

뇌전(thunder & lightning) 발생 원인과 예측

■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술분석과(내선 1657) ■ 발행일: 2015년 5월 26일(화)

낙뢰는 정전, 화재, 시설물 파괴와 인명 피해 등 매우 좁은 지역에 큰 피해를 남기는 기상 현상이다. 우리나라에서 낙뢰의 89%는 여름철에 발생하며 7월에 가장 많은 발생빈도(39%)를 보인다(2005~2014년(10년 평균), 2014년 낙뢰연보). 2007년 7월 29일 낮에 북한산에 낙뢰가 떨어지면서 등산객 5명이 숨지는 등 인명피해가 있었으며, 2006년 6월 9일 비행 중에 낙뢰로 인한 기체 손상으로 비상 착륙을 하는 사고가 발생하기도 하였다. 이처럼 낙뢰는 항공운항에서도 위협적인 기상요소다. 이번 호에서는 뇌전의 발생 원리와 주요 발생사례를 이용한 예측 방법에 대해 설명한다.

❖ 뇌전(lightning & thunder)이란?

번개(lightning)는 발달한 구름대에서 발생하는 전기적 현상으로 구름 내부나 구름과 구름사이로 혹은 구름에서 주변 대기나 지면으로 이동하는 섬광을 말한다. 이중 구름에서 지면으로 연결되는 번개 불빛을 낙뢰(cloud-to-ground lightning)라고 부른다. 또한, 번개의 섬광이 보이는 곳의 공기 온도는 순간적으로 최대 3만°C에 이른다. 급격한 가열에 의해 대기는 폭발적으로 팽창하면서 충격파를 발생시키는데, 이때 천둥(thunder)이라는 폭음이 동반된다. 천둥과 번개현상을 합쳐 뇌전현상이라고 부른다.

❖ 번개의 특징

번개의 섬광은 빛의 속도($3 \times 10^8 \text{m/s}$)로 이동하므로 발생 즉시 사람들은 그 빛을 볼 수 있으나 천둥소리는 음속(330m/s)으로 진행하므로 발생 거리에 따라 빛이 보인 후 시간차를 두고 천둥소리가 들린다. 번개의 섬광을 본 후 6~7초가 지났다면, 번개 발생 지점과의 거리는 약 2km 정도 떨어져 있다고 생각할 수 있다. 그렇지만 번개의 섬광은 보이는데 천둥소리가 들리지 않는 경우도 있다. 천둥소리의 음파가 대기에 의해 굴절되고 감쇄되기 때문이다. 음파(sound wave)는 찬 공기보다 따뜻한 공기에서 진행속도가 더 빠르다. 뇌우는 고도상승에 따라 기온이 급격히 감소하는 불안정 대기에서 형성되므로 음파는 지면 근처의 따뜻한 대기 중에서 더 빨리 이동하고 위(상층대기)로 굴절됨으로써 지상의 관측자로부터 멀어진다. 따라서 낙뢰 발생 위치에서 약 15km 이상 떨어진 위치에서는 천둥소리가 들리지 않을 수 있다(대기환경과학 2009).

❖ 번개의 발생원인

번개가 일어나려면 서로 반대되는 전하(양전하와 음전하)를 띤 두 영역이 하나의 구름에 함께 존재해야 한다. 전기적 성질을 보이는 음전하와 양전하가 구름 내에 발생하기 위해서는 다음과 같은 구조가 필요하다.

1) 불안정대기와 강한 상승기류

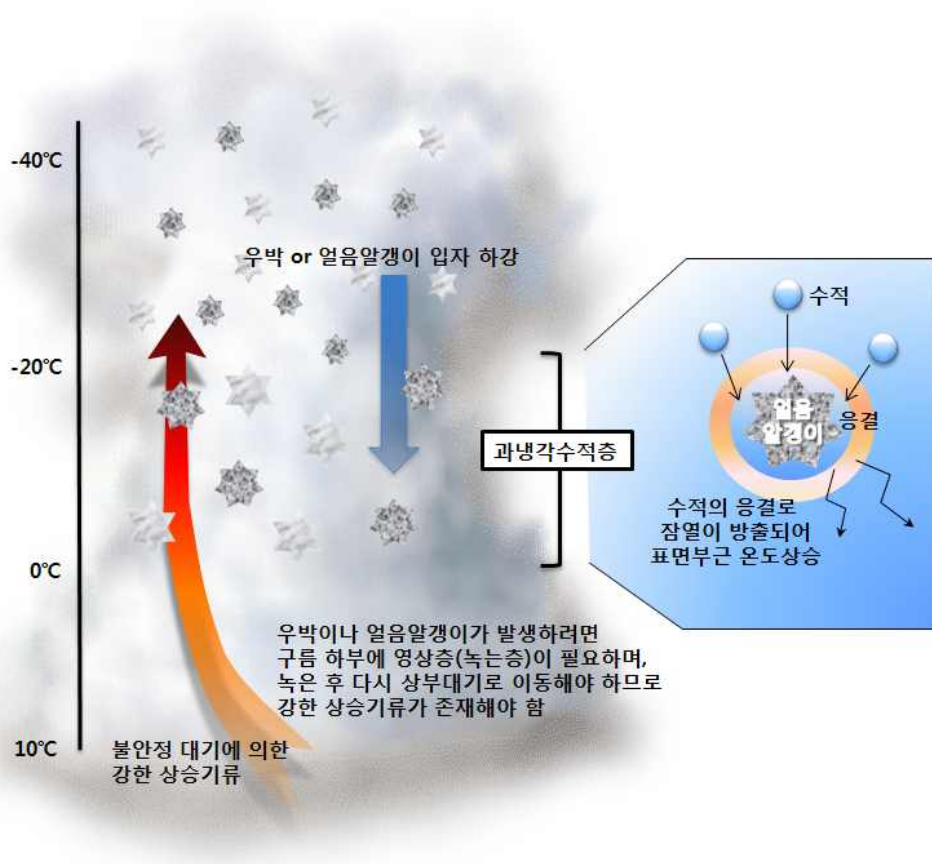


그림 1. 음전하를 만들기 위한 구름내부 모식도

그림 1과 같이 불안정한 대기로 인한 강한 상승기류가 존재해야 한다. 번개가 발생하기에 가장 좋은 조건은 하층은 따뜻하고 습하며, 상층은 차가운 기온분포로 인해 우박, 토네이도가 나타날 수 있을 정도로 매우 불안정한 대기이다. 왜냐하면 불안정으로 인한 강한 상승기류가 우박과 같은 큰 얼음알갱이 입자들을 중력에 대응하여 구름 속에 오래 머물고 성장시키는데, 이 얼음입자들이 번개를 발생시키는 음전하를 만드는데 중요한 역할을 하기 때문이다. 구름 내부에서 빙정이 성장한 후 하강하여 영상의 기온층을 지나면서 녹고, 다시 강한 상승기류에 의해 영하의 구름 속으로 이동하여 얼어붙을 경우 우박(얼음알갱이)이 성장한다.

