

주요 안개 사례 분석을 통한

안개 분석기술과 예측방법



■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술분석과(내선 1657) ■ 발행일: 2015년 3월 18일(수)

2015년 2월 11일 오전 9시 45분경 인천 영종대교에서 짙은 안개가 낀 가운데 106중 차량추돌사고가 발생하였다. 이 사고로 2명이 숨지고, 73명이 다쳤으며, 주변 일대 교통마비와 인천공항의 항공기 운항이 지연되거나 취소되는 등의 피해가 발생하였다. 이번 호에서는 대형 교통사고와 관련성이 있는 안개의 종류와 특징에 대해 알아보고, 주요 안개 사례에 대한 분석을 통해 예측방법과 활용모델을 제시한다.

■ 안개의 정의와 종류

1) 안개의 정의

WMO에서 안개는 수상에 의해 수평시정이 1km 미만으로 나타나는 현상으로 정의한다.

2) 안개의 종류

안개는 지표의 냉각으로 형성되는 복사안개(radiation fog)와 따뜻하고 습윤한 공기가 차가운 지표 또는 수면 위로 이동할 때 포화되어 발생하는 이류안개(advection fog), 습윤한 공기가 높은 지형을 따라 상승하여 응결하는 활승안개(upslope fog), 온난전선면 부근에서 약한 비가 내릴 때 발생하는 전선안개(frontal fog), 차가운 공기가 따뜻한 수면 위를 이동할 때 발생하는 김 안개(steam fog)로 나누어진다.

복사안개, 이류안개, 활승안개는 공기의 냉각 과정에 의해 발생하며, 전선안개와 김 안개는 수증기의 증발과정에 의해 발생하는 증발안개이다.

김 안개 형태의 증발안개는 상층대기로 확산되기 때문에 짙게 끼이는 안개와는 관련성이 적다. 따라서 교통사고를 초래하는 안개는 냉각과정에 의해 발생하는 복사안개와 이류안개, 활승안개, 수증기 공급으로 발생하는 전선안개가 있으며, 지상에서 주로 발생하는 안개는 복사안개와 이류안개, 전선안개로 구분할 수 있다. 해안지역에서 복사안개와 이류안개의 특징이 복합적으로 나타나는 안개가 있는데, 이 안개를 연안안개(coastal fog)라고 부른다.

안개에 따라 형성과정의 물리적인 원인이 다르기 때문에 안개 예측을 위해서는 발생원인의 규명이 선행되어야 하며, 안개의 종류와 특징에 따라 예측 성능이 좋은 모델을 활용해야 한다.

3) 안개발생 빈도와 분포

손희정 등(2010)은 1989년부터 2008년까지 20년간 기상청과 공군에서 관측한 1km 미만의 안개를 대상으로 우리나라의 지역별 안개 발생빈도를 연구하였다.

안개 일수가 가장 많은 지역은 산악지역으로서, 주로 강수과정과 관련된 구름의 영향과 활승안개에 원인이 있다.

우리나라 내륙은 가을철에 동서 고압대 형태의 일기배치를 보이는 안정한 대기구조에서 기온 하강으로 인하여 안개 발생빈도가 다른 계절에 비해 높다.

서해안은 봄과 여름에 안개 발생빈도가 높는데, 바다에서 발생하는 바다안개의 영향이 크기 때문이다(그림 1 참조).

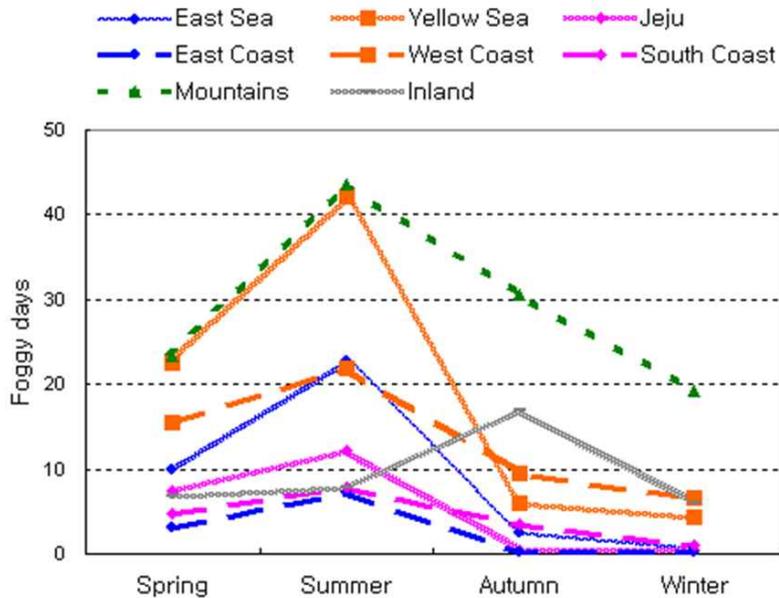


그림 1. 8개 지역별 20년(1989-2008)간 안개 발생일 비교(손희정 등 2010)

안개의 종류별 특징

1) 복사안개

복사안개는 우리나라 내륙에서 가장 빈번하게 발생하는 안개이다. 주로 가을철에 발생빈도가 높으며, 고기압권에서 바람이 약하고 지상에서 925hPa 부근까지, 혹은 그 이상의 고도까지 역전층이 형성될 경우 발생한다. 전일 비가 내리거나 눈이 쌓인 후 녹았다면, 지표에 수증기가

풍부하여 안개 발생가능성이 높아진다. 도심보다는 기온이 크게 떨어질 수 있는 도심 외곽 지역에서 발생빈도가 높으며, 주변에 강이나 호수가 있다면 수증기 공급이 더해지면서 발생 가능성은 더욱 증가한다(그림 2a).

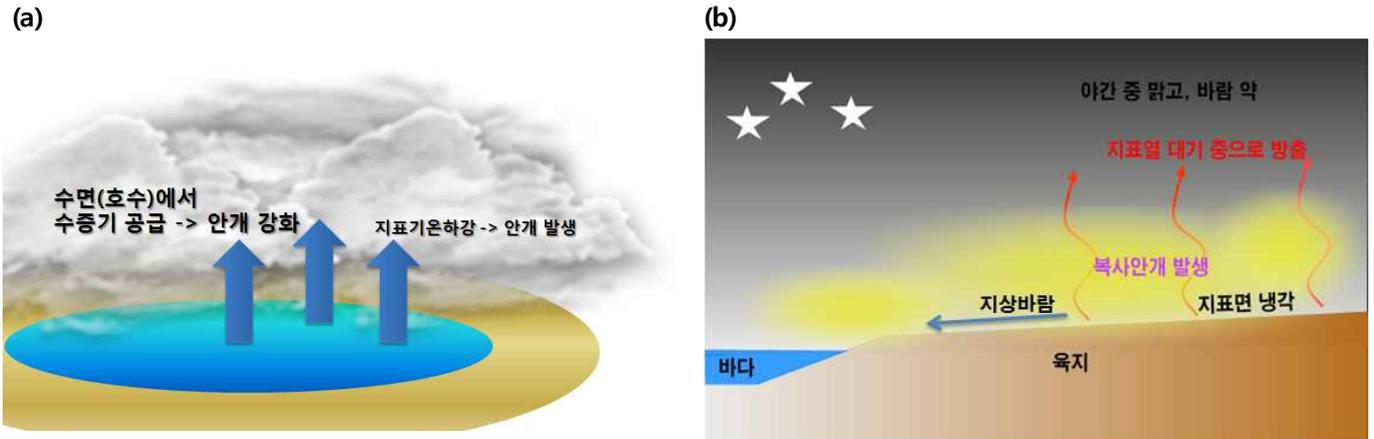


그림 2. 호수 근처에서 짙게 끼이는 안개의 발생 모식도(a)와 복사안개 발생 모식도(b)

우리나라에서 복사안개는 내륙에서만 발생하지 않는다. 특히, 서해안 지역은 연안의 해수온도가 비교적 낮고, 서풍이 아닌 동풍형의 국지풍(해륙풍 순환 중 육풍)이 불면서 기온이 크게 떨어질 경우 안개가 발생할 수 있다(그림 2b).

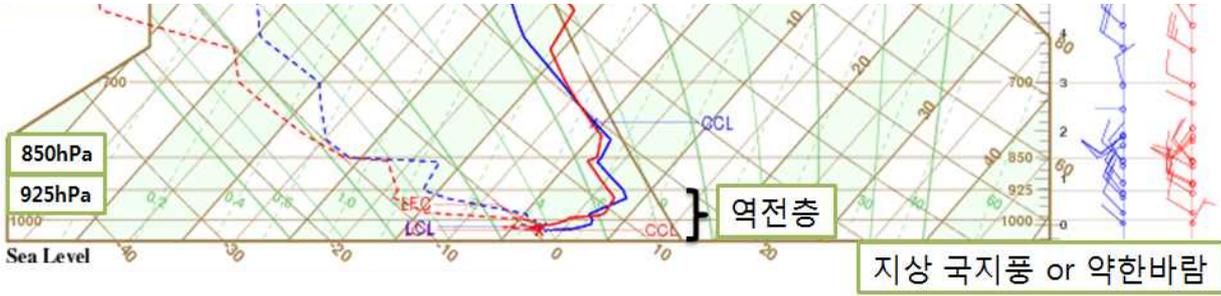
2006년 10월 3일 07시 50분경 서해대교에서 발생한 29중 추돌사고가 서해안에서 복사 안개로 인한 대표적인 피해 사례이다. 이 사고로 사망 12명, 부상 50여명의 인명피해가 발생하여 큰 사회적 이슈가 되었다. 이 외에도 2008년 2월 20일 새벽 6시경 일산 부근 자유로에서 발생한 차량 34중 추돌사고도 복사안개로 인한 교통사고 사례이다. 이 때 지상의 기온이 -4°C 이하로 떨어지면서 노면이 얼어붙어 차량 제어가 더욱 어려워져 다중 추돌 사고가 발생되었다. 복사 안개가 발생했을 때, 지상의 기온이 0°C 부근이거나 이하일 경우 빙판길에 의한 교통사고의 문제점도 제기된 사례였다.

복사안개의 경우 지역별로 시정 차이가 매우 크다. 그림 3은 2014년 3월 23일 아침에 우리나라 서쪽 대부분 지방에서 발생한 안개 사례를 보여준다.

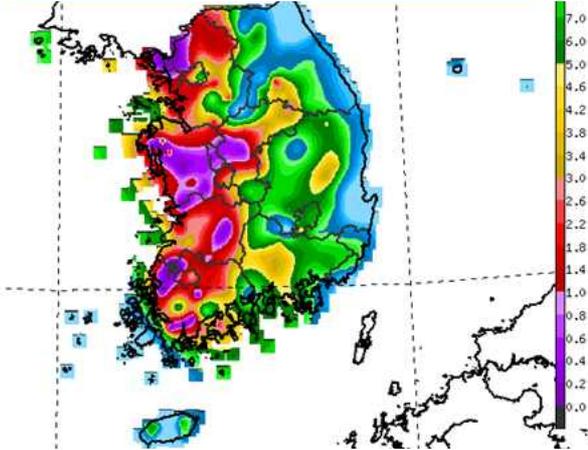
광주의 경우 오전 9시 역전층의 고도가 지상에서 925hPa까지 형성되어 있고, 지표부근은 포화된 상태로 안개형태의 대기구조를 보여준다.

시정 분포도를 살펴보면, 큰 규모의 안개 발생 사례에서도 지역별로 시정 차이가 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 이런 안개의 국지적인 특징이 안개예측을 어렵게 만드는 이유이기도 하다. 안개는 보통 기온이 가장 낮게 떨어지는 새벽과 아침사이에 발생하고, 일출 후 2~3시간 정도까지 이어진다. 만약, 역전층과 지면부근의 포화된 층의 두께가 두껍다면, 안개 소산시간은 일출 후 3시간 이상 길어지기도 한다.

