

< 훈련결과보고서 요약서 >

성 명	송 태 준		직 급	기상주사
훈 련 국	영국	훈련기간	2021.3.22. ~ 2022.9.21	
훈련기관	영국기상청		보고서 매수	115 매
훈련과제	고품질 기상관측자료 생산을 위한 최적 관측장비 구성 · 도입 · 운영 및 품질관리 기술 습득			
보고서 제목	고품질 항공기상관측자료 생산 · 활용을 위한 수치모델 기반의 최적 관측장비 구성 및 품질관리 기술 습득			
내용요약	<p>1. 영국기상청 관측망 현황</p> <p>영국기상청은 영국 본토와 영국의 해외영토(세인트헬레나 섬, 포클랜드 섬 등)에서 기상관측을 실시하고 있다. 영국기상청의 관측 목적은 단기 및 중기예보를 생산할 수 있는 수치모델의 입력자료 활용, 국가적인 현재 날씨에 대한 정보, 위험기상의 발생 빈도와 기후변화에 대한 정보에 활용하기 위한 것이다.</p> <p>지상관측은 다양한 장비를 활용하여 기온, 기압, 바람, 습도, 일사 등의 기상요소에 대하여 관측을 실시하고 있다. 지상관측소는 영국 전역에 폭넓게 걸쳐 있으며 일부는 지상관측뿐만 아니라 기후적인 목적, 고객의 요청에 따른 기온 및 바람 관측, 강수량 집중관측, 수자원 관리, 홍수 예측 등을 위한 관측을 겸하고 있다. 관측망에 대한 해상도는 약 40km 로 저기압이나 전선통과에 대한 기상관측이 신속히 가능하도록 구성되어 있다. 대부분의 지상관측망은 완전히 자동화되어 있으며 기상관측 후 영국기상청 본부(Exeter)로 보내어진다. 지상관측망에 더해 일부 관측요소에 대한 보조관측소를</p>			

별로 운영하고 있다. 이러한 관측소는 특정 목적에 따라 운영되며 도시기상관측망, 산악기상관측망, 장기기후관측망 등으로 나눌 수 있다. 몇몇 보조관측소는 오직 기온, 습도, 바람, 강수량만 관측한다. 이를 위하여 관측장비는 도시지역의 빌딩이나 다른 건축물 혹은 산악지역, 기후관측소 등에 설치된다. 기후관측을 제외하고 다른 관측은 넓은 지역을 대표하지는 않으며 매우 지역적인 특성을 관측하도록 디자인 된다.

영국의 많은 관측망은 기후자료를 산출할 수 있는 조건에 부합한다. 장기간 이전되지 않고 현 관측소 위치를 유지하며 최소 30년 이상 운영될 수 있도록 하고 있다. 이중 몇몇은 완전히 자동화되었고 실시간으로 자료를 보내고 있다. 일부는 열정적인 자원봉사자가 수동으로 관측하여 주간이나 월간단위로 자료를 제출하고 있다. 이들 기후관측소의 관측요소는 최고/최저 기온, 평균기온, 초상온도, 토양온도, 상대습도, 강수량, 적설량, 일사량이다.

2. 수치모델 내 관측자료 활용

현대 일기예보는 수치모델의 영향을 크게 받고 있으며 수치모델은 관측자료로부터 물리방정식을 활용하여 예측을 시작한다. 수치모델에 있어 관측자료는 초기 입력값으로 자료동화를 위해 매우 중요하다. 특히 좋지 못한 관측자료는 수치모델의 예측성능을 크게 저하시키므로 고품질의 기상관측자료를 활용하는 것이 필수적이다. 특히, 국지모델과 같은 고해상도 수치모델의 성능 향상을 위해서는 해당 격자에 맞는 고해상도의 관측자료가 초기자료로써 필수적이지만 실제 고해상도의 관측자료는 확보하기 힘든데 이는 관측망

신규 설치 및 운영을 위한 경제적 비용이 상당하기 때문이다. 이에 따라 전 세계 기상관련 기관들은 위성, 레이더, 항공기 등의 고해상도 자료 산출이 가능한 자료를 확보하기 위해 원격탐측장비 등을 활용하고 있다.

