

ORIGINAL ARTICLE

2022년 5월 31일 발생한 밀양산불이 인근 도시 지역의 미세먼지 농도에 미치는 영향

전병일*

신라대학교 항공교통관리학과

Effect of May 31, 2022 Miryang Forest Fire on Fine Particle Concentration in Nearby Urban Areas

Byung-Il Jeon*

Department of Air Traffic & Operation Management, Silla University, Busan 46958, Korea

Abstracts

This study investigated the effect of May 31, 2022 Miryang wildfire on fine particle concentrations in Busan and Gimhae, which are neighboring urban areas. In addition, fine particle characteristics and air pollution concentrations were investigated in Miryang, where haze occurred. The Miryang city wildfire that occurred on May 31, 2022, at 0925 LST, was driven by strong north winds and increased fine particle concentrations in Dongsangdong and Jangyoodong, Gimhae City, which are approximately 35 km to the southeast and south, respectively, of the wildfire occurrence site. Furthermore, the fine particle concentration in Myeongjidong, which is approximately 50 km south-southeast of the wildfire site, exhibited a temporary increase at 1400 LST owing to the effects of wildfire smoke. On the morning of June 1, the day after the fire, the Miryang area had very bad visibility because of the smoke from the fire. Therefore the PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Naeildong, 3 km south of the wildfire site, were 276 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 222 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, at 1200 LST. In addition, the gases O₃, CO, and SO₂ showed high concentrations at the time of haze generation. This study provides insights into policy making in response to the rapid increase in fine dust when wildfire occurs near cities.

Key words : Wildfire, Fine particle concentration, Urban area, Visibility

1. 서론

산불은 다량의 이산화탄소, 블랙 카본, 휘발성 및 반 휘발성 유기물, 질소 산화물 그리고 입자상 물질을 대기 중으로 방출한다(Reid et al., 2005). 또한 산불은 국지 및 광역 그리고 지구 규모의 복사와 기후에 영향을 미치며, 산불의 강도와 규모는 화재지역의 연료, 연소 온도 및 기상 조건에 따라 달라진다(Reisen et al., 2015).

산불에 의해 발생하는 오염물질은 지역 주민의 건강에 악영향을 미칠 수 있으며, 공기가 수송될 때 다른 오염 물질이 2차적으로 형성되어 산불 현장에서 멀리 떨어진 지역의 사람에게도 유해한 영향을 미칠 수 있다(Bowman and Johnston, 2005). 특히 대형 산불은 연기, 그을음, 재를 1,000 km 이상 멀리까지 수송하고 성층권에 진입하여 지구 전체 지역에 영향을 미칠 수 있다(Wotawa and Trainer, 2000).

Received 31 October, 2022; Revised 11 January, 2023;

Accepted 12 January, 2023

*Corresponding author : Byung-Il Jeon, Department of Air Traffic & Operation Management, Silla University, Busan 46958, Korea
Phone : +82-51-999-5056
E-mail : bijeon@silla.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1. Location of fire and air quality observation sites.

Ahn and Choi(2021)은 2015년부터 2019년까지 5년간 강원도 시·군을 대상으로 산불 발생일을 중심으로 산불과 대기질 항목 간의 상관성을 분석한 결과, 산불 직전 PM_{10} 농도는 평균 $48.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나, 산불 발생 기간에는 $76.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 상승하였고, $PM_{2.5}$ 도 산불 직전 $23.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $31.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하였다. 또한, 산불강도가 클수록 PM_{10} 농도가 더 높아지는 것으로 나타났으며, 미세먼지 외에 SO_2 와 O_3 등의 대기질 수치도 증가시켰다. Lee et al.(2004)은 2003년 5월에 발생한 러시아 지역 대규모 산불로 인한 스모크 에어로졸이 한반도를 뒤덮고 있는 모습을 인공위성자료로 뚜렷이 관측 및 분석하였고, 지상에서 관측된 에어로졸 광학두께 분석에서도 산불의 영향을 확인하였다. 그리고 지표면에서 PM_{10} 과 CO 농도가 에어로졸의 영향이 있던 날에 특별히 높게 나타났다. Arriagada et al.(2020)은 2019년 9월 호주 퀸즐랜드와 뉴사우스웨일스에서 발생한 산불로 인해 $PM_{2.5}$ 농도가 $98.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가하였고, 이 지역의 평균농도($6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 14 배에 해당한다고 하였다. Xie et al.(2020)은 2017~2018년 미국 서부지역의 일평균 $PM_{2.5}$ 농도가 미국 환경기준치($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하였는데, 이는 미세먼지의 90%가 여름철 산불에 의한 것으로 추정하였다. Jin et al.(2017)은 2000년부터 2010년까지 중국 북건성에서

산불로 인한 $PM_{2.5}$ 배출량이 증가하는 추세를 보였으며, 산불로 인한 대기오염물질이 지역 대기질에 미치는 영향은 해마다 증가하였다.

