

2010년 2월

博士學位論文

미세먼지에보 정확도 향상에 관한 연구

-서울시 먼지 예·경보제 분석을 중심으로-

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

蔡 熙 政

미세먼지예보 정확도 향상에 관한 연구

-서울시 먼지 예·경보제 분석을 중심으로-

A Study on Improving of PM₁₀ Forecast in seoul

2009年 11月 日

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

蔡 熙 政

미세먼지에보 정확도 향상에 관한 연구

-서울시 먼지 예·경보제 분석을 중심으로-

指導教授 崔炯一

이 論文을 工學博士 學位申請 論文으로 提出함.

2009年 10月 日

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

蔡熙政

蔡熙政의 博士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 申 大 允 印

委 員 朝鮮大學校 教授 鄭 京 勳 印

委 員 圓光保健大學校 教授 姜 公 言 印

委 員 光州廣域市
保健環境研究院 部長 白 桂 辰 印

委 員 朝鮮大學校 教授 崔 炯 一 印

2009年 12月

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	vii
Abstract	x
I 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구의 필요성 및 목적	2
II 이론적 고찰 및 선행사례	4
2.1 미세먼지 발생현황	4
2.2 미세먼지 예·보제 선행사례	5
1. 미세먼지 예·보제 시행사례	6
1) 미국	6
2) 영국	7
3) 노르웨이	8
4) 일본	9
5) 국내사례	10
III 연구내용 및 방법	13
3.1 연구내용	13
3.2 연구방법	14
IV 연구결과 및 고찰	16
4.1 미세먼지농도의 영향변수	16
1. 기상변수의 영향	16
1) 강우의 영향 분석	17

2) 기온의 영향 분석	35
3) 풍속 및 풍향의 영향 분석	46
4) 일교차와 안개의 영향 분석	67
5) 상대습도의 영향 분석	72
2. 기상요인 외 영향 변수	88
1) 배경오염도	88
2) 2차입자 생성기작과 미세먼지농도에의 영향	95
4.2 미세먼지예보를 위한 결과 및 고찰	99
1. 계절별 기상요인의 영향	99
2. 계절별 예보	104
1) 겨울철 예보방법	104
2) 봄철 예보방법	113
3) 여름철 예보방법	118
4) 가을철 예보방법	122
4.3 종합적 고찰	126
V 결 론	128
참 고 문 헌	131

List of Tables

Table 2.1. 배출원별 미세먼지 발생량	4
Table 2.2. 대기질 지수	6
Table 2.3. 영국의 대기질 예보	7
Table 2.4. 대기오염경보 시 행동요령	8
Table 2.5. 일본의 대기질 예보	9
Table 2.6. 각국의 대기질 예보	9
Table 2.7. 미세먼지 예보절차	10
Table 2.8. 미세먼지 경보 기준	11
Table 2.9. 서울의 미세먼지 예보지수	12
Table 3.1. 분석절차 및 방법	15
Table 4.1. 미세먼지 오보의 영향변수('06.1~8월)	16
Table 4.2. 서울의 강우일 및 강수량	17
Table 4.3. 계절별 강우일과 미세먼지농도 상관도	20
Table 4.4. 강우량과 미세먼지농도와 상관도(강우량 4.5mm 이상)	22
Table 4.5. 강우량과 미세먼지농도와 상관도(강우량 17mm 이상)	22
Table 4.6. 강우량과 미세먼지농도(강우량 0.1mm 이상, 시간자료)	24
Table 4.7. 미세먼지농도와 강우일의 다중회귀분석(풍속 2mm/s 이하, 강우 0.1mm 이상)	25
Table 4.8. 미세먼지농도와 강우일의 다중회귀분석(풍속 2mm/s 이상, 강우 0.1mm 이상)	27
Table 4.9. 1시간 지연 시 미세먼지농도와 항목별 상관도	29
Table 4.10. 1시간 지연 시 다중회귀분석(풍속 2 미만, 강우량 0.1mm 이상)	30
Table 4.11. 강우시간 지연 시 미세먼지농도(풍속2m/s이상, 강우량0.1mm이상, 7월~10월)	32
Table 4.12. 강우시간 지연 시 미세먼지농도와 다중회귀분석(2시간 지연)	

.....	32
Table 4.13. 미세먼지농도와 강우의 다중회귀분석(2시간 지연 시, 풍속 2m/s 미만, 강우량 0.1mm 이상)	33
Table 4.14. 미세먼지농도와 강우의 다중회귀분석(2시간 지연 시, 풍속 2m/s 이상, 강우량 0.1mm 이상)	33
Table 4.15. 미세먼지농도와 기온(Temp)의 회귀분석 결과	37
Table 4.16. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석 결과	37
Table 4.17. 기상항목별 상관도('05년~'07년)	38
Table 4.18. 기온과 기상항목의 다중회귀분석 결과('05년~'07년)	38
Table 4.19. 미세먼지농도와 기온의 단회귀분석 결과(11월~2월)	39
Table 4.20. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석 결과(11월~2월)	39
Table 4.21. 기온과 기상항목의 다중회귀분석(11월~2월)	40
Table 4.22. 미세먼지농도와 기상항목의 상관도(3월~5월)	40
Table 4.23. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석 결과(3월~5월)	41
Table 4.24. 기온과 기상항목의 회귀분석(3월~5월)	41
Table 4.25. 미세먼지농도와 기온의 단회귀분석(6월~8월)	42
Table 4.26. 미세먼지농도와 기온의 다중회귀분석(6월~8월)	42
Table 4.27. 기상항목 간 상관도(6월~8월)	43
Table 4.28. 미세먼지농도와 기온의 단회귀분석(9월~10월)	43
Table 4.29. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석(9월~10월)	44
Table 4.30. 기상항목 간 상관도(9월~10월)	44
Table 4.31. 서울의 풍속 범위별 일수('05년~'07년)	47
Table 4.32. 풍속구간별 미세먼지농도 일수	48
Table 4.33. 미세먼지농도와 항목별 상관도(풍속 1m/s 이상, 2m/s 미만)	49
Table 4.34. 미세먼지농도와 풍속의 상관도(강우일 및 비강우일)	53
Table 4.35. 계절별 미세먼지와 풍속의 상관도(강우일 및 비강우일)	54
Table 4.36. 계절별 풍향 일수('05년~'07년)	56
Table 4.37. 풍향별 미세먼지농도('05년~'07년)	57
Table 4.38. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석('05~'07)	64

Table 4.39. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석(11월~2월)	65
Table 4.40. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석(3월~5월)	65
Table 4.41. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석(6월~8월)	66
Table 4.42. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석(9월~10월)	66
Table 4.43. 미세먼지농도와 상대습도의 월별 상관도	74
Table 4.44. 상대습도와 미세먼지농도의 상관도(강우 0.1mm 미만)	76
Table 4.45. 상대습도와 미세먼지농도의 상관도(비강우일)	78
Table 4.46. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석('06. 7월)	78
Table 4.47. 상대습도와 미세먼지농도의 상관도(풍속 2m/s 이하, 강우 0.1mm 미만)	79
Table 4.48. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석(풍속3m/s이하, 강우0.1mm 미만)	80
Table 4.49. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석(풍속 2m/s 이상 3m/s 미만, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)	80
Table 4.50. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석(풍속 2m/s 이상 3m/s 미만, 강우 0.1mm 미만, 4월~10월)	80
Table 4.51. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석(풍속 3m/s 초과 4m/s 이하, 강우 0.1mm 미만, 4월~10월)	82
Table 4.52. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석(풍속 3m/s 초과 4m/s 이하, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)	82
Table 4.53. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석(풍속 4m/s 초과 6m/s 이하, 강우 0.1mm 미만 11월 ~ 3월)	83
Table 4.54. 미세먼지농도와 평균해면기압의 상관도	84
Table 4.55. 상대습도와 평균해면기압의 상관도('07년)	85
Table 4.56. 상대습도와 평균해면기압 상관도(기온 포함, '07년)	86
Table 4.57. 상대습도와 평균해면기압의 계절별 상관도	87
Table 4.58. 서울의 미세먼지농도	88
Table 4.59. 서울과 백령도의 미세먼지농도 상관도('07)	89
Table 4.60. 서울과 강화도의 최대 상관계수	90

Table 4.61. 서울의 월별 미세먼지농도('05~'07)	91
Table 4.62. 질소산화물 감축 영향	96
Table 4.63. 황산화물 감축 영향	96
Table 4.64. CAPSS의 배출량 산정	97
Table 4.65. 시간별 미세먼지농도 변화	99
Table 4.66. 시간별 강우량과 미세먼지농도 변화(서풍시)	101
Table 4.67. 여름철 강우량에 따른 시간별 미세먼지농도 변화(동풍시)	101
Table 4.68. 강우량에 따른 시간별 미세먼지농도 변화(동풍 & 서풍)	102
Table 4.69. 미세먼지농도와 항목별 상관도(겨울철)	107
Table 4.70. 미세먼지농도와 기상항목별 상관도(겨울철)	108
Table 4.71. 미세먼지농도와 항목별 조합의 상관도(겨울철)	108
Table 4.72. 기상항목 단위당 미세먼지농도 변동(겨울철)	109
Table 4.73. 미세먼지농도와 항목별 상관도(봄철)	113
Table 4.74. 미세먼지농도와 기상항목별 상관도(봄철)	113
Table 4.75. 미세먼지농도와 항목별 조합의 상관도(봄철)	114
Table 4.76. 계절별 Durbin-Watson Ratio	116
Table 4.77. 미세먼지농도와 항목별 상관도(여름철)	118
Table 4.78. 미세먼지농도와 기상항목별 상관도(여름철)	118
Table 4.79. 미세먼지농도와 항목별 조합의 상관도(여름철)	119
Table 4.80. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석(여름철)	119
Table 4.81. 미세먼지농도와 항목별 상관도(가을철)	122
Table 4.82. 미세먼지농도와 기상항목의 상관도(가을철)	122
Table 4.83. 미세먼지농도와 항목별 조합의 상관도(가을철)	123
Table 4.84. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석(가을철)	124

List of Figures

Fig. 4.1. 2007년 강우일과 미세먼지농도 .	18
Fig. 4.2. 2006년 강우일과 미세먼지농도 .	19
Fig. 4.3. 2005년 강우일과 미세먼지농도 .	19
Fig. 4.4. 강우일과 미세먼지농도(2007. 11월~3월) .	20
Fig. 4.5. 강우량과 미세먼지농도.(강우량 1mm 이상, '05~'07)	23
Fig. 4.6. 강우량과 미세먼지농도.(강우량 4.5mm 이상, 17mm 미만)	23
Fig. 4.7. 강우량과 미세먼지농도.(강우량 17mm 이상)	23
Fig. 4.8. 강우시간 지연 시 미세먼지 저감 효과.('05. 6월)	28
Fig. 4.9. 강우시간 지연 시 미세먼지 저감 효과.('07. 4월)	28
Fig. 4.10. 미세먼지농도와 강우량.(5월~10월, 풍속 2m/s 이상, 강우량 0.1mm 이상)	29
Fig. 4.11. 미세먼지농도와 강우량.(11월~3월, 풍속 2m/s 이상, 강우량 0.1mm 이상)	30
Fig. 4.12. 강우시간 1시간 지연 시 미세먼지농도와 강우량.(풍속 2m/s 이상 강우0.1mm 이상)	31
Fig. 4.13. 겨울철 미세먼지농도와 강우량.(풍속 2m/s 이상, 강우량 0.1mm 이상)	31
Fig. 4.14. 강우일과 미세먼지농도.(강우량0.1mm이상, 2시간지연, '05.5월)	34
Fig. 4.15. 강우일과 미세먼지농도.(강우량 0.1mm 이상, 2시간 지연, '05.7월)	34
Fig. 4.16. 최대 상관도 지연시간(강화도, 서울).	46
Fig. 4.17. 2005년 풍속과 미세먼지농도 .	47
Fig. 4.18. 미세먼지농도별 일수.(풍속 1~2m/s)	49
Fig. 4.19. 월별 미세먼지농도.(풍속 1~2m/s)	49
Fig. 4.20. 월별 미세먼지농도.(풍속 1~2m/s)	50
Fig. 4.21. 월별 미세먼지농도 30 μ g/m ³ 이하 일수.(풍속 2m/s 이상, 3m/s 미만)	51
Fig. 4.22. 풍속 구간별 미세먼지농도 일수 .	52
Fig. 4.23. 계절별 미세먼지농도와 풍속의 상관도 .	54
Fig. 4.24. 풍향별 일수.('05년~'07년)	55

Fig. 4.25. 계절별 풍향 일수.(11월~2월)	57
Fig. 4.26. 계절별 풍향 일수.(3월~5월)	58
Fig. 4.27. 계절별 풍향 일수.(6월~8월)	58
Fig. 4.28. 계절별 풍향 일수.(9월~10월)	59
Fig. 4.29. 주 풍향별 미세먼지농도 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 일수.	59
Fig. 4.30. 미세먼지농도 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(11월~2월)	60
Fig. 4.31. 미세먼지농도 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(11월~2월)	60
Fig. 4.32. 미세먼지농도 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(3월~5월)	61
Fig. 4.33. 미세먼지농도 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(3월~5월)	61
Fig. 4.34. 미세먼지농도 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(6월~8월)	62
Fig. 4.35. 미세먼지농도 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(6월~8월)	62
Fig. 4.36. 미세먼지농도 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(9월~10월)	63
Fig. 4.37. 미세먼지농도 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(9월~10월)	63
Fig. 4.38. 미세먼지농도와 일교차.('05~'07)	67
Fig. 4.39. 미세먼지농도와 일교차.('07년)	68
Fig. 4.40. 미세먼지농도와 일교차.('06.11~'07.4)	68
Fig. 4.41. 미세먼지농도와 일교차.('05.1.1~'07.12.28)	68
Fig. 4.42. 미세먼지농도와 일교차.('07)	69
Fig. 4.43. 상대습도와 일교차.('07)	70
Fig. 4.44. 미세먼지농도와 일교차.(2007, 강우·강설 제외)	70
Fig. 4.45. 미세먼지농도와 일교차.(일교차 10°C 이상)	71
Fig. 4.46. 상대습도와 미세먼지농도.	72
Fig. 4.47. $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 입경비.	72
Fig. 4.48. 상대습도에 따른 입자분포.	73
Fig. 4.49. 상대습도에 따른 입자수분포.	73
Fig. 4.50. 일별 상대습도에 따른 시간별경향.('08, 4월)	74
Fig. 4.51. 시간별 입자크기 변화.	74
Fig. 4.52. 월별 미세먼지농도와 상대습도의 상관도.	75
Fig. 4.53. 미세먼지농도와 상대습도의 상관도.(가을철, 겨울철)	75
Fig. 4.54. 비강우일의 상대습도와 미세먼지농도.(1월~3월)	76
Fig. 4.55. 비강우일의 상대습도와 미세먼지농도(10월~12월).	77
Fig. 4.56. 비강우일의 상대습도와 미세먼지농도(7월).	77

Fig. 4.57. 상대습도와 미세먼지농도.(풍속 2m/s 이하, 강우 0.1mm 미만)	79
Fig. 4.58. 미세먼지농도와 상대습도.(풍속 2m/s 이상 3m/s 미만, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)	81
Fig. 4.59. 상대습도와 미세먼지농도.(풍속 2m/s 이상 3m/s 미만, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)	81
Fig. 4.60. 상대습도와 미세먼지농도.(풍속 3m/s 이상 4m/s 미만, 강우 0.1mm 미만 11월~3월)	82
Fig. 4.61. 상대습도와 미세먼지농도.(풍속4m/s 초과 6m/s이하, 강우0.1mm 미만, 11월~3월)	83
Fig. 4.62. 평균현지기압.(Mean Station Pressure, '05~'07)	84
Fig. 4.63. 상대습도와 평균해면기압.('07)	85
Fig. 4.64. 미세먼지농도 변화의 상관도. (서울 & 강화, '07).	92
Fig. 4.65. 미세먼지농도 변화의 상관도.(서울 & 강화, '07. 4월)	92
Fig. 4.66. 미세먼지농도 변화의 상관도.(서울, 강화, '07. 6월)	93
Fig. 4.67. 미세먼지농도 변화의 상관도.(서울, 백령도, '07)	93
Fig. 4.68. 미세먼지농도 변화의 상관도. (서울, 백령도, '07.4월)	94
Fig. 4.69. 미세먼지농도 변화의 상관도. (서울, 백령도, '07. 6월)	94
Fig. 4.70. 서울지역 미세먼지농도에의 배출원별 기여도.(입력 배출원 9)	98
Fig. 4.71. 강우량 1.0mm 이하 시 미세먼지농도.('07. 11월~2월)	100
Fig. 4.72. 강우량 1.0mm 이하 시 미세먼지농도.('07. 11월~12월)	100
Fig. 4.73. 여름철 강우량에 따른 시간별 미세먼지농도 변화.(2007.7.9)	102
Fig. 4.74. 강우량에 따른 시간별 미세먼지농도 변화.(2007.10.10일, 22일)	102
Fig. 4.75. 강우와 미세먼지농도의 상관도.(1월~2월)	105
Fig. 4.76. 강우와 미세먼지농도의 상관도.(11월~12월)	106
Fig. 4.77. 강우와 미세먼지농도의 상관도.(5월~6월)	106
Fig. 4.78. 강우와 미세먼지농도의 상관도.(7월~8월)	106
Fig. 4.79. 기상항목에 따른 미세먼지농도 영향.(KZ-F)	114

Abstract

A Study on Improving of PM₁₀ Forecast in seoul

By Chae Hee-Jeong

Advisor: Prof. Choi Hyung-il

Department of Environmental-Biological Engineering

Graduate School of Chosun University

Along with the industrial development, environmental pollution emerged as one of the most critical social problems that needs be resolved urgently. In particular, air pollution, one of the major factors that affects the human life most significantly, possess high uncertainties and its estimates vary greatly depending on implementation results of reduction measures or weather changes.

Air pollution is reported to have negative impacts on human life. Especially the weak and the elderly are mainly affected by air pollution. Consequently it is understood that a common ground was created to realize that air pollution is a problem that must be resolved in order to provide a healthy and pleasant life for the humankind.

Since 2005, the city of Seoul has implemented forecasting/alarming system to protect citizens' health from PM₁₀. Its accuracy rate hovers around 72%, and some people raised the necessity to improve the confidence in the system.

The study has analyzed impacts and intensity of weather that affect PM₁₀ concentration based on PM₁₀ forecast conducted by the city of Seoul in order to identify ways to improve the accuracy of PM₁₀ forecast. Variables that influence PM₁₀ concentration include not only velocity and direction of the wind and rainfalls, but also those including secondary particulate matter, which were identified to greatly influence the concentration in complicated manner as well. In

addition, same variables were found to have different impacts depending on seasons and conditions of other variables.

This study assumed that forecast methods should be specified to enhance the accuracy of PM₁₀ forecast and suggested ways to improve the accuracy based on estimation of increase and decreases of seasonal variables considering characteristics of influencing variables.

Factors that influence PM₁₀ concentration such as rainfalls, velocity and direction of wind, and relative humidity tend to be inconsistent and have irregular impacts. Hence the study focused on wind velocity as permanent influence factor to analyze influence changes of different variables within the scope of each wind velocity. However it was difficult to measure consistent and quantitative influences of specific variables as this varied as well. Additionally as co-variance among variables were recognized to be affected significantly, it was inevitable to avoid uncertainty.

To improve accuracy of PM₁₀ forecast, this study has established a method that increase or decrease the estimation by anticipating the possible fluctuation scope of PM₁₀ concentration if one of the variables of weather factor fluctuates, through dividing the period into seasons and estimating sensitivity of variables that influence PM₁₀ concentration based on the wind velocity sectors. The study also predicted that rainfall forecast will be more accurate if the impact is applied by dividing into time units.

The study also pointed out that temperature and relative humidity have different impacts on PM₁₀ concentration at day and night time, and the impacts of wind direction differ in winter and summer. In other words in the daytime, temperature rises and relative humidity falls while in the night the situation becomes the other way around. Thus PM₁₀ concentration forecast needs to be estimated in different ways by integrating hourly PM₁₀ concentration estimates and finalizing the forecast. The estimates that change PM₁₀ concentration based on the wind velocity changes were anticipated by wind direction.

The study found out that improving accuracy of PM₁₀ concentration forecast face some limits as it is greatly influenced by the weather. As an estimation, this study assumed that basic research units and artificially estimated pollutant emissions, study on mechanisms of secondary particulate matter productions, observatory compliment, and enhanced forecaster's expertise are needed for better forecast.

This study is not to correct errors emerged from forecasting programs during the analysis process. Rather this study can be regarded as a pre-step for the forecaster to apply analysis results to compliment forecast program gradually if the results can be combined practically.

Unlike other countries, forecast history in Korea is short and some air pollution reduction measures implemented in the country influence the changing scope of pollution. Furthermore around 2/3 of the year, Korea is influenced by China's situation, making it more difficult to forecast. This study was conducted to analyze and help forecast errors from the current stage and it is my hope that this study can help those who are willing to improve forecast accuracy in the future.

I. 서론

1.1. 연구배경

우리나라는 경제개발의 지속적인 성장에 힘입어 지난 30년간 괄목할 만한 경제적·사회적 발전을 이룩하였을 뿐만 아니라, 고도의 산업발달과 국민의 생활수준 향상으로 경제발전 우선순위 정책으로 인해 인구의 증가와 도시집중화 현상을 초래하게 됨에 따라 도시의 대형화로 오염물질 배출 역시 급격한 증가를 보여 우리 주변 환경은 더욱 열악하게 되어 대기, 수질, 폐기물오염 등 심각한 오염문제를 유발하게 되었다.

특히, 우리나라의 수도인 서울은 장기간 다양한 산업화시대를 이끌어 오면서 개발제일주의의 결과에 따른 극심한 환경적 피해를 누적시켜 왔으며, 대기오염은 서울의 대표적 이미지중 하나가 되었다. 대기오염을 가시화하는 것은 대기 중 분산되어 있는 에어로졸(Aerosol) 물질이 원인이 되는데 먼지(Particles matter), 결정상태의 염, 산성 액정, 수분이 포함된 고형물질의 결합체, 미생물을 포함하는 입자 등 여러 가지가 포함된다. 이러한 물질들은 시정거리를 악화시키고 인체에 유해한 영향을 미칠 뿐만 아니라 일상적인 생활에도 부정적인 영향을 미치게 되어 해결해야 하는 사회적 문제로 대두되었다.^{7,20-23)}

이러한 대기오염의 심화로 도시인들이 휴식과 여가를 즐기기 위해서는 도시를 벗어나 교외나 한적한 장소로 이동해야 하는 도심도피의 현상을 빚어내고, 생활공간으로서의 도시가 아닌 일터로서의 도시화를 만드는 데 일조한다고 여겨지며, 사람의 심리적 분위기를 악화시켜 사회 전반적인 면에 있어 부정적 요인이 되는 것으로 판단된다.

근래에 들어 이러한 문제점을 해결하기 위한 각종 정책과 노력이 성과를 보이기 시작하여, 2002년 $76\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었던 미세먼지농도가 2005년에는 $58\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록하였으며 2008년에는 $55\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮아졌다. 그러나 총량적인 저감이 가져오는 것은

체감도 개선에 국한되어 정작 인체에 유해한 영향을 미치는 미세먼지와 독성(toxic)을 지닌 미세입자의 부정적 환경에서는 크게 개선되지 못한 것으로 평가되었다. 이러한 현상은 인체의 기능이 저하되는 노인과 발육이 완성되지 못한 어린이 등의 경우 부정적 환경영향이 우려되는 수준으로 판단되어 시급히 개선해주어야 하는 문제이고 이는 개인 또는 국지적으로 해결이 가능한 문제가 아닌 국가적으로 해결해야 하는 공공정책으로 인지되었다.^{5,19)}

이에 서울시에서는 2005년 2월부터 시민들의 생활에 체감도가 높은 먼지 예보제를 도입함으로써 시민들이 실외활동이나 체육활동에 참고토록 하여 건강보호에 도움을 주고자 하였다. 특히 시민생활에 있어 정서상의 영향뿐만 아니라 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있는 미세먼지를 위주로 하여 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 예측되는 경우 실외활동의 자제토록 권고하고 먼지오염도를 줄이기 위한 배출원에 대한 관리를 강화하는 방안을 채택하였으며, $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도의 경우에는 먼지주의보 및 경보 등을 발령하여 시민들이 높은 대기오염으로부터 건강상의 피해를 입지 않도록 하는 방안을 실시하였다.^{3,9)}

1.2. 연구 필요성 및 목적

미세먼지가 심각한 환경적 위해요소이며 생활에 막대한 영향을 주는 요인으로서 작용한다는 것이 밝혀짐에 따라 우리나라에서도 미세먼지의 저감을 위한 노력의 필요성을 인정하여 수도권대기환경개선을 위한 기본계획에 반영하고 있다. 환경부 및 서울시 등에서는 12%의 국토 면적에서 47%의 인구가 밀집된 수도권 지역의 대기질(大氣質)을 2014년까지 미세먼지 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, 이산화질소 22ppb의 개선목표를 설정하고 자동차배출가스 저감, 대기오염물질 배출업소의 배출 총량제(總量制) 시행 등 다양한 개선정책을 추진 중이다.^{17,35)}

미세먼지에 의한 조기 사망자수가 연간 11,127명에 달하고 영아(嬰兒)의 사망률이 9% 증가, 호흡기 질환 사망률은 2배 증가하는 것으로 연구되었으며, 서울시의 시민여론조사 결과('97)에 따르면 응답자의 약 60%가 대기오염이 심각한 상태로 여기고 있고, 서울에 거주하는 외국인(481명)에 대한 설문조사 결과 서울이 살기

나쁜 이유로 교통체증(25.5%)과 환경오염(23.6%)을 꼽고 환경오염 중에 대기오염(40.2%)을 가장 큰 문제로 인식하였다.(대기오염 40.2%, 쓰레기 26.5%, 수질오염 13.5%, 소음·진동 10%)^{9,10)}

현대 도시인들은 여가활동, 운동시간의 증가 등으로 외부의 대기에 직접 노출되는 시간이 많아지고 있으며, 특히 대기의 혼합고가 낮아지는 아침과 저녁에 격한 운동을 하게 되는 경우가 많은데, 시민들이 육안으로 오염도를 판별하거나 일정수준의 오염도가 인체의 건강에 미치는 영향의 수준을 이해하기 어려우므로 세부적인 안내가 필요한데 최근 대기질의 상태는 공공기관을 위주로 하여 실시간으로 오염도를 공표하고 있다.

먼지예보제가 시행된 이후로 시민들의 관심도는 증가하였으나 예보의 적중률이 70% 초반대로 예보모델의 성능 향상과 예보자의 전문성을 확보할 필요가 대두되어 2008년에는 예보시스템을 전문 인력을 확보한 서울시보건환경연구원에서 운영토록 하였다. 그러나 많은 변수의 작용에 따라 변화하는 미세먼지농도를 예측하는 것은 용이한 일이 아니며 기존의 예보모델의 재구성과 예보방법에 대한 재검토가 필요한 것으로 평가되고 있다. 또한 예보모델을 구성하고 있는 모델의 알고리즘(Algorithm)과 이에 사용된 과거의 자료 등이 변화하는 최근의 기후변화 등에 의해 적중률이 저하될 수밖에 없다는 우려 등이 새로운 예보방법의 탐색을 요구하게 되었다.^{1,2)}

본 연구의 목적은 모델에 의해 산정된 예측값을 기초하여 예보자가 비교적 단시간 내 기상 등의 변화를 예측하여 미세먼지농도 범위를 예측하는데 기초자료로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

II. 이론적 고찰 및 선행사례

2.1. 미세먼지의 발생 현황

서울시 미세먼지 발생량은 Table 2.1과 같이 도로 비산먼지를 제외하고 연간 총 4,310톤으로('05년) 전국 발생량 67,343톤의 6.4%를 보이고 있으며, 가장 배출량이 많은 울산광역시(10,530톤/'03년)가 제조업 연소부문에서 57% (6,011톤)로 주된 발생원임에 비해 서울시에서는 도로이동오염원에서 3,009톤이 발생되어 대부분 (70%)을 차지하고 있으며, 비도로 이동오염원에서 913톤(21%), 비산업연소 부문에서 313톤(8.5%) 등이 발생되었다. 미세먼지가 가장 많이 발생하는 도로이동오염원 부문은 자동차의 꾸준한 증가와 함께 '99년부터 지속적으로 증가되어 왔다.⁵⁾

Table 2.1. 배출원별 미세먼지 발생량

(unit : ton)

배출원	계	에너지 산업연소	비산업 연소	제조업 연소	도로이동 오염원	비도로 이동오염원	폐기물 처리
2005년	4,310	14	367	3	3,009	913	4
2006년	3,433	7	363	4	2,690	350	19

세계 주요도시의 대기질에 영향을 미치는 환경요소를 분석해 보면 지리, 지형 등 자연적 요소와 인구밀도, 오염물질의 배출밀도 등 인위적 요소로 구분할 수 있을 것이다. 서울은 런던, 파리 등의 도시들에 비해 인구 밀도가 매우 높고 지형적으로 볼 때 분지형태로서 대기의 정체성이 비교적 높다고 판단된다.

동경은 편서풍 지대에서 동쪽으로 바다를 접하고 있어 확산 잠재력이 클 것으로 판단되며 런던과 파리는 평야에 위치하고 있어 대기 순환에 장애가 없고 대기 정체가능성이 낮다. 반면에 서울은 남단과 북단에 높은 산이 위치하고 있고 동쪽으로도 비교적 높은 구릉으로 둘러싸여 있어 대기확산 잠재력이 낮다.

오염물질 배출총량은 파리가 가장 많으나 배출밀도는 NO_x 및 PM 모두 서울이 가장 높으며, 또한 서유럽은 연중 고르게 비가 내리고 해양성 기후의 영향으로 겨울이 온난하며 동경도 해양과 인접해 있어 비교적 온화한 날씨를 보이고 있는 반면,

서울은 강우량이 여름에 집중되어 있고 겨울에 대륙성 고기압의 영향으로 매우 추운 날씨를 나타내는 등 스모그 잠재력(즉, 2차 오염물질 생성 잠재력)이 타 도시에 비해 크다. 즉 서울의 대기질이 타 도시에 비해 떨어지는 이유는 오염물질의 배출 밀도가 높은 것이 주된 요인이라고 할 수 있으나, 자연적인 여건에 의한 확산잠재력이 낮은 것도 대기질을 악화하는데 크게 기여하는 것으로 볼 수 있다.

이는 서울의 청정지역으로 대표될 수 있는 북한산측정소의 '07년도 미세먼지농도가 $46\mu\text{g}/\text{m}^3$ ('06년 $41\mu\text{g}/\text{m}^3$, '05년 $44\mu\text{g}/\text{m}^3$)인 것을 보더라도 외부적 요인과 서울의 지형적 요인에 의해 미세먼지농도가 높다는 것을 보여준다.

따라서 서울시 미세먼지농도를 예측하기 위해서는 오염원의 배출량을 정확히 파악하고 기상 조건과 외부에서 유입되는 오염도 등을 규명하는 것이 필요하다고 볼 수 있다.¹⁹⁻²²⁾

2.2. 미세먼지 예보제 선행사례

미세먼지가 인체에 유해하고 생활환경에 부정적 요인으로 작용함에 따라 미국, 영국 등 주요 선진국 등에서는 인간의 생활환경에의 중요한 영향요소로서 오존과 미세먼지 등을 유의하여 관리하고 있으며, 기상과의 상관관계를 분석하여 적용하는 통계모델을 기본으로 한 미세먼지 예보제를 시행하여 주민에게 미세먼지에 대한 정보를 기상예보와 유사한 수준으로 제공함으로써 사람들이 일상생활에서 활용하도록 하고 있다. 특히 미세먼지에 취약한 그룹인 노인, 어린이, 기관지 및 호흡기질환자들이 미세먼지 예보정보를 적극 활용하고 있다.

1. 미세먼지 예보제 시행 사례

1) 미 국

미국 환경청은 인구 350,000명 이상인 주요 도시와 주정부를 대상으로 실시간으로 측정된 오존 및 미세먼지를 포함한 오염물질의 대기질 현황을 인터넷(AirNow)을 통해 공개해 왔으며, 2003년 10월부터는 오존 및 미세먼지(주로 $\text{PM}_{2.5}$)를 대기질 지표인 AQI(Air Quality Index)를 이용하여 275개 도시를 대상으로 예보를 시행하고 있다.²⁾

예보작업은 각 주와 지방청의 대기 전문가 및 기상 전문가 등에 의해 미세먼지 오염도를 하루 전에 예보하고 있으며, 대기질 지수(Air Quality Index)는 Good에서 Hazardous까지 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 간격의 6단계로 구분하고 있고, 실시간 미세먼지농도 ($\text{PM}_{2.5}$)를 전국 지도에 등급별 색깔(Color)을 이용하여 농도 등급을 동시에 게시하고 있다.(Table 2.2)

Table 2.2. 대기질 지수

Numerical Value	Air Quality Index Levels of Health Concern	Meaning
0 to 50	Good	Air quality is considered satisfactory, and air pollution poses little or no risk
51 to 100	Moderate	Air quality is acceptable; however, for some pollutants there may be a moderate health concern for a very small number of people who are unusually sensitive to air pollution
101 to 150	Unhealthy for Sensitive Groups	Members of sensitive groups may experience health effects. The general public is not likely to be affected.
151 to 200	Unhealthy	Everyone may begin to experience health effects; members of sensitive groups may experience more serious health effects
201 to 300	Very Unhealthy	Health alert: everyone may experience more serious health effects.
301 to 500	Hazardous	Health warnings of emergency conditions. The entire population is more likely to be affected

또한, 미국 San Francisco만을 중심으로 구성된 BAAQMD(Bay Area Air Quality Management District)는 대기질을 실시간으로 공개하고 있고, 이와 더불어 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)와 오존농도 5일간의 예측값을 예보시스템에서 운영하고 있다. 다음날의 예보값은 AQI값으로 자세히 예보가 되고 있고, 나머지 4일간을 AQI지수의 범위로 예보하고 있다.⁴¹⁾

익일 예보 값이 기준치를 초과할 시에는 사람들에게 대기사전경보(Air Alert)를 발령하여 언론매체를 통해서 하루 전에 알려주고, 그에 따른 국민들이 배출량을 저감하기 위한 참여방법을 홍보하여 자발적인 참여를 유도하는 프로그램(Spare

the Air)을 운영하고 있다. 참여프로그램으로 대중교통의 이용 등의 차량 운행 억제, 목재용 난방 자제, 주유 시간대 조정, 페인트 등의 유기용제 사용 억제 등이다. 겨울철에는 미세먼지를 중점적으로 예보하고, 봄철 및 여름철에는 오존을 중심으로 운영하고 있다.

2) 영국

영국에서는 AQA(Air Quality Archive)에서 대기질의 실시간 공개 및 예·경보를 하고 있다. 전체 지역을 16개 구역으로 나누어 대기질 지수(band index)를 이용하여 오존(O₃), 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(CO), 미세먼지(PM₁₀)를 종합적으로 판단하여 실시간 대기오염도 공개 및 예보를 한다.

Table 2.3. 영국의 대기질 예보

예보주체	NETCEN(National Environmental Technology Center)와 기상청(Met. office)
예보공개	영국 환경청(DEFRA - AQA)
예보항목	PM ₁₀ , O ₃ , CO, SO ₂ , NO _x 를 종합한 대기질
기간·방법	16시에 지수(Band Index)로 24시간 예보
모델종류	수치모델(Trajectory Ozone model, NAME model, box model)

경보 기준 농도(Threshold Concentration)가 초과 시에 즉시 경보를 발령하여 배출원 제어 등의 조치를 수행하고 있고, 이와 더불어 주요 도시 및 주정부에서 24시간 대기질을 예보하고 있다.(Table 2.3)

또한 Cambridge Environmental Research Consultants를 통하여 일부지역에 미세먼지 예보를 실시하고 있다. CERC에서는 일반적으로 사용하는 통계모델이 아닌 배출원 산정 프로그램과 대기확산 모델링 소프트웨어인 ADMS를 이용하여 지역별로 오염도를 예보한다. 예보는 최대 농도분포를 지도에 등농도(等濃度)를 그려 표시해준다.(Table 2.4)

Table 2.4. 대기오염경보 시 행동요령

What should I do when I receive an air TEXT alert?		
MODERATE AIR POLLUTION	HIGH AIR POLLUTION	VERY HIGH AIR POLLUTION
What health effects may I notice?		
<ul style="list-style-type: none"> You may notice mild health effects You are unlikely to need to take any action but be aware of your symptoms Take reliever medication with you as a precaution 	You may notice significant effects such as wheezing or more difficulty in breathing or chest pains if you have a heart condition	You may notice a worsening of breathing difficulties or chest pains if you have a heart condition

3) 노르웨이

노르웨이(오슬로)는 3차원 예측모형을 이용하여 NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}에 대해 예측하고 오염도가 심각할 때 교통통제를 시행하고 있으며, 1일 평균 PM₁₀이 100µg/m³ 이상일 때 오슬로 주요 진·출입 도로에서 60km/hr 이하로 통행속도 제한(속도 계측기 설치)하고 있다. 이 제도는 1999년 겨울부터 시행하였으며 주로 겨울철에 평균 10회 정도의 교통통제가 발령되는 것으로 알려진다.

4) 일본

일본의 경우는 과거 동경부에 한해 대기질 예보시스템이 있었으나 최근에는 대기질 공개시스템으로 전환한 후 광화학 옥시던트에 한하여 주의보 및 경보 시스템을 발령하고 있고, 또한 국립환경연구소는 황사 및 미세먼지를 동아시아 지역 대상으로 다음 날의 농도를 예보 중에 있다.(Table 2.5)

광화학산화제에 대한 주의보 및 경보 시스템(Soramame)는 광화학산화제(광화학 옥시던트)를 경보하고 있다. 주의보는 광화학산화제 농도의 1시간 측정값이 0.12ppm이상인 경우에 기상상황을 참고하여 그 상태가 계속된다고 인정되면 발령한다. 경보는 각 도도부현(都道府縣) 등이 독자적 요강(要綱)을 정하고 있는 것으로, 일반적으로는 광화학산화제 농도의 1시간치가 0.24ppm이상으로, 기상상태가 계속된다고 인정되면 각 도도부현 등이 정한 요강에 의하여 발령한다.

동경에서는 광화학물질에 대하여 학교정보(분홍색), 주의보(노란색), 경보(빨간

색) 발령지역과 예보(파란색) 발령지역으로 구분하여 표시한다. 일본 시스템의 특징은 중앙에서 집중 관리하고 있으며 전국 47개 지역별, 측정소별 측정값을 등급 방식으로 공개하고 있다. 측정 자료는 공개시스템으로 수집되어 옥시던트와 화산 가스 중 황화합물 농도에 대한 주의보·경보 시스템을 운영하며, 미세먼지는 측정소별 현황농도를 지도위에 표현하는 방식으로 관리한다.

Table 2.5. 일본의 대기질 예보

예보주체	국립환경연구소
예보공개	국립환경연구소
예보항목	미세먼지(황사, 에어로솔), SO ₂
예보기간	1530 UTC 한번
예보방법	농도
모델종류	수치모델(RAMS, CMAQ)

그 밖에 캐나다, 프랑스 등에서도 모델을 이용하여 예보를 시행중으로 세부내용은 아래와 같다.(Table 2.6)

Table 2.6. 각국의 대기질 예보

국가명	시행기관	사용모델	예보물질	대상지역	예보주기	예보형태
캐나다	환경청	통계 및 수치(CHRONOS)	O ₃ , PM 등	동부 서부 중부	익일 매시간 6시간(수치)	등농도 AQI
프랑스	INERIS	통계	O ₃ , PM _{2.5} 등	전국	익일 고농도	등농도
덴마크	NAEI	통계 및 수치	O ₃ , PM ₁₀ 등	전국 8개 지점	익일 고농도	등급
독일	베를린주	통계 및 수치	O ₃	베를린	익일 고농도	등농도

5) 국내 사례

우리나라에서도 대도시에서 거주하는 시민들이 생활의 질적 수준의 향상과 더불어 건강과 관련한 중요한 요인으로서 대기오염 항목들에 유의도가 높아지는 추세이다. 이러한 사회적 요구에 부응하기 위하여 서울시는 1995년 7월부터 오존경보제를 시행하여 왔으며, 2005년 1월 5일 “서울특별시 먼지예보 및 경보에 관한 조례”를 공포하고, 그 해 2월 1일부터 미세먼지 예·경보제를 시행하였다.

아울러, 먼지농도를 줄여 체감오염도를 줄이고 쾌적한 생활환경을 조성하여 건강수명을 늘려 나갈 수 있는 대기 개선정책의 교두보를 마련함과 더불어 미세먼지 예·경보 홈페이지를 개설하여 시민들에게 대기오염정보를 실시간으로 제공하였다. 또한 2004. 10월부터 미세먼지 예보와 더불어 이산화질소 등 5개 항목의 오염도를 서울시보건환경연구원 인터넷홈페이지를 통하여 공개함으로써 시민들이 실시간으로 볼 수 있도록 하고 있다.

2006년 이후에는 경기도와 인천광역시에서도 미세먼지 예·경보제를 시작하였고, 환경부에서는 수도권 지역의 미세먼지예보를 통합하여 광역적으로 대기환경정보를 제공하는 인터넷 서비스를 시행하였으며, 5대 광역시 대기오염도 공개를 위한 홈페이지를 개설하여 시행중이다.

Table 2.7. 미세먼지 예보절차

자료수신	자료통계	예보모델의 예보값 산출	예보관의 예보값 검토	예보값 송출
대기오염도 자료 (5개 측정소) 기상자료 서울기상대	대기오염도 자료 (SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃ , PM ₁₀) 기상자료 (풍속, 기온, 습도, 강우량)	신경망모델 회귀모델 고농도신경망모델 고농도회귀모델	기상자료 등 추가 항목 검토 기류궤적 (NOAA) Wind Rose, 혼합고, 역전층, 안개 등	자치구, 방송사, 교육기관, 인근자치단체 인터넷 홈페이지 SMS, E-mail

서울시는 Table 2.7과 같이 미세먼지의 예보뿐만 아니라 시민의 대기오염으로 인한 피해의 예방을 위하여 경보제를 병행하였다. 이를 위해 “서울특별시 미세먼지예보 및 경보에 관한 조례”를 제정하여 제도적 기반을 갖추었으며, 미세먼지주의보 및 경보가 예측될 경우 25개 자치구 및 시 산하 공원·고궁·체육시설 관리사업소 등에 관계공무원이 발령을 대비하여 비상근무체제를 유지토록 하고, 경보가 발령되거나 해지될 경우 또한 SMS 및 인터넷, 팩스 등을 통해 신속히 전파함으로써 시민생활에 편의를 도모하도록 하였다.

미세먼지예보는 2001년부터 2003년까지 3년 동안의 풍속(風速)과 강우량(降雨量), 혼합고(混合高), 역전층 유무 등의 기상 예보자료와, 5개 항목의 대기오염자료 등을 이용하여 신경망모델 및 회귀모델, 고농도신경망 및 고농도회귀모델 등을 제작하였으며, 이 모델을 이용하여 미세먼지농도를 예측하고, 2001년부터 통계자료가 유효한 시점까지의 기상 및 대기오염도 자료에 의한 실측치를 검색하여 고·저층의 대류와 지표기류(地表氣流) 등 국지적 영향요인들을 검토하여 최종적으로 예보일의 예상되는 미세먼지농도를 결정하여 예보하는 시스템이다.¹⁾





대기오염도 자료 중 미세먼지 예보시스템에 사용되는 항목은 SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀이며, 시간별 자료를 입력받아 시간 평균값을 입력 자료로 하고, 현재 미세먼지 예보시스템에서는 대기오염도 자동측정망의 자료를 QA/QC를 하지 않고 수신되는 모든 자료를 사용하여 평균을 구하고 있다.

Table 2.8과 같이 기상자료는 서울기상대로부터 수신되는 시간자료를 FTP(File Transfer Protocol)로 수신하여 사용한다. 미세먼지 예보시스템에 사용되는 기상자료 항목은 당일의 예보 직전 시간(16시)까지의 풍속, 온도, 습도, 강수량 자료의 평균을 사용하고, 강수량은 전일 00:00부터 24:00까지의 강우 총량 자료를 예보모델에 사용한다.