현재 영국기상청은 나우캐스팅 강수예측을 효과적으로 수행하기 위해 빠른 수치모델 사이클링, 고해상도 자료동화, 고성능의 수치모델을 활용하고 있다. 수치모델은 일반적으로 모델 모수화 없이 대류를 모의할 수 있는 역학적 및 열역학적 방정식에 대한 충분한 해상도를 가지고 있다. 초단기 모델의 정확도는 초기 입력자료의 품질과 고해상도 관측자료의 범위와 주기에 의존한다. 빠른 사이클링은 최신 관측자료를 모델에 반영할 수 있는 장점이 있으며 위험기상에 대해 보다 현실적으로 모의할 수 있도록 지원한다. 성공적인 나우캐스팅 수치모델 시스템을 구축하기 위해서는 신속하고 능률적으로 최신 관측자료를 자료동화 시스템에 입력하여야 한다. 또한 종관규모의 자료보다 대류규모의 정보를 제공할 수 있는 관측자료가 더 많아야 한다. 영국기상청에서 사용중인 4차원 변분법의 장점은 예보 오차 공분산이 이미 배경장 오차 공분산의 시간 윈도우 안에 포함되어 있다는 것이다.

3. 영국기상청 항공기상관측 활용 현황

현재 수치모델에 활용 중인 비행기 기반 관측자료는 크게 AMDAR(Aircraft meteorological data relay)와 Mode-S(Mode select enhanced tracking data)로 나눌 수 있다.

AMDAR 는 영국기상청 통합모델의 자료동화 시스템의 주요 자료로써 대서양에 있어 가장 중요한 바람관측 자료이며 북미지역에서는 라디오존데에 이어 두 번째로 중요한 관측수단이다. 기본적으로 AMDAR 에 참여하고 있는

항공기는 탑재된 센서를 통해 바람과 기온을 산출 혹은 관측한다. AMDAR 항공기는 기상센서를 통해 관측된 원시자료를 설치된 소프트웨어에서 처리하여 기상자료값을 산출하고 이를 지상으로 보낸다. AMDAR의 장점은 해양과 같이 관측망이 부족한 지역에 대한 자료를 제공하는 것이다.

오늘날 상업 항공편의 증가로 전세계적으로 많은 비행기가 운행 중에 있다. 비행기 관측자료는 잘 활용될 수 있는 자료로서 Mode-S 데이터는 항공기에 탑재된 2 차 감시 레이더로부터 수집된다. 비행기들은 지상 관제소로부터 호출을 받으면 현재의 항공 정보를 보내게 되어 있다. 기본적으로 이 자료는 기상관측을 위해 생성된 자료가 아니라 항공운항을 위해 생성된 자료이다. 따라서 이 자료를 실제 기상자료로 변환하기 위해서는 별도의 과정이 필요한데 항공기의 실제 속도와 마하 넘버로부터 기온 산출이 가능하다. 하지만 이 자료는 많은 불확실성이 있어 기상자료로 사용하기 위해서는 스무딩 과정이 필요하다. 관측자료 오차에는 기기 자체의 오차, 대기경계층 난류로 인한 오차, 저고도에 따른 저속의 효과(이착륙 시 속력을 줄이는 현상) 등이 있다.

