Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 32, No. 1 (2022) pp. 51-60
https://doi.org/10.14191/Atmos.2022.32.1.051
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

파장별 지표 자외선 복사량을 이용한 SARS-CoV-2 바이러스 비활성화 시간 추정 연구

박선주[1] · 이윤곤[1]* · 박상서[2]
[1]충남대학교 우주·지질학과 대기과학전공, [2]울산과학기술원 도시환경공학과

(접수일: 2022년 3월 3일, 수정일: 2022년 3월 18일, 게재확정일: 2022년 3월 21일)

Estimation of the SARS-CoV-2 Virus Inactivation Time Using Spectral Ultraviolet Radiation

Sun Ju Park[1], Yun Gon Lee[1]*, and Sang Seo Park[2]
[1]Atmospheric Sciences, Department of Astronomy, Space Science, and Geology, Chungnam National University, Daejeon, Korea
[2]Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Korea

(Manuscript received 3 March 2022; revised 18 March 2022; accepted 21 March 2022)

Abstract Corona Virus Disease 19 pandemic (COVID-19) causes many deaths worldwide, and has enormous impacts on society and economy. The COVID-19 was caused by a new type of coronavirus (Severe Acute Respiratory Syndrome Cornonavirus 2; SARS-CoV-2), which has been found that these viruses can be effectively inactivated by ultraviolet (UV) radiation of 290~315 nm. In this study, 90% inactivation time of the SARS-CoV-2 virus was analyzed using ground observation data from Brewer spectrophotometer at Yonsei University, Seoul and simulation data from UVSPEC for the period of 2015~2017 and 2020. Based on 12:00-13:00 noon time, the shortest virus inactivation time were estimated as 13.5 minutes in June and 4.8 minutes in July/August, respectively, under all sky and clear sky conditions. In the diurnal and seasonal variations, SARS-CoV-2 could be inactivated by 90% when exposed to UV radiation within 60 minutes from 10:00 to 14:00, for the period of spring to autumn. However, in winter season, the natural prevention effect was meaningless because the intensity of UV radiation weakened, and the time required for virus inactivation increased. The spread of infectious diseases such as COVID-19 is related to various and complex interactions of several variables, but the natural inactivation of viruses by UV radiation presented in this study, especially seasonal differences, need to be considered as major variables.

Keywords: Spectral UV radiation, Virus inactivation time, SARS-CoV-2, COVID-19, Cloud amount

*Corresponding Author: Yun Gon Lee, Department of Astronomy, Space science, and Geology, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea.
Phone: +82-42-821-7101, Fax: +82-42-821-8891
E-mail: yglee2@cnu.ac.kr

1. 서 론

2020년 2월 세계보건기구(World Health Organization; 이하 WHO)에서 공식 명칭으로 발표한 코로나바이러스 감염증-19(Corona Virus Disease 19 pandemic; 이하 COVID-19)는 2019년 12월 중국 우한에서 처음 발생한 이후, 중국 전역과 전 세계로 확산된 새로운 유형의 코로나바이러스(Severe Acute Respiratory Syndrom CoronaVirus 2; 이하 SARS-CoV-2)에 의한 호흡기 감염질환이다. WHO는 2020년 1월 국제적 공중보건 비상사태를 선포하였으며, 같은 해 3월에는 전 세계적 대유행 상태로 격상시켰다. 전 세계적인 COVID-19 대유행으로 인해 2022년 1월 기준 전 세계 확진자는 3억 5천만명을 넘어섰고, 국내에서 확진자는 약 74만명, 사망자는 약 6천명을 기록하고 있다. COVID-19는 감염자의 호흡기 침방울(비말)이 다른 사람의 호흡기나 눈·코·입 점막으로 침투될 때 전염된다. 감염되면 약 2~14일의 잠복기를 거친 뒤 발열 및 기침이나 호흡곤란 등 호흡기 증상, 폐렴이 주요 증상으로 나타나지만 무증상 감염 사례 빈도도 높게 나오고 있어 그 문제가 심각하다. 더욱이 SARS-CoV-2는 돌연변이를 통해 지속적으로 변화하며, 때때로 이러한 돌연변이 결과로 새로운 바이러스 변이가 발생하면서 세계 각국의 방역과 백신의 대응을 약화시키는 상황이다.

태양복사 중 자외선(Ultraviolet; 이하 UV) 복사는 짧은 파장 순으로 UV-C (200~280 nm), UV-B (280~320 nm), 그리고 UV-A (320~400 nm)로 구분된다. 식물, 동물 및 인간에게 매우 유해한 UV-C 영역은 대기층을 통과하면서 완전히 소산되기 때문에 지표에 도달하지 못하며, UV-B 영역의 대부분은 성층권 오존에 의해 흡수되고 일부만 지표에 도달한다. 그렇기 때문에 지표에 도달하는 자외선 복사는 극히 일부분의 UV-B 영역과 대부분의 UV-A 영역으로 구성된다. 이러한 자외선 복사에 대한 관심은 대기복사학적 측면에서뿐만 아니라 생물학 분야에서도 자외선 복사에 대한 관심이 증가하고 있다(Harm, 1980; Schmid, 2001). 특히, 1980년대 오존층 감소에 따른 지표 UV-B 복사의 증가는 UV-B 복사의 인체 유해성(예, 피부 홍반, 악성 흑색종, 피부 암, DNA 손상, 백내장, 광노화 등)에 대한 심각한 우려와 주의가 요구되었다(Diffey, 1991; Kerr and McElroy, 1993; Armstrong and Kricker, 2001; Matsumura and Ananthaswamy, 2004; Young, 2006; Watson et al., 2016). 다른 한편으로는 적절한 UV-B 복사 노출이 가져오는 유익성, 즉 인체의 비타민 D_3 자연적 합성 기능에 대한 연구결과들도 지속적으로 제시되어왔다(Galkin and Terenetskaya, 1999; Holick, 2007; WHO, 2008; Norval et al., 2010, Lin et al., 2012; Lucas et al., 2015; Park et al., 2019).

