만, 이천에서는 12시에 최고점이 나타나고 20시에 또 다른 고점이 나타난다.

3.4 태양 활동에 따른 Es(Sporadic E Layer)층 발생률 변화

Fig. 9는 이천과 제주를 포함한 주변국 이오노존데 관측소의 월간 Es층 발생률(> 7 MHz)과 태양 흑점수 변화를 시간에 따라 나타낸다. 태양 흑점수 그림에서(가장 아래) 붉은색 굵은 실선은 태양 극대기, 초록색 굵은 실선은 태양 극소기를 나타낸다. 태양 극대기와 극소기 기간은 아래와 같다.

- 태양 극대기(연도): 1967-1969, 1979-1981, 1989-1991, 2000-2002, 2012-2014
- 태양 극소기(연도): 1974-1976, 1985-1987, 1995-1997, 2007-2009, 2018-2020

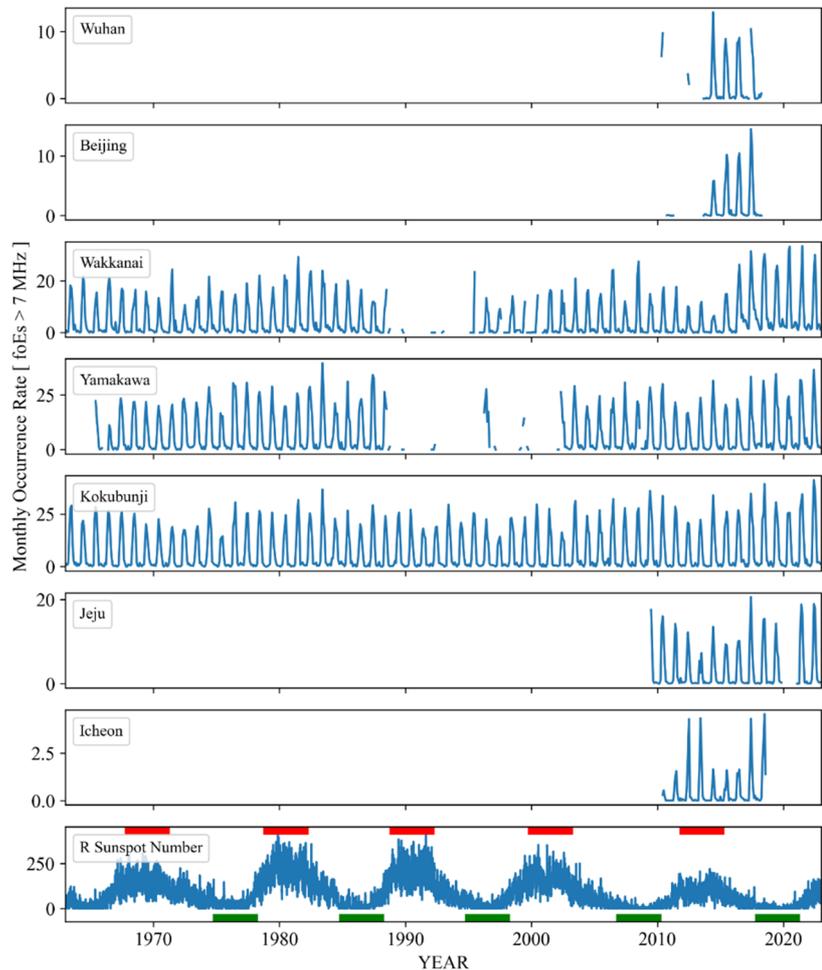


Fig. 9. Time series of monthly Es (> 7 MHz) occurrence measured at 7 East Asia ionosonde stations. Time series of sunspot numbers R is given at the bottom. foEs, critical frequency of Es.