2017년 6월 말, 유럽 남서부 Doñana 자연공원에서 발생한 산불이 8시간 만에 El Arenosillo 전망대에 도달하여 CO , O_3 , NO_2 , SO_2 , PM_{10} 등이 엄청난 농도를 나타내었고, 이 화재는 지중해 연안 근처의 Seville와 Cadiz 대도시 지역에 영향을 미쳤다(Adame et al., 2018). 포르투갈 중부 지역에서 발생한 2017년 대형 및 초대형 화재로 인해 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도는 유럽 국가 환경기준을 훨씬 초과(PM_{10} 는 $704 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 는 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$)했으며, 2017년 산불로 112명이 사망했고, 산불 노출로 인해 인구 10만 명당 총 474건의 심혈관계 질환 입원, 3,524건의 천식 환자가 발생하였다(Oliveira et al., 2020). 2002년 7월 캐나다 퀘벡에서 250건 이상의 화재에 의해 발생한 $PM_{2.5}$ 농도의 급격한 증가는 수 천 킬로미터 떨어진 미국 북동부 및 중부 대서양 주 11개 카운티의 노인 인구의 건강에 위협을 가해서 호흡기 및 심혈관 진단을 위한 입원율이 각각 49.6%와 64.9% 증가하였다(Le et al., 2014). 또한 2012년 여름 시베리아에서 발생한 대규모 산불에 의한 연기는 400~800 km 떨어진 도시, 교외 및 배경 지역의 에어로졸에 영향을 미쳤고 PM_{10} , 유기물, 2차유기물, 원소탄소 농도가 높게



Fig. 2. A photo taken at the time of fire(left) and Chollian 2A visible image taken by the Korea Meteorological Administration in the afternoon of May 31, 2022 in the Gyeongnam area, including the Miryang area(right).

나타났으며 이온성분인 HCOO^- , K^+ , NO_3^- 및 Cl^- 의 증가도 관측되었다(Smolyakov et al., 2014).

산불은 생태적 측면, 경제적 측면, 사회적 측면에서 영향을 미친다. 생태적인 측면으로 탈산림화, 생물 다양성 감소, 야생동물 서식지 파괴, 토양 영양물질 소실, 홍수피해 증가, 국지기상의 변화, 산성비와 대기오염 증가, 이산화탄소 배출량 증가로 기후변화 초래를 들 수 있고, 경제적 측면으로 목재, 가축, 임산물 소득 손실, 산림의 환경기능 손실, 국립공원의 파괴, 식품생산과 물공급에 의한 비용증가, 산업교란, 수송교란으로 인한 경제적 손실을 들 수 있으며, 사회적인 측면으로 관광객 감소와 산업의 교란 그리고 대기 중 연무농도에 따라 피부 및 호흡기 계통의 영향을 들 수 있다(KFS, 2022a).

본 연구에서는 2022년 5월 31일 밀양시 부북면 춘화리에서 발생한 산불이 기류의 방향에 따라 인근 도시 지역인 부산과 김해의 미세먼지 농도에 미치는 영향과, 또한 화재 지역에서 발생한 연무 현상이 밀양 지역의 미세먼지와 대기오염농도에 어떤 영향을 미쳤는지를 체계적으로 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 기상자료는 화재 발생 지역인 밀

양기상관측소에서 측정된 일기상통계표와 AWS (Automatic Weather Station) 측정 그래프 그리고 일본 기상청에서 발행한 인쇄 지상일기도를 이용하였다. 화재 발생 시 공기궤를 추적하기 위해 미국의 해양기상청(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 forward trajectory를 사용하였다. Forward trajectory는 NOAA에 의해 개발된 HYSPLIT-4 (Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory) 모형을 사용하였다(Draxler and Rolph, 2013). 공기궤의 출발지점은 화재 발생 지점으로서 밀양시 부북면 춘화리($35^{\circ}50'N$, $128^{\circ}75'E$)로 하였고, 궤적의 모사 시간을 24시간(6시간 간격)으로 하고, 공기궤의 고도는 공기궤의 상·하층 고도의 이동을 보기 위해 500 m, 1,000 m, 1,500 m로 하였다.

대기질 자료는 밀양 산불 발생 시 인근 도시지역의 미세먼지 특성을 고찰하기 위해 부산시(명지동, 부산신항)와 김해시(동상동, 장유동)의 시간별 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 농도자료를 사용하였다. 그리고 밀양 산불 발생(5월 31일) 다음날 공기 정체에 의한 연무 발생이 밀양시에 어떠한 영향을 미쳤는지를 조사하기 위해 밀양시 내일동에서 측정된 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , O_3 , CO , NO_2 농도 자료를 이용하였다. Fig. 1은 산불의 발화지점과 김해시(동상동, 장유동)와 부산시(명지동, 부산신항) 그리고

Table 1. Rainfall and relative humidity of springtime(2012~2022) in Miryang(Values in parentheses represent the 11 year average)

	Rainfall(mm)			Relative humidity(%)
	March	April	May	May
2012	99.7	160.5	46.3	60.7
2013	69.4	72.4	134.4	60.5
2014	115.9	75.0	57.8	54.2
2015	55.1	125.0	72.9	58.7
2016	93.3	174.6	109.5	60.3
2017	31.9	89.4	37.1	59.3
2018	122.6	103.9	93.5	66.9
2019	40.5	76.4	48.6	54.6
2020	36.1	44.4	50.3	64.1
2021	134.3	66.7	107.9	64.2
2022	58.7(77.7)	59.6(98.8)	3.3(75.8)	47.9(60.4)