2) CAPE(Convective available potential energy; 대류가능잠재에너지) 구역 내 Main charging zone(-20~-10°C) 존재

그림 2의 오른쪽 모식도와 같이 구름 내부에 Main charging zone(charge reversal zone이라고 고도 함)이라고 불리는 -20~-10°C의 과냉각 수적층이 있어야 한다. 우박과 같은 큰 얼음알갱이는 과냉각수적이 있는 -20°C보다 높은 기온에서 얼음알갱이 주위로 수적이 달라붙어 성장한다. 이 때, 수적은 얼어붙는 상변화 과정을 통해 잠열을 방출하므로 얼음알갱이 표면의 공기온도는 빙정이나 작은 얼음조각보다 높아진다.

이와 같이 온도가 상대적으로 높은 얼음알갱이들이 온도가 낮은 빙정들과 접촉할 때 중요한 전기 현상이 일어난다. 상대적으로 따뜻한 물체로부터 찬 물체로 양(+전하)의 이동이 발생하기 때문이다. 큰 얼음알갱이의 주변은 음(-)전기를 띠게 되고 빙정이나 부서진 얼음파편과 같은 작은 얼음 주위로는 양(+전하)가 모이게 된다. 양(+전하)를 띠는 얼음파편이나 빙정은 크기가 작기 때문에 상승기류를 타고 구름상부로 이동하고, 음(-)전하를 보이는 무거운 얼음알갱이는 구름 내부에 위치하거나 구름의 하부로 내려온다.

이와 같은 메커니즘을 통해 그림 2의 모식도와 같이 구름의 상부는 양(+)전기를 띠고 중간층은 음(-)전기를 띠며 녹는 고도 부근에서는 양(+전하)역이 나타나기도 하며, 그 외 구름 하부에서는 대부분 혼합전하 구역이 위치한다.

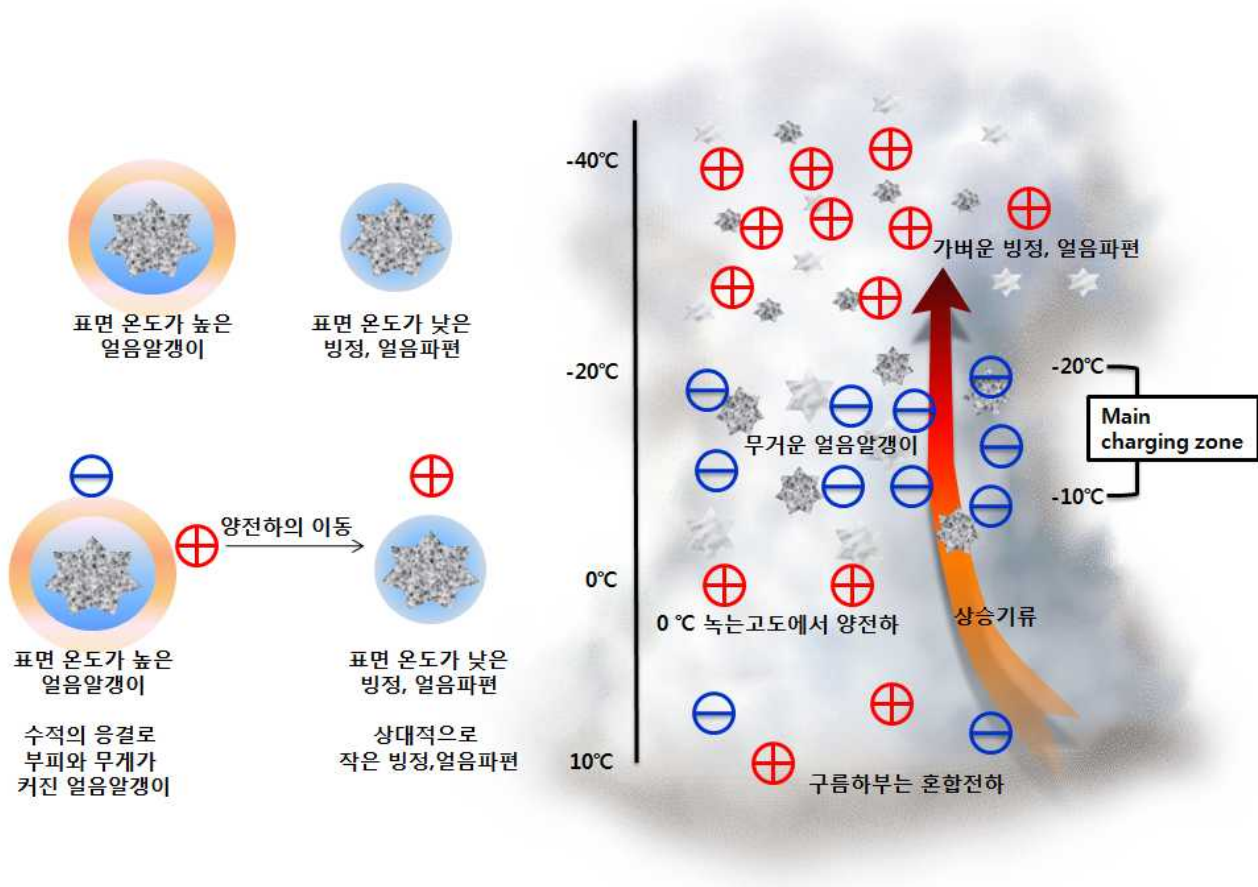


그림 2. 발달한 구름내부의 양전하와 음전하의 분포

낙뢰

서로 다른 전하끼리 끌어당기는 전기의 속성 때문에 구름 하부의 음(-)전하는 바로 그 지상에 양(+)-전하를 이끈다(그림 3). 지상의 양전하는 결국 발달한 구름이 어디에 위치하느냐에 따라 달라진다. 일반적으로 우박이나 강한 비가 내릴 때 낙뢰 가능성이 증가하는데, 이는 음(-)전하를 띠는 큰 얼음알갱이들이 구름하부로 이동하여 지상에 양(+)-전하가 집중되는 지역(지면에서 솟아 오른 물체로 고층건물이나 나무)에 강한 전류를 만들기 때문이다. 강한 강수 이후에도 대기 중 하층에 강한 하강기류에 의해 음(-)전하를 구름하부로 이동시켜 낙뢰를 발생시키기도 한다.

그림 4는 낙뢰가 발생하는 과정을 시간(백만분의 1초) 순으로 보여준다.

(a)와 (b)는 발달한 구름내부에 전하의 분포를 보여주며, (c)~(e)는 stepped leader(계단선도)로서, 구름하부에서 지면으로 전자가 방출되는 과정이다. 이 전자의 방출거리리는 1회에 50~100m이며, 약 100만분의 50초 간격으로 반복된다(대기환경과학 2009).