자외선에 대한 과도한 인체 노출은 피부세포 손상 및 노화 등의 해를 끼치지만, 역으로 세포를 파괴하는 손상 능력 덕분에 살균 효과가 탁월하다. 특히, 노로바이러스, 박테리오파지 MS2, 칼리지 바이러스 등 여러 바이러스들을 무기력화하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(El-Ghorr and Norval, 1996; Pecson et al., 2009; Lee and Ko, 2013; Nims and Plavsic, 2013). SARS-CoV-2 전파는 노출된 바이러스와의 밀접한 접촉이 주요한 원인이라고 할 수 있다. SARS-CoV-2는 기온 23°C 이상, 상대습도 40% 이하의 실내 조건에서 며칠 동안 지속될 수 있으나, 제한된 조건의 실험실에서 UV-C 영역 자외선에 노출되면 30분 이내에 많은 바이러스가 비활성화된다(Ratnesar-Shumate et al., 2020). 그러나, 여러 바이러스 비활성화에 가장 효과적인 UV-C 영역은 지표에 도달하지 않기 때문에, 실험실에서 계산된 UV-C 영역 특정 파장에 대한 UV-B 영역의 정규화된 가중 함수(SARS-CoV-2 비활성화 가중 함수)로 적용될 수 있다(Herman et al., 2021). Herman et al. (2021)에서는 SARS-CoV-2 비활성화 가중 함수를 UV-B 영역(290~315 nm)에 적용하고, 전체 바이러스 중 90%를 비활성화시키는데 필요한 복사량(D_{90})으로 3.2 J m^{-2}를 제시하였다. 이 값을 기준으로 OMI 위성으로 관측된 UV-B 복사량과, 오존 전량, 구름, 에어로졸 등의 대기 상태를 고려하여 SARS-CoV-2 비활성화 시간을 추정하였다.

본 연구에서는 서울 지역의 지표 파장별 자외선 복사량과 복사전달모델의 모의 값을 이용하여 SARS-CoV-2 바이러스 비활성화 시간을 추정하고자 한다. 먼저, 서울 연세대학교에서 설치, 운영되고 있는 Brewer 분광광도계의 파장별 자외선 복사량과 파장별 SARS-CoV-2 가중 함수를 적용하여 실제 대기 상태에서의 SARS-CoV-2 바이러스 비활성화 시간을 산출하고 변동성을 분석하였다. 두 번째는 복사전달모델을 이용하여 관측 지점의 SARS-CoV-2 바이러스 비활성화 시간에 대한 이론적 모의 값을 도출하고 이를 관측 결과와 비교 분석하였다. 또한, 복사전달모델 모의를 위한 주요한 입력 값 중 Brewer 분광광도계에서 관측되는 오존 전량(Total Ozone Column; 이하 TOC)과 에어로졸 광학 두께(Aerosol Optical Depth; 이하 AOD)를 적용함으로써, 구름에 의한 비활성화 시간 차이를 관측과 모델의 비교를 통해 도출하고자 하였다. 바이러스의 확산과 소멸과 관계된 의학적, 공중보건학적, 사회적 인자들이 다양하지만 본 연구는 대기복사학적 측면에서, 지표에 도달하는 태양 복사(자외선)에 의한 바이러스의 자연적인 활동성을 평가하고자 하였다.

2장에서는 본 연구에서 사용된 관측 자료와 UVSPEC 복사 전달 모델에 대해서 설명하고, SARS-CoV-2 바이러스의 비활성화 시간을 추정하는 방법에 대해 기

술한다. 3장은 관측과 모델로부터 추정된 바이러스 비활성화 시간의 통계적 특징을 설명하고, 4장에서는 본 연구결과의 요약 및 시사점을 제시한다.

2. 자료 및 방법

2.1 관측 자료

본 연구에서는 서울 연세대학교에서 설치, 운영되고 있는 Brewer 분광광도계(MKIV, SCI-TEC Inc., #148)의 파장별 자외선 복사량을 사용하였다. Brewer 분광광도계는 UV-B와 UV-A 영역을 포함하는 286.5~363 nm 범위에서 0.5 nm의 파장 분해능을 갖는다. Brewer 분광계는 측기 내에 들어온 태양 광선을 빛의 회절과 간섭을 이용하여 파장별로 분류한 후, 특정 파장 5개를 선택하여 그 강도를 측정한 값을 이론식(푸리에 변환) 또는 경험식을 사용하여 대기 중의 TOC를 산출하는 장비이다. TOC 외에도 TOC 관측에 이용하는 파장 쌍을 통한 오존 연직 분포, 320.1 nm AOD, 파장별 지표 자외선 복사량 그리고 홍반 가중 함수 [Erythema Weighting Function, Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)]가 적용된 홍반 자외선 복사량을 측정한다. 자외선 영역에서 분광된 파장을 이용하기 때문에 TOC 관측 자료의 불확실성은 낮은 편이고, 가시광 영역이 아닌 자외선 영역의 AOD가 산출되며 정확도 측면에서 신뢰도가 높다고 제시되었다(Gröbner et al., 2004; López-Solano et al., 2018). 이러한 관측 자료를 이용하여 한국에서의 자외선 복사량 변화 감시, 자외선 복사량에 미치는 구름 및 에어로졸의 영향, 그리고 자외선 지수 산출 등 다양한 연구들이 진행되었다(Kim et al., 2006; Kim et al., 2013; Kim et al., 2014; Park et al., 2015; Kim et al., 2017; Park et al., 2017; Kim et al., 2021). 본 연구는 2015년부터 2020년까지의 전체 6년 동안의 파장별 자외선 복사량 (단위: W m^{-2} nm^{-1}) 자료를 구축하여 분석하였고, 2018년과 2019년의 자료는 측기 내부 검보정 문제와 자외선 반응함수 차이로 제외하였다. 따라서 최종적으로 분석에 사용된 자료는 2015~2017년, 2020년으로 총 4년 기간이다.

2.2절에서 제시하게 될 복사전달모델은 구름 광학두께(Cloud Optical Depth; 이하 COD)와 구름의 광학적 특성 등을 통해서 구름의 영향을 고려하게 된다. 그러나 COD와 구름의 광학적 특성 정보 등에 대한 관측 자료 확보는 상당히 제한적이기 때문에, 관측된 TOC와 AOD 입력 외에 구름 정보에 대해서는 맑은 날씨 상황을 가정하였다. 따라서 본 연구에서 관측과 모델을 통한 산출 결과의 주요한 차이는 구름에 따른 영향으로 추정할 수 있다. 이를 분석하기 위해서, 기상청 기상 자료개방포털(www.data.go.kr)에서 제공하는 전운량 자료를 이용하여 관측과 모델 차이에 대한 구름의 효과로 살펴보았다. 전운량 자료는 관측 지점 구름의 양에 따라 0에서 10까지 분포하며, 시간별로 관측되기 때문에 본 연구에서는 12시, 13시 두 자료의 평균값을 해당 날의 정오 시간대 값으로 사용하였다. 본 연구는 서울 송월동의 전운량 자료를 사용하였고, 이 지점은 Brewer가 위치한 연세대학교와 인접해 있어 자료를 사용하는데 문제가 없다.