(a) 2014. 3. 23. 09시 광주 단열선도



(b) 2014. 3. 23. 06시 시정 분포도



(c) 주요 지점별 12시간 시정변화 그래프

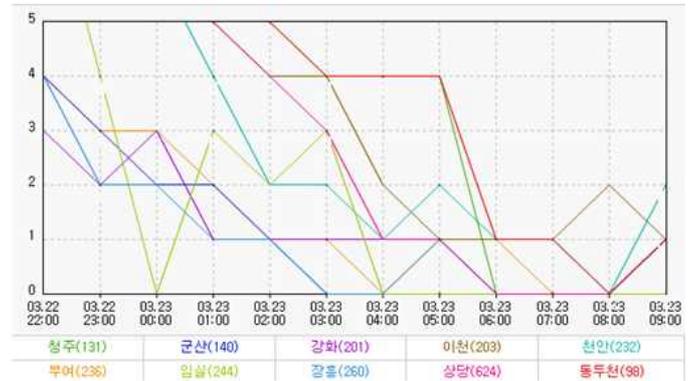


그림 3. 2014년 3월 23일 안개 발생 관련 단열선도(a), 시정 분포도(b), 주요지점별 시정변화 그래프(c)

2) 이류안개(바다안개)

이류안개의 대표적인 현상이 바다안개(이하 해무)이다. 해무는 그림 4와 같이 차가운 해수면 위로 따뜻한 공기가 근접하여 포화될 때 발생한다. 지상에서 925hPa 고도 내의 풍계에 따라 내륙으로 들어오기도 하며, 안정한 대기상태에서 내륙의 복사안개와 동시에 만들어질 경우 해무는 더욱 오래 지속되고, 연안 및 내륙지역의 시정도 악화되는 경우가 있다. 그림 4와 같이 해무는 연안지역에 직접적으로 영향을 주어 안개에 의한 저시정을 초래하고, 내륙으로 이동하면서 상승하여 낮은 층의 구름대인 층운(St)형 구름을 만든다.

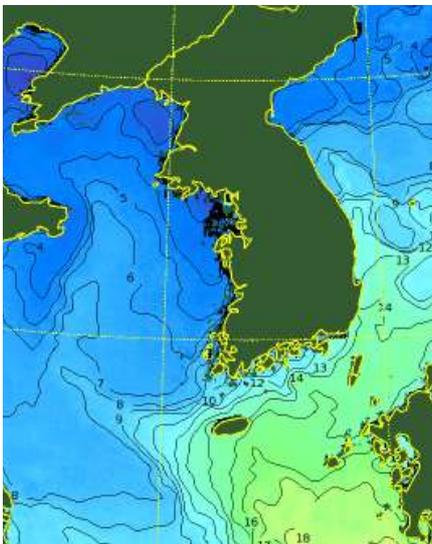
우리나라 주변에서 발생하는 해무는 해수면 온도보다 기온이 높은 4~10월 사이에 나타난다. 특히, 서해상의 해무는 남서기류가 강화되는 5, 6, 7월에 집중되며, 이 중 7월에 발생빈도가 가장 높다. 연안지역으로 해무 유입은 공항, 해상교통 등에 위험을 초래한다. 또한, 서해안은 조석간만의 차이가 커서 연안지역의 해수면 온도가 낮기 때문에(특히, 새벽과 아침시간) 기온과 노점온도의 차이가 더욱 커져 안개발생과 해무의 유입이 많을 수 있다(김문옥 1998).

해무는 복사무와 달리 아침시간 외에 낮에도 발생하며, 완전히 맑은 날 보다는 남풍이 부는 구름(주로 층운(St)형)이 낀 날에 발생빈도가 더 높다(원덕진 등 2000).

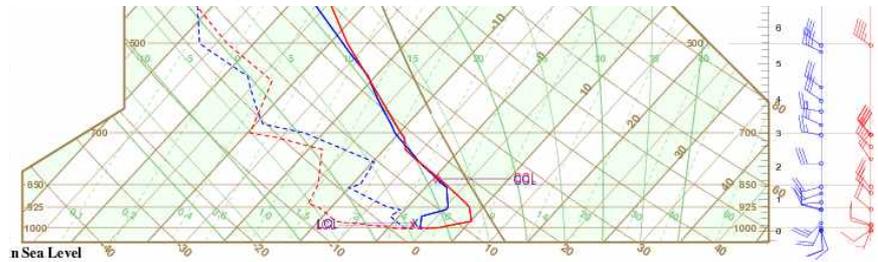


그림 4. 해무발생 및 내륙 유입 모식도

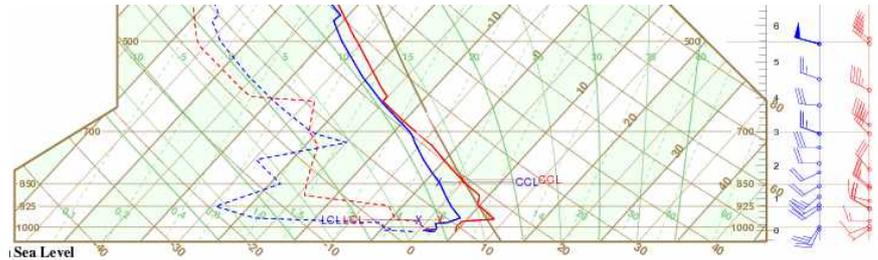
(a) 2012.3.27. 해수면 온도



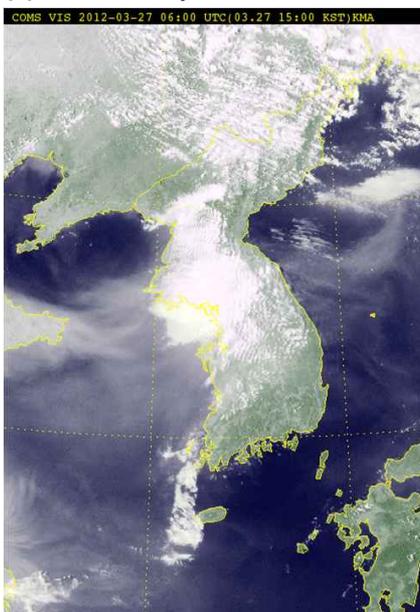
(b) 2012. 3. 27. 백령도 단열선도



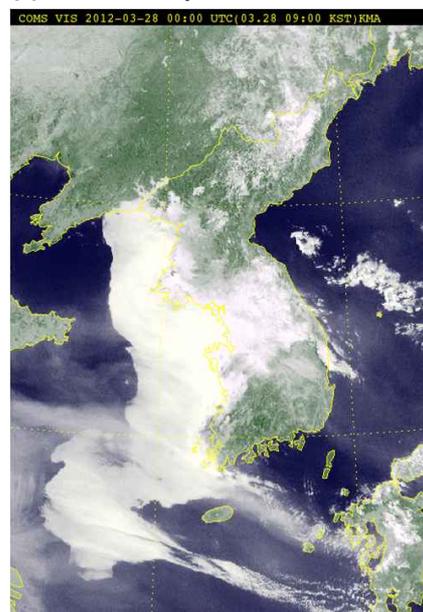
(c) 2012. 3. 27. 흑산도 단열선도



(d) 3. 27. 15시



(e) 3. 28. 09시



(f) 3. 28. 15시



그림 5. 2012년 3월 27일~28일 서해상 해무 발생 사례

그림 5는 2012년 3월 27~28일 서해상에 광범위하게 해무가 발생한 사례이다. 이 해무는 27일부터 발생 및 강화되어 28일 아침시간에 서해안 대부분 지역에 영향을 주었고, 28일 오후부터는 해안에 위치하던 해무가 서해상으로 이동하였다.

발생초기인 27일 천리안 영상에서 관측된 해수온도 분포도(a)를 살펴보면, 백령도 부근은 약 4°C, 흑산도 부근은 약 7°C의 수온 분포를 보인다. 27일 21시 백령도 단열선도(b 붉은색 곡선)에서 지표기온이 해수면 온도와 거의 비슷한 4°C를 보이는 반면, 925hPa은 약 8°C로 지상과 4°C 차이를 보이는 역전층이 형성되어 있다. 지표부근에 남풍의 바람이 불고 925hPa 기온보다 해수면 온도가 낮으므로 차가운 해수면 위에서 응결이 되어 해무가 발생할 수 있는 좋은 조건이었다. 같은 시각 관측된 흑산도 단열선도에서는 비록 역전층의 기온 구조와 925hPa과 지표기온이 10°C 내외로 해수면 온도보다 약 3°C 가량 높지만, 흑산도 남쪽에 10°C 이상의 고수온지역이 분포하고 있어 지표 부근에서 완전히 포화가 되지 않은 모습을 확인할 수 있다(c).

28일 아침에 우리나라 내륙에서 복사냉각이 일어나면서 박무가 나타났고, 연안지역으로는 해무와 결합되어 안개가 발생하였다(e). 오후에 기온이 상승하면서 경기만 부근의 해무는 서쪽으로 물러간 모습을 확인 할 수 있다(f).

경기만은 물이 육지에 갇힌 형태의 지형이므로 내륙의 가열효과가 다른 서해안(충청 및 전라도 서해안 지역)보다도 큰 작용을 한다. 따라서, 28일 15시 관측된 위성영상(f)과 같이 복사안개와 해무가 동시에 소산되는 모습을 볼 수 있다. 남서풍이나 서풍이 강할 경우 종종 그림 4에서 보여준 모식도와 같이 해상의 해무는 상승하여 층운형 구름형태로 내륙까지 유입되는 경우가 있다.

3) 전선안개

전선안개는 상층의 따뜻한 공기에서 내리는 비가 차가운 지면에 떨어지면서 증발과정을 통해 포화되거나 과 포화되어 발생한다. 상층의 대기가 따뜻하고 약한 비가 내리는 현상은 보통 지상의 저기압 중심부근에서 나타난다. 그림 6은 이런 대기구조의 모식도를 보여준다. 지표부

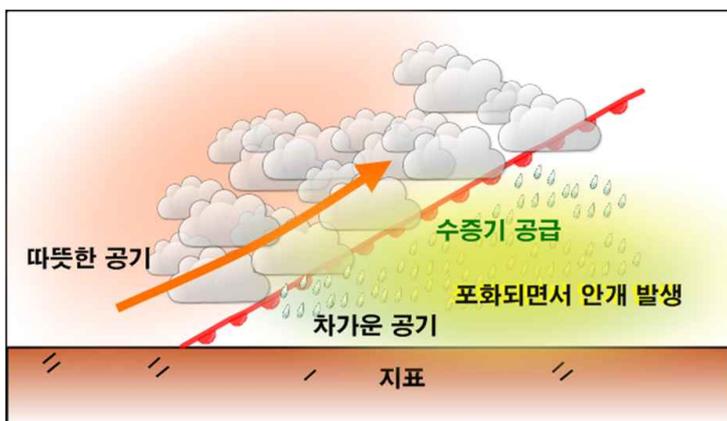


그림 6. 전선안개의 연직 대기구조 모식도

근의 차가운 공기 위로 따뜻한 공기가 상승하면서 북으로 이동하므로 대기는 안정화 된다. 차가운 지표로 상층에서 내리는 따뜻한 비가 떨어지면 지표의 습도가 높아져 증발이 더 이상 일어나지 않는 상태 즉, 포화 혹은 과 포화될 때 안개가 발생한다. 대기 온도 구조에 큰 변화가 나타나지 않는 이슬비 형태의 약한 비가 내리는 기상조건일 경우 안개 가능성은 증가한다.

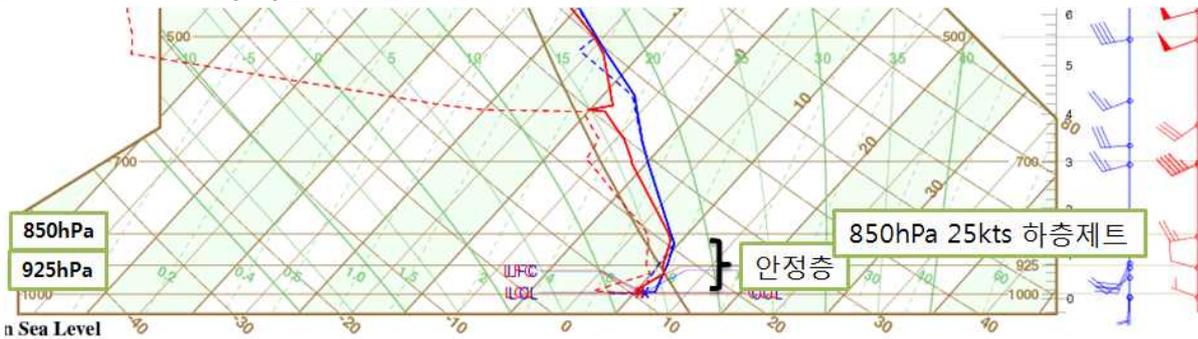
그림 7은 2014년 3월 26일 전국적으로 전선안개가 발생한 사례이다. (a) 지

상일기도에서 저기압 중심이 우리나라를 통과하고 있으며, 5kts 이하의 약한 바람과 전국적으로 이슬비 형태의 비가 내리고 있었다. (b) 26일 9시 흑산도 단열선도에서 850~700hPa 고도에 남서풍의 하층제트(25kts 이상)가 불고 있으며, 850hPa의 기온과 지상의 기온이 비슷한 안정한 대기구조를 보인다. (c) 전국 시정분포도를 살펴보면, 박무와 함께 일부 지역에서는 1km 미만(보라색 구역)의 안개가 끼여 있는 모습을 볼 수 있다. (d) 주요 지점의 시간별 시정 그래프에서 1km 미만으로 안개가 짙게 낀 시간대를 찾을 수 있다.