태양 활동성에 따른 Es층 발생률 변화를 분석하기 위해서는 장기간의 관측 자료가 필요하다. Fig. 9를 보면, 이천 관측소 자료는 태양 극대기 1회에 해당하며, 제주 관측소 자료는 태양 극대기 1회와 극소기 1회 동안 사용 가능하다. 태양 활동성에 따른 제주와 이천의 Es층 발생률을 분석하기에는 자료의 양이 충분하지 않다고 판단되어, 제주와 이천 이외에 지리적/지자기적인 위치가 유사한 일본과 중국의 이오노존데 자료를 함께 사용해 태양 활동성에 따른 Es층 발생률 변화를 조사하였다.

Fig. 10과 Table 1은 연구에 사용된 이천, 제주, 베이징, 우한, 와카나이, 코쿠분지, 그리고 야마가와 이오노존데 관측소의 위치를 나타낸다. 이 7곳 관측소의 지리적 위도 차이는 최대 15도, 지자기 위도 차이는 최대 16도, 경도 차이는 약 27도에 이른다.

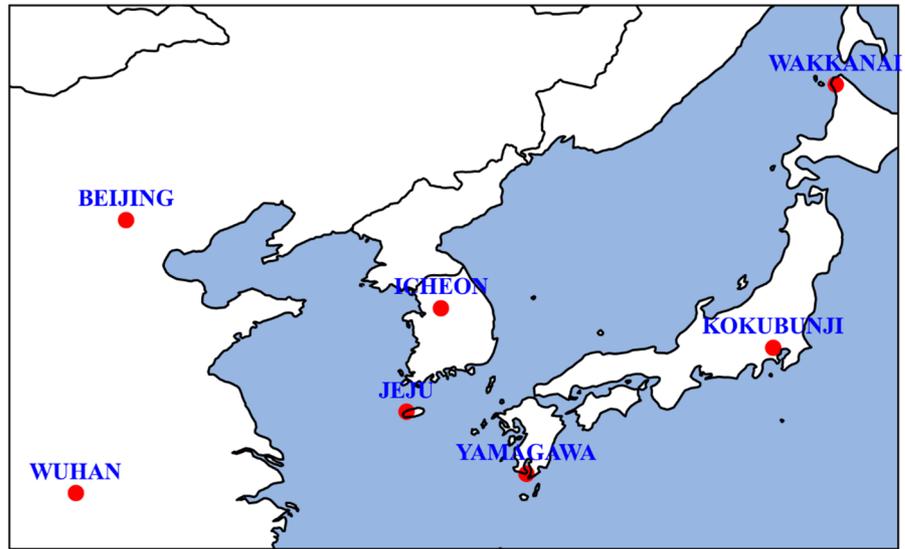


Fig. 10. Location of ionosonde stations in the East Asian region.

Table 1. Geographical and geomagnetic coordinates of ionosonde observatory around the Korean Peninsula

Satation	Geographic latitude (°N)	Geographic longitude (°E)	Geomagnetic latitude (IGRF-13(2022), °N)	Geomagnetic longitude (IGRF-13(2022), °E)
Wakkanai	45.16	141.75	37.27	210.08
Beijing	40.30	116.20	31.17	187.89
Icheon	37.14	127.54	28.32	198.24
Kokubunji	35.71	139.49	26.67	209.23
Jeju	33.43	126.30	24.55	197.36
Yamagawa	31.20	130.62	22.55	201.49
Wuhan	30.50	114.40	21.22	186.53

한반도 주변국까지 관측소를 확장하였음에도 불구하고, 태양 활동성과 Es층 발생률 간 상관분석을 위한 적절한 관측소 수는 충분하지 않았다. 예를 들어, 우한과 베이징 관측소는 태양 극대기와 극소기를 모두 포함하지 못한다. 이에 따라 상대적으로 긴 관측 자료가 제공되는 코쿠분지, 와카나이, 야마가와 관측소 자료를 주로 해석하였고, 한계가 있으나 제주 관측소의 자료를 포함하여 태양 활동성에 대한 분석을 수행하였다.