2.2 UVSPEC 복사 전달 모델

복사 전달 모델은 주어진 대기 상태에서 대기층을 통과해서 지상에 도달하는 복사량을 모의계산하는 데에 자주 활용된다. 본 연구에서는 Brewer 분광광도계에서 얻어진 관측 조건에 대한 자외선 복사량 정보의 모의 계산을 위해 libRadtran 소프트웨어 패키지 UVSPEC 모델을 통해 계산을 수행하였다(Mayer and Kylling, 2005; Emde et al., 2016). UVSPEC 복사 전달 모델은 다양한 대기 조건에 대한 지구 대기의 복사량을 각 파장에 대해 계산하며, 자외선 및 가시광선 영역에 대한 복사량을 모의하기 위한 기본적인 기체흡수선과 공기 입자에 의한 Rayleigh 산란 효과, 에어로졸 및 구름 입자에 의한 Mie 산란 효과를 위한 정보를 포함하고 있다. 본 연구에서는 연세대학교 관측 지점 정보(위도, 경도, 해발고도), DOY (Day Of Year), SZA (Solar Zenith Angle), AOD, TOC 자료를 입력 자료로 하여 복사량의 민감도와 모의 계산을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이, AOD와 TOC 값은 연세대학교 Brewer 분광광도계에서 관측한 시간별 자료의 값을 일 평균하여 사용하였고, 구름 정보에 대해서는 맑은 날씨 상태로 가정하였다. 즉, 지표에 도달하는 자외선 복사량 변화에 가장 큰 민감도를 나타내는 TOC 값이 적용된, 맑은 날씨의 이론적 모의 값으로 해석될 수 있다. 일반적으로 Brewer 관측 자료의 오차 제거는 AMF (Air Mass Factor)를 주로 활용하며, 추가적으로 표준편차 값이나 SZA의 사용이 권장된다(Fioletov et al., 2005; Kappinen et al., 2016). 본 연구에서는 Brewer 관측으로 얻은 AOD가 6 이상이거나 TOC가 200 DU (Dobson Unit) 이하인 값들을 관측 오차로 입력자료에서 제거하고 분석하였다.

2.3 SARS-CoV-2 바이러스 비활성화 시간 추정 방법

Figure 1은 Brewer 파장별 자외선 관측 자료와 UVSPEC 파장별 자외선 모의 자료를 이용해 SARS-CoV-2 바이러스를 90% 비활성화하는 복사량을 산출하고, 이 값들을 바이러스 비활성화에 필요한 시간으로 산출하는 흐름도를 나타낸 것이다. 2.2절에서 설명한 바와 같이, Brewer 분광광도계를 통해서는 실제 대기 상태에서의 바이러스 비활성화 시간 추정을, 복사

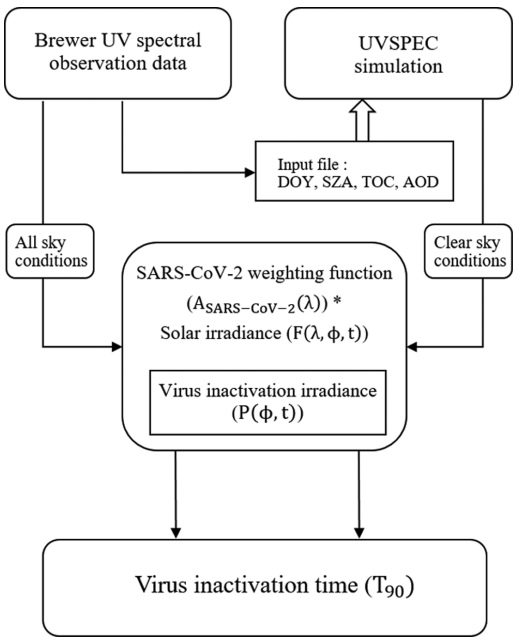

Fig. 1. Flow chart of inactivation time of SARS CoV-2 virus.

전달모델을 통해서는 가정된 맑은 날씨 상태에서의 추정 결과를 각각 보여준다. 바이러스 90% 비활성화에 필요한 복사량은 290~320 nm 범위의 파장별 자외선 복사량에 SARS-CoV-2 파장별 가중 함수를 곱하고, 적산하여 계산한다. 산출식은 아래와 같다.

$$P(\phi, t) = \int_{290}^{320} F(\lambda, \phi, t) A_{Covid}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

식(1)에서 $P(\phi, t)$는 SARS-CoV-2 90% 비활성화 복사량(W m^{-2})이며, λ는 파장, ϕ는 SZA, t는 시간이다. 또한, 290~320 nm 파장 범위의 복사량은 F(관측과 모의값), SARS-CoV-2 가중 함수는 A로 나타내었다. 가중함수 A는 가장 유효한 254 nm를 1로 두고, 적용되는 자외선 파장 범위에서 정규화하였다(Herman et al., 2021). 특정한 생리적 활동이 수행될 때, 빛의 서로 다른 파장별 에너지는 상대적인 효율을 보여주는데, 이것은 어떤 파장의 빛이 특정 화학반응에서 가장 효율적으로 사용되는지를 보여주는 작용스펙트럼으로 해석되며, 반응물의 종류에 따라 다양하게 나타날 수 있다(Stringham et al., 2003; Young et al., 2021).

바이러스의 비활성화 시간 추정에서 고려해야 하는 인자 중 하나는 비활성화율이다. 본 연구에서는 Herman et al. (2021)에서 제시한 SARS-CoV-2 바이러스의 90%를 비활성화하는 에너지 양인 D_{90}, 3.2 J m^{-2}를 적용하였다. 다른 선행연구에서는 SARS-CoV-2 바이러스의 63%를 비활성화하는 D_{63}이나 99%를 비활성화하는 D_{99}를 사용하여 비활성화 시간을 추정하기도 하였다(Nicastro et al., 2021). D_{90} (3.2 J m^{-2})을 현재 시점의 $P(\phi, t)$ (W m^{-2})로 나누고 시간 단위를 환산하면,

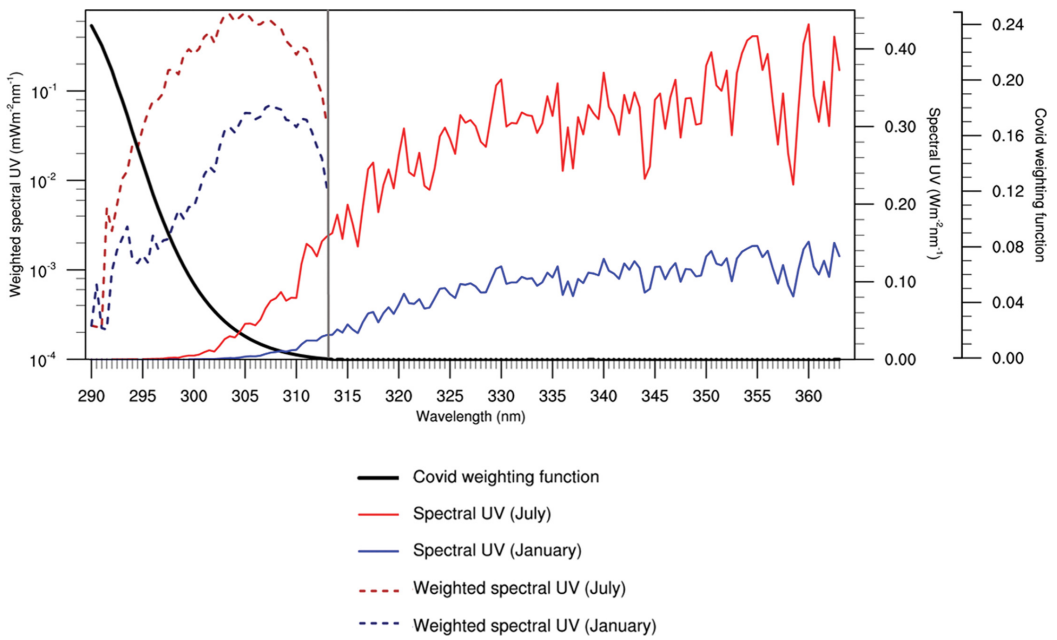

Fig. 2. Spectral irradiance of July 15th, January 15th in 2020 and SARS-CoV-2 weighting function.