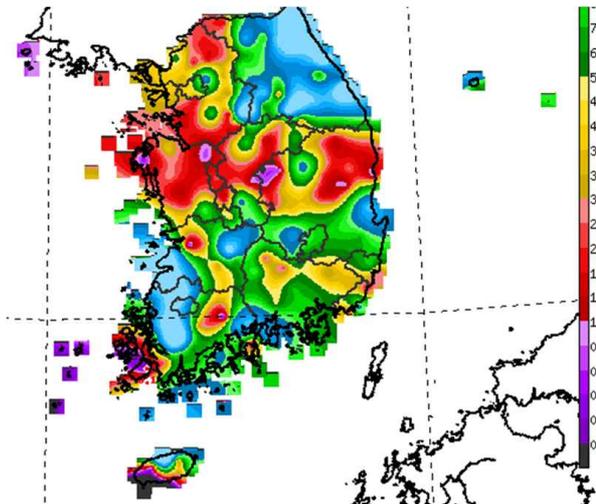
(a) 2014. 3. 26. 09시 지상일기도



(b) 2014. 3. 26. 09시 흑산도 단열선도



(c) 2014. 3. 26. 06시 시정 분포도



(d) 주요 지점별 12시간 시정 변화 그래프

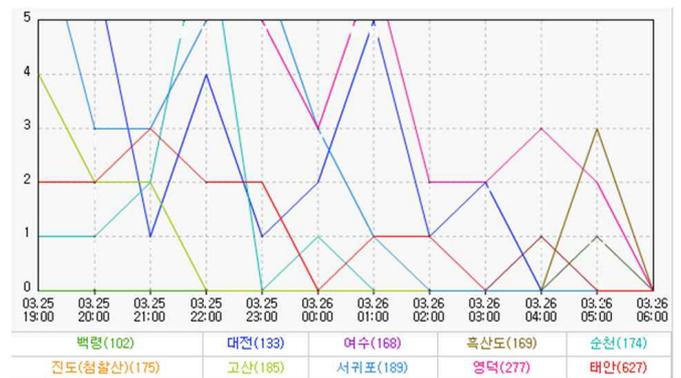


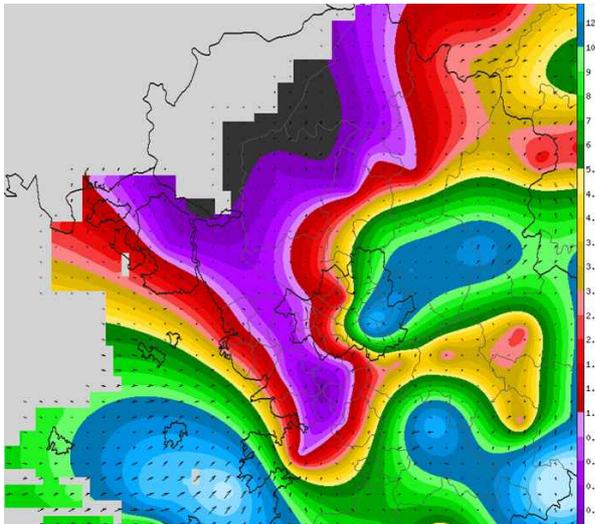
그림 7. 2014년 3월 23일 안개 발생 관련 지상일기도(a), 단열선도(b), 시정 분포도(c), 주요지점별 시정변화 그래프(d)

4) 연안안개

연안안개는 복사무와 해무의 특징을 동시에 보이는 안개로서, 야간에 서풍이 내륙에서 연안으로 부는 육풍(동풍)과 충돌하여 연안에서 무풍 또는 약한 서풍이 나타나고, 일몰 후 지면의 냉각과 바다로부터 들어오는 서풍에 의해 습해진 공기가 응결되어 연안안개가 발생한다(최효 2001). 연안안개는 주변지형과 해안선 형태에 영향을 받기 때문에 해무와는 구별 된다(Leipper 1994). 연안 안개는 5~8월에 주로 발생하며, 해무(바다안개) 발생시기와 비슷하다. 7월에 가장 많이 발생하며, 남풍이 부는 날에 주로 발생한다. 임헌호 등(2005)은 인천공항 안개연구를 통해 안개발생이 여름, 봄, 가을, 겨울 순이며, 기온하강이 주 원인을 지적했다. 해무의 특징과 복사무의 특징이 결합되어 나타나므로 최저기온이 나타나는 새벽과 오전에 주로 발생한다.

2015년 2월 11일 09시 45분 경 인천 영종대교(인천공항→서울 방면 3.8km 부근)에서 안개로 인한 차량 106중 추돌사고가 발생하여 사망 2명, 부상 73명 등 인명피해와 함께 도로통제, 비행기 결항 등이 발생하여 사회적 이슈가 되었다.

(a) 2월 11일 05시 시정분포



(b) 2월 11일 09시 40분 시정분포

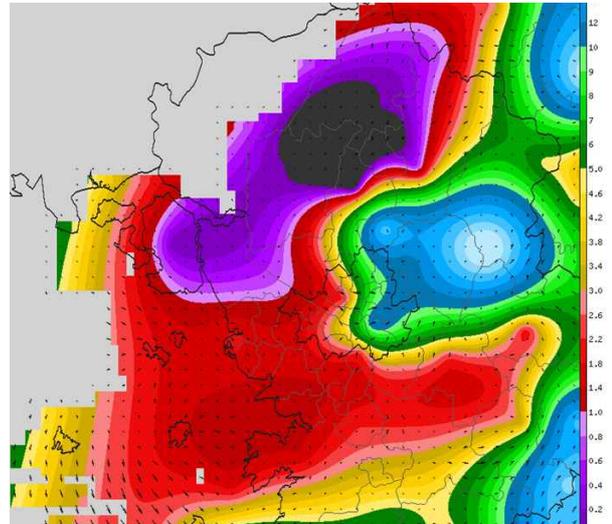


그림 8. 시정 분포도(붉은색 영역은 1~3km, 보라색 영역은 1km 미만)

그림 8의 시정 분포도를 살펴보면, 11일 05시부터 강화 및 경기 북서지역으로 시정 100m 이하의 안개가 탐지되었고, 사고 발생 시각인 09시 40분에 경기만 부근으로 2km 이하 시정 지역이 확대되었다.

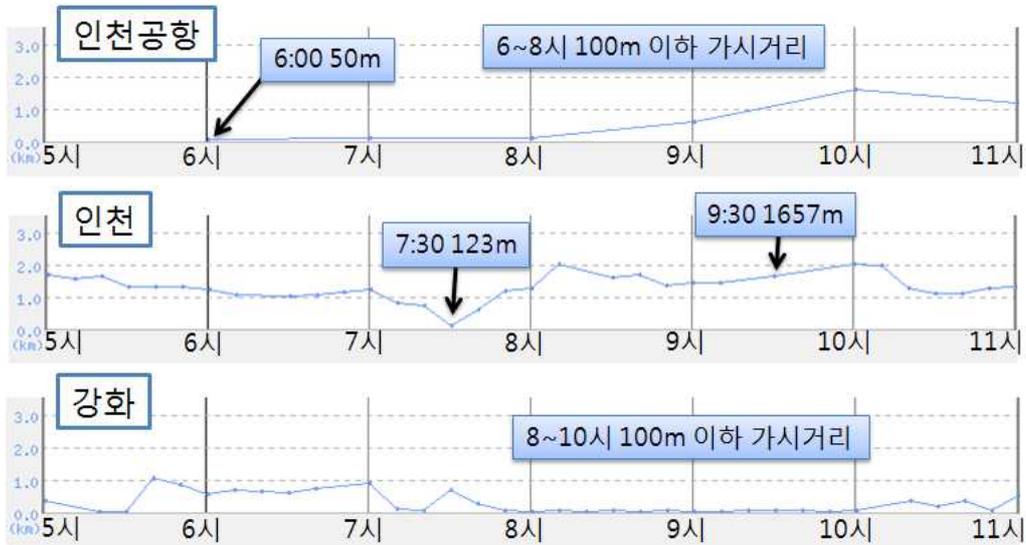
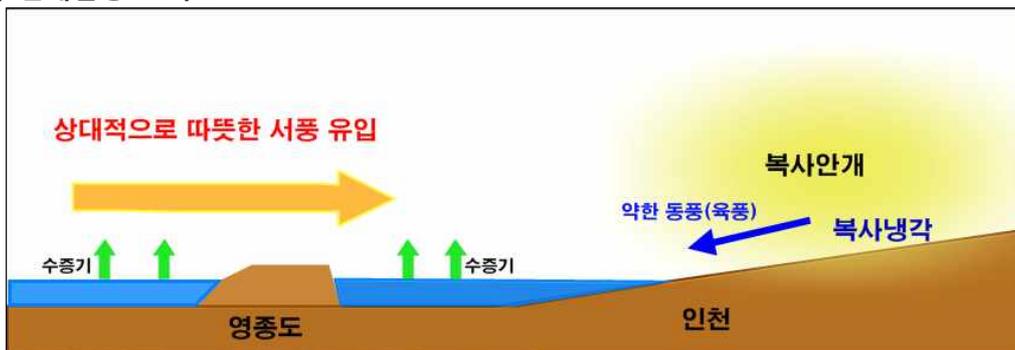


그림 9. 2월 11일 5~ 11시 주요 지점별 시정 변화

표 1. 사고 당시 기상실황(2015. 2. 11. 09:40)

| 구분 | 바람(평균풍속) | 기온 | 시정(09시기준) |
|----------|-------------|-------|-----------|
| 인천기상대 | NW 0.7 m/s | 1.6°C | 1500m |
| 영종도(AWS) | NW 0.9 m/s | 2.4°C | - |
| 인천공항 | NNW 1.3 m/s | 1.0°C | 600m |

(a) 11일 새벽 안개발생 모식도



(b) 11일 아침 연안안개 발생 모식도

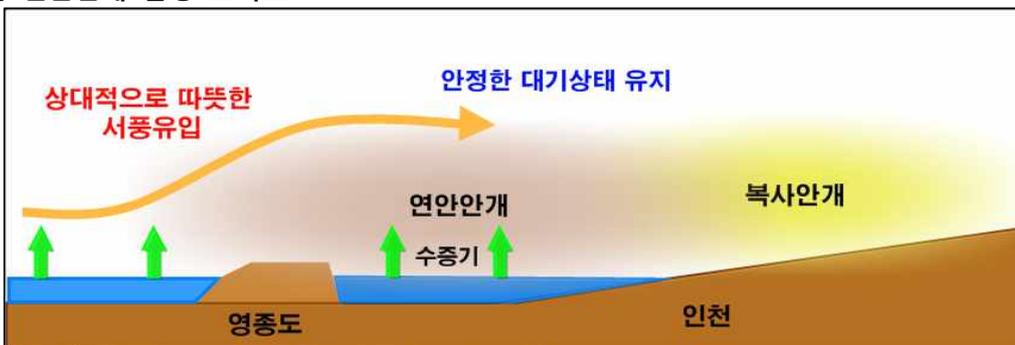


그림 10. 2015년 2월 11일 영종도 지역 안개 발생 모식도

안개 발생 2일 전인 9일 서울·경기도와 강원도영서, 충청남도를 중심으로 눈이 내려 쌓인 가운데, 10일 기온이 평년보다 높게 오르면서(인천 최고기온 5.5°C 기록, 평년 3.6°C) 쌓인 눈이 녹아 지표부근에서 습윤한 상태가 유지되었다. 또한, 10일 야간에 대체로 맑고 안정한 대기상태가 유지됨에 따라 복사냉각이 활발하게 진행되어, 강화 및 경기북부를 중심으로 기온 하강과 함께 안개(복사안개)가 발생되었다.

11일 아침시간에 기온하강으로 안개구역이 인천 등 경기서해안으로 확대되었고, 서해상에서 따뜻하고 습윤한 공기를 가진 서풍이 연안지역의 차가운 공기 위로 이동하면서 경기만 일대의 대기는 더욱 안정화 되었고, 해상에서 수증기가 지속적으로 공급되어 인천공항과 인천 등 연안지역을 중심으로 안개가 발생되어 지속되었다. 특히, 인천 및 영종대교는 만조에 의해 지상의 기온보다 높은 온도의 해수가 연안으로 유입되면서 호수 부근에서 안개가 질게 끼는 내륙 안개현상과 유사하게 수증기를 지속적으로 공급받아 안개가 강화되고 지속될 수 있었다(그림 11).