밀양시 내일동을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 밀양 산불의 개관과 특성

밀양 산불은 2022년 5월 31일 09시 25분경 밀양시 부북면 춘화리 옥교산 서쪽 해발 150 m에서 발생한 뒤 강풍에 의해 급속도로 확산되었다. 산림청은 바로 산불 대응 3단계와 국가위기경보 심각단계를 발령하고 헬기 44대와 1,606명의 인력을 투입해 진화에 나섰지만 건조주의보가 내려질 정도로 삼림이 매마른 데다 꺼졌던 불씨가 강풍에 의해 되살아나면서 진화를 하는 것이 어려웠다. 다음날인 6월 1일 오전 5시 5분 일출과 동시에 41대의 헬기로 진화를 나섰으나, 오전 내내 강한 연무가 발생하여 헬기의 투입이 11시 30분에야 가능했다. 오후 5시 진화율은 58%, 산불영향구역은 392 ha, 잔여 화선 길이는 4.2 km이었다. 화재 발생 셋째날인 6월 2일 오전 5시 10분 일출과 동시에 53대의 헬기를 동원해 공중 진화를 하였고, 군병력 552명 등 진화 인력 2,500명을 17개 구역으로 나눠서 공중과 지상에서 동시에 입체적으로 진화를 시도하였다. 이 날은 어제와 달리 연무가 심하지 않아 진화에 어려움이 없었고 오후 6시 30분 진화율은 81%, 산불영향구역은 727 ha이었다. 넷째 날인 6월 3일 오전 10시부터 주불이 진화되었고, 6월 5일 오후 3시 5분경에야 완전히 꺼졌고, 산림당

국이 추정한 산불영향구역은 763 ha로 축구장(7,140 m²) 1,000여개 면적에 이르렀다(KFS, 2022b).

Fig. 2의 왼쪽 사진은 화재 발생 지점인 밀양시 부북면 춘화리 야산에서 산불이 발생할 당시의 모습이다. 주불의 오른쪽에 군데군데 연기가 피어나는 것은 상공으로 올라간 불씨가 바람에 의해 날아가서 불이 붙었기 때문이다. 오른쪽 사진은 기상청이 이날 오후 밀양 지역을 포함한 경남 일대를 찍은 천리안2A 가시영상으로 이날 오전 9시 40분부터 낮 12시 40분까지의 약 180분간 2분 간격으로 찍은 위성사진을 합성한 영상이다. 이 영상에 의하면 경남 밀양에서 발생한 산불 연기는 북풍에 의해 김해를 거쳐 부산 강서구 쪽으로 이동하였다.

Table 1은 2012년부터 2022년까지 11년간 밀양기상관측소에서 측정한 봄철 강수량과 상대습도를 나타낸 것이다. 2022년 5월 밀양의 강수량은 3.3 mm로 11년간 평균 75.8 mm의 4.4%에 불과하였고 3.3 mm도 5월 2일에 내린 것으로서 한 달 가까이 밀양지역에 비가 오지 않았다. 기상청은 2022년 5월에 우리나라 상층대기가 건조한 가운데 중국에서 중앙시베리아 지역까지 남북으로 기압능이 폭넓게 형성되었기 때문이라고 분석하였다(KMA, 2022). 밀양지역의 2022년 5월 평균 상대습도도 47.9%로 11년 평균 60.4%보다 매우 낮았다. 밀양지역이 건조한 환경이 조성되면서 대형화재로 번질 수밖에 없는 상황이었다.

3.2. 산불 발생 시의 밀양지역의 기상 특성

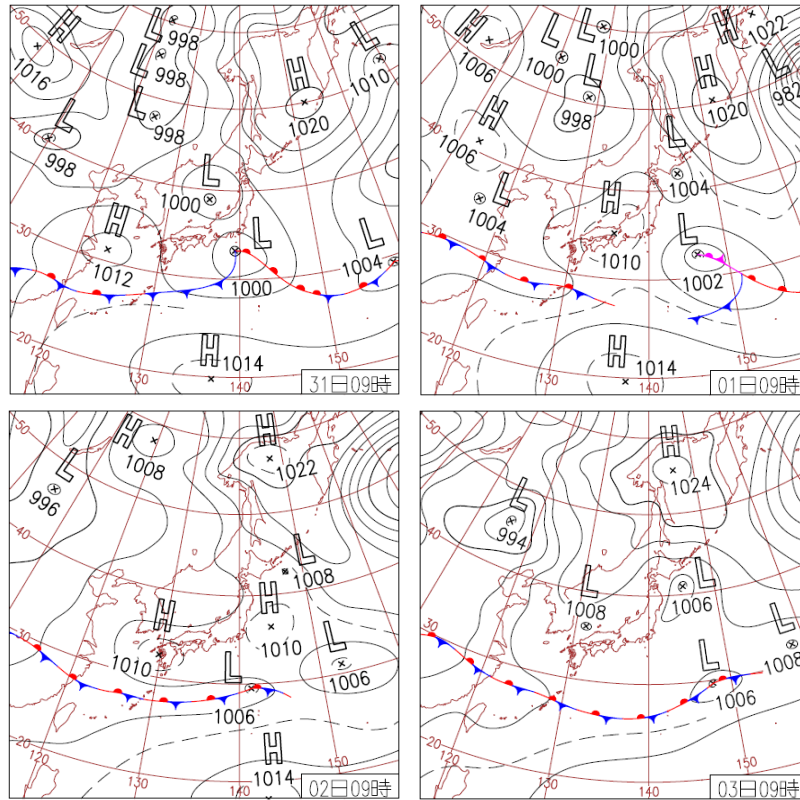


Fig. 3. Synoptic weather charts from May 31 to June 3, 2022.

