

인천국제공항의 안개 특성에 따른 안개 안정 지수 FSI(Fog Stability Index) 개발 및 검증

송윤영 · 염성수*

연세대학교 대기과학과

(접수: 2013년 8월 6일, 수정: 2013년 10월 1일, 게재확정일: 2013년 10월 30일)

Development and Verification of the Fog Stability Index for Incheon International Airport based on the Measured Fog Characteristics

Yunyoung Song and Seong Soo Yum*

Department of Atmospheric Sciences, College of Sciences, Yonsei University

Abstract The original Fog Stability Index (FSI) is formulated as $FSI = 2(T - T_d) + 2(T - T_{850}) + WS_{850}$, where $T - T_d$ is dew point deficit (temperature-dew point temperature), $T - T_{850}$ is atmospheric stability measure (temperature-temperature at 850 hPa altitude) and WS_{850} is wind speed at 850 hPa altitude. As a way to improve fog prediction at Incheon International Airport (IIA), we develop the modified FSI for IIA, using the meteorological data at IIA for two years from June 2011 to May 2013, the first one year for development and the second one year for validation. The relative contribution of the three parameters of the modified FSI is 9: 1: 0, indicating that WS_{850} is found to be a non-contributing factor for fog formation at IIA. The critical success index (CSI) of the modified FSI is 0.68. Further development is made to consider the fact that fogs at IIA are highly influenced by advection of moisture from the Yellow Sea. One added parameter after statistical evaluation of the several candidate parameters is the dew point deficit at a buoy over the Yellow Sea. The relative contribution of the four parameters (including the new one) of the newly developed FSI is 10: 2: 0.5: 6.4. The CSI of the new FSI is 0.50. Since the developmental period of one year is too short, the FSI should be refined more as the data are accumulated more.

Key words: Statistical fog prediction, Incheon International Airport, FSI (Fog Stability Index)

1. 서 론

안개는 작은 물방울과 얼음입자가 대기 중에 떠 있어서 수평시정 1 km 미만인 경우를 의미한다. 안개는 대기경계층에서 일어나는 현상으로 지표와 해수면의 상태에 강하게 영향을 받고 종관 규모의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 안개 생성의 원인을 명확히 규명하기가 어렵다(Gultepe *et al.*, 2007).

안개의 발생과 소멸은 지역적 특성이 크게 반영되는데 우리나라는 삼면이 바다로 이루어져 바다의 영

향을 무시할 수 없다. 해안선의 위치에 따라서 서해, 동해, 남해는 서로 다른 기상학적 특성을 보이고 있으며 서해 해역은 수심이 얕고 섬이 많을 뿐만 아니라 해안선이 복잡하여 조석 간만의 차가 커서 기상 변화가 심하고, 안개 발생이 잦다(Cho *et al.*, 2000; Heo *et al.*, 2004). 또한 해무는 복사무와 달리 일출 후에도 쉽게 소산되지 않고, 지속시간이 길기 때문에 바람에 의해 이동하여 연안 지역까지 빈번하게 영향을 주게 된다(NIMR, 1986).

해양사고의 주된 기상요인으로 해무가 큰 비중을 차지하고 있으며(Kim *et al.*, 2011) 중위도 지역의 연안에 위치한 공항은 매년 안개로 인한 항공기의 결항과 회항으로 막대한 피해를 겪고 있는 실정이다. 항공진흥협회(2002)는 안개가 항공기 지연의 가장 큰 기

*Corresponding Author: Seong Soo Yum, Department of Atmospheric Sciences, College of Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea.
Phone : +82-2-2123-5681, Fax : +82-2-365-5163
E-mail : ssyum@yonsei.ac.kr

상요인임을 지적한 바 있다. 서해 연안에 위치한 인천국제공항은 서해상에서 발생한 해무가 이동하여 시정을 악화시켜 항공 운항을 방해하는데, 2001에서 2005년 사이에 안개로 인한 항공기 작업 지연이 837건, 비행 취소가 138건으로 금전적 손실과 더불어 안전한 항공 운항을 위협받고 있다(Mason, 1982; Kim *et al.*, 2000; Leem *et al.*, 2005).

안개로 인한 피해를 줄이기 위해서 안개 예측을 위한 수치모의 방법과 통계적 방법을 이용한 다양한 연구가 시도되고 있다. Van der Velde *et al.*(2010)은 WRF와 HIRLAM(the High-Resolution Limited-Area Model)을 이용한 안개 예보 결과를 비교하면서 모델이 정확하게 안개를 모사하지 못함을 지적하고 물리 과정에 대한 연구의 필요성을 강조한 바 있다. 수치모형의 발달에도 불구하고 아직까지 모델 내에서 안개 발생과 소멸, 성장을 나타내기가 어렵고, 난류에 대한 명확한 답을 제공하지 못하고 있으며(Gultepe *et al.*, 2007), 모델 해상도의 한계는 국지적 특성을 고려해야 하는 안개 예측의 가장 큰 장애 요소로 지적되고 있다.

전통적으로 기상학에서는 예보를 위해서 통계적 접근 방법이 사용되고 있다. Sujitjorn *et al.*(1994)과 Murtha(1995)은 안개 예측에 있어서 통계적 방법의 적합성을 언급하였고, Marzban *et al.*(2007)과 Petty *et al.*(2000)는 회귀분석을 사용한 시정(visibility) 예측의 우수성을 보인 바 있다.

의사결정나무(Decision Trees)는 확인하고자 하는 변수를 다양한 경우에 따라 나무 구조로 분류하여 예측하는 기법으로 널리 알려진 예보 도구이다. Wantuch(2001)은 의사결정나무를 이용하여 시정과 안개 예측을 시도한 바 있다. 엄기철과 김남원(2002)은 로지스틱 회귀분석(Logistic regression analysis)을 이용하여 강원지역의 안개 예측모형을 개발하여 높은 적중률을 보인 바 있으며, 최재훈과 이상훈(2003)은 의사결정나무와 회귀분석을 이용하여 수원지역의 안개 예보 요소를 분석하고 예측 모형식을 만들어 우수성을 검증하였다. 그 밖에도 칼만 필터(Kalman-filter)(Kilpinen and Juha, 1992), 신경망(neural network)(Pasini *et al.*, 1999)과 같은 다양한 방법이 확률 예보로 사용되고 있다.

Holtslag *et al.*(2010)은 1970년대 미 공군에서 개발된 안개 예보 경험식인 FSI(Fog Stability Index)를 이용하여 네덜란드의 12개 지역에서 모델의 결과보다도 높은 안개 예측 정확도를 보여주었다. 이 식은 4가지 변수만이 요구되는 간단한 식이지만 안개 생성의 중요한 인자를 포함하고 있고, 지역의 특수한 조건을 고려하여 최적화될 때 합리적인 식으로 사용될 수 있다고 하였다.