SARS-CoV-2 바이러스를 90% 비활성화 시킬 수 있는 추정 시간 T_{90}(단위, minute)을 계산할 수 있다(식 2).

$$T_{90} = \frac{D_{90}}{60} / P(\phi, t) \quad (2)$$

위 산출 과정은 현재 시점의 $P(\phi, t)$ 복사량이 일정하게 유지되면서 기준 값(D_{90})에 도달한다는 전제가 있으나, Brewer 분광광도계 관측 스케줄 상 일정치 않은 파장 스캔 시간에 최적화된 방법론이다.

3. 결과 및 토의

Figure 2는 2020년 1월 15일과 7월 15일의 겨울철과 여름철을 대표하는 사례에 대해서 Brewer 분광광도계 파장별 자외선 복사량, SARS-CoV-2 가중 함수, 그리고 두 값을 곱한 가중된 파장별 자외선 복사량을 각각 나타낸 것이다. 검은색 실선이 SARS-CoV-2 가중 함수이고, 빨간색 실선이 7월, 파란색 실선이 1월의 파장별 자외선 복사량을 나타낸다. 또한, 각 복사량을 가중 함수에 곱한 값은 점선으로 나타내었다. SARS-CoV-2 가중 함수는 290 nm부터 감소하여 313 nm 이후에 0의 값을 나타내는데, 이것은 313 nm 이후 파장 범위에서는 바이러스 비활성화에 끼치는 영향이 없다는 것을 의미한다. 여름철에 해당되는 7월 값이 1월 값에 비해서 상당히 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 가중 함수가 적용된 이후에도 그 결과는 동일하다. 한편, 가중 함수는 290~313 nm까지 급격하게 감소하지만, 지표에 도달하는 파장별 자외선 복사량은 파장이 길어질수록 커지기 때문에 가중 함수가 적용된 복사량은 7월에 305.0 nm에서, 1월은 307.5 nm에서 최댓값을 보였다.

Figure 3은 전체 4년 기간(2015~2017년, 2020년) 정오 시간대(12~13시) 기준, (a) 관측 자료와 (b) 모의 자료에 대해 SARS-CoV-2 90% 비활성화 시간을 산

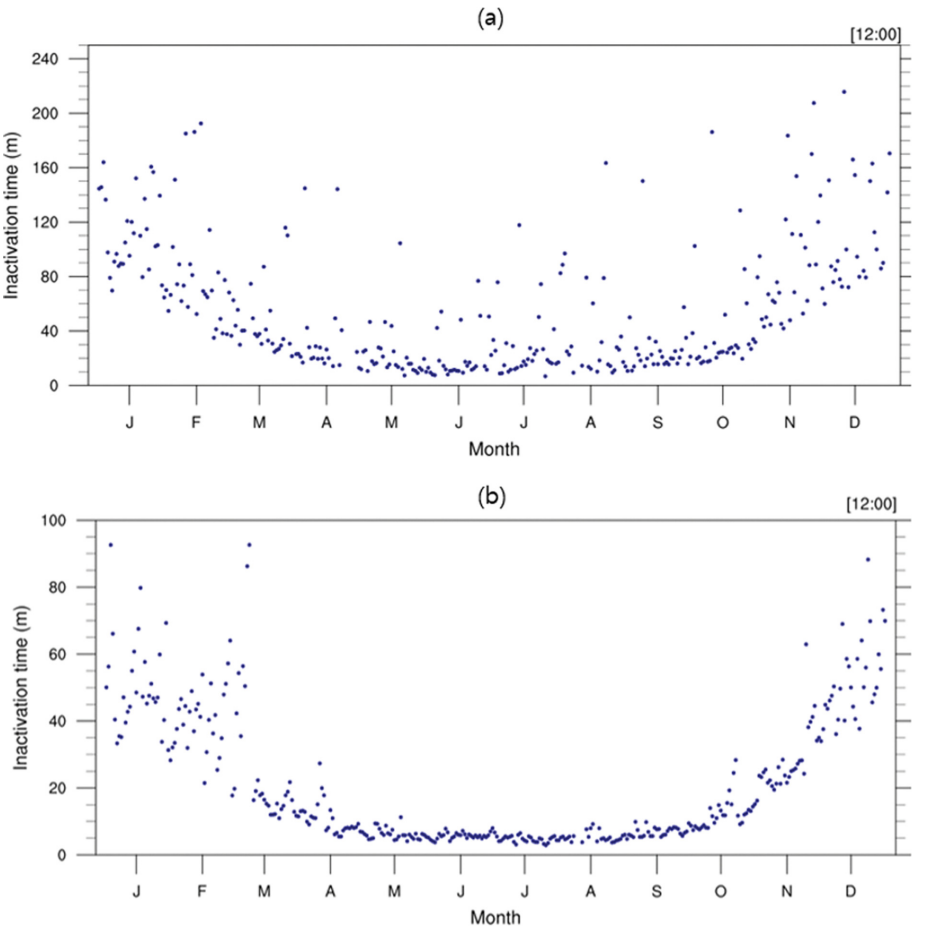

Fig. 3. Daily average of SARS-CoV-2 inactivation time at noon from (a) Brewer observation data and (b) UVSPEC simulation.

Table 1. Monthly median of SARS-CoV-2 inactivation time at noon from Brewer observation data and UVSPEC simulation (The numbers in parentheses are 25th and 75th percentile for each monthly data).