Fig. 11은 코쿠분지, 와카나이, 제주, 야마가와 관측소의 Es층 발생률을 태양 활동성에 따라 구분하여 나타낸 것이다. 실선은 Es층 발생률(> 7 MHz)이고 점선은 Es층 발생률(> 10 MHz)을 나타낸다. 파란색 실선과 점선은 태양 극소기, 주황색 실선과 점선은 태양 극대기의 발생률을 의미한다. 관측소 간의 정량적인 차이는 있지만, 4곳 관측소 모두에서 Es층 발생률(> 7 MHz)와 Es층 발생률(> 10 MHz)은 태양 극소기에 더 높게 나타나는데, 특히 발생률이 최고점인 정오 부근에서 태양 극대기와 극소기의 발생률 차이가 두드러지게 나타난다. 이와 유사한 경향은 Fig. 12의 태양 활동성에 따른 계절별 발생률 변화에서도 나타나는데, 4곳 관측소 모두 여름철에 Es층 발생률이 높고, 태양 극소기에 발생률이 극대기에 비해 높은 경향을 보인다.

중위도 지역에서 Es층 발생의 주요한 원인은 중성 대기의 바람 시어와 유성에 의한 전리권 E층의 플라즈마 밀도 증가로 알려져 있다[8-10]. Tang et al.(2021)은 중위도 유성 레이더로 관측된 유성 개수와 이오노존테의 Es층 발생률을 비교한 결과, 유성 개수와 Es층 발생률은

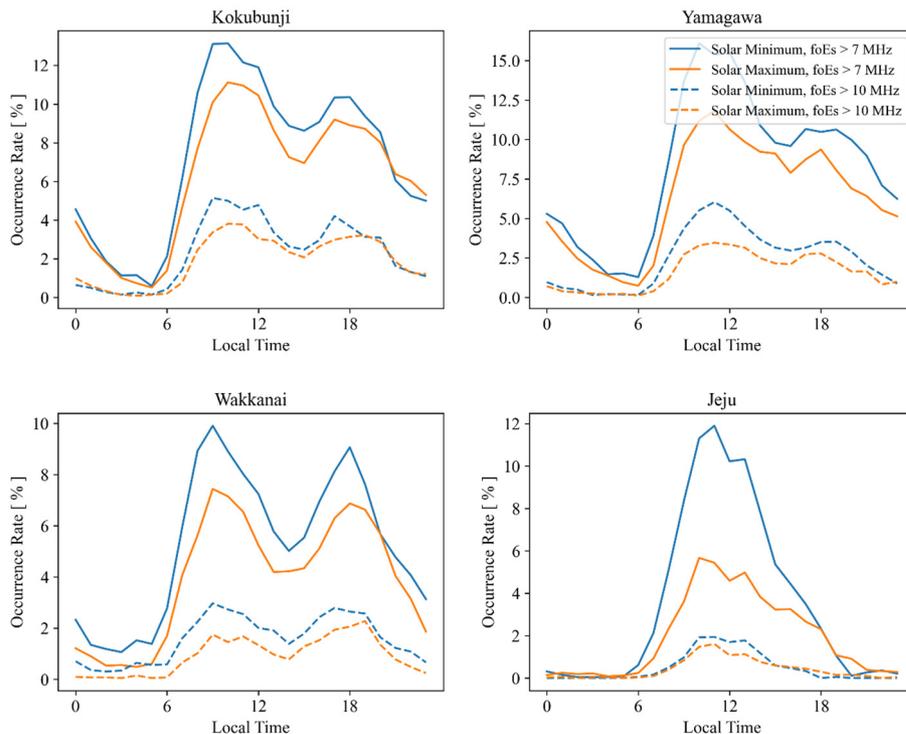


Fig. 11. Occurrence rates of Es layer according to local time at Kokubunji, Yamagawa, Wakanai, and Jeju. Solid and dashed lines are for foEs > 7 MHz and > 10 MHz, respectively. Blue and orange colors represent solar minimum and maximum, respectively. foEs, critical frequency of Es.