Table 2.8. 미세먼지 경보 기준

구 분	발령기준	해제기준
미세먼지 주의보	시간당 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속시	시간당 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하시
미세먼지 경보	시간당 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속시	시간당 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하시

Table 2.9. 서울의 미세먼지 예보지수

인체영향	좋음	보통	민감한 사람에게 나쁜 영향	약간 나쁨	나쁨	매우 나쁨
예보기준 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{일}$)	0~50	51~100	101~150	151~200	201~300	301이상
캐릭터						

미세먼지 예보횟수는 Table 2.9와 같이 일 2회(익일 예보 18시, 당일예보 09시)를 시행하며, 미세먼지 예측농도에 따라 “좋음” 부터 “매우 나쁨” 까지 6단계로 구분하고, “좋음” 과 “보통” 은 동일한 캐릭터 아이콘을 사용하며, “나쁨” 과 “매우 나쁨” 도 각각 동일한 캐릭터를 사용하였다.('09. 5월 일부 개정)

Ⅲ. 연구내용 및 방법

3.1. 연구내용

미세먼지예보의 정확도를 향상시키는 방안에 대하여 현실적으로 사용되는 지식 체계로는 많은 제약조건이 있고 미세먼지의 발생과 거동, 소멸에 대하여 불확실도가 완전하게 제거될 수 없을 것이다. 우선 미세먼지를 발생시키는 원인에 대하여도 정확한 파악이 어렵고, 1차 배출 미세먼지(primary particles)와 대기 중에서 생성되는 2차 입자상물질의 기작도 정량적으로 분석하기 어려우며, 시계열적인 변화의 폭도 기상의 여건 등에 따라 일률적이지 않으며, 생성기작에 영향을 미치는 메타조건(Meta condition)으로서 기상의 변화도 예측하기 어려운 문제이다.

또한 외부에서 유입되는 정도에 대하여도 측정이 이루어지지 않은 상태이므로, 대기오염물질의 변화량을 정량적으로 예측하기 어려우며 중국과 동아시아 등에서 발원되는 오염량도 추정하기 용이한 것은 아니지만 서울지역으로 유입되는 오염물질의 개략적 추정량은 계절별로 유사한 범위로 추정한다. 이를 전제로 하여 특정한 추세를 보이는 강우와 풍속 등 기상조건의 영향특성을 추정함으로써 미세먼지 농도에 미치는 영향과 정도에 대해 연구를 진행하고 이를 토대로 모델예보를 보완하여 예보를 시행할 수 있도록 함으로서 적중률을 높일 수 있는 방법을 찾고자 한다.

본 연구에서는 기존의 서울시 예보결과를 통해 미세먼지 농도에 영향을 미칠 수 있는 기상여건 변수를 알아보고, 여기서 영향력이 큰 강우와 풍속, 풍향, 안개(박무), 상대습도, 일교차, 기압 등 기상여건 및 미세먼지 오염도에 영향을 미치는 지형적 특성을 통한 배경농도, 미세먼지농도의 상관도 및 계절별 영향특성 등을 분석하고자 하였다. 기상변수의 변화에 따른 미세먼지농도의 변화가능성을 파악하며, 아울러 2차 미세먼지를 형성하는 것으로 보고되는 기체상 물질의 상관도를 평가하고자 하였다. 이를 토대로 보다 여러 고려 요인들을 파악하여 예보 정확도를 높일 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

3.2. 연구방법

1. 연구방법

연구방법은 2005년부터 2007년까지 3년간 서울시 27개 대기측정소에서 실측한 자료와 미세먼지 예보실적, 기상청의 기상측정자료를 이용하여 회귀분석을 시행하고, 또한 미세먼지농도에 대한 기상변수의 영향력과, 각 변수 간 공변성의 추세 등을 분석한다.

미세먼지농도에 영향을 미치는 변수의 추정은 2005년도 서울시 환경국에서 예보제 시행 후 결과보고서에서 언급된 기상항목과, 최근까지 영향인자로 보고되고 있는 대기오염항목 및 기상항목 등 미세먼지 예보 시 직접적으로 영향을 미치는 요인과 각 변수들의 변동을 추측하는데 보조적으로 활용하였던 요인들을 상정하여 분석하였다. 즉, 미세먼지농도에 영향을 미치는 아황산가스(SO₂) 등 대기오염물질과 강우(Rain), 풍속(Wind speed), 상대습도(Relative humidity) 등 변수들을 각각 추정하여 개별 항목에 대해 미세먼지농도와와의 상관도를 확인하고 기본적인 영향력을 확인하였다.

본 연구에서 적용한 회귀분석은 목적변수에 대해 각 독립변수들이 가지는 설명력과 상관도를 산출할 수 있고 이를 토대로 장래의 예측과, 예측오차의 범위를 추정할 수 있으며, 경험적으로 관찰된 현상의 설명과 부합되는 측면이 있고 또한 범용성 있는 분석방법이므로 활용에 큰 문제점이 없을 것으로 판단된다.

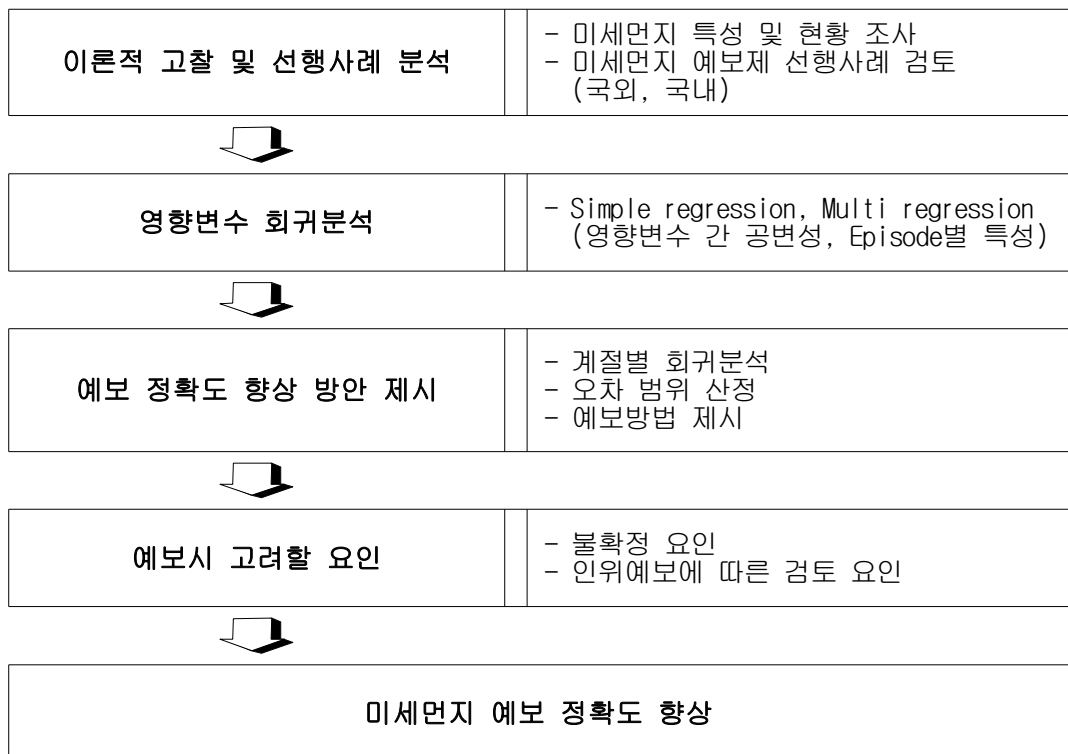
그러나 단회귀분석(Simple regression)은 다중회귀(Multi regression)시와 다소 다른 값을 나타낼 수 있고 또한 기상요소들 사이에 공변성이 예측되므로 단회귀시와 다중회귀시의 차이에 대하여도 검토하였다. 예보모델은 일평균 미세먼지량(Y)과 전일 평균습도(X)의 관계 등을 이용한 중선형(中線型) 회귀모델이며, 미세먼지 예보모델에서는 설명변수(독립변수)가 4개의 환경인자와 5개의 기상인자 등 10개로서 중선형 회귀모델을 사용하였다. 중선형 회귀모델은 실제 응용에 있어서 Simple Regression Model보다 실질적인데, 대부분 독립변수 1개로 특정 현상을 설명할 수 있는 경우는 드물고, 다수의 독립변수에 의해 영향을 받으며, 변수들 간에도 공변성도 존재하기 때문이다. 중선형 회귀모델에서는 종속변수 Y와 k 개의 독립 변수 X₁, ..., X_k가 다음과 같은 관계식을 가진다고 가정한다.

$$Y_i = a_0 + a_1X_{i1} + \dots + a_kX_{ik} + e_i$$

대기오염물질 각 항목은 배출원에서 단일항목만 배출되는 경우가 없고 2 이상의 항목이 동시에 배출되며, 기상의 각 항목은 대부분 2 이상의 변수에 의해 공변성을 가지게 되므로 중회귀분석에서 Step wise 분석으로 할 경우 변수의 변화에 대하여 검토하고, 변수의 증가에 따라 높아질 수 있는 설명력에 대하여는 경험적인 추리로서 평가하였다.

마지막으로 기존 회귀모델에서 추정된 회귀식에 계절에 따른 기상의 항목별 특성을 고려하여 민감도를 파악하고 서울의 미세먼지농도에 기여하는 배출원별 영향을 살펴봄으로서 미세먼지농도의 변화폭을 예측할 수 있게 하여 예보정확도를 높일 수 있는 방법에 대해 논의하고, 향후 회귀모델의 성능향상에 필요한 자료의 활용도를 높이고자 하였다.

Table 3.1. 분석절차 및 방법



IV. 연구결과 및 고찰

4.1. 미세먼지농도의 영향변수

1. 기상변수의 영향

미세먼지 예보모델은 과거자료를 이용하여 학습함으로서 적중률이 비교적 높게 설계되어 있으나, 실제로 만족할 만한 수준에 이르지 못하고 있으며 예보자에 의한 인위적 예보가 당초 모델의 설계 적중률에 이르고 있다. 이는 여러 가지 요인에 의하여 나타나는 결과이겠지만 가장 큰 영향을 미치는 것은 역시 예보모델에 입력되는 기상예보의 오류에 기인한다고 추정해 볼 수 있으며, 특히 풍속과 강우(량), 안개(박무·연무)의 발생여부에 의해 미세먼지농도의 변화가 심하므로, 기상항목의 예측에 의해 미세먼지예보의 정확도가 좌우된다고 할 수 있겠다.

미세먼지 예보결과의 적중 여부와 오차의 발생원인 등을 분석하여 정확도 향상을 위한 분석 자료로 활용하기 위해 '06년 1월부터 8월까지 미세먼지예보가 적중하지 않은 경우 예보담당자들은 각자가 판단하는 오보의 원인을 기록하였는데, 74일간의 오보원인이 기록된 내용을 보면 예보가 적중하지 않은 경우 원인이 된 기상항목은 Table 4.1에서와 같이 박무와 풍속, 강우, 황사 등에 의한 것이다.

Table 4.1. 미세먼지 오보의 영향변수('06. 1~8월)

구 분	안개(박무·연무)	강우(량)	풍 속	황 사	계
안개(박무·연무)	25				25
강우(량)	10	2			12
풍 속	2	6	3		11
황 사	6			20	26
계	43	8	3	20	74

미세먼지예보 중 74일의 비적중일 중 안개(박무, 연무)가 강우, 풍속 등과의 복합적 영향에 의한 비적중일이 43일로서 약 58%를 차지하며, 안개의 영향이 오보의 유일한 영향이었던 날은 34%인 25일로서 가장 많은 비중을 차지한다.

황사의 직접적인 영향과 황사가 지나간 후 잔류황사의 영향, 백령도 등을 스쳐가는 원거리 황사의 영향과, 황사와 박무의 영향을 동시에 받은 오보는 26일, 강우와 풍속, 박무의 영향을 함께 받은 날은 18일로 나타나며, 풍속과 안개의 영향으로 인한 오보는 2일, 풍속의 영향에만 의한 오보는 3일로 나타났으며, 황사와 박무로 인한 오보는 6일이었다.

1) 강우의 영향 분석

서울지역을 비롯한 우리나라 전반에 걸쳐 강우는 여름철에 집중되는데 2005년부터 2007년까지 강우기록을 보면, 6월부터 9월까지의 강우량이 연간 강우량의 74%를 차지하고 있다.

먼지예보의 정확도 향상을 위한 연구를 위해 과거 3년(2005년~2007년) 동안의 실측자료를 이용하여 분석한 기상요인의 영향을 Table 4.2에 나타내었다.

Table 4.2. 서울의 강우일 및 강우량 (단위 : 일, mm)

월별 년도		계	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
		평 균	강우일	145	8	8.3	12	11.3	10	14	20.7	18.7	14.7	7.7
강우량	1,417. ⁵		16.5	15.2	50	62.5	126.5	130.5	519.2	214.6	188.8	40.8	39.5	13.4
2007	강우일	166	6	7	17	13	13	15	20	21	21	11	8	14
	강우량	1,212. ³	10.8	12.6	123.5	41.1	137.6	54.5	274.1	237.6	241.9	39.5	26.4	12.7
2006	강우일	137	8	8	12	12	9	13	26	15	9	5	12	8
	강우량	1,681. ⁹	34.3	15.7	14	51.8	156.2	168.5	1,014	121.2	11.1	30.2	47.6	17.3
2005	강우일	134	10	7	7	9	8	14	16	20	14	7	13	9
	강우량	1,358. ⁴	4.5	17.2	12.5	94.7	85.8	168.5	269.4	285	313.3	52.6	44.6	10.3

강우는 오염물질의 세정과 용해, 재비산 방지 작용 등을 통해 대기 중 미세먼지 등의 오염도 경감에 단기적으로 영향을 미치는 가장 큰 요인으로 볼 수 있다. 그러나 또한 많은 양의 강우량은 대기의 세정효과를 가질 수 있으나, 미소한 강우량은 상대습도를 증가시키고, 대기의 정체(停滯)시 미세먼지농도를 높게 상승시키는 현상을 볼 수 있다.

이는 수변지역(水邊地域)의 미세먼지농도 추이를 보면 특히 알 수 있는데, 서울 지역이 전반적으로 미세먼지농도가 낮은 경우에도 수변에 위치한 송파1측정소(송파구 방이동)와 성동측정소(성동구 서울숲) 등은 비교적 넓은 수면(水面)이 인접한 특성으로 인해 미세먼지농도가 상대적으로 높아지고, 상대습도가 높거나 박무가 끼는 시간대에 높았던 미세먼지농도가 안개가 걷히면서 낮아지는 현상을 자주 볼 수 있다.

그러나 강우가 시작되면 미세먼지농도는 낮아지기 시작하며 일정한 양 이상의 강우가 있는 날은 황사가 있는 경우를 제외한 대부분의 경우 미세먼지농도가 낮게 나타나는데, '05년부터 '07년까지 강우일과 미세먼지농도의 추이를 보면 강우일과 미세먼지농도가 음의 상관성을 가지는 것을 볼 수 있었다(Fig.4.1~4.3).

강우일에 대한 영향여부를 보기 위해 강우일과 비강우일에 대한 더미변수(Dummy Variable)를 사용하여 분석한바 강우일은 미세먼지농도에 대하여 음(-)의 효과를 보이는 것으로 나타났다($Y=58.8548-0.8805\text{Rain}$). 이는 미세먼지에 대한 강우의 영향이 비강우일에 비해 상당히 많이 작용하는 것으로 판단하게 된다.

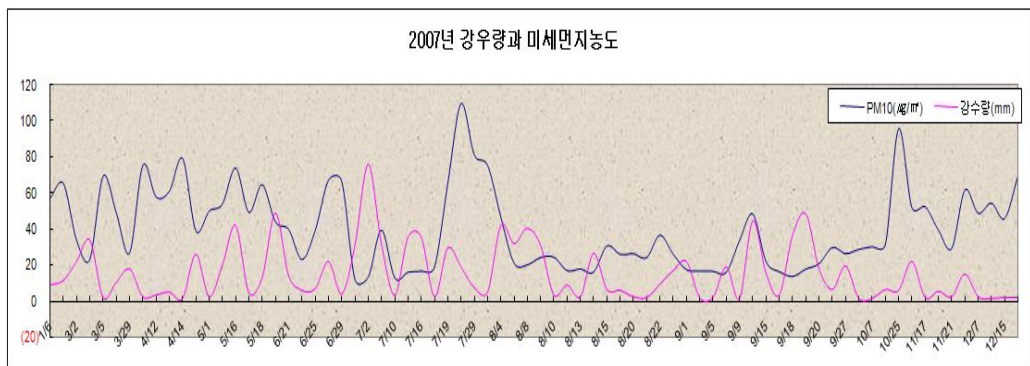


Fig. 4.1. 2007년 강우일과 미세먼지농도.

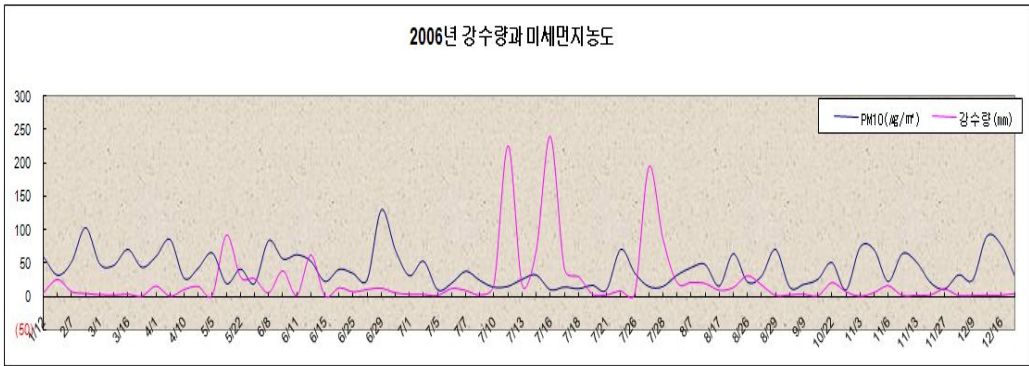


Fig. 4.2. 2006년 강우일과 미세먼지농도.

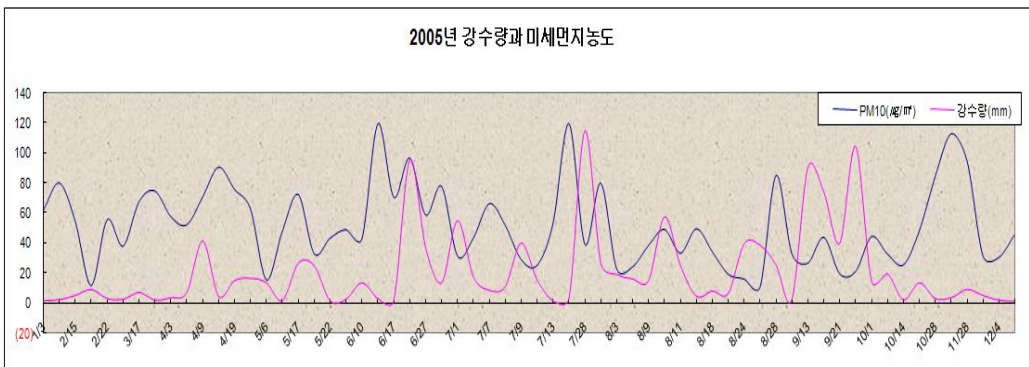


Fig. 4.3. 2005년 강우일과 미세먼지농도.

미세먼지농도가 통상적으로 높게 유지되는 봄철과 겨울철에도 강우일이 많은 '07년 3월의 경우, '05년의 $62\mu\text{g}/\text{m}^3$, '06년 $72\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮게 나타났다. '05년 4월의 경우 강우량은 가장 많으나 '06년과 '07년 4월보다 강우일이 적어 미세먼지농도는 높았는데, 일시적인 강우에 의해 미세먼지농도가 낮아질 수 있으나 서풍의 지배적인 영향 하에서는 유입되는 오염물질과, 도시에서 배출되는 오염물질에 의해 강우로 인한 세정효과가 장시간 지속되기 어렵다는 점을 시사하는 것으로 보인다.

Table 4.3, Fig. 4.4의 '05년부터 '07년까지 황사가 발생하였던 35일과 황사영향이 지속된 4일 등 총 39일을 제외하고 1,056일간의 강우일과 미세먼지농도 관계를 보면, 총 강우일은 419일이었으며, 단회귀분석(Simple Regression Analysis)의

상관도는 -0.226으로 나타났다. 황사를 제외한 날의 미세먼지농도와 강우일의 연도별 상관도를 보면 '07년 158일의 강우 시 -0.274, '06년 131일의 강우 시 -0.293, '05년 130일의 강우 시 -0.153이며, 총 강우일과의 차이는 황사발생일과 황사영향일을 제외한 것이다.

Table 4.3. 계절별 강우일과 미세먼지농도 상관도

	1월~3월	4월~6월	7월~9월	10월~12월
2007년	-0.52	-0.11	-0.13	-0.02
2006년	-0.31	-0.25	-0.32	-0.39
2005년	-0.18	0.28*	-0.26	-0.15

기간별로는 '07년 1분기가 -0.515로 가장 높게 나타났으며, '07년 4분기는 -0.031로 낮게 나타났다. 또한 월별 상관도는 '07년 3월이 -0.586으로 가장 높았고 6월은 0.014로 낮았는데, 미세먼지농도가 낮아지는 여름철로 접어들면서 강우에 의한 세정효과의 폭이 상대적으로 낮게 나타나고, 이는 도로변 등의 침적물질 및 대기 중 오염물질 총량의 감소와 더불어 낮은 오염기류인 동풍의 유입이 잦은 이유로 보인다.

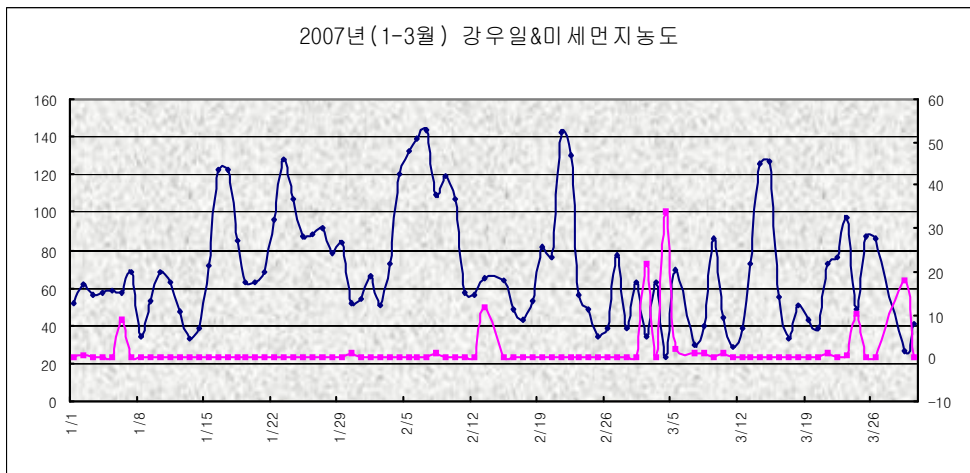


Fig. 4.4. 강우일과 미세먼지농도(2007. 11월~3월).

연도별 상관특성을 보면 '06년은 사계절 모두 유사하게 강우일과의 상관도가 나타났고 '07년에는 1월에서 3월 사이 특히 높은 상관성을 보였으며, '05년 2분기(4월~6월)는 양의 상관도를 보였는데, 이는 4월 달에 집중된 황사 등에 의해 침적되어 있었던 미세먼지가 강우에 의해 재 비산(再飛散)되는 영향이 컸던 것으로 추정될 수 있으며, 서울시내의 도로물청소가 강화되면서부터 재 비산되는 미세먼지의 양이 감소되었던 것으로 추정해 볼 수 있다.

강우와 미세먼지농도간의 상관도가 경험적으로 지득되는 관측값보다 낮게 나타나는 것은, 강우의 시작과 미세먼지농도 누적계산 시점이 다르기 때문으로 추정되며 강우의 시기와 일일 평균농도의 누적시점을 일치시키는 경우 실질적인 강우와 먼지농도의 상관도는 훨씬 높을 것으로 판단된다.

일일 강우량이 1mm 이상의 날은 '07년 78일, '06년 72일, '05년 65일에 불과해 매일 발생하는 바람에 비해 영향의 지속성이 작다고 볼 수 있다. 그러나 강우는 입자상의 물질뿐만 아니라 NO₂, SO₂ 등 2차 생성물질의 기초물질(Base Source)인 기체상 물질들을 용해하여 대기를 세정함으로써 확산에 의해 오염물질을 이동시키는 바람의 영향보다 근원적으로 오염도를 줄이는 효과가 있는 것으로 볼 수 있다.

예보모델의 경우, 전일 강우량이 17mm 이상인 경우와 당일 예보 강우량이 4.5mm 이상인 경우를 기준하여 대기의 세정효과(洗淨效果)를 가능토록 모델링인자를 고려하였으나, '05년부터 '07년까지의 강우량 대비 미세먼지농도의 변화추이를 보면 일정한 강우가 있는 날의 영향은 있으나, 강우량에 비례적으로 상관도가 높아지지 않는다는 점이다.

강우가 있었던 전체 기간의 상관도는 -0.226이며, 당일 강우량이 4.5mm 이상인 날의 피어슨상관계수는 -0.24, 당일 강우량이 17mm 이상인 날은 -0.18을 나타냈는데, 이는 대기 중의 오염물질이 강우에 의해 낙하되고 지역배출량을 세정할 수 있는 정도의 강우가 온 뒤에는 강우량이 많아지더라도 대기오염도와 지속적인 비례 관계를 갖지 않는다는 점을 설명할 수 있으며, 강우일의 최저 미세먼지농도는 '08년 8월 25일 38.5mm의 강우량 시 10.96 μ g/m³이었다.

그러나 강우시간이 길어져 고습도가 지속되어 일일 평균 상대습도(Relative Humidity)가 높아지는 경우, 상대습도와 미세먼지농도와 음의 상관성이 증가하게 되는데, 다중회귀에서 변수증감에 따른 해석상의 오류가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

Table 4.4. 강우량과 미세먼지농도의 상관도(강우량 4.5mm 이상)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rain	Rh
Pearson Correlation	0.576	0.264	0.573	0.595	-0.098	-0.127	-0.24	-0.299

Table 4.4에서와 같이 강우량이 4.5mm 이상인 142일간의 상관도를 보면, 미세먼지농도와 강우와의 상관성이 높아지나 기온과 풍속의 상관도는 낮아지는바, 강우량이 많아지는 경우 기온과 풍속의 변화는 미세먼지농도에 미치는 영향이 적어지며 강우시간이 길어져 습도가 높아지는 경우에도 상대습도의 음의 상관성이 증가하나 이는 강우의 효과로 추정해야 함을 알 수 있다.

Table 4.5. 강우량과 미세먼지농도의 상관도(강우량 17mm 이상)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rain	Rh
Pearson Correlation	0.507	0.437	0.450	0.500	0.085	-0.159	-0.181	-0.287

Table 4.5, Fig.4.5~4.7에 나타낸바와 같이 강우량이 17mm 이상인 72일간의 상관도를 보면, 상대습도가 음의 강우량이 4.5mm 이상인 때와 마찬가지로 상관도(R)를 보이며, 기온의 경우는 부호가 바뀌는데, 이는 강우량이 많은 경우 기온은 강우에 의해 공변성을 갖는 변수로서 강우 시에는 그 자체로 미세먼지농도에 직접적인 영향을 미치는 요인이 아닐 수 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

또한, 기온과 풍속은 분석 시 유의확률(Significant)이 높아지고 기온의 경우 부호가 바뀌는 점을 미루어 강우시의 기온과 풍속은 강우에 의해 변수간의 자기상관성이 높음을 추정하게 한다. 미세먼지농도와 상관도가 높은 아황산가스, 이산화질소 등 대기오염물질은 양의 공변성(共變性)을 나타내고 강우량이 많아지는 경우에도 높은 상관도를 보이나, 오존(O₃)농도는 증가하지 않는데 전구물질인 이산화질소(NO₂)가 높아지는 경우라도 생성기작의 영향변수인 자외선(Ultra Violet)의 결여로 인한 결과로 판단된다.

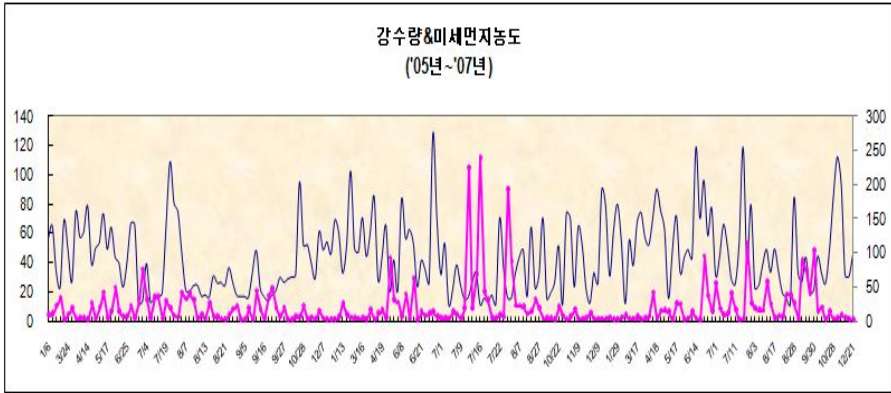


Fig. 4.5. 강우량과 미세먼지농도.(강우량 1mm 이상, '05~'07)

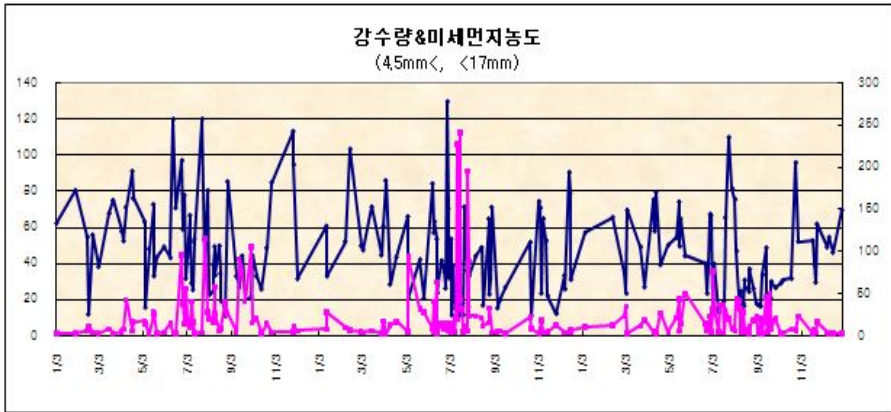


Fig. 4.6. 강우량과 미세먼지농도.(강우량 4.5mm 이상, 17mm 미만)

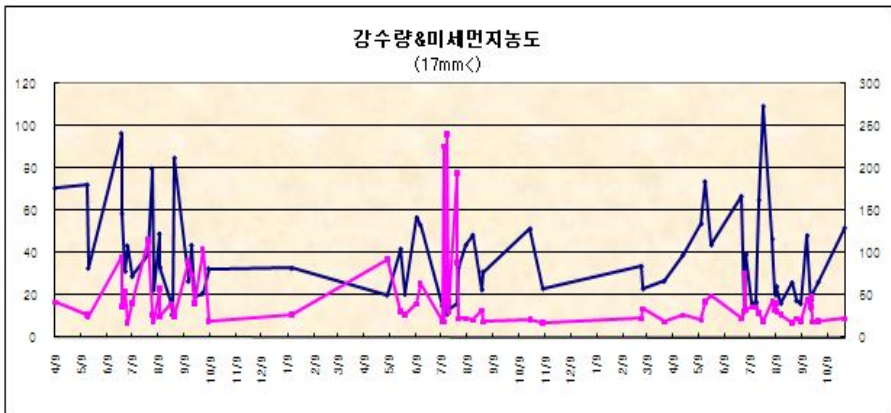


Fig. 4.7. 강우량과 미세먼지농도.(강우량 17mm 이상)

따라서, 대기 중의 미세먼지농도가 강우에 의한 세정영향이 크지만 강우가 시작되고 끝나는 시간에 따라 일별 미세먼지농도 변화의 폭이 크고, 일일 평균농도를 예보하는데 있어서는 강우의 시점과 종료되는 때를 고려해야 함을 의미한다고 볼 수 있다.

즉 오후 늦게 짧은 시간 동안 비가 많이 올 경우라도 이미 하루의 대부분 동안 미세먼지오염도가 고농도를 유지했다면 강우에 의한 세정효과로 강우 후 미세먼지농도는 낮아질 수 있으나, 장시간 동안 고농도로 유지되었을 경우 산술평균으로 지수값을 평가하기 때문에 일일 평균농도의 저하를 기대하기 어려울 것이므로 미세먼지예보에 있어서는 강우일의 시간적 저감효과를 고려해야 할 것으로 보인다.

Table 4.6에 강우가 있었던 시간의 미세먼지농도 변화를 보기 위하여 황사가 발생하였던 날을 제외한 날 중 0.1mm 이상 강우가 있었던 시간자료 1,399개를 이용하여 분석한 미세먼지농도와 강우의 상관도(Correlation-Bivariate)는 -0.067로 음의 효과를 보였다.

Table 4.6. 강우량과 미세먼지농도(강우량 0.1mm 이상, 시간자료)

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-50.626	4.974		-10.177	.000
SO ₂	5388.002	340.569	.418	15.821	.000
O ₃	622.431	48.912	.320	12.726	.000
NO ₂	315.266	69.276	.143	4.551	.000
CO	41.548	4.523	.328	9.187	.000
temp.	.314	.081	.085	3.875	.000
ws.	-.730	1.254	-.014	-.582	.560
rain	-.190	.117	-.030	-1.629	.104
hum.	.355	.038	.212	9.336	.000

단회귀분석 시는 음의 상관도를 나타냈고($Y=48.284-0.419\text{Rain}$ 로), 대기오염항목과 기상요인을 포함한 다중회귀 시에도 강우와 풍속은 비교적 높은 음의 상관도를, 기온과 상대습도는 양의 상관도를 나타냈다

이 연구에서 유의수준(Significant)은 통상적으로 사용하는 수준인 5%로 하였으므로, 풍속(W_s)과 강우(Rain)의 경우 유의수준을 벗어나 통계적 의미가 약하다고 판단할 수도 있으나, 이는 많은 독립변수에 의한 다중공선성(multicollinearity) 때문인 것으로 판단된다. 즉, 실제로 풍속이 미세먼지농도에 미치는 영향이 유의한 수준임에도 풍속이 다른 변수와의 상관성이나 계절별 차이 등 특정한 기상여건이 동시에 작용할 때, 이들에 의해 영향이 다르게 작용하게 되므로 유의수준이 높아지는 것으로 판단하여야 할 것으로 생각된다.

Table 4.7. 미세먼지농도와 강우일의 다중회귀분석
(풍속 2m/s 미만, 강우 0.1mm 이상)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-57.4076	5.851526		-9.81071	6.64E-22
SO ₂	6227.693	407.7582	0.448961	15.273	3.07E-48
O ₃	677.3835	56.47761	0.324087	11.99384	2.24E-31
NO ₂	363.7022	75.79234	0.162636	4.798667	1.8E-06
CO	36.16691	4.922896	0.290428	7.346674	3.76E-13
Temp	0.430641	0.09435	0.109522	4.564315	5.53E-06
Ws	-4.90287	1.997227	-0.06134	-2.45484	0.014237
Rain	-0.17976	0.125966	-0.0287	-1.42704	0.153831
Rh	0.425606	0.045001	0.231127	9.457772	1.61E-20

미세먼지농도에 상시 영향을 미치는 풍속의 강도에 따라 상관도를 보기 위하여 분석하였다. Table 4.7에 나타낸 시간당 평균 풍속이 2m/s 미만이고 강우량이 0.1mm 이상인 1,203개의 시간자료의 경우 상관도(R)는 -0.079, 단회귀식은 강우가 있는 시간대의 미세먼지농도 저감효과가 높게 나타났으며($Y=49.159-0.492\text{ Rain}$),

기상요인을 모두 포함한 다중회귀에서는 풍속과 강우 모두 미세먼지농도와 비교적 높은 음의 상관도를 나타냈다.

일반적으로 상관도가 0.4 이상의 값을 가질 때 변수 간 상관성이 있는 것으로 보는 통례에서 볼 때, 0.079의 상관도는 독립변수와의 상관성이 없는 것으로 판단할 수 있는데, 이 역시 다수의 독립변수에 의한 영향과 변수 간 공변성에 따른 것으로 추정된다.

Table 4.7에서 보면 t값(편회귀계수의 값/계수의 표준오차)이 강우의 경우 -1.427로서 풍속과 같이 미세먼지농도에의 공헌도가 감소하는 방향으로 나타나며, 대기오염물질항목과 기온(Temp), 상대습도(Rh)는 미세먼지농도에의 공헌도가 비교적 큰 것으로 나타난다.

한편, Table 4.7에서 시간당 평균 풍속이 2m/s 이상이고 강우량이 0.1mm 이상인 182개의 시간자료의 상관도는 0.023, 단회귀식은 풍속이 높아지는 경우에 강우가 미세먼지농도에 미치는 효과는 오히려 양의 부호를 나타내($Y=43.244+0.143\text{Rain}$), 풍속에 따라 강우의 효과가 변화됨을 나타냈으며, 다중회귀의 경우 -0.022로 음의 상관도를 보였다.

Table 4.8과 같이 강우가 양의 상관도를 보이는 것은, 강우량이 미량인 상황에서 높은 오염도의 기류가 유입되는 경우와, 대기가 정체된 상황에서 지역의 오염물질 배출량이 증가하는 경우 등으로 볼 수 있으나, 풍속이 2m/s 이상인 기상조건에서 0.1mm 이상의 강우량이 있음에도 양의 상관성을 보이는 것은 변수간의 다중공선성에 의한 것으로 생각될 수 있다. 상기 조건에서 다중회귀분석 시 변수에 의한 Durbin-Watson 계수는 1.12로 자기상관성은 불확정적인 것으로 나타났다.

다중공선성에 대한 검토는 공차한계(Tolerance limit)를 이용하는 것으로, 일반적으로는 두개의 설명변수끼리의 상관계수가 1 또는 -1에 가까운 경우와, 세 개 이상의 설명변수끼리의 관계를 1차식으로 나타낼 수 있는 등의 경우를 말할 수 있는데, 이 경우 상관도가 높은 변수의 처리문제가 있을 수 있다.

잔차(Error)의 독립성에 관한 검정은 Durbin-Watson¹⁾ 테스트로 실시하여 자기상

1) Durbin-Watson Ratio는 탄도학(彈道學) 분야에서 포탄의 비거리가 균일하지 못하고 흩어지는 것에 관한 자료를 보다 공정하게 처리하기 위해 J.L. 노이만이 1941년 제기한 아이디어에서 힌트를 얻어 J.더빈과 G.S 왓슨이 고안한 것으로, 선형회귀방정식의 오차항에 관한 계열상관의 강약을 측정할 수 있고 설명변수의 결락이나 함수형의 부적합도 판정할 수 있다.

회귀방정식을 계측할 때는 다른 시점의 관찰 값의 오차항은 상관성이 없는 것으로 가정된다. 만

관관계의 유무를 확인할 수 있는데, Durbin-Watson 계수가 2에 가까울수록 자기상관이나 계열상관성이 적다고 볼 수 있으며, 잔차의 독립성 검정에 관한 임계치는 설명변수 3, 관측수가 15일 경우 $0.82 \leq D \leq 1.75$ 로 알려져 있다.

Table 4.8. 미세먼지농도와 강우일의 다중회귀분석(풍속 2m/s 이상, 강우 0.1mm 이상)

Model Summary										
Model	R	R Square	Adjusted R Square			Std. Error of the Estimate			Durbin-Watson	
1	0.826	0.682	0.667			15.222			1.119	
		Cons	Temp	Ws	Rain	Rh	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO
Unstandardized Coefficients	B	-39.685	-0.074	4.361	-0.022	0.180	2,776.9	589.63	420.72	59.59
Collinearity Statistics	Tolerance		0.679	0.856	0.952	0.647	0.391	0.592	0.356	0.2157

위의 결과와 같이 모든 변수가 미세먼지농도에 일관성 있는 상관도를 나타내고 있지 않아 기상항목별 특정한 에피소드에 따라 영향력을 분석해야 할 필요가 있는 것으로 판단되며, 직접적 영향관계로 시간적 지연을 검토할 필요가 있는 것으로 추정되었다. 강우에 의한 미세먼지농도 변화가 실질적으로 가시화되는 것은 일정 시간 진행된 후에 세정효과가 기대되므로 강우가 있는 날의 시간을 지연한 회귀분석(Time-Lag Regression)을 실시하여 강우가 있는 다음 시간대의 미세먼지농도에 미치는 영향을 보았다.

Fig. 3.8과 같이 강우가 있는 후 1시간이 경과한 경우에 비해 2시간 경과 시는 미세먼지농도가 낮아졌으며, 최고 미세먼지농도가 $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높았던 '05년 6월의 경우 강우량이 5mm에 불과하였는데도 미세먼지농도 변화의 폭이 크게 나타나고, 2시간 지연 시는 1시간 지연시보다 미세먼지농도가 더 낮아졌으나, 최고 미세먼지

일, 오차항에 계열상관이 있으면 어떤 시점의 관측값 오차의 영향은 장래에도 영향을 미치게 된다. 즉 특정시점에서 과대추계된 값은 다음의 예측에도 넘겨지므로 올바른 예측이 어렵게 된다. 최소제곱법으로 적용시킨 회귀식에서의 남은 차의 제곱합을 분모로 하고 남은 차의 제차의 제곱합을 분자로 하여 계산하고 더빈-왓슨통계표와 대조하여 계열상관을 검정한다. 이 값이 2에 가까울수록 계열상관은 없는 것으로 판정한다.

농도가 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮은 '07년 4월의 경우는 강우에 의한 변화가 상대적으로 적게 나타난다.

이는 봄철의 고농도 미세먼지가 외부에서 유입되어 강우에 의한 세정효과를 크게 나타내지 않거나 세정효과가 단시간 내에 소멸되는 것으로 추정할 수 있는데 서울의 대기오염특성을 표현하는 것으로 볼 수 있다. 즉 '05년 6월의 경우 강우가 있는 다음 미세먼지농도가 낮아졌으나 교통량 증가 등에 따라 미세먼지농도가 강우가 그친 후에는 현저하게 상승되어 지역 배출오염의 영향이 크게 작용하는 것으로 보이며, Fig. 4.8과 같이 '07년 4월의 경우를 보면 강우가 있는 후에 미세먼지 농도가 변화는 있으나 '05년 6월의 경우처럼 크게 변동이 나타나지 않는바, 봄철에는 외기의 오염도에 의해 보다 많은 영향을 받음을 알 수 있다.

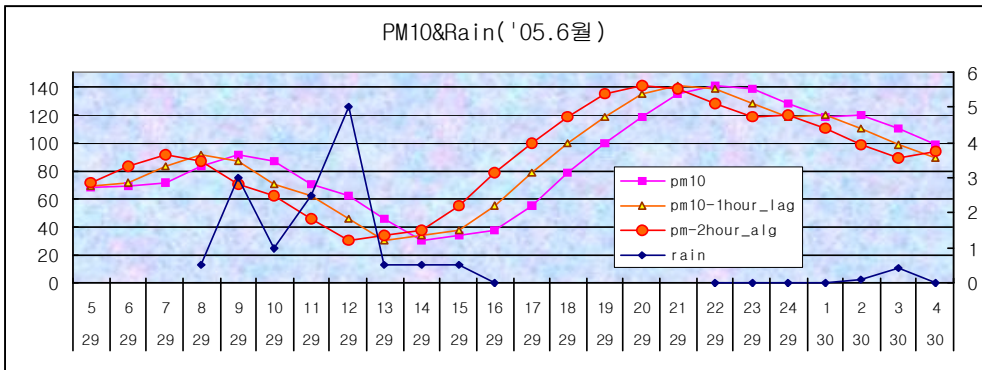


Fig. 4.8. 강우시간 지연 시 미세먼지 저감 효과.('05. 6월)

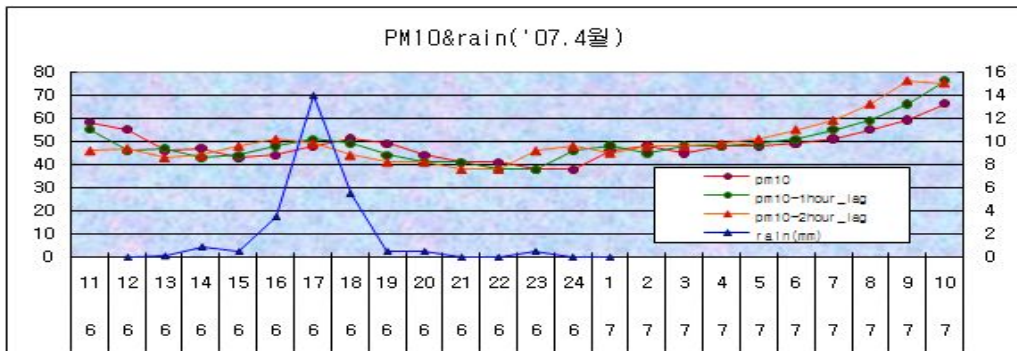


Fig. 4.9. 강우시간 지연 시 미세먼지 저감 효과.('07. 4월)

Table 4.9. 1시간 지연 시 미세먼지농도와 항목별 상관도

Coefficients(a)								
Constant	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rain	Rh
-59.47	4,763.97	504.843	-132.845	116.291	0.108	4.119	0.101	0.210

Table 4.9에 강우가 있는 1시간 후의 1,399개의 시간자료를 이용한 분석 결과, 미세먼지농도와 강우와의 상관도는 -0.046이었으며, 단회귀분석의 결과는 강우가 대체로 미세먼지농도를 낮추는 것으로 나타나($Y=47.945-0.317\text{Rain}$), 경험적으로 관측된 결과와 일치되었다. 반면에 강우를 포함하여 대기오염항목과 4개의 기상항목들을 포함한 다중회귀분석의 결과는 Fig. 4.10, 4.11과 같이 나타나, 강우가 미세먼지농도를 낮추는 상관도가 낮아져 다른 변수들과의 공변성이 작용되는 것으로 추정되었다.