Month	Brewer (min)	UVSPEC (min)
Jan	**104.9** (89.4, 138.3)	**47.1** (40.4, 57.0)
Feb	**70.1** (57.7, 89.0)	**41.3** (33.5, 46.6)
Mar	**37.9** (30.6, 59.0)	**16.5** (13.3, 22.0)
Apr	**27.1** (19.9, 44.7)	**8.8** (7.5, 12.5)
May	**16.0** (12.0, 24.9)	**5.9** (4.9, 6.4)
Jun	**13.5** (10.9, 21.3)	**5.7** (5.1, 6.2)
Jul	**18.1** (14.5, 28.2)	**4.8** (4.1, 5.4)
Aug	**17.2** (10.7, 33.8)	**4.8** (3.8, 5.5)
Sep	**20.2** (15.7, 26.0)	**6.7** (5.7, 7.8)
Oct	**27.6** (22.2, 36.2)	**11.8** (8.8, 14.2)
Nov	**73.5** (54.8, 117.8)	**25.2** (22.5, 28.4)
Dec	**99.9** (84.5, 168.2)	**50.0** (44.0, 58.6)

출하고, 이를 평균하여 나타낸 것이다. Table 1은 Fig. 3의 결과를 월별 중앙값과 25%, 75% 백분위 수로 자세히 요약하였다. 바이러스 비활성화 시간은 계절별, 월별 자외선 복사량 크기에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었다(Fig. 3). 지표 도달 일사량과 자외선 복사량이 큰 여름철에 관측과 모델 모두 바이러스를 비활성화시키는 시간이 가장 짧았고, 이와 반대로 겨울철에는 바이러스를 비활성화 시키는데 긴 시간이 걸리는 것으로 나타났다. 또한, 실제 대기 상태가 반영된 관측 자료로부터 추정된 시간이 맑은 날씨를 가정한 모의 자료로부터의 결과보다 약 1.7~3.8배 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Table 1). 특히, 7월과 8월에 그 차이가 최대로 나타나며, 일사량이 강한 여름철에 운량에 따른 영향이 더 강조되는 것으로 추정할 수 있다. SARS-CoV-2 바이러스가 자외선에 노출되어 90% 비활성화되는데 소요되는 시간을 자세히 살펴보면, 관측 자료에서는 6월에 13.5분으로 가장 짧게 나타났고, 1월에 104.9분으로 가장 길게 나타났다. 모의 자료에서는 7월과 8월에 4.8분으로 가장 짧게 나타났으며, 12월에 50.0분으로 가장 길게 추정되었다. 특히, 본 연구 결과가 정오 시간대 자외선 복사량이 유지되는 경우를 가정하였기 때문에, 겨울철에 나타난 비활성화 시간은 현실적으로 도달하기 어려운 수준이다. 그러나 여름철(6~8월)의 경우는 최소 4.8분에서 최대 18.1분으로 지표에 도달하는 자외선 복사량으로 자연적인 바이러스 비활성화가 가능한 수준으로 판단된다.

Herman et al. (2021)에서는 북위 30°~40°의 범위에 속하는 중위도 국가들의 SARS-CoV-2 바이러스에 대한 90% 비활성화 시간이 북위 40°~53°의 중위도 국가들의 비활성화 시간보다 짧게 나타났다고 밝혔다. 그리고 남위 27.5°, 34.6°, 39.9°에 위치하는 특정 국가에서는 여름에 50분 이내에 비활성화되고, 겨울에는 비활성화 시간이 너무 길어 효과가 없다고 제시하였다. 북위 30°~40°의 국가들은 여름에는 50분 이내, 겨울에는 200분 이내에 비활성화에 도달하였고, 북위 40°~53°의 국가들은 여름에는 80분 이내, 겨울에는 250분 이내의 시간에 바이러스가 비활성화되었다. 이는 상대적으로 저위도에 속하는 국가일수록 지표에 도달하는 일사량과 자외선 복사량이 크기 때문에 비활성화에 도달하는 시간이 짧게 나타남을 의미한다. Nicastro et al. (2021)에서는 SARS-CoV-2 비활성화 시간을 COVID-19 치사 시간으로 정의하고, 정오시간 기준 위도별 COVID-19 치사 시간을 산출하였다. 적도 근처의 저위도 국가들에서는(북위 20°~남위 20°) COVID-19을 63% 치사시키는데 계절 차이 없이 1년 내내 2분 미만의 짧은 시간으로 나타났다. 이 값은 위도가 20°~60°인 중위도 지역에서 여름철에만 해당되는 것이며, 일반적으로 바이러스 치사 시간은 가을철부터 겨울철까지 여름철에 비해 최대 20배까지 꾸준히 증가하다가 봄철부터 다시 감소한다는 결과를 제시하였다. 또한, 남반구와 북반구 사이에는 약한 비대칭이 나타나는데 이는 남반구의 여름이 북반구에 비해 태양으로부터 지구까지의 거리가 더 가까워 더 많은 일사량을 받기 때문으로 설명하였다. 본 연구에서 분석된 지역인 서울(북위 37.5°)에서 SARS-CoV-2 바이러스가 여름철에 평균 16.2분, 겨울철에 평균 91.6분이 노출되면 바이러스가 90% 비활성화된다는 관측 자료에 기반한 결과는 앞서 설명한 선행 연구 결과들과 비슷한 수준이다.

Figure 4는 관측 자료(Figs. a, c)와 모델 모의 값(Figs. b, d)을 분석해서 각 계절 평균 시간별 SARS-CoV-2 자외선 복사량과 이를 이용한 바이러스 90% 비활성화 시간의 추정 값을 나타내었다. 비활성화 시간의 계산은 각 해당 시간대의 복사량 기준으로 계산하였으며, 유의미한 값을 나타낼 수 있는 오전 9시부터 오후 4시까지의 값으로 제한하였다. 관측과 모델 모두 하루 중 시간별 자외선 복사량 값은 여름철에 가장 높고, 겨울철에 가장 낮으며, 봄철이 가을철보다는 다소 높은 값을 나타내었다. 하루 중 시간대별로는 관측과 모델 모두 12~13시 정오 시간대에 일 최댓값을 보였다. Brewer 관측 자료에서는 여름철 정오 시간대에 약 4.0 mW m^{-2}, 겨울철에는 약 0.6 mW m^{-2}의 복사량을, UVSPEC 모의 값 자료에서는 여름철 정오 시간에 약 8.3 mW m^{-2}, 겨울철에는 약 1.0 mW m^{-2}의 복사량이 나타났다. SARS-CoV-2 자외선 복사량과 반비례하는 비활성화 시간은 관측과 모의 자료 모두에서 정오 시간 기준 여름철에 13.3분, 6.4분으로 가장 짧았고, 겨울철에 88.0분, 54.9분으로 가장 길었다.