구름에서 지면으로 내려오는 음(-)전하는 지면의 양(+)-전하를 만나고, 지면으로 흐른다. (f)와 (g)는 return stroke(되돌이 뇌격)로서, 음(-)전하가 내려온 계단선도를 따라 지면에서 구름으로 100분의 1초라는 짧은 시간에 강한 섬광을 발생시킨다. 이후 (j)~(l)처럼 처음의 낙뢰와 같은 순서의 dart leader(화살선도)가 나타난다. 이 화살선도는 전위차가 낮아진 상태로 발생하므로 첫 번째(f~g) 되돌이 뇌격에 비해 강도가 약하다.

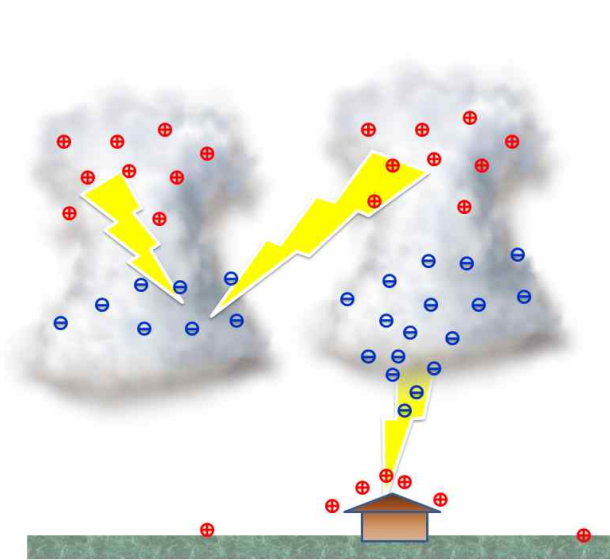


그림 3. 전하의 분포에 따른 낙뢰(번개) 발생 모식도

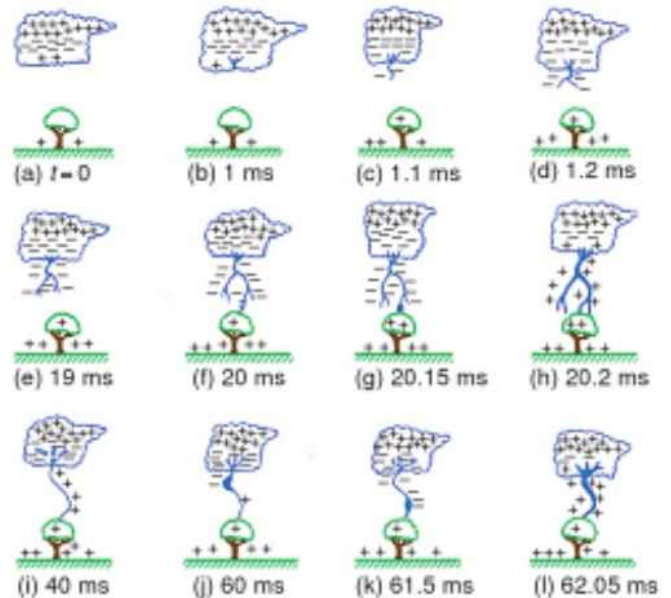


그림 4. 낙뢰발생의 각 단계를 보여주는 모식도(Uman 1987), ms는 micro seconds(백만분의 1초)를 의미함

Tip !

- ☞ 구름 하부의 대기가 건조할 경우 낙뢰가 발생하기 어렵다 : 건조한 공기가 절연체 역할을 함
- ☞ 낙뢰는 비가 오거나 지표와 하층대기에서 충분히 습한 상태가 유지될 때 발생

❖ 뇌전 예측시 고려사항

번개는 발달한 구름 내부에서 나타나므로, 먼저 대류형 구름이 발생할 수 있는 조건에 대해 분석해야 한다. 다음으로 충분한 음전하와 양전하가 만들어질 수 있는 연직기온분포가 보이는 지를 찾아내야 한다.

번개가 발생할 수 있는 대류형 구름의 발생 형태는 크게 2가지로 구분할 수 있다.

1) 지면 가열에 의한 열적 불안정대기

낮에 지표가열로 기온이 상승하여 상층과의 큰 기온차로 인한 불안정 대기를 만드는 구조로서, 상층의 차가운 공기가 위치한다면 대류가 발달하기 더욱 좋다. 그림 5와 같이 지상의 기온이 가장 올라가는 15시를 전후로 CAPE가 하층부터 상층대기까지 깊게 분포할 경우 뇌전 가능성이 높아진다.

그림 5를 참고하여 뇌전이 발생하는데 꼭 필요한 요소는 다음과 같다.

CAPE(하늘색 구역)가 $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$ 기온, 0°C 이상 기온구역에 존재해야 한다. $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$ 는 Main charging zone으로 얼음알갱이들이 위치하고, 많은 음전하가 분포하는 구역이다. 0°C 이상(영상기온) 구역에서 CAPE는 눈(snow)이 녹은 빗방울을 상승시켜 얼음으로 만들 수 있는 힘을 가지고 있다. 만약 앞의 조건을 모두 만족하고, -40°C 이하에서도 CAPE가 위치한다면, 우박 발생 가능성도 높아진다.