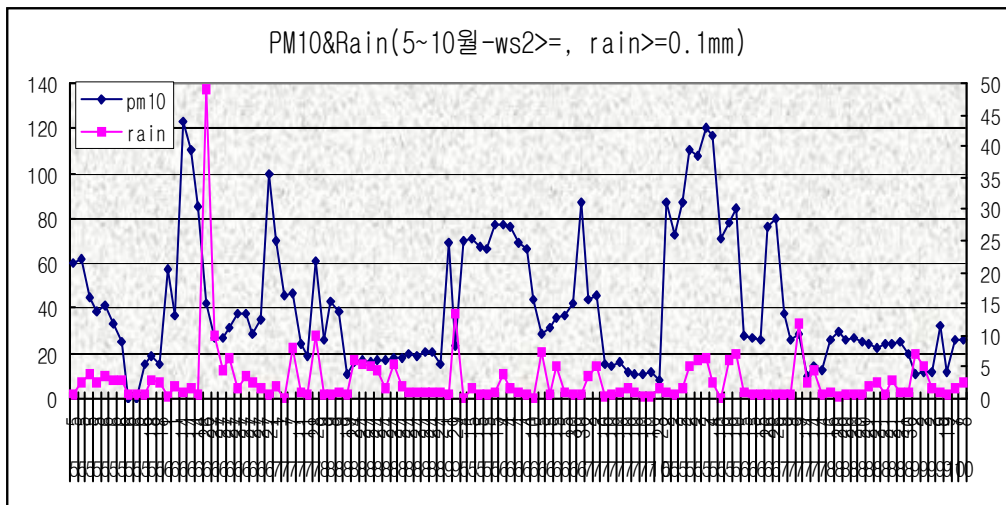


Fig. 4.10. 미세먼지농도와 강우량.
(5월~10월, 풍속 2m/s 이상, 강우량 0.1mm 이상)

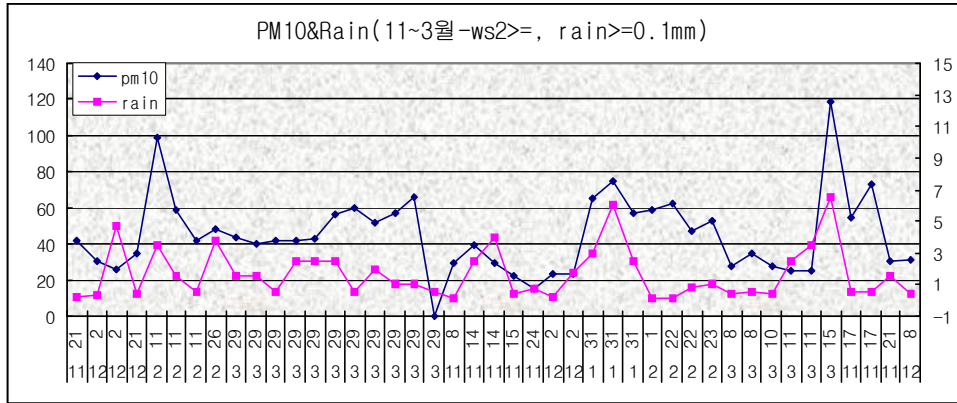


Fig. 4.11. 미세먼지농도와 강수량.
(11월~3월, 풍속 2m/s 이상, 강수량 0.1mm 이상)

Table 4.10. 1시간 지연 시 다중회귀분석(풍속 2 미만, 강수량 0.1mm 이상)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-44.2303	5.637667		-7.8455	9.53E-15
SO ₂	5822.834	408.2749	0.41983	14.26204	9.92E-43
O ₃	598.4619	55.87229	0.286404	10.71125	1.26E-25
NO ₂	288.7481	76.1307	0.129157	3.792794	0.000156
CO	40.44151	4.953395	0.324829	8.164402	8.14E-16
Temp	0.490627	0.096089	0.124369	5.105974	3.83E-07
Ws	-6.09317	2.016739	-0.07626	-3.0213	0.002571
Rain	-0.24036	0.127295	-0.03838	-1.88823	0.059237
Rh	0.295165	0.043137	0.160335	6.842441	1.24E-11

Table 4.10과 같이 강우의 효과가 직접적으로 나타나는 효과를 보기 위해 시간 당 평균 풍속이 2m/s 미만이고 강우량이 0.1mm 이상인 1,203개의 자료 중 강우와 상대습도를 1시간 지연시켜 1,202개를 자료를 분석하였다. 이 경우 상관도는 -0.091로 나타났고 다중회귀의 경우 풍속과 강우는 미지연시와 같게 음의 효과를 나타냈다.

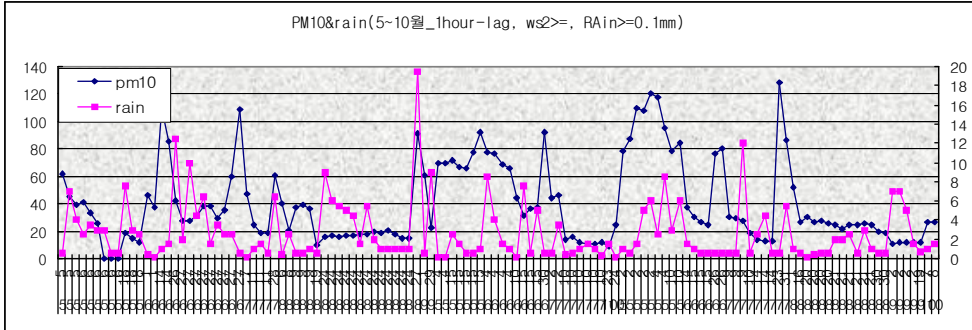


Fig. 4.12. 강우시간 1시간 지연 시 미세먼지농도와 강우량.
(풍속 2m/s 이상 강우0.1mm 이상)

한편, Fig. 4.12와 같이 시간당 평균 풍속이 2m/s 이상이고 강우량이 0.1mm 이상인 시간자료를 1시간 지연시켰을 때 186개의 시간자료가 만들어지는데, 이 경우 강우의 상관도는 0.138로 미지연시와 마찬가지로 양의 부호를 나타냈고, 5월부터 10월까지 여름철 124개 시간자료의 다중회귀결과는 강우가 음의 상관도를 가지는 것으로 나타났으며,

($Y = -77.75 + 2.658.8SO_2 + 4630.69O_3 + 932.82NO_2 + 53.26CO - 0.796Temp + 2.495Ws - 0.114Rain + 0.353Rh$), 강우가 미세먼지농도에 대하여 가지는 설명력(R^2)도 0.006으로 매우 낮았다.

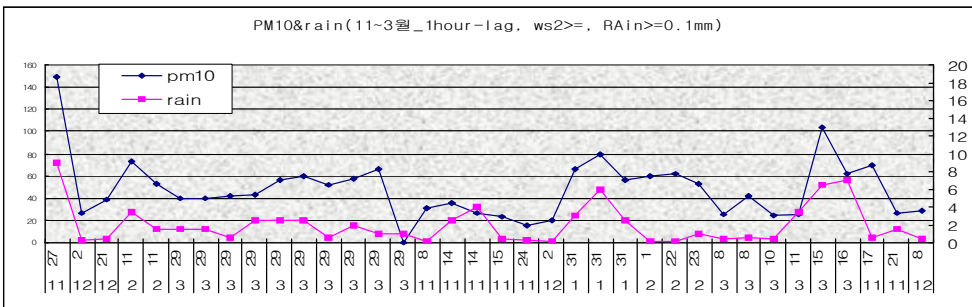


Fig. 4.13. 겨울철 미세먼지농도와 강우량.
(풍속 2m/s 이상, 강우량 0.1mm 이상)

Fig. 4.13과 같이 2005년부터 2007년까지의 기간 동안 11월부터 3월까지 겨울철 38개 자료의 다중회귀결과는 풍속과 강우 모두 양의 상관도를 나타냈으며, 이때의 설명력(R^2)은 0.336으로 다소 높게 나타났다.

($Y = -37.26 + 5,777.1SO_2 - 252.03O_3 + 513.93NO_2 + 43.84CO - 0.042Temp + 5.49Ws + 2.66Rain + 0.28Rh$).

즉, 풍속이 2m/s 이상인 경우 미세먼지농도에 대한 강우의 설명력은 낮은 풍속에서와 같이 미세먼지농도와 밀접한 상관도를 보이지 않는다. 계절별로 보면, 5월부터 10월에는 강우가 있는 경우 미세먼지농도는 낮게 나타나나 부분적으로 동반 상승하는 경우도 있으며, 겨울철(11월~3월)에도 대부분 음의 관계를 보였으나 여름철과 마찬가지로 동반상승도 있었다.

Table 4.11. 강우시간 지연 시 미세먼지농도(풍속2m/s이상, 강우량0.1mm이상, 7월~10월)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the estimate
1	0.813	0.661	0.6295	15.297
a	Predictors: (Constant), Rh, Rain, Ws, CO, Temp, O3, NO ₂ , SO ₂			

반면, Table 4.11과 같이 황사의 영향이 없고 동풍이 주풍향인 6월부터 10월까지 강우와 상대습도가 1시간 지연된 95개 시간자료의 다중회귀에 따른 미세먼지농도에 대한 강우의 설명력(R^2)은 0.661, 다른 변수의 영향력을 감안한 조정기여도(Adjusted R^2)도 0.63으로 비교적 높았으며 다중회귀시의 상관도도 -0.252로 나타났다.

Table 4.12. 강우시간 지연 시 미세먼지농도와 다중회귀분석(2시간 지연)

Constant	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rain	Rh
-47.10	4,808.3	597.4	469.1	38.492	0.284	0.528	-0.286	0.304

대기오염물질의 용해, 강하, 세정 등의 작용에 대한 진행되는 영향정도를 보기 위해 Table 4.12와 같이 시간자료 중 강우와 상대습도를 2시간 지연시키는 경우, 2,462개의 자료가 만들어지며 상관도는 -0.082로 나타났고, 다중회귀 시 강우의 상관도는 -0.286으로 나타나 강우량이 0.1mm 이상이었을 때의 -0.19, 풍속이 2m/s 이상이고 강우량이 0.1mm 이상시의 -0.24보다 높아 강우효과가 2시간 이상 지속될 수 있음을 보였다.

Table 4.13. 미세먼지농도와 강우의 다중회귀분석

(2시간 지연 시, 풍속 2m/s 미만, 강우량 0.1mm 이상)

Constant	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rain	Rh
-48.342	5709.74	636.12	471.08	32.458	0.3886	-6.177	-0.211	0.347

강우가 있는 후 1시간이 지났을 때와 마찬가지로 풍속이 2m/s 미만이고 강우량이 0.1mm 이상인 1,201개의 자료를 이용해 분석한 결과, 상관도는 -0.085였으며, 단회귀분석시 강우의 영향이 높게 나타났으며($Y = 48.465 - 0.535\text{Rain}$), 대기오염 항목과 기상항목 등 8개 항목을 모두 포함한 다중회귀 시는 Table 4.13과 같이 강우는 -0.211로 음의 상관도를 보였으며, 1시간 지연 시와 유사한 상관도를 보였다.

Table 4.14. 미세먼지농도와 강우의 다중회귀분석

(2시간 지연 시, 풍속 2m/s 이상, 강우량 0.1mm 이상)

Constant	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rain	Rh
-35.131	2923.86	454.45	127.3	97.153	-0.078	1.605	0.575	0.109

한편, Table 4.14에 나타낸바와 같이 시간당 풍속이 2m/s 이상이고 강우량이 0.1mm 이상인 경우의 184개의 자료를 분석하면, 상관도(Correlation-Bivariate)는 0.079, 단회귀분석시 양의 계수를 나타냈으며($Y=0.492\text{Rain}+42.324$), 기상항목 등 8개 항목을 모두 포함한 다중회귀 시에도 기온을 제외한 항목이 양의 상관도를 나타냈다. 즉, 강우가 있는 뒤에 2시간이 경과하면 기온이 낮게 유지되는 경우 미세먼지농도가 낮아지는 것으로 보이나, 다중회귀의 경우 기상항목의 공선성으로 인해 계수의 부호가 변화되는 것으로 추정된다.(Fig. 4.14, 4.15)

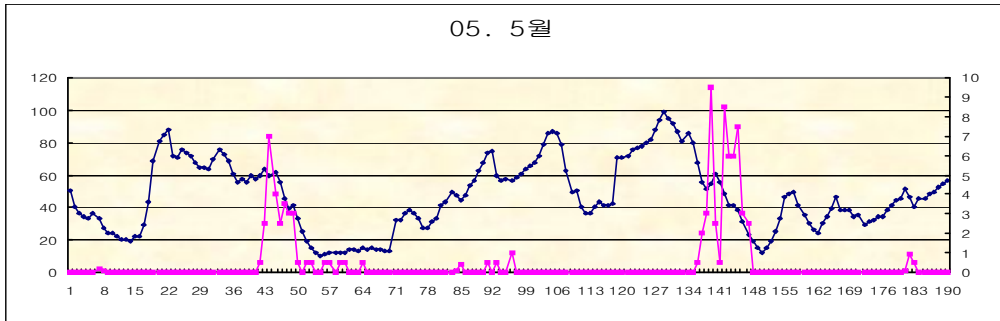


Fig. 4.14. 강우일과 미세먼지농도.(강우량 0.1mm 이상, 2시간 지연, '05.5월)

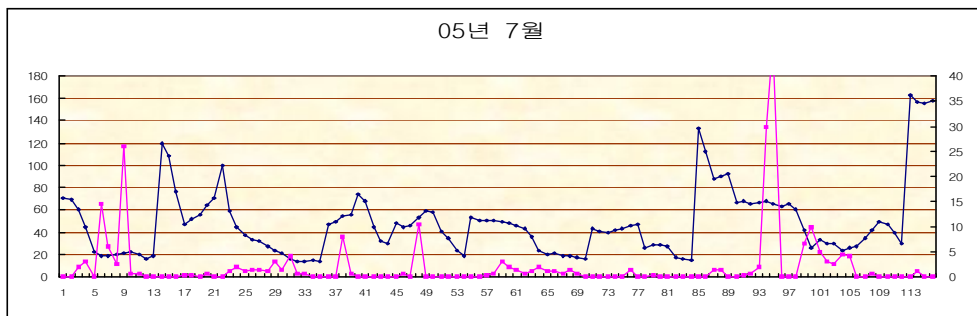


Fig. 4.15. 강우일과 미세먼지농도.(강우량 0.1mm 이상, 2시간 지연, '05.7월)

여기서는 입경별 분포와 특성에 관하여는 분석하지 않았으나 봄철에는 황사로 인한 조대입자(Coarse particles)의 증가, 늦가을에는 큰 일교차로 인한 복사안개 및 서해의 해무(海霧)가 이류(advection)됨으로서 대기 중 상대습도를 높이고 입자의 흡습성(吸濕性)을 높여 미세입자의 생성을 촉진시킴으로서 전체 질량농도를 증가시키는 것으로 보고되는 최근의 연구들을 참고할 때, 미세먼지의 생성메커니즘에 대한 보다 자세한 연구가 필요하고 예보 시에도 Secondary Particles의 생성 조건에 대한 예측이 필요한 것으로 판단된다.

최근에는 입자직경이 2.5mm 이하의 초미세먼지(PM2.5)의 인체 위해성이 강조되고 있으며, 자동차 배출가스 등에 다량으로 함유된 NO_2 , NH_4^+ 등 기체상 물질이 입자화되는 2차 입자(Secondary Particles)에 대한 우려가 높아지고 있다. 전체 미세먼지농도와 NO_3^- 와 NH_4^+ 및 SO_4^{2-} 농도합의 감소량이 계절에 따라 차이가 있으나 기체상물질의 저감에 따라 겨울에 8%에서 여름철 52% 정도의 미세먼지 저감효과를 보이는 것으로 나타났다.

이는 사계절 평균으로는 대략 18% 정도의 효과가 있을 것으로 예측되어 기체상 물질의 저감이 미세먼지 오염도 개선에 중요한 요소임이 입증되었다. 따라서 강우에 의한 초미세입자의 낙하 및 기체상 물질들의 용해는 대기오염도 전반에 걸쳐 매우 중요한 개선요소라 여겨지며 미세먼지예보에 있어 고·저 농도를 판단함에 있어 중요한 요건임을 알 수 있다. 따라서 기체상 오염도를 저감시킬 수 있는 강우가 잦을수록 대기환경에는 긍정적인 효과를 볼 수 있으며 예보적중률의 향상도 용이할 것으로 평가된다.

2) 기온의 영향 분석

기온은 자체로서 미세먼지농도에 영향을 미치는 요인이라기보다 기온의 변화에 의해 다른 기상항목의 변화를 유인할 수 있는 변수로 추정해 볼 수 있다. 대기층의 기온은 상층부로 갈수록 낮아져 지표면의 따뜻한 공기가 상승됨으로서 대기확산이 이루어지고, 하층부에서 발생된 미세먼지 등 오염물질농도의 희석효과가 있으나, 기온 역전층(Temperature inversion)이 발생하는 경우 하층부의 공기가 정체되면서 높은 오염도를 나타낼 수 있다.

대류권에서 연직 기온변화는 $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 정도이며 대류권의 높이, 즉 권계면의 고도(高度)는 적도지방(赤道地方)에서 가장 높고 고위도 지방으로 갈수록 낮아지며 같은 위도에서는 하계에 높고 동계에 낮다. 권계면의 평균고도는 적도부근에서 약 18km, 고위도에서는 약 8km 정도이며 중위도 지방에서는 약 12km 정도이나 일정하지 않아서 온대저기압이 위치할 때는 낮아지고 고기압이 위치할 때는 높아지기도 하는데 그 차이는 수 km에 달한다.

역전층 높이의 계산은 그 날의 최고기온에서 이슬점 기온을 제외한 값에 120M를 곱하게 되나, 계산 값에서 $\pm 100\text{m}\sim 200\text{m}$ 의 편차가 발생할 수 있다. 통상 겨울철을 제외한 경우 지표부근은 대기 상층부에 비해 기온이 높는데 기온 역전은 4가지로 구별해 볼 수 있다.

첫 번째로 태양의 복사열에 의해 지표는 대기보다 쉽게 가열되고 주간에 충분히 가열됐던 지표가 야간에 냉각되면 지표부근의 대기 기온이 상층의 대기보다 낮아지는 복사역전(radiation inversion)의 경우, 형성되는 역전층은 대기의 정체현상을 나타내고 오염물질이 확산되지 않아 하층에서 정체됨으로 높은 오염도를 나타

낼 수 있다. 주로 맑은 날 해가 진후부터 새벽에 잘 생기며 지표에서부터 수 백 미터 고도까지 발달하고 특히 겨울철에 잘 생긴다.

두 번째로 고기압 중심에서 상층의 공기가 서서히 침강하게 되는 경우 이것을 채우기 위해 넓은 지역에 걸쳐 상공으로부터 하강하는 기류는 단열압축에 의해 기온이 상승하여 하층의 공기보다 기온이 높아지는 침강성 역전(subsidence inversion)은 대개 지표 상층부분에서 발생되어, 대기가 매우 안정되고 하층의 대기에 대하여 덮개 역할을 함으로써 오염물질의 연직확산을 억제하게 된다. 이러한 현상은 해가 뜬 후 복사열에 의한 지표면이 가열되면서 소멸되기 시작한다.

세 번째로 따뜻한 공기가 찬 공기의 위로 덮이는 전선성 역전(Front inversion)은 계절과 지형 구분이 없이 발생하며, 따뜻한 공기층 아래는 기온이 낮은 공기가 차서 그 경계면에 대기가 정체되어 기온역전층을 발생한다.

네 번째로 지형성 역전(Geomorphological inversion)은 산곡풍 또는 해륙풍에 의해 무겁고 찬 공기가 계곡의 사면을 따라 완만하게 저지대로 흘러 들어오면 밀려난 계곡 내 따뜻한 공기는 상층으로 올라가 기온역전층을 형성하게 되는데 계곡 내 역전층이라고도 한다.

이러한 역전층의 생성은 스모그(Smog)의 형성과 대기오염물질의 확산을 일으키지 않는 조건이 되어 인체에 유해한 물질들에 의한 호흡기 질환을 일으키기도 하며, 식물의 성장을 방해하고 삼림을 황폐화시키고 자동차 타이어 등 고무제품도 부식시켜 내구성을 떨어뜨리는 영향을 주게 된다. 이에 따라 피해를 겪은 영국 등의 국가에서는 스모그 통제 방법으로 탄화수소의 배출을 줄이도록 했고 정유공장의 배출에 대해 엄격한 통제를 가하기도 했다. 따라서 기온은 미세먼지농도에 간접적으로 영향을 미치는 요인으로 다른 기상항목이나 이로 인한 상관도를 산정할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

Table 4.15와 같이 기온과 미세먼지농도와와의 상관성을 보기 위해 2005년부터 2007년까지 황사가 발생한 날과 그 영향일을 제외하고 1,056일간의 기온과 미세먼지농도와 상관도를 알아본 결과, 상관도는 0.115로 나타났으며, 단회귀분석에서는 기온이 높은 경우 미세먼지농도가 낮아지는 것으로 나타났는데, 이는 기온이 높아지는 여름철에 강우와 풍향 등 다른 기상요인에 의해 미세먼지농도가 낮아지는 특성을 보인 것으로 판단된다.

Table 4.15. 미세먼지농도와 기온(Temp)의 회귀분석 결과

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	60.10286	1.432009		41.971	4.1E-227
	Temp	-0.31907	0.084815	-0.11511	-3.762	0.000178
a	Dependent Variable: PM ₁₀					

Table 4.16. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석 결과

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
Variables	Cons	88.89967	9.834372		9.03969	6.1E-18
	Temp	-0.55092	0.148927	-0.19367	-3.699	0.00024
	Ws	-13.407	3.013247	-0.21484	-4.44936	1.11E-05
	Rain	-0.18393	0.055761	-0.16786	-3.29852	0.00106
	Rh	-0.14041	0.124421	-0.06428	-1.12851	0.25976
a	Dependent Variable: PM ₁₀					

Table 4.16에서와 같이 풍속과 강우, 상대습도를 포함한 다중회귀의 경우 기온의 회귀계수는 -0.55로 나타났는데, 여름철 낮은 미세먼지농도의 특성과 더불어 강우 등 다른 기상요인과의 다중공선성을 나타내는 것으로 평가된다.

즉, 강우가 있는 여름철 기온은 겨울철에 비해 높으나 미세먼지농도는 낮고, 기온이 낮은 겨울철은 서풍에 의해 황사 등 중국 등지에서서의 오염도가 높은 기류가 유입되는 영향을 나타내, 전체 자료에서 기온이 높은 경우 미세먼지농도가 낮아지는 것으로 나타났다고 볼 수 있다.

따라서 Table 4.17과 같이 기온과 풍속, 강우 등 다른 기상요인과의 상관도를

보면, 전체 자료의 경우 상관도는 풍속 -0.18, 강우 0.187, 상대습도는 0.510을 나타내 풍속이 높은 경우, 기온이 낮아지고 강우가 있는 경우와 상대습도가 높은 경우는 기온이 높아지는 현상을 나타냈다.

Table 4.17. 기상항목별 상관도('05년~'07년)

Correlations				
	Temp	Rh	Ws	Rain
Temp	1	0.510573	-0.18023	0.187834
Rh	0.510573	1	-0.19488	0.415263
Ws	-0.18023	-0.19488	1	-0.02185
Rain	0.187834	0.415263	-0.02185	1

Table 4.18. 기온과 기상항목의 다중회귀분석 결과('05년~'07년)

Model Summary(b)						
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson	
1	0.47424	0.224903	0.2193	8.323501	0.519984	
Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	-3.01213	3.238147		-0.9302	0.352807
	Ws	-2.85634	0.983254	-0.1302	-2.905	0.003869
	Rain	0.003989	0.018378	0.010356	0.21705	0.828278
	Rh	0.322915	0.037823	0.420538	8.53748	2.62E-16
a	Dependent Variable : Temp					

한편, Table 4.18과 같이 기온과 다른 기상항목의 다중회귀의 경우 상관도(R)는 0.474, 설명력(R^2)은 0.225를 나타냈으며 풍속은 기온을 낮추는 영향이 있으나 강우와 상대습도는 기온과 유사하게 상승하는 것으로 나타났다.

이는 계절적인 특성을 배제하고 각 기상항목별 영향도를 평가할 필요가 있는 것

으로 판단되었으며 계절별 상관도를 알기 위해 위의 측정 자료를 분할하여 상관도 및 회귀분석을 실시하였다.

Table 4.19. 미세먼지농도와 기온의 단회귀분석 결과(11월~2월)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	57.29391	1.574169		36.39629	1.6E-121
	Temp	1.740339	0.273835	0.320429	6.355422	6.42E-10
a	Dependent Variable: PM ₁₀					

Table 4.19와 같이 겨울철(11월~2월)의 355일의 경우 기온과 미세먼지농도의 상관도는 0.32로 전체자료의 경우보다 약 2배 정도 높아졌으며, 단회귀분석의 경우 미세먼지농도를 증가시키는 것으로 나타나 모든 계절의 분석 시 음의 관계를 보였던 것과는 반대로 기온이 높은 경우 미세먼지농도도 높아지는 것으로 나타났다.

Table 4.20. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석 결과(11월~2월)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	38.67093	19.14428		2.019973	0.046061
	Temp	1.350151	0.486924	0.257591	2.772815	0.00663
	Ws	-7.56927	5.691976	-0.12731	-1.32981	0.186605
	Rain	-2.09543	0.64246	-0.31828	-3.26157	0.001516
	Rh	0.500972	0.246697	0.2118	2.030718	0.044938
a	Dependent Variable: PM ₁₀					

Table 4.20과 같이 풍속과 강우 등을 포함한 다중회귀의 경우에도 풍속과 강우는 미세먼지농도를 낮추는 영향을 보이거나 기온과 상대습도는 미세먼지농도를 높이는 영향이 나타나는 것으로 평가되었다.

Table 4.21. 기온과 기상항목의 다중회귀분석(11월~2월)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	-0.21663	3.912101		-0.05537	0.955949
	Ws	-1.98962	1.146192	-0.1754	-1.73585	0.08564
	Rain	0.01615	0.131278	0.012857	0.123019	0.902337
	Rh	0.103355	0.049353	0.229033	2.094219	0.038744
a	Dependent Variable: Temp					

Table 4.21과 같이 겨울철 기온에 대한 다른 기상항목의 영향을 보면 상관도(R)가 0.331, R^2 은 0.110이었으며, 다중회귀의 경우 풍속이 높을수록 기온이 낮아지고 강우와 상대습도가 높을수록 기온이 높아져 겨울의 특징을 나타냈다.

봄철(3월~5월) 242일의 경우 황사가 발생한 날 등을 제외하고 미세먼지농도와 기온의 상관도(R)는 0.127로 겨울보다 낮았으며, 단회귀분석의 경우 기온이 높은 경우 미세먼지농도도 높아지는 것으로 나타났다.

Table 4.22. 미세먼지농도와 기상항목의 상관도(3월~5월)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	0.38378	0.147284	0.105688	22.28707	1.597237
a	Predictors: (Constant), Temp, Rh, Ws, Rain				
b	Dependent Variable: PM ₁₀				

Table 4.22, 4.23과 같이 풍속 등 다른 기상항목을 포함한 경우 상관도는 0.3837, R^2 은 0.147이었으며 풍속과 강우, 상대습도는 미세먼지농도와 부(-)의 상관도를 보였으나 기온은 정(+)의 상관도를 나타내 봄철에는 기온이 높아지면 미세먼지농도도 높아지는 것으로 나타났다.

Table 4.23. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석 결과(3월~5월)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	76.52135	17.60749		4.345953	3.95E-05
	Ws	-4.26106	5.37508	-0.08943	-0.79274	0.430215
	Rain	-0.47211	0.192928	-0.28659	-2.44706	0.016539
	Rh	-0.23126	0.208086	-0.12514	-1.11136	0.269661
	Temp	0.634582	0.488976	0.151519	1.297778	0.198003
a	Dependent Variable: PM ₁₀					

Table 4.24. 기온과 기상항목의 회귀분석(3월~5월)

Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	19.34743	3.333511		5.80392	1.15E-07
	Ws	-4.66758	1.092413	-0.41026	-4.2727	5.12E-05
	Rain	0.110541	0.041574	0.281035	2.65891	0.009405
	Rh	-0.01186	0.046693	-0.02688	-0.254	0.800111
a	Dependent Variable: Temp					

기온에 대한 다른 기상항목의 상관도는 0.487, R²은 0.237로 나타났고 강우는 기온과 정(+)의 상관도를, 풍속과 상대습도는 부(-)의 관계를 보였으며, 기온과 다른 기상항목의 다중회귀는 Table 4.24와 같았다. 즉, 봄철에 강우가 정(+)의 상관도를 보이는 것은 강우 전에 기온이 다소 상승하는 계절적 특성을 보인 것으로 평가되며, 풍속이 높은 부(-)의 상관도를 보이는 것은 서풍보다 오염도가 낮은 남서풍이 유입되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4.25. 미세먼지농도와 기온의 단회귀분석(6월~8월)

Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	24.44872	15.95578		1.53228	0.12661
	Temp	1.014497	0.636217	0.095888	1.59458	0.11196

Table 4.25와 같이 여름철(6월~8월) 276일은 기온과 미세먼지농도와의 상관도가 0.096으로 낮게 나타났으며, 단회귀분석 결과는 미세먼지농도와 정(+)의 상관도를 나타냈고 유의수준이 높게 나타났는데, 강우가 있는 경우 대기세정에 의해 미세먼지농도가 낮아지며 기온은 냉각되는 효과로, 기온이 높아지면 상대적으로 강우가 없다는 것으로서 기온이 정(+)의 효과를 나타내는 이유로 판단할 수 있다.

Table 4.26. 미세먼지농도와 기온의 다중회귀분석(6월 ~ 8월)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	54.79787	29.98195		1.8277	0.06952
	Temp	1.165851	0.730231	0.124484	1.59655	0.1124
	Ws	-20.2795	5.654894	-0.27903	-3.5862	0.00045
	Rain	-0.1177	0.063532	-0.15796	-1.8526	0.06585
	Rh	-0.15526	0.241809	-0.05659	-0.6421	0.52177

Table 4.26과 같이 풍속과 강우, 상대습도를 포함한 다중회귀 시에도 미세먼지농도에 대한 기상항목의 상관도는 0.359, R^2 은 0.129였으며 풍속과 강우, 상대습도는 부(-)의 상관도를 보였으나 기온은 정(+)의 상관도를 나타내, 여름철에도 기온이 높아질수록 미세먼지농도가 상승하게 되는데 이는 기상항목 상호간에 상관성을 나타내는 것으로 보아야 할 것으로 판단된다.

Table 4.27. 기상항목 간 상관도(6월~8월)

	Temp	Ws	Rain	Rh
Temp	1	-0.05444	-0.23268	-0.14084
Ws	-0.05444	1	-0.05226	-0.11136
Rain	-0.23268	-0.05226	1	0.454516
Rh	-0.14084	-0.11136	0.454516	1

Table 4.27과 같이 기온에 대한 다른 기상항목의 상관성을 보면 풍속과 강우, 상대습도가 부(-)의 상관도를 보이며, 강우가 기온을 낮추는 경향이 가장 크게 나타났는데, 이는 겨울철에 풍속만이 기온과 부(-)의 관계를 보인 것과 대조되는 것으로 기상항목들은 상당한 자기상관성을 나타내고 계절별 많은 차이가 있는 것으로 평가된다.

Table 4.28. 미세먼지농도와 기온의 단회귀분석(9월~10월)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	57.89884	10.07001		5.74963	3.74E-08
	Temp	-0.73204	0.515308	-0.10501	-1.4206	0.157155
a	Dependent Variable: PM ₁₀					

Table 4.28과 같이 가을철(9월~10월) 183일은 기온과 미세먼지농도와 상관도가 0.105로 나타났으며, 단회귀분석 결과 미세먼지농도와 부(-)의 상관도를 나타냈고 유의수준이 높게 나타났다. 풍속과 강우, 상대습도를 포함한 다중회귀 시 미세먼지농도에 대한 기상항목의 상관도는 0.385, R²은 0.148로 여름철보다 다소 높았으며, 기온과 풍속, 강우는 부(-)의 상관도를 보였고 상대습도는 정(+)의 상관도를 나타내, 가을철에는 상대습도가 미세먼지농도와 동일 방향으로 움직이는 것으로 보인다.

Table 4.29. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석(9월~10월)

Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	71.1355	33.58683		2.117958	0.038195
	Temp	-0.61665	0.848157	-0.08694	-0.72704	0.469936
	Ws	-22.1353	8.721613	-0.33585	-2.53798	0.013676
	Rain	-0.11782	0.17305	-0.10169	-0.68083	0.498517
	Rh	0.103167	0.377157	0.041236	0.273539	0.785348
a	Dependent Variable: PM ₁₀					

Table 4.29와 같이 기온에 대한 기상항목들 간의 상관도는 모두 정(+)의 상관도를 보였으며 풍속과 상대습도만 부(-)의 상관도를 나타냈는데, 풍속이 높아지는 경우 대기 중의 박무나 수증기 입자가 확산되거나 이류되는 현상으로 추정해 볼 수 있다.

Table 4.30. 기상항목 간 상관도(9월~10월)

Correlations				
	Temp	Ws	Rain	Rh
Temp	1	0.051168	0.016592	0.224013
Ws	0.051168	1	0.242849	-0.16716
Rain	0.016592	0.242849	1	0.498041
Rh	0.224013	-0.16716	0.498041	1

위 Table 4.30에서 본 바와 같이 기온이 미세먼지농도에 대하여 나타내는 상관도는 겨울철과 봄철, 여름철에는 정(+)의 관계를, 가을철에는 부(-)의 관계를 보이고 있으며, 풍속에 대하여는 가을철에는 정(+)의 관계를 보이고 다른 계절에는 음의 관계를 보이며 특히 겨울과 봄철에 비교적 높은 음의 관계를 나타냈다. 강우에 대하여는 여름철에만 비교적 높은 부(-)의 상관도를 나타내 세정에 의한 냉각 효과를 표현한 것으로 추정되며, 상대습도와는 경우는 봄과 여름철에 부(-)의 관계를 보였고 겨울과 가을철에는 정(+)의 상관도를 보였으며 특히 가을철에 비교적 높은 상관도를 나타냈다.

이와 같이 계절별로 작용하는 기온과 다른 기상항목들 간의 영향이 다른 이유를 추정하면, 강우가 있는 경우 통상적으로 상대습도는 높아지지만 겨울철에는 빙결되어 있던 수증기가 녹아 강우로 되어야 할 만큼 기온이 높아져야 하며, 여름철에는 이미 높아져 있는 기온이 강우에 의해 냉각되는 것 등을 상정해 볼 수 있으며, 이때 기상항목들의 변화에 따라 미세먼지농도 변화의 방향도 달라 가을철이 타 계절과 다르게 변동되는 것으로 볼 수 있다.

따라서 기온은 미세먼지농도 변화의 예측에 작용변수로 고려하는 것보다 강우 등 다른 기상항목들을 영향인자로 고려하는 보조적 영향인자로 이해하여야 할 것으로 판단된다.

3) 풍속 및 풍향의 영향 분석

가. 풍속(Wind speed)의 영향

풍속은 오염물질을 확산시키고 이동시킴으로서 지역적 오염도를 낮추게 되며 혼합고(Mixing depth)는 대기층이 교호적으로 혼합되는 수직범위를 일컫는 것으로, 혼합고가 높을수록 혼합범위가 넓어지는 효과가 있어 미세먼지농도는 낮아지게 된다. 대기(지구를 둘러싸고 있는 기체의 혼합층)는 지상으로부터 9,600km에서도 감지되나 전체 대기 질량의 약 99%가 30km이하의 높이에 있으며 이중 50%가 5.5km이하에 분포한다. 그러나 실제적으로 미세먼지의 오염도와 직접적으로 상관되는 대기는 혼합고의 높이이며 대체로 850hPa 기압을 유지하는 1km 정도로 알려져 있고, NOAA에서 제공되는 Back-Trajectory를 참고하면 3km 상공의 기류까지 직접 영향권이라고 볼 수 있다.

'08년 환경부에서 서울과 강화도의 미세먼지농도에 영향을 미치는 풍향과 풍속의 관계를 분석한 결과를 보면 서울의 미세먼지농도가 낮은 경우($50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하) 서울과 강화 모두에서 동풍이 비율이 커지고, 풍속의 경우에는 서울의 풍속이 평균 풍속에 비하여 증가된 것으로 나타났는데, 미세먼지농도가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날은 동풍이 부는 일수가 많은 8월과 9월에 많아지고, 서풍이 우세하게 부는 3월과 4월에 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날이 주로 나타난 것으로 분석되었다(Fig. 4.16, 4.17).

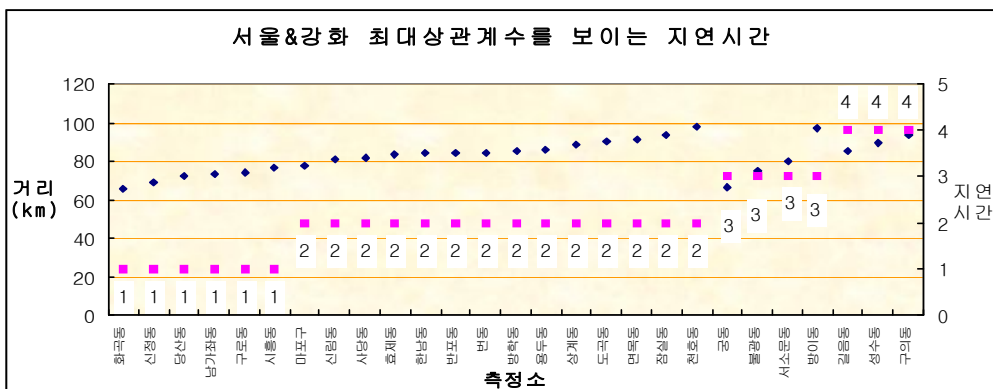


Fig. 4.16. 최대 상관도 자연시간(강화도, 서울).

이 결과는 일일 풍향을 동풍(0~179도), 서풍(180~359도)으로 나누어 서울시 미세먼지농도수준에 따라 시간별 변화하는 미세먼지농도를 분석한 결과와 일치하는 것으로 나타났는데, 최근 수년간 경험적으로 감지되는 서울의 미세먼지농도변화 경향과 합치되는 것으로 여겨진다.

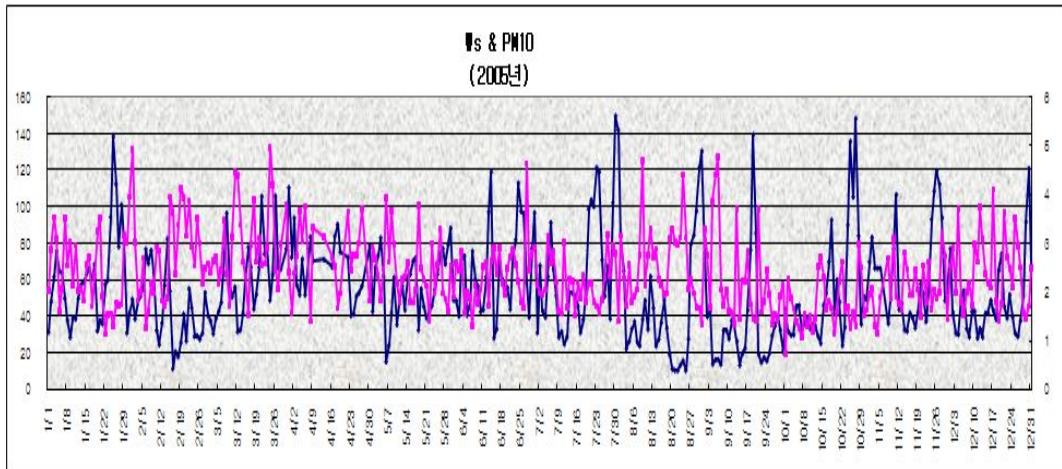


Fig. 4.17. 2005년 풍속과 미세먼지농도.

서울의 기상자료와 대기오염 측정 자료에 국한하여 미시적으로 분석한 결과, 황사가 발생한 날을 제외하고 일일 평균 풍속과 미세먼지농도의 변화추이를 볼 때 풍속이 높은 날은 미세먼지농도가 낮아지는 현상이 나타나고 있는데, 이는 장기간 풍속이 미세먼지농도에 미친 영향과 배치되는 결과이다. 계절과 상관없이 풍속이 높아지는 경우 미세먼지농도가 낮아지고, 고농도로 유지되던 날도 풍속이 높아지면서 미세먼지농도는 낮아진다.

Table 4.31. 서울의 풍속 범위별 일수('05년~'07년)

풍속(m/s)	1미만	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	5 이상	계
일 수	1	362	476	172	41	4	1,056

Table 4.31과 같이 일평균 풍속별 미세먼지농도의 분포를 보면 '05년부터 '07년까지 황사발생 및 영향이 지속된 날과 손실자료를 제외하고 총 1,056일중 일 평균 풍속이 1m/s미만인 날이 1일, 평균풍속이 1m/s 이상~2m/s 미만인 날이 362일,

2m/s 이상~3m/s 미만인 날이 476일, 3m/s 이상~4m/s 미만인 날이 172일, 4m/s 이상~5m/s 미만인 날이 41일, 평균풍속이 5m/s 이상인 날은 4일에 불과했다. 전체적으로 평균 풍속이 2m/s~3m/s인 날이 476일로 가장 많아 서울의 평균 풍속(2.4m/s)과 일치하는 것으로 나타났으며, 1m/s~2m/s인 날이 362일로 다음으로 많았다.

서울의 평균풍속(2.4m/s) 범위에서는 미세먼지농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날이 254일로 가장 많았으며 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이인 날이 194일, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 날이 28일로 나타났다. 풍속이 높아질수록 미세먼지농도는 낮아지며, 일 평균풍속이 4m/s를 넘어서는 경우 미세먼지농도는 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 날이 1일이었다.

따라서 황사가 오는 경우를 제외하고 풍속이 4m/s를 초과하는 경우는 예보에 있어 '좋음'과 '보통'의 두 경우가 유력하나, 서울 기상의 대부분을(96%) 차지하는 1m/s~4m/s 범위에서의 선택은 여전히 어려운 것으로 판단된다. 대기질의 체감은 쉽게 시정거리에 따라 인지되고 박무나 연무가 없이 시정거리가 확대되고 쾌적함을 느낄 수 있는 오염도는 보통 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 경우가 보통인바, 풍속의 변화에 따른 기상변수와 미세먼지농도 상관도 및 분포를 살펴보았다.

Table 4.32. 풍속구간별 미세먼지농도 일수

풍속(m/s) PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1미만	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	5 이상	계
30이하		33	95	51	16	2	197
30<, ≤50	1	114	159	44	11	1	330
50<, ≤80		118	154	62	11	1	346
80<, ≤100		46	40	9	2		97
100<, ≤150		50	28	6	1		85
150<, ≤200		1					1
계	1	362	476	172	41	4	1,056

Table 4.32와 Fig. 4.18과 같이 일일 평균 풍속이 1m/s~2m/s 사이일 때의 미세먼지농도별 일수를 보면 일평균 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 쾌청한 날이 33일, 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날이 114일, 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날이 118일, 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날이 46일이었으며, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 날은 51일이었다.