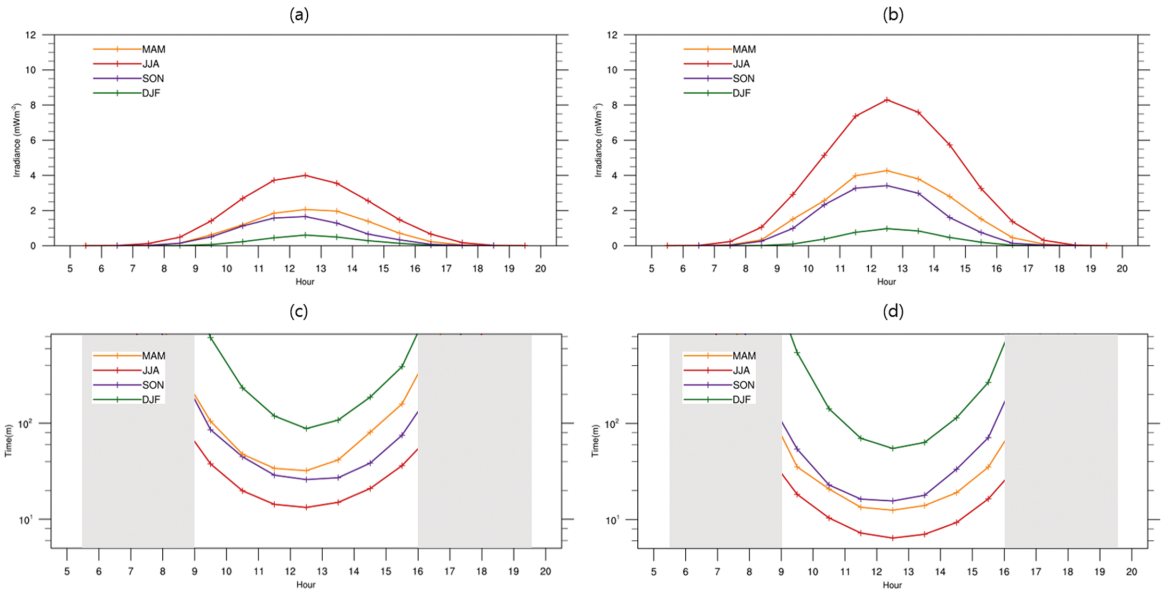

Fig. 4. Diurnal average of SARS-CoV-2 inactivation irradiance and time from (a), (c) Brewer observation data and (b), (d) UVSPEC simulation.

즉, 여름철에 정오 시간대에서는 6.4~13.3분 동안 자외선에 노출되면 SARS-CoV-2를 효과적으로 90% 비활성화할 수 있다는 의미이다. 하지만 겨울철이 되며 정오 시간대에서도 자외선 복사량이 크게 줄어들기 때문에 바이러스의 비활성화 효과는 무의미한 것으로 판단된다. 오전 10~11시의 비활성화 시간은 관측 자료에서 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철에 각각 44.8분, 19.8분, 47.6분, 234.0분, 모델 자료에서는 20.8분, 10.4분, 22.9분, 142.0분으로 나타났다. 오후 2~3시에는 관측 자료에서 38.4분, 20.9분, 80.6분, 187.0분, 모델 자료에서 19.0분, 9.3분, 33.3분, 114.0분이 비활성화에 소요되었다. 정오 시간대의 결과와 마찬가지로 여름철에는 SARS-CoV-2 바이러스가 자외선 복사량에 의해 효과적으로 비활성화될 수 있고, 봄과 가을철에는 어느 정도의 가능성을, 겨울철에는 그 영향이 미약했다.

앞서 언급한 바와 같이, 본 연구의 모델 모의 자료는 구름에 대한 영향을 반영하지 못한다. 즉, 관측과 모델로 산출한 바이러스 비활성화 시간의 차이는 해당일의 운량에 대한 효과를 나타내고 있다고 판단되기 때문에, 두 값의 비율을 전운량과 비교하여 산점도로 나타내고, 전운량에 대한 fit curve 식을 도출하였다(Fig. 5). 전운량이 0~2 범위로 추정되는 맑은 날씨에서는 관측과 모델의 비율이 1(관측과 모델 값 일치)~1.5 사이의 값에 대부분 분포하는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로는 전운량이 증가함에 따라서 관측과 모델의 차이가 점점 증가하였으나, 전운량 6을 기준으로 급격한 변화가 나타났다. 전운량이 8~10 범위인 완전히 흐린 날씨일 때는 최대 10배에 가까운 차이를 나타내기도 하였다. 그러나, 맑은 날씨 상태를 가정한 모델 모의 결과임에도 불구하고, 관측과 모델의 차이를 운량만으로 설명하기에는 제한적인 분포를 보이기도 한다. 첫 번째는 전운량 관측 자료의 오차, 두 번째는 Brewer 분광광도계로 관측한 TOC와 AOD 관측 오차가 이유일 수 있다. 즉, 모든 날씨 상황에서 관측된 결과에는 구름이 존재하는 경우가 포함되기 때문에 맑은 날씨와 비교해서 오차가 발생하며, 이에 따른 모의 값의 오차도 고려할 수 있다(Zhao et al., 2019). 특히, 두 번째 원인은 복사전달 모델로부터 자외선 복사를 모의할 때 TOC 민감도가 상당히 크기 때문에 작은 오차에서도 290~310 nm 영역의 자외선 복사에 큰 영향을 줄 수 있다. 그럼에도 전운량 그룹별(0~2, 2~4, 4~6, 6~8, 8~10)로 평균된 비율 값을 가지고 fit curve 식을 나타내었다. 어느 특정 지역과 시간에 대한 복사전달모델 모의 값을 구하고, 그때의 전운량 자료를 적용하게 되면, 실제 대기 상태에서 SARS-CoV-2 바이러스의 90% 비활성화 시간을 추정할 수 있다. 실제 관측된 파장별 자외선 복사량 자료를 이용하는 것이 가장 합리적인 방법이 될 수 있지만, 측기를 구비하고 관측소를 운영하는 여러 고려 사항을 감안하면 대안으로의 가치는 클 것으로 판단된다.