※ 3월 11일 만조시각(국립해양조사원 자료) : 영종대교(09:05), 인천(08:55)
 ※ 9시 인천 검조소 수온 2.1°C, 덕적도 부이 수온 3.3°C
 ※ 9시 기온 : 인천기상대 1.1°C(노점온도 0.9°C)

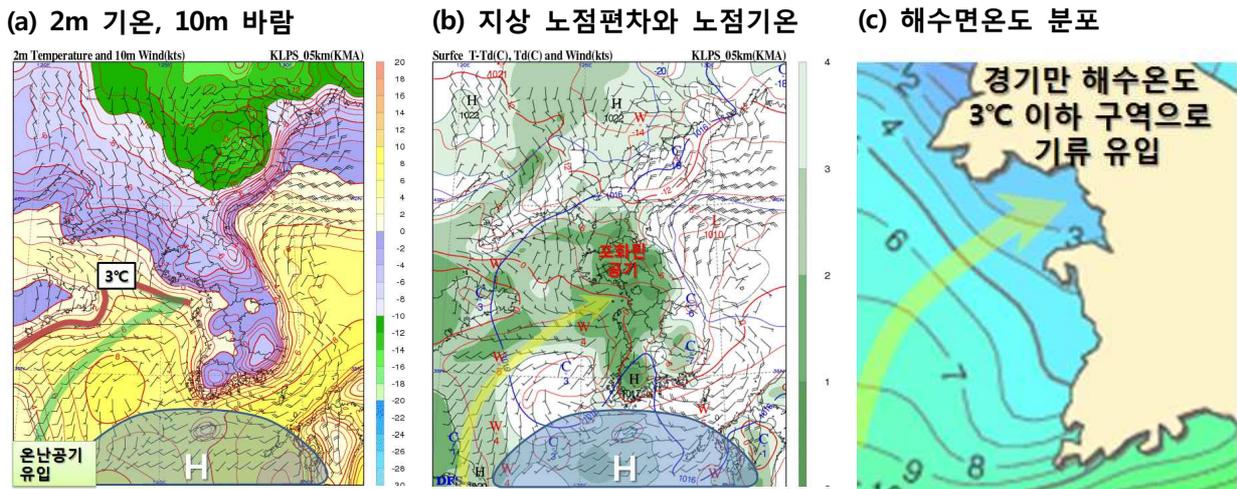
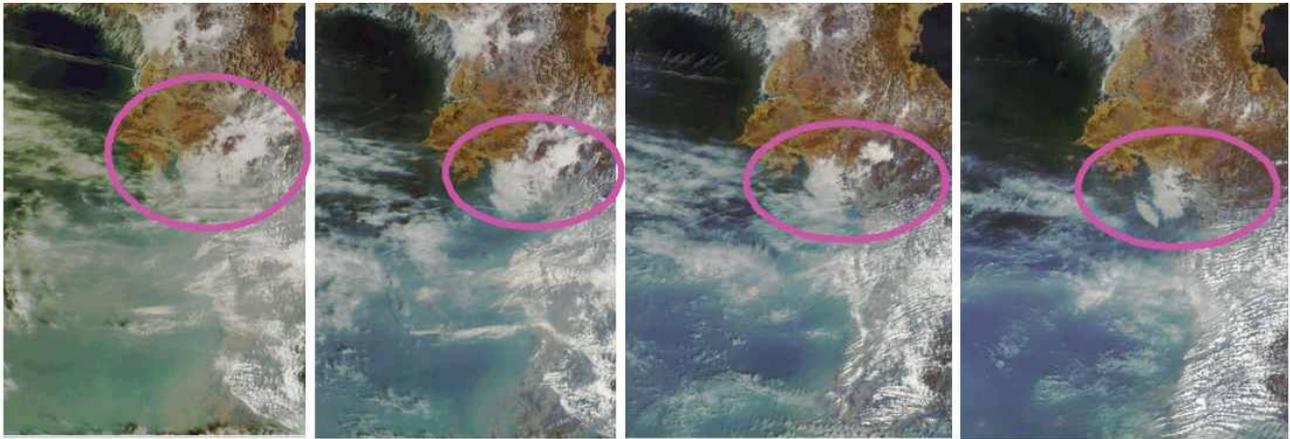


그림 11. 2015년 2월 11일 06시 KLAPS 분석장(a, b)과 해수면온도 분포(c)

그림 11과 같이 남쪽에 위치한 고기압에 의해 서해상에서 경기만으로 해수온도(3°C)와 비슷하거나 높은 기온의 습윤하고 따뜻한 지표공기가 유입되어 바다안개(해무)형 특징이 더해져 안개가 지속될 수 있었다.



2015.2.11. 09:16 KST

2015.2.11. 10:16 KST

2015.2.11. 11:16 KST

2015.2.11. 12:16 KST

그림 12. 천리안위성-해양센서 컬러합성영상, 분홍색 원은 경기만에서 탐지된 해무형 안개를 보여줌

서해상의 해무는 해수면 온도보다 기온이 높게 올라가는 여름과 봄철에 주로 발생하는데 해수면 온도가 대기 기온보다 높은 겨울철에 해무형태의 안개 발생은 이례적인 현상으로 볼 수 있다. 이번 영종대교 부근에서 발생한 안개는 내륙에 복사안개와 바다에 해상안개의 특징이 혼합된 연안안개로서, 복사안개로 발생된 2006년 서해대교 29중 추돌사고, 2008년 자유로 34중 추돌사고와는 발생 원인에 차이가 있었다. 시간대별 연안안개 발생 원인을 요약하면 다음과 같다.

- 발생원인 : 습윤한 지표상태 + 기온하강
⇒ 강화도 및 경기만 인근 지역 복사안개 발생(03~07시)
- 강화원인 : 대기안정 + 수증기 공급
⇒ 연안지역 안개 강화(07~09시)
- 지속원인 : 만조 + 경기만 해무
⇒ 연안지역 안개 지속(09~12시)

모형 예측결과 분석(2014. 2. 11. 안개사례)

1) 국지모델 시정예측

그림 13의 국지모델 시정자료(1.5m 고도)는 10일 21시 생산된 예측자료에서 경기남부지역에 1km 미만의 안개를 03시경부터 06시 사이에 예상하였다. 06시경에 5km 아하의 시정 영역이 강원영서지역까지 확장되다. 11일 3시에 생산된 예측자료는 전일 21시보다 5km미만의 안개영역이 줄었으며, 주로 서울·경기 및 경기만으로 안개를 모의하였다. 특히, 경기남부와 서울은 3km 정도의 시정을 예상하였다. 국지모델의 예측자료는 다른 안개 예측모델에 비하여 실험과 큰 차이를 보였다. 그러나 일정규모의 권역에 안개가 발생할 사전 신호로서는 의미를 부여할 수 있다.

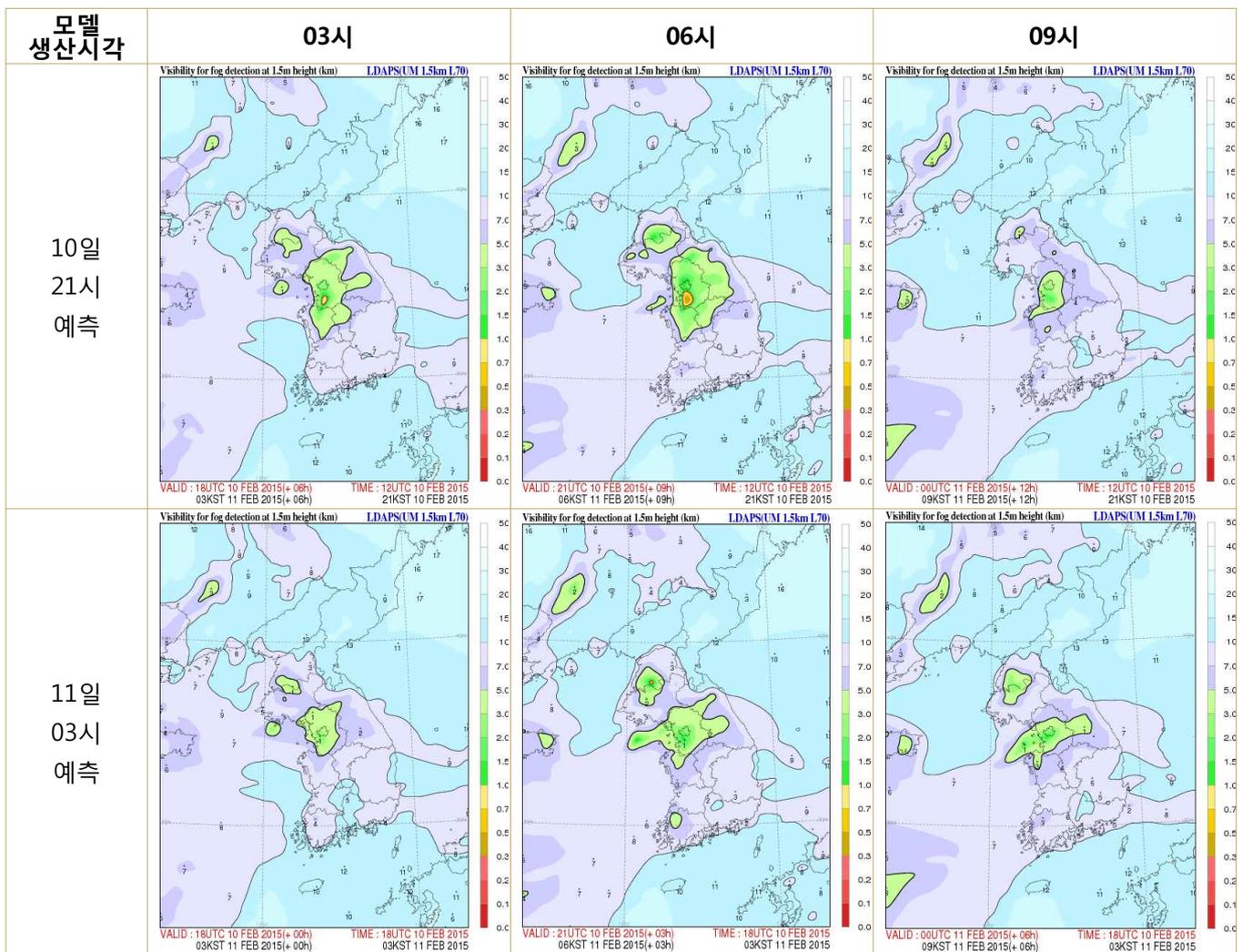


그림 13. 국지모델(LDAPS) 시정예측 결과

2) 지역특화 안개 가이던스

그림 14의 관측자료 및 지역특화 안개가이던스의 공간분포 예상도를 살펴보면, 10일 21시 생산된 자료에서 서울·경기와 충남일부까지 넓게 안개를 예상하고 있으나, 실제 안개가 나타난 지역은 인천과 경기북부지역으로 영역에 차이가 보인다. 11일 03시 생산된 예상 자료는 10일 21시에 생산된 자료에 비해 공간분포가 실황과 유사하다. 인천공항은 비교적 정확하게 예상한 편이나, 실황의 안개지역보다 남쪽지역으로 안개를 예상하였다. 지역특화 안개가이던스의 경우 안개구역을 다소 과대 모의하는 경향을 보이지만, 상대적으로 안개 탐지율은 높은 편이다(현재까지 안개 탐지율이 높은 사례가 30~40%정도로써 안개예측정확도는 다른 기상요소에 비해 정확도가 낮은 점은 감안해야 함).