본 연구에서는 FSI와 회귀분석을 이용하여 인천국제공항의 지역적 특수성을 고려한 안개 예보식으로 최적화하고, 이를 검증하고자 한다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 자료

2011년 6월부터 2013년 5월까지 인천국제공항에서 기온, 노점온도, 풍향, 풍속, 시정의 관련 기상자료를 사용하였다. 자료는 두 부분으로 나뉘는데, 2011년 6월부터 2012년 5월까지의 자료는 예보식을 만드는 데 사용하고, 2012년 6월부터 2013년 5월까지의 자료는 예보식을 검증하는 데 사용되었다. 예보식 구성에 필요한 850 hPa의 자료는 현업 운영중인 UM(Unified Model)의 재분석장 값을 이용하였고, UM 자료가 생산되는 시간에 맞춰 모든 자료는 하루 4번 6시간 간격으로 수집하여 사용하였다(0000, 0600, 1200, 1800 UTC). 비교를 위해 수원과 광주에서도 같은 분석을 하였고, 두 지역의 850 hPa의 온도와 풍속은 오산, 광주의 라디오존데 자료가 있으므로 이를 직접 이용하였다.

선행 연구에 따르면 인천국제공항은 서해상에서 발생한 해무의 이류로 인한 안개 발생이 잦다(NIMR, 2000, 2001, 2002; Leem *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2009). 서해의 기상요소를 사용하기 위해 인천국제공항에 근접한 덕적도 부이에서의 온도, 습도, 해수면 온도 등 관련 기상자료도 사용하였다.

2.2 연구방법

본 연구에서 사용된 FSI(Fog Stability Index)는 1970년대 후반 미 공군에서 개발한 경험식이다(Reymann *et al.*, 1998). FSI는 4개의 변수로 이루어진 식으로 지상의 온도, 노점온도와 850 hPa의 온도와 풍속 정보를 포함하고 있다. FSI는 원래 복사무 생성 확률을 확인하기 위한 식으로 구성되었다. FSI는 식 (1)과 같다.

$$FSI = 2(T - T_d) + 2(T - T_{850}) + WS_{850} \quad (1)$$

여기서 T 와 T_d 는 지상의 온도와 노점온도(°C)이고 T_{850} , WS_{850} 은 850 hPa 고도의 온도와 풍속(knot)이다. 식에서 $(T - T_d)$ 는 습수를, $(T - T_{850})$ 은 대기안정도, WS_{850} 은 지표 근처 대기 난류를 나타내는 항으로 대기의 습도가 높고, 안정하며 풍속이 약할수록 안개 형성에 좋은 조건이 된다. 즉 세 항이 모두 작을수록 안개 형성에 유리하다. FSI의 임계값(threshold)으로 안개의 생성 확률을 확인할 수 있는데 Reymann *et al.*(1998)은 $FSI < 31$ 이면 안개 생성 가능성이 높고, $31 < FSI < 55$ 이면 보통, $FSI > 55$ 이면 낮음으로 판정하였다.

FSI를 검증하기 위해 숙련도(Skill Score)를 평가하였다. 관측된 안개는 기상 현상코드(40)로 확인하고, FSI 임계값이 31 미만일 때를 안개로 예보한다. Table 1에 보인 바와 같이 FSI가 31 미만이고, 안개가 관측되면 A, FSI가 31 이상이면 안개가 관측되지 않으면 B, FSI가 31

Table 1. Contingency table.

		Observations	
		YES	NO
Forecasts	YES	A	B
	NO	C	D

이상이면서 안개가 관측되지 않으면 D로 정의하고, FSI의 정확성 판단을 위해 Critical Success Index(CSI), Hit Rate(HR), False Alarm Ratio(FAR)을 계산하는데 수학적 표현은 (2), (3), (4)와 같다. CSI는 안개 예보의 정확도를 나타내며 1에 가까울수록 예보의 정확도가 높다. HR은 안개 예보 적중률을, FAR은 안개 예측 오보율을 의미한다.

$$CSI = A / (A + B + C) \tag{2}$$

$$HR = A / (A + C) \tag{3}$$

$$FAR = B / (A + B) \tag{4}$$

FSI를 최적화하기 위해서 임계값(threshold)을 기준으로 숙련도를 향상시키는 각 항의 계수를 찾고, 다시 임계값을 조정하면서 이와 같은 작업을 반복하였다.

FSI는 복사무 형성에 맞게 설계되었으므로 인천국제공항의 안개 특성을 고려한 식으로 최적화하기 위해 회귀분석으로 안개 발생 인자를 선별하였다.

선형 회귀모형(Linear Regression Model)은 변수 사이에 상관관계가 있을 때 임의의 변수로 다른 변수를 예측하기 위한 것이다. 이때 독립변수가 둘 이상이면 다중 선형 회귀모형(Multiple Linear Regression Model)이라 하고, 다음의 일반식으로 나타난다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon,$$

여기서 $x_1 \dots x_p$ 는 독립변수(independent variable)로써 예측자(predictor)라고 표현하기도 하고, y 는 종속변수(dependent variable)로써 피예측자(predictand)로도 나타낸다. 또한 여기서 $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_p$ 는 회귀계수이고, ϵ 는 오차항이다. 추정된 회귀모형에서는 피예측자를 잘 설명하는 범위 내에서 가능한 한 적은 수의 예측자들을 추려내야 하는데 이를 위해서 전진선택법(Forward Selection)과 후진제거법(Backward Elimination)을 사용하였다(Seo *et al.*, 2009).

안개 예보를 위한 통계모델에서는 어떤 요소가 예측자, 피예측자 인지를 결정하는 것은 중요하다. 시정은 안개 유무 판정을 위해 가장 널리 사용되는 피예측자이므로(Gultepe *et al.*, 2007) 본 연구에서는 인천국제공항의 시정을 피예측자로 두고, 이것과 가장 상관성이 높은 예측자들을 선별하였다.

3. 결 과

3.1 인천국제공항의 안개 특성

3.1.1 안개 발생일

예보식을 개발하기 위한 기간인 2011년 6월부터 2012년 5월까지의 1년간 월별 안개 발생일 분포는 Fig. 1과 같다. 이 기간 동안 보고된 인천국제공항의 안개 일수는 47일이었고, 2011년 6월에 가장 많은 안개가 발생하였으며 2011년 9월과 2012년 1월, 2월에는 안개가 발생하지 않았다. 수원과 광주를 비교할 때 인천국제공항의 안개 일수는 많았으며 주로 봄과 여름에 집중적으로 나타난 것을 확인할 수 있다. Figure 1에서 함께 나타난 2002년부터 2012년까지 11년간의 인천국제공항의 월별 평균 안개 발생 빈도와 비교해 보면 6월에 안개 발생 빈도가 가장 높았던 본 연구 기간과 달리 11년 평균은 7월에 가장 높은 빈도를 기록했으나 대체로 경향은 비슷하다고 할 수 있다.