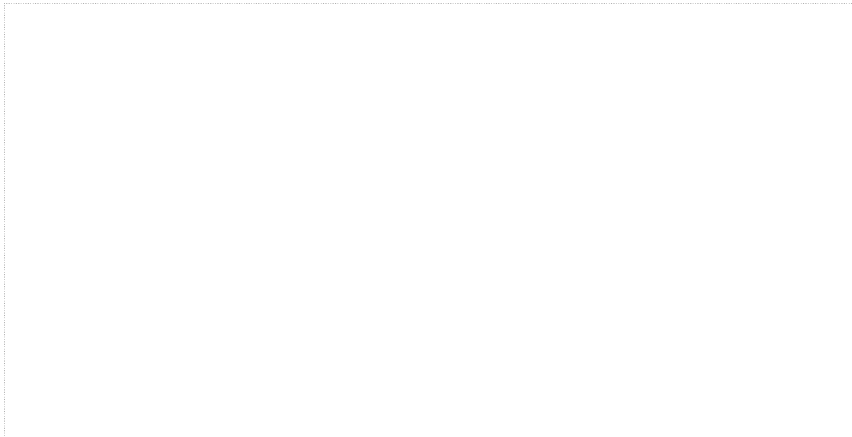


Fig. 4.18. 미세먼지농도별 일수.(풍속 1~2m/s)

Table 4.33. 미세먼지농도와 항목별 상관도(풍속 1m/s 이상, 2m/s 미만)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rain	Rh
Pearson Correlation	0.655	0.041	0.601	0.569	-0.177	-0.091	-0.131	-0.008
Sig. (1-tailed)	0.000	0.217	0.000	0.000	0.000	0.042	0.006	0.441

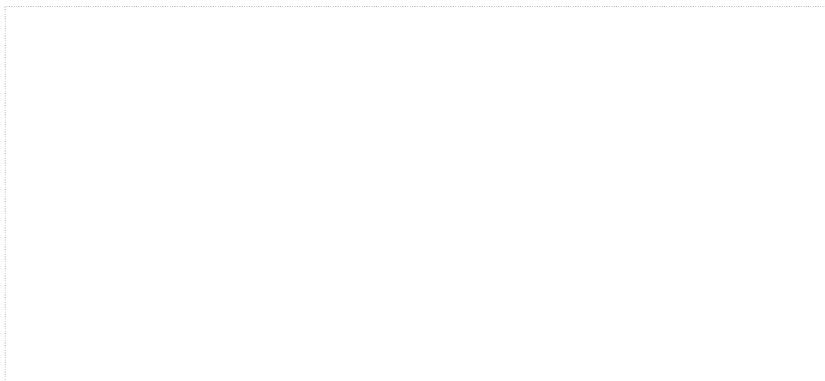


Fig. 4.19. 월별 미세먼지농도.(풍속 1~2m/s)

Table 4.33과 Fig. 4.19와 같이 미세먼지농도와 대기오염항목별 상관도를 보면 아황산가스와 이산화질소, 일산화탄소는 높은 상관도를 보이고 있으며 기상항목 중 기온, 풍속, 강우량은 음의 상관도를 보였다. 계절별 특성을 보면 7월부터 10월 사이에 낮은 농도일이 많고 겨울철을 위주로 고농도일이 나타났다.

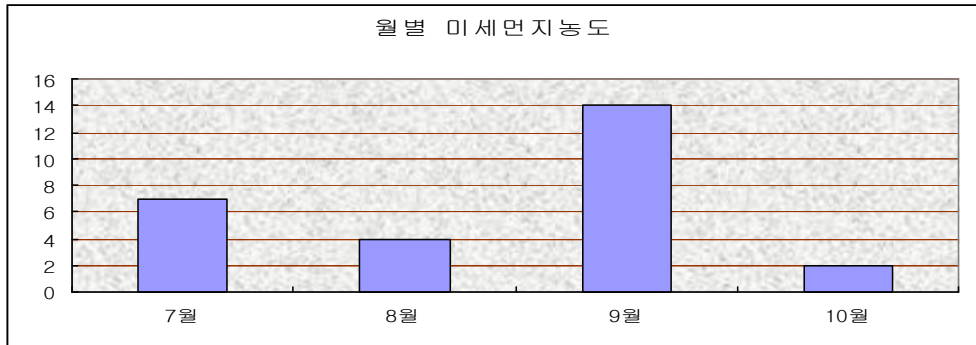


Fig. 4.20. 월별 미세먼지농도.(풍속 1~2m/s)

Fig. 4.20과 같이 일일 평균풍속이 1m/s 초과 ~ 2m/s 이하일 경우 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 쾌청한 날은 여름철인 7월에서 10월 사이로, 11월부터 6월까지 1m/s ~ 2m/s 사이의 낮은 풍속 하에서는 미세먼지농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮아지지 않음을 나타내 보였다. 일일 평균풍속이 1m/s ~ 2m/s 이하에서 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 저 농도일이 가장 많은 달은 9월이며 7월과 8월이 다음으로 많았다.

이처럼 낮은 풍속 하에서 낮은 농도를 유지하는 것은 대기의 확산이 잘 되지 않는 경우라도 지역적인 배출량이 적은 경우와 외부에서의 오염물질 유입이 적다는 것을 의미하는데, 서울의 오염특성상 유사수준의 배출량 분포를 보이고 있음을 전제로 할 때 7월과 8월은 강우에 의한 세정효과가 크고, 오염도가 낮은 동풍이나 남풍의 유입영향이 큰 것으로 볼 수 있으며, 9월은 전체 미세먼지의 57%를 차지하는 도로 비산먼지의 감소로 인한 지역오염도의 감소영향이 작용한 것으로 추측해 볼 수 있다.

한편, 11월부터 5월 사이에는 2m/s의 낮은 풍속일 경우 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 농도를 나타내는 날이 없는데 이는 주로 서풍 계열의 영향을 받는 시기로 강우에 의한 세정과 간헐적인 대기확산이 이루어지더라도 높은 오염도의 기류가 유입되고 누적되어 있는 도로비산먼지로 인해 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 낮은 농도를 형성하기에는 어려운 것으로 보인다.

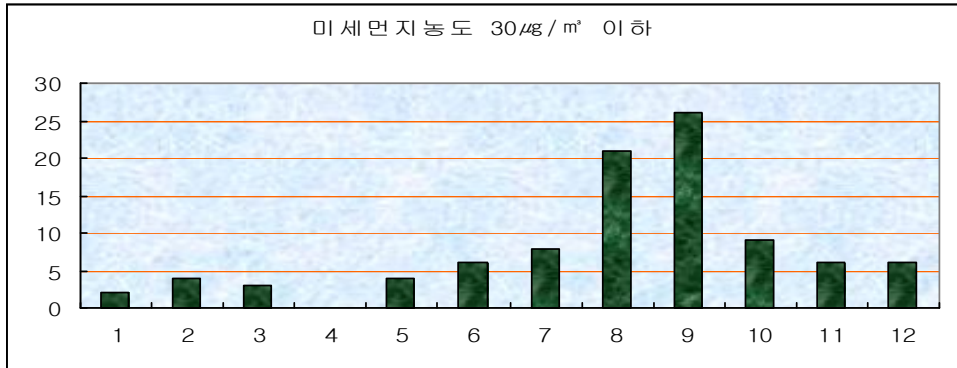


Fig. 4.21. 월별 미세먼지농도 30µg/m³ 이하 일수.
(풍속 2m/s 이상, 3m/s 미만)

Fig. 4.21과 같이 일일 평균 풍속이 2m/s~3m/s의 범위에서 미세먼지농도가 30µg/m³ 이하의 쾌청한 날은 95일로서, 8월과 9월이 가장 많았고 4월은 없었으며, 2월에는 4일, 3월에는 3일이 있었다. 4월은 황사 등 서풍에 의한 오염물질의 유입에 따라 쾌청한 맑은 날을 나타내기 어려우며, 강우량에 의해 세정효과를 보는 경우에도 높은 풍속으로 서풍이 부는 경우 짧은 시간 내 다량의 오염물질이 유입되어 미세먼지농도를 상승시키는 것으로 이해될 수 있다.

미세먼지예보에 있어서의 어려운 점은 예보지수의 경계(50µg/m³, 100µg/m³, 150µg/m³)에서의 판단인데 특히, 빈도가 잦은 50µg/m³, 100µg/m³ 부근에서의 예보라 할 수 있다. 풍속이 2m/s 초과 ~ 3m/s 사이에서 50µg/m³ 이하가 254일, 50µg/m³ 이상 100µg/m³ 이하가 194일므로 이 구간에서는 풍속과 계절별 특성, 강우의 여부, 습도의 영향 등 다양한 기상요인의 분석이 필요하다고 할 것이다.

일평균 풍속이 3m/s 초과, 4m/s 이하인 날은 총 172일로 이 풍속범위에서의 미세먼지농도별 일수를 보면 30µg/m³ 이하가 51일, 30µg/m³ 초과 50µg/m³ 이하가 44일, 50µg/m³ 초과 100µg/m³ 이하가 71일, 101µg/m³을 넘는 경우는 6일로 나타났다. 평균풍속이 3m/s 넘는 경우 풍속이 낮은 날에 비하여 특이할만한 점을 보인다고 보기는 어려우나 100µg/m³을 초과하는 날이 상대적으로 적은 것으로 나타난다. 즉, 풍속이 2m/s 이하인 날은 미세먼지농도가 100µg/m³을 초과하는 날이 14%이며, 풍속이 3m/s 이하인 날은 미세먼지농도가 100µg/m³을 초과하는 날이 5.9%였으나, 풍속이 3m/s 이상인 경우는 미세먼지농도가 100µg/m³을 초과하는 날이 3.5%로 점

차 낮아졌으며 풍속이 5m/s를 초과하는 경우 미세먼지농도가 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 날이 없는바, 이는 풍속과 미세먼지농도 사이의 상관도를 확연히 드러나게 하는 것으로 볼 수 있다.

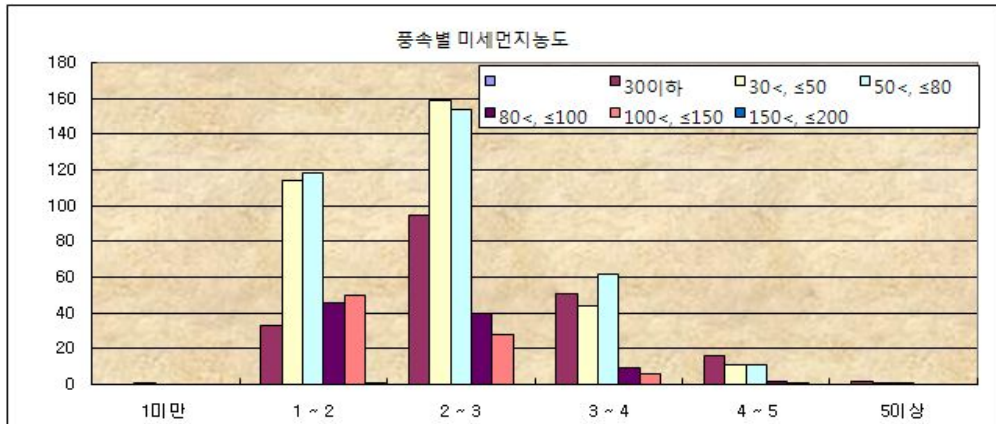


Fig. 4.22. 풍속 구간별 미세먼지농도 일수.

Fig. 4.22와 같이 일평균 풍속이 3m/s~4m/s인 날의 미세먼지농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날의 월별 분포를 보면 여름철인 7월, 8월, 9월에 집중되고 모든 계절에 있어 나타남을 알 수 있다. 평균 풍속이 3m/s 이하인 경우 4월은 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날이 없었으나 3m/s를 초과하는 경우는 꽤 많은 날이 나타날 수 있으며, 유입되는 풍향이 북쪽으로 치우쳐 차가운 바람이 유입되는 2월에도 중국 발 오염물질의 유입이 적어 저 농도일이 많이 나타나는 것으로 보인다.

한편, 일평균 풍속이 4m/s를 초과하는 날은 총 45일에 불과하며 일평균 미세먼지농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날이 18일로 가장 많았으며 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 날이 절반이 넘는 30일이었다. 이 때 $81\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 날은 3일로서, '07년 5월 14일, 11월 18일과 12월 31일이었는데, 5월 14일은 박무가 심했던 날이며, 11월 18일은 서해에서 남쪽으로 흐르는 황사의 기류가 강한 바람에 의해 수도권으로 유입되었고, 12월 31일은 전일 발생한 황사의 영향이 일부 시간 동안 지속되었다. 이를 감안하면 평균 풍속이 4m/s 이상으로 유지되는 경우 미세먼지농도는 계절적 요인이나 다른 기상여건 등을 고려치 않고도 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘지 않는다고 추정할 수 있을 것이다.

Table 4.34. 미세먼지농도와 풍속의 상관도(강우일 및 비강우일)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rain	Rh
2005년	Rain-exclude(data-351)							
	0.592	0.129	0.551	0.467	0.103	-0.265		0.087
	Rain-only(data-130)							
	0.511	0.121	0.475	0.506	0.025	-0.265	-0.154	-0.026
2006년	Rain-exclude(datar-354)							
	0.700	-0.046	0.668	0.641	-0.188	-0.249		-0.022
	Rain-only(data-131)							
	0.699	-0.064	0.698	0.657	-0.278	-0.208	-0.263	-0.294
2007년	Rain-exclude(data-351)							
	0.728	0.029	0.642	0.698	-0.284	-0.212		-0.073
	Rain-only(data-158)							
	0.707	0.154	0.599	0.675	-0.357	-0.066	-0.236	-0.274

Table 4.34와 같이 풍속과 미세먼지농도 간 상관도를 보기 위해 2005년부터 2007년까지의 일별 미세먼지농도 자료와 풍속자료를 활용하여 피어슨상관계수를 산정해 본 결과, 풍속과 미세먼지농도의 추이는 '07년 상관도가 -0.212, '06년 -0.249, '05년 -0.265로 나타났으며, '07년의 경우 강우일은 상관도가 매우 낮아 졌는바 '07년의 강우일이 '05년 대비 32일(24%) 많아 강우에 의한 세정효과가 크고 풍속의 영향이 적게 미친 것으로 이해된다.

Fig.4.23과 같이 계절별로는 겨울과 가을철에 강우가 없는 경우 풍속과의 상관도가 높았으며, 여름철(7월-9월)에는 강우가 있는 날이 풍속과의 상관도가 높았다. 겨울철에는 강우량이 적어 세정효과가 크지 않고 미량의 강우 시 고습도 및 대기 정체에 의해 미세먼지농도를 상승시키는 점을 시사하는 것으로 추정되고, 여름철에는 강우가 있는 경우 풍속이 높아지는 점을 보여주는 것으로 보인다.

모든 계절에 있어 풍속이 높아지는 경우 미세먼지의 농도는 낮아지며, 미세먼지

농도와 풍속과의 절대적 상관도를 평가할 수 있는 배경농도의 기준이 설정되지 못하여 감각적으로 예측하는 정도의 높은 상관도를 나타내지는 않고 있으나 미세먼지농도의 전반적인 추이는 풍속에 지배적임을 알 수 있다.

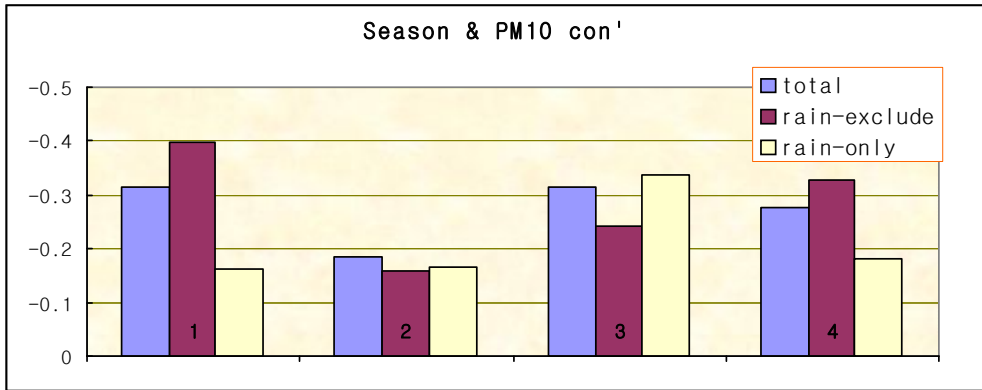


Fig. 4.23. 계절별 미세먼지농도와 풍속의 상관도.

Table 4.35. 계절별 미세먼지와 풍속의 상관도(강우일 및 비강우일)

기간 \ 연도	Year-Mean	1분기 (1월~3월)	2분기 (4월~6월)	3분기 (7월~9월)	4분기 (10월~12월)
Total	-0.240	-0.314	-0.184	-0.314	-0.277
Rain-exclude	-0.250	-0.397	-0.160	-0.243	-0.329
Only-Rain	-0.168	-0.161	-0.167	-0.336	-0.181

위 Table 4.35에서 보듯이 풍속이 상시적으로 일관되게 미세먼지농도에 영향을 미치는 것은 아니지만, 그 상관도가 비교적 크게 나타나 미세먼지예보를 시행함에 있어 풍속은 우선적으로 고려되어야 하는 요인으로 판단되며, 다른 기상요인들에 비해 큰 영향을 미치는 것으로 고려되어야 하나, '07년의 사례와 같이 서해 상공의 황사 등 장거리 이동오염물질의 거동을 확인하여야 하는 광역적 시각을 요구하게 하는 것으로 평가된다. 따라서 예보 시에는 계절별 특성을 참고하여 풍속구간별 상관도를 산정하고 이에 따른 분석결과를 적용하여 관측값과의 정합도를 살펴 보아야 할 것으로 판단된다.

나. 풍향(Wind direction)의 영향

풍속이 미세먼지농도에 계절별로 일정하게 영향을 미치지 않는 이유는 몇 가지를 추정해 볼 수 있겠으나 기단의 특성을 규정할 수 있는 오염도 때문으로 판단된다. 황사가 발생하는 경우 대개 풍속이 높아지며 동시에 미세먼지농도도 급격하게 상승하게 되는 것처럼 서울지역으로 유입되는 기단의 오염특성은 풍속의 높고 낮음보다 서울의 미세먼지농도에 더 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 미세먼지에 보를 함에 있어서 주로 작용하게 될 풍향을 파악하는 것이 예보적중률을 높이는 데 주요한 역할을 할 것으로 보인다.

이러한 기단오염특성을 예상하기 위해 Back trajectory 모델을 이용하여 500m, 1,000m, 2,500m 상공의 기단 이동방향과 이동속도 등을 예측하고 예보당일에 서울로 유입되는 풍향과 시간을 확인하기 위해 Wind Rose를 확인하고 있으나 이미 다른 방향의 지역에 유입되어 있는 오염기단이 풍향이 변동되어 재유입되는 경우 등에는 오염도예측의 어려움이 있다. 서울지역으로 작용되는 풍향은 보통 겨울철에는 북풍계열, 봄철에는 서풍계열, 여름과 가을철에는 동풍과 남동풍 또는 남서풍이 강하게 나타나는 것으로 추정되고 있다.

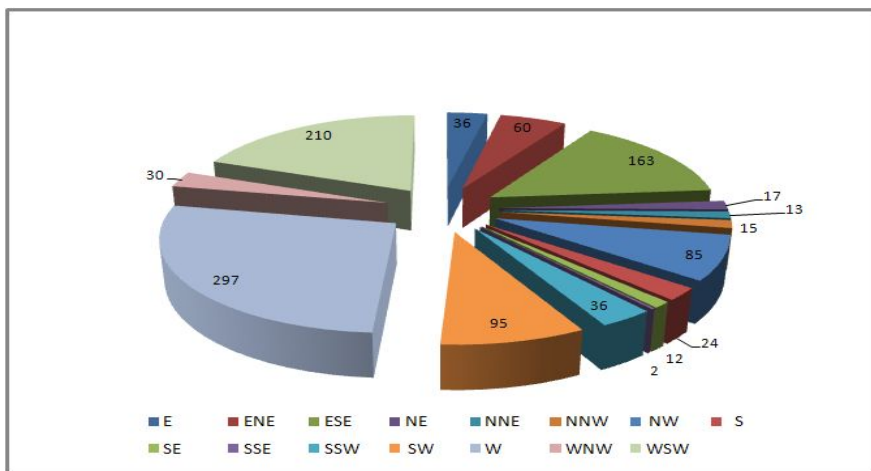


Fig. 4.24. 풍향별 일수.('05년~'07년)

Fig. 4.24에서 볼 수 있듯이 2005년부터 2007년까지 서울의 대기측정소에서 실측된 1,095일간의 일별 주 풍향을 보면 서풍이 297일로 가장 많고 서남서풍이 210

일로 다음으로 많았으며, 북서풍과 남서풍 등 서울의 서쪽에서 기류가 유입되는 날은 총 768일로 연중 70% 이상의 날이 서풍에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 반면에 오염도가 상대적으로 낮은 기류가 유입되는 것으로 추정되는 동풍과 동북풍, 동남동풍은 259일, 북동풍과 북북동풍은 30일이었으며 남풍과 남동풍, 남남동풍은 38일로 적었다.

Table 4.36과 같이 계절별로 보면 풍속의 분석 시와 다르게 기간을 설정하였는데 이는 특성을 나타내는 시점구분이 다르게 나타났기 때문이다. 겨울철(11월~2월) 360일 중 서풍이 95일로 가장 많았으며 북서풍과 서남서풍, 남서풍이 148일로써 서풍 계열이 총 273일로 76%였으며, 동풍 계열은 82일에 불과하였다. 봄철(3월~5월)의 276일의 경우에도 겨울철과 마찬가지로 서풍이 106일로 가장 많았으며, 서풍 계열이 224일로 81%에 달하여 주로 서해의 기류가 유입되는 것으로 나타났다.

Table 4.36 계절별 풍향 일수('05년~'07년)

겨울(11월~2월)															
WD	E	ENE	ESE	NE	NNE	NNW	NW	S	SE	SSE	SSW	SW	W	WNW	Wsw
day	6	25	30	12	3	8	60	5	5	1	6	40	95	16	48
봄(3월~5월)															
WD	E	ENE	ESE	NE	NNE	NNW	NW	S	SE	SSE	SSW	SW	W	WNW	Wsw
day	3	10	24	2	4	5	4	5	4	0	9	29	106	8	63
여름철(6~8월)															
WD	E	ENE	ESE	NE	NNE	NNW	NW	S	SE	SSE	SSW	SW	W	WNW	Wsw
day	7	14	55	1	2	0	4	11	3	1	18	21	66	5	68
가을철(9~10월)															
WD	E	ENE	ESE	NE	NNE	NNW	NW	S	SE	SSE	SSW	SW	W	WNW	Wsw
day	20	11	54	2	4	2	17	3	0	0	3	5	30	1	31

여름철인 6월부터 8월까지는 서남서풍이 68일 가장 많았으며 다음으로 동남동풍이 55일로 많았고, 서풍 계열은 총 182일인 66%로 겨울과 봄철에 비해 감소한 반면 동풍과 남풍이 증가하였다. 가을철(9월-10월)에는 동남동풍이 54일로 가장 많았으며 서풍 계열은 총 89일인 48%였으며 동풍 계열은 91일로 50%에 달하였다.

즉, Table 4.37과 같이 계절별 특성은 겨울철과 봄철에는 서풍이 지배적이고 여름철과 가을철로 갈수록 동풍과 남풍이 증가하였는데(Fig. 4.25~4.28), 미세먼지 농도 역시 동일한 추세의 변화를 보여 풍향과 높은 상관도를 보이는 것으로 나타났다.

Table 4.37. 풍향별 미세먼지농도('05년~'07년)

	겨울철	봄철	여름철	가을철
서풍 계열 일수(%)	273(76)	224(81)	182(66)	89(48)
평균 풍속(m/s)	2.31	2.76	2.34	2.13
미세먼지 평균농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	62.7	75.7	49.7	43.9

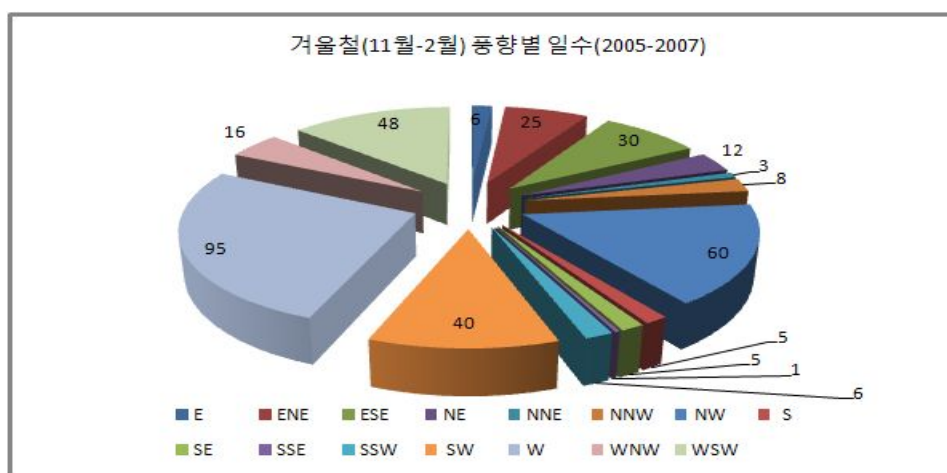


Fig. 4.25. 계절별 풍향 일수.(11월~2월)

풍속을 연계하여 보면 봄철에 평균 풍속이 가장 높고 가을철이 가장 낮음에도 미세먼지농도는 풍향에 의해 영향을 받는 것이 뚜렷하게 나타난다. 따라서 서풍이

지배적인 경우는 중국과 인천, 경기서부지역 등 서쪽에서 발생하는 미세먼지 등 대기오염물질의 유입에 의해 서울의 미세먼지농도가 높아지는 것을 알 수 있다.

앞에서 풍속과 미세먼지농도의 상관도 분석 시, 풍속이 높아지는 경우 미세먼지 농도가 낮은 날이 많아졌으나 풍속과 미세먼지농도의 상관도가 경험적 예측치보다 낮아진 이유를 풍향이 설명해 줄 수 있는 것으로 판단된다.

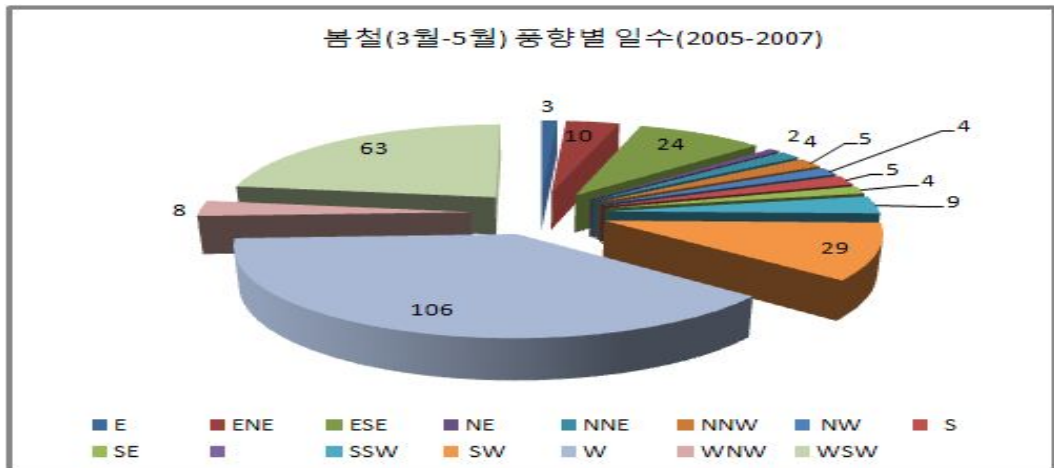


Fig. 4.26. 계절별 풍향 일수.(3월~5월)

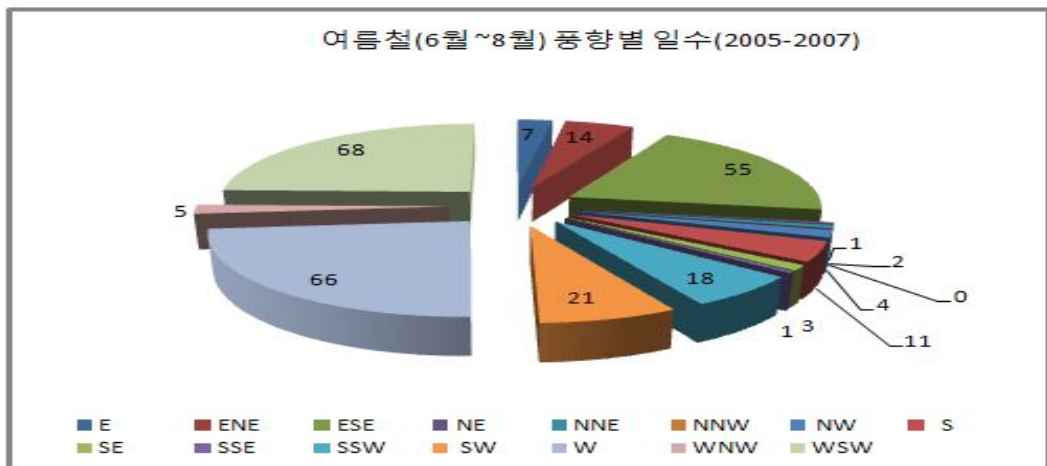


Fig. 4.27. 계절별 풍향 일수.(6월~8월)

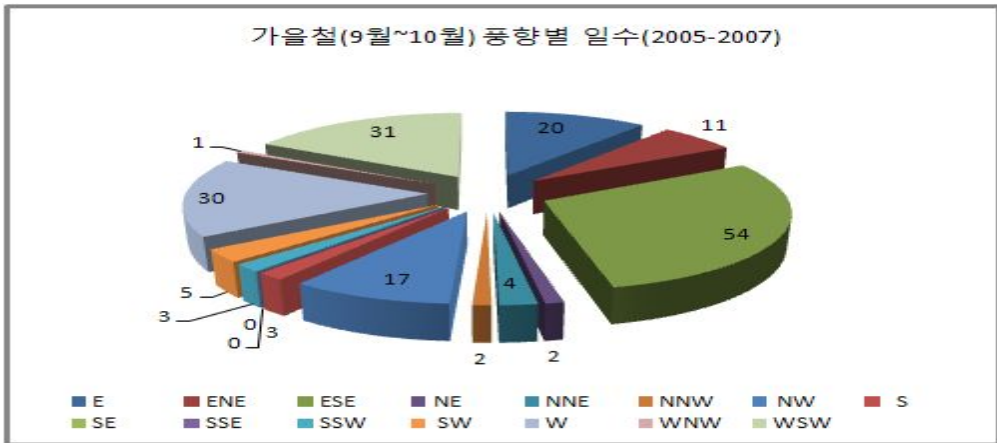


Fig. 4.28. 계절별 풍향 일수.(9월~10월)

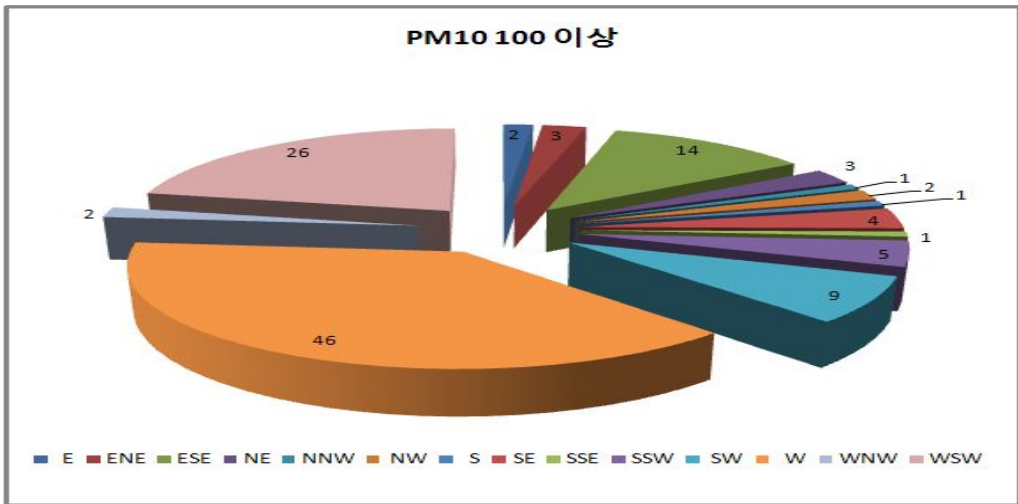


Fig. 4.29. 주 풍향별 미세먼지농도 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 일수.

다음으로 Fig. 4.29에서 풍향별 미세먼지농도의 변화를 세부적으로 보면, 일평균 미세먼지농도가 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 119일의 경우 주풍향이 서풍인 경우가 46일, 서남서풍인 경우가 26일로 가장 많았으며, 동풍인 경우는 2일이었는데 '05. 10. 26일의 경우 전 24일부터 27일까지 풍속이 낮고($0.64\sim 0.77\text{m/s}$) 박무가 지속되어 미세먼지가 높게 유지되던 중 27일 강우가 있는 후에 낮아졌으며, '06. 1. 28일의 경우도 역시 전 26일부터 풍속이 낮고($0.8\sim 1.3\text{m/s}$) 박무가 지속되어 미세먼지농도가 높아졌으며 강우가 조금 있는 후 점차 낮아졌다.

즉, 서풍이 유입되지 않는 경우 미세먼지농도가 높아지는 경우는 풍속이 낮고 박무가 형성되는 경우로 추정해 볼 수 있고, 서풍 또는 서남서풍이 유입되는 경우 미세먼지농도는 높아질 수 있음을 알 수 있다.

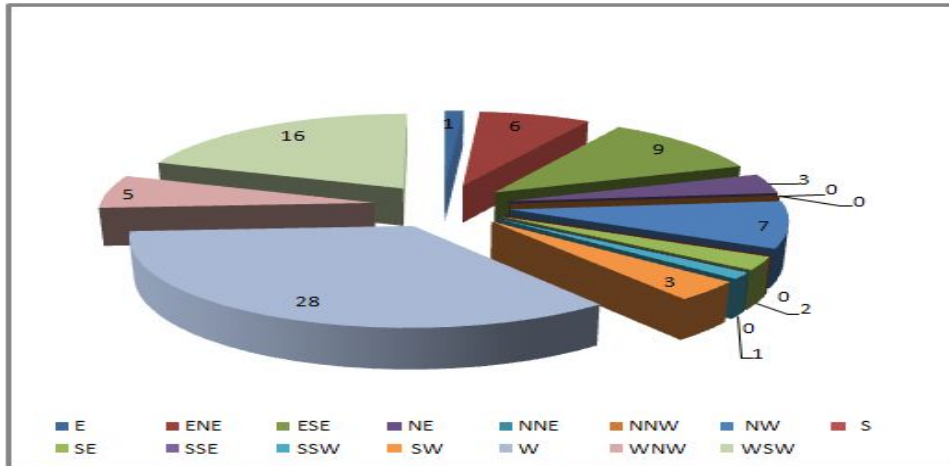


Fig. 4.30. 미세먼지농도 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(11월~2월)

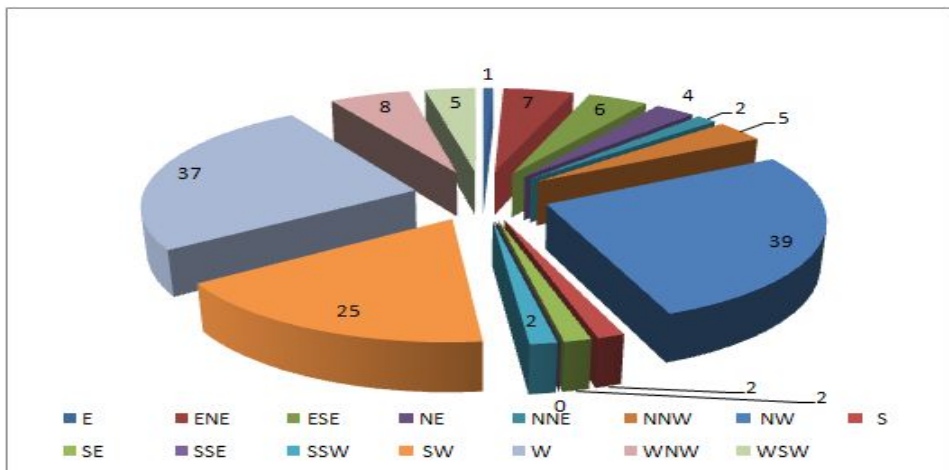


Fig. 4.31. 미세먼지농도 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(11월~2월)

Fig. 4.30에서 계절별 특성을 보면 겨울철의 경우 미세먼지농도가 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날이 81일이었는데, 이중 서풍인 날이 28일, 서풍 계열인 날은 총 60일로 74%였으며, 동풍 계열인 경우는 총 21일이었고 남풍 또는 북풍은 없었다. 한편 Fig.

4.31과 같이 일평균 미세먼지농도가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만인 날은 총 145일로서 북서풍이 39일로 가장 많았고 서풍이 37일이었으며, 동풍 또는 남풍 계열인 날이 24일이었

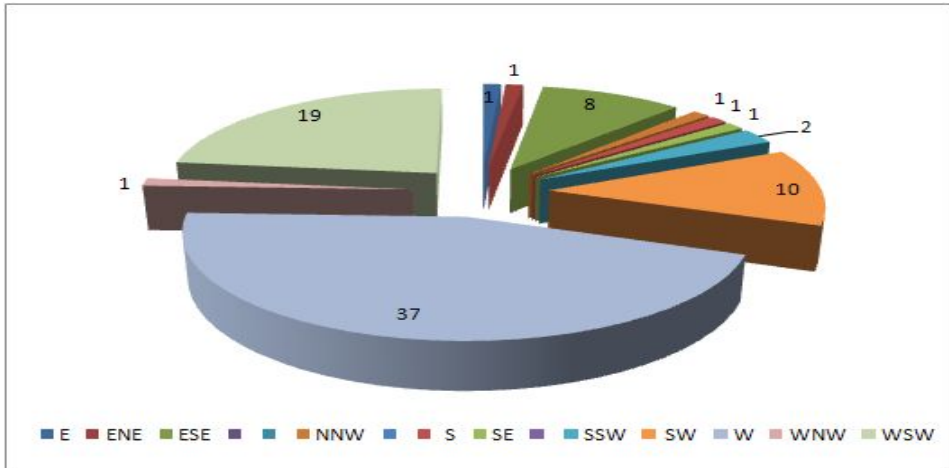


Fig. 4.32. 미세먼지농도 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(3월~5월)

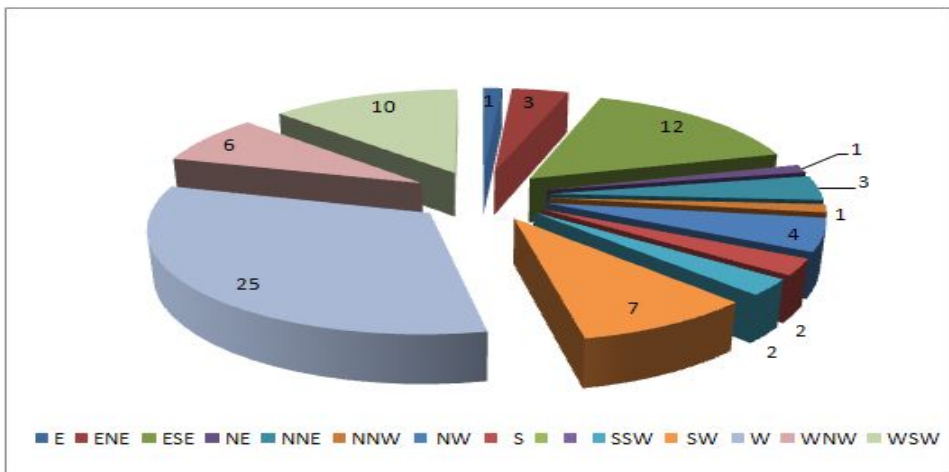


Fig. 4.33. 미세먼지농도 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(3월~5월)

Fig. 4.32와 같이 봄철의 경우에는 일평균 미세먼지농도가 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날이 총 82일로서 겨울철과 마찬가지로 서풍인 날이 37일로 가장 많았으며, 서풍 계열 총일수는 70일로 85%에 달하였으며, 동풍 계열인 날은 총 11일인 13%에 불과했다.

Fig. 4.33과 같이 일평균 미세먼지농도가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만인 날은 77일로서 주풍향이 서풍인 날이 25일로 많았으나 겨울철에 비해 줄어들고, 동풍 계열인 날이 20일인 26%로서 미세먼지농도가 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우에 비하여 약 2배가량 증가하였다.

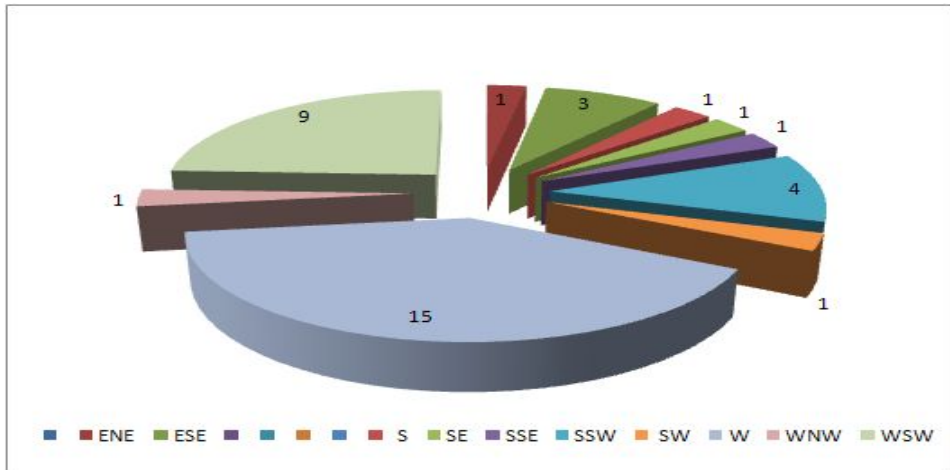


Fig. 4.34. 미세먼지농도 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(6월~8월)

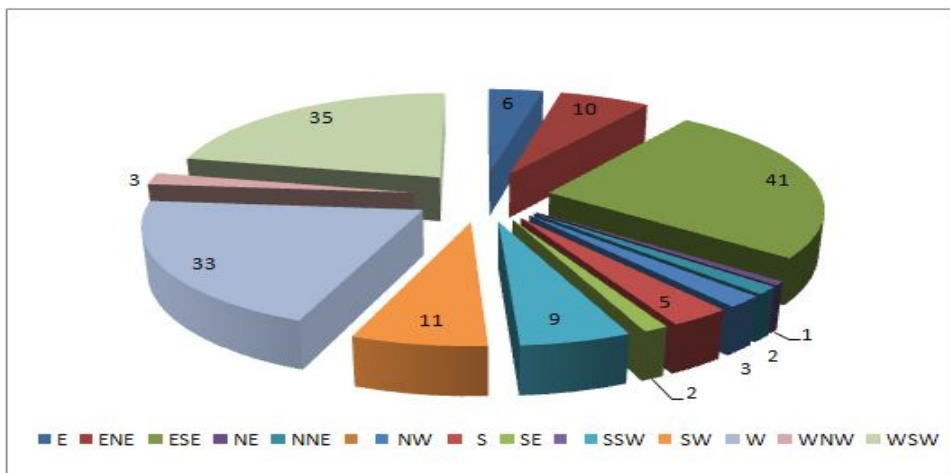


Fig. 4.35. 미세먼지농도 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(6월~8월)

Fig. 4.34와 같이 여름철에는 미세먼지농도가 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 날이 37일, $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만인 날이 161일로 대체로 낮은 오염도를 유지하였으며 미세먼지농도가 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$

/m³ 이상으로 높은 날은 동풍의 영향이 거의 없고 대체로 서풍 또는 남서풍이 유입되었으며, 미세먼지농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만으로 낮았던 날은 동남동풍이 41일로 가장 많았다.

Fig. 4.35와 같이 여름철에 미세먼지농도가 낮은 이유는 강우에 의한 영향도 많이 있을 것으로 추정되는데, 미세먼지농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만으로 낮았던 날 중에서 서풍과 서남서풍, 남서풍, 남남서풍이 있었던 총 88일 중 53일은 강우가 있었다.