4. 관측자료 품질관리 기법

Mode-S 관측자료의 양이 매우 크고 균질하지 않으므로 관측자료의 불확실성에 대해서는 적절한 통계기법을 사용하여 추정할 수 있으며 관측오차 공분산을 예측하는 간단한 방법 중 하나로 Desroziers et al. (2005) 기법이 널리 사용되고 있다. 이 진단법은 비현실적인 가정에 근거하고 있고 관측오차 공분산에 대한 근사치를 주기는 하지만 관측자료의 전반적인 품질평가에 매우 유용하다. 우선 Assumed estimates 기법은 자료동화 시스템에 사용되는 관측자료를 이상적으로

만드는 것이다. 오차 예측을 위해 선형이나 다중회귀 기법을 사용한다. 반면 Empirical estimates 는 동일 지점에서 기록된 두 개의 관측자료를 사용하며 추정하는 기법으로 이를 위해서는 매우 근접한 자료를 사용해야 한다. 이 연구에서 사용할 Diagnosed estimates 는 수치모델 자료동화 시스템으로부터의 결과값과 관측값을 비교하는 기법이다. 이 기법은 관측장-배경장 오차(observation minus background, innovation vector)와 관측장-분석장 오차(observation minus analysis, residual vector)를 사용하며 각각 증분과 잔차벡터로 불린다. 이 자료는 수치모델 자료동화 시스템에서 얻어지며, 이 두 값의 통계적 평균을 계산하여 전체 관측자료에 대한 관측 공분산오차를 산출한다. EMADDC 는 Mode-S 로부터 산출한 자료이지만 EMADDC 의 자료처리 알고리즘이 적용된 형태로 유럽 대륙이 중심이다. 이에 반해 Mode-S 는 영국기상청에서 영국 내 수신기로 수신한 Mode-S 데이터를 자체 품질관리를 활용해서 산출한 후 전구와 국지 수치모델에 활용하고 있는 관측자료이다.

5. 관측자료 품질 분석결과

5.1 관측오차 분포

자료동화 시스템에서의 항공기 관측자료 불확실성 분석을 위해 각 항공기 관측자료 별, 계절별, 관측요소, 고도별 분석장 오차(O-A, Observation-Analysis) 히스토그램을 활용하였다. 그 다음으로는 수치적인 분석을 위해 분석장의 표준편차를 계산하였다. 우선 전체적으로 모든 항공기 관측자료는 가우시안 분포(Gaussian distribution)와 유사하며, 관측자료 품질은 크게 나쁘지 않은 것으로 보였다.

세부적으로 보자면 AMDAR 의 경우 대부분 자료의 분석장 오차(관측장-분석장)가 기온의 경우 ± 5 °C 미만으로 우수한 편이었다. 특히, 대부분의 자료가 0 에 가까운 쪽으로 집중되어있었다.

전체적인 표준편차는 여름철에 약 1.2 K, 겨울철에 1.3 K 로 겨울철이 약간 높은 편으로 나타났다. 다만 영국과 비영국 지역은 거의 표준편차의 차이가 없었다. 고도별로 보자면 100 hPa 로부터 300 hPa 까지는 높게 나타났지만 300 hPa 로부터 500 hPa 까지는 가장 낮았으며 고도가 하강함에 따라 표준편차는 작아졌지만 900 hPa 이상에서는 다시 높아졌다. 겨울철은 모든 고도에서 여름철보다 표준편차가 약간 높게 나타났지만 전체적인 경향은 여름과 겨울철 모두 비슷하였다. 전체적으로 보자면 AMDAR 에 대한 기온 분석장 오차의 표준편차는 대부분 1.5 K 보다 낮아 우수한 편이었으며, 300 hPa 에서 500 hPa 까지의 표준편차는 1 K 미만으로 좋은 결과를 보여주었다.

관측자료 분포는 우선 AMDAR 의 경우 다른 항공기 관측자료인 EMADDC 와 Mode-S 와는 다르게 가장 넓은 관측범위를 가지고 있다. 다음으로 EMADDC 의 경우 AMDAR 보다는 관측범위가 작지만 Mode-S 보다는 넓었다. 이는 EMADDC 나 Mode-S 의 경우 항공기 운항정보를 수신할 수 있는 수신기를 설치할 경우에만 해당지역의 자료를 수신할 수 있기 때문이다. Mode-S 의 경우 EMADDC 와 수신하는 데이터 종류는 같지만 이 자료는 영국기상청에서 영국 내 수신기를 설치하여 직접적으로 확보한 자료이다.