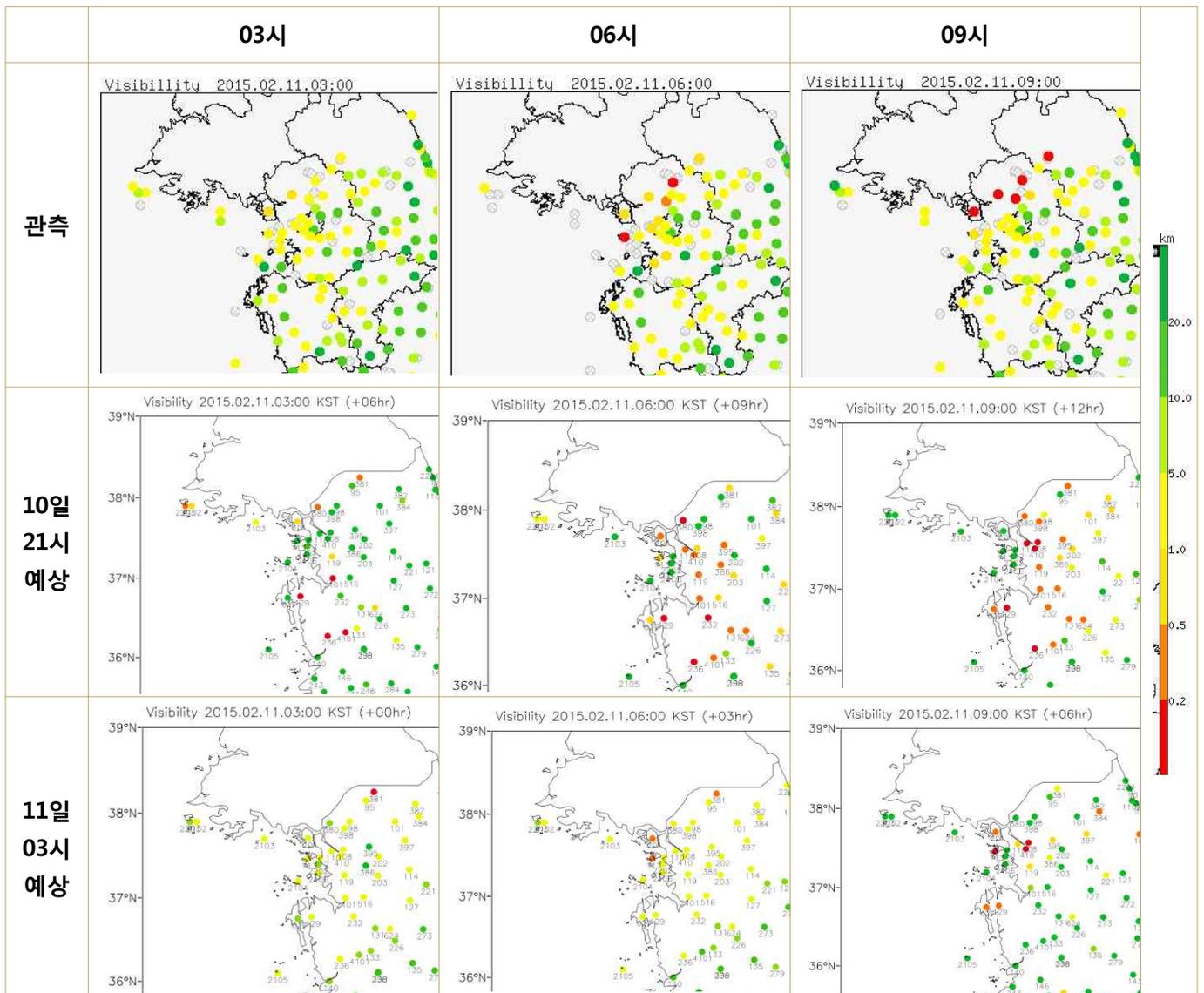


그림 14. 관측자료 및 지역특화 안개가이던스 공간분포예상도

3) 지역특화 안개 가이던스의 인천공항 시계열 예상

그림 15의 2월 10일 21시에 생산된 인천공항 연직시계열 예측자료는 11일 5시에 1km 미만의 안개를 일시적으로 모의하였다. 2월 11일 03시에 생산된 예측자료는 100m 미만의 안개를 3시간정도 모의하였다. 시정관측 자료를 넛징(nudging)¹⁾하여 사용하는 모델의 특성상 실제 안개 발생 시간에 가까운 예측시간대 자료의 정확도가 높은 편이다.

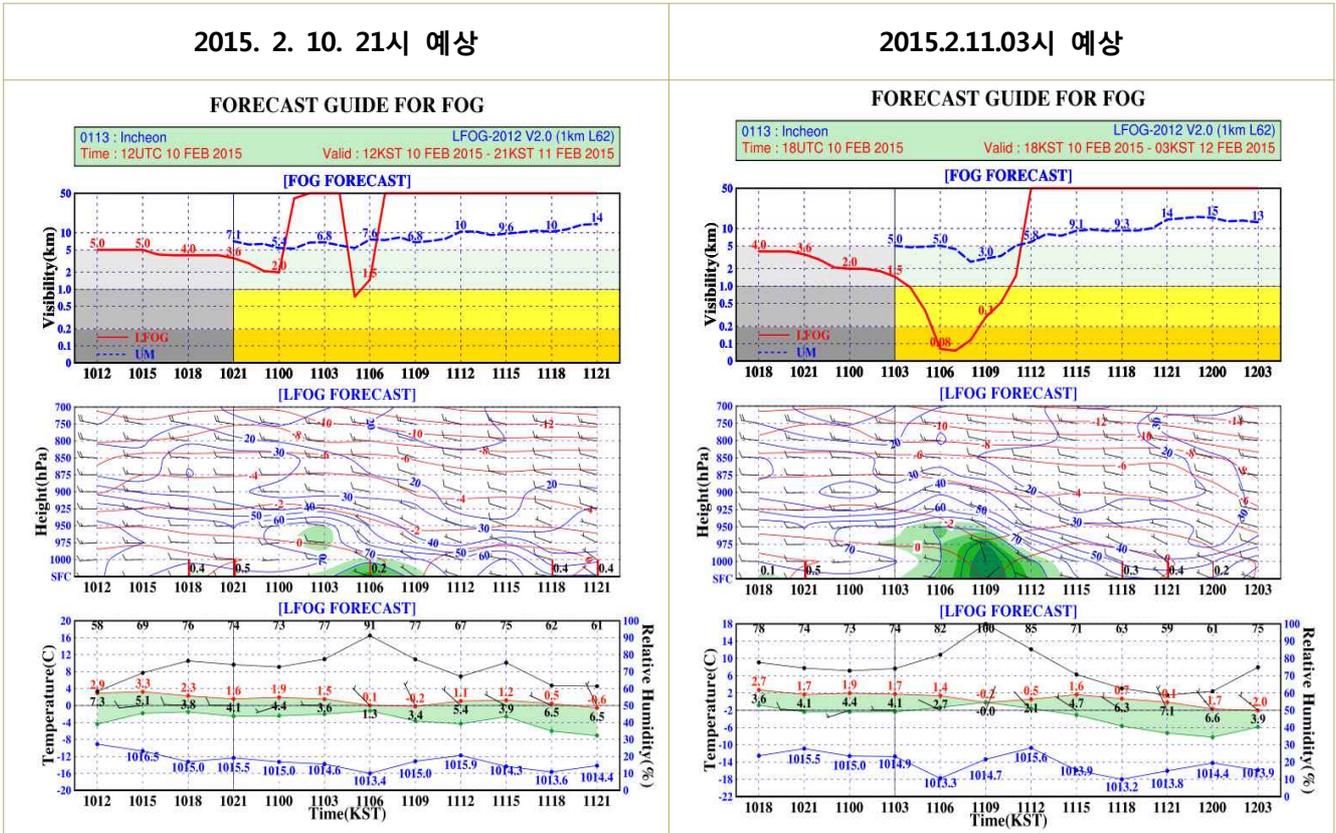


그림 15. 지역특화 안개가이던스(LFOG) 인천공항 시계열 예상도

1) 시공간에 대해서 격자화된 예측값에 대해 관측값이 있는 지점, 시간에서의 예측값을 관측값으로 동화시키는 방법 [nudge의 사전적 의미: (~)을 특정방향으로)살살 밀다]

4) 구름물리변수 기반의 안개 가이던스

그림 16은 구름물리변수 기반의 안개가이던스이다. 10일 21시 생산된 예측자료는 서울·경기와 충남, 강원영서로 200m 미만의 안개를 03시경부터 09시경까지 예측하였다. 해상에는 경기만 일부에 해무를 예상하였다. 11일 03시 생산된 자료는 03시에 안개를 모의하지 않고, 백령도 부근에만 해무를 모의하였고, 06시경에 경기남부, 강원영서 일부에 200m미만의 안개를 예상했다. 이 때, 경기만에 띠 형태의 해무가 모의되었다. 실제 현상과 지역적인 차이(서울, 경기, 경기만으로 국지적으로 안개를 제시하였으나, 실제 안개는 인천공항, 인천, 파주, 동두천부근에서 관측)는 존재하지만, 해무와 복사안개를 동시에 예측한 것은 해안지역에 짙게 끼이는 연안 안개 가능성을 보여준 결과다. 강수로 인한 저시정과 구분을 위해 강수역을 중첩하나 이번 사례에는 강수가 없어 시정자료만 표출되어 있다.

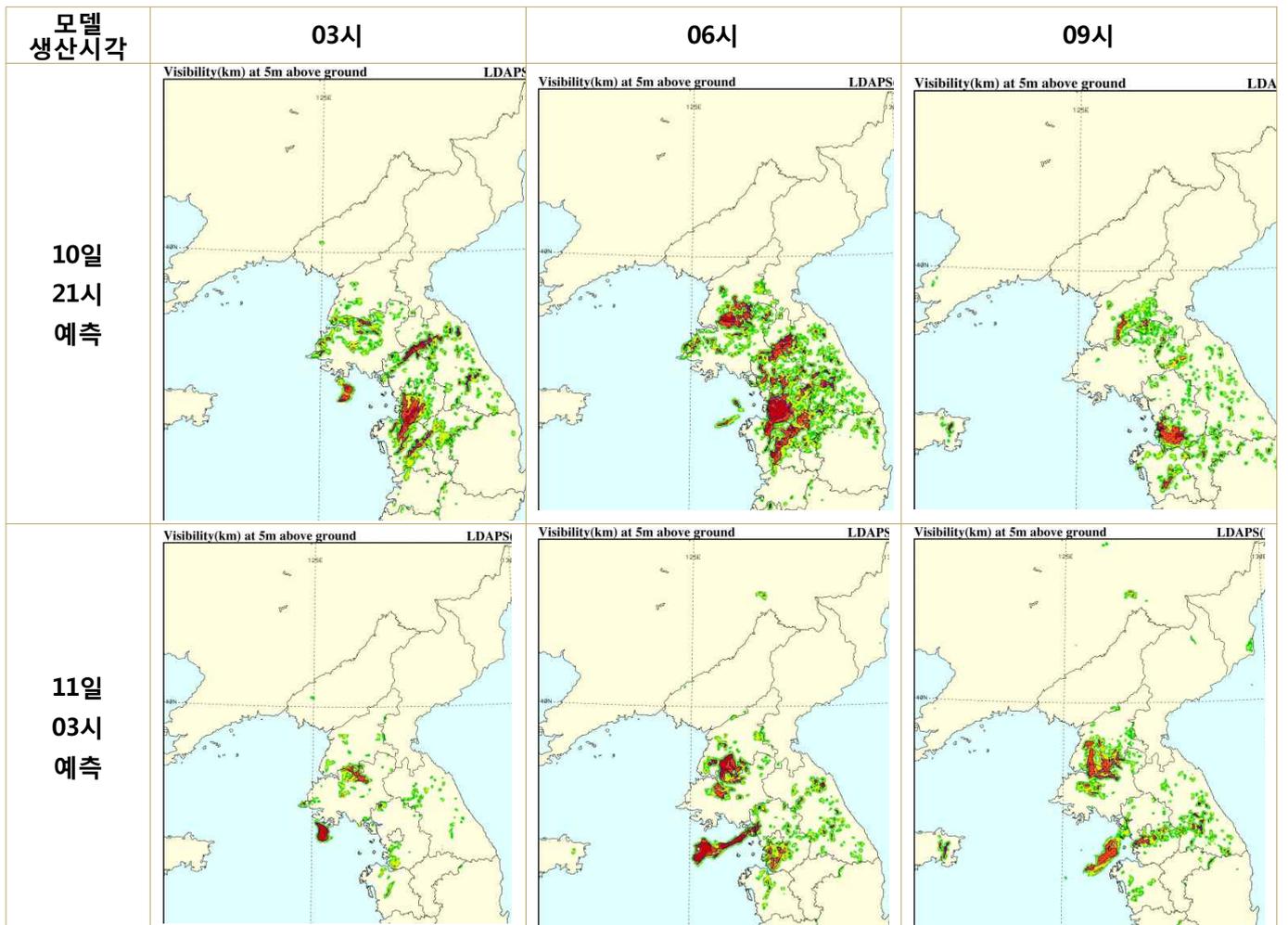
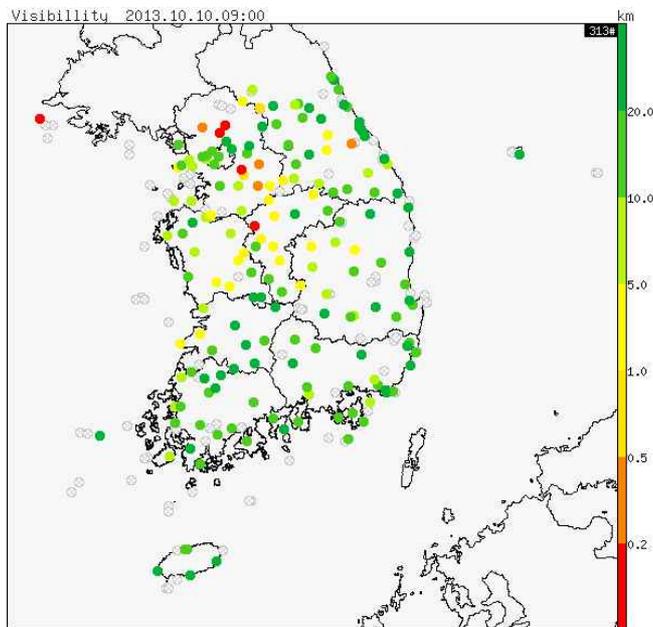