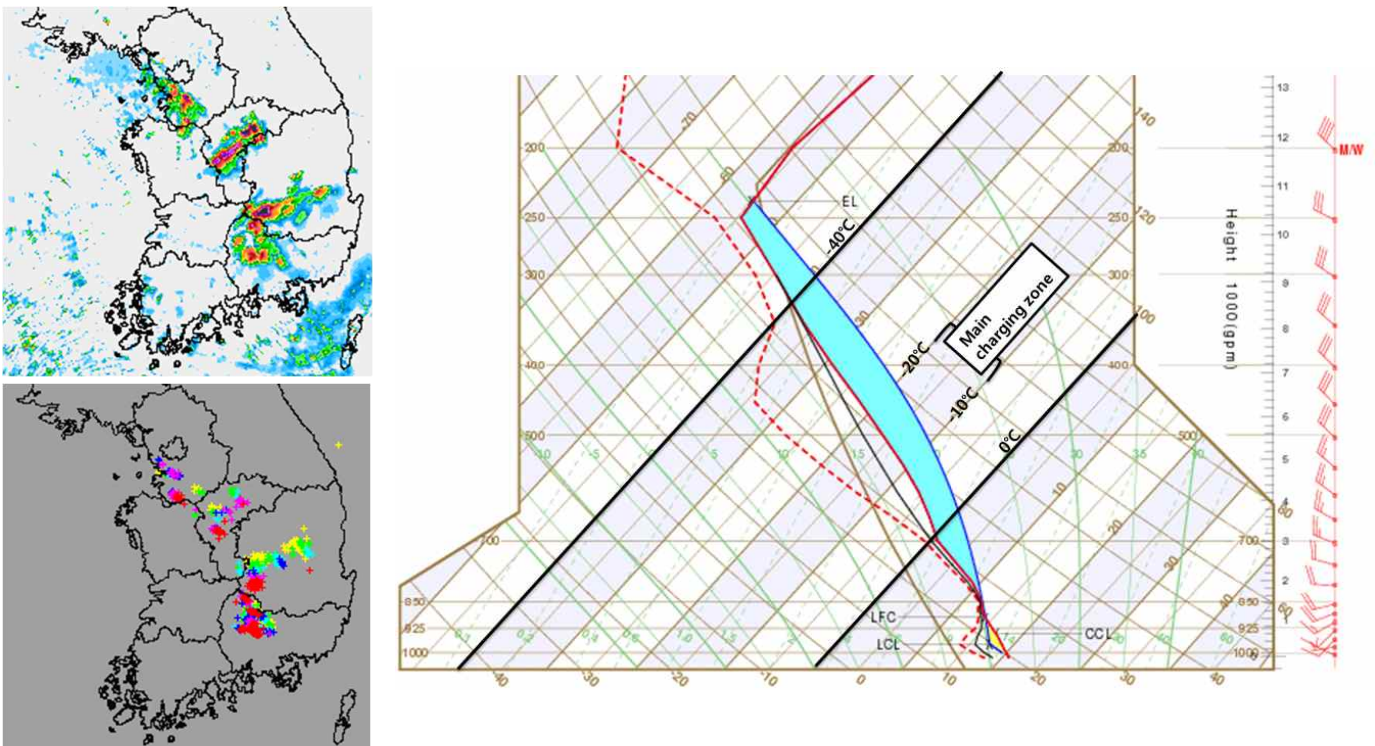


그림 5. 2012년 5월 28일 15시 레이다, 낙뢰 실황과 오산 단열선도(오른쪽) UM 지역모델 분석장

2) 시스템에 의한 역학(운동학)적 불안정대기

저기압시스템에 동반되어 하층대기에서 강한 바람(주로 남서풍의 하층제트)에 의한 수렴과 상승운동으로 인한 불안정대기에서 발생하는 뇌전현상이 있다.

그림 6은 뇌전을 예측하지 않았으나 관측된 사례(2015년 5월 19일 18시)로서 운동학적 불안정대기에서 발생한 뇌전현상이다. (c)의 850hPa 수렴장을 보면, (a)레이더의 강수구역과 비슷하게 수렴의 중심 구역이 서해상에서 중부지방으로 위치해 있다. 이 수렴지역으로는 25kts 이상의 하층제트가 보인다.

(d)의 연직 수렴·발산분포를 살펴보면, 강수구역에 하층수렴과 상층발산의 구조를 보이므로 상승기류가 발달하기 좋은 연직구조임을 알 수 있다. 초록색 선으로 표시된 등풍속선 분포를 살펴보면, 북쪽의 300hPa 부근에 jet core가 있으며, 북쪽과 남쪽으로 등풍속선의 고도차이가 크게 벌어져 북쪽의 차가운 공기와 남쪽의 따뜻한 공기 사이에 대류 발달 구역(하층수렴, 상층발산)이 위치하고 있음을 알 수 있다.

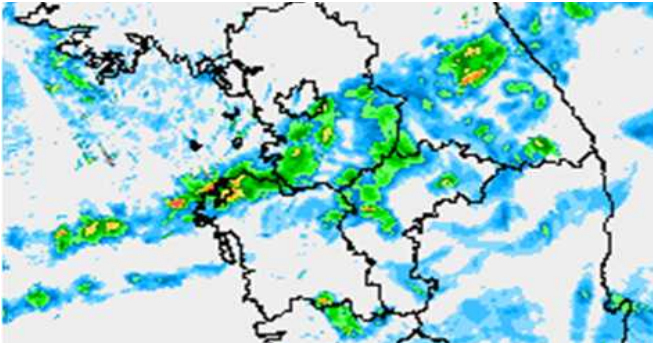
뇌전이 발생한 지역과 가까운 천안의 단열선도(e)를 살펴보면, 850hPa보다 낮은 고도에서는 비교적 안정한 기온분포를 보이며, 850hPa부터 약 400hPa 고도까지는 조건부불안정의 기온분포를 보인다. 오른쪽 바람 분포에서, 850hPa에 서남서풍의 25kts 하층제트가 있다. (c)와 (d)에서 보았듯이 850hPa에 강한 수렴과 상층대기에 발산이 위치하므로, 하층제트가 유입되면서 조건부 불안정이 시작되는 850hPa 고도에서부터 CAPE 영역을 분석할 필요가 있다.

지상을 기준으로 CAPE를 분석하면, 매우 적은 범위(하늘색 구역)로 불안정 구역이 나타나지만, 850hPa 고도를 기준으로 분석하면 400hPa 고도 이상으로 깊은 CAPE 영역이 나타난다. 850hPa 고도에서 시작하는 CAPE 구역은 0°C이상 구역과 -10~-20°C 구역이 모두 포함되어 있으므로 뇌전이 발생할 수 있는 조건을 만족하고 있다.

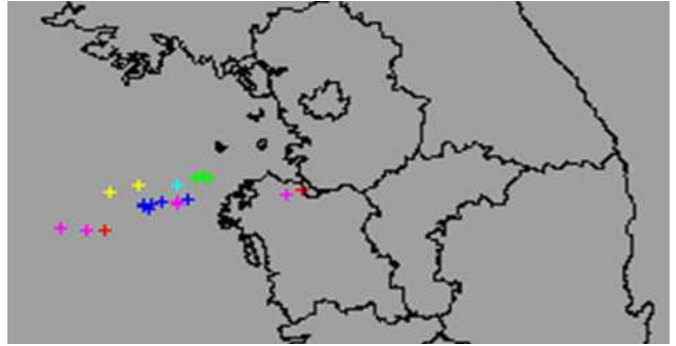
Tip !