Fig. 3은 2022년 5월 31일부터 6월 3일까지 우리나라 주변의 기압배치를 나타낸 지상일기도이다. 밀양 산불이 발생한 5월 31일 0900 LST의 지상일기도를 보면, 중국 상해 동쪽 해상에 1,012 hPa의 고기압이 위치하고 동해상에 1,000 hPa의 저기압이 있으며 일본 남동해상에 1,000 hPa의 전선을 동반한 온대성 저기압이 위치하고 있다. 우리나라의 등압선은 완만한 곡선이지만 북서에서 남동으로 기울어져 있는 남서의 고기압과 북동의 저기압에서 북풍계열의 바람이 부는 양상을 보이고 있다. 산불 발생 다음 날인 6월 1일 0900 LST의 일기도를 보면, 전날과는 달리 중국 산둥반도에 1,004 hPa의 저기압이 위치하고 일본 도쿄 근처에 1,010 hPa의 고기압이 위치하면서 남풍계열이 있다. 그러나 전날보다는 등압선 간격은 느슨하다. 6월 2일 0900 LST의 일기도를 보면, 일본 큐슈 지역에 1,010 hPa의 고기압 세력이 우리나라 남부 지역에 광범위한 영향을 미치고 있다. 한편 6월 3일 0900 LST의 일기도를 보면,

우리나라는 오후크크해상에 정체해 있는 1,024 hPa의 고기압의 영향이 설상(舌狀)으로 동해까지 영향을 미치고 있다.

Fig. 4는 2022년 5월 31일부터 6월 3일까지 밀양기상관측소 AWS에서 관측한 기상요소의 일변화를 나타낸 것이다. 산불이 발생한 5월 31일 1000 LST에 북북서풍이 4.2 m/s로 증가하였고 이후 동일한 풍향이 1600 LST까지 지속적으로 나타났다. 바람은 연료의 수분을 증발시키며 산소 공급을 증가시켜 연소 진행을 가속시킨다. 야간이 되면서 풍속은 급속히 약화되어 1 m/s 이하의 북서풍 계열의 바람이 6월 1일 오전까지 지속되었다. 6월 1일 1200 LST 이후 남풍 계열의 바람이 3 m/s 정도 불면서 연무현상은 걷혔고, 기온이 가파르게 상승하면서 대류현상이 활발하였다. 이러한 기상 현상은 산불을 더욱 북쪽으로 확산시키는 역할을 하였고 피해면적을 확대시키는 작용도 하였다. 밀양 지역에 연무현상이 발생한 6월 1일 1000 LST의 시정은 182

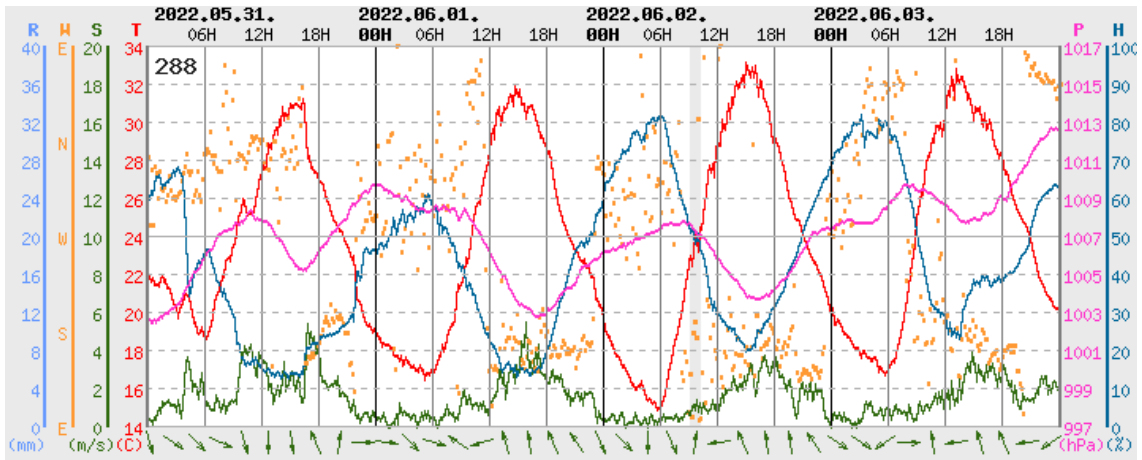


Fig. 4. Hourly variations of meteorological parameters from May 31 to June 3, 2022 in Miryang meteorological observatory.