그림 16. 국지모델- 구름물리변수기반 안개 가이던스의 시정예측자료(2015. 2. 10. 21시, 2. 11. 03시 예측)

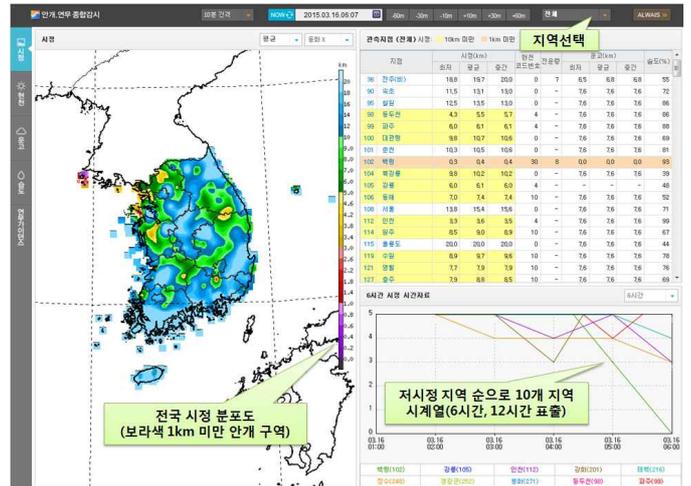
안개관측 및 감시

그림 17(a)는 COMIS-4에서 표출하고 있는 관측소별 시정 값을 보여준다. 선진예보시스템에 서는 그림 17(b), (c)와 같이 안개, 연무 종합감시 시스템을 통해 시정 분포도와 지역별 시계 열, 실시간 기상요소를 표출한다. 지역별로도 선택이 가능하여 해당구역에 대한 집중 감시 및 분석에 용이하다.

(a) 전국 시정 관측소(관측 값 표출)



(b) 안개, 연무 종합감시 시스템



(c) ALWAYS 안개

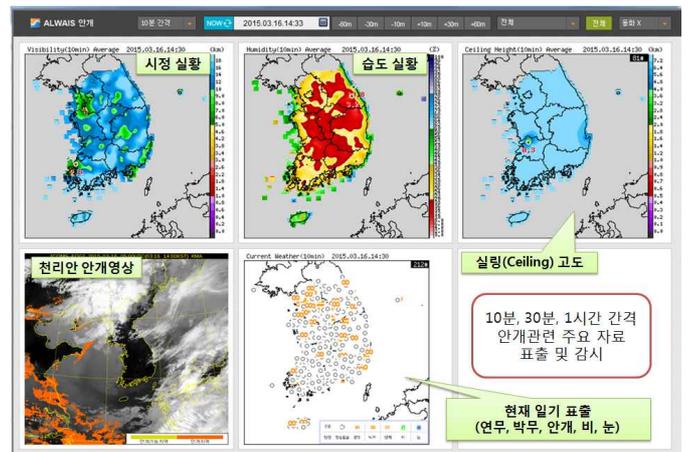


그림 17. 안개 관측망 분포와 시정계 관측값(a)과 선진예보시스템 안개 감시 시스템 표출화면(b, c)

안개예측의 어려움과 한계

1. 안개는 증발과정, 냉각과정 등 복잡한 원인과 복사안개, 해양안개 등 종류도 다양하여 정확한 원인 분석을 통해 예보해야 하는 어려움이 있다.
2. 안개는 지표부근에서 형성되므로 대기의 수적을 탐지하는 레이더로 실시간 파악이 어렵다. 따라서 정확한 예측을 위한 연구가 부족한 상황이다.
3. 위성분석에서 안개와 낮은 층운형 구름은 구별하기가 어렵고, 안개가 주로 생성되는 야간시간은 가시영상을 볼 수 없기 때문에 더욱 탐지가 어렵다.
4. 안개는 시간과 공간적으로 매우 다양한 변화성을 가지고 있다. 안개 발생은 종관규모의 기상요소와 일기배치에 관련성이 크지만, 1km 미만의 저시정을 보이는 안개의 범위는 중규모- γ (2~20km) 규모이거나 이보다 더 작은 규모이므로 지역, 시간, 강도를 예측하기는 매우 어렵다.
5. 순수한 물은 쉽게 응결되지 않기 때문에, 지표 부근이 포화된 상태가 되더라도 안개가 발생하지 않는 경우가 많다. 미세물리과정의 이해, 중규모- γ 규모이하의 지형과 지면 상태를 모두 고려해야 한다.
6. 안개입자와 같이 작은 물방울은 입자의 크기에 따라 포화도의 변동이 심해 물방울의 성장, 증발과정 등이 공존하므로 수치모델로 안개를 정확히 예측하는데 한계가 있다(그림 18 참조).

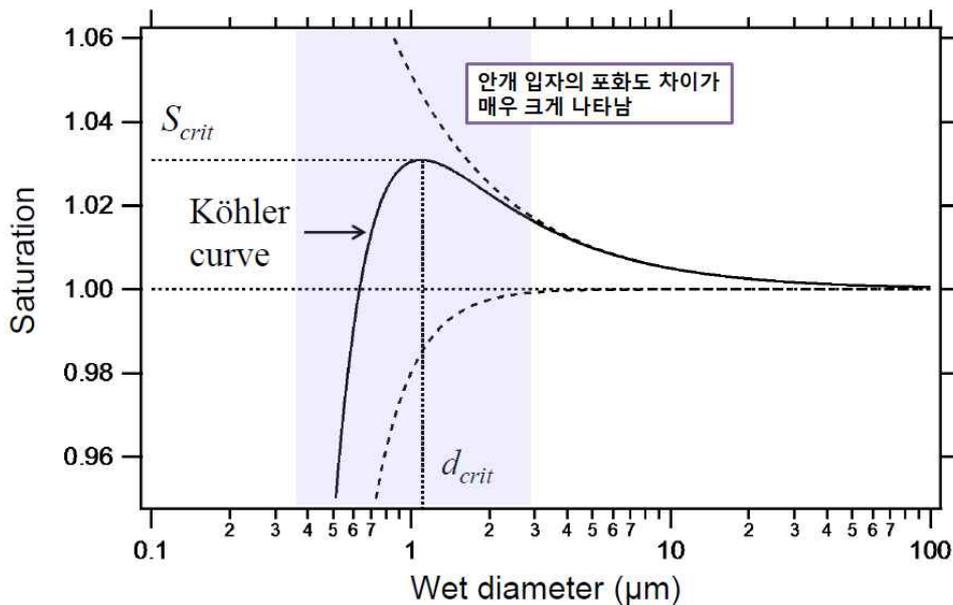


그림 18. 수적의 직경에 따른 포화도 차이분포(Köhler 1936)

〈부 록〉 안개 가이드스 소개

안개특보·정보를 생산을 위한 안개가이드스는 COMIS-4 > 일기도 > 위험기상 메뉴에 표출하고 있으며, 가이드스별 제공 자료와 생산시간 등은 표 2와 같다(단, 연무가이드스 제외).

표 2. 안개가이드스 자료 요약

(‘15년 3월 중순 현재)

| 구분 | 제공자료 | 수평 해상도 | 생산시간(시) | 예측시간 | 자료제공시기 |
|------------------|---|-------------------|--|---|---|
| UM 모델 | 지역예보 모델 · 시정 · Fog fraction · 습도예상도 | 12km | 03, 09, 15, 21 [‘11.5.23.09 이전은 09,21] | +87시간 (3시간간격) [‘13.9.30.09시 이전 +72시간(3시간간격) [‘10.5.14.09시 이전 +36시간(3시간간격)] | ‘10.5.14. 09시~ (습도: ‘06. 1. 7. 09시~) |
| | 국지예보 모델 · 시정 · Fog fraction · 습도예상도 | 1.5km | 03, 09, 15, 21 | +36시간 (1시간간격) | ‘14. 7. 10. 03시~ |
| UM지역 안개가이드스 | · 시정 시계열 (습도, 역전층 등 포함) (55개 지점) | 12km | 09, 21 | +87시간 (3시간간격) [‘13.9.30.21시 이전 +72시간(3시간간격)] | ‘10. 4. 24. 21시~ |
| 지역특화 안개가이드스 | RFOG (지역예보 모델기반) · 시정 시계열 (습도, 역전층 등 포함) · 시정-공간분포도 | 1km (육상 85개소) | 09, 21 | +48시간 (1시간간격) | ‘13. 1. 22. 09시~ ‘13. 1. 22. 09시~ |
| | LFOG (국지예보 모델 기반) · 시정변화판단표 (116개지점) | 3km (해안가 51개소) | 03, 09, 15, 21 | +24시간 (1시간간격) | |
| 구름물리 변수기반 안개가이드스 | 지역예보 모델 · 시정(강수역 중첩) | 12km | 03, 09, 15, 21 | +73시간 (3시간간격) | ‘15. 3월 하순~ (시험운영중) |
| | 국지예보 모델 | 1.5km | 03, 09, 15, 21 | +36시간 (1시간간격) | |
| 연무가이드스 | · 4개구간 시정발생 확률(113개 지점) | - | 09, 21 | +48시간 (3시간간격) | ‘14. 9. 1. 09시~ |

* 표출위치: ‘COMIS-4> 일기도 > 위험기상’(단, 연무가이드스는 ‘선진예보시스템 > 안개-연무 종합감시)

≡ UM 지역/국지예보모델 안개 예측자료

지역예보모델과 국지예보모델에서는 안개와 관련하여 습도예상도, 시정예상도, Fog fraction 예상도를 제공하고 있다. 통합모델의 시정은 식 (1)과 같으며 분자는 상수, 분모는 빛의 소산 계수로 모델이 예측한 상대습도와 에어로졸 수농도(남한지역: 국립환경과학원 2009년 국가대기배출량 자료²⁾, 동아시아지역: NASA의 INTEX-B³⁾(2006) 자료 활용)로부터 추정된 응결물입자의 수농도에 의존한다. 지상에서 1.5m 고도의 시정으로 km 단위를 사용한다.

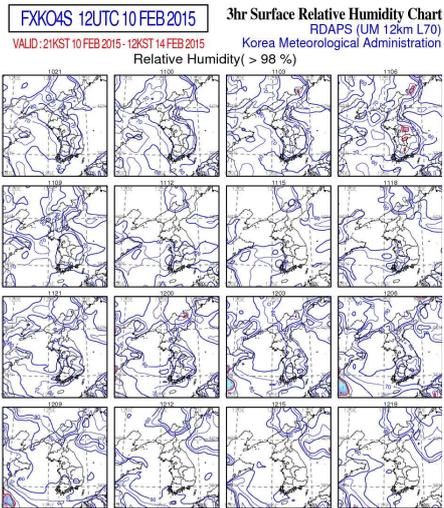
2) 1km 해상도의 점오염원(kg/year/km²)과 면오염원(kg/year/km²)자료로 구성, 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 유기 화합물(VOC) 등을 포함.

3) INtercontinental chemical Transport EXperiment phase B 의 약어로, NASA에서 2006년 3월 1일~5월 15일까지 10주 동안 대기 에어로졸 두께를 관측한 자료로, SO₂, NO_x, NMVOC, CO, PM10 등 총 8가지 물질에 대한 아시아지역(0.5°×0.5°) 배출량자료를 포함.

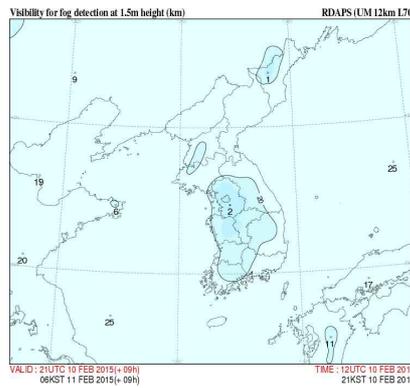
$$vis = - \frac{\ln(0.02)}{\beta_{air} + \beta(RH, m)} \quad \text{식(1)}$$

여기서 β 는 소산계수이며, air는 맑은 공기를 의미한다.