각 항공기 관측자료에 대한 수직분포를 보여주는 자료를 보면 공통적인 결과가 있다. 이는 상당수의 관측자료가 고고도(200~250 hPa)에서 생산되고 있다는 점이다. EMADDC

및 Mode-S 의 경우 200 hPa 에서 가장 많은 관측자료가 생산된다. 그 다음으로 250 hPa 의 관측자료가 많고 300~500 hPa 까지는 일정하게 관측되다가 지표면으로 갈수록 양은 적어진다. 계절적인 특성을 보면 여름철과 겨울철 모두 EMADDC 관측자료가 Mode-S 보다 많으며 그 차이는 겨울철에 더욱 커진다. EMADDC 의 경우 영국 영역 자료는 비영국 지역의 약 1/4 정도로 작은 편이며 자료의 대부분은 비영국 지역인 유럽대륙 쪽의 자료이다. 하지만 Mode-S 는 대부분의 관측자료가 영국 영역에 해당하는 자료로 영국의 국지모델인 UKV 에는 Mode-S 가 더 큰 영향을 미칠 수 있다.

5.2. 관측오차 표준편차 결과

기온의 경우 AMDAR 관측 오차에 대한 표준편차는 400 hPa 에서 약 0.8~0.9 K 로 나타났으며 고도가 올라갈수록 조금씩 증가하는 추세를 보였다. 이에 반해 EMADDC 관측자료의 경우 지상부근에서 1.4 K, 400 hPa 에서는 1 K 로 하락하였지만, 두 관측자료 간의 차이는 고도가 상승함에 따라 크게 나타났다. 계절적 변화를 보자면 여름철과 겨울철의 큰 변화는 보이지 않았지만 EMADDC 의 경우 여름철보다 겨울철이 표준편차가 약간 크게 나타났다. 관측영역에 대해서도 영국과 비영국 지역에 대해 큰 편차가 보이지는 않았지만 EMADDC(Mode-S)가 AMDAR 보다는 큰 표준편차를 가지고 있었다. 하지만 그 차이는 불과 최대 0.5 K 수준으로 상당히 개선되어 충분히 현업에 활용한 수준이다. 특히 EMADDC 는 AMDAR 에 비해 비교가 되지 않을 정도로 관측해상도가 매우 높기에 활용가능성은 훨씬 높다.

바람에 대하여 여름철의 AMDAR 관측자료는 500 hPa 이하에서 약 1.5 m/s 의 표준편차를 가지고 있고 고도가 올라감에 따라 2.2 m/s 까지 증가한다. EMADDC 의 경우 지상에서 850 hPa 까지 2.0 m/s 에서 2.2 m/s 까지 증가하며 다시 500 hPa 까지 1.6 m/s 으로 감소한 후 2.5 m/s 로 증가한다. 반면 Mode-S 는 두 관측자료에 대한 오차의 표준편차보다 크게 나타나며 지상부근 1.6 m/s 에서 200 hPa 에 2.5 m/s 로 증가한다. 겨울철의 경우에는 세 종류의 관측자료가 유사한 경향을 보이는데 지상부근에선 1.6~1.7 m/s, 200 hPa 에서는 2.5 m/s 로 서서히 증가한다. 계절적인 요소를 고려하면 AMDAR 와 EMADDC 는 700 hPa 까지는 비슷하지만 그 위 고도부터는 Mode-S 가 약 0.2~1.2 m/s 로 커진다. 500 hPa 이하에서 AMDAR 는 1.5 m/s 로 일정하지만 EMADDC 와 Mode-S 는 변동성이 큰 편이다. 특히 Mode-S 는 그 중에서 가장 큰 변동성을 보인다. 계절적인 특징으로는 북반구에서 겨울철의 경우 종관규모의 시스템에 의해 유사한 성분의 바람이 주로 부는 경향이 있고 여름철에는 보다 작은 대류규모의 의한 바람이 자주 발생하는 경향 때문에 계절적인 차이가 발생하는 것으로 보인다.