선행연구에 따르면 인천국제공항의 안개 발생은 주로 늦봄과 여름에 집중되며(Leem *et al.*, 2005) 서해상에서 발생한 해무의 이류때문에 나타난다고 하였다(NIMR, 2000, 2001, 2002; Won *et al.*, 2000). 또한 Kim and Yum(2010)은 덱적도 부이의 습도(RH)를 기준으로 인천국제공항의 안개를 분류한 결과 복사무의 성질을 가진 연안무는 겨울에, 해무는 주로 봄과 여름에 나타난다고 하였고, 덱적도 부이에서의 해기차를 이용하여 온해무와 냉해무로 분류하고 각각 안개 발생의 특성을 구분지었다. 2002년부터 2006년까지 약 4년간 인천국제공항의 안개 특성을 분석한 Kim and Yum(2010)의 연구 결과를 바탕으로 예보식 개발 기간 동안(2011.6~2012.5) 안개 발생의 기상요소별 특성을 비교, 대조하였다.

개발에 사용된 전체 1198개(4번/일 × 1년)의 사례

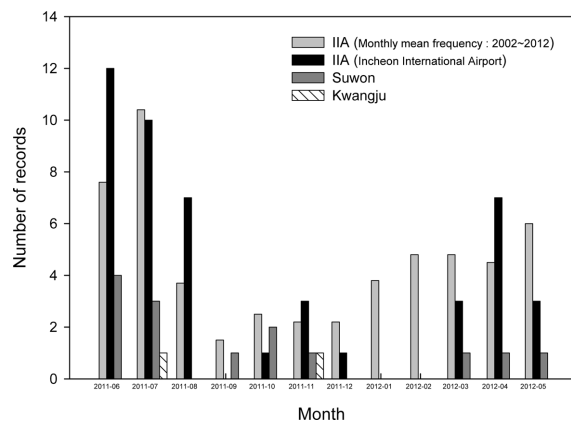


Fig. 1. Monthly frequency of foggy days at IIA, Suwon and Kwangju during the developmental period (2011.6~2012.5).

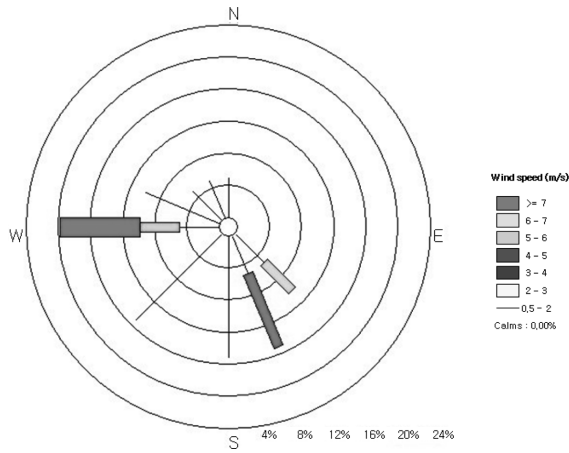


Fig. 2. Wind rose plot for foggy days during the developmental period (2011.6~2012.5).

(case) 중에서 덕적도 부이에서의 결측값을 제외하고 안개 사례는 20번이었다. Kim and Yum(2010)에 따라 안개를 분류하면 연안무는 7번, 해무는 13번의 사례가 있었으며 연안무보다 해무가 더 많이 나타났다. 겨울에 주로 발생하는 연안무는 본 연구 기간 동안 6월에 집중적으로 나타나 Kim and Yum(2010)과는 다른 결과를 보인다. 연구 기간이 짧고 안개 사례가 적어 각각의 안개 사례를 분류하고 비교하기에는 무리가 있다고 판단되어 해무 발생의 특성에 초점을 두고 기상요소를 확인하였다.

3.1.2 안개 발생 시의 기상요소 분석

Kim and Yum(2010)은 인천국제공항에서 해무가 발생할 때 남풍, 남서풍이 우세하고 풍속은 평균보다 강하게 나타난다고 하였고, 원덕진 등(2000)은 여름에 남풍계열의 바람이 남쪽 바다 위의 따뜻하고 습한 공기를 유입시켜 서해상의 안개를 형성한다고 하였다. 본 연구 기간 동안은 안개 발생시 서풍이 가장 우세했고 남풍, 남서풍, 남남동풍이 뒤를 이었으며 풍속은 7 ms^{-1} 이상으로 강한 바람의 영향이 있었다(Fig. 2).

안개가 발생할 때 인천국제공항에서의 습수($T - T_d$)는 작아진다. 이것은 대기가 포화에 가까운 것을 의미하고, 안개가 발생한 하절기의 습수가 뚜렷하게 작아지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3). Kim and Yum(2010)은 저녁에 공기의 복사 냉각으로 RH가 상승하여 연안무가 발생하고, 이때 덕적도 부이에서의 습수는 크다고 하였는데 실제 연안무가 발생했던 6월과 11월에 덕적도 부이의 습수가 높게 나타난다. Kim and Yum(2010)은 인천국제공항의 해무를 두 가지로 분류하였다. 습한 공기의 냉각 또는 찬 해수면과의 접촉에 의한 복사냉각으로 해무가 형성된 경우 냉해무라

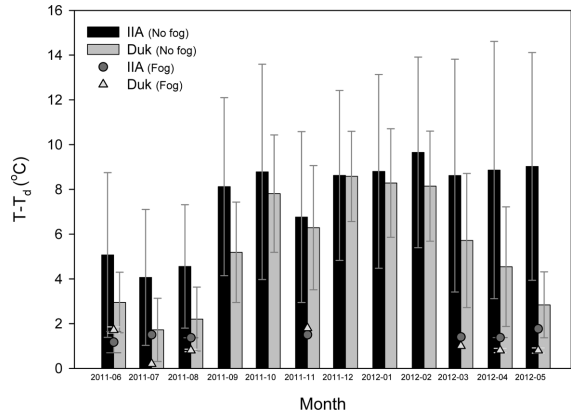


Fig. 3. Same as Fig. 1 except dew point deficit on foggy days and no foggy days at IIA and Dukjeok Island.

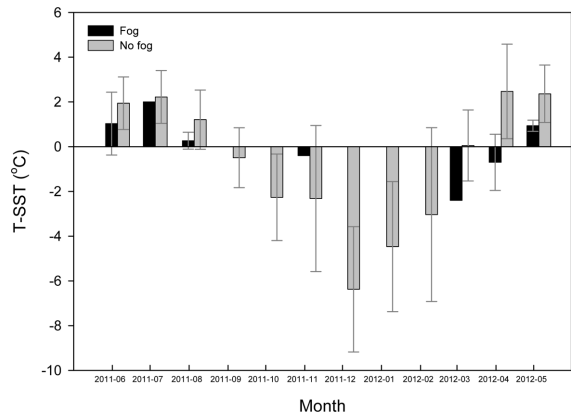


Fig. 4. Same as Fig. 1 except “T-SST” on foggy days and no foggy days at Dukjeok Island.