m이었고, 1100 LST에 246 m, 1200 LST 695 m이었으며, 바람이 남동풍으로 바뀌면서 풍속이 증가된 1300 LST에 시정이 4,923 m로 빠르게 회복되었다. 3.4절에서 언급하겠지만 연무현상이 발생한 이 시간대에 미세먼지농도를 비롯한 대기오염농도가 급격히 상승하였다. 산불 발생 지역에서의 풍향과 풍속은 산불의 확산에 중요한 인자이다. 6월 2일 새벽에 1 m/s 이하의 서풍 계열의 약한 바람이 있었으나, 이날은 화재 지역에 연무 현상은 발생하지 않았다. 주간에는 3 m/s 이상의 남동풍이 야간 늦게까지 지속되었다. 6월 3일 새벽에는 오호츠크 해 고기압의 영향으로 북동풍이 약하게 나타났으며 주간에 3 m/s 정도의 남풍계열이 나타났다. 5월 31일부터 6월 3일까지 최고기온이 30°C 이상이었고 상대습도가 매우 낮아 산불 진화에 어려움이 있었다. 특히 5월 31일 1400 LST와 6월 1일 1700 LST의 상대습도는 각각 13%와 14%로 매우 낮은 값을 나타내었다.

Fig. 5는 밀양시 산불지점(35°50'N, 128°75'E)으로부터 방출된 연기의 이동방향을 추적하기 위해 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT 모델을 이용하여 forward trajectory 분석이다. 공기괴의 출발지점은 밀양 산불 지점이며 출발시각은 2022년 5월 31일 0900 LST로 선정하였고 공기괴의 고도는 500 m, 1,000 m, 1,500 m이며, 24시간 동안 6시간 간격으로 선정하였다. 세층 모두 초기 3~4시간의 궤적선은 북풍의 영향으로 화재 지역의 남쪽인 김해지역으로 이동하였다. 그러나 1,500 m의 공기괴는 김해지역을 통과해 남해상의 가

덕도 우측 해상까지 진출하여 시계방향으로 회전하여 다시 남풍을 타고 동해상으로 빠져나가는 양상을 보였다. 밀양지역을 출발한 공기괴는 초기에 남쪽인 김해와 부산지역으로 이동하였고 6시간 후 세 층의 공기괴는 북동쪽으로 이동하였다. 그리고 세 층 모두의 공기괴는 출발 후 몇 시간 만에 지상 근처로 침강하였다. 특히 1,000 m의 공기괴는 출발 2시간 후부터 지표로 침강한 것을 알 수 있다. 이는 밀양 산불에서 발생한 연기가 대기경계층을 통해 이동하다 하강기류의 영향으로 지상으로 하강하였다는 것을 알 수 있다. 공기괴가 출발하여 9시간 후 세 층 모두 다시 상승하여 500 m을 유지하였다. Dreessen et al.(2016)은 화재활동에 의해 생성된 강력한 에너지와 강한 대류로 인해 화재 방출물은 행성 경계층 위로 유입되고 대규모 순환에 의해 장거리 수송된다고 하였으며, Pahlow et al.(2005)은 대기 중에서 이동 및 확산과정에서 연기 에어로졸은 다양한 수송 메커니즘을 통해 지표면으로 하강할 수 있고 종관적인 침강상태에서 자유대기의 스모크 에어로졸은 낮은 고도로 이동한다고 보고하였다.

3.3. 밀양산불에 의한 인근 도시지역의 미세먼지 농도 특성

Fig. 6은 경남 밀양 산불이 발생한 2022년 5월 31일부터 6월 1일까지 2일간 김해지역의 동상동과 장유동, 부산지역의 명지동과 부산신항의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 김해시 동상

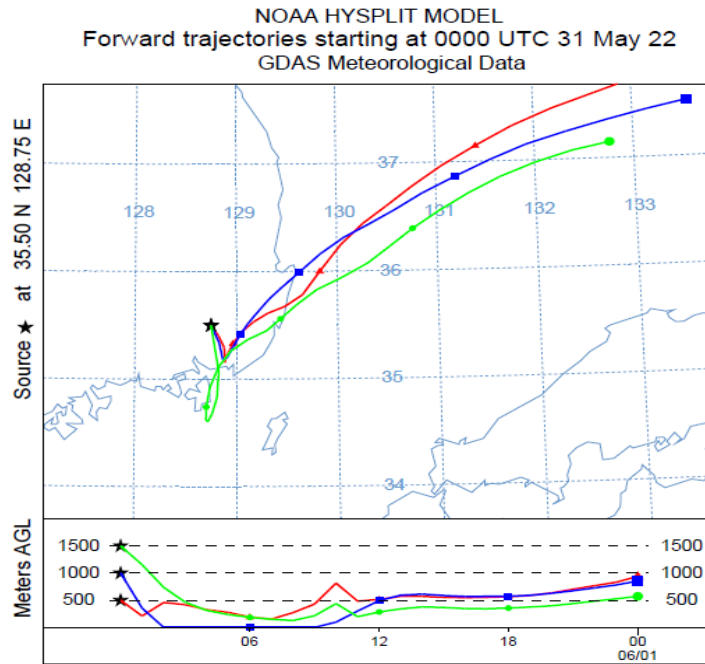


Fig. 5. Forward trajectory from Miryang (35°50'N, 128°75'E) at May 31 00Z, 2022.