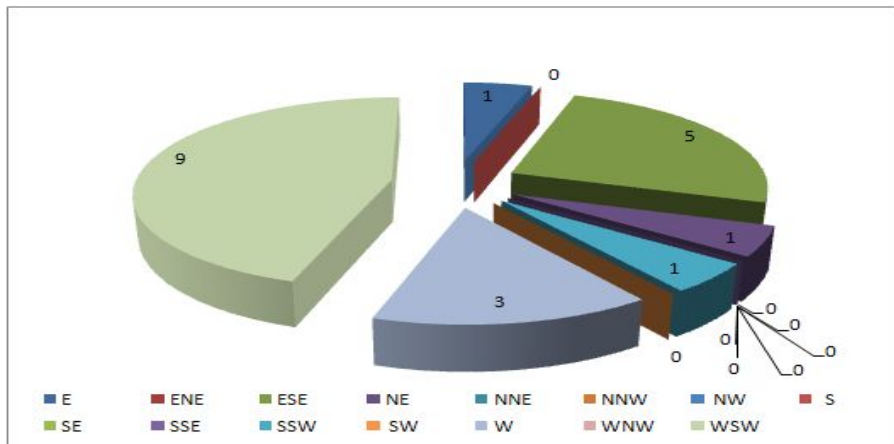


Fig. 4.36. 미세먼지농도 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(9월~10월)

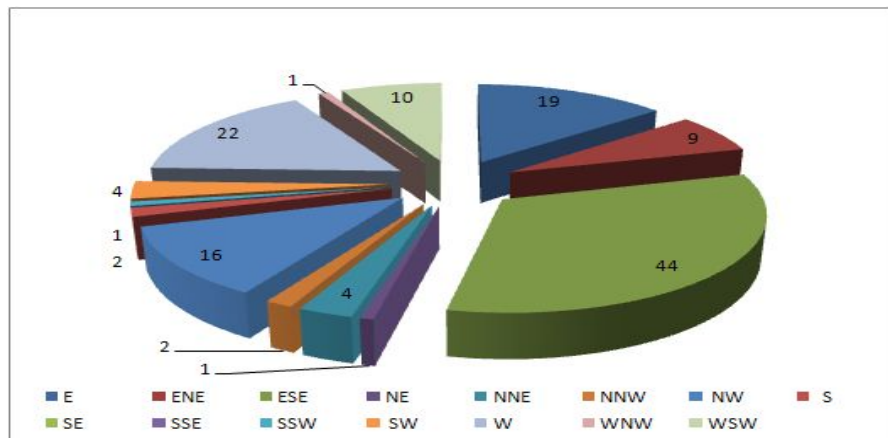


Fig. 4.37. 미세먼지농도 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 일수.(9월~10월)

Fig. 4.36, 4.37과 같이 가을철에도 여름과 비슷한 양상을 보이는데 미세먼지농도가 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우는 총 20일로서 서풍 계열 13일, 동풍 계열이었던 날이 7일이었으며, 미세먼지농도가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만인 날은 총 135일로서 서풍 계열인 날이 56일, 동풍 계열이었던 날이 77일이었고 남풍이 2일이었다. 이와 같이 볼 때 서풍이 유입되는 경우 미세먼지농도는 높아지는 것을 알 수 있고 동풍이 부는 경우에는 반대의 영향이 나타나는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 미세먼지농도가 높았던 날은 서풍 계열의 영향이 크게 작용하고, 동풍의 영향이 많아질수록 미세먼지농도가 낮아질 수 있음을 알 수 있는데, 이는 동풍의 경우 낮은 오염도의 기류가 유입되는 경우의 영향으로 파악되는바 서울지역의 미세먼지농도는 외부의 조건, 풍향에 의해 많은 영향을 받고 있음을 반증하는 것이라 볼 수 있겠다.

풍향과 미세먼지농도의 함수관계를 알아보기 위하여 풍향별 더미변수를 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 동풍과 남풍, 동북동풍, 동남동풍, 북동풍 등 동쪽에서 유입되는 풍향 계열은 더미변수를 '0'으로, 서풍과 북서풍, 남서풍 등 서쪽 풍향 계열은 '1'로 부여하여 풍속을 포함한 회귀분석을 실시하였다. 분석방법은 Microsoft Excel 2007을 이용하였으며 풍속과 풍향은 황사가 발생한 날을 포함하였고 유의수준(P-값, SPSS에서의 유의수준)은 5%로 하였다.

Table 4.38. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석('05~'07)

	Constant	St Error	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
Constant	59.68	4.217	14.15	7E-42	51.41	67.95329
X 1	-8.464	2.983	-2.838	0.005	-14.32	-2.61174
X 2	15.38	2.828	5.438	7E-08	9.831	20.92785

2005년부터 2007년까지 전체 자료를 이용한 회귀분석결과 풍속(X1)은 미세먼지농도와 부(-)의 상관도를 나타냈고, 서풍 계열(X2)인 경우는 정(+)의 상관도를 보였는데 서풍의 회귀계수는 Table 4.38과 같이 비교적 크게 나타났다. 전체적으로 풍속은 미세먼지농도를 낮추는 영향이 있으며 서풍 계열이 유입되는 경우는 풍속

이 낮추는 미세먼지농도의 2배수 가량을 높이는 것으로 추정이 가능하다는 것을 알 수 있으며, 변수별 표준오차는 $\pm 3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 나타났다. 여기서 하위 95%와 상위 95%는 변수를 한 단위 변동 시 변동될 수 있는 범위 값을 표현한다.

계절별 상관도를 보면 모든 계절에 있어 풍속(X1)은 미세먼지농도와 부(-)의 상관도를, 서풍 계열(X2)인 경우 정(+)의 상관도를 나타냈는데, 봄철에는 풍속의 회귀계수가 가장 적게 나타나 풍속이 높을 경우라도 황사 등 서쪽에서 유입되는 오염물질에 의해 미세먼지농도를 저감시키는 효과가 반감되는 것으로 추정되었다.

반면에 여름철과 가을철에는 동풍 계열의 영향이 커 풍속의 회귀계수가 크게 나타나 풍속에 의한 미세먼지 저감효과가 큰 것으로 추정되며, 서풍 계열의 회귀계수도 크게 나타나 서풍에 의한 미세먼지농도 증가효과도 큰 것으로 이해되었다. 즉 겨울철보다 봄철부터 가을철까지 서풍에 의해 미세먼지농도가 높아지는 영향이 상대적으로 크다는 의미로 볼 수 있다.

Table 4.39. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석(11월~2월)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
Constant	87.13104	4.784379	18.21157	7.08E-53	77.72193	96.54015
X 1	-20.35	3.513124	-5.79258	1.52E-08	-27.2591	-13.441
X 2	1.237671	3.791092	0.326468	0.744261	-6.21801	8.693351

Table 4.40. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석(3월~5월)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
Constant	69.10486	15.0048	4.605517	6.32E-06	39.56504	98.64469
X 1	-0.93714	9.003588	-0.10408	0.917178	-18.6624	16.78815
X 2	9.908091	10.21288	0.970157	0.332827	-10.1979	30.01409

Table 4.41. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석(6월~8월)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
Constant	65.20701	6.990463	9.327996	3.85E-18	51.44495	78.96908
X 1	-21.2147	5.059676	-4.1929	3.73E-05	-31.1757	-11.2538
X 2	15.88467	3.365359	4.720053	3.77E-06	9.259319	22.51003

Table 4.42. 미세먼지농도와 풍속, 풍향의 다중회귀분석(9월~10월)

	계수	표준 오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
Constant	68.91173	6.282553	10.96875	9.15E-22	56.51481	81.30866
X 1	-29.0527	5.03565	-5.76941	3.41E-08	-38.9892	-19.1162
X 2	14.76194	3.668577	4.023888	8.42E-05	7.522992	22.00089

Table 4.39~4.42와 같이 풍향은 미세먼지농도에 미치는 영향이 일관되게 나타나고 있으나 대류층의 높이에 따른 유동방향이나 기류 층고별 정량적 파악이 어려운 관계로 예보에 절대적인 변수로 활용하기 어려운 점이 있다. 그러나 다른 변수에 비해 영향의 방향(+ or -)이 비교적 일정하게 나타나므로 예보 시 보완변수로서 가치가 크다고 볼 수 있겠다.

4) 일교차와 안개의 영향 분석

안개나 박무, 일교차의 역할과 영향을 파악하기 위하여 '05년부터 '07년까지 972일간의 일교차와 상대습도, 미세먼지농도의 관계를 살펴보았다. 일교차는 기상청에서 관측한 일별 최고기온과 최저기온의 차를 산정하였다. 일교차는 전일의 최고기온과 당일의 최저기온차를 산정하였으며, 총 1,095일 중 황사가 발생하였던 날과 황사의 영향일, 그 밖에 기록이 불분명한 자료 등 123일을 제외하였다.

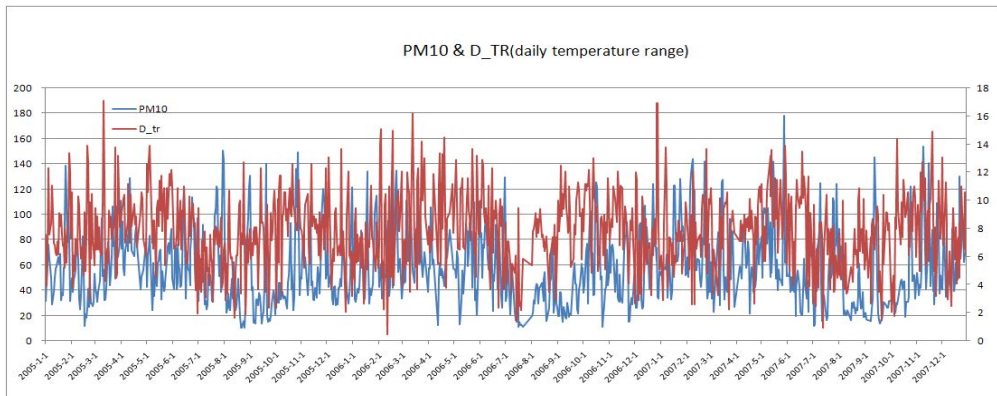


Fig. 4.38. 미세먼지농도와 일교차.('05~'07)

Fig. 4.38과 같이 총 972일 중 일교차의 평균은 7.84℃, 일교차가 가장 큰 날은 '05. 3. 11일로 17.1℃이었으며, 가장 작은 날은 '06. 2. 10일로 0.5℃로 나타났다. 일교차가 가장 컸던 경우 전날은 비와 안개비가 내렸고 당일에도 강우가 있었으며, 전일에 비해 미세먼지농도가 5.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 상승하였다. 일교차가 가장 적었던 날은 전날 강설이 있었으며 당일은 박무가 있었고 미세먼지농도는 48.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 높아졌다. 강우가 강설이 있는 경우보다 대기세정효과가 크게 나타내며, 박무가 있는 경우 미세먼지농도가 높아지는 것으로 보인다.

미세먼지와 일교차(DTR, Daily Temperature Range)의 직접적인 관계는 일교차가 큰 경우 미세먼지농도를 상승시키는 것으로 나타났으나($Y=57.28+0.09D_R$), 상관도는 0.008로 정량적인 함수를 알기 어려웠다. 계절별로 겨울과 봄철에 상대적으로 양의 관련성이 크게 보이며, 5월부터는 상대적으로 음의 관련성이 크게 나타난다.

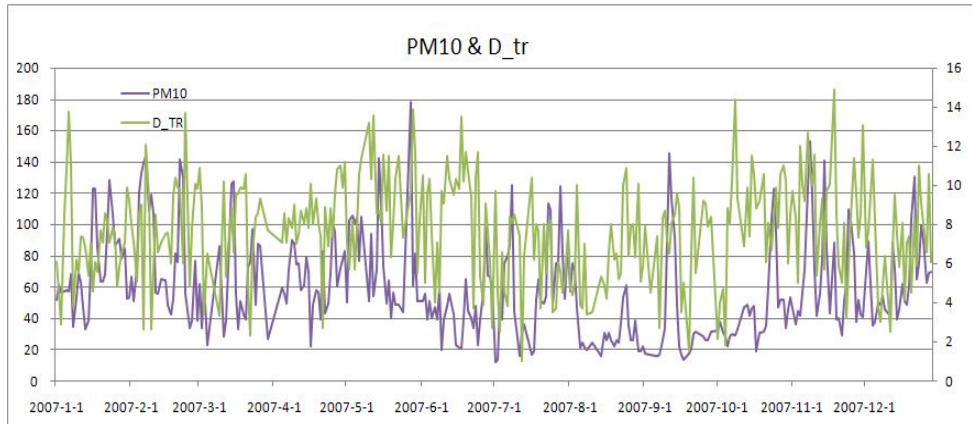


Fig. 4.39. 미세먼지농도와 일교차.('07년)

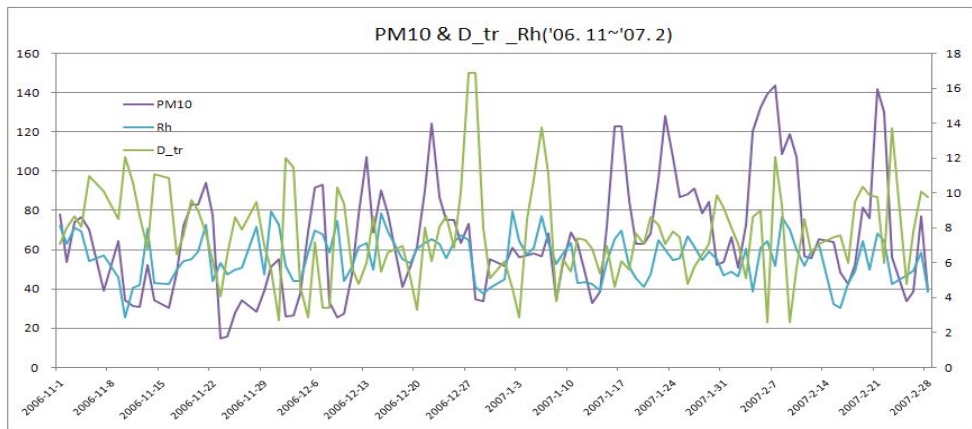


Fig. 4.40. 미세먼지농도와 일교차.('06. 11~'07. 4)

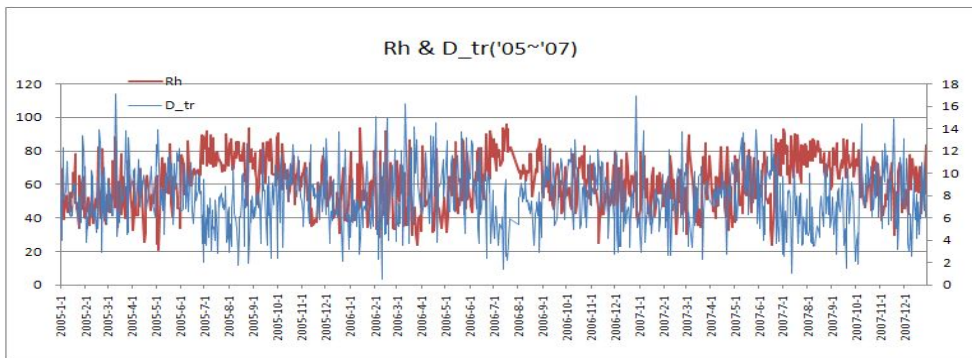


Fig. 4.41. 미세먼지농도와 일교차.('05. 1. 1~'07. 12. 28)

한편, 일교차와 상대습도의 상관도는 0.33, 단회귀분석의 결과는 일교차와 상대 습도가 음의 상관도를 보였으며($Y=75.54-1.849DTR$), 여름철에는 일교차가 낮아도 상대습도는 높아 강우기간의 영향특성을 보이는 것으로 보인다.

황사가 있었던 날을 제외하고 2005년부터 2007년까지 박무가 있었던 571일간(강우·강설 포함)의 일교차와 미세먼지농도의 상관도는 0.069로 낮게 나타났으며 회귀분석결과는 일교차가 미세먼지농도에 비교적 높은 상관도를 나타냈다($Y=62.056+0.807DTR$).

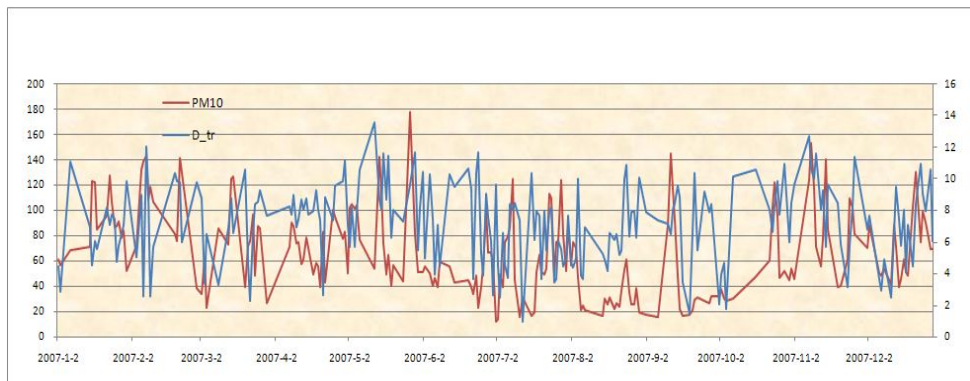


Fig. 4.42. 미세먼지농도와 일교차.('07)

Fig. 4.42에서 '07년 미세먼지와 일교차의 변화추이를 보면, 일교차가 크면 미세먼지농도가 높아지는 경우와, 일교차가 크지만 미세먼지농도가 낮아지는 극한 양상을 보이는 경우가 많은데, 전자의 경우 풍속이 낮아지는 대기 정체상태와 입자의 흡수로 인한 질량농도의 증가를 예상할 수 있고, 후자의 경우는 강우에 의한 세정효과를 생각해 볼 수 있다. 주기적 경향을 보면 4월 이후에는 일교차와 미세먼지농도가 음의 관계를 보이는 경향이 크고, 겨울철과 봄철에는 양의 관계를 보이는 추세로 나타난다.

한편, Fig. 4.43과 같이 상대습도와 일교차의 상관도는 0.284로 나타나며 회귀결과는 일교차가 상대습도를 낮추는 음의 상관도를 보였는데($Y=77.368-1.274DTR$), 이는 강우가 있는 후 상대습도가 높아지나 계절적 특성으로 인해 일교차가 크게 차이가 나지 않는 경우를 추정해 볼 수 있으며, 실제적으로 7월부터 10월초까지 일교차의 폭이 크게 나타났다. 즉, 여름철에 건조한 날씨가 지속되다가 강우가 있는 경우 상대습도는 매우 높아지게 되나, 강우가 있는 여름철의 경우 직사광선의

수광량(受光量)이 적어 복사열이 적어지게 되므로 일교차가 적어지기 때문으로 볼 수 있다.

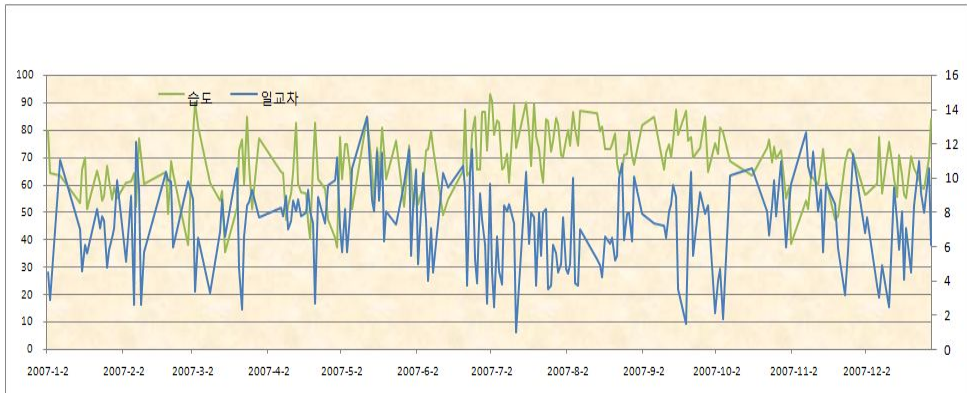


Fig. 4.43. 상대습도와 일교차.('07)

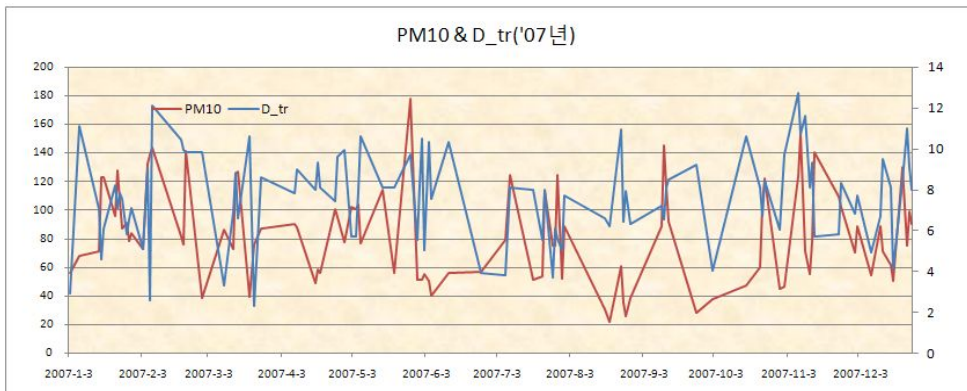


Fig. 4.44. 미세먼지농도와 일교차.(2007, 강우·강설 제외)

Fig. 4.44와 같이 강우나 강설이 없이 박무와 안개, 연무만 있었던 303일간의 미세먼지농도와 일교차의 변동추이를 보면 상관도(R)가 0.004로 낮았으며 회귀식은 일교차가 미세먼지농도를 높이는 영향이 있는 것으로 나타났다($Y=77.759+0.046DTR$).

2007년도 박무가 있었던 날만의 경우 미세먼지농도와 일교차의 상관도(R)는 0.066, 회귀분석은 일교차 1단위가 미세먼지농도 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 높이는 것으로 나타났다($Y=74.85+0.992DTR$). 따라서 강우나 강설이 없이 박무 또는 안개가 있는 경우 미세먼지농도를 높이는 영향이 있음을 나타내는 것으로 평가하여야 할 것으로 판

단된다.

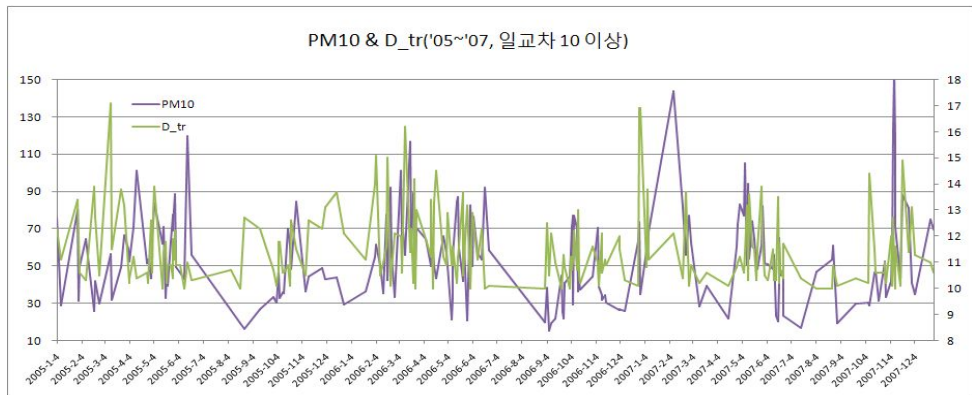


Fig. 4.45. 미세먼지농도와 일교차.(일교차 10℃ 이상)

Fig. 4.45와 같이 2005년부터 2007년까지 일교차가 10℃ 이상인 199일이었으며 강우나 강설이 없이 박무 또는 연무만 있는 날은 57일로서 미세먼지농도와 상관도(R)는 0.148, 회귀분석결과는 일교차가 큰 경우 미세먼지농도를 증가시키는 것으로 나타났다($Y=36.52+3.083DTR$).

이처럼 일교차가 낮은 상관도를 보이는 것은 강우가 있는 경우와 온난한 일기 중 북풍계열의 한랭기류의 유입이 있는 경우 일교차는 크나 미세먼지농도와 상대습도는 낮아질 수 있으며, 미세먼지농도가 높게 유지되는 경우에도 기온차가 커 박무가 발생하는 경우 미세먼지농도나 상대습도의 차는 적어질 수 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

따라서 일교차가 큰 경우라도 미세먼지농도와 상대습도는 풍속 등 다른 기상여건에 의해 주로 변동되는 것으로 보여, 일교차는 미세먼지농도의 예보에 직접적인 상관변수로 포함시키지는 않는 것이 타당할 것으로 판단된다.

5) 상대습도의 영향 분석

가. 상대습도(Relative Humidity)와 미세먼지의 상관성

미세먼지의 농도는 습도와 연관성을 갖는 것으로 평가되고 있다. 특히, 미세먼지농도가 높아지는 날은 황사의 발생이나 서해에서 이루어지는 대기오염물질의 유입 영향 외에 지역적으로 박무의 발생이나 일교차가 큰 날 지표면의 복사안개(Radiation fog) 등에 의한 영향이 큰 것으로 보고되고 있다.

대기 중의 습도(濕度)가 높은 날은 수증기가 흡습성 입자상 물질의 성장을 돕게 되고 응집(凝集), 응축(凝縮) 등의 과정을 거치고 흡착도(吸着度)를 높여 입자의 질량농도(質量濃度)를 증가시킴으로서 미세먼지농도를 높이게 되며, 또한 측정기의 오차를 유발시키는 요인으로 작용된다. 특히 최근에는 기체상물질의 입자화에 대한 연구가 진행되고 있고, 이 과정에서 미세먼지농도 등 대기오염물질에 미치는 상대습도(Relative Humidity)의 영향을 정량적으로 분석하는 것이 필요하다는 의견이 대두되고 있다.

Fig. 4.46과 같이 2008년 환경부의 연구에 의하면 상대습도(Relative Humidity)가 70%까지는 상대습도의 증가에 따라 미세먼지농도가 같이 증가하나, 상대습도가 70% 이상에서는 상대습도가 증가할수록 미세먼지농도는 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고되었는데, 이는 상대습도가 70% 이상의 날은 강우일이 많은 경우로 강우에 의한 대기의 세정효과에 의한 이유로 추정할 수 있다.

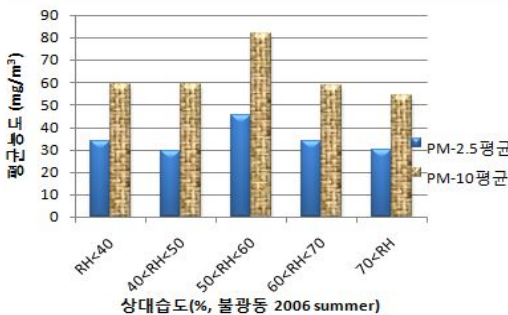


Fig. 4.46. 상대습도와 미세먼지농도.

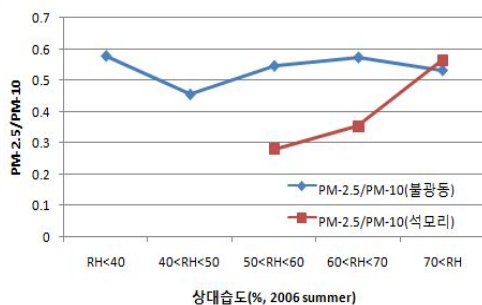


Fig. 4.47. PM_{2.5}/PM₁₀ 입경비.

Fig. 4.47과 같이 입자의 크기변화와 정량적 농도에 관련한 연구결과는 상대습도가 증가할수록 PM₁₀과 PM_{2.5}의 차이가 줄어들고, 당일 강우량이 1mm 이상의 강우일을 포함하는 경우 높은 습도에서는 강우에 의한 조대입자의 제거가 많아 입경별 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

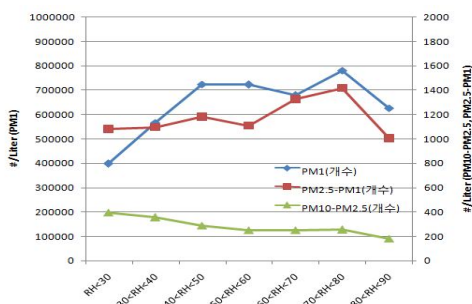


Fig. 4.48. 상대습도에 따른 입자분포.

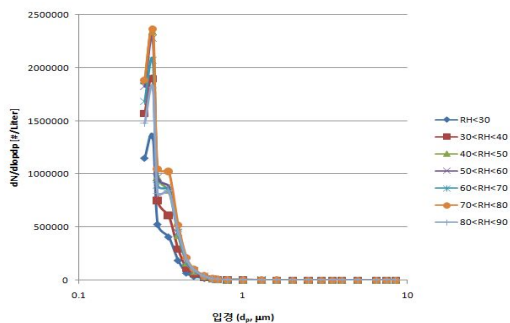


Fig. 4.49. 상대습도에 따른 입자수분포.

Fig. 4.48과 같이 계절별 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도비를 보면, 봄철의 경우 습도가 증가할수록 PM_{2.5}의 농도가 증가하는 경향을 보이고 있으며 PM₁₀은 증가가 뚜렷하지 않은 것으로 나타났는데, 이를 황사 등으로 인한 영향으로 습도와 상관없는 조대입자의 증가를 원인으로 해석하였다. 여름철은 PM₁₀과 PM_{2.5}의 모두 습도와 비례하지 않는 것으로 나타났는데 이는 여름철에 습도가 낮은 경우가 잦고, 습도가 높은 구간에서는 강우에 의한 세정작용이 자주 있었던 것으로 해석되었다. 가을과 겨울철은 습도가 높을수록 미세먼지농도가 증가하였으며 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율도 증가하는 것으로 보고되었다.

Fig. 4.49와 같이 광학적 입자계수기를 이용한 입도별 습도와의 상관성을 분석한 결과는 습도가 높을수록 조대입자보다는 PM_{2.5} 이하의 농도가 증가하는 경향이 있음을 나타내었고 PM_{10-2.5}는 감소되는 경향을 보였다. 특히, PM₁의 증가가 가장 높았는데 질량농도를 습도에 비교하였을 때에도 동일한 결과를 나타냈는바, 상대습도의 증가에 따른 미세먼지입자의 성장은 초미세입자 영역에서 뚜렷하다는 결론을 얻었다.

Fig. 4.50과 같이 일별 분석과 더불어 시간적인 변화추이를 보면, 상대습도는 새벽 및 오전에 높다가 낮에 감소하고 저녁이 되면서 증가하는 전형적인 변화경향

을 보이는데, PM_{10} 이하 극미세입자의 경우 Fig. 4.51과 같이 시간에 따라 증가하다가 오후에는 감소하는 경향을 보였으며, PM_{10} 이상의 경우는 오후 3시경 일 중 가장 높은 농도를 보이고 오후 5시경에 가장 낮은 농도를 보였다. 이는 오전 출근시간에 차량운행이 증가됨에 따라 이동오염원에 의한 PM_{10} 의 농도가 증가하는 것으로 보고, PM_{10} 이상의 입자는 차량보다 사람의 활동과 바람 등의 영향에 기인하는 것으로 추정하였다.

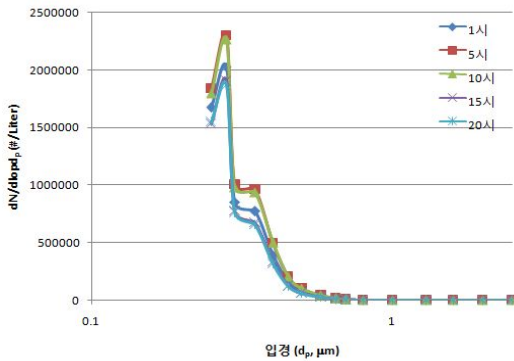


Fig. 4.50. 일별 상대습도에 따른 시간별 경향.('08, 4월)

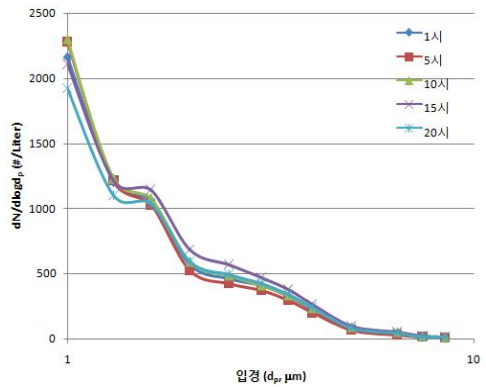


Fig. 4.51. 시간별 입자크기 변화.

이 장에서는 '05년부터 '07년까지 황사 발생일과 0.1mm 이상 강우일을 제외한 측정 자료를 주로 이용하여 습도와 미세먼지농도간의 관계를 분석하였다. 이는 모든 측정 자료를 사용한 상대습도와 미세먼지농도 간 상관성은 늦가을과 겨울철은 부분적으로 양의 상관성을 나타냈으나, 전체적으로 음의 상관성을 나타내 강우에 의한 세정효과와 황사 등의 비일상적 에피소드를 반영하지 못하는 것으로 평가되므로, 환경부의 연구에서와 같이 황사와 강우를 제외하고 분석을 시행하였다.

Table 4.43. 미세먼지농도와 상대습도의 월별 상관도

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
'07년	0.426	0.596	-0.063	0.094	-0.007	0.394	-0.029	-0.081	-0.086	0.308	0.447	0.263
'06년	0.216	0.607	0.336	-0.174	-0.154	-0.191	-0.558	0.453	0.321	0.626	0.206	0.448
'05년	0.502	0.066	0.404	-0.077	-0.522	0.035	-0.415	0.176	0.303	0.257	0.729	0.428

Table 4.43과 Fig. 4.52와 같이 2005년부터 2007년까지 황사가 발생한 날을 제외하고 1,056개의 일별 측정 자료를 분석한 결과, 가을부터 겨울철까지는 상대습도가 높아짐에 따라 미세먼지농도가 상승되는 경향이 나타나지만(10월~2월), 대기오염도 상승에 미치는 다수의 요인이 복합적으로 작용됨에 따라 개별변수 간 상관성(Pearson Correlation)이 경험적으로 예상한 것보다 크게 나타나지는 않았다.

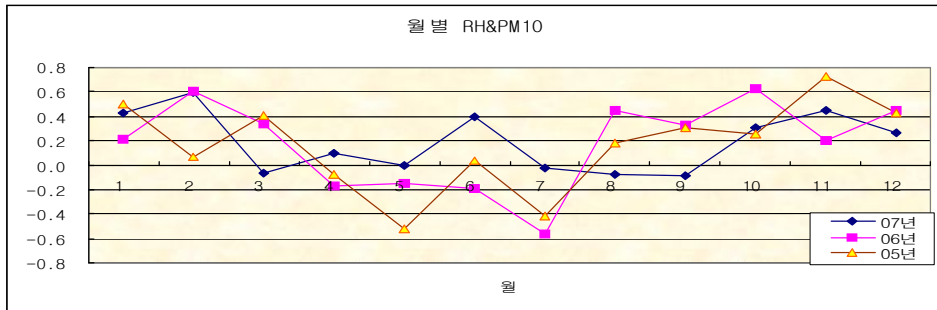


Fig. 4.52. 월별 미세먼지농도와 상대습도의 상관도.

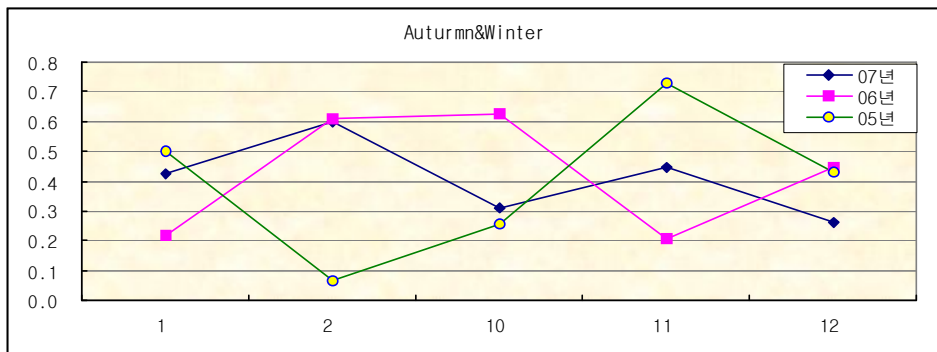


Fig. 4.53. 미세먼지농도와 상대습도의 상관도.(가을철, 겨울철)

Fig. 4.53과 같이 주로 강우가 없는 가을과 겨울철에 비례적으로 상관있는 변동 추이를 보였으며, 3월부터 9월 사이에는 연도별로 방향성이 달라 강우의 세정효과가 큰 경우는 음의 관계를 보인 것으로 나타났다.

'07년 3월은 0.1mm 이하의 강우가 있었던 날이 1일이며 월 강우량이 91mm로 많아 습도와 미세먼지농도가 음의 상관도를 보였으나, '06년과 '05년은 3월의 강우량이 13.8mm, 12.5mm에 그쳐 습도에 대한 양의 관계를 보이는데, 미량의 강우로 습도가 높아지는 경우에는 습도가 증가할수록 미세먼지농도가 높아지나, 세정효과의 지속시간을 예측하기 어려우며 서풍의 영향이 지속되는 시기로서 외부의 영향으로 인한 고농도 에피소드가 발생함으로 인해 먼지농도 예측은 매우 어려움을 나타냈다. 그러나 10월부터 3월 사이에는 상대습도가 미세먼지농도를 예측하는데 활용이 가능한 점을 시사한다고 보여진다.

Table 4.44. 상대습도와 미세먼지농도의 상관도(강우 0.1mm 미만)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rh
Pearson Correlation	0.685	-0.009	0.618	0.601	-0.046	-0.231	0.231

Table 4.44와 같이 서울은 국지적으로 강우가 있는 날이 있으며, 국지적인 소량의 강우에 의해서도 일부 측정지역에서는 세정효과를 나타낼 수 있고 27개 측정소에서 각기 다른 기상적 영향을 받을 수 있으며, 이로 인해 전체적인 미세먼지농도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 0.1mm 이상의 강우일과 황사가 발생한 날을 제외하고 '05년부터 '07년까지의 725일 동안 측정자료를 이용하여 분석한 결과, 미세먼지농도와 상대습도, 풍속의 상관도는 각각 0.231, -0.231로 나타났으며 SO₂, NO₂, CO의 상관도가 높았으나, O₃과 기온의 상관도는 낮고 유의수준을 벗어나 보였다.

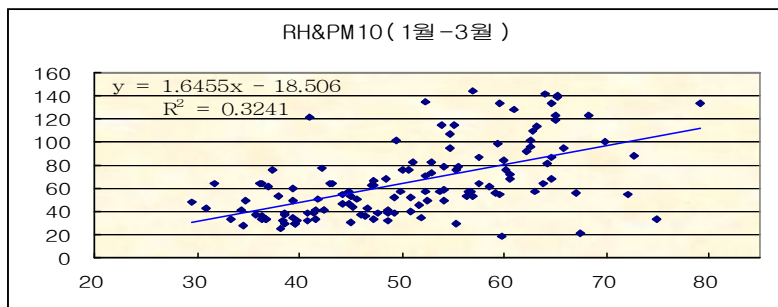


Fig. 4.54. 비강우일의 상대습도와 미세먼지농도.(1월~3월)

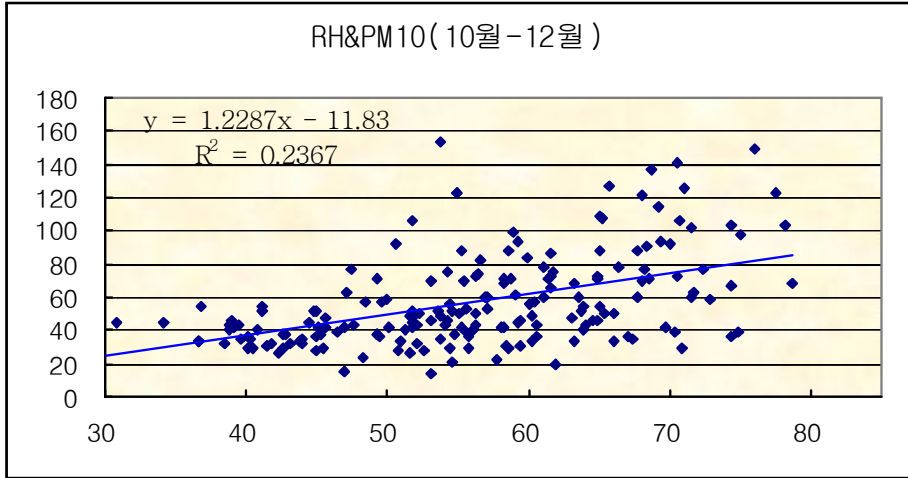


Fig. 4.55. 비강우일의 상대습도와 미세먼지농도(10월~12월).

강우에 의한 세정효과를 배제하고 상대습도와 미세먼지농도의 상관도를 보기 위하여 강우가 있었던 날을 제외하고 637일의 자료를 분석한바, Fig. 4.55와 같이 10월부터 3월까지 높은 상관도를 보였는데 특히, Fig.4.54와 같이 1월부터 3월까지 상대습도에 의한 미세먼지농도 상승효과가 높은 것으로 나타났으며 여름철에는 큰 폭으로 낮아지는 경향을 보였다.

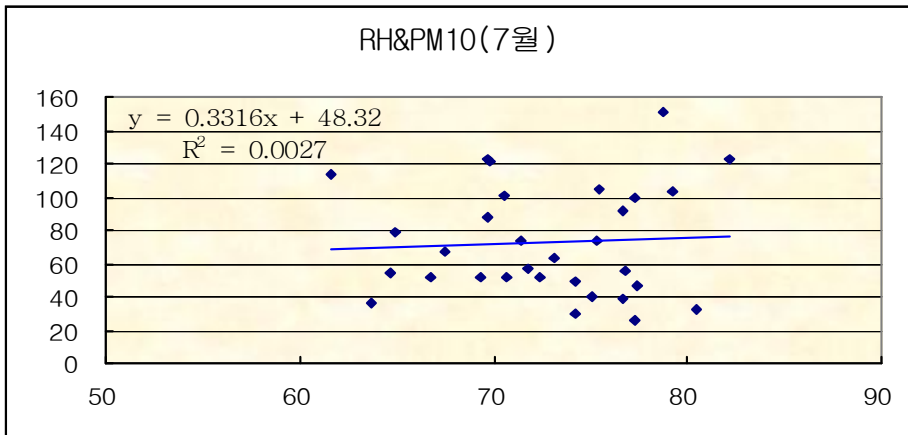


Fig. 4.56. 비강우일의 상대습도와 미세먼지농도(7월).

Fig. 4.56과 같이 이는 비강우시 상대습도가 높아지는 경우는 상대적으로 풍속이 낮아 혼합고 및 기류의 이동이 적다는 것을 짐작할 수 있는데, 이때에 미세먼지농도는 동반 상승하고, 풍속이 높아지는 경우 습도가 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있어 비강우일의 풍속이 낮고 습도가 높아지는 경우 미세먼지농도는 상승됨을 나타내 보였다.

Table 4.45. 상대습도와 미세먼지농도의 상관도(비강우일)

월 별	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
Pearson Corr	0.560	0.574	0.458	0.114	0.072	0.503	0.052	0.441	0.312	0.576	0.532	0.659

Table 4.45와 같이 계절적 상관도를 보면 10월에서 3월까지의 높은 상관도를 보였으며 여름철은 상관도가 낮게 나타나 계절적으로 상대습도가 미세먼지농도에 미치는 영향은 풍속, 기온 등 다른 기상요인의 작용과 상관성이 있으며 특히 겨울철에는 미세먼지농도에 주 영향 변수인 것으로 이해된다.

Table 4.46. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석('06. 7월)

Specified	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rh	Rain
Pearson Corr	0.631	0.309	0.364	0.489	0.515	-0.111	-0.405	-0.383
Sig. (1-tailed)	0.0003	0.0622	0.0337	0.0056	0.0036	0.2946	0.0202	0.0268

Table 4.46과 같이 늦가을과 겨울철에 높은 상관도를 보인 것과 달리 '06년 7월의 경우 음의 상관도를(-0.405) 보였는데 이때에는 강우일이 27일이나 되고 강우가 없었던 날이 4일에 불과하여 연속적인 강우로 습도가 높게 유지되었으나 강우에 의한 대기세정효과가 지속되어 미세먼지농도와 음의 상관도를 나타냈던 것으로 이해된다. 여기서 Sig(1-tailed)는 단측 검증을 의미하므로 앞에서 통상적으로 사용한 양측검증을 추정하려면 곱을 하여 판단하면 될 것이다.

풍속 구간별 상대습도와 미세먼지농도의 관계를 보기 위하여 풍속이 2m/s 이하인 경우, 2m/s 초과 3m/s인 경우, 3m/s 초과 4m/s인 경우, 4m/s 초과인 경우로 나누어 상관성을 분석하였으며, 유사한 특성을 보이는 기간별로 재분류 하였다.

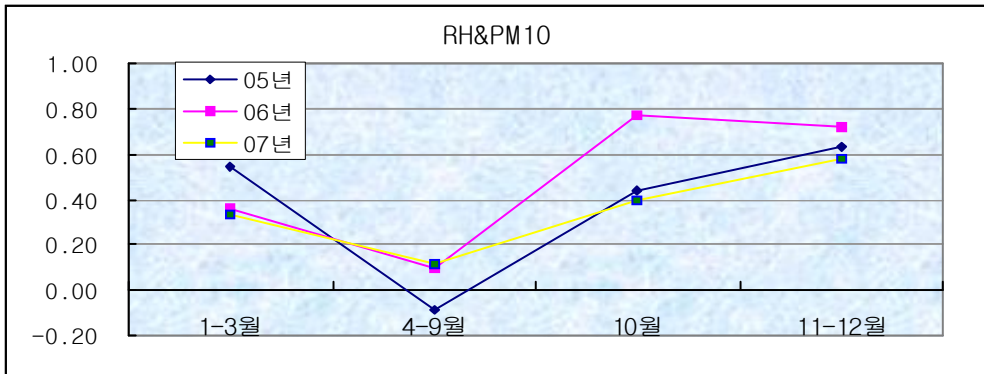


Fig. 4.57. 상대습도와 미세먼지농도.(풍속 2m/s 이하, 강우 0.1mm 미만)

Table 4.47, Fig. 4.57과 같이 강우량이 0.1mm 미만이고 일 평균풍속이 2m/s 이하인 327일의 분석결과를 보면 상관도가 0.199이었으나, 겨울철인 11월부터 3월까지의 0.33~0.72까지 비교적 높은 상관성을 나타냈으며, 여름철에는 낮거나 음의 상관도를 보였다. 계절별로는 가을과 겨울철이 높은 상관도를 보였으며 '06년 10월이 0.77로 가장 높았다. 이에 미루어보면 풍속이 2m/s 이하로 낮은 경우 상대습도의 증가는 미세먼지농도를 증가시키는데 밀접하게 기여하는 것으로 이해되며 경험적 관측과 부합된다.