- ☞ 지상가열에 의한 대기불안정 : 지상의 기온과 이슬점 온도로 CAPE 영역 및 불안정도 분석
- ☞ 하층제트에 의한 대기불안정 : 850hPa의 기온과 이슬점 온도로 CAPE 영역 및 불안정도 분석

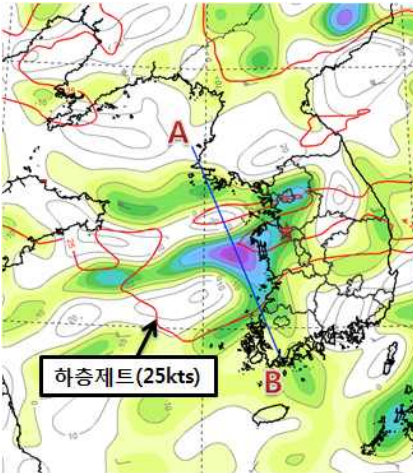
(a) 레이더



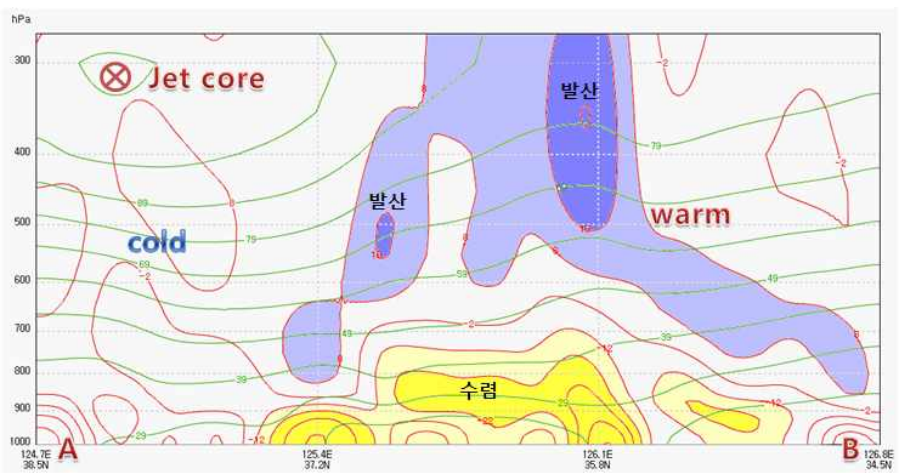
(b) 낙뢰



(c) 850hPa 수렴도



(d) (c)의 A, B 연직 단면도(녹색선은 등풍속선)



(e) (c)의 붉은색 별로 표시한 천안의 단열선도

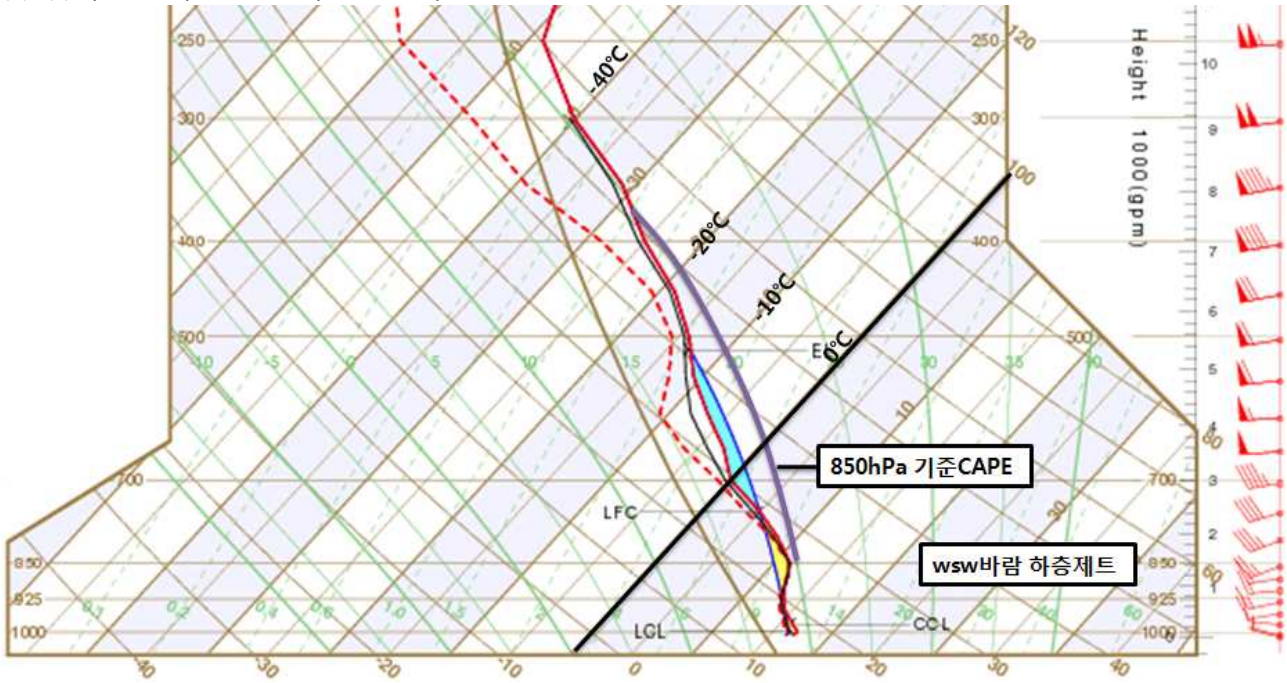


그림 6. 2015년 5월 19일 18시(KST) 뇌전사례, (c), (d), (e)는 UM 지역모델 06UTC 생산모델의 +3시간 예측자료

현업 활용을 위한 낙뢰가이던스 소개

표 1. 낙뢰관련 자료 요약표

구분	모델종류	생산시간 (단위:KST)	예측시간	자료제공시기
낙뢰가이던스	RDPS	03, 09, 15, 21	+12시간 (3시간간격)	'10.12.14. 09시~
구름물리 낙뢰가이던스	RDPS GDPS ECMWF	03, 09, 15, 21 (단 ECMWF는 09,21)	+84시간 (3시간간격)	'15.5.27. 09시~
초단기 동네예보 낙뢰확률예측자료	KLAPS	매1시간 간격	+4시간 (1시간간격)	'11.5.16.21시~

* 표출위치: 'COMIS-4> 일기도 > 위험기상 > 낙뢰 > 낙뢰가이던스/구름물리: 낙뢰

* 단, 초단기 동네예보 낙뢰확률예측자료는 동네예보편집기와 기상청홈페이지>육상예보>동네예보>그래픽에서 조회

1. 낙뢰가이던스

낙뢰가이던스는 지역예보모델이 예측한 최대 CAPE(J/kg, 100J/Kg이상)와 대류성 강수영역(5mm/3hr)을 보여주며, 6시간 이전의 예측자료에는 낙뢰 관측자료(1시간 간격의 이전 3시간 누적자료)를 중첩시켜 표출한다. 예로 그림 1처럼 2015년 4월 2일 09시 기준 낙뢰가이던스는 상단에는 전시간대인 03시의 예측자료와 관측된 낙뢰자료를 중첩시켜 보여주며, 하단에는 해당시간의 예측자료를 3시간 간격으로 최대 12시간까지 보여준다. 03시 예측시간 기준 +09h, +12h시 자료는 09시 예측시간의 +03h, +06h와 같은 시간대 자료이다. 일반적으로 실제 낙뢰 발생영역에 비해 예상영역이 넓게 모의되는 경향이 있다.