동은 밀양산불 지점으로부터 남남동쪽으로 35 km, 장유동은 남쪽으로 37 km 떨어져 있고, 부산시 명지동은 밀양 산불지점으로부터 남남동쪽 50 km, 부산신항은 남쪽 52 km 떨어져 있다. 먼저, 김해시 동상동의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 경우, 5월 31일 1100 LST 농도는 각각 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 1400 LST에 각각 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 급격하게 증가하였다. 다만, 1200 LST와 1300 LST자료가 누락되었다. 1500 LST에도 PM₁₀은 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 유지하였으나 PM_{2.5}는 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격하게 하강하였다. 장유동의 경우, PM₁₀과 PM_{2.5} 농도가 5월 31일 1200 LST부터 상승하기 시작하여 1300 LST에 각각 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었고, 산불에 의한 연기는 1500 LST까지 이 지역에 영향을 주었다고 볼 수 있다. 부산시 명지동의 경우, PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 5월 31일 1400 LST에 각각 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내어 1300 LST부터 1500 LST까지 영향을 주었다. 부산 신항의 경우, 앞의 세 지점과 같은 뚜렷한 양상을 보여주지는 않았으나, PM₁₀과 PM_{2.5} 농도가 다른 형태를 나타내었다. 보통의 경우 미세먼지 농도가 하강할 시간대인 1400 LST에 PM₁₀ 농도가 일시적으로 상승하였고 PM_{2.5} 농도는 통상적인 것과 같이 하

강하였다.

이상을 정리하면 Fig. 5의 전방궤적선에 언급하였듯이 밀양 산불의 연기는 초기에 북풍을 타고 김해지역과 부산지역의 미세먼지농도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 거리적으로 밀양 산불 지점과 가까운 김해시의 동상동의 미세먼지는 장유동과 명지동 그리고 부산신항에 비해 큰 영향을 받은 것으로 사료된다. 밀양 산불의 연기의 영향으로 몇십 km 떨어진 김해시와 부산시의 미세먼지 농도가 상승한 것은 향후 산불에 의해 인근 도시지역의 대기질에 영향을 미칠 수 있으며, 주민들의 건강에도 위해를 가할 수 있다는 것을 시사하고 있다 (Bowman and Johnston, 2005).

3.4. 연무 발생에 의한 밀양 지역의 대기오염농도 특성

Fig. 7은 2022년 5월 31일부터 6월 1일까지 경남 밀양시 내일동에서 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, CO, SO₂ 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 밀양시 내일동 측정소는 밀양 산불 현장에서 남동쪽으로 약 3 km 떨어져 있다. 먼저 산불이 발생한 5월 31일 1100 LST까지 측정자료가 누락되어 있는데, 오전 자료가 있었다면

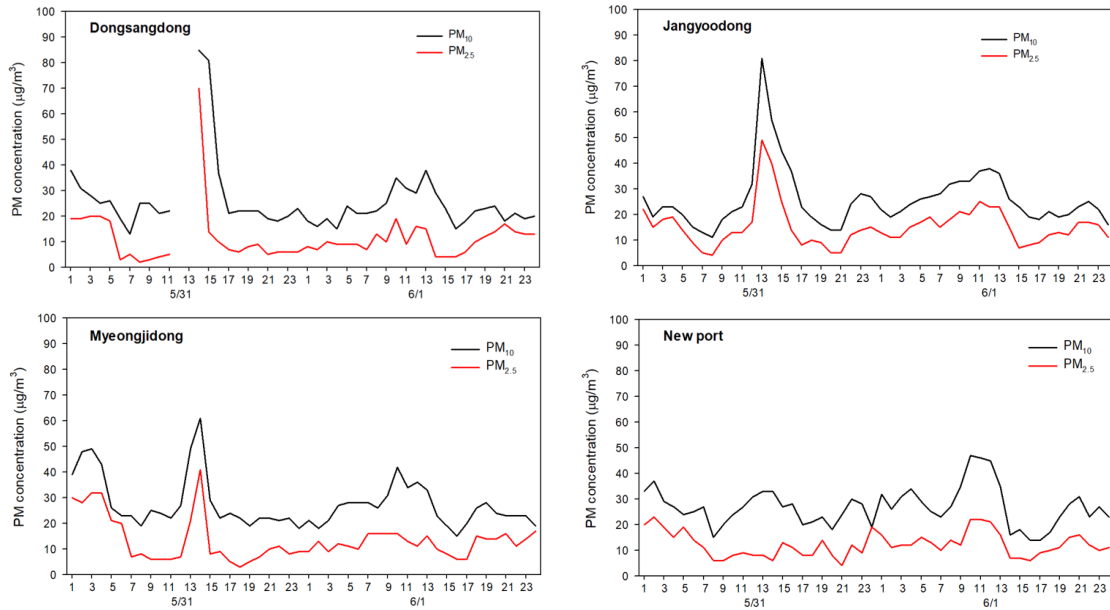


Fig. 6. Diurnal variations of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations from May 31 to June 1, 2022 at Dongsangdong, Jangyoodong, Myeongjidong and Busan new port.