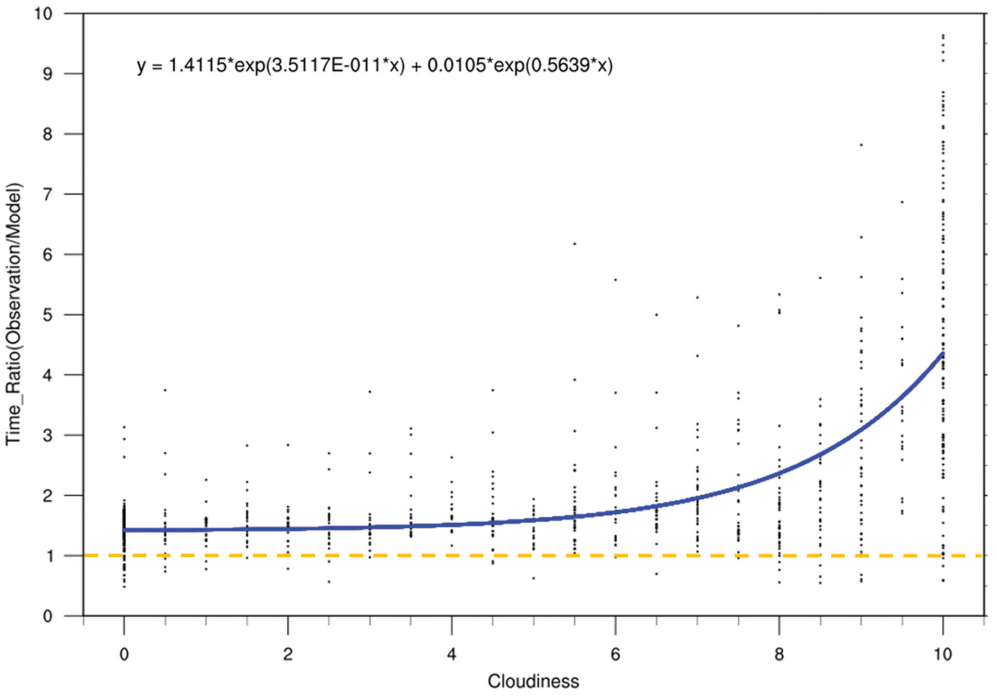

Fig. 5. Scatter plot of ratio of SARS-CoV-2 inactivation time between observation and model to the cloudiness.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지표 파장별 지표 자외선 복사량을 이용해 SARS-CoV-2 바이러스의 비활성화 시간을 추정하였다. 연세대학교 Brewer 분광광도계에서 관측되고, UVSPEC 모델을 통해 모의된 각각의 파장별 자외선 자료에 SARS-CoV-2 가중 함수를 적용함으로써, 서울지역에서 바이러스의 90% 비활성화 소요시간을 산출하였다. 12~13시 정오시간대 자외선 복사량 기준, 관측 자료에서는 6월에 13.5분으로 가장 짧게 나타났고, 1월에는 104.9분으로 가장 길게 나타났다. 맑은 날씨 상태를 가정한 모델 모의 자료는 8월에 4.8분으로 가장 짧은, 12월에는 50.0분으로 가장 긴 시간이 비활성화에 소요되었다.

계절에 따른 시간대별 SARS-CoV-2 자외선 복사량과 바이러스 90% 비활성화 소요시간을 확인한 결과, 복사량은 관측과 모델 모두 여름에 가장 높고 봄, 가을이 뒤따르며, 겨울에 가장 낮게 나타났다. 비활성화 시간은 관측 자료(모든 날씨)에서 여름철에 13.3분으로 가장 짧고, 겨울철에는 88.0분으로 가장 길게 나타났고, 모의 자료(맑은 날씨)에서는 여름철에 6.4분, 겨울철에 54.9분으로 나타났다. 유의미한 값을 나타낼 수 있는 오전 10시부터 오후 2시까지를 살펴보면, 봄철, 여름철, 가을철에는 SARS-CoV-2가 자외선에 60분 이내로 노출되었을 때 90% 이상 비활성화됨을 확인하였다. 그러나 겨울철에는 자외선 노출에 따른 비활성화 시간이 상당히 길어져 무의미한 것으로 나타났다.

본 연구에서 관측과 모의 자료의 가장 큰 차이는 운량에 대한 영향에서 나타난다. 따라서 관측된 운량에 대해 관측과 모델로 산출한 비활성화 시간의 비율을 확인해 본 결과 전운량 값이 커질수록 관측과 모델의 일치성이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 전운량이 8~10 범위인 완전히 흐린 날씨의 경우, 최대 10배의 차이를 나타내었다. 맑은 날씨를 가정한 모의 결과임에도 두 차이를 운량으로만 보기에는 제한적이었으나, 특정 지역과 시간에 대해서 복사전달 모델로 모의된 파장별 자외선 값과 전운량 자료를 활용하게 되면 실제 대기 상태에서 SARS-CoV-2 바이러스의 90% 비활성화 시간을 추정할 것으로 판단된다.

본 연구는 서울지역에서 지표에 도달하는 파장별 자외선 복사량 관측과 모델 결과를 이용하여 COVID-19 바이러스인 SARS-CoV-2의 90% 비활성화 시간을 처음으로 추정한 것으로 그 의미가 크다. 그러나 비활성화에 필요한 자외선 복사량을 일정 시간대의 값으로 가정했기 때문에 실시간으로 변화하는 복사량의 적산 값을 반영하지 못한 한계가 존재한다. 이를 보완하기 위해서 일정한 시간 간격(예, 5분, 10분)의 자외선 자료 활용이 필요하며, 광대역 복사 자료를 이

용한 후속 연구를 계획하고 있다. 무엇보다, COVID-19과 같은 전염병의 확산은 여러 변수들의 다양하고 복잡한 상호작용과 관계되기 때문에 자외선에 의한 바이러스의 비활성화, 특히 위도/계절별 차이는 이 중 하나의 변수로 고려될 수 있다. 최근 다양하게 제시되고 있는 확진자 발생 예측 모델의 추가적인 변수로 자외선에 의한 바이러스의 비활성화가 적용된다면 이전보다 유의미한 결과를 나타낼 수 있을 것으로 예상된다.

REFERENCES

Armstrong, B. K., and A. Kricker, 2001: The epidemiology of UV induced skin cancer. *J. Photochem. photobiol. B.*, **63**, 8-18.

Diffey, B. L., 1991: Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Phys. Med. Biol.*, **36**, 299.

El-Ghorr, A. A., and M. Norval, 1996: The effect of UV-B irradiation on secondary epidermal infection of mice with herpes simplex virus type 1. *J. Gen. Virol.*, **77**, 485-491.

Emde, C., and Coauthors, 2016: The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geosci. Model Dev.*, **9**, 1647-1672, doi:10.5194/gmd-9-1647-2016.

Fioletov, V. E., J. B. Kerr, C. T. McElroy, D. I. Wardle, V. Savastiouk, and T. S. Grajnar, 2005: The Brewer reference triad. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20805.

Galkin, O. N., and I. P. Terenetskaya, 1999: 'Vitamin D' biodosimeter: basic characteristics and potential applications. *J. Photoch. Photobio. B.*, **53**, 12-19.

Gröbner, J., and C. Meleti, 2004: Aerosol optical depth in the UVB and visible wavelength range from Brewer spectrophotometer direct irradiance measurements: 1991~2002. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **109**, D09202.

Harm, W., 1980: *Biological effects of ultraviolet radiation*. Cambridge University Press, 229 pp.

Herman, J., B. Biegel, and L. Huang, 2021: Inactivation times from 290 to 315 nm UVB in sunlight for SARS coronaviruses CoV and CoV-2 using OMI satellite data for the sunlit Earth. *Air Qual. Atmos. Health*, **14**, 217-233, doi:10.1007/s11869-020-00927-2.

Holick, M. F., 2007: Vitamin D deficiency. *N. Engl. J. Med.*, **357**, 266-281, doi:10.1056/NEJMra070553.