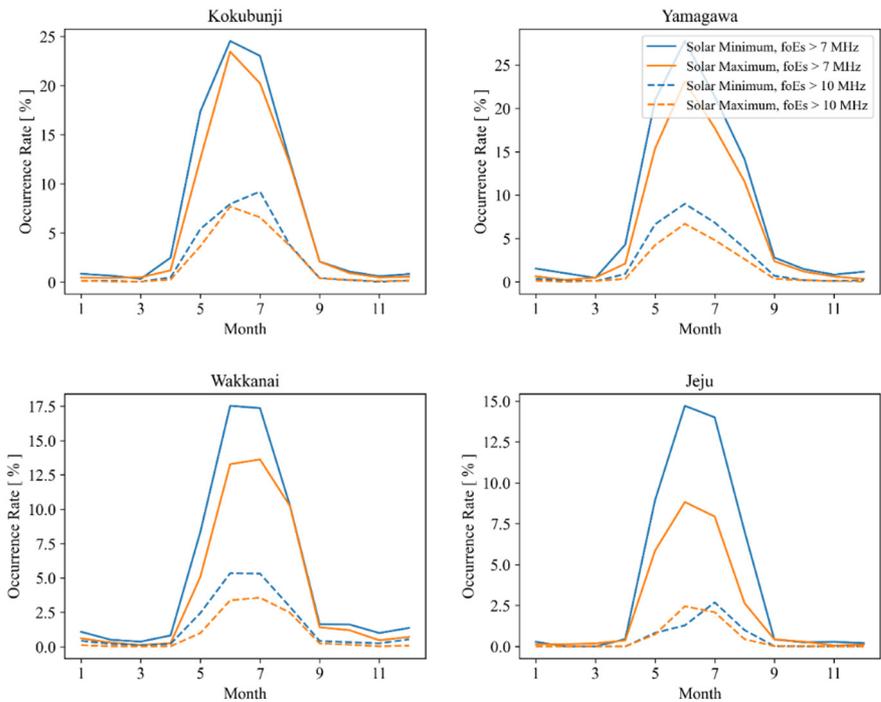


Fig. 12. Occurrence rates of Es layer according to season at Kokubunji, Yamagawa, Wakkanai, and Jeju. Solid and dashed lines are for foEs > 7 MHz and > 10 MHz, respectively. Blue and orange colors represent solar minimum and maximum, respectively. foEs, critical frequency of Es.

여름철 높고 겨울철에 낮은 경향을 보였으며, 두 변수 간의 선형 상관계수는 약 0.6으로 나타났다[11]. Campbell-Brown에 따르면, 태양 활동성이 증가할수록 VHF 레이더로 관측되는 유성의 수가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 연구 결과를 종합하면, Fig. 11과 12에서 나타나는 태양 극소기 동안의 Es층 발생률이 높은 경향은 계절과 태양 활동성에 따른 유성 유입량의 차이에 기인한 것으로 해석할 수 있다[12].

3.5 지자기 교란 정도에 따른 Es(Sporadic E Layer)층 발생률 변화

Fig. 13은 일본 카키오카 지자기 관측소(36.233°N, 140.189°E)에서 측정된 K 지수의 월별, 지방시별 평균 분포를 나타낸다. K 지수는 춘분과 추분에 평균적으로 높은 값을 보이며, 지방시 기준으로는 자정에 높은 경향을 나타낸다. K 지수에 따른 Es 발생률 분포를 분석할 때, 계절 및 지방시에 따른 Es층 발생률이 혼재하여 분석에 어려움이 발생할 수 있다. 지자기 변동에 의한 Es층 분포를 명확히 하기 위해 계절별, 지방시별로 K 지수에 따른 Es층 발생률을 조사하였다.

Figs. 14-16의 파란색 실선은 K지수가 0일 때의 Es층 발생률(> 7 MHz)를 빨간색부터 노란색은 각각 K = 1, K = 2, K = 3, 그리고 K가 4이상일 경우의 발생률을 나타낸다. 분석은 봄, 가을, 겨울, 여름으로 구분하여 계절별로 지방시에 따른 발생률 분포를 제시하였다. K = 1, 2, 3 일 경우에는 계절에 관계없이 특정한 경향을 파악하기 어려운 분포를 보였지만, K = 0과 K가