Table 4.47. 상대습도와 미세먼지농도의 상관도
(풍속 2m/s 이하, 강우 0.1mm 미만)

	2005년	2006년	2007년
1월~3월	0.543	0.360	0.33
4월~9월	-0.085	0.097	0.11
10월	0.436	0.77	0.39
11월~12월	0.632	0.720	0.57582

Table 4.48. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석
(풍속3m/s이하, 강우0.1mm미만)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rh
Pearson Corr	0.642	0.160	0.581	0.560	0.008	-0.031	0.214
Sig.(1-tailed)	0.000	0.003	0.000	0.000	0.445	.298	0.000

Table 4.48과 같이 강우량이 0.1mm 미만이며 일 평균풍속이 2m/s를 초과하고 3m/s 이하인 날은 294일로서 미세먼지농도와 상대습도의 상관도는 0.214로 나타났고, 기온과 풍속은 유의성 수준을 벗어났으며 예측치(Predicted value)의 오차는 다소 높게 나타나 보였다.

Table 4.49. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석
(풍속 2m/s 이상 3m/s 미만, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rh
Pearson Corr	0.781	-0.117	0.696	0.650	0.461	-0.155	0.628
Sig.(1-tailed)	0.000	0.093	0.000	0.000	0.000	0.040	0.000

Table 4.50. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석
(풍속 2m/s 이상 3m/s 미만, 강우 0.1mm 미만, 4월~10월)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rh
Pearson Corr	0.668	0.398	0.505	0.665	-0.131	0.061	0.033
Sig.(1-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	0.220	0.335

Table 4.49와 같이 늦가을과 겨울철인 11월부터 3월까지 129일의 분석 결과 0.628의 상관도를 보여 상대습도가 미세먼지농도에 크게 영향을 미치는 것을 나타내 보였으며, Table 4.50과 같이 4월부터 10월까지 165일은 유의한 상관도가 보이지 않았다. 이는 풍속이 2m/s를 초과하고 3m/s 이하인 경우 늦가을과 봄철까지는 상대습도의 증가가 미세먼지농도 증가에 영향을 많이 미치나, 여름철에는 미세먼

지농도를 증가시키는데 다른 변수에 비해 크게 기여하지 않는 것으로 이해되는데, 풍향이 주요변수로 작용됨을 추정된다.(Fig. 4.58, 4.59)

늦가을과 겨울철에 오염도가 높은 서해기류가 유입되는 경우 풍속이 2m/s 이상 임에도 상대습도가 높아지면 미세먼지농도가 상승되는데 풍속은 음의 상관도를 나타내고 상대습도는 양의 상관도를 보이는데, 이 두 변수가 상호 상쇄효과를 갖는다고 추정할 때 풍속이 낮고 대기가 정체되는 경우 미세먼지농도는 더 높아질 수 있는 점이 시사된다.

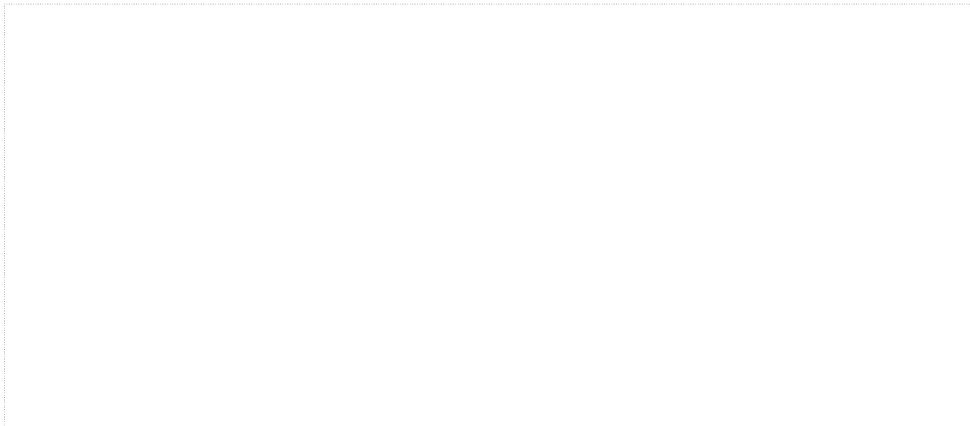


Fig. 4.58. 미세먼지농도와 상대습도.
(풍속 2m/s 이상 3m/s 미만, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)

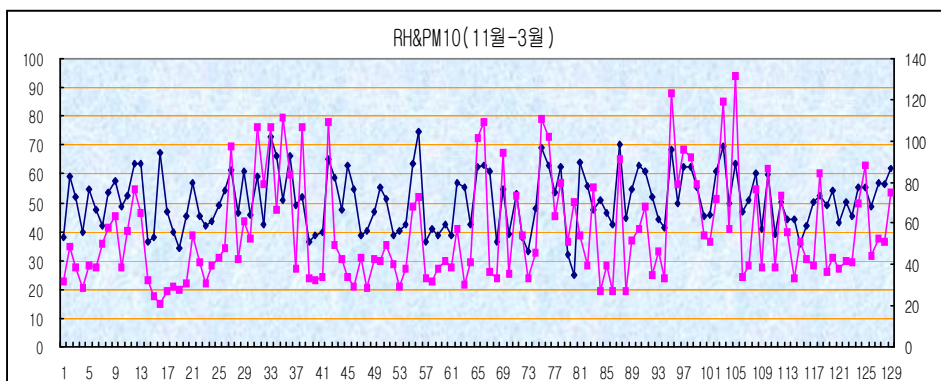


Fig. 4.59. 상대습도와 미세먼지농도.
(풍속 2m/s 이상 3m/s 미만, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)

Table 4.51, Fig. 4.60과 같이 강우량이 0.1mm 미만이며 일 평균풍속이 3m/s 초과, 4m/s 이하인 날은 83일로 전체의 상관도는 0.273이었으며, Table 4.52와 같이 11월에서 3월까지 48일간의 상관도는 0.524로, 풍속이 3m/s 이하인 경우보다 소폭 낮았으나, 상대습도가 높은 경우라도 풍속이 높아질 경우 미세먼지농도에 대한 상대습도의 영향이 낮아지는 것으로 추정할 수 있다.

반면, 4월부터 10월까지의 기간은 0.051로 낮아 여름철에는 풍속이 서울 평균 (2.4m/s)을 넘는 경우 상대습도에 의한 미세먼지농도는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

Table 4.51. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석

(풍속 3m/s 초과 4m/s 이하, 강우 0.1mm 미만, 4월~10월)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rh
Pearson Corr	0.740	0.257	0.726	0.6578	0.022	-0.191	0.273
Sig.(1-tailed)	0.000	0.009	0.000	0.000	0.423	0.042	0.006

Table 4.52. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석

(풍속 3m/s 초과 4m/s 이하, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rh
Pearson Corr	0.7021	-0.0553	0.7605	0.5695	0.4656	-0.2799	0.5238
Sig.(1-tailed)	0.000	0.354	0.000	0.000	0.000	0.027	0.000

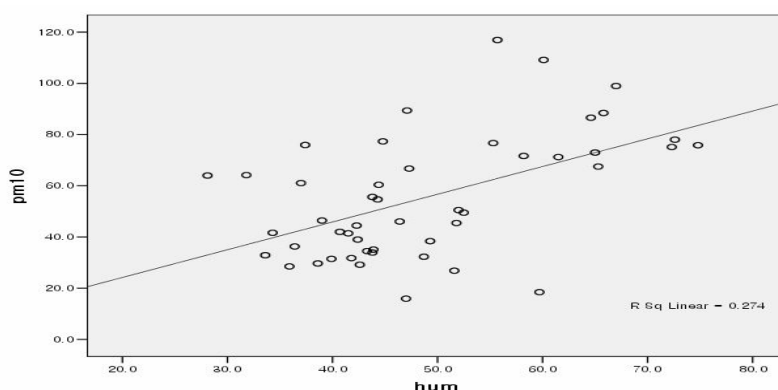


Fig. 4.60. 상대습도와 미세먼지농도.

(풍속 3m/s 이상 4m/s 미만, 강우 0.1mm 미만 11월~3월)

Table 4.53. 미세먼지농도와 항목별 다중회귀분석

(풍속 4m/s 초과 6m/s 이하, 강우 0.1mm 미만 11월~3월)

	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO	Temp	Ws	Rh
Pearson Corr.	0.5053	0.1101	0.2656	0.2904	-0.5874	-0.1461	-0.5817
Sig.(1-tailed)	0.0097	0.3174	0.1223	0.1008	0.0026	0.2637	0.0028

Table 4.53, Fig. 4.61과 같이 강우량이 0.1mm 미만이고 일 평균풍속이 4m/s를 초과하는 날은 21일에 불과하였으며, 미세먼지농도와 상대습도 간 상관도는 -0.582로 음의 관계를 나타냈다. 즉, 풍속이 높고 강우량이 없는 경우 기온과 습도는 미세먼지농도에 음의 관계를 나타내는바, 풍속이 높은 경우 모든 기상항목이 풍속과의 공변성을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 기상변수간의 다중공선성이 전제되는 경우, 특정항목이 예측과 달라질 때 전체적인 영향도가 변화되므로 미세먼지농도의 예측은 틀려질 수 있음을 알 수 있다.

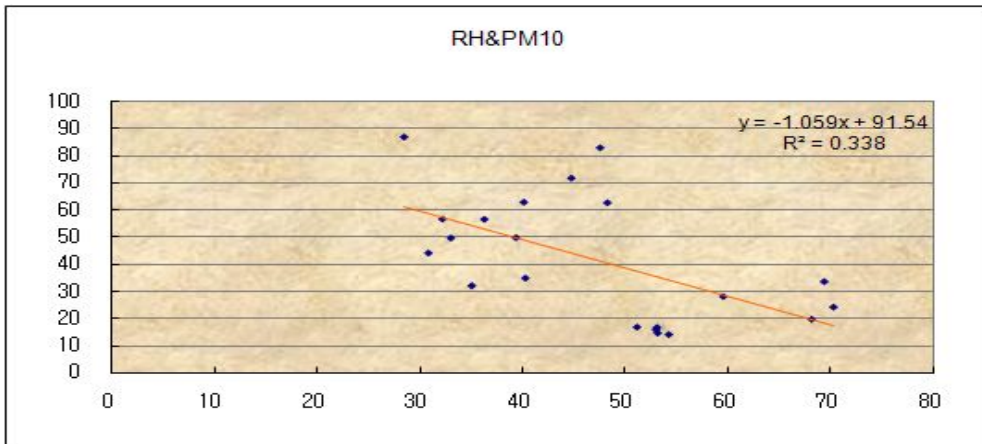


Fig. 4.61. 상대습도와 미세먼지농도.

(풍속 4m/s 초과 6m/s 이하, 강우 0.1mm 미만, 11월~3월)

나. 기압과 상대습도의 상관도

상대습도는 기체 중 수증기의 포화도에 대한 상대적 표현이므로 대기의 압력상태에 의해 포화도가 달라질 수 있어 기압에 의한 상대습도의 상관도를 보았다. 분석 자료는 기상청에서 기록한 2005년부터 2007년까지의 평균해면기압자료(Mean Sea Level Pressure)와 평균현지기압(Mean Station Pressure)을 이용하였다.

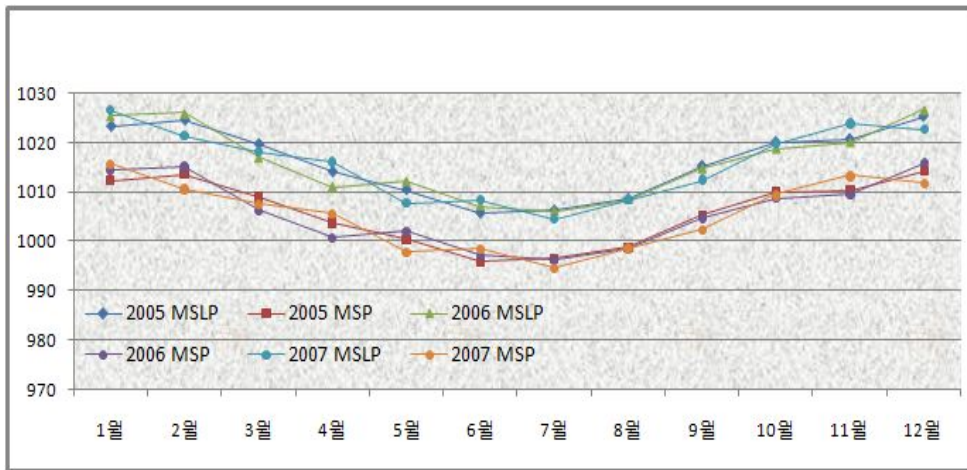


Fig. 4.62. 평균현지기압.(Mean Station Pressure, '05~'07)

Fig. 4.62와 같이 서울의 평균 현지기압은 2005년 1,005.8hPa, 2006년 1,005.8hPa, 2007년 1,005.5hPa 이었으며, 계절별로는 겨울철(11월~2월)이 높고 여름철이 낮았다. 평균 해면기압은 2005년 1,016.1hPa, 2006년 1,016.1hPa, 2007년 1,015.8hPa로 현지기압과 hPa미만의 차이를 보였다. 2005년부터 2007년까지 3년 동안 월 평균 현지기압이 가장 높았던 달은 2006년 12월로 1,015.8hPa이었으며, 2007년 7월이 994.7hPa로 가장 낮았다.

Table 4.54. 미세먼지농도와 평균해면기압의 상관도

Mode	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.109(a)	.012	.009	40.42144	1.035
a Predictors : (Constant) MSLP, b Dependent Variable : PM10					

Table 4.54와 같이 평균해면기압(MSLP)이 계절별로는 일정한 변화를 보이고 여름철에는 낮은 미세먼지농도를 나타내나 미세먼지농도와와의 상관도는 0.109, R²은 0.012로 비교적 낮아 기압이 미세먼지농도에 직접적인 영향관계는 약한 것으로 추정되었다.

Table 4.55. 상대습도와 평균해면기압의 상관도('07년)

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	873.665	73.19192		11.9366	6.22E-28
	MSLP	-0.79976	0.072055	-0.50337	-11.099	7.64E-25
a	Dependent Variable: Rh					

이에 따라 기압이 간접적인 변수로 작용하여 미세먼지농도에 영향을 미치는 1차 변수에 대하여 추정하면 풍속과 혼합고, 상대습도 등이 상정될 수 있다. 따라서 Table 4.55와 같이 기압의 변화에 따른 상대습도의 상관도를 보기 위하여 일별 평균 상대습도와 평균해면기압을 회귀분석한 결과, 상대습도에 대한 기압의 상관도(R)는 0.503, R²은 0.253으로 나타났으며 기압이 높아지면 상대습도는 낮아지는 것으로 나타났다.(Y=873.6 - 0.8MSLP)

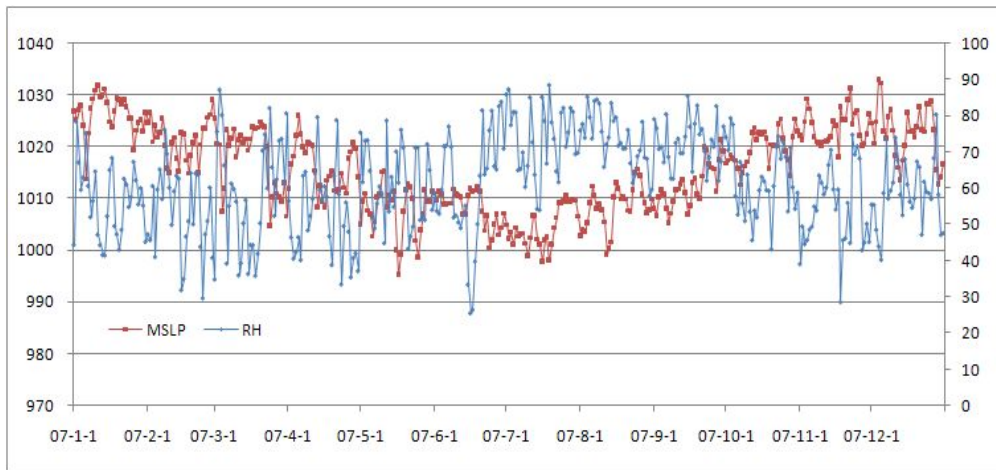


Fig. 4.63. 상대습도와 평균해면기압.('07)

Fig. 4.63에서 보듯이 기압이 높아지는 겨울철에는 상대습도는 낮아지며 기압이 낮아지는 여름철의 경우 상대습도는 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 강우에 의한 상대습도의 변화에 의한 영향이 크게 작용하는 것으로 볼 수 있어 오히려 상대습도가 높아지는 경우 기압이 낮아지는 것으로도 이해될 수 있을 것이다. 즉, 상대습도는 대기의 기온별 포화수증기량에 대한 상대적인 것으로, 절대 수증기량이 동일한 경우 닫힌 계(system)에서는 포화수증기량이 증가하는 여름철에 상대적으로 낮게 나타날 수 있으나, 상시적으로 외부와 교호되는 복잡계(Complex System)인 대기의 운동과 흐름에 있어서는 여름철에 습한 대기의 이류에 의해 나타나는 현상으로 추정할 수 있다.

Table 4.56. 상대습도와 평균해면기압 상관도(기온 포함, '07년)

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson	
1	0.51241	0.262565	0.258491	11.27286	0.887003	
a	Predictors : (Constant), Temp, MSLP					
b	Dependent Variable: Rh					
Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Cons	685.9839	114.557		5.988142	5.12E-09
	MSLP	-0.61781	0.111756	-0.38885	-5.52816	6.2E-08
	Temp	0.207211	0.097617	0.149311	2.122694	0.034458
a	Dependent Variable : Rh					

Table 4.56과 같이 상대습도는 기온과의 밀접한 관계를 가지고 기압도 마찬가지로 기온에 대한 함수를 가지게 되므로 기온을 포함하여 상대습도에 대한 상관도를 보면 R은 0.512, R²은 0.262로 기압과의 상관도와 유사하게 나타났으며, 회귀식을 보면 기압은 부(-)의 상관도를, 기온은 정(+)의 상관도를 가지는 것으로 나타났

다.

Table 4.57. 상대습도와 평균해면기압의 계절별 상관도

	겨울철(11월~2월)		봄철(3월~5월)		여름철(6월~8월)		가을철(9월~10월)	
	simple_reg	multi_reg	simple_reg	multi_reg	simple_reg	multi_reg	simple_reg	multi_reg
상관도(R)	0.318	0.368	0.490	0.551	0.363	0.363	0.508	0.593
설명력(R ²)	0.101	0.135	0.240	0.304	0.132	0.132	0.258	0.352

Table 4.57과 같이 계절적으로 보면 봄철과 가을철에 상대습도와 기압의 상관도가 상대적으로 높게 나타났으며, 겨울과 여름철에 낮았다. 기온을 포함하는 경우에도 마찬가지로 봄철과 가을철에 높은 상관도를 보여 기압과 상대습도는 정형적인 관계를 지니고 있음을 나타냈으며, 미세먼지농도에 미치는 영향변수로 상대습도를 활용하는 경우 기압의 작용을 추가로 고려하지 않아도 될 것으로 추정되었다.

2. 기상요인 외 영향 변수

1) 배경오염도

서울의 미세먼지 오염도는 비인위적으로 조성되는 배경농도에 어느 정도의 지역 오염도가 가중되는가에 따라 총량적인 대기오염농도를 결정짓게 된다. Table 4.58 와 같이 서울의 오염도와 직접적인 비교지표가 될 수 있는 백령도의 2007년도 미세먼지농도는 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈으며 청정지역으로 간주될 수 있는 울릉도의 경우 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈다. 같은 해 서울의 미세먼지농도가 $61\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 점을 감안하면, 자연현상과 서울 지역 외 외부에서 유입되는 오염도가 매우 높은 것을 볼 수 있다.

Table 4.58. 서울의 미세먼지농도 (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

년도 \ 지역	서울	백령도	강화도	울릉도
2007	61	50	56	40
2006	60	48	55	38

따라서 서울의 미세먼지 오염도를 정확하게 예측하기 위해서는 배경적인 측면에서 외부에서 유입되는 오염도의 규명이 선행되어야 하며, 이에 지역적으로 배출되고 생성되는 오염도의 정량적인 파악이 필요하다. 오염물질의 유입량은 풍향에 의해 영향을 크게 받게 되므로 지표풍의 유입정도를 아는 것은 배경농도를 가능할 수 있는 방법이 될 것이다.

서울은 지리적으로 미세먼지농도가 높은 겨울과 봄철에 서풍의 영향을 주로 받게 되어 배경농도가 되는 강화도와 백령도의 오염도를 아는 것이 중요하다. 2008년 환경부에서 강화도와 수도권의 배경농도 상관성을 분석한 연구결과에 의하면 최대 농도를 나타내는 시간적 지연은 불과 0~2시간에 불과한 것으로 나타났다.

특히 미세먼지농도가 높을수록 강화지역과의 상관도는 높아졌으며, PM10의 농도가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 경우는 상관도가 비교적 낮았는바, 이때는 지역배출량에 의한 오염영향이 큰 것으로 판단되었고, 미세먼지농도가 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우에는

상관성이 높아지고 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 되는 경우 뚜렷한 상관도를 나타냈는바, 이는 고농도 오염기단이 서풍에 의해 유입되면서 수도권 전체지역에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

Table 4.59에서와 같이 서울의 측정소 중 강화도와 최대 상관관계를 나타내는 지연시간은 1~4시간으로 나타났는데, 강서·구로 등 서울의 서부지역 6개 측정소는 1시간, 마포·관악 등 14개 측정소는 2시간, 중구·은평 등 4개소는 3시간, 성동·광진 등 3개소는 4시간의 지연시간을 보였다. 이에 따라 서울과 강화도의 미세먼지 농도 상관성을 최대화하는 지연시간을 별도로 산정하지 않고 농도변화의 추이를 보기 위하여 일별 평균농도를 가지고 상관성에 대한 분석을 한 바, 2007년 1월부터 11월까지 서울과 백령도, 강화도의 미세먼지농도의 상관도는 각각 0.69와 0.88을 나타내 유사한 농도변화를 보인 것으로 나타났다.

Table 4.59. 서울과 백령도의 미세먼지농도 상관도('07)

	평균	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월
백령도	0.69	0.60	0.54	0.52	0.98	0.59	0.36	0.71	0.52	0.73	0.54	0.84
강화도	0.88	0.87	0.67	0.87	0.98	0.90	0.62	0.87	0.63	0.93	0.93	0.79

Table 4.60, Fig. 4.64~4.69에 나타낸바와 같이 월별로 두 지역의 미세먼지농도의 상관도는 0.98~0.36까지의 변화를 보였으며, 가장 높은 시기는 4월이고 가장 낮은 시기는 6월로 나타나 기류의 이동특성을 나타내는 것으로 판단되었다. 거리상 가까운 강화도가 백령도보다 다소 상관도가 높았는데, 이는 기류의 이동에 따른 영향강도가 시간에 의해 작용되는 것으로 평가된다. 즉, 중국으로부터 월경되는 기단의 흐름이 4월과 11월경에 우리나라의 미세먼지 오염에 영향을 미치고, 6월부터 10월까지의 남풍과 동풍 계열에 의해 각기 다른 오염도를 보이는데, 여름철에는 주로 지역적 배출량에 의해 먼지오염도가 변화하는 것으로 추정할 수 있다. 강화도는 거의 모든 계절에 있어 서울과 농도변화의 추이가 같으므로 동일한 기단의 영향 하에 있는 것으로 보아야 할 것이며, 백령도는 시간적 차이가 다소 나타나는 것으로 이해된다.

Table 4.60. 서울과 강화도의 최대 상관계수

지연시간	최대 상관계수	거리 (km)	측정소 위치
1	0.7	65.5	화곡
1	0.67	68.7	신정
1	0.68	72.7	당산
1	0.61	72.8	남가좌
1	0.65	74	구로
1	0.68	76.5	시흥
2	0.68	77.5	대흥
2	0.71	80.9	신림
2	0.71	82.1	사당
2	0.68	83.2	효제
2	0.74	83.9	한남
2	0.76	84	반포
2	0.69	84.5	번동
2	0.74	84.9	방학
2	0.6	85.8	용두
2	0.66	88.7	상계
2	0.62	90	도곡
2	0.68	91.3	면목
2	0.66	93.4	잠실
2	0.67	98.2	천호
3	0.74	66.6	궁동
3	0.74	74.5	불광
3	0.72	80.2	서소문
3	0.66	97.4	방이
4	0.71	85.1	길음
4	0.72	89.2	성수
4	0.71	93.8	구의

따라서 동일한 풍향인 경우 서울과 강화도의 미세먼지오염도는 그 변화추이가 거의 동일하게 나타나고 농도의 차이도 5%($3\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 불과함을 감안할 시, 기단의 움직임에 따라 서울의 농도를 예측할 수도 있을 것으로 보이므로, 미세먼지 예보 시 풍속과 풍향의 흐름을 확인하고 강화도의 미세먼지농도를 예보변수에 포함하여야 할 것으로 보인다.

특히, 서풍이 주로 불어오는 겨울철과 봄철에는 강화도 및 백령도의 먼지농도와 기류의 이동속도를 예보에 반영할 경우 예보적중률이 높아질 것으로 보이며, 상관도가 적은 시기(6월~10월)에는 주로 동풍과 남풍이 경유하는 지역의 먼지농도의 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다. 연중 11월에서 4월까지 서해 상공에서 유입되는 기류가 백령도, 강화도를 거쳐 서울로 유입될 때의 미세먼지농도는 강화도를 경유하면서 지역오염의 영향을 받아 약간 상승되고, 강화도를 거쳐 인천과 부천의 상공을 지나면서 해당 지역 지표부근의 오염영향을 받게 되며 서울에 도달한 후 지역적인 배출량이 더해져 서울의 미세먼지농도에 영향을 주는 것으로 시나리오를 구성해 볼 수 있다.

이 경우 미세먼지예보는 백령도 및 강화도의 오염도와 풍속과 거리를 감안하여 서울로 유입되는 배경농도를 추정함으로써 예보의 기초적인 배경을 설정하고 서울 및 수도권 상공의 혼합고와 지역배출량을 예측하는 순으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

Table 4.61. 서울의 월별 미세먼지농도('05~'07)

년도	월별	평균	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2007	전 체	61	71	81	70	77	86	46	55	31	34	45	68	72
	황사제외	59	-	81	60	65	77	-	-	-	-	-	-	65
2006	전 체	60	64	66	78	106	63	69	33	38	34	59	48	61
	황사제외	55	-	-	72	58	60	-	-	-	-	-	-	-
2005	전 체	58	59	45	64	83	57	66	67	44	36	54	69	49
	황사제외	57	-	-	62	71	-	-	-	-	-	-	-	-

Table 4.61과 같이 2005년부터 실시한 미세먼지예보에 따라 경험적으로 추리되는 것은 짧은 시간 내에 풍향이 역방향으로 바뀔 경우에 가장 예측이 어려운 것으로 보이는데, 서풍의 영향으로 비교적 높은 미세먼지농도가 유지되다가 동풍이 유입되는 경우 쉽게 저농도로 예측하면 오보(誤報)의 위험이 있다는 것이다. 이는 고농도 미세먼지를 가진 기류가 동쪽으로 다량 이류(移流)해 있는 경우 풍향의 변화에 의해 다시 서울로 유입되어 일정시간 동안 고농도가 유지되는 경우가 있을 수 있으며, 이 경우 적은 농도차이로 오보를 하게 되는 것이다.

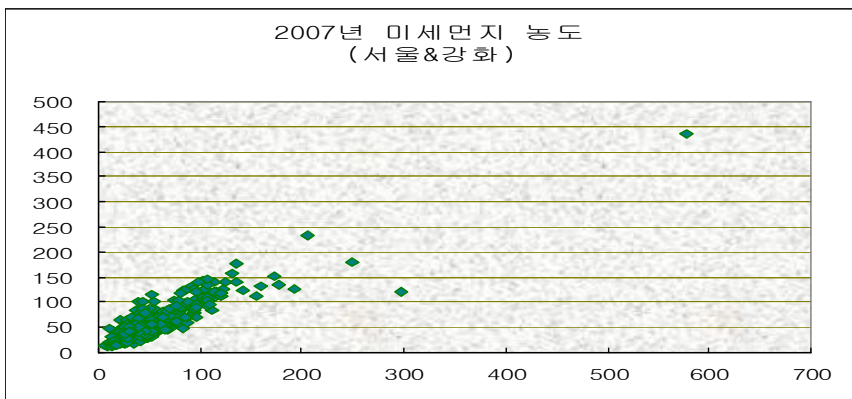


Fig. 4.64. 미세먼지농도 변화의 상관도.
(서울 & 강화, '07).

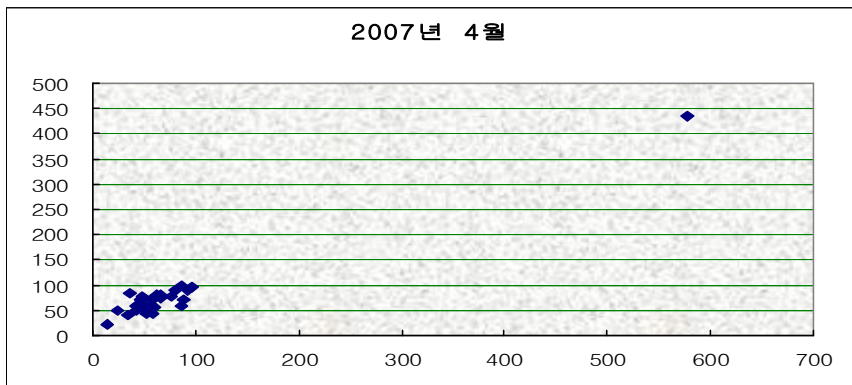


Fig. 4.65. 미세먼지농도 변화의 상관도.
(서울 & 강화, '07. 4월)

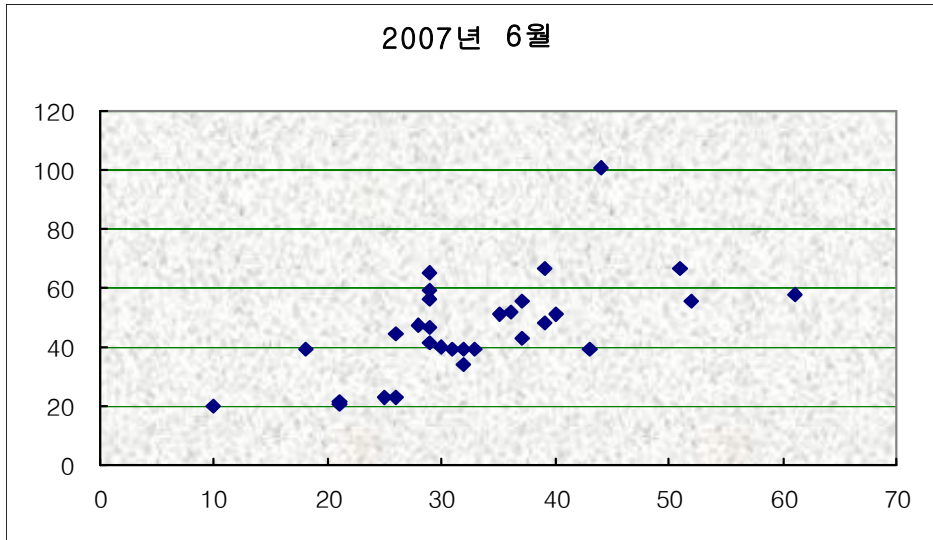


Fig. 4.66. 미세먼지농도 변화의 상관도.
(서울, 강화, '07. 6월)

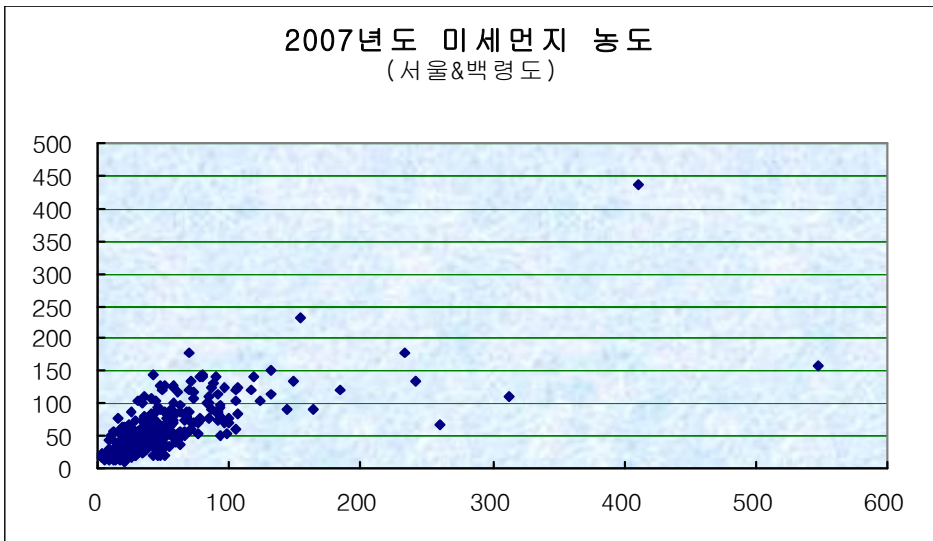


Fig. 4.67. 미세먼지농도 변화의 상관도.
(서울, 백령도, '07)

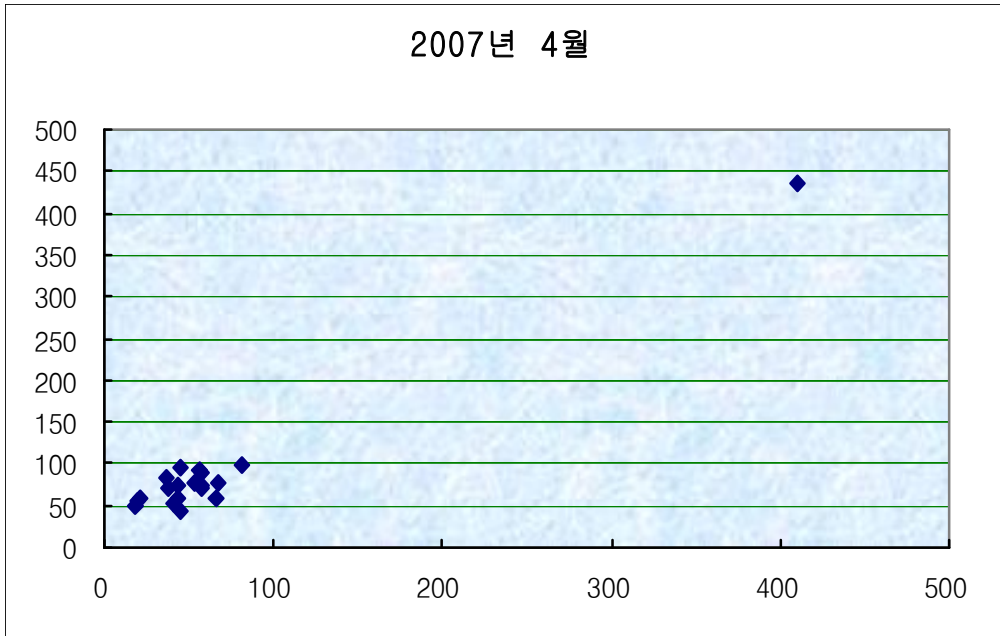


Fig. 4.68. 미세먼지농도 변화의 상관도. (서울, 백령도, '07.4월)

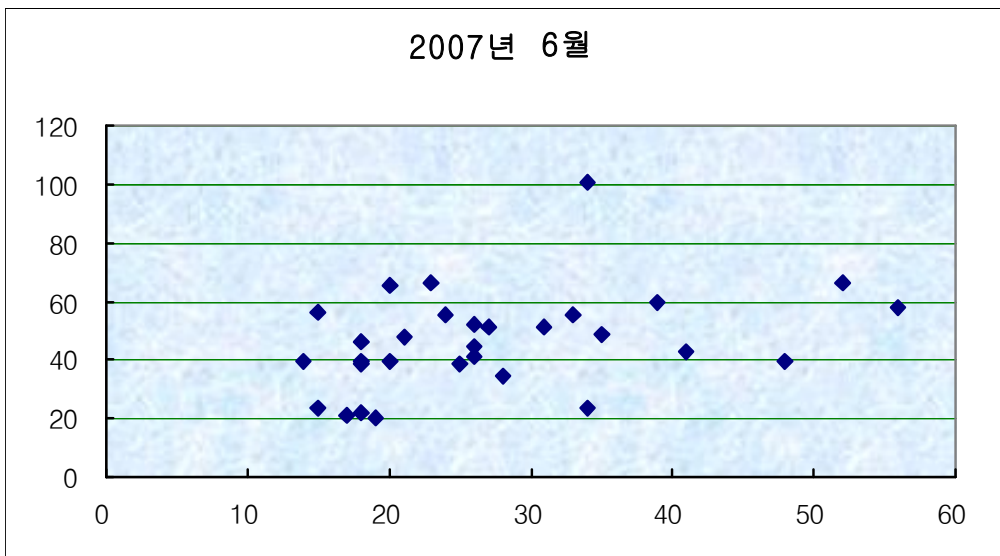


Fig. 4.69. 미세먼지농도 변화의 상관도. (서울, 백령도, '07. 6월)

2) 2차 입자(Secondary Particle) 생성기작과 미세먼지농도에의 영향

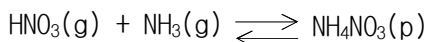
2차 생성물질의 변화와 미세먼지농도의 관계는 충분히 연구되지 않아 과학적 프로세싱으로 논의하기 어려운 점이 있으나 현재까지 발표된 연구문헌의 내용과 경험적으로 합치되는 부분들을 연계하여 예보에 참고할 내용들을 검토하였다.

가. 기체상 물질 등의 입자화에 관한 검토

서울시의 미세먼지농도에 영향을 미치는 기체상 물질은 질산염(NO_3^-)과 황산염(SO_4^{2-}), 암모늄염(NH_4^+)으로 대별될 수 있으며 그 밖에도 EC(Elemental Carbon), OC(Organic Carbon), VOCs(Volatile Organic Compounds), 미량의 금속성분과 염소(Cl^-) 등이 있다.

이러한 기체상 물질들은 화학적 변환과정을 거쳐 미세먼지의 총량을 크게 증가시키는 것으로 보고되고 있는데, 특히 서울의 경우 중국 등 서해 쪽에서 유입되는 기체상 물질로 인해 미세먼지 총량의 약 40% 내지 50%가 증가되는 것으로 연구되었다. 또한 이러한 오염영향의 계절별 부하량이 다르고 기류의 혼합정도에 따라 미세먼지농도에의 기여도가 달라져 특정기간의 미세먼지예보에 있어 중요한 변수로 작용되고 있다.

Eulerian Box 모델을 이용한 이산화질소(NO_2)의 영향분석을 보면 HNO_3 , N_2O_5 , H_2SO_4 , OH 등의 기체상 물질과, NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 등 입자상물질의 경우 NO_2 의 농도 변화에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. NH_3 의 분압이 고정되는 것으로 할 경우 대기 광화학반응에 의해 생성되는 HNO_3 는 NH_3 와 HNO_3 의 분압의 곱이 평형상수값을 초과하게 되면, 초과분의 HNO_3 가 입자상 Nitrate로 전환되어 평형상태를 이루는 경향으로 반응하게 된다. HNO_3 , N_2O_5 , NO_3 중 HNO_3 의 생성은 낮에 활발하여 입자상 Nitrate를 형성하는 주요기작이 되며, 밤에는 N_2O_5 , NO_3 에 의해 입자상물질이 형성되나 낮에 발생하는 양보다 적어지는 것으로 보고되었다.



반면, OH 라디칼은 NO_x 농도가 감소할수록 높은 농도를 보이며, H_2SO_4 의 생성량을 증가시키고 SO_4^{2-} 의 생성량을 증가시키는 것으로 나타났다. 즉, NO_x 의 농도감소

는 입자상 Sulfate를 증가시키는 결과를 가져오고, 입자상 Sulfate 형성 시 대기 중 NH₃는 Sulfate의 중화를 위해 입자상으로 유입되게 된다.

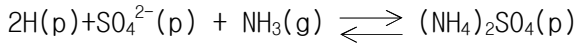


Table 4.62. 질소산화물 감축 영향 (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$, kton/year)

Season	Spring	Summer	Fall	Winter
저감효과	0.038	0.225	0.047	0.067

Table 4.62와 같이 대기 중 반응에 의한 정량분석결과는 질소산화물의 배출량을 저감시킴에 따라 계절별로 차이가 있으나 겨울에는 8%에서 여름 52%까지 미세먼지 저감효과를 보일 수 있으며 평균적으로 18%의 저감효과가 예측되었다.

Table 4.63. 황산화물 감축 영향 (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$, kton/year)

Species \ Season	Spring	Summer	Fall	Winter
SO _x	0.077	0.147	0.063	0.090
NH ₃	0.656	5.108	0.629	0.535

Table 4.63과 같이 아황산가스(SO₂)의 배출량을 저감시키는 경우 미세먼지는 0.8%에서 2.7%의 저감효과를 볼 수 있으며, 암모니아는 겨울 3.5%에서 여름 65%로 평균 19.7%의 저감효과를 나타낼 수 있는 것으로 보고되었다.

나. 2차 생성 미세먼지의 영향 예측

Table 4.64에 나타낸바와 같이 미세먼지농도에 영향이 큰 물질은 NH₃이며 SO₂는 비교적 낮은 영향물질로 보고되었는바, 여름에는 NH₃를 감소시키는 것이 가장 효과적으로 보고되었다. 그러나 현재까지 NH₃에 대하여 주기적으로 농도측정이 이루어지지 않아 미세먼지 생성에 대한 영향도를 직접적으로 파악하기 어려우며, 지역의 배출량 산정에 있어서는 자동차 부문에서 가장 많이 배출되는 것으로 조사되었다.

따라서 암모니아의 독립적 영향을 예측하여 먼지예보에 적용하기는 어려울 것이나 이와 반응하여 염류를 형성하는 NO_x, SO_x 등의 물질의 농도와 황산염(SO₄²⁻)이나 질산염(NO₃⁻)의 농도를 간접적으로 참고하여야 할 것이다.

실제로 측정이 진행되는 항목은 NO₂와 SO₂이나 미세먼지 중 약 40% 내지 50%가 외부에서 유입되는 2차 입자상물질이고 황산염류는 반응시간이 비교적 길어 염류로 형성된 후 유입되는 것으로 추정되므로 미세먼지농도 예보에 있어서 지역적 영향은 NO₂를 주시할 필요가 있을 것이다.

화학적 분압평형을 감안하고 서울지역에서의 NO₂가 고농도인 점을 고려하면 지역 내에서 암모니아가 배출되는 경우 NO₂는 추가로 입자상물질로 전환될 가능성을 배제할 수 없다. 결론적으로 암모니아의 저감은 입자상물질의 저감효과로 이어질 수 있다고 보아야 할 것이며 이를 줄이기 위한 방안으로 자동차 등 도로이동오염원의 저감방안이 유효할 것으로 추정되며, 먼지예보에 있어 지역교통량 뿐만 아니라 수도권 전체의 교통량 증감을 유효한 변수로 고려해야 할 것이다.

Table 4.64. CAPSS의 배출량 산정

(단위 : ton, year)

구 분		CO	NO _x	SO _x	TSP	PM10	VOC	NH ₃
2005 CAPSS	서울	127,938	59,170	714	3,009	3,009	20,634	1,913
	인천	30,761	22,354	258	1,314	1,314	5,701	470
	경기도	103,299	96,318	1,161	5,445	5,445	17,998	2,577

2007년부터 서울시에서 시행한 미세먼지 상세모니터링을 통한 미세먼지 특성연구의 중간보고 외 많은 수용모델링을 통한 연구에서 서울시 미세먼지농도에 가장 크게 기여하는 배출원은 2차 생성입자로 판단되고 있는데, 개략적으로 40% 이상이 대기 중에서 생성되는 입자로 추정하고 있다. 더구나 백령도의 미세먼지 연평균 농도가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 점을 들어 2차 생성입자도 외부의 영향이 크게 작용하는 것으로 판단하고 있다.