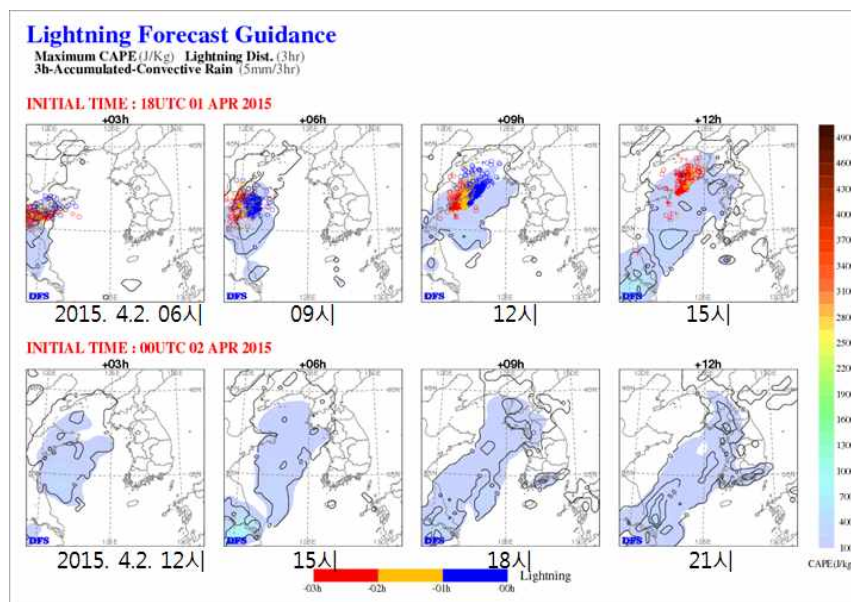


그림 7. 지역예보모델(RDPS)의 낙뢰가이던스

2. 구름물리: 낙뢰가이던스

구름내 낙뢰의 발생과 관련된 물리변수는 표 2과 같이 LCL(Lifting condensation level; 상승응결고도)의 온도, CAPE, EL(Equilibrium Level; 평형고도)의 온도이다.

표 2. 적란운 전기발생 조건(물리변수)

물리변수	조건	목적
LCL	$\geq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	과냉각 수적 존재 확인
CAPE (0~-20°C 층)	$\geq 100\sim 200\text{ Jkg}^{-1}$	Charge-reversal 층(그림 2 참고)으로 향하는 혼합층에 충분한 상승운동 존재 확인
EL 온도	$\leq -20\text{ }^{\circ}\text{C}$	구름꼭대기가 charge-reversal 층(-15~-20도) 상층임을 확인

구름물리 기반의 낙뢰가이던스는 적란운에서 전기가 발생할 대기 조건과 대류가 활발한 깊은 대류운의 경우 강수를 동반한다는 점에 착안하여, 낙뢰가 발생 가능한 구름내 물리변수들의 조건을 이용한 CPTP(Cloud Physics Thunder Parameter, 미국 NOAA의 스톰예보센터(Storm Prediction Center)의 Bright et al.(2005) 개발)와 강수량을 활용하여 만들어진다. CPTP는 낙뢰가 발생 가능한 구름내 물리변수들의 조건을 이용하며, 식은 아래와 같다.

$$CPTP = \frac{(-19^{\circ}\text{C} - T_{EL})(CAPE_{20} - K)}{K}$$

여기서 T_{EL} 은 EL 온도($^{\circ}\text{C}$), $CAPE_{20}$ 는 Most Unstable Parcel의 0~-20°C 층 CAPE(즉, Most Unstable Parcel의 LCL 기온 $> -10^{\circ}\text{C}$. LCL 기온이 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ 이면 $CPTP=0$ 임), K 는 상수로 100~200 Jkg^{-1} 값을 적용(6~7 m/s 의 상승기류가 있으려면 실제 대기에서 약 100~200 Jkg^{-1} 의 CAPE 필요하며, 구름물리 안개가이던스에서는 100 Jkg^{-1} 을 적용함).

구름물리 낙뢰가이던스에서의 낙뢰는 구름-지면방전뿐만 아니라 구름내, 구름과 구름사이, 구름과 주변공기와의 방전을 모두 포함하는 개념이다.

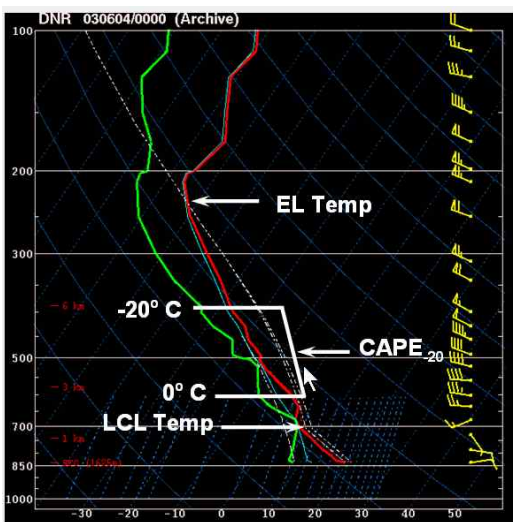


그림 8. 단열선도 상에서 LCL 고도의 온도, CAPE(0~20°C), EL 고도의 온도

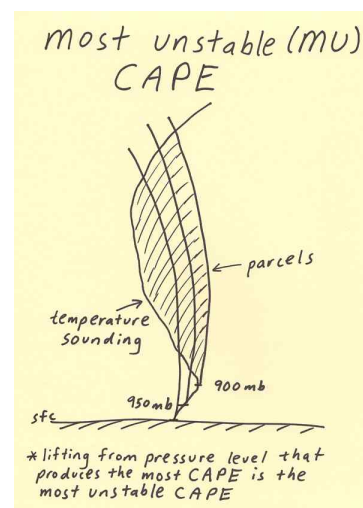
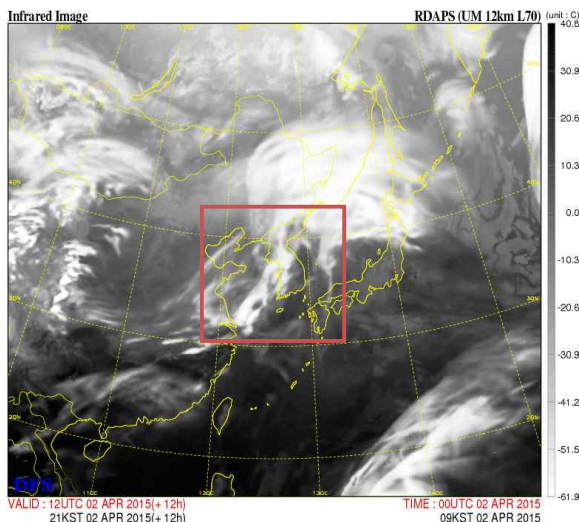
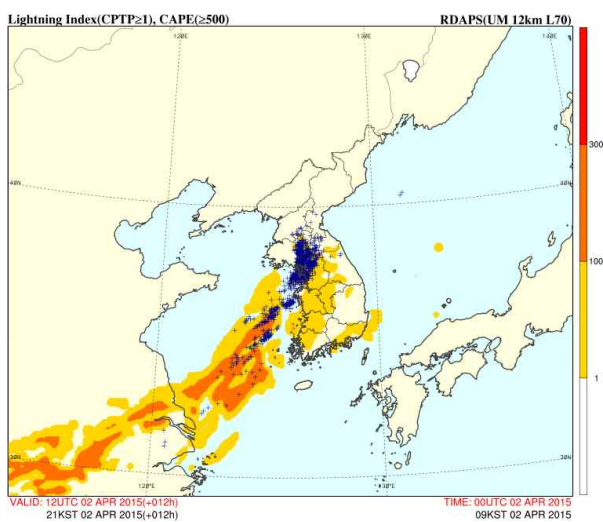