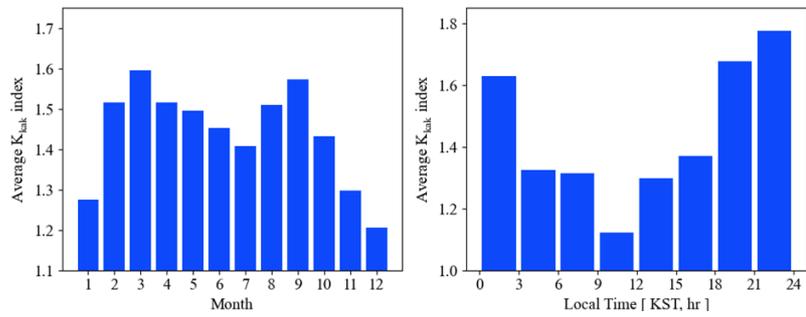


Fig. 13. Average distributions of Kakioka K index by month (left) and local time (right). KST, Korean Standard Time.

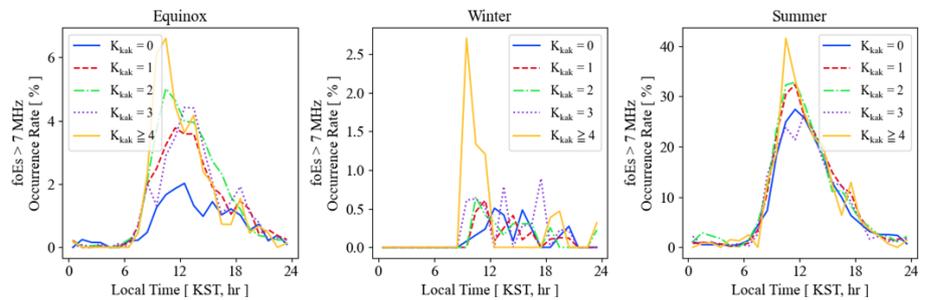


Fig. 14. Occurrence rates of Es (> 7 MHz) at Jeju as function of local time for equinox, winter, summer seasons. The occurrence rates are plotted for each group of K index as indicated in the label. foEs, critical frequency of Es; KST, Korean Standard Time.

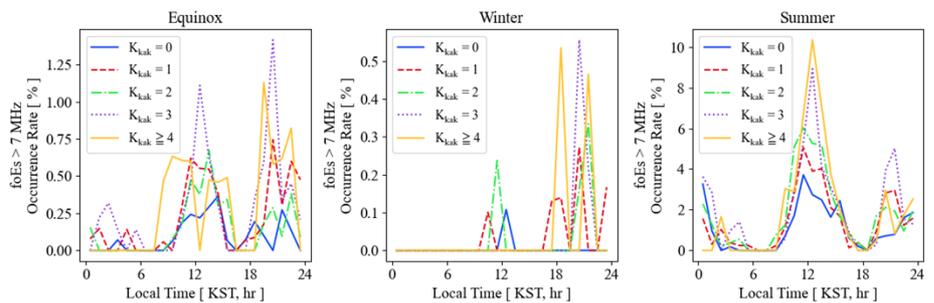


Fig. 15. Same as in Fig. 14 except for Icheon. foEs, critical frequency of Es; KST, Korean Standard Time.

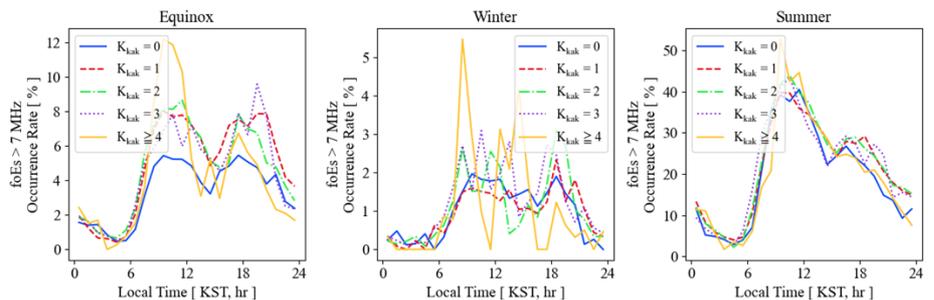


Fig. 16. Same as in Fig. 14 except for Kokubunji. foEs, critical frequency of Es; KST, Korean Standard Time.