Karppinen, T., K. Lakkala, J. M. Karhu, P. Heikkinen, R. Kivi, and E. Kyrö, 2016: Brewer spectrometer total ozone column measurements in Sodankylä. *Geosci. Instrum., Method. Data Syst.*, **5**, 229-239, doi:10.5194/gi-5-229-2016.

Kerr, J. B., and C. T. McElroy, 1993: Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science*, **262**, 1032-1034.

Kim, J., H.-K. Cho, J. Mok, H. D. Yoo, and N. Cho, 2013: Effects of ozone and aerosol on surface UV radiation variability. *J. Photoch. Photobio. B.*, **119**, 46-51, doi:10.1016/j.jphotobiol.2012.11.007.

Kim, J., J. Kim, H.-K. Cho, J. Herman, S. S. Park, H. K. Lim, J.-H. Kim, K. Miyagawa, and Y. G. Lee, 2017: Intercomparison of total column ozone data from the Pandora spectrophotometer with Dobson, Brewer, and OMI measurements over Seoul, Korea. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 3661-3676, doi:10.5194/amt-10-3661-2017.

Kim, J. E., Y. J. Kim, and Z. He, 2006: Temporal variation and measurement uncertainty of UV aerosol optical depth measured from April 2002 to July 2004 at Gwangju, Korea. *Atmos. Res.*, **81**, 111-123.

Kim, S., S.-J. Park, H. Lee, D. H. Ahn, Y. Jung, T. Choi, B. Y. Lee, S.-J. Kim, and J.-H. Koo, 2021: Evaluation of total ozone column from multiple satellite measurements in the Antarctic using the Brewer spectrophotometer. *Remote Sens.*, **13**, 1594, doi:10.3390/rs13081594.

Kim, W., J. Kim, S. S. Park, and H.-K. Cho, 2014: UV sensitivity to changes in ozone, aerosols, and clouds in Seoul, South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 310-322, doi:10.1175/JAMC-D-13-052.1.

Lee, J. E., and G. P. Ko, 2013: Norovirus and MS2 inactivation kinetics of UV-A and UV-B with and without TiO_2. *Water Res.*, **47**, 5607-5613, doi:10.1016/jwatres.2013.06.035.

Lin, Y., J. L. Ubels, M. P. Schotanus, Z. Yin, V. Pintea, B. D. Hammock, and M. A. Watsky, 2012: Enhancement of vitamin D metabolites in the eye following vitamin D3 supplementation and UV-B irradiation. *Curr. Eye Res.*, **37**, 871-878, doi:10.3109/02713683.2012.688235.

López-Solano, J., and Coauthors, 2018: Aerosol optical depth in the European Brewer Network. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 3885-3902, doi:10.5194/acp-18-3885-2018.

Lucas, R. M., M. Norval, R. E. Neale, A. R. Young, F. R. de Gruijl, Y. Takizawa, and J. C. van der Leun, 2015: The consequences for human health of stratospheric ozone depletion in association with other environmental factors. *Photochem. Photobiol. Sci.*, **14**, 53-87, doi:10.1039/c4pp90033b.

Matsumura, Y., and H. N. Ananthaswamy, 2004: Toxic effects of ultraviolet radiation on the skin. *Toxicol.*

Appl. Pharmacol., **195**, 298-308.

Mayer, B., and A. Kylling, 2005: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1855-1877.

Nicastro, F., and Coauthors, 2021: Solar UV-B/A radiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2. *Sci. Rep.*, **11**, 14805, doi:10.1038/s41598-021-94417-9.

Nims, R., and M. Plavsic, 2013: Inactivation of caliciviruses. *Pharmaceuticals*, **6**, 358-392, doi:10.3390/ph6030358.

Norval, M., L. O. Björn, and F. R. de Gruijl, 2010: Is the action spectrum for the UV-induced production of previtamin D3 in human skin correct?. *Photoch. Photobiol. Sci.*, **9**, 11-17, doi:10.1039/B9PP00012G.

Park, S. S., Y. G. Lee, and J. H. Kim, 2015: Impact of UV-A radiation on erythemal UV and UV-index estimation over Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **32**, 1639-1646, doi:10.1007/s00376-015-4231-7.

_____, M. Kim, H. Lee, H. Lee, S.-M. Kim, and Y. G. Lee, 2017: Estimating cloud and aerosol UV modification factors based on spectral measurement from the Brewer spectrophotometer. *Atmosphere*, **8**, 109, doi:10.3390/atmos8060109.

_____, Y. G. Lee, M. Kim, J. Kim, J.-H. Koo, C. K. Kim, J. Um, and J. Yoon, 2019: Simulation of threshold UV exposure time for vitamin D synthesis in South Korea. *Adv. Meteorol.*, **2019**, 4328151, doi:10.1155/2019/4328151.

Pecson, B. M., L. V. Martin, and T. Kohn, 2009: Quantitative PCR for determining the infectivity of bacteriophage MS2 upon inactivation by heat, UV-B radiation, and singlet oxygen: advantages and limitations of an enzymatic treatment to reduce false-positive results. *Appl. Environ. Microb.*, **75**, 5544-5554.

Ratnesar-Shumate, S., and Coauthors, 2020: Simulated sunlight rapidly inactivates SARS-CoV-2 on surfaces. *J. Infect. Dis.*, **222**, 214-222, doi:10.1093/infdis/jiaa274.

Schmid, F.-X., 2001: Biological macromolecules: UV-visible spectrophotometry. *eLS*, 1-4, doi:10.1038/npg.els.0003142.

Stringham, J. M., K. Fuld, and A. J. Wenzel, 2003: Action spectrum for photophobia. *J. Opt. Soc. Am. A*, **20**, 1852-1858.

Watson, M., D. M. Holman, and M. Maguire-Eisen, 2016: Ultraviolet radiation exposure and its impact on skin cancer risk. *Semin. Oncol. Nurs.*, **32**, 241-254, doi:10.1016/j.soncn.2016.05.005.

WHO, 2008: Vitamin D and Cancer. World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, IARC Working Group Report 5, 210 pp.

Young, A. R., 2006: Acute effects of UVR on human eyes and skin. *Prog. Biophys. Mol. Bio*., **92**, 80-85.

Young, A. R., K. A. Morgan, G. I. Harrison, K. P. Lawrence, B. Petersen, H. C. Wulf, and P. A. Philipsen, 2021: A revised action spectrum for vitamin D synthesis by suberythemal UV radiation exposure in humans in vivo. *P. Natl. A. Sci.*, **118**, e2015867118, doi:10.1073/pnas.2015867118.

Zhao, X., K. Bognar, V. Fioletov, A. Pazmino, F. Goutail, L. Millán, G. Manney, C. Adams, and K. Strong, 2019: Assessing the impact of clouds on ground-based UV-visible total column ozone measurements in the high Arctic. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 2463-2483, doi:10.5194/amt-12-2463-2019.