그림 9. MU(Most unstable) CAPE 개념: 그림처럼 공기구의 기압면을 변화시키면서 찾은 가장 큰 CAPE 값을 의미함

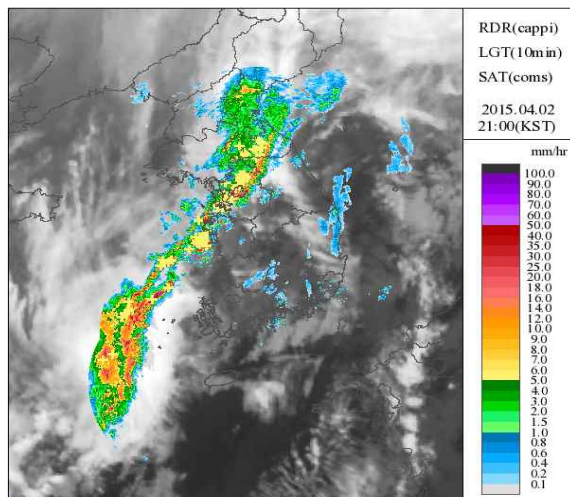
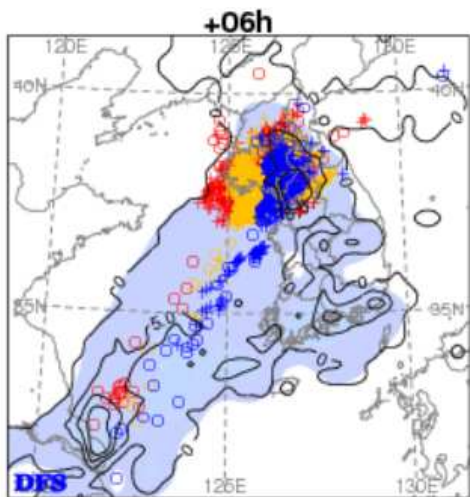
구름물리 낙뢰가이던스는 RDPS와 GDPS의 경우 0.25mm/hr 이상의 강수가 있고, ECMWF는 0.5mm/3hr의 강수가 있으면서, CPTP \geq 1 인 경우만을 필터링하여 만들어진 CPTP 공간분포도이다. 이전 낙뢰가이던스에 비해 구름물리 낙뢰가이던스는 낙뢰발생가능지역을 전반적으로 광범위하게 과대 모의하는 경향을 줄였다. 표출되는 그림의 컬러테이블은 1, 100, 300이상 3단계로 구분하였지만, CPTP 값이 1 이상인 경우 낙뢰가 발생할 수 있는 조건을 만족하므로, 물리적으로 1이상의 값이면 유효한 값이라고 볼 수 있다. 구름물리 가이던스의 예측시간은 GDPS의 3시간 간격 예측시간에 맞춘 +84시간이며 3시간간격으로 만들어진다.

구름물리 낙뢰가이던스의 경우 저기압 시스템에 동반되어 나타나는 하층 제트에 의한 대기 불안정에 의한 낙뢰 예측은 약간의 위상차를 보이거나 비교적 낙뢰의 발생과 이동을 잘 예측하는 편이다(그림 10 참고).



a) 2015.4.2. 21시 낙뢰가이던스(2015.4.2. 09시 예측)와 낙뢰자료 중첩영상. +표시는 구름방전을 포함한 1시간 누적 낙뢰임

b) 구름물리 낙뢰가이던스는 낙뢰가 발생할 수 있는 대류운을 가정하여 산출되므로, RDPS 적외체널 구름모의영상(2015.4.2. 21시(2015.4.3. 09시 예측))의 구름영역 중 잘 발달한 대류운영역과 유사함

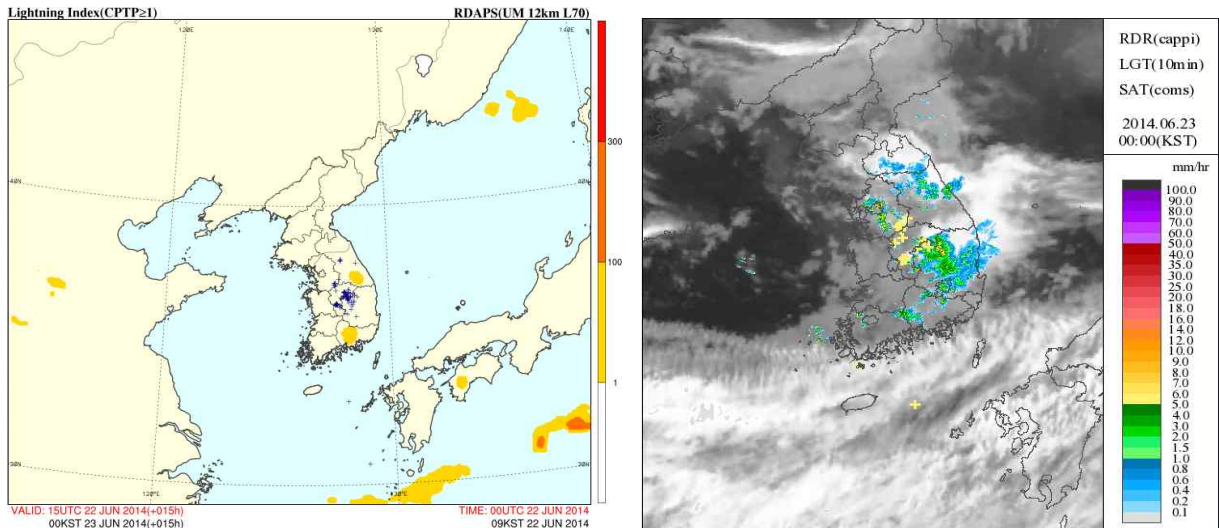


c) 기존 낙뢰가이던스의 2015.4.2. 21시(2015.4.2. 15시 예측)과 낙뢰관측자료를 중첩한 영상(우). (○:양극성, +: 음극성 낙뢰 구분표시, 구름방전 포함한 낙뢰임). 낙뢰 예측 범위가 넓고, +12시간만 예측함

d) 2015.4.2. 21시 천리안 적외+레이더+낙뢰(10분자료) 중첩 영상. 구름물리:낙뢰가이던스에서 CPTP가 1 이상인 영역과 레이더에코영역/낙뢰 영역간에 약간의 위상차이가 있으나 비교적 낙뢰를 잘 모의했음

그림 10. 구름물리:낙뢰가이던스 사례(2015.4.2.)