4 이상인 경우(파란색 및 노란색 실선)는 유의미한 발생률 차이가 나타났다. 제주와 코쿠분지의 경우 봄·가을, 여름 그리고 K가 4 이상일 때 Es층 발생률이 높은 경향을 보이며, 겨울에 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이천 관측소의 경우 여름철에는 K지수에 따른 유의미한 발생률 차이가 관찰되었지만, 봄·가을과 겨울에 차이가 나타나지 않았다.

3.6 Es(Sporadic E Layer)층 발생률과 VIC(Vertical Ion Convergence) 간 상관분석

식 (3)을 사용하여 일별 VIC(Vertical Ion Convergence)와 일별 Es층 발생률 간 상관분석을 수행하였다. 식 (3)은 수직 이온 수렴도(VIC)를 나타내며 이는 수직 방향 이온 속도의 기울기를 의미한다[13].

$$VIC = - \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3)$$

VIC 계산에 NRLMSIS-00, HWM2014 그리고 IGRF-13 모델을 사용하였는데 각 모델로부터 이온 밀도, 중성대기 속도 그리고 자기장을 산출하였다. Fig. 17의 (a)와 (b)에서 파란색 실선은 일별 Es층 발생률(< 7 MHz)의 변화, 붉은색 실선은 고도 115 km와 105 km의 VIC 변화를 각각 나타낸다. 115 km의 경우 대체적으로 일별 Es층 발생률(< 7 MHz)과 VIC의 증감이 여름철에는 높고 겨울철에는 낮은 경향의 유사한 패턴을 보인다. 반면 105 km의 경우 일별 Es층 발생률(< 7 MHz)과 VIC 간 변화가 서로 다른 양상을 보인다. Fig. 17의 (c)에는 고도에 따른 VIC와 Es층 발생률 간의 상관관계수가 (d)에는 관측된 Es층 발생 고도의 분포 히스토그램이 제시되어 있다. 110 km 부근에서 Es층이 가장 많이 관측되었으며, 이 고도에서 상관관계수가 약 0.6으로 가장 높게 나타났다. 고도가 110 km보다 낮거나 135 km보다 높은 경우 상관관계수가 낮아지는 경향을 보였으며, 이는 Es층 발생률(< 7 MHz)과 Es층 발생률(< 10 MHz) 모두에서 동일하게 관찰되었다.

Fig. 18은 Fig. 17과 동일한 형식으로 이천 관측소의 결과를 나타낸 것이며, 전반적인 경향은 제주와 유사하지만 상관관계수는 제주보다 낮은 경향을 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 Es층의 발생 예측 모델 개발을 목적으로, Es층의 발생 빈도를 분석하고, 태양 활동성과 지자기 교란 상관분석을 수행하였다. foEs는 여름철 정오 부근에서 가장 높으며, 여름에서 겨울로, 정오에서 자정으로 갈수록 점차 낮아지는 경향을 보였다. h'Es(virtual height of Es)는 6시경에 가장 높고, 정오까지 점진적으로 감소하다가 16시경에 다시 증가한 후 자정까지 다시 낮아지는 형태를 나타내며, 4월이 가장 높은 값을 보이고 8월까지 감소한 뒤 이후 다시 증가하는 경향을 보였다.

이천 관측소의 Es발생률은 12시와 20시에 두 번의 최대점을 보였으며, 계절적으로는 6월에 최고점을 기록하였다. 반면, 제주 관측소의 경우 6월 11시에 한 번의 발생률이 가장 높았다.