하였고 이때 해기차는 양의 값이고, 음의 해기차를 가져 따뜻한 해수면으로부터 수분이 공급되어 형성되는 해무는 온해무라 명명하였다. 연구 기간 동안 늦봄과 여름철에 주로 냉해무가 나타났고 11월, 3월, 4월은 온해무가 나타났음을 알 수 있다(Fig. 4).

인천국제공항의 안개 예측을 위해서 Kim and Yum(2010)은 안개 유형에 따라 안개 발생 특성을 분리하여 예측해야 함을 제시하였으나 본 연구에서는 연구 기간이 짧고 안개 사례가 적어 안개 유형에 따른 예보식을 따로 분류하지는 않았다.

3.2 안개 안정 지수(Fog Stability Index, FSI) 개발

3.2.1 기존 FSI 적용

인천국제공항에서 수집된 관련 기상자료를 바탕으로 하루 4번(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) FSI를 계산하고 안개 발생 여부를 살펴보았다. 예보식의 개발

Table 2. Monthly mean and standard deviation of FSI at IIA for foggy days and no foggy days.

	2011							2012				
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
Foggy days	32.3	32.8	32.3	32.4	33.5	35.8	43.5	48.0	35.2	35.7	32.3	31.3
Std	14.6	10.8	12.7	6.4	10.3	11.5	9.5	9.3	13.7	11.8	20.1	9.5
No foggy days	38.5	43.5	41.9	47.9	50.4	50.2	54.3	51.0	54.3	54.4	56.4	47.4
Std	13.6	11.8	12.9	14.4	16.1	16.0	16.1	16.5	15.9	16.7	19.7	16.8

기간(2011.6~2012.5) 동안 안개 사례는 31번으로 그 수가 적어 안개와 박무를 모두 고려한 455개의 사례를 안개로 간주하여 확인하였다. 안개 발생일의 FSI 평균 값은 35.4였고, 비발생일의 평균 FSI 값은 49.2로 안개 유, 무에 따른 FSI 값은 분명한 차이를 보이며 t-test 결과 귀무가설 “안개발생일과 비발생일의 FSI는 같다”가 5% 유의수준 하에서 기각되었다. 원래 FSI의 임계값이 31 미만인 경우만 안개 발생으로 간주하므로 실제 안개 발생시 인천국제공항의 FSI는 이보다 높게 나타난 것을 알 수 있다. 안개 발생일 FSI의 표준편차를 확인해보면, 4월에 가장 많은 편차를 보이고, 9월에 그 차가 작다(Table 2). 안개가 집중되는 봄과 여름철을 살펴보면 4월부터 7월까지 안개 발생일의 FSI 평균 값은 32.2로 나머지 달의 평균(37.0)에 비하여 낮은 것으로 나타난다. 비발생일의 경우 4월부터 7월까지의 FSI 평균은 46.4이고, 나머지 달들은 50.6으로 역시 큰 차이를 보인다.

앞서 언급하였듯이 FSI는 복사무에 맞게 설계된 식이므로 내륙지역의 수원과 광주의 FSI를 계산하여 인천국제공항과 비교하였다. Figure 5에서 수원과 광주의 안개 발생일 평균 FSI 값은 각각 31.7과 30.8이고, 비발생일은 각각 48.6, 47.4이다. FSI 결과로만 볼 때 인천국제공항보다 이 두 지역에서 FSI = 31을 기준으로 하는 안개 예보가 적중률이 높은 것을 예상할 수 있다. 그러나 인천국제공항, 수원, 광주의 CSI는 각각 0.37, 0.31, 0.26으로 나타나 오히려 예보의 정확도는 인천국제공항이 다른 두 지역보다 높게 나타난다. 이는 CSI의 계산이 안개가 없을 때를 맞추는 경우를 제외하기 때문이다. 실제 수원과 광주에서 안개 발생일의 평균 FSI 값이 임계값 31에 가까워도 상대적으로 FSI가 안개 없음을 맞춘 경우(Table 1의 D)가 훨씬 많았으므로 CSI는 낮았다. 사실상 FSI는 우리나라의 세 지역에 대해 정확하게 안개를 예측한다고는 볼 수 없다.

변희룡 등(1997)은 안개 발생이 기후 인자의 영향을 강하게 받기 때문에 지역마다 발생 특성을 따로 구분지어야 함을 지적하였고, Holtslag *et al.*(2010)은 지역적 특성을 반영하여 식이 수정되어야 함을 언급하였으며, 식을 개발한 미 공군 기상단에서도 FSI 임계값은 조정될 수 있다고 하였다(Reymann *et al.*, 1998).

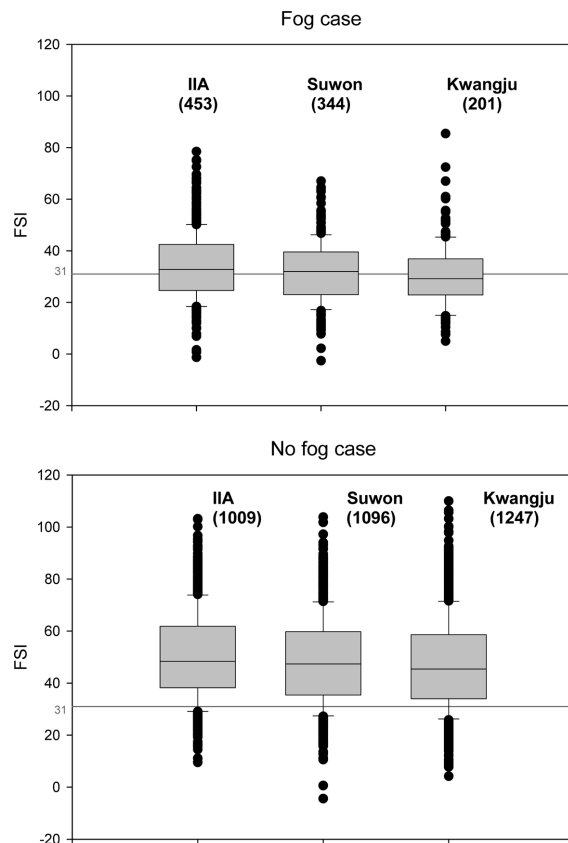


Fig. 5. Schematic plot of FSI for fog and no fog cases at IIA, Suwon and Kwangju during the developmental period (2011.6~2012.5). The number in parentheses indicate the number of cases.

따라서 인천국제공항의 안개 발생 특성에 맞도록 기존의 FSI를 수정하여 최적화해야 현실적인 예보식으로 활용될 수 있다.