반면에, 국지적으로 발생하는 대기불안정에 의한 낙뢰의 경우 일부 낙뢰의 발생을 예측하지만, 실제 관측자료와 비교하면 위치차이가 큰 편이다(그림11 참고).



a) 2014.6.23. 00시 낙뢰가이던스(2014.6.22. 09시 예측)와 낙뢰자료 중첩영상. 가이던스는 강원남부와 경남 지역에 낙뢰를 예상했으나 충북지역에 낙뢰가 발생
 b) 2014.6.23. 00시 천리안 적외+레이더+낙뢰(10분 자료) 중첩 영상

그림 11. 구름물리:낙뢰가이던스 사례(2014.6.23.)

3. 초단기 동네예보- 낙뢰확률예측자료

초단기 동네예보의 낙뢰확률예측자료는 +1시간, +2시간까지는 이전시간관측과 현재시간 낙뢰관측 자료를 이용하여 낙뢰이동벡터를 산출하고 1시간동안의 낙뢰관측자료 외삽 예측장을 산출한 뒤 그 결과를 확률로 변환하여 제공한다. +3시간, 4시간 예측자료는 KLAPS 예측장자료를 활용하여 미국 NOAA에서 개발한 뇌전가능지수(Lightning Potential Index; LPI)를 적용하여 산출한다(이용희 외, 2011). 낙뢰 발생확률 표현은 발생확률이 30% 미만인 경우는 없음, 30%이상~50%미만인 경우는 낮음, 50%이상~70%미만인 경우는 보통, 70% 이상인 경우는 높음으로 표시한다.

뇌전 가능지수(Lightning Potential Index; LPI)는 아래와 같은 불안정지수와 뇌전 발생에 필요한 기상요소를 고려한다.

- Mixed Layer CAPE (~3,000m)
- Lifted Index
- Theta-E lapse rates at 600hPa
- 850hPa temperature
- Precipitable water
- Relative humidity at -10°C

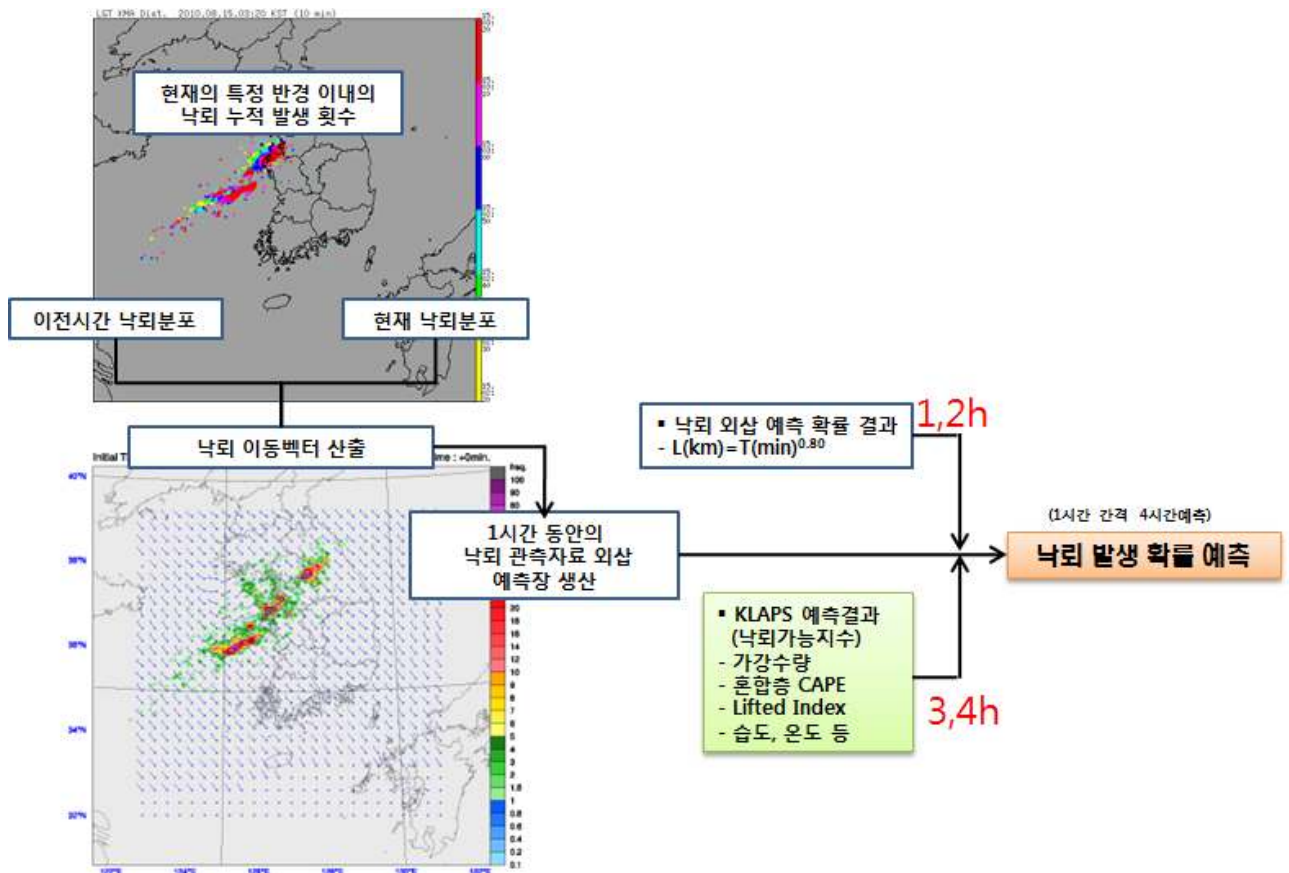


그림 12. 초단기예보 낙뢰확률예측과정(이용희 외, 2011)

참고문헌

- 김광식, 1992: 기상학사전, 향문사.
- 기상청, 2014: 2014년 낙뢰연보
- 대기환경과학 2009: 민경덕, 민기홍 역 제5판, C. Donald Ahrens 저, p248-253.
- 이용희 외, 2011: 2011년 초단기예보 낙뢰요소 추가 및 예보 지역확대(PPT), 2011 지경노세미나
- AMS Glossary, 2000: AMS 전자기상사전. <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>
- Bright, Wandishin, Jewell and Weiss, 2005: A Physically Based Parameter for Lightning Prediction and its Calibration in Ensemble Forecasts. Conference on Meteorological Application of Lightning data of American Meteorological society.
- http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/fall06/nats101s3/lecture_notes/nov21.html
- Uman M. 1987: The lightning discharge. *Academic Press, Inc.*, New york, pp12.
- Wallace J. M. and P. V. Hobbs 2006: Atmospheric science. 2nd Edition, *Academic Press*, p252-258.