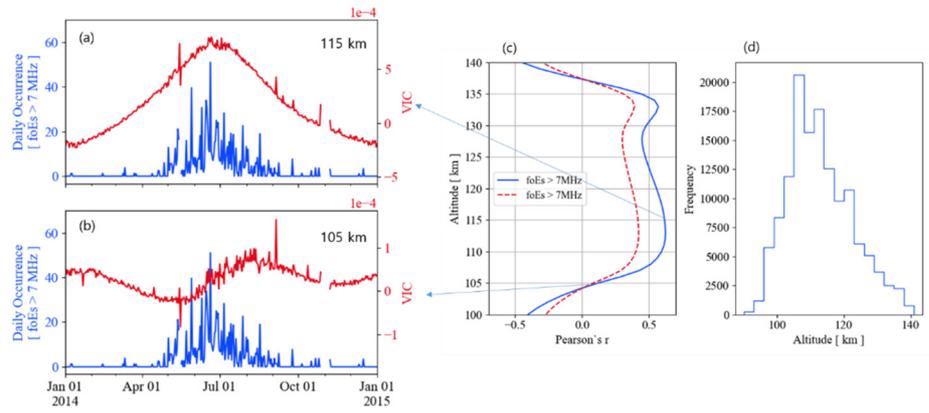


Fig. 17. Daily occurrence rate of Es (> 7 MHz) in 2014 at Jeju. Overlapped red curves are VIC computed at 115 km (a) and 105 km (b). Altitude profiles of correlation between daily Es occurrence and VIC (c). Histogram of Es heights (d). foEs, critical frequency of Es; VIC, Vertical Ion Convergence.

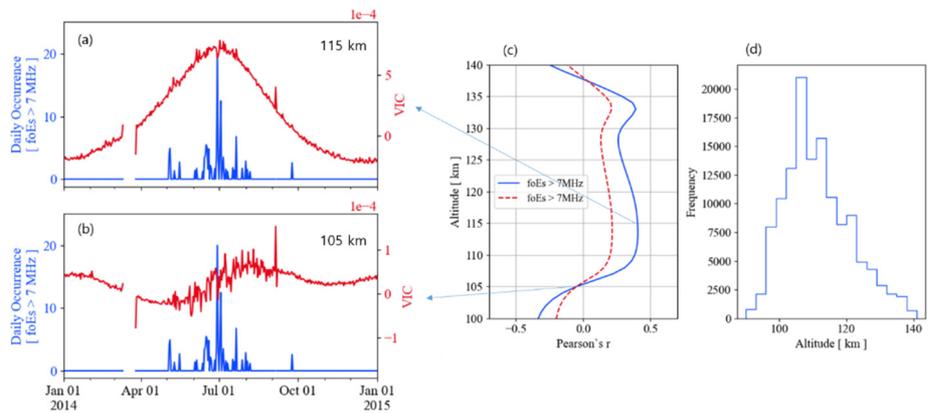


Fig. 18. Same as in Fig. 17 except for Icheon. foEs, critical frequency of Es; VIC, Vertical Ion Convergence.

Es 발생률은 위도에 따라 다르게 나타났으며, 고위도일수록 두 번의 최대점이 존재하고 저위도일수록 한 번의 최대점이 나타나는 경향이 확인되었다. 또한, 태양 극소기 동안의 발생률이 극대기 기간에 비해 더 높게 나타났다.

북반구 중위도 지역에서 Es층의 주요 발생 원인은 중성대기 바람 시어이며 유성에 의한 유입되는 금속 이온이 Es 발생률을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다. 110-120 km 고도에서의 VIC와 Es층 발생률 간에 가장 높은 상관관계가 나타났으며, 지자기 교란이 클수록 발생률이 대체적으로 높아지는 경향을 보였다.