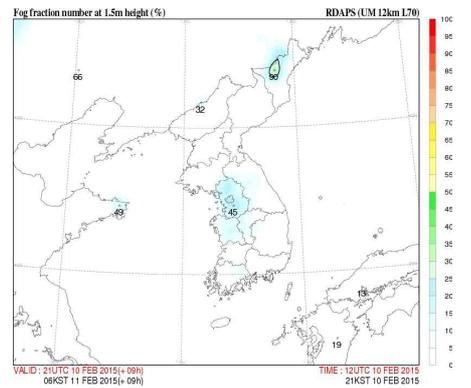
(a) 습도예상도(지역예보모델)



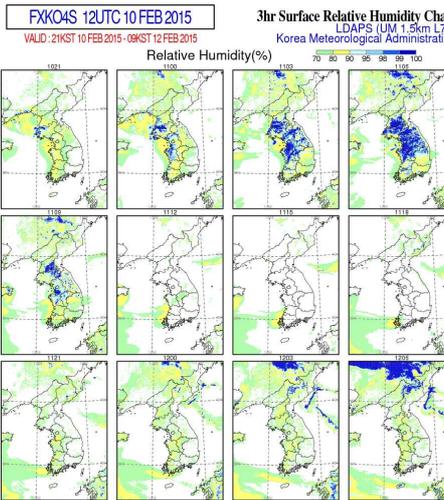
(b) 시정예상도(지역예보모델)



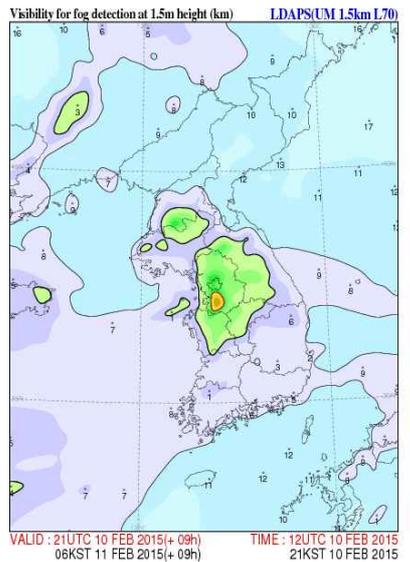
(c) fog fraction(지역예보모델)



(d) 습도예상도(국지예보모델)



(e) 시정예상도(국지예보모델)



(f) fog fraction(국지예보모델)

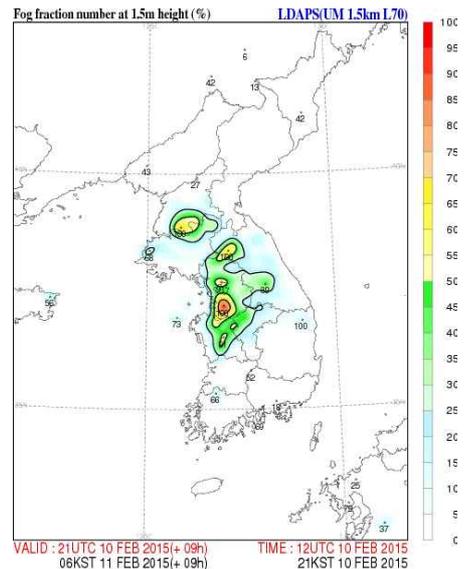


그림 19. 지역예보모델과 국지예보모델의 안개관련 예측자료 (COMI-4 > 일기도 > 위험기상), 2015년 2월 10일 21시에 예측한 2월 11일 06시 자료(영종대교 106중 추돌사고(오전 9시 45분경) 발생일)

Fog Fraction은 모델의 격자 내에서 상대습도 분포함수로부터 시정분포를 확률적으로 계산하며 시정이 1km 미만일 확률(%)을 의미한다(식2). 100%에 가까울수록 안개발생 확률이 높다.

$$Fog\ Fraction = 1.0 - 0.5 \times \left[\frac{q_{cr} - q + dw}{dw} \right]^2 \quad \text{식(2)}$$

여기서 q 는 상대습도, q_{cr} 은 임계상대습도, dw 는 주어진 분포함수의 폭을 의미한다.

그림 19에서 보듯이 지역예보 모델(12km)과 국지예보모델(1.5km)의 공간해상도 차이로 인해 국지예보모델이 시정을 짧게 모의하는 편이며, 지역모델 시계열자료(그림 20)에서는 MOS (Model output Statistics)를 적용하여 시정예상도보다 짙은 안개를 예상한다. 시정자체의 값은 실황보다 좋게 모의하는 편이지만 5km이하의 안개예상역이나 fog fraction이 높은 영역은 해당 지역이나 주변에 안개가 발생할 가능성 정보로서 활용할 수 있다.

FORECAST GUIDE FOR FOG

| 47112: 인천 (Incheon) | | | | | | MOS AND RDAPS(UM 12km L70) | | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|-----|
| Time : 12UTC 10 Feb 2015 | | | | | | Valid : 03KST 11 Feb 2015 - 12KST 14 Feb 2015 | | | | | |
| OBS | T-Td | RHum | Wspd | POD | FAR | MODEL | T-Td | RHum | Wspd | POD | FAR |
| TS | 1.5 | 91.0 | 3.6 | 79.6 | 81.4 | TS | 2.1 | 86.0 | 3.6 | 81.1 | 93. |
| WTS | 1.0 | 94.0 | 2.4 | 68.3 | 93.8 | WTS | 2.0 | 85.0 | 2.5 | 71.4 | 99. |

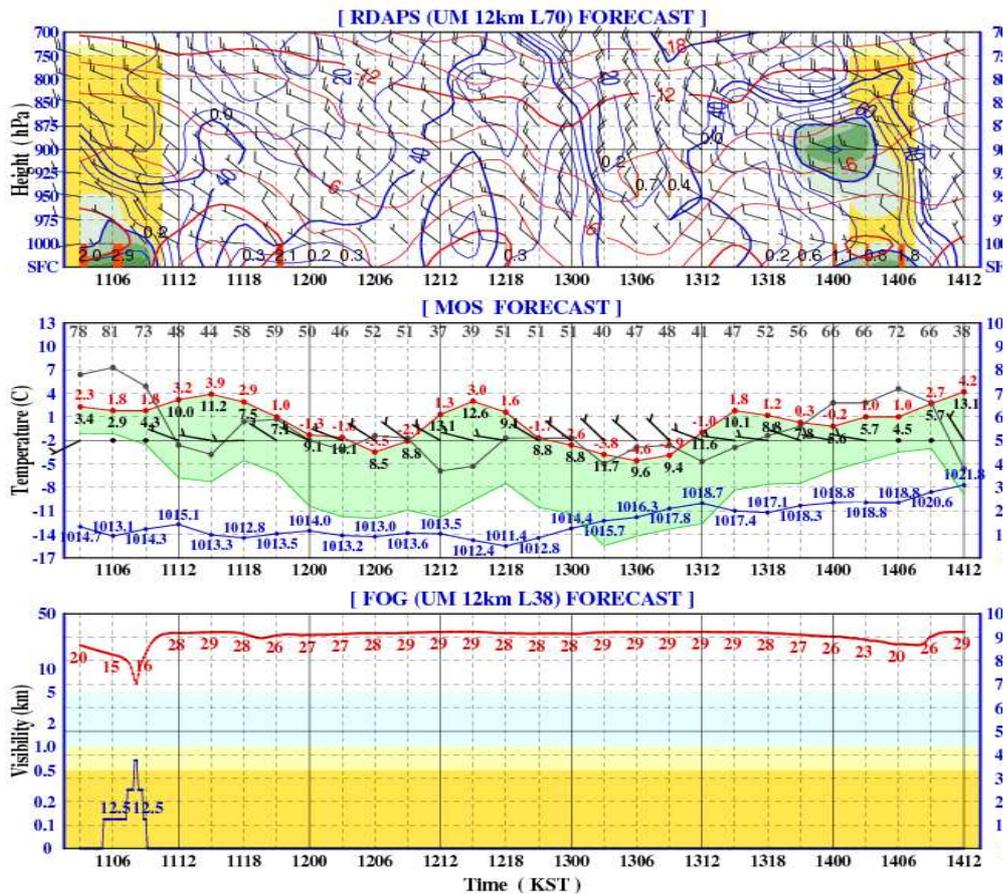


그림 20. 지역예보모델 안개가이던스(인천, 2015.2.10. 21시 예측), 전국 55개 지점 및 14개 공항(공항:안개가이던스 메뉴 참고)

≡ 지역특화 안개가이던스

지역특화 안개가이던스는 전국 116개 지점(공항을 포함한 기상청시정계, 해군 목측, 미공군 시정계 관측지점)에 대한 복사무, 이류무를 예측한다. 고해상(50m) 지표피복자료와 수온정보(환경부 물 환경정보시스템, UM 해수면 온도자료 활용)를 적용하였으며, 지점별 시정계 관측 자료를 넷징하는 과정이 포함되어 있다. 시계열, 공간분포도, 시정변화판단표가 제공되며 기준 시간에서 48시간 예측자료를 제공한다. 또한 각 지점별로 최적화를 수행하였다.

그림 21처럼 31개 해안가 지점은 3km × 3km 격자의 단일컬럼 모드를 적용하였고, 83개 육상 지점은 지표면의 특성이 반영될 수 있도록 1km × 1km 격자를 3 × 3 으로 확대한 다중 컬럼 모드로 시정을 산출한다. 시정은 1.5m 고도의 값이며 km 단위이다. 2010년부터 2012년 까지 선진예보시스템 구축사업의 일환으로 개발되었다.

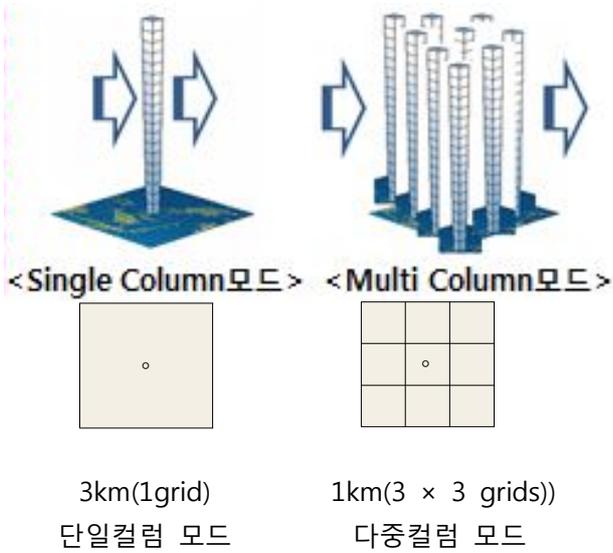
지역특화 안개가이던스의 시정산출은 식(3)과 같다.

$$vis = - \frac{\ln(0.02)}{\beta_{cloud\ water} + \beta_{cloud\ ice} + \beta_{rain} + \beta_{snow}} \quad \text{식(3)}$$

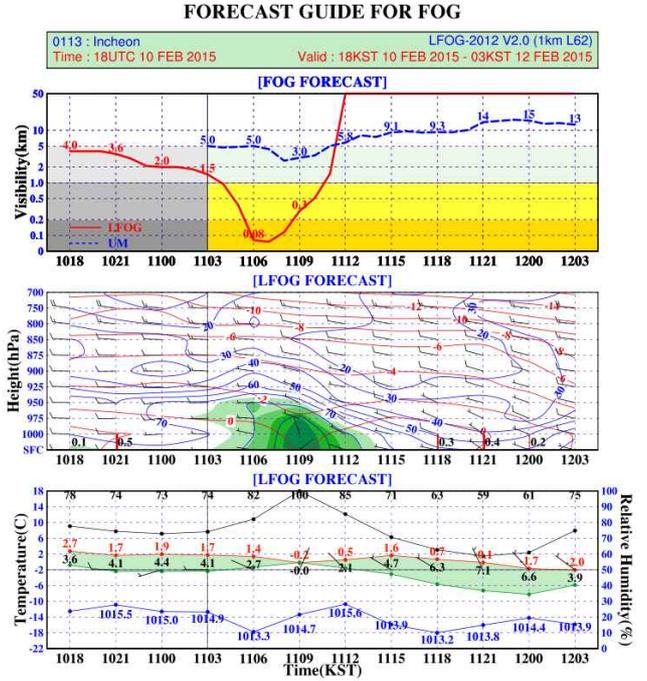
여기서 β 는 소광계수(extinction coefficient)이며, cloud water, cloud ice, rain, snow 입자의 수농도로 인한 감쇄정도를 반영하여 시정을 산출한다.