3.2.2 FSI 수정(Modified FSI)

인천국제공항의 FSI 개발을 위해서 Holtslag *et al.* (2010)과 같은 방법으로 FSI를 수정하였다. 먼저 FSI 임계값의 변화에 따라 숙련도가 어떻게 달라지는지

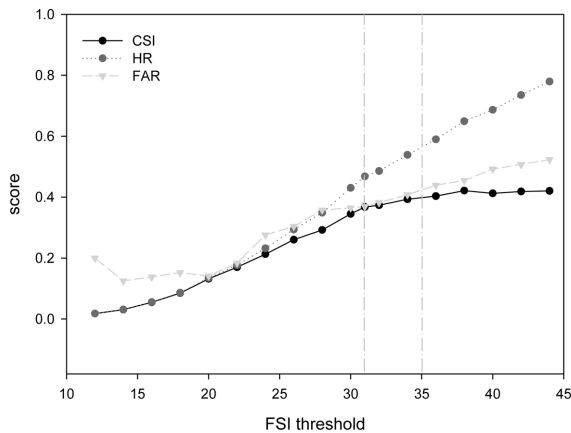


Fig. 6. Skill scores of the original FSI as a function of FSI threshold value.

분석하였다. Figure 6에서 FSI 임계값이 커질수록 숙련도는 모두 증가하는 것을 볼 수 있는데 CSI와 HR이 높고, FAR이 낮은 최적의 임계값은 35로 추정할 수 있다. 이때 CSI, HR, FAR는 각각 0.40, 0.57, 0.42였다. 다음으로 FSI를 구성하는 세 항 계수의 최적값을 찾기 위하여 각 항의 계수를 0부터 100까지 1간격으로 변화시키면서 FSI 임계값 35를 기준으로 CSI를 가장 높게 만드는 계수값을 찾았는데 $(T - T_d)$ 의 항이 9, $(T - T_{850})$ 는 -1, WS_{850} 는 0으로 나타났다. 찾은 세 계수로 다시 임계값의 변화에 따른 숙련도를 확인하였다. Figure 7에서 임계값이 증가함에 따라서 HR, FAR이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, CSI가 증가하다가 일정해지는 값인 39를 임계값으로 선택하였다. 그 때의 CSI, HR, FAR은 각각 0.68, 0.89, 0.26이었다. 임계값 39를 기준으로 동일한 방법을 이용하여 세

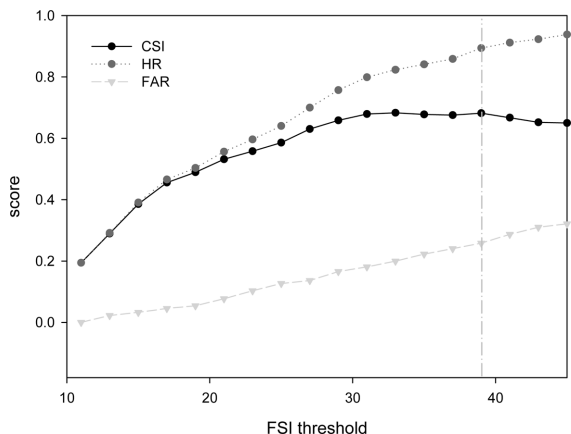


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for the modified FSI.

항의 계수를 찾으면 이전과 같은 계수가 확인되므로 식 (5)을 Modified FSI로 확정지었다.

$$\text{Modified FSI} = 9(T - T_d) - 1(T - T_{850}) + 0(WS_{850}) \quad (5)$$

기존의 FSI(식 (1))와 비교할 때 Modified FSI는 임계값이 31에서 39로 증가할 때 안개를 잘 예측하는 것으로 나타나고, 두 식에서 $(T - T_d)$ 의 습수항과 대기의 안정도를 나타내는 $(T - T_{850})$ 항의 영향이 달라지는 것을 알 수 있다. 또한 Modified FSI의 풍속항 (WS_{850})은 계수가 0으로 사실상 FSI 식에서 안개 발생에 중요한 의미를 주지 못하는 인자로 확인된다.

인천국제공항과 수원, 광주 세 지역에 Modified FSI를 적용하여 숙련도를 계산한 결과 인천국제공항의 CSI가 0.68, 수원은 0.45, 광주는 0.27로 나타나 기존 FSI에 비해 Modified FSI의 CSI가 증가하는데, 이는 세 지역에서 Modified FSI가 기존의 FSI 보다 안개를 더 잘 예측한다는 것을 말해주며 특히 다른 지역과 비교할 때 인천국제공항에서의 CSI가 가장 크게 향상된다. 이는 인천국제공항의 안개 발생 상황에 맞게 식이 수정되었기 때문으로 추측된다. FSI를 지역의 특성에 맞게 보완했을 때 그 지역에 해당되는 안개를 가장 잘 설명할 수 있음을 알 수 있다.

3.2.3 새로운 FSI(New FSI) 개발

앞서 언급하였듯이 인천국제공항 안개 발생의 원인이 서해상의 기상조건에 따라 크게 좌우되므로 FSI의 안개 예보 정확도를 높이기 위해서는 실질적인 안개 발생 요소들로 구성된 식으로 개발되어야 한다.

인천국제공항의 지형적인 특성 때문에 서해상에서 발생하는 해무의 이동이 큰 영향을 미친다(Kim and Yum, 2010). 해무로 인한 안개 발생 인자로 서해상에 위치한 덕적도 부이에서의 기상자료를 이용하였다. 인천국제공항에서 기존 FSI 구성에 사용된 $(T - T_d)$, $(T - T_{850})$, (WS_{850}) 는 물론 안개 발생에 영향을 줄 것으로 예상되는 풍향(WD)을 추가하고, 덕적도 부이에서의 습수($T - T_d$)(duk), 해기차($T - SST$)(duk), $(T_d - SST)$ (duk) 풍향(WD)(duk)과 더불어 두 지점의 기상요소를 결합한 인천국제공항에서의 지상 온도, 노점온도와 덕적도의 해수면 온도 차인 $(T - SST_{duk})$ 와 $(T_d - SST_{duk})$ 까지 총 10개 변수를 안개 발생의 잠재인자로 택하였다. 10개의 변수 중에서 인천의 시정을 약화시키는 가장 중요한 기상인자들을 선택하기 위해 다중 선형 회귀 분석을 이용하였고 시정을 피예측자로 두고 가장 상관성이 높은 예측자들을 찾아냈다. 시정을 결정하는 변수를 선택하기 위해서 먼저 전진선택법(Forward Selection Method)을 이용하였다. 이 방법은 다수의 잠재적인 예측자 중에서 피예측자를 가장 잘 설명할 수 있는 예측자를 순서대로 찾아내는 방법으로서 결정계