본 연구의 분석 결과는 Es층 발생률 예보 모델 개발에 사용될 것이다. 분석 결과는 기계학습 모델의 입력 자료 선정에 참고될 것이며, 다양한 구조의 기계학습 구조를 훈련하여 우주환경 예보에 활용될 수 있는 Es층 예보 모델을 개발할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 정부(우주항공청 우주환경센터)의 재원으로 정보통신기획평가원(과제번호 : RS-2023-00237693, 우주전파재난 위험분석 및 대응기술 개발 사업)의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

References

1. Haldoupis C, Midlatitude sporadic E. A typical paradigm of atmosphere-ionosphere coupling, *Space Sci. Rev.* 168, 441-461 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9786-8>
2. Axford WI, The formation and vertical movement of dense ionized layers in the ionosphere due to neutral wind shears, *J. Geophys. Res.* (1896-1977). 68, 769-779 (1963). <https://doi.org/10.1029/JZ068i003p00769>
3. Chimonas G, Axford WI, Vertical movement of temperate-zone sporadic E layers, *J. Geophys. Res.* (1896-1977). 73, 111-117 (1968). <https://doi.org/10.1029/JA073i001p00111>
4. Houminer Z, Russell CJ, Dyson PL, Bennett JA, Study of sporadic-E clouds by backscatter radar, *Ann. Geophys.* 14, 1060-1065 (1996). <https://doi.org/10.1007/s00585-996-1060-0>
5. Harwood J, Some observations of the occurrence and movement of sporadic-E ionization, *J. Atmos. Terr. Phys.* 20, 243-244, IN1, 245-262 (1961). [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(61\)90204-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(61)90204-5)
6. Tanaka T, Sky-wave backscatter observations of sporadic-E over Japan, *J. Atmos. Terr. Phys.* 41, 203-215 (1979). [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(79\)90013-8](https://doi.org/10.1016/0021-9169(79)90013-8)
7. Galkin IA, Reinisch BW, Huang X, Khmyrov GM, Confidence score of ARTIST-5 ionogram autoscaling, in INAG Technical Memorandum, pp. 1-7 (2013).
8. Whitehead JD, The formation of the sporadic-E layer in the temperate zones, *J. Atmos. Terr. Phys.* 20, 49-58 (1961). [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(61\)90097-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(61)90097-6)
9. Whitehead JD, Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E, *J. Atmos. Terr. Phys.* 51, 401-424 (1989). [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(89\)90122-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90122-0)
10. Mathews JD, Sporadic E: current views and recent progress, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 60, 413-435 (1998). [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(97\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00043-6)
11. Tang Q, Zhao J, Yu Z, Liu Y, Hu L, et al., Occurrence and variations of middle and low latitude sporadic E layer investigated with longitudinal and latitudinal chains of ionosondes, *Space Weather.* 19, e2021SW002942 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021SW002942>
12. Campbell-Brown MD, Solar cycle variation in radar meteor rates, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 485, 4446-4453 (2019). <https://doi.org/10.1093/mnras/stz697>
13. Shinagawa H, Tao C, Jin H, Miyoshi Y, Fujiwara H, Numerical prediction of sporadic E layer occurrence using GAIA, *Earth Planets Space.* 73, 28 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01330-y>

Author Information

최규철 kcchoi@selab.co.kr



충북대학교 천문우주학과에서 석사학위를 받았고 박사과정을 수료하였다. (주)에스이랩의 책임연구원으로 재직하고 있으며, 우주과학 및 우주기상, 자력계, 기상레이더 영상 분석 등의 분야에서 연구 및 사업을 수행하고 있다.

오승준 oh@selab.co.kr



2002년 (주)에스이랩을 공동 창업하고, 현재 대표이사로 역임하고 있다. 2007년 서울대 물리천문학부에서 전리권 연구로 박사학위를 취득한 후 우주 기술 관련 다양한 응용 콘텐츠 개발 및 사업화의 책임자로 활동하고 있다. 2013년부터 2018년까지 아·태 산업자문회의 위원(APEC Business Advisory Council member)으로 활동했다.

신대규 dkshin@selab.co.kr



충북대학교 천문우주학과에서 석사와 박사학위를 받았고, (주)에스이랩의 책임연구원으로 재직하고 있다. 우주과학 및 우주기상, 기상레이더, AI 등의 분야에서 연구 및 사업을 수행하고 있다

김용하 eyhkim@cnu.ac.kr



충남대학교 명예교수로 "지구의 고층대기"(충남대 출판원)의 저자이고, (주)에스이랩의 책임연구원으로 재직하며, 전리권/고층대기 전반의 연구를 수행중이다.