지역특화 안개가이던스는 지점별로 특화된 안개가이던스로 COMIS-4의 시정계 관측자료 공간분포도와 동일한 컬러테이블을 적용하여 지점별 공간분포도를 제공한다. 짙은 안개를 과다하게 모의하는 경향이 있으나, 다른 모델에 비해 안개/짙은 안개의 발생가능성에 대한 정보로 활용도가 높으며, 지역예보모델 기반의 RFOG보다 국지예보모델 기반의 LFOG의 정확도가 좀 더 나은 편이다.

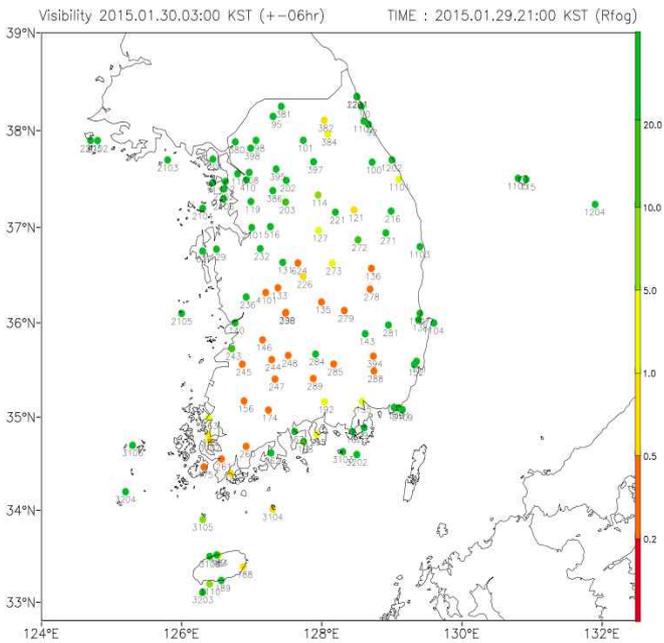
(a) 지역특화 안개가이던스의 모드별 공간해상도



(b) 지역특화: 안개가이던스



(c) 지역특화:안개예측:공간분포



(d) 지역특화:안개예측:시정변화판단표

위험기상 지역특화안개예측시정변화판단표

Now: 2015.02.10.09:00

| 시정 | -48H | | | | | | | | | | | | -24H | | | | | | | | | | | | -12H | | | | | | | | | | | | +12H | | | | | | | | | | | | +24H | | | | | | | | | | | | +48H | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | | | | | | | | | |
| 98 동두천 | 3.0 | 2.8 | 3.1 | 5.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 3.0 | 2.8 | 3.1 | 5.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 3.0 | 2.8 | 3.1 | 5.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 3.0 | 2.8 | 3.1 | 5.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 3.0 | 2.8 | 3.1 | 5.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 |

그림 21. 지역특화 안개가이던스 모드별 공간해상도와 2015.2.10. 21시 예측자료, 공간분포도는 지점이 중첩되지 않도록 48개 지점만 선별하여 표출하고 있음

≡ 구름물리변수 기반의 안개 가이던스

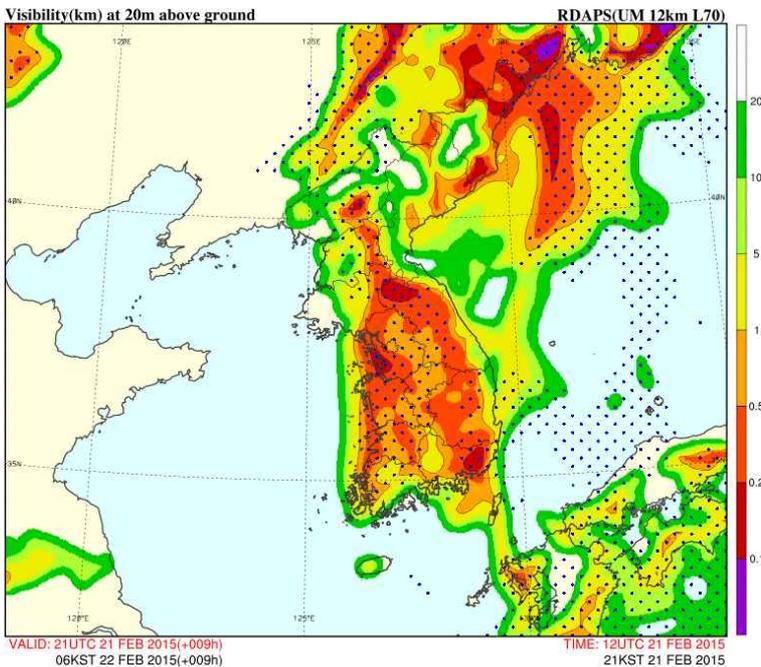
구름물리변수 기반의 안개가이던스는 NCEP의 시정산출 알고리즘을 적용하여 지역예보모델과 국지예보모델의 최하층의 구름물리 변수(Cloud water, Cloud ice, Rain)를 이용하여 시정을 산출한다. 산출식은 기존의 안개가이던스와 동일하며, 식(4)와 같이 모델 최하층의 cloud water, cloud ice, rain 입자의 수농도를 이용하여 소광계수를 구한 뒤 시정을 계산한다.

$$vis = - \frac{\ln(0.02)}{\beta_{cloudwater} + \beta_{cloudice} + \beta_{rain}} \quad \text{식(4)}$$

여기서 β 는 소광계수이다.

지역예보모델은 20m, 국지예보모델은 5m고도의 최하층 구름물리변수에서 산출하며, 기존의 지역예보모델과 국지예보모델의 시정 예상자료에 비해 200m나 100m 이하의 짙은 안개 모의가 가능하다. 구름형태로 예측이 가능한 폭넓은 복사무는 예측이 가능하나, 아주 국지적인 복사무는 예측이 어렵다. 이 안개가이던스에는 강수로 인한 저시정을 구분하기 위해 강수영역을 중첩한 특징이 있다. 그림 22(a)의 경우 저시정의 주요인은 강수로 예상할 수 있으며(전선안개형태), 그림 22(b)처럼 강수역 중첩이 없는 저시정 영역은 복사안개 또는 이류안개로 판단할 수 있다.

(a) 시정예상도(지역예보모델활용)



(b) 시정예상도(국지예보모델활용)

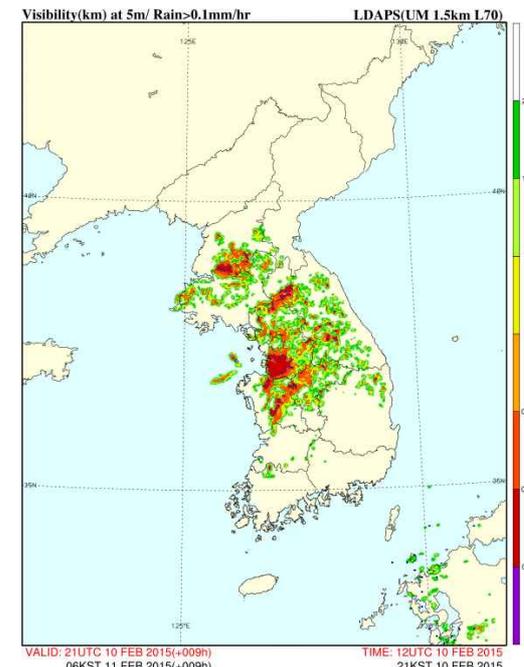


그림 22. 구름물리변수 기반의 안개가이던스. (a) 2015. 2. 22. 06시(서울 00:00~05:40 비, 06:25~07:50 이슬비, 02:15~10:20 안개관측) (b)2015. 2. 11. 06시

≡ 연무가이던스

연무가이던스는 지역예보모델자료와 시정계/습도 관측자료를 이용해 전국 113개 지점의 시정 구간별 발생확률을 통계적으로 산출하여 제공한다. 연무가이던스이긴 하지만 시정 1km 미만의 예측확률은 안개예측에도 활용할 수 있다. 가이던스에 적용한 확률예측방법론은 Random Forests⁴⁾ 방법으로 현재 서리/우박 예보 가이던스에 적용하고 있다. 연무가이던스의 예측구간은 1km 미만, 1~4km, 4~10km, 10km이상 4구간이며, 습도 75%를 기준으로 발생확률을 제공한다. 습도 75%는 박무와 연무를 판단하는데 활용할 수 있다. 100m 이하의 짙은 안개의 경우 관측 통계자료 수가 적어 최소 시정구간이 1km 미만이 되었다(그림 23).

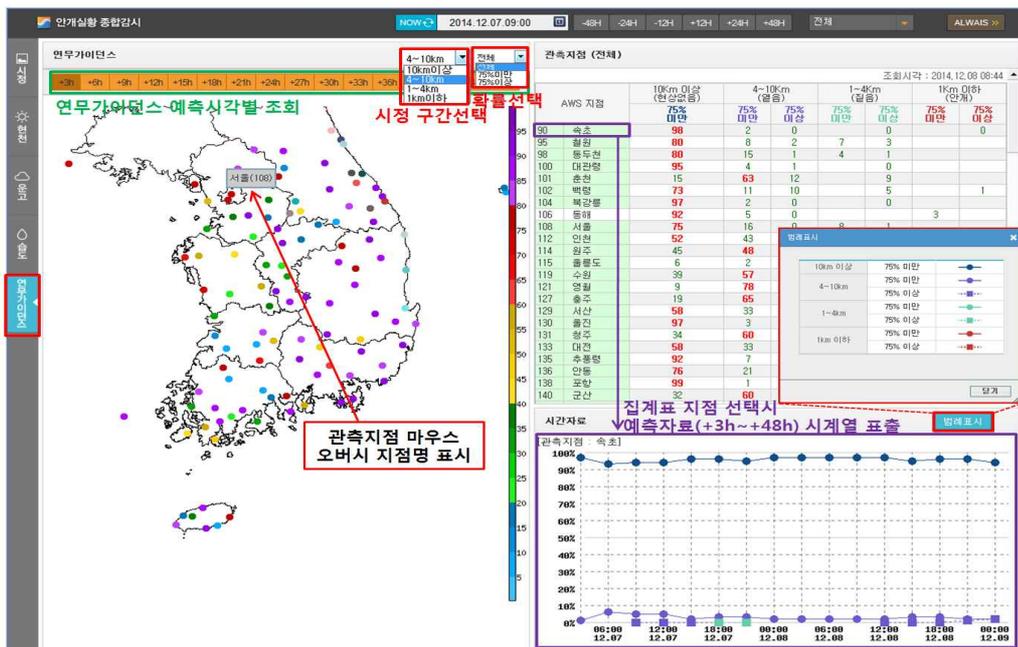


그림 23. 연무가이던스: 분포도(좌), 관측지점별 발생확률(우상), 관측지점별 시계열자료(우하) 표출 위치: 선진예보시스템 > 안개·연무 종합감시 > 연무가이던스

참고문헌

- 김광식, 1992: 기상학사전, 향문사.
 김문옥, 1998: 한반도 주변해역의 해무 분포 특성(The characteristics of sea fog distribution around the Korean peninsula). 전남대학교 대학원 석사학위 논문.
 손희정, 김맹기, 김좌겸, 황명균, 이상천, 2010: 우리나라 안개 발생의 장기 변동 특성 분석. *한국기상학회 학술대회 논문집*, 229-230.
 원덕진, 김상윤, 김경익, 민경덕, 2000: 황해상 해무 발생시의 기상 및 해양 요소의 특성 분석. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **36(6)**, 631-642.
 임헌호, 이화운, 이순환, 2005: 인천국제공항에서 발생한 안개의 특성분석. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **41(6)**, 1111-1123.
 최효, 2001: Numerical Prediction on Fog Formation Affected by the Yellow Sea and Mountain. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **37(3)**, 261-282.
 AMS Glossary, 2000: AMS 전자기상사전. <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>
 Kunkel, 1984: Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23**, 34-42.
 Köhler, H., 1936: The nucleus in and the growth of hygroscopic droplets. *Trans. Faraday Soc.*, **32**, 1152p.

4) Random Forests 방법: 동일 데이터로부터 다수의 의사결정나무를 형성하여 정확도가 높은 분류모형을 얻는 통계적 방법으로 입력변수를 무작위로 선택하여 나무를 성장시키는 방식으로 각 의사결정나무의 정확도는 낮으나, Forests최종 결과의 정확도는 높다.