수(R^2)를 기준으로 선택한 4개의 예측자는 순서대로 $(T - T_d)$, $(T - T_d)(duk)$, $(T - T_{850})$, WS_{850} 이다. 기존 FSI의 세 항에 추가로 덕적도에서의 습수항이 시정과 상관성이 높은 변수로 나타난다. 전진선택법으로 선택한 변수의 적합성을 확인하기 위하여 후진제거법(Backward Elimination Method)을 적용해 보았다. 후진제거법은 기여도가 낮은 예측자를 제거시켜 나가는 절차로 첫 단계에서 모든 후보 예측자들 중 기여도가 가장 낮은 예측자 하나를 찾아 제거하고 남은 예측자들 중에서 다시 기여도에 따라 차례로 제거하는 방법이다. 마지막으로 남은 예측자들은 WS_{850} , $(T - T_{850})$, $(T - T_d)(duk)$, $(T - T_d)$ 순서를 보인다. 따라서 후진제거법과 전진선택법으로 확인된 예측자는 동일하다. 기존 FSI에서 나타난 세 개의 변수와 추가적으로 덕적도 습수항이 인천국제공항 시정과 가장 상관성이 높은 인자로 나타나고, 시정과 상관성이 높은 인자의 중요도는 $(T - T_d)$, $(T - T_d)(duk)$, $(T - T_{850})$, WS_{850} 순이다. 확인된 4개의 변수로 New FSI를 구성하면 다음과 같다.

$$\text{New FSI} = a(T - T_d) + b(T - T_{850}) + c(WS_{850}) + d(T - T_d)(duk) \quad (6)$$

모든 변수들의 계수를 찾기 위해서 a부터 d까지 각각의 계수에 -10부터 10까지 0.1 간격으로 대입하고 FSI 임계값 31을 기준으로 CSI와 HR을 높이고 FAR을 낮추는 계수를 찾았으며 이를 대입한 FSI은 식 (7)과 같다.

$$\text{New FSI} = 10(T - T_d) + 2(T - T_{850}) + 0.5(WS_{850}) + 6.4(T - T_d)(duk) \quad (7)$$

찾은 계수로 새로운 식을 구성한 뒤 Modified FSI와 동일한 방법으로 임계값을 바꾸면서 숙련도를 계산하였다. 단, 여기서 Modified FSI와 다른 점은 실제

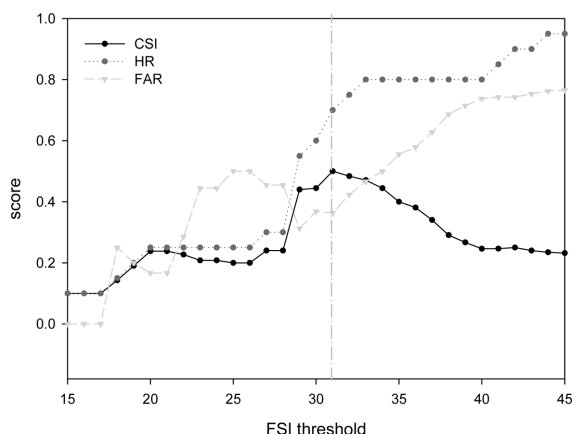


Fig. 8. Same as Fig. 6 except for the New FSI.

인천국제공항의 최저 착륙시정은 200 m(KCADA, 2002)로 안개 기준 시정(1000 m)보다 낮으므로 숙련도를 평가할 때는 박무로 판정된 경우는 제외하였다. Figure 8을 보면 임계값이 31일 때 CSI가 0.50으로 가장 높고, HR은 0.70, FAR은 0.36이므로 최적의 임계값으로 31을 선택하였고 계수를 찾기 위해 사용된 임계값이 31이었으므로 더 이상의 계수 수정 없이 (7)식을 최종식으로 확정지었다.

새로 구성된 New FSI에서 모든 변수의 평균 값이 비슷하므로 계수가 큰 것이 안개 발생에 중요한 인자임을 알 수 있다. 연구 기간 동안의 안개 발생은 인천국제공항에서의 습수와 덕적도 부이에서의 습수가 가장 큰 원인이 된다는 것을 보여준다. Modified FSI에서는 850 hPa의 풍속이 안개 발생에 정보를 주지 않는 변수로 나타났으나, New FSI에서는 예보를 결정하는데 영향을 주는 인자로 나타난다.

3.3 안개 안정 지수(FSI) 검증

3.3.1 Modified FSI

Modified FSI를 예보식으로 사용하기 위해서는 검증 과정이 필요하다. 검증은 FSI 식을 개발한 기간(2011.06~2012.05)이 아닌 다른 기간에 이 식을 적용하였을 때의 숙련도를 살펴보는 방법을 이용하여 이루어질 수 있다. 2012년 6월부터 2013년 5월까지의 1년 기간 동안에 대해 적용해 보았는데 이 기간 동안의 안개 발생 횟수는 23번, 박무를 합친 횟수는 모두 382번 이었다(Table 3).

Modified FSI는 안개와 박무를 모두 고려한 식으로 구성되었으므로 검증시에도 안개와 박무를 모두 고려하였다. 숙련도는 Table 4와 같다. 개발 기간 동안의

Table 3. Number of fog and mist cases for the developmental and validation periods.

Periods	2011.06~2012.05	2012.06~2013.05
Fog	31	23
Fog & Mist	455	382

Table 4. Validation skill scores of modified and new FSI at IIA.

		Development periods	Verification periods
Modified FSI	CSI	0.68	0.52
	HR	0.89	0.93
	FAR	0.26	0.45
New FSI	CSI	0.50	0.24
	HR	0.70	0.38
	FAR	0.36	0.62

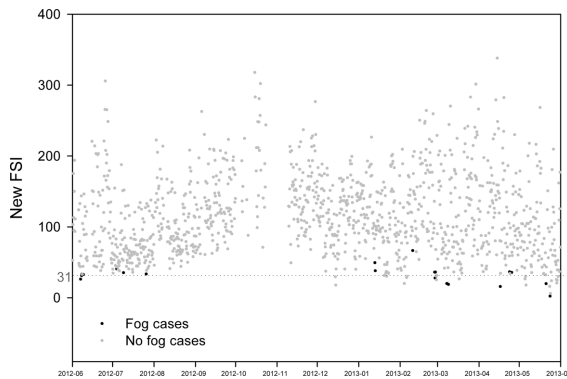


Fig. 9. New FSI values of the fog and no fog cases during the entire validation period (2012.6~2013.5).

CSI가 0.68인데 반해 검증시에 0.52로 낮아지고, HR은 오히려 0.89에서 0.93으로 상승하여 예보 적중률이 유지됨을 확인할 수 있다.