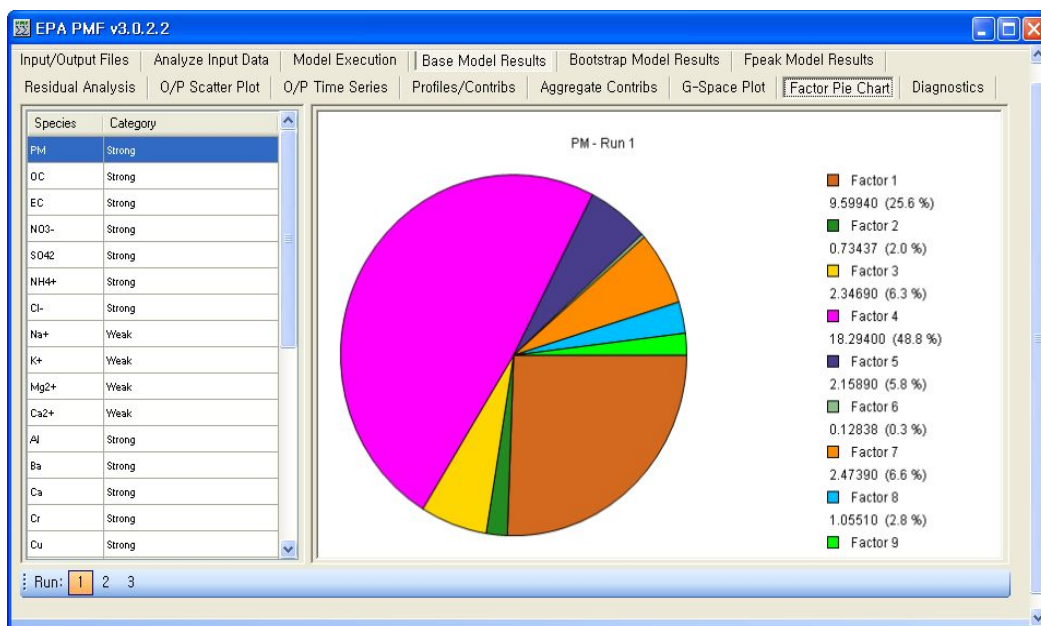


Fig. 4.70. 서울지역 미세먼지농도에의 배출원별 기여도.(입력 배출원 9)

이처럼 2차 생성입자의 영향이 큰 서울의 경우 미세먼지농도는 풍향에 의해 많은 영향을 받을 수밖에 없는데, 서풍이 주로 불어오는 겨울철과 봄철에 먼지농도가 높은 이유를 중국 등에서의 유입되는 오염물질과 수도권 서부지역의 영향이 큰 것으로 추정해볼 수 있다. 따라서 서울의 미세먼지예보는 풍속에 의한 영향보다 풍향에 의해 절대적인 지배가 있음을 상정해볼 수 있고, 이는 경험적 추리와 근접되는 것으로 보인다.

4.2. 미세먼지 예보를 위한 고찰 및 결과

1. 계절별 기상요인의 영향

미세먼지의 생성과 농도변화에 영향을 미치는 요인들에 대하여 살펴보았으나 특정한 요인이 항상 동일하게 영향을 미치는 것은 아니며, 영향변수들 사이에도 상당한 관련성이 존재하여 하나의 변수에 전적으로 의존하여 미세먼지농도의 예보를 하는 것은 어려움을 알 수 있다. 예보모델의 적중률에서 보듯이 다변량의 1차 함수로 구성되는 회귀모델은 신경망모델에 비하여 적중률이 낮아 다양하고 복잡하게 변화하는 영향변수가 특정 함수식에 의해 규정되어지는 것은 어려움이 나타난다.

현재까지 연구된 성과에 의해 적용되어지는 영향인자는 풍속 등 기상항목과 2차 입자를 생성할 수 있는 기체상 오염물질 등 9개의 변수를 독립변수로 활용하고 있으나, 이들 변수 간에도 다중공선성이 존재하는 것으로 판단된다. 이렇듯 현상은 모두가 규명될 수 없는 것으로, 추적(Tracing)과 예측(prediction)이 가능한 것은 일부의 유형들에 대해서 일 뿐이며, 이에 대해 관찰(Observation)과 이해가 가능하다고 판단하여야 하는 조건부 일반화에 따를 수밖에 없을 것이다.

위에서 영향변수의 상관성과 작용특성을 본 바와 같이 일정량 이상의 경우는 미세먼지농도를 줄이는 방향으로 작용되며, 풍향은 서풍과 동풍의 영향이 극명하게 나뉘는 것으로 볼 수 있다.

Table 4.65. 시간별 미세먼지농도 변화

Date	2007. 1. 31일									2007. 2. 1일					
time	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	1:00	22:00	23:00	0:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	
Rain(mm)	3.00			6.00			2.50					0.10			
PM10	65	66	73	75	80	75	57	56	57	58	62	59	60	59	
	2007. 11. 25일											2007. 11. 26일			
time	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	01:00	02:00				
Rain(mm)	0.7			1.3			0.3			0.5					
PM10	98	103	99	93	97	107	105	98	94	100	98				
	2007. 12. 9일										2007. 12. 10일				
time	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	22:00	23:00	24:00	1:00	2:00	3:00		
Rain(mm)	0.00							0.20			0.10				
PM10	46	48	51	50	50	49	48	48	48	50	52	48	48		

Table 4.65와 같이 강우일은 2005년부터 2007년 3년간 평균 40%인 145일로서 일 강우량이 0.1mm 이상인 날은 286일, 1mm 이상인 날은 130일에 불과하였는데, 미세 먼지 등 대기오염물질의 세정효과가 나타날 수 있는 강우량의 절대량을 보기 위하여 강우가 있었던 시간 후의 PM₁₀의 농도추이를 보았다.

Fig. 4.71, 4.72와 같이 겨울철의 경우 미세먼지농도가 오히려 상승하는 추이를 나타냈는데, 강우량이 6.0mm인 경우('07.1.31일)와 1.5mm인 경우('07.12.9일)에도 다음 시간대에 미세먼지농도는 높아졌으며, 강우량이 0.3mm('07.11.25일), 0.5mm('07.11.26일), 0.1mm('07.12.10일)로 낮은 경우에도 미세먼지농도가 낮아지는 현상이 나타났다.

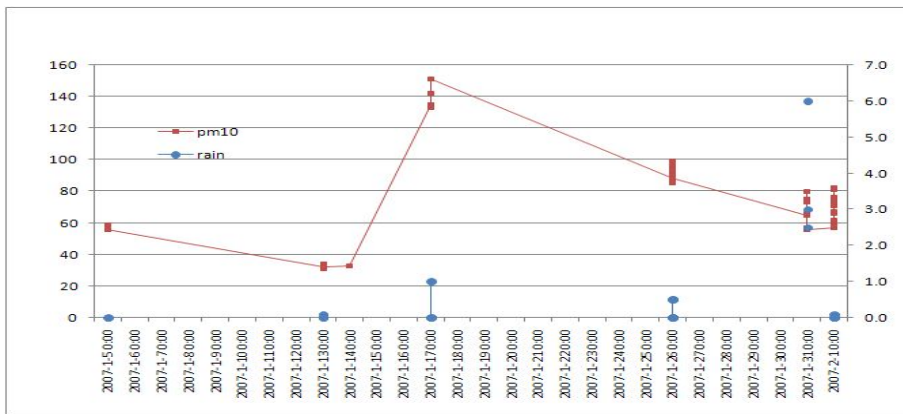


Fig. 4.71. 강우량 1.0mm 이하 시 미세먼지농도.('07. 11월~2월)

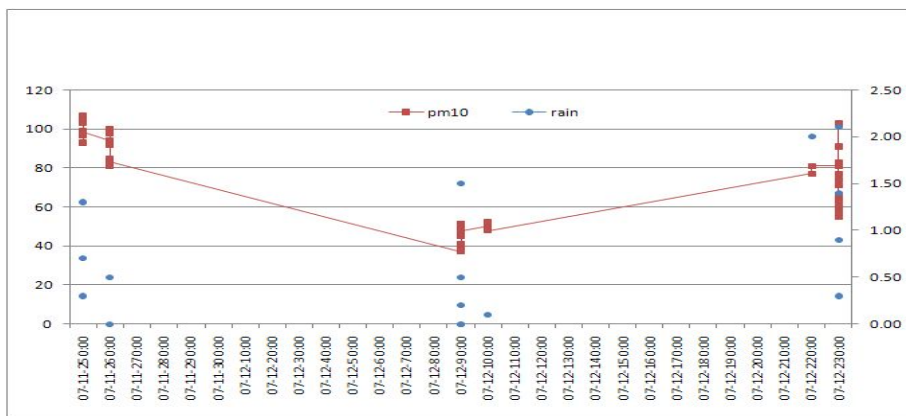


Fig. 4.72. 강우량 1.0mm 이하 시 미세먼지농도.('07. 11월~12월)

Table 4.66. 시간별 강우량과 미세먼지농도 변화(서풍시)

2007. 5. 10일							2007. 5. 11일			
time	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00
Rain	6	7	9	10.5	7	3.5	2	0.5	0	0.5
PM10	78	84	83	83	84	85	88	85	86	83
wind-direction	SW	W	W	W	W	W	SW	WsW	WsW	WsW

Table 4.66과 같이 봄철에도 겨울철과 유사하게 강우량이 14mm인 날에도 ('07.4.6일 17:00) 미세먼지농도는 $48\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높아졌고, 연속하여 강우가 있고 시간 강우량이 10mm를 초과하는 경우에도('07.5.10일~11일) 미세먼지농도가 변화가 없거나 미세한 상승이 있었는데, 이는 오염도가 높은 서풍이 주 풍향으로 지속되면서 강우에 의한 세정효과보다 유입오염도의 영향이 크게 작용되었던 것으로 추정된다.

Table 4.67. 여름철 강우량에 따른 시간별 미세먼지농도 변화(동풍시)

date	2007. 7. 9일										2007. 7. 10일					
time	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	21:00	22:00	24:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00
Rain	0.5	0.0	0.5	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0			0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PM10	38	30	26	29	27	27	29	25	23	25	23	19	16	13	13	10
wind-direction	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ENE	ESE	ENE	ENE	ENE	ENE

Table 4.67, Fig. 4.73과 같이 여름철에는 0.5mm의 소량의 강우가 있었던 경우에도(2007.7.9일) 미세먼지농도는 $38\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 20% 가량 낮아졌으며, 12mm의 강우가 있었던 때와 지속적으로 강우가 있었던 시간대에 미세먼지농도는 1/4 수준까지 낮아졌는데 이때의 주 풍향은 동남동풍 및 동북동풍이 영향을 미친 것으로 나타났다.

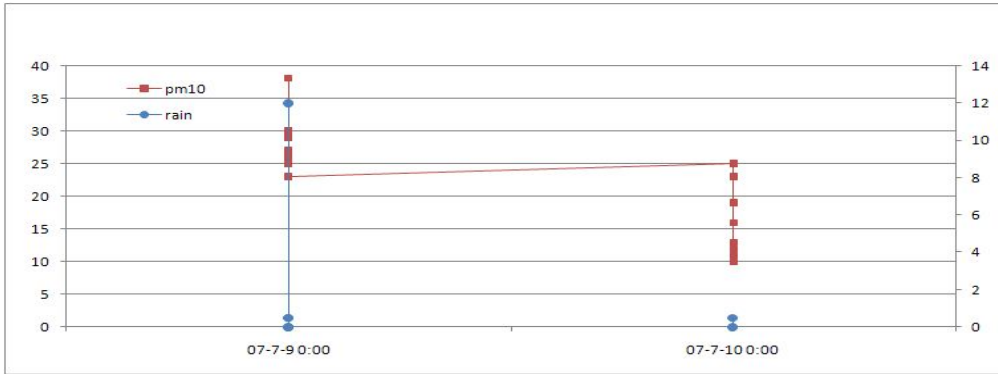


Fig. 4.73. 여름철 강우량에 따른 시간별 미세먼지농도 변화.(2007.7.9)

Table 4.68. 강우량에 따른 시간별 미세먼지농도 변화(동풍 & 서풍)

date	2007. 10. 10일										2007. 10. 22일				
	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
Rain	0.0	0.5	4.5	17.0	0.0					0.2			0.1		
PM10	45	50	49	53	51	55	55	52	47	76	81	86	79	74	74
wind-direction	NW	NNE	NNE	ESE	NNW	ESE	NW	NW	W	SW	W	WNW	SW	SW	SW

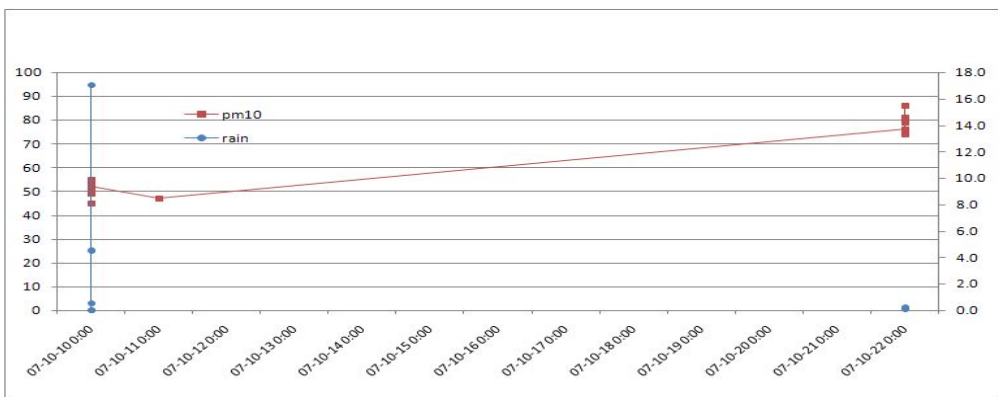


Fig. 4.74. 강우량에 따른 시간별 미세먼지농도 변화.(2007.10.10일, 22일)

Table 4.68, Fig. 4.74와 같이 가을철에는 불규칙한 양상을 나타냈는데, 강우량이 4.5mm ('07.10.10일)인 경우 다음 시간대의 미세먼지농도는 $49\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $53\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높아졌으며, 연속하여 17mm의 강우가 있는 후 미세먼지농도는 $53\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮아졌다가 다시 다음 시간대에는 $55\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 재 상승되었다. 이때 주 풍향은 북북동풍 및 동남동풍이 작용하였으며, 재상승시에는 북북서풍이 작용하는 등 복잡다단한 기상조건이 나타났다.

2007년 10월의 경우에도 시간당 강우량이 0.2mm 경우 미세먼지농도는 점차 상승하였으며, 2시간 후 0.1mm의 강우가 있는 후 다시 낮아졌는데 이때의 주 풍향은 모두 남서풍 또는 서풍, 서북서 풍이었다.

이와 같이 미세먼지농도를 낮출 수 있는 절대적인 강우량을 설정하는 것은 계절별로 다르고 다른 기상조건의 작용 등에 의해서도 다를 수 있어 대체적인 강우의 효과특성을 짐작할 수는 있으나, 다양하게 변화하는 기상에서 동일한 영향을 산정하는 것은 매우 어렵다는 점을 알 수 있다.

풍속은 통상적으로 미세먼지농도를 낮추는 영향을 미치는 것으로 평가되나 황사나 높은 오염도의 기류가 유입되는 경우 반대의 효과가 나타날 수 있다. 위에서 살펴본 바와 같이 풍향과의 관계가 밀접하게 연계되는데 풍속이 높은 경우라도 풍향이 서풍 계열이 주풍향인 경우에는 미세먼지농도가 하향 일변도를 나타내지는 않고 있으며, 풍속이 비교적 낮은 경우라도 동풍 계열의 영향을 받는 경우에는 미세먼지농도를 낮추는 영향이 있는 것으로 보인다. 다만, 풍속이 4m/s 이상으로 높은 경우 황사 등 특별한 경우가 아니면 미세먼지농도가 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하지 않고 있어 계절별 풍향 특성을 감안하면 풍속의 영향을 미세먼지농도와 역방향으로 짐작할 수 있다.

다음으로 상대습도는 미세먼지농도를 높이는 영향이 큰 것으로 평가되는데 특히 겨울철과 봄철에 미세먼지농도를 증가시키는 방향으로 작용되며 여름철에는 강우가 있는 경우 상대습도가 높아져 대기의 세정효과 여부를 살펴보아야 할 것으로 판단된다. 강우가 없는 경우에는 기체상 물질이 입자화되는 경향이 크게 나타나는 것으로 보고된 바와 같이 PM2.5 이하의 극 미세입자의 증가속도가 커지는 점을 주시해야 할 것으로 보이며, 기체상 오염물질의 양이 유사한 상태에서 상대습도가 증가하는 경우는 풍속이 낮게 유지되는 기상조건으로서 미세먼지농도도 증가하는

경향을 고려해야 할 것이다.

그 밖에 일교차와 기압은 미세먼지농도에 직접적인 영향변수로 설정하기 어려운 점을 나타냈으나, 상대습도 등 1차적 변수들의 추이가 불분명하다고 판단될 때 그 변수의 변화추이를 판단하기 위한 보조적 영향변수로 활용하면 미세먼지농도 예측에 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 계절별 예보

미세먼지의 예보적중률 향상을 위해 이용되는 대기오염도와 기상요인 등을 미세먼지농도 변화와 연계하여 분석한 결과 미세먼지농도는 몇 개의 상관성 높은 지표에 의해 확정되지 않는 다양한 변수를 포함하여야 할 것으로, 보다 정확하고 다양한 예측방법이 요구된다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 미세먼지예보의 적중률 향상은, 모델링이 아닌 예보자가 예보를 하는 경우에 참고할 수 있는 내용으로, 계절별 또는 유사한 기상여건을 갖는 기간을 일단의 군(群)으로 분류하여, 기상요인의 영향을 증감시키는 변수증감법(Step wise-Regression)에 의해 가장 상관도가 높은 해를 찾고자 하였다. 또한 미세먼지예보의 오보율(誤報率)이 높은 기상여건의 경우 오염특성을 고려하여 고농도가 지속되는 시간과 오염도가 낮아지는 시간을 구분하여 일일 오염도의 평균치를 예측함으로써 예보의 적중률을 높이고자 하였다.

미세먼지예보의 적중률을 높이는 방안은 우선 계절 또는 기간별로 미세먼지농도에 기여하는 주요 변수들의 선정이 중요한 것으로 판단된다. 따라서 주된 풍향이 변동되는 계절별로 풍속 등 상관성이 높은 변수들과 영향을 설정하였으며, 서울의 미세먼지농도와 공변성(共變性)을 보이는 서해지역, 백령도와 강화도의 미세먼지농도를 보완적 설명변수로서 고려하는 방안이 합당할 것으로 여겨진다.

1) 겨울철 예보방법

겨울철은 통상적으로 기온의 높고 낮음에 따라 11월부터 3월까지로 구분하고 있으나 3월은 동절기에 비해 기상의 변화가 잦고 폭이 크며 또한, 황사의 영향이 3월부터 5월까지 지속되는 등 기상의 유사성이 봄철에 가까워 미세먼지예보와 관련하여서는 11월부터 2월까지로 구분하였다.

겨울철에 미세먼지농도에 영향을 미치는 변수 중에 강우의 경우, '05년부터 '07년까지의 상관도는 평균 -0.336으로 나타났으며, 일 강우량이 4.5mm 이상인 경우 풍속, 기온, 상대습도가 음의 상관도를 나타내며, 일 강우량이 17mm 이상인 경우에는 풍속과 상대습도가 음의 관계를 나타냈고, 기온은 낮은 상관도를 보였다.

월별 상관도는 Fig.4.75~4.78과 같이 겨울철(11월~2월)에 0.03~0.13까지 나타났고, 여름철(5월~8월)에는 0.0034~0.098까지 낮게 나타났으며, 겨울철의 강우일수는 '05년부터 '07년까지 3년간의 평균을 보면 1월 8일, 2월 7일, 11월과 12월은 10일로서 적다. 겨울철에 강우의 상관계수가 높게 나타나고 여름철에 상대적으로 낮게 나타나는 것은 미세먼지농도가 겨울철에 상대적으로 높아 변화의 폭이 비례적으로 크게 나타날 수 있는 것으로 추정된다. 즉 미세먼지농도가 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 높은 경우와 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮은 경우 동일한 영향에 의해 변화의 폭이 크고 적을 수 있음을 의미한다.

강우가 있었던 날의 일평균 강우량은 2.1mm이었으나, '06년 1월 13일에 26.5mm의 많은 강우가 온 것을 제외하면 1.9mm이었으며, 시간당 0.1mm 이상의 강우시 풍속이 2m/s 이하인 경우라도 강우 효과를 1시간 지연시켜 분석할 경우에는 4개 기상항목이 모두 음의 상관성을 가지고 있어 주요변수로 작용되는 것으로 판단된다.

그러나 겨울철 중 일일 강우량이 0.1mm 이상인 경우는 360일 중 76일로 21%이며, 시간당 강우량이 0.1mm 이상인 경우는 총 26,280개의 시간자료 중 1,450회인 5.5%에 불과하여 겨울철 예보에 있어 상시 영향변수로 설정하기 어려운 것으로 판단된다.

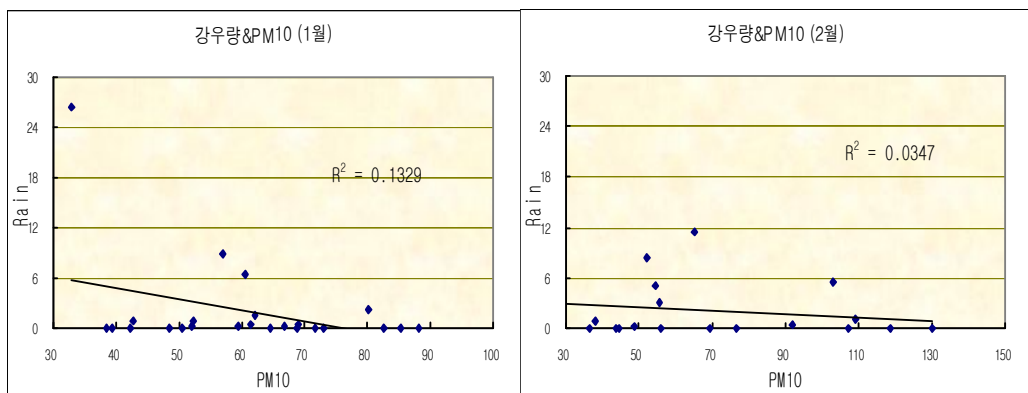


Fig. 4.75. 강우와 미세먼지농도의 상관도.(1월~2월)

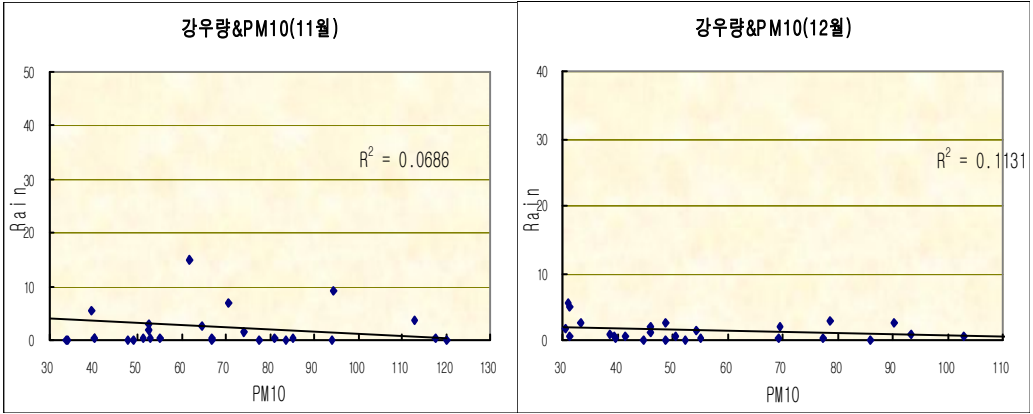


Fig. 4.76. 강우와 미세먼지농도의 상관도. (11월~12월)

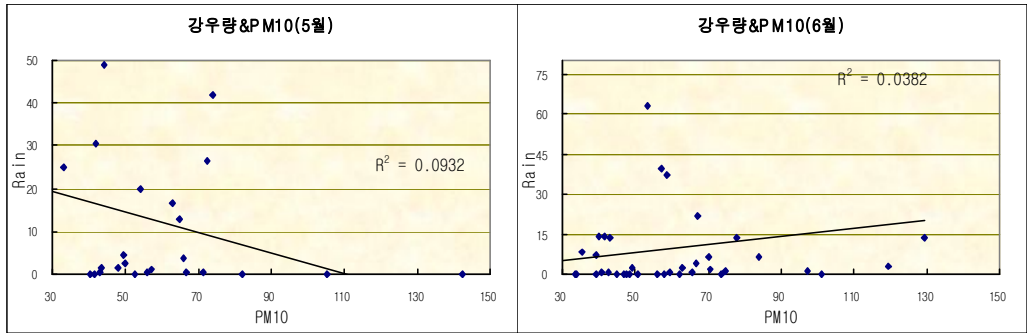


Fig. 4.77. 강우와 미세먼지농도의 상관도. (5월~6월)

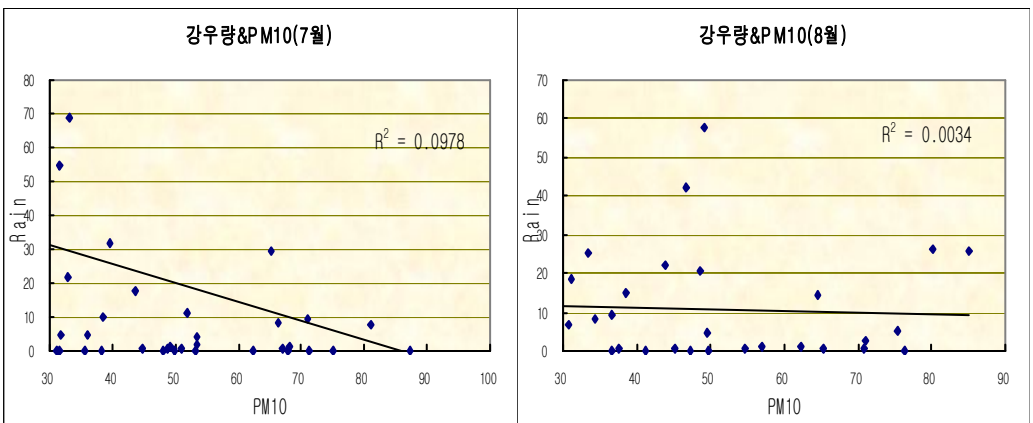


Fig. 4.78. 강우와 미세먼지농도의 상관도. (7월~8월)

반면, 풍속은 매일 영향을 미치는 변수로서 평균 풍속이 4m/s를 넘는 경우에는 미세먼지농도가 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 높아지는 일이 거의 없으며, 실제 예보시 풍속을 주요하게 다루어 왔고, 이를 위주로 한 예보자의 예보적중률이 모델링의 예보적중률보다 높았다. 따라서 풍속은 미세먼지예보의 상시 중심변수로 설정하고, 이에 더불어 미세먼지의 농도변화에 대한 기상요인별 설명도를 높이도록 변수증감을 실시하여 적정 한 예보방법을 모색하는 것이 합당할 것으로 판단되었으며, 풍속의 영향과 더불어 풍향도 중요하게 고려해야 할 것으로 판단된다.

Table 4.69. 미세먼지농도와 항목별 상관도(겨울철)

항 목	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂ +O ₃	SO ₂ +NO ₂ +O ₃	SO ₂ +NO ₂ +CO	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO
R	0.797	0.682	0.375	0.661	0.797	0.820	0.808	0.823
R Square	0.634	0.465	0.141	0.437	0.635	0.672	0.652	0.677
Adjusted R Square	0.633	0.463	0.139	0.435	0.633	0.669	0.649	0.674

Table 4.69와 같이 2005년부터 2007년까지의 겨울철(11월~2월) 측정자료 355개의 분석시 대기오염물질의 경우 겨울철에는 SO₂의 상관성(Pearson Correlation)이 0.797로 NO₂의 0.682, CO의 0.661, O₃의 0.375보다 높았으며, 네 가지 물질을 모두 포함하여 다중회귀의 경우 상관계수는 0.823으로 높았다. 대기오염물질들의 미세먼지농도에 대한 설명력으로서 R²의 값은 SO₂와 O₃의 경우 0.635로, 단일항목 SO₂와의 기여율 0.634와 큰 차이가 없었으나, NO₂의 포함 시 0.672, 일산화탄소(CO)까지 4개 항목을 모두 포함하는 경우 0.677로 나타났다.

그 외에 미세먼지의 2차 생성영향을 고려하고 대기오염물질 중 아황산가스와 이산화질소, 일산화탄소의 경우 배출원에서 같이 배출되는 경우가 많기 때문에 공변성이 있는 것으로 판단할 수 있으며, 오존의 경우 UV(ultraviolet rays)의 작용하에 생성되는 기작을 감안하여야 할 것으로 판단된다.

이에 관련하여 변수증가에 의한 무의미한 값을 덜어내기 위한 자유도 조정 기여율(Adjust R Square)을 살펴보면, SO₂와 O₃의 조합인 경우에는 SO₂ 단일항목이었을 경우와 같은 0.633으로 변동이 없었으며, SO₂와 O₃, NO₂의 조합인 경우 0.669, CO를 포함한 네 가지 모두를 조합한 경우에는 0.674로 나타났다.

Table 4.70. 미세먼지농도와 기상항목별 상관도(겨울철)

항 목	Ws	Rh	Temp	Rain	Ws+Rh	Ws+Rh+Temp	Ws+Rh+Temp+Rain
R	0.345	0.395	0.320	0.223	0.491	0.503	0.474
R Square	0.119	0.156	0.103	0.050	0.241	0.253	0.225
Adjusted R Square	0.116	0.154	0.100	0.040	0.236	0.247	0.194

Table 4.70과 같이 기상요인의 상관도(R)는 풍속(Wind speed)의 경우 0.345, 상대습도(Related Humidity) 0.395, 기온(Temp) 0.320, 강우(Rain)는 0.223이었고 단일항목으로는 상대습도(Rh)가 상관성(R)과 설명력(R²)이 가장 높았으며, 다중회귀의 경우 풍속과 상대습도, 기온을 조합한 경우 상관성(R)이 0.503으로 가장 높았다. 단회귀분석 시와 다중회귀분석 시 항목별 부호가 바뀌는 현상도 발생되었는데 이는 계절별 특성, 다중공선성에 기인하는 부분과 변수들의 간섭에 의한 것으로 추정된다.

Table 4.71. 미세먼지농도와 항목별 조합의 상관도(겨울철)

항 목	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh+Temp	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh+Temp+Rain
R	0.817	0.822	0.825	0.829
R Square	0.668	0.676	0.681	0.688
Adjusted R Square	0.664	0.671	0.675	0.662

Table 4.71과 같이 겨울철의 경우 대기오염물질은 SO₂와 NO₂, CO, O₃을 포함한 경우 상관도와 설명력이 가장 높고, 기상영향으로는 풍속과 상대습도, 기온을 포함한 경우 상관도와 설명력이 가장 높았으며, 대기오염물질과 기상영향을 포함하는 경우에는 SO₂와 NO₂, CO, O₃, Ws, Rh, Temp, Rain을 모두 조합하는 경우 상관도가 0.829로 가장 높았으나, 조정된 설명력(Adjusted-R²)은 Rain을 제외 시 0.675로

가장 높아, 강우가 없는 경우 Rain을 제외한 변수조합에 기초하여 예보하는 것이 예측의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 시간당 강우가 0.1mm 이상인 경우와, 시간당 0.1mm 이상의 강우가 예보일 초기에 나타나는 경우 세정효과가 장시간 영향을 미쳐 미세먼지농도는 확연히 낮아지는 것으로 예측하여야 할 것으로 보인다.

2005년부터 2007년까지의 기온, 풍속, 강우량, 상대습도 등 기상요인을 포함한 겨울철 실측자료의 회귀식은 아래와 같이 나타나 풍속은 영향이 중국 등에서 발생되는 높은 오염도를 가진 기류에 의해 양의 관계를 보이는 것으로 추정되었다.

$$Y = -73.127 + 5096.25S_{O_2} + 1429.578_{O_3} + 598.6NO_2 + 18.783CO + 0.529Temp + 3.749Ws - 1.187Rain + 0.535Rh$$

결론적으로 보면, 겨울철 예보의 경우 일 평균풍속이 4m/s 이상인 경우의 미세먼지농도는 $50\mu g/m^3$ 이하로 예측되며, 상대습도가 높아지는 경우 미세먼지농도는 상승되는 것으로 보아야 하고, 오염도가 큰 북서풍과 서풍이 주로 유입되므로 풍향은 오염도를 높이는 영향으로 고려하여야 할 것으로 보인다. 또한 풍속이 높아 대기의 확산과 혼합고가 높아지는 경우에는 미세먼지농도가 낮아지며, 특히 풍속이 2m/s 이하의 경우 상대습도가 높아지면 미세먼지농도도 높아지고, 예보일 기점부터 아침시간까지(06시 전후) 시간당 0.1mm 이상의 강우가 오거나 아침까지의 총 강우량이 4.5mm 이상인 경우에 미세먼지농도는 낮아진다고 예보함으로써 예보의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4.72. 기상항목 단위당 미세먼지농도 변동(겨울철)

항 목	Temp	Ws	Rain	Rh
예보적용단위	1℃	1m/s	1mm	10%
민감도 ($\mu g/m^3$)	0.53	3.749	-1.187	5.35

Table 4.72와 같이 겨울철의 기상요인 중 단일변수로서는 상대습도가 상관도와 설명력이 높게 나타나지만, 예보에 적용되는 계량단위의 변화에 있어 상대습도보다 풍속의 민감도가 클 것으로 예측되었다. 겨울철 평균값을 이용한 회귀식의

적용 시 실측 평균값과의 오차는 $4.26\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 6.9%를 보였으며, 예보 시 각 항목별 적용되는 측정단위의 1단위를 변경 시 평균값에 비해 기온은 $0.53\mu\text{g}/\text{m}^3$, 풍속은 $0.511\mu\text{g}/\text{m}^3$, 상대습도는 $5.35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 높아지며, 강우는 $1.187\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 낮아지는 것으로 나타났다.

따라서 강우가 있는 경우와 없는 경우는, 예보일의 강우 전·후 시간의 산술평균값을 산정하여 간략하게 예측하는 방법과, 민감도가 큰 풍속과 상대습도 중 계량단위가 적은 풍속의 구간별 변수증감에 의해 예보하는 방법으로 세분할 수 있으며, 대기오염항목은 측정될 수 있는 계측단위(ppm or ppb)가 적어 큰 차이가 없는 경우 차별 없이 유사하게 간주하였다.

예보방법 1> 일평균 풍속이 2m/s 이하인 경우 겨울철의 회귀식은

$$Y = -51.045 + 5,002.439\text{SO}_2 + 1,092.223\text{O}_3 + 967.777\text{NO}_2 - 3.07\text{CO} \\ + 0.111\text{Temp} - 7.125\text{Ws} - 0.518\text{Rain} + 0.654\text{Rh}$$

로 나타났으며 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값-기간평균값)는 -0.086이었다.

이 경우, 기상요인 중 풍속과 강우는 음의 상관성을, 기온과 상대습도는 양의 상관성을 보였으므로, 항목별 예보에 적용되는 계량단위는 음의 변수는 1단위를 늘이고 양의 변수는 1단위(상대습도 10% 단위)를 줄이는 경우, 회귀식에서 각각의 변화값은 풍속 7.125, 강우 0.518, 상대습도 6.54, 기온 0.111이 감소된다.

따라서 평균 풍속이 2m/s 이하인 날은 회귀식의 예측값에 적용된 기상요인 중 각 항목별 변화(Fluctuation)가 예측되는 경우, 단위별 민감도 중 상대습도와 기온의 단위별 변화값을 더하여 예보하고, 강우가 있는 경우에는 시간단위별 강우의 효과값을 감산 또는 가산하여 시간별 예측값을 산정하고, 산술평균하는 방법을 적용함으로써 최종 예보값을 예측하는 것이 적중률을 높일 것으로 기대된다.

강우의 영향은 계절별, 풍향별로 다른 방향의 영향이 나타날 수 있고 극히 미소(微少)한 강우량인 경우 상대습도의 상승을 예상할 수 있으며, 이는 미세먼지농도의 증가를 가져올 수 있으나 평균적으로 미치는 영향도는 세정효과를 감안하여 아래와 같은 강우효과를 산정하였다.

※ 강우시 산술평균 = (강우시간까지의 시간농도+강우 후 시간단위별 예측농도)/24시간

- 강우 후 시간단위별 예측농도 = 전 시간의 미세먼지농도 - 전시간의 미세먼지농도 × 0.518(강우의 편회귀계수)

그러나 이러한 기상변수들을 고려하더라도 예보모델과 회귀식에 적용되는 기상항목은 일일 평균값으로 입력됨에 따라 시간대별 미세먼지농도의 변화를 예측하기 어렵게 된다. 따라서 예보의 적중률을 높일 수 있는 방법은 기상청의 시계열 일기도에서(일기도-예상일기도-시계열도) 시간대별 기상자료에 의해 시계열적으로 예상되는 미세먼지농도를 산출하고, 시간의 경과에 따라 기상항목의 변동범위를 추정하여 각 항목별 민감도 범위를 추정한 후 그 조합에 따른 미세먼지농도 변화범위를 추정하는 것이다.

즉, 기온이 높아지고 상대습도가 낮아지는 낮 시간으로 진행되는 경우 풍속과 기온이 1단위 높아지고, 상대습도가 1단위 낮아지는 경우의 미세먼지농도 변화값을 산정하고, 기온이 낮아지고 상대습도가 높아지는 밤 시간으로 진행되는 경우 반대의 방법으로 추정값을 내어 각 시간대별 미세먼지농도값을 조합하여 범위를 설정하고 최종적으로 예보값을 결정하는 경우 적중률을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 풍속의 변화가 미세먼지농도를 변화시키는 방향은 풍향에 의해 추정할 수 있을 것이다.

앞의 풍향 분석에서와 같이 서풍 계열인 경우 미세먼지농도의 증가를, 동풍 계열인 경우 반대의 변화를 추정할 수 있으나, 계절적으로 회귀계수의 차이가 크나(1.2~15.9) 겨울철에는 비교적 작아 풍향 변화에 의한 오차가 적게 나타날 것으로 예상된다. 즉 겨울철에는 다수의 측정소 중 일부가 서풍 계열이 아닌 동풍 계열의 영향을 받는다고 하더라도 오차가 비교적 적을 수 있는 이유는, 이미 유입되어 있는 오염기단이 광활한 지역에 영향을 미치고 있어 순간 풍향이 변화하더라도 오염특성이 유사한 기단이 영향을 주게 되는 점을 판단하여야 할 것이다.

예보방법 2> 일평균 풍속이 2m/s 초과, 3m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타났으며 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값-기간평균값)는 풍속이 2m/s 이하로 낮은 때와 달리 $-8.156\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 비교적 높게 나타났다.

$$Y = -94.866 + 4,959.756\text{SO}_2 + 1,237.088\text{O}_3 + 651.562\text{NO}_2 - 15.659\text{CO} \\ + 0.545\text{Temp} + 3.691\text{Ws} - 1.472\text{Rain} + 0.896\text{Rh}$$

여기서는 풍속이 2m/s 이하일 때와 달리 강우를 제외한 3항목이 양의 관계로 나타났고 오차율도 커졌는데 이는 서풍이나 북서풍이 주로 유입되어 풍속이 높아지

는 경우 장거리 이동오염물질의 유입이 많은 특성을 나타낸 것으로 추정된다. 즉, 풍속이 미세먼지농도를 낮추는 추세와 달리 풍속이 다소 높아지는 경우라도 중국 등으로부터 이동되는 높은 오염도의 기단에 의해 서울의 대기 중 미세먼지농도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 추정된다.

기상항목별 단위 변동률은 강우의 경우 $-1.472\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 음의 관계를 보였으나 나머지 항목은 모두 양의 상관도를 나타냈다. 따라서 예보는 상대습도와 기온, 풍속 중 변동이 예측되는 항목의 단위별 변화값과 오차값을 가감하여 예보하고, 강우가 있는 경우에는 예보방법 1>에서와 같이 시간단위별 강우의 효과값과 시계열별 범위값을 증감하고, 예보 1의 경우와 달리 회귀식의 오차값이 $8.156\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이므로 예보값이 지수경계에서 도출되는 경우 오차의 가감 방향을 판단하여 최종 예보값을 예측하는 방법이 적정할 것으로 예측된다.

예보방법 3> 일평균 풍속이 3m/s 초과 4m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타났으며

$$Y = -25.937 + 6,365.842\text{SO}_2 + 2,064.765\text{O}_3 + 509.793\text{NO}_2 + 45.044\text{CO} + 0.404\text{Temp} \\ - 19.4541\text{Ws} - 1.944\text{Rain} + 0.640\text{Rh}$$

예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -1.648 로 나타났다. 이 때 풍속과 강우는 음의 효과로 기온과 상대습도는 양의 효과를 보였는데, 풍속이 3m/s 이하인 경우와 달리 풍속이 3m/s를 초과하는 경우 중국 등에서 유입되는 오염도도 확산공간이 확대되어 풍속이 음의 상관도를 보이는 것으로 추정된다.

따라서 풍속이 3m/s 초과 4m/s 이하인 경우의 예보는 풍속의 1단위 변동 시 회귀값은 매우 크게 나타나므로 풍속의 변화를 예측하는 것이 관건으로 판단되며, 풍속이 1m/s 차이가 있는 경우 미세먼지농도는 약 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 변할 수 있으므로 강우의 적용 시와 같이 시간대별 풍속의 변화에 대한 미세먼지농도를 산정하여 예측하는 방안이 예보오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

이 밖에 풍속이 4m/s를 초과하는 경우에는 황사발생시를 제외하고 미세먼지농도가 높아지는 경우가 극히 드물게 나타나므로, 예보일의 시간대별 풍속이 4m/s 이상인 시점이 초기부터 나타나는 경우는 황사 등 높은 오염도의 서풍이 도래하지 않는 경우는 미세먼지농도가 낮을 것으로 예보하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

2) 봄철 예보방법

봄철인 3월과 4월에는 습도와 황사의 영향이 크고, 기류의 이동이 빠르며 풍속이 높은 경우에도 중국 등에서 발생하는 오염도 높은 기단의 이동과 황사의 영향으로 미세먼지농도가 높아지는 특징이 있다.

Table 4.73. 미세먼지농도와 항목별 상관도(봄철)

항 목	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂ +O ₃	SO ₂ +NO ₂ +O ₃	SO ₂ +NO ₂ +CO	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO
R	0.680	0.574	0.123	0.594	0.681	0.722	0.716	0.738
R Square	0.462	0.329	0.015	0.353	0.464	0.522	0.513	0.545
Adjusted R Square	0.458	0.325	0.009	0.349	0.456	0.512	0.503	0.533

Table 4.73과 같이 봄철에 미세먼지농도에 영향을 미치는 요인으로 대기오염의 상관도는 단일항목으로 아황산가스(SO₂)가 0.68로 가장 높았으며, 대기오염도 항목별 조합에 있어서는 네 가지 항목 모두를 조합한 경우가 0.738이었으며, 설명력도 0.533으로 가장 높았다. 반면, 오존의 경우는 0.123의 상관도와 0.009의 매우 낮은 설명력을 보인 특징이 있었다.

Table 4.74. 미세먼지농도와 기상항목별 상관도(봄철)

항 목	Ws	Rh	Temp	Rain	Ws+Rh	Ws+Rh+Temp	Ws+Rh+Temp+Rain
R	0.335	0.069	0.259	0.283	0.347	0.386	0.485
R Square	0.112	0.005	0.067	0.080	0.120	0.149	0.235
Adjusted R Square	0.106	0.002	0.061	0.063	0.109	0.132	0.177

기상요인의 영향도는 Table 4.74와 같이 풍속(Ws)의 상관도가 0.335, 조정된 설명력(Adjusted-R²)은 0.106으로 단일 변수로는 가장 높았으며 상대습도는 각각

0.069, 0.002로 가장 낮았다. 겨울철과 마찬가지로 Ws, Rh, Temp, Rain 모두를 조합한 경우 상관도가 가장 높았으며, 강우의 영향이 겨울철보다 크게 작용되는 반면, 상대습도는 겨울철에 비해 영향도가 적게 나타나는 것으로 평가된다.