화재 발생 당시 북풍에 의해 남쪽으로 이동하면서 밀양 시내에 어떠한 영향을 미쳤는지를 고찰할 수 있는 좋은 기회가 되었을 것이라고 사료된다. 5월 31일 오후의 밀양의 미세먼지농도는 1600 LST와 1700 LST에 일시적으로 약간 상승한 것이 특징적이었고, 이는 Fig. 4의 밀양의 AWS에서 보듯이 북서풍에서 남동풍으로 풍향이 바뀌는 시간대이다. 게다가 SO₂, CO, O₃ 농도도 동일한 상승을 나타내었다. 따라서 5월 31일 오후의 미세먼지와 기체상 오염물질의 일시적 상승은 산불에 의해서 영향을 받았다고 본다. 그리고 6월 1일 1000 LST부터 1300 LST까지 미세먼지 농도의 급속한 상승을 나타내었다. 이는 Fig. 4에서 언급하였듯이 이 시간대의 밀양지역은 전날 발생한 산불 연기가 정체하면서 오전 내내 시정이 500 m 이하인 극심한 연무현상이 관측되었다. PM₁₀ 농도는 0900 LST 40 µg/m³에서 1000 LST 230 µg/m³, 1100 LST 271 µg/m³, 1200 LST 276 µg/m³로 급속히 상승하였으며, 풍향이 남동풍으로 바뀌고 풍속이 증가한 1300 LST에 101 µg/m³ 그리고 1400 LST에 36 µg/m³로 급속히 하강하였다. PM_{2.5} 농도는 0900 LST 18 µg/m³에서 1000 LST 182 µg/m³, 1100 LST 219 µg/m³, 1200 LST 222 µg/m³로 급속

히 상승하였으며, 풍향이 남동풍으로 바뀌고 풍속이 증가한 1300 LST에 69 µg/m³, 1400 LST에 13 µg/m³로 급속히 하강하였다. PM_{2.5}/PM₁₀ 농도비는 0900 LST 0.45, 1000 LST 0.70, 1100 LST 0.81, 1200 LST 0.80, 1300 LST 0.68, 1400 LST 0.36이었는데, 이는 산불에 의한 연무 발생시 PM_{2.5}/PM₁₀ 농도비가 0.8 이상으로 초미세먼지 비율이 상당히 높았다는 것을 알 수 있다. 따라서 산불은 미세먼지 농도를 높일 뿐만 아니라 초미세먼지 농도도 동시에 증가시켜 인체의 건강에 상당한 위해를 가할 수 있다(Arriagada et al., 2020). 그리고 O₃의 농도도 1200 LST에 93 ppb로 상승하였고 1500 LST까지 80 ppb 이상을 유지하였다. 또한 CO의 농도는 0900 LST 0.3 ppm에서 1000 LST 0.9 ppm으로 급상승하였고 1200 LST까지 동일한 농도를 유지하였다. SO₂ 농도는 0700 LST 0.004 ppm에서 0800 LST부터 1300 LST까지 0.005 ppm 이상을 유지하였으며, 1700 LST에 일시적으로 0.006 ppm을 나타내기도 하였다. 따라서 산불에 의한 연기가 밀양시내에 정체하면서 1000 LST부터 1300 LST까지 미세먼지, 초미세먼지와 더불어 기체상 오염물질의 농도가 급상승하여 인체의 건강에 위해를 가할 수 있는

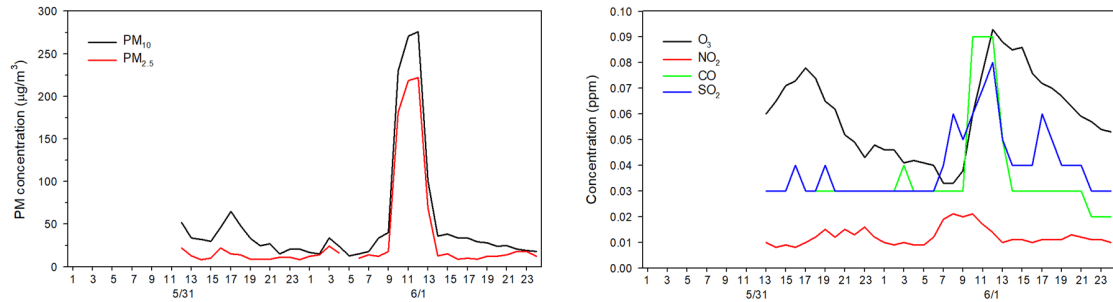


Fig. 7. Diurnal variation of PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, CO and SO₂ from May 31 to June 1, 2022 at Naeildong in Miryang.

상황이 발생하였다고 할 수 있다(Le et al., 2014).

른 정책 수립에 정보를 제공하리라 판단된다.

4. 결론

2022년 5월 31일 밀양시 북북면 춘화리에서 발생한 산불이 인근 도시 지역인 부산과 김해의 미세먼지 농도에 미친 영향과 연무 현상이 발생한 밀양의 미세먼지와 대기오염농도의 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2022년 5월 31일 09시 25분경 밀양시 북북면 춘화리에서 발생한 산불은 강한 북풍을 타고 남동쪽 및 남쪽으로 약 35 km 떨어진 김해시 동상동과 장유동의 미세먼지농도를 상승시켰으며, 1300 LST부터 1500 LST까지 높은 농도를 나타내었다. 또한 산불 발생지점으로부터 남남동쪽 약 50 km 떨어진 부산시 명지동의 미세먼지 농도도 1400 LST에 산불 연기의 영향으로 일시적인 상승을 보였다.
- 2) 산불 발생 다음날인 6월 1일 오전 밀양지역은 산불 연기에 의해 시정이 매우 나쁜 연무현상이 발생하였다. 이의 영향으로 산불 발생지점으로 남쪽으로 3 km 떨어진 밀양시 내일동의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 1200 LST에 각각 276 µg/m³과 222 µg/m³를 나타내었다. 그리고 기체상 물질인 O₃, CO, SO₂ 농도도 연무가 발생한 시각에 높은 농도를 나타내었다.
- 3) 이와 같이 산불이 도시 지역 인근에 발생한다면 도시 지역의 미세먼지 농도를 일시적으로 상승시켜 주민들의 건강에 위해를 가할 수 있다. 따라서 본 연구는 산불이 도시 인근에 발생할 경우 도시 주민들에 실시간으로 산불 상황을 전달하거나 관련 당국으로 하여금 산불 대응 체계 등 미세먼지의 급격한 증가에 따