3.3.2 New FSI

New FSI의 경우 박무를 제외한 안개를 가지고 식을 구성하였으므로 안개만으로 식을 검증하였다. 예보식의 개발 기간 동안 CSI는 0.50이지만 검증시에 0.24로 낮고, HR은 0.70에서 0.38으로 FAR은 0.36에서 0.62로 전반적으로 정확도는 낮게 나타난다(Table 4). 검증기간의 안개는 덕적도 부이에서의 기상 인자 결측값으로 인해 원래 안개 발생 횟수보다 적은 20번의 사례가 적용되었고, 1462개의 전체 검증 데이터 중에서 1197개만이 이용되었다. 전체 사용된 데이터와 비교할 때 안개 사례는 너무 적다.

검증기간 전체 사례에 대한 New FSI 값은 Fig. 9와 같다. 검증기간 동안 전체 안개 발생일의 평균 New FSI 값은 31.30로 임계값 31과 거의 같고, 비발생일은 116.80으로 안개 유, 무에 따른 평균은 큰 차이를 보인다. 그러나 비발생일에도 31보다 작은 값을 보이는 사례가 많았으므로 New FSI의 안개 예측의 정확도는 낮게 나타난다. 그러나 Fig. 9에서 안개 사례가 주로 31 근처에 분포된 것으로 보아 더 많은 사례를 적용하여 임계값을 조정하면 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

3.4 안개 안정 지수(FSI) 개선

1년의 기간으로 구성된 식을 인천국제공항의 안개 예보식으로 대표하기에는 무리가 있다. 더 많은 데이터를 사용하여 최적화된 식으로 구성되어야 현실적인 예보식으로써 사용될 수 있을 것이다.

FSI를 구성하는 850 hPa의 기상자료는 UM 모형의 자료를 사용하는데 UM이 안정화되기 이전의 5월까

지는 자료가 없는 현실이다. 예보식 검증을 위해 사용한 2011년 6월부터 2013년 5월까지의 자료를 포함한 총 2년의 기간을 예보식 개발에 사용해 구한 New FSI는 식 (8)와 같다.

$$\text{New FSI} = 11(T - T_d) + 2.6(T - T_{850}) + 7.2(T - T_d)(duk) - 2(T - SST)(duk) \quad (8)$$

임계값은 31로 이전 식과 동일하게 확인되고, 속련도의 경우 CSI는 0.36 HR은 0.78 FAR은 0.60으로 CSI는 낮게 나타나지만 적중률(HR)은 향상됨을 보여준다. 이전 New FSI와 비교할 때 850 hPa의 풍속은 제외되고, 덕적도 부이에서의 해기차가 추가된다. 이는 서해상에서 대기과 해수면의 해상 조건이 인천국제공항의 안개 발생에 중요한 인자임을 보여주는 결과라 할 수 있다.

4. 결 론

인천국제공항의 안개를 예측하기 위해서 안개 특성에 따른 기상요소들을 분석하였다. 1년 동안 안개 일수는 47일로 6월에 가장 많은 안개가 발생했고 뒤를 이어 7, 8, 4월에 안개가 많이 나타나 하절기에 안개가 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 안개 발생일과 비발생일의 풍향, 풍속, 기온, 노점온도, 해수면 온도, 해기차를 분석한 결과 안개 발생일에 습수가 작고, 남풍이 우세하는 등 기상학적 특성이 나타났고, 서해상의 기상조건과 상관관계가 높았다. 분석된 안개의 특징은 인천국제공항의 시정과 상관성이 높은 변수들로 확인되었으며 예보식을 구성할 때 해무 인자로서 다시 한 번 확인되었다.

FSI는 안개 예측을 위한 경험식으로 간단하고 쉽게 안개를 예측하는 유용한 도구이다. FSI를 인천국제공항에 최적화하기 위해서 기존의 FSI를 수정하여 Modified FSI 구성하였고, 안개 특성을 고려하여 서해상 해무의 이류 인자가 포함된 New FSI를 개발하였다. 인천국제공항에 최적화된 Modified FSI(식 (5))의 850 hPa 풍속은 안개 예보에 정보를 주지 않는 요소로 확인되었고, 예보식의 정확도를 판별하는 CSI는 기존 FSI 보다 향상되었다.

인천국제공항의 시정과 상관성이 높은 인자를 포함하여 새롭게 개발된 New FSI(식 (7))는 기존 FSI의 향과 더불어 해무 발생인자인 덕적도 부이에서의 습수가 중요한 정보를 주는 것으로 나타났으며 기존 FSI를 적용할 때 보다도 예보의 정확도가 높게 나타났다.

두 FSI 식의 구성을 분석해 보면 인천국제공항의 안개는 서해상에서 따뜻하고 습한 공기가 이류하여 차가운 해수면 위에서 냉각되어 발생한 해무와(NIMR, 2002; Kim and Yum, 2010) 인천국제공항에서의 습하

고 안정한 대기의 조건과 더해져 안개가 형성된다고 할 수 있다. 즉, 해풍에 의해 이루어진 공기는 복사 냉각에 의해 형성되는 복사안개와 더해져 복합적인 원인으로 안개가 나타난다고 할 수 있다.

두 식을 검증한 결과 Modified FSI의 CSI는 0.52, New FSI의 CSI는 0.24로 확인되어 개발 기간 보다 검증 시 정확도가 낮게 나타났다. New FSI의 경우는 검증에 사용된 전체 사례에 비해 안개 사례가 적기 때문에 숙련도를 기준으로 한 평가에 불확실성이 많다고 할 수 있는데, 이는 CSI가 좋지 않더라도 검증 기간 동안 안개 발생일의 평균 New FSI 값은 28.85로서 31 미만이었으며, 안개가 없을 때의 평균은 119.61로 New FSI의 값이 안개 발생을 보여준다고 할 수 있다.