Table 4.75. 미세먼지농도와 항목별 조합의 상관도(봄철)

항 목	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh+Temp	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh+Temp+Rain
R	0.741	0.741	0.745	0.748
R Square	0.549	0.550	0.555	0.560
Adjusted R Square	0.533	0.531	0.534	0.488

Table 4.75와 같이 대기오염항목과 기상요인을 조합한 경우 대기오염항목과 기상항목 모두를 조합한 경우에 있어 상관도가 0.748로 가장 높았으나, 조정된 설명력(Adjusted-R²)에 있어서는 대기오염항목과 기상항목 중 강우를 제외하고 조합한 경우가(SO₂+NO₂+O₃+CO+Ws+ Rh+Temp) 0.534로 가장 높아, 봄철에는 풍속의 영향이 크고 상대습도와 강우의 영향이 비교적 적게 작용되는 것으로 평가된다.

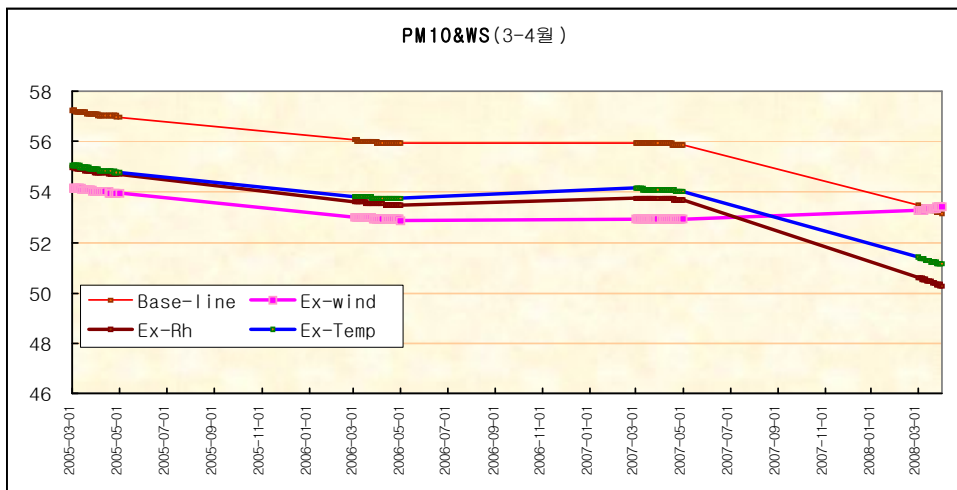


Fig. 4.79. 기상항목에 따른 미세먼지농도 영향.(KZ-F)

따라서 봄철의 예보에 있어서는 황사의 영향이 없는 경우 풍속을 주요변수 (Marker Variables)로 하여 다른 기상요인들을 감안하여야 할 것으로 보인다. 2003년부터 2008년까지 KZ-F(Kalmogorov-Zurbenko Filter)로 일별 자료를 분석하여 기상요인별 장기추세를 보면 아래와 같았다.

풍속의 경우 Fig. 4.79와 같이 2008년부터 미세먼지농도와 음의 상관도를 보이 기 시작했는데 이는 여름철의 풍속은 동풍의 영향으로 미세먼지농도와 음의 관계를 가지나 장기적으로 특히, 서풍이 주로 유입되는 겨울과 봄철에 풍속의 영향이 크게 작용되고, KZ-Filter에 의한 자료의 Moving Average로 인해 장기간의 자료는 평준화되어 전체적인 풍속의 영향은 오염도를 가중시키는 것으로 평가되며, 원시 계열자료(Base-line)가 2008년 6월까지로 국한되어 있어 3월부터 풍속이 가지는 음의 효과를 표현해내는 것으로 보인다. 즉, 풍속은 단기적으로 미세먼지농도를 낮추는 효과가 있으나, 풍향이 주는 외부 오염도의 가중효과로 인해 장기적으로 풍속은 미세먼지농도를 상승시키는 작용으로 표현되었다고 볼 수 있을 것이다.

상대습도의 영향을 배제한 경우(Ex-Rh)와 기온의 영향을 배제한 경우(Ex-Temp) 미세먼지농도는 원시계열자료와 같은 추세로 낮아지는 것을 볼 수 있어, 봄철에도 상대습도와 기온은 미세먼지농도와 양의 방향으로 작용됨을 알 수 있으며, 2005년부터 2007년까지의 실측자료 중 대기오염항목과 기상항목을 포함한 회귀식은 아래와 같았다.

$$Y = -54.909 + 4073.125SO_2 + 769.824O_3 + 860.434NO_2 + 24.992CO + 0.656Temp + 4.9Ws - 0.385Rain + 0.126Rh$$

따라서 단기예보인 미세먼지 일일예보에 있어서 풍속은 앞에서의 분석결과와 같이 부(-)의 변수로, 상대습도와 기온은 양(+)의 변수로 적용하여 풍속의 범위에 따라 다른 기상요인들과 조합을 통해 예보를 하는 경우 적중률이 높아질 것으로 보인다.

봄철의 경우 SO₂와 NO₂, CO의 상관도는 0.574~0.680으로 풍속이 1m/s ~2m/s 구간의 연간 평균 상관도(0.569~0.655)보다 높아 고농도 오염물질의 유입에 의한 영향을 받는 것으로 추정할 수 있으며, 고농도 오염물질이 유입되는 반면 풍속이 주는 음(-)의 효과가 크고, 대기오염항목과 풍속만을 조합한 설명력이 큰 점을 감안하여야 할 것으로 판단된다.

Table 4.76. 계절별 Durbin-Watson Ratio

계 절	Winter	Spring	Summer	Fall
Durbin-Watson Ratio	1.227	1.995	1.264	1.320

또한 Table 4.76과 같이 봄철의 특징은 변수 간 Durbin-Watson Ratio가 가장 크게 나타나 계절별 상관성이 가장 낮게 나타나는 것으로 평가되었다. 즉 미세먼지 농도에 영향을 미치는 기상항목은 각기 다른 항목과 완전하게 독립적이 아닌 공변성이 있으나, 봄철의 경우에는 영향을 미치는 독립성이 높아진다고 보여진다.

봄철의 예보가 겨울철의 예보와 다른 점은 상대습도와 강우의 비중으로 볼 수 있다. 겨울철에는 상대습도를 우선 감안해야 할 것으로 판단되었으나, 봄철에는 황사와 풍속을 우선적으로 예측하고 강우의 영향과 기온을 감안하여야 할 것으로 판단된다. 따라서 풍속을 주요 변수로 하는 예보방법을 위해 풍속 구간별 회귀결과를 토대로 하여 예보방법을 설정하였다.

예보방법 1> 일평균 풍속이 2m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같았으며, 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -1.486이었다.

$$Y = 243.398 + 12.368.424SO_2 - 2,125.719O_3 - 1,713.695NO_2 - 42.85CO + 3.051Temp - 83.502Ws + 6.198Rain - 0.04Rh$$

이 경우, 기상요인 중 풍속과 상대습도는 음의 상관성을 보였으며 특히, 풍속의 경우 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 기온과 강우는 양의 상관성을 보였으나, 강우의 경우는 강우가 있는 날만의 자료로 분석되는 값으로 강우가 있기 전에 저기압에 의한 풍속 저하와 오염도가 높은 시간이 있어 양의 값으로 표현되는 것으로 추정된다.

따라서 항목별 예보에 적용되는 계량단위는 풍속과 기온이 유의할 변수로서 판단되며, 상대습도는 영향도가 매우 적어 고려할 변수에서 배제하였으며, 강우는 겨울철 예보에서와 같이 시점구분에 의한 가감율(加減率)을 적용하여 예보하는 것이 합당할 것으로 평가된다.

위에서 풍속이 변화시킬 수 있는 값이 매우 크나, 풍향의 영향분석에서 나타난 것처럼 풍향의 변화가 있을 것으로 예상되는 경우 동풍 계열과 서풍 계열은 평균적으로 10 μ g/m³의 차이를 나타낼 수 있으므로 예측값이 예보지수 경계에서 근접하

여 나타나는 경우 풍향의 변화를 예측할 필요가 있고, 각 측정소별 Wind_Rose를 확인하여 전체적인 증감 추세를 예측해 볼 필요가 있을 것으로 보인다.

예보방법 2> 일평균 풍속이 2m/s 초과, 3m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타나며, 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -1.648이었다.

$$Y = 6.725 + 5,016.4744SO_2 + 381.7080_3 + 379.513NO_2 + 22.292CO + 1.884Temp - 12.009Ws - 1.177Rain - 0.093Rh$$

이 경우에도 풍속은 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났고 기온과 강우도 유의할 만한 변수로 나타났다. 따라서 항목별 예보에 적용되는 계량단위는 풍속과 기온, 강우가 유의할 변수로서 예상되며 상대습도는 영향도가 적어 고려할 변수로서 배제하였으며, 강우의 경우 앞의 예보방법과 마찬가지로 시점구분에 의한 가감율을 적용하여 예보하는 것이 합당할 것으로 평가된다.

특히 위의 경우에는 풍속이 가지는 회귀계수와 풍향 분석에서의 변화값 $10\mu g/m^3$ 이 서로 상쇄될 수 있는 값으로 나타나고, 이미 유입되어 있는 서풍 계열의 기단이 정체화 되어 있는 것으로 판단되는 경우에는 증감의 경우를 폭넓게 추정해야 할 것으로 판단된다.

예보방법 3> 일평균 풍속이 3m/s 초과 4m/s 이하인 경우 회귀식은 나타났으며, 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -2.145였다.

$$Y = -30.486 + 4,729.549SO_2 + 287.7070_3 + 577.125NO_2 + 97.712CO + 0.812Temp - 5.418Ws + 0.105Rain - 0.129Rh$$

이 경우에도 기상요인 중 풍속은 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고 기온과 강우는 약한 양의 상관도를, 상대습도는 약한 음의 상관관계를 나타냈다. 이 경우 예보는 풍속의 증감에 의해 미세먼지농도가 다르게 나타날 수 있는 값이 풍향에 의한 영향보다 적게 나타나므로 모델링 시 적용된 풍속의 예측정확도에 대한 검토와 풍향 예측이 중요하게 작용할 것으로 판단된다.

즉, 풍향이 서풍인 경우에는 풍속의 1단위 변화 시 $15\mu g/m^3$ 이상의 변화값을 가질 것으로 판단되므로 서풍과 동풍의 예측이 나타낼 수 있는 오차가 클 것으로 평가된다. 또한 강우가 있는 경우에는 미세먼지농도를 높일 수 있는 가능성이 있을 것으로 나타나므로 세정효과가 상당한 시간동안 지속되지 않는 정도의 적은 강우의 경우 미세먼지농도와 정(+)의 영향을 고려하여야 할 것이며, 풍속이 4m/s가 초과하는 경우에는 미세먼지농도는 낮을 것으로 예보하여야 할 것으로 판단된다.

3) 여름철 예보방법

Table 4.77과 같이 여름철인 5월부터 8월 사이에는 주로 남서풍 또는 동풍의 영향이 미친다. 여름철에 미세먼지농도에 영향을 미치는 요인으로 대기오염의 상관도는 단일항목으로 CO가 0.687로 가장 높았으며 항목별 조합에 있어서는 네 가지 항목을 조합한 경우가 0.773이었으며, 설명력도 0.594로 가장 높았다. 또한 오존의 경우는 겨울철보다 높아진 0.492의 상관도와 0.24의 설명력을 보여 여름철 오염특성을 나타냈다.

Table 4.77. 미세먼지농도와 항목별 상관도(여름철)

항 목	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂ +O ₃	SO ₂ +NO ₂ +O ₃	SO ₂ +NO ₂ +CO	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO
R	0.653	0.522	0.492	0.687	0.703	0.720	0.747	0.773
R Square	0.427	0.273	0.242	0.471	0.494	0.518	0.558	0.598
Adjusted R Square	0.425	0.271	0.240	0.470	0.491	0.514	0.554	0.594

Table 4.78. 미세먼지농도와 기상항목별 상관도(여름철)

항 목	Ws	Rh	Temp	Rain	Ws+Rh	Ws+Rh+Temp	Ws+Rh+Temp+Rain
R	0.230	0.152	0.057	0.210	0.265	0.276	0.302
R Square	0.053	0.023	0.003	0.044	0.070	0.076	0.091
Adjusted R Square	0.050	0.020	0.001	0.039	0.065	0.069	0.071

Table 4.78과 같이 기상요인의 영향은 봄철과 마찬가지로 풍속의 상관도가 0.230으로 가장 높았고 설명력(Adjusted-R²)도 0.05로 단일 변수로는 가장 높았으며, 봄철과 마찬가지로 Ws, Rh, Temp, Rain 모두를 조합한 경우 상관도와 설명력이 높게 나타났으나 기온은 0.057, 0.001로 상관도가 낮았다.

Table 4.79. 미세먼지농도와 항목별 조합의 상관도(여름철)

항 목	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh+Temp	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh+Temp+Rain
R	0.774	0.789	0.798	0.793
R Square	0.598	0.623	0.637	0.629
Adjusted R Square	0.593	0.617	0.630	0.613

Table 4.79와 같이 대기오염항목과 기상요인을 조합한 경우 봄철과 달리 대기오염항목과 기상항목 중 강우를 제외하고 조합한 경우의 상관도가 0.798로 가장 높았으며, 설명력(Adjusted-R²)에 있어서도 0.63으로 가장 높게 나타나, 단일변수로서의 영향력과 차이를 보였으며 여름철에 있어 강우의 공변성은 다른 계절과 다르게 나타냈다.

Table 4.80. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석(여름철)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
Constant	88.322	19.278		4.581	8.5E-06
Temp	-0.211	0.517	-0.029	-0.409	0.683
Ws	-6.282	2.3234	-0.193	-2.7032	0.007
Rain	-0.125	0.0634	-0.155	-1.971	0.050
Rh	-0.263	0.1984	-0.104	-1.325	0.187

또한 Table 4.80과 같이 기온, 풍속, 강우, 상대습도 등 기상요인만 분석 시 겨울철에 미세먼지와 양의 상관성을 보였던 기온과 상대습도, 봄철에 양의 상관성을 보였던 기온이 여름철에는 모두 음의 상관성을 나타냈는바, 이는 강우로 인한 상대습도의 증가가 반영된 것으로 강우 시 상대습도가 증가하는 경우에도 강우에 의한 미세먼지 세정효과가 커져 상대습도는 겨울철과 달리 음의 상관성을 보이며,

기온이 음의 효과를 나타내는 것은 강우와 공변성에 의한 가능성과, 기상물질 등이 2차적으로 생성하는 과정도 고려할 필요성을 표현하는 것으로 판단된다.

여름철 기상변수만을 고려한 경우 회귀식은 풍속의 편회계수가 가장 크고 모든 기상항목이 음의 상관성을 보인다($Y=88.322-0.211Temp-6.282Ws-0.125Rain-0.263Rh$). 따라서 봄철과 마찬가지로 풍속을 주요변수(Marker Variable)로 하여 다른 기상요인들을 감안하여야 할 것으로 판단된다.

2005년부터 2007년까지 여름철 363일간의 대기오염항목과 기상요인을 모두 조합하여 회귀분석한 결과는 아래와 같이 나타났다.

$$Y = -153.531 + 4,305.935SO_2 + 1,206.6243O_3 + 666.817NO_2 + 96.167CO + 1.72Temp + 4.189Ws - 0.103Rain + 0.626Rh$$

여기서 강우를 제외한 모든 항목이 양의 상관성을 보이는데, 기상항목만의 회귀시와는 다른 결과로서 전체적인 예보에 참고하기 어려우므로 위에서와 마찬가지로 풍속 구간별 상관도에 의해 예보하는 방법을 추정하였다.

예보방법 1> 일평균 풍속이 2m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타났으며, 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -0.287이었다.

$$Y = -84.816 + 11,494.315SO_2 + 1,203.922O_3 - 90.62NO_2 + 85.376CO - 0.532Temp - 2.844Ws - 0.125Rain + 0.586Rh$$

기온은 여름철 전체의 특성과 다르게 음의 값을 나타냈으나, 풍속과 강우, 상대습도는 여름철 전체 특성과 같은 음의 상관성을 보였으며, 풍속의 영향이 크게 나타났다.

따라서 풍속이 2m/s 이하 시 여름철 예보는 풍속이 유의할 변수로서 판단되며 상대습도는 양의 상관도로 적용하고, 강우의 경우 다른 계절과 마찬가지로 시점구분에 의한 가감율(加減率)을 적용하여 예보함이 타당할 것으로 판단된다. 또한 풍향의 영향은 회귀계수가 15.9로 다른 계절에 비해 크게 나타나고, 풍속의 회귀계수와 큰 차이를 보이고 있어 서풍과 동풍의 차이가 매우 큰 값을 변화시킬 수 있을 것으로 보이므로 풍향의 예보내용과 지점별 지표풍의 확인이 필요한 것으로 판단된다.

예보방법 2> 일평균 풍속이 2m/s 초과 3m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타났으며, 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -3.047이었다.

$$Y = -174.109 + 2,295.906SO_2 + 850.398O_3 + 1,504.771NO_2 + 60.896CO + 1.606Temp \\ + 15.627Ws - 0.189Rain - 0.692Rh$$

이 경우에도 풍속은 지배적인 영향을 미치나 양의 상관도를 보였으며 강우는 음의 상관도를 나타냈다. 풍속이 양의 상관도를 보이는 것은 5월의 황사와 비산먼지로 인한 영향에 기인하는 것으로 추정된다.

따라서 항목별 예보에 적용되는 계량단위는 풍속과 기온, 강우가 유의할 변수로서 예상되며 상대습도는 강우가 많은 관계로 영향도가 적어 고려할 변수로서 배제하였으며, 앞의 예보방법과 마찬가지로 강우의 경우 시점구분에 의한 가감율을 적용하여 예보하는 것이 합당할 것으로 평가된다.

예보방법 3> 일평균 풍속이 3m/s 초과 4m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타났으며, 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -8.549였다.

$$Y = -345.777 + 6,430.242SO_2 + 2,120.173O_3 + 1,290.026NO_2 + 24.300 + 4.629Temp \\ + 13.859Ws - 0.037Rain + 1.609Rh$$

이 경우에도 풍속은 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고 기온과 상대습도의 영향이 다소 높아졌으며 강우는 약한 음의 상관관계를 나타냈다.

따라서 이 경우의 예보도 풍속의 가감에 의해 미세먼지농도의 변동이 크게 나타나므로 모델링 시 적용된 풍속의 예측정확도가 관건으로 판단되며, 회귀예측값이 음으로 나오는 점을 감안하여 오차값을 가하여 예보할 것이 적중률을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

4) 가을철 예보방법

가을철에는 오염도가 낮은 동풍이 주로 유입되어 미세먼지농도는 낮게 유지된다. 경험적으로 감지되는 가을철의 미세먼지농도는 특별한 이벤트가 없는 경우 대부분 낮게 유지되므로 풍속이 낮아 대기가 장기간 정체되고 안개가 끼지 않는 경우에는 비교적 적중률이 높게 나타난다.

Table 4.81. 미세먼지농도와 항목별 상관도(가을철)

항 목	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂ +O ₃	SO ₂ +NO ₂ +O ₃	SO ₂ +NO ₂ +CO	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO
R	0.798	0.680	0.019	0.839	0.804	0.835	0.861	0.882
R Square	0.636	0.462	0.000	0.703	0.646	0.697	0.741	0.779
Adjusted R Square	0.634	0.459	0.005	0.701	0.642	0.692	0.736	0.774

Table 4.81과 같이 가을철 미세먼지농도에 영향을 미치는 요인으로 대기오염의 상관도는 단일항목으로 CO가 0.839로 가장 높았으며 항목별 조합에 있어서는 네 가지 항목을 조합한 경우가 0.882이었으며, 설명력도 0.774로 가장 높았다. 반면, 오존의 경우는 0.019의 상관도와 0.005의 매우 낮은 설명력을 보여 가을에 저농도인 오존은 미세먼지농도에 낮은 영향을 나타낸 특징이 있었다.

Table 4.82. 미세먼지농도와 기상항목의 상관도(가을철)

항 목	Ws	Rh	Temp	Rain	Ws+Rh	Ws+Rh+Temp	Ws+Rh+Temp+Rain
R	0.364	0.190	0.105	0.164	0.396	0.409	0.347
R Square	0.132	0.036	0.011	0.027	0.156	0.167	0.120
Adjusted R Square	0.128	0.031	0.006	0.012	0.147	0.453	0.063

Table 4.82와 같이 기상요인의 영향도는 다른 계절과 마찬가지로 풍속의 상관도가 0.364, Adjusted-R²는 0.128로 단일 변수로는 가장 높았으며 기온은 0.105, 0.006으로 가장 낮았다. 항목별 조합에 있어서는 강우를 제외한 Ws, Rh, Temp를

조합한 경우 상관도가 0.409로 가장 높았으며 풍속의 영향이 여름철보다 크게 작용되는 반면, 강우는 여름철에 비해 영향도가 적게 나타나는 것으로 나타났다.

Table 4.83. 미세먼지농도와 항목별 조합의 상관도(가을철)

항 목	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh+Temp	SO ₂ +NO ₂ +O ₃ +CO+Ws+Rh+Temp+Rain
R	0.882	0.885	0.888	0.859
R Square	0.779	0.783	0.789	0.738
Adjusted R Square	0.772	0.776	0.781	0.702

Table 4.83과 같이 대기오염항목과 기상요인을 조합한 경우 대기오염항목과 강우를 제외한 기상항목을 조합한 경우에 있어 상관도가 0.888로 가장 높았고, 설명력(Adjusted-R²)에 있어서도 0.781로 가장 높아, 가을철에는 모든 변수를 조합하는 경우에도 풍속의 영향이 크고 강우의 영향이 적게 작용되는 것으로 평가된다.

따라서 가을철의 예보에 있어서는 풍속을 위주로 한 예보가 적중률이 높을 것으로 보이는데, 기상항목만의 회귀식은 다음과 같이 나타났다.

$$Y = 52.731 - 0.496Temp - 8.544Ws - 0.153Rain + 0.231Rh$$

이 때 유의수준(Significant)은 풍속의 경우 0.04였으나 기온, 강우, 상대습도는 0.38~0.57로 다소 높게 나타났고, 상대습도를 제외한 풍속, 기온, 강우는 음의 상관도를 보였으며 풍속과 강우의 영향이 여름철보다 크게 나타났다. 또한 전체 변수의 상관도에 있어서 회귀식은 아래와 같이 나타나 미세먼지농도에 대한 영향도가 다소 낮아졌으며 상대습도의 부호도 변경되었다.(Table 4.84)

$$Y = -43.321 - 626.243SO_2 - 107.432O_3 - 594.81NO_2 + 189.75CO + 1.779Temp + 3.849Ws - 0.07Rain - 0.4586Rh$$

그러나 강우를 제외한 경우 회귀식은 다음과 같이 나타나 강우가 없는 경우 상대습도는 양의 상관도를 보이는 것으로 나타났다.

$$Y = 70.579 - 5,493.103SO_2 + 746.547O_3 + 3.915NO_2 + 103.996CO + 0.683Temp + 1.647Ws + 0.092Rh$$

Table 4.84. 미세먼지농도와 기상항목의 다중회귀분석(가을철)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
Constant	52.73111	31.57811		1.670	0.010
Temp	-0.496	0.868	-0.070	-0.571	0.570
Ws	-8.544	4.140	-0.273	-2.064	0.043
Rain	-0.153	0.175	-0.132	-0.876	0.385
Rh	0.231	0.372	0.092	0.619	0.538

따라서 강우가 없는 경우와 강우 후 미세먼지농도가 상승되는 기점에서부터 상대습도는 미세먼지농도를 상승시키는 요인으로 작용시키는 것으로 간주하여야 할 것으로 보인다. 회귀계수가 큰 풍속을 주요 변수로 하는 예보방법을 위해 풍속 구간별 분석결과를 기초로 예보방법을 보면 다음과 같다.

예보방법 1 > 일평균 풍속이 2m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타났으며, 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -0.688이었다.

$$Y = -113.812 + 2,448.087SO_2 + 1,108.548O_3 - 416.272NO_2 - 103.73CO + 0.619Temp + 3.116Ws - 1.238Rain + 0.646Rh$$

이 경우 기상요인 중 풍속과 상대습도, 기온은 양의 상관성을 보였으며, 강우는 음의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 풍속이 2m/s 이하로 낮은 경우 강우가 있을 때는 시점구분에 의한 감율(減率)을 적용하여 예보하는 것이 합당할 것으로 평가된다. 풍향의 회귀계수는 14.76으로 위 풍속의 회귀계수 3.116보다 매우 크므로 풍향의 변화에 따라 미세먼지농도의 변화도 크게 나타날 것으로 판단된다. 따라서 동풍이 작용하는 경우에는 예측된 미세먼지농도값을 풍향의 회귀계수만큼 가감시켜 예측해보는 방법도 염두에 두어야 할 것이다.

예보방법 2> 일평균 풍속이 2m/s 초과 3m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타났으며, 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 -3.925였다.

$$Y = -94.86 + 4,959.756SO_2 + 1,237.088O_3 + 651.562NO_2 + 15.659CO$$

$$+ 0.545Temp + 3.691Ws - 1.472Rain + 0.896Rh$$

이 경우에도 풍속의 회귀계수가 크게 나타나고 강우를 제외한 기상항목은 양의 상관변수로 나타났다. 따라서 풍속이 2m/s 이상 3m/s 이하인 경우에도 풍속이 2m/s인 경우와 같이 강우가 있을 때는 회귀식에 의한 농도산정과 강우 시점의 구분에 의해 가감하여 예보하는 것이 합당할 것으로 평가된다. 풍향의 영향도 풍속이 2m/s 이하인 경우와 마찬가지로 풍속의 변화값보다 크게 나타날 수 있을 것이므로 위 예보방법 1과 같이 풍향의 영향값을 고려해야 할 것으로 보인다.

예보방법 3> 일평균 풍속이 3m/s 초과 4m/s 이하인 경우 회귀식은 다음과 같이 나타났으며 예측값과 기간 평균값의 오차(예측값 - 기간평균값)는 - 3.666이었다.

$$Y = -180.159 - 6,488.869SO_2 - 3,216.913O_3 + 3,403.019NO_2 + 1.054CO$$

$$+ 5.319Temp + 72.45Ws - 0.129Rain - 1.975Rh$$

이 경우에도 풍속은 가장 큰 편회계수를 나타내는 것으로 나타났고 기온은 양의 상관도를, 강우와 상대습도는 약한 음의 상관관계를 나타냈다.

따라서 이 경우의 예보는 풍속이 강한 경우 인근 지역에서의 비산먼지의 유입을 고려해야 할 것으로 보이며, 특히 농업활동 등에 있어 추수가 진행되거나 종료된 후 토지의 피복도가 저하되는 경우 비산먼지의 유입도가 증가할 수 있음을 감안하여야 할 것으로 판단된다.

또한 풍속의 경우 회귀계수가 매우 크게 나타나 1단위의 변동에 의해 오차의 20여 배를 증감시킬 수 있으므로 세밀한 예측이 요구되며, 상대습도가 음의 상관도를 나타내는 것은 강우에 의해 동반되는 효과로 볼 수 있다. 결론적으로 회귀식에 의해서 예측되는 미세먼지농도와 오차값을 가하여 예보하고, 풍속이 4m/s가 초과하는 경우 미세먼지농도는 낮을 것으로 예보하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

4.3 종합적 고찰

본 연구의 결과에 의하면 미세먼지의 경우 기상여건과 기체상 대기오염물질, 2차 입자를 생성하는 물리적 조건 등이 변화하여 각 변수 간 맺고 있는 함수관계가 변동된다면 이를 반영시켜 최근 자료에 의해 새로운 모델로 업데이트하는 것이 중요하다고 볼 수 있다. 특히, 회귀모델의 경우에는 특정한 시기에 다른 영향을 나타낼 수 있는 변수들과, 각 변수 간 특별한 상관성, 계절별로 달라지는 상관도를 적절하게 보완하는 경우 예보모델의 정확도는 향상될 수 있을 것이다.

현재 시행하고 있는 방법에 따라 예보의 정확도를 높이기 위해서는 예보모델에 의한 적중률 분석과 아울러 예보자가 실시한 예보에 대한 비교분석이 필요하다고 볼 수 있다. 예보모델에 적용되지 않는 영향변수는 예보보고서에 기재되고 있으며 비적중일에 대한 평가는 적중되지 않은 주요 영향변수를 위주로 하여 평가할 필요가 있다. 이 경우 적중되지 않은 영향변수는 그 오차의 범위를 산정하여 예측한 미세먼지농도의 범위와 비교함으로써 변수에 대한 영향도를 추정하고, 사전에 검토된 영향력과 차이가 발생한 원인을 분석함으로써 변수가 가지는 활동도(Action range)를 짐작할 수 있을 것이며, 이를 토대로 예보모델에서의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

또한 Back Trajectory를 추출하여 기단의 움직임을 확인하고 기단이 출발한 지점에서의 미세먼지농도와 현지(서울 측정지점)에서의 오염차이를 추출함으로써 기단이 이동경로에서 가감되는 오염도 차이를 추정해 볼 수 있을 것이다.

영향변수 분석에서는 주 풍향을 분석함으로써 미세먼지농도에 대해 일관성 있는 상관도를 나타내는 것으로 평가되었으나 서울시 전역이 동일한 시간대에 동일한 풍향의 영향을 받지 않고, 동일한 기류가 전역에 영향을 미친다고 해도 시간적인 차이가 나타나고 있다. 따라서 계절별 예보방법에서는 풍향을 고정변수로 사용하지 않았으나 계절적으로 풍향의 변화가 있기 때문에 특별히 고려해야 할 시기가 있다. 서울의 전역에 대한 일률적인 풍향의 영향을 예측하기보다 권역적으로 분할하여 Wind Rose를 확인하고 영향을 미치는 풍향을 사전에 파악하는 것이 보다 나은 예측방법이라 할 수 있을 것이다.

특히 서울과 같이 넓은 지역에서 많은 측정소를 이용하여 미세먼지농도를 측정하는 경우 지형적 조건과 대기오염물질의 지역적 배출조건 등 각가지 이유로 인해

오차가 발생할 수 있으므로 측정소별 예측되는 미세먼지농도의 산정 후 이를 총괄적으로 합산하여 평가하는 방식도 검토해 볼 수 있다.

미세먼지농도는 본 연구에서 다루어 온 대기오염도와 기상항목, 대기여건에 의한 2차 생성 미세먼지 등의 비정형적 요인 외에도 현재까지 입증하지 못한 다수의 영향요인이 작용되는 것으로 여겨진다. 최근의 Eulerian 모형과 Gradient 기법에 의한 활발한 연구에도 불구하고 2차 생성물질의 메커니즘 규명은 미숙한 부분이며, 도로 재 비산먼지의 규명과 오염배출원별 특성 및 기여도 규명은 많은 연구를 필요로 한다.

장래의 미세먼지의 농도를 예측함에 있어 대기오염물질의 배출량을 토대로 하는 모델링이 응용되고 있으나 정확도에 있어 많은 오차를 나타내고 있다. 국내 자료 중 도로나 점오염원의 현황은 비교적 잘 파악하고 있으나, 비산먼지의 배출원의 규모와 이동오염원 등의 활동도에 대한 배출량을 산정할 수 있는 기초적인 자료가 부족하며, 배출계수 또한 EPA(Environmental Protection Agency)의 자료를 활용하는 부분이 많다. 따라서 대기오염도 저감을 위한 정책이나 미세먼지 예보의 정확도를 높이는 데 있어 배출량의 산정의 정확도를 높이는 것이 관련 연구에 필요한 과제로 볼 수 있으며, 배출량 산정의 정확도를 높이는 조사방법으로 시차적 오차를 최소화 할 수 있도록 전체 지역에 대한 동시 조사방법을 상정해 볼 수 있을 것이다.

근래에 연구되는 격자형 모델은 각 경계범위에서 각기 다른 변수의 영향을 정확하게 산출하지 못하고 있으나, 수용모델링을 병행하는 경우 높은 정확도를 추정할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 연구는 미세먼지 예·경보에 대한 시민들의 높은 관심과 활용도의 효용을 제고시키는데 기여할 것으로 판단되며, 미세먼지 예보정확도를 향상시키는 것은 시민들의 건강보호에 직결되는 것으로서 사회의 발전 상태를 반영하는 지표적 성격을 나타낸다고 할 수 있을 것이다.

V. 결 론

기존의 회귀모델은 일평균 미세먼지량(Y)과 전일 평균습도의 관계 등을 이용한 중선형(中線型) 모델이며, 미세먼지 예보모델에서는 설명변수(독립변수)가 4개의 환경인자와 5개의 기상인자 등 10개로서 연중 동일한 회귀식을 사용하는 모델이다. 그러나 이러한 독립변수들이 계절별 또는 다른 변수들과의 협동적 관계에서 일관적인 영향을 보이지 않는 것을 알 수 있다.

이에 더불어 대기오염물질 각 항목도 배출원에서 단일항목만 배출되는 경우가 없고 두 가지 이상의 항목이 동시에 배출되며, 기상의 각 항목은 대부분 두 가지 이상의 변수에 의해 상호간 공변성을 가지게 되므로 중회귀분석에서 Step_wise 분석으로 할 경우 변수의 변화에 대하여 검토하고, 변수의 증가에 따라 높아질 수 있는 설명력에 대하여는 경험적인 추리로서 평가하였다.

미세먼지농도변화의 현상적인 부분을 다루기 위해 과거 실측자료를 이용하여 회귀분석하고, 변수증감법에 의해 상관도가 높아지는 요인들을 중점으로 예측함으로써 예보정확도를 높이는 방안을 검토해 본 결과 다음과 같다.

1. 미세먼지농도에 영향을 미치는 요인은 대기오염물질과 기상요인들의 설명력이 높게 나타나며, 기상요인의 계절별 영향특성은 다음과 같았다.

가. 강우의 경우 미세먼지농도를 낮추는 영향특성을 가지나 서풍의 유입이 많은 경우 강우에 의한 세정효과가 짧은 시간 내에 소멸되며, 미세먼지농도와 상관도는 연도별 차이가 있으나 겨울철에 상관계수가 크게 나타났다. 강우의 효과는 강우가 있는 후 2시간 경과 시 미세먼지농도가 가장 낮아졌으며, 하절기에는 강우가 있는 후 지역적인 배출에 의해 미세먼지농도가 상승되는 영향이 크고 봄철에는 외기의 유입에 의해 상승영향이 큰 것으로 나타났다.

나. 기온의 경우 미세먼지농도와 음의 상관도를 보이거나 강우 등 다른 기상항목과 상관도를 가지는 것으로 평가되었으며, 전체적으로 풍속과는 음의 관계를 강우와 상대습도와는 양의 관계를 보이고 있으며 미세먼지농도와 직접적인 예측변수보다 다른 변수와의 조합에 의한 보조변수로서 이해하여야 할 것으로 판단된다.

다. 풍속은 4m/s를 초과하는 경우 미세먼지농도가 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 경우가 거의 없고 강우일을 제외한 경우에도 미세먼지농도와 음의 상관도를 보여 예보에 주요한 변수로 이해되었다. 풍향의 경우 서풍 계열(북서풍, 남서풍 포함)은 미세먼지농도와 양의 상관도를 보였으며, 동풍과 남풍 등이 주 풍향인 경우에는 미세먼지농도가 낮아지는 것으로 나타났다.

라. 일교차와 안개의 영향은 상관도가 낮았으나 겨울과 봄철이 여름철보다 상대적으로 양의 상관도가 높았다. 일교차가 큰 경우 미세먼지농도와는 양의 상관성을 보이고 있으나, 일교차가 큰 경우라도 박무를 형성하지 않는 경우도 있고 유입되는 기류에 의해 영향특성이 달라지는 것으로 평가되어 미세먼지농도 예측에 직접적인 영향변수로 다루기 어려운 것으로 판단되었다.

마. 상대습도는 미세먼지농도를 증가시키는 영향특성을 보이는데, 1월부터 3월까지의 상대습도의 상승은 미세먼지농도를 증가시키는 효과가 크고 여름철에는 강우가 있는 경우 상대습도가 높아지는 경우가 있어 미세먼지농도가 낮아지는 경향을 보였다. 다음으로 상대습도와 기압의 상관도는 계절별로 차이를 나타냈는데, 기압이 높아지는 겨울철에는 상대습도가 낮아지며 기압과 상관도가 낮아졌고, 여름철에는 반대의 경향을 보였다.

2. 미세먼지의 예보에 있어 고려해야 할 영향인자는 기상요인 외 2차 생성물질을 꼽을 수 있는데 이에 대한 영향도는 도심지역과 도로변지역이 차이를 보였다. 2차 입자상 물질을 Biomass Burning과 기타 기체상 물질의 합으로 분류할 경우 도심지역에서는 42% ~ 45%의 범위로 나타나고 도로변 지역에서는 34% ~ 42%로 나타나, 도로변 지역에서는 지역 배출량에 의한 영향이 더 크게 작용하는 것으로 평가되어 자동차의 영향을 추측하게 했다.

3. 미세먼지예보의 정확도를 높이기 위한 방안으로 계절별 예보를 설정하였으며, 대기오염항목과 기상변수를 조합하는 경우 설명력(R square)과 조정된 설명력(Adjusted R square)은 다음과 같았다.

가. 겨울철과 봄철은 대기오염항목 SO_2 , NO_2 , O_3 , CO와 기상항목 풍속(Ws), 상대 습도(Rh), 기온(Temp), 강우(Rain) 모두를 조합하는 경우 설명력(R Square)이 각각 0.829, 0.748로 가장 높았고, 위 항목에서 강우(Rain)를 제외하는 경우 조정된 설명력(Adjusted R square)은 0.675, 0.534로 가장 높았다.

나. 여름철과 가을철은 위와 달리 강우를 제외한 대기오염항목 SO_2 , NO_2 , O_3 , CO와 기상항목 풍속(Ws), 상대습도(Rh), 기온(Temp)을 조합하는 경우 설명력(R Square)이 각각 0.798, 0.888과 조정된 설명력(Adjusted R square)이 각각 0.63, 0.781로 가장 높았다.

4. 본 연구 결과에 따라 기상요인의 경우는 풍속이, 대기오염물질의 경우는 모든 물질을 고려하였을 때 설명력이 높은 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 예보자가 보다 정확도가 높은 예보를 위한 방법으로 풍속 구간별 계절별 요인을 고려한 미세먼지 예보방법을 제시하였다.

5. 위의 연구결과를 참고하여 미세먼지농도를 예측하는 경우 1차적으로 회귀식에서 산출된 예측농도와 이에 적용되지 않은 변수로 풍향이 농도변동의 주요 판단근거로 작용하게 되는데, 일별 주풍향이 가감의 방향을 제시해 주게 됨으로 기류가 이동한 속도를 고려한다면 예보의 정확도를 보다 증대시키게 될 것이다.

참 고 문 헌

1. 구윤서.(2004). 「미세먼지 예보시스템 도입방안」
2. 구윤서.(2004). 「미세먼지 개요 및 해외 예보사례」
3. 권호장.(2004). 먼지예보제의 도입필요성과 시민의 역할. 서울시정개발연구원 (서울시 먼지 예보제 도입을 위한 시민공청회)
5. 국립환경과학원.(2007). 「수도권지역 미세먼지 오염현상 해석 및 장래예측(최종보고서)」
6. 국립환경과학원.(2005). 「환경오염질한 모니터링을 통한 위해성 관리방안 구축」
7. 국립환경연구원.(1996). 「수도권지역의 시정장애현상 규명을 위한 조사연구(Ⅲ)」
8. 김나경· 김용표.(2006). 배경지역에서의 국지오염원의 영향:2000년 3월 고산측 정결과 「한국대기환경학회지」 22(6):821~830
9. 김용표.(2006). 서울의 미세먼지에 의한 대기오염. 「한국대기환경학회지」 22(5):535~553
10. 김운수.(2004). 「서울시 미세먼지 배출량 현황 및 저감방안」. 서울시정개발연구원
11. 김유근외 3.(2007). MM5-CAMx를 이용한 대기오염물질의 재순환현상 모델링:2004년 6월 수도권 오존오염 사례연구 「한국대기환경학회지」 23(3):297~310
12. 박진수· 김신도.(2005). 서울과 인천지역 PM10과 PM2.5 중 2차생성 탄소성분 추정. 「한국대기환경학회지」 21(1):131~140
13. 배귀남· 이진욱· 신동천.(2006). 「극미세입자 평가관리 기반구축」. 국립환경과학원
14. 배귀남.(2008). 인체위해성 관점에서 자동차 미세먼지 관리. 서울시 대기질 개선 포럼
15. 송철한.(2008). 「광화학모델링을 이용한 미세먼지 오염 예측」. 국립환경과학원
16. 서울시정개발연구원.(1997). 「서울시 미세먼지저감 및 관리방안」
17. 서울시.(2004). 수도권 대기환경영향요인 분석 및 총량관리정책개발연구
18. 서울시.(2005). 「미세먼지예경보시스템 사용자안내서」

19. 서울시.(2006). 「수도권대기환경관리기본계획 시행을 위한 서울특별시 시행계획」. 서울시 환경국
20. 서울시.(2006). 「2005년 서울의 대기현황」. 서울시 환경국
21. 서울시.(2007). 「2006년 서울의 대기질 평가보고서」. 서울시 환경국
22. 서울시.(2007). 「서울시 미세먼지특성분석 기본연구」. 서울시 맑은 서울추진본부
24. 신문기외 3.(2007). 기상인자가 미세먼지농도에 미치는 영향 「한국대기환경학회지」 23(3):322~331
25. 이대엽.(2006). 배출가스저감장치 부착사업 해외사례 및 국내 현황
26. 이정영외 3.(2007). KZ필터법을 이용한 4대도시 미세먼지농도의 장기변화. 「2007 환경공동학술대회」
27. 이정영외 3.(2008). KZ 필터법을 이용한 서울지역 미세먼지농도의 장기변화 분석. 「한국대기환경학회지」 24(1):63~71
29. 이학성외 3.(2004). 미세입자(PM2.5)의 배출원 구성물질 성분비 개발에 관한 연구 「한국대기환경학회지」 20(3):317~330
30. 임종한.(2007). 「대기오염으로 인한 질병부담과 취약그룹의 건강피해」
31. 하은희.(2007). 산모와 영유아의 환경적 요인과 건강영향. 모자환경보호센터
32. 한국과학기술연구원.(2006). 서울시 교통환경정책의 대기환경개선효과 평가
33. 허종배외 3.(2008). 서울시 대기 중 미세먼지(PM2.5)의 오염원 기여도와 사망과의 연관성 분석. 서울대학교 보건대학원
34. 허종배외 2.(2008). Source apportionment of PM2.5 in seoul, korea. 서울대학교 보건대학원
35. 환경부.(2005). 「수도권 대기환경관리기본계획」
36. 황인조·김동술.(2003). PMF 모델을 이용한 대기 중 PM-10 오염원의 확인 「한국대기환경학회지」 19(6):701~717
37. 황인조·김동술.(2003). PMF 모델을 이용한 대기 중 PM-10 오염원의 정량적 기여도 추정 「한국대기환경학회지」 19(6):719~731
38. 한진석외 4.(2003). PMF를 이용한 수도권지역 VOCs의 배출원 추정 「한국대기환경학회지」 22(1):85~97

39. 한진석외 6.(2006). 장거리 이동 대기오염물질 이동량의 공간적 분포와 변화 추이 (1997~2004년) 「한국대기환경학회지」 22(1):99~106
40. Andra´s Gelencse.al.(2007). Source apportionment of PM2.5 organic aerosol over Europe:Primary/secondary, natural/anthropogenic, and fossil/biogenic origin. Journal of Geophysical Research, Vol. 112, D23S04
41. Erika K Wise.al.(2004). Air Quality and Climate Variability in the Southwestern United state 「Air Quality Forum Tucson, AZ」
42. Gary W. Fuller, David Green.(2006). Evidence for increasing concentrations of primary PM10 in London 「Atmospheric Environment」 40(2006):6134-145
43. John R. Stedman, Emma Linehan, Beth Conlan(2000). Receptor modelling of PM10 concentrations at a United Kingdom national network monitoring site in central London. Atmospheric Environment 35(2001)297:304
44. Judith C. Chow, John G. Watson.(2001). Review of PM2.5 and PM10 Apportionment for Fossil Fuel Combustion and Other Sources by the Chemical Mass Balance Receptor Model. Energy & Fuels 2002(16):222-260
45. Kostas Tsigaridis.al.(2007). Secondary organic aerosol importance in the future atmosphere. Atmospheric Environment(41) 4682-4692
46. Michael J. Kleeman.(2007). Source apportionment of secondary organic aerosol during a severe photochemical smog episode
47. Michael Lewandowski.(2007). Primary and Secondary Contributions to Ambient PM in the Midwestern United States
48. Tadeusz E. Kleindienst.al.(2007). Estimates of the contributions of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to secondary organic aerosol at a southeastern US location 「Atmospheric Environment」 41(2007):8288-8300