REFERENCES

- Adame, J. A., Lope, L., Hidalgo, P. J., Sorribas, M., Gutierrez-Alvarez, I., Águila, A., Saiz-Lopez, A., Yela, M., 2018, Study of the exceptional meteorological conditions, trace gases and particulate matter measured during the 2017 forest fire in Doñana Natural Park, Spain, *Sci. Total Environ.*, 645, 710-720.
- An, S. G., Choi, K. H., 2021, Effect of forest fire on fine particulate matter concentration in coastal cities of Gangwon-do, South Korea, *Asso. Kor. Geo.*, 10, 391-400.
- Arriagada, N. B., Palmer, A. J., Bowman, D. M., Morgan, G. G., Jalaludin, B. B., Johnston, F. H., 2020, Unprecedented smoke-related health burden associated with the 2019-20 bushfires in eastern Australia, *Medi. Australia*, 213, 282-283.
- Bowman, D. M., Johnston, F. H., 2005, Wildfire smoke, fire management, and human health, *EcoHealth*, 2, 76-80.
- Draxler, R. R., Rolph, G. D., 2013, HYSPLIT (hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory) model access via NOAA ARL READY Website (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php).
- Dreessen, J., Sullivan, J., Delgado, R., 2016, Observations and impacts of transported Canadian wildfire smoke on ozone and aerosol air quality in the Maryland region on June 9-12, 2015, *Air Waste Manag. Assoc.*, 66, 842-862.
- Hung, W. T., Lu, C. H., Alessandrini, S., Kumar, R., Lin, C. A., 2011, The impacts of transported wildfire smoke aerosols on surface air quality in New York State: A multi-year study using machine learning,

- Atmos. Environ., 259, 118513.
- Jin, Q. F., Wang, W. H., Ma, X. Q., Yang S. Y., Guo, F. T., 2017, Temporal and spatial dynamics of pollutants emission from forest fires in Fujian during 2000-2010, *China Environ. Sci.*, 37, 476-485.
- Korea Forest Service, 2022a, <https://www.forest.go.kr/kfsweb/>.
- Korea Forest Service, 2022b, Gyeongsangnam-do Miryang area forest fire extinguishing briefing, 2.
- Korea Meteorological Administration 2022, 2022 Busan Ulsan Gyeongnam spring climate characteristics, 11.
- Le, G. E., Breyse, P. N., McDermott, A., Eftim, S. E., Geyh, A., Berman, J. D., Curriero, F. C., 2014, Canadian forest fires and the effects of long-range transboundary air pollution on hospitalizations among the elderly, 2014, *Int. Geo-Inf.*, 3, 713-731.
- Lee, K. H., Kim, J. E., Kim, Y. J., Kim, J., 2004, Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003, *Kor. Atmos. Environ.*, 20, 603-613.
- Oliveira, M., Delerue-Matos, C., Pereira, M. C., Morais, S., 2020, Environmental particulate matter levels during 2017 large forest fires and megafires in the center region of Portugal: a public health concern?, *Int. Environ. Pub. Heal.*, 17, 1.032-1.051.
- Pahlow, M., Kleissl, J., Parlange, M. B., 2005, Atmospheric boundary-layer structure observed during a haze event due to forest-fire smoke, *Bound. Layer Meteorol.*, 114, 53-70.
- Reid, J. S., Koppmann, R., Eck, T. F., Eleuterio, D. P., 2005, A Review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 799-825.
- Reisen, F., Duran, S. M., Flannigan, M., Elliott, C., Rideout, K., 2015, Wildfire smoke and public health risk, *Inter. Wild., Fire*, 2015, 24, 1029-1044.
- Smolyakov, B. S., Makarov, V. I., Shinkorenko, M. P., Popova, S. A., Bizin, M. A., 2014, Effects of Siberian wildfires on the chemical composition and acidity of atmospheric aerosols of remote urban, rural and background territories, *Environ. Pollu.*, 188, 8-16.
- Wotawa, G., Trainer, M., 2000, The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States, *Science* 288, 324-328.
- Xie, Y., Lin, M., Horowitz, L. W., 2020, Summer PM_{2.5} pollution extremes caused by wildfires over the western United States during 2017-2018, *Geophy. Resear Let.*, 47, e2020GL089429.

• Pfofessor. Byung-Il Jeon
 Department of Air Traffic & Operation Management,
 Silla University
 bijeon@silla.ac.kr