New FSI의 예보식 개발 기간을 2년으로 확장한 결과 덕적도의 해기차가 추가로 포함되어 인천공항의 안개 발생에 영향을 주는 인자로 확인되었다. 그러나 예보식의 정확도는 이전보다 낮게 나타났다. 개발 기간을 확장했지만 전체 사용된 데이터에 비해 안개 사례가 적어 신뢰성 있는 숙련도 평가는 쉽지 않다. 따라서 더 많은 안개 사례가 포함되어야 인천국제공항의 안개 특성을 잘 반영한 예보식을 개발할 수 있을 것이다. 또한 구성된 식에서 연안무와 해무의 특성이 복합적으로 나타나므로 Kim and Yum(2010)이 제시하였듯이 안개의 종류에 따라 예보식을 따로 구성한다면 안개 예측의 정확도가 향상되어 인천국제공항의 안개 예보식으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-2012)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Byun, H.-R., D. K. Lee, and H.-W. Lee, 1997: Analysis on the Characteristics and Predictability of the Marine Fog over and near the East Sea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **33**, 41-62.
- Cho, Y. K., M. O. Kim, and B. C. Kim, 2000: Sea Fog around the Korean Peninsula. *J. Appl. Meteorol.*, **39**, 2473-2479.
- Choi, J. H., and S. H. Lee, 2003: A study on creation plan of the fog forecasting method using data mining techniques. *Database Res.*, **19**, 89-100.
- Eom, K.-C., and N.-W. Kim, 2002: Development of fog statistical forecast model for Gang-Won province. *Proceedings of Spring meeting of KMS*, **12**, 292-294.
- Gultepe, I., and Coauthors, 2007: Fog research: a review of past achievements and future perspectives. *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 1121-1159.
- Heo, K.-Y., and K.-J. Ha, 2004: Classification of synoptic pattern associated with coastal fog around the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 541-556.
- Holtzlag, M. C., G. J. Steeneveld, and A. A. M. Holtzlag, 2010: Fog forecasting: "old fashioned" semi-empirical methods from radio sounding observations versus "modern" numerical models. *5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, online available at <http://www.met.wau.nl/medewerkers/steeneveld/pubs.html>.
- Kilpinen, and Juha, 1992: The application of kalman filter in statistical interpretation of numerical weather forecasts. *12th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences*, 11-16.
- Kim, C. K., and S. S. Yum, 2010: Local meteorological and synoptic characteristics of fogs formed over Incheon International Airport in the West Coast of Korea. *Adv. in Atmos. Sci.*, **27**, 761-776.
- Kim, J., S.-N. Oh, Y. Chun, J.-C., Choi, and H.-K. Min, 2000: Fog forecast for the Kimpo International airport of Korea. *Preprints 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Amer. Meteor. Soc., Orlando FL*, 219-222.
- Kim, S.-G., and J.-P. Kang, 2011: A Study on the Relationships between the Casualties of Fishing Boats and Meteorological Factors. *J. FISHRIES MAR. SCI. EDU.*, **23**, 351-360.
- Korea Civil Aviation Development Association, 2002: Factor analysis on the aviation limitation caused by fog, 132 pp.
- Leem, H.-H., H.-W. Lee, and S.-H. Lee, 2005: The Analysis of the Characteristics of the Fog Generated at the Incheon Int'l Airport. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 1111-1123.
- Marzban, C., S. M. Leyton, and B. Colman, 2007: Ceiling and visibility forecasts via neural networks. *Wea. Forecasting*, **22**, 466-479.
- Mason, J., 1982: The physics of radiation fog. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 486-498.
- Murtha, J., 1995: Applications of fuzzy logic in operational meteorology. *Canadian Forces Weather Service*, 42-54.
- NIMR, 1986: A study on sea fog at the central part of western coastal sea, MR 86-1, 66 pp.
- _____, 2000: A study on the forecasting of sea fog around

- the Youngjong-Do (I), NIMR, MR000M03, 89 pp
- _____, 2001: A study on the forecasting of sea fog around the Youngjong-Do (II), NIMR, MR010M03, 156 pp.
- _____, 2002: Study on forecasting techniques for fog occurred in Incheon Interntational Airport, MR022M28, 72 pp.
- Pasini, A., V. Pelino, and S. Potest, 1999: A Neural Network model for visibility nowcasting from surface observations: results and sensitivity to physical input variables. *J. Geophy. Res.*, **106**, 951-959.
- Petty, K., B. Carmichael, G. Wiener, M. Petty, and M. Limber, 2000: A fuzzy logic system for the analysis and prediction of cloud ceiling and visibility. *Preprints Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, FL, Amer. Meteor. Soc.*, 331-333.
- Reymann, C. M., C. J. Piasecki, M. F. Hosein, M. S. Larabee, T. G. Williams, M. Jimenez, and D. Chapdelaine, 1998: *Meteorological Techniques*. Air Force Weather Agency, 242 pp.
- Seo, H.-S., K.-S. Yang, N.-Y. Kim, H.-Y. Kim, M.-K. Kim, 2009: *SPSS regression analysis*, Hanna-Rae Academy, 486 pp.
- Sujitjorn, S., P. Sookjaras, and W. Wainikorn, 1994: An expert system to forecast visibility in Don-Muang Air Force Base. *1994 IEEE International Conference on Humans, Information and Technology, Systems Man and Cybernetics*, **3**, 2528-2531.
- Van der Velde, I. R., G. J. Steeneveld, B. G. J. Wichers Schreur, and A. A. M. Holtslag, 2010: Modeling and forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 4237-4253.
- Wantuch, F., 2001: Visibility and fog forecasting based on decision tree method. *IDOJARS*, **105**, 29-38.
- Won, D.-J., S.-Y. Kim, K. E. Kim, K.-D. Min, 2000: Analysis of meteorological and oceanographic characteristics on the sea fog over the Yellow sea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **36**, 631-642.
- Zhang, S.-P., S.-P. Xie, Q.-Y. Liu, Y.-Q. Yang, X.-G. Wang, and Z.-P. Ren, 2009: Seasonal variations of yellow sea fog: observations and mechanisms. *J. Climate*, **22**, 6758-6772.

※ 영어로 작성되지 않은 한글 및 일본어 참고문헌은 편집진에서 영어로 번역하였습니다. 번역된 참고문헌은 다음과 같습니다.

- 1) 기상연구소, 1986: 한국 서해중부연안의 해무특성 조사. 기상연구소, MR 86-1, 66 pp.
NIMR, 1986: *A study on sea fog at the central part of western coastal sea*, MR 86-1, 66 pp.
- 2) 기상연구소, 2000: 영종도 주변해역의 해무예측연구(I). 기상연구소, MR000M03, 89 pp.
NIMR, 2000: *A study on the forecasting of sea fog around the Youngjong-Do (I)*. NIMR, MR000M03, 89 pp.
- 3) 기상연구소, 2001: 영종도 주변해역의 해무예측연구(II). 기상연구소, MR010M03, 156 pp.
NIMR, 2001: *A study on the forecasting of sea fog around the Youngjong-Do (II)*. NIMR, MR010M03, 156 pp.
- 4) 기상연구소, 2002: 인천국제공항의 안개 예측기법 연구. 기상연구소, MR022M28, 72pp.
NIMR, 2002: *Study on forecasting techniques for fog occurred in Incheon Interntational Airport*. MR022M28, 72 pp.
- 5) 서혜선, 양경숙, 김나영, 김희영, 김미경, 2009: *SPSS 회귀분석*. 한나래아카데미, 486 pp.
Seo, H.-S., K.-S. Yang, N.-Y. Kim, H.-Y. Kim, M.-K. Kim, 2009: *SPSS regression analysis*. Hanna-Rae Academy, 486 pp.
- 6) 항공진흥협회, 2002: *안개에 의한 비행제한 요인 분석*. 항공진흥협회, 132 pp.
Korea Civil Aviation Development Association, 2002: *Factor analysis on the avaiation limitation caused by fog*, 132 pp.