5.3. 관측오차 상관관계

기온은 고도가 높아질수록 관측자료에 대한 수평 관측오차 상관관계길이(상관관계가 0.2 이상인 구간)는 증가하였다. EMADDC 의 관측오차 상관관계는 200 hPa 의 4 km 지점에서 0.7, 10 km 지점에서는 0.6 이었다. 500 hPa 에서는 4 km, 10 km 지점에서 각각 0.3, 0.2 로 나타났다. 하지만 AMDAR 의 경우 500 hPa 의 4km, 10 km 지점에서 각각 0.5, 0.4 로 EMADDC 자료에 비해서는 높았다. 그러나 AMDAR 의 경우

관측자료의 숫자가 EMADDC 보다 훨씬 적어 일부 고도에서는 생략되었으며 산출된 고도는 500 hPa 에서 850 hPa 까지였다. 계절적 특징을 보자면 여름에 EMADDC 관측오차 상관관계는 겨울보다 작았고 AMDAR 는 겨울보다 여름에 값이 커졌다. 하지만 영국 영역과 비영국 영역의 비교에 있어서는 큰 차이점이 없었다.

바람에 관해서는 기온의 경우와 같이 고도가 증가할수록 관측오차 상관관계도 증가하였고 상관관계 길이도 늘어났다. 바람의 경우는 Mode-S 자료도 추가되었는데 Mode-S 의 상관관계를 보자면 EMADDC 와 AMDAR 보다 대부분의 고도에서 훨씬 높게 나타났다. 특히 500 hPa 에서 300 hPa 에 이르는 구간에서는 그 차이가 훨씬 커졌다. 전체적으로 EMADDC 와 AMDAR 는 500 hPa 에서 850 hPa 까지 유사하였지만 Mode-S 보다는 둘 다 낮았다. 지상 부근에서는 세 종류의 관측자료 간 상관관계의 차이가 줄어들었다.

5.4. 관측자료의 수치모델 영향도 평가

본 연구에서는 관측자료의 수치모델 자료동화시스템내의 영향을 평가하기 위해 Fowler et al. (2020)가 제안한 방법으로 수행하였다. 가장 먼저 기온에 대한 결과를 보자면 AMDAR 와 EMADDC 는 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만 전체적으로 EMADDC 의 수치가 높은 편이며 AMDAR 는 거의 모든 고도에서 이론적 영향이 실제 관측자료 영향보다 큰 편이다. 이 차이는 여름철에 뚜렷하게 나타나며 겨울철에 적어진다.

바람에 관해서는 실제 및 이론적 관측자료 영향정도가 기온보다 더 크게 나타난다. Mode-S 는 AMDAR 와 EMADDC 보다 훨씬 뚜렷하게 차이점이 드러난다. 관측오차

표준편차와 비교했을 때 실제 관측자료 영향도가 이론적 영향도보다 크게 나타나는 부분은 UKV 관측오차 프로파일에 비해 실제 이 실험에서 계산된 관측오차 표준편차가 크게 나타나는 고도와 일치한다. 이를 통해 과소하게 설정된 UKV 관측오차 추정치로 인해 실제 관측자료가 수치모델에 크게 영향을 미치는 것으로 추정되며 이는 Mode-S 가 EMADDC 와 사실상 같은 자료로써 후처리가 다르다는 점을 감안한다면 배경장의 문제가 아닌 관측자료의 문제로 인한 것으로 보인다.

5.5. 관측장비 별 관측오차 비교

기온 관측자료에 대한 품질평가를 위해 주요 관측장비의 O-A 값을 계산하였을 때 라디오존데 관측자료의 품질이 가장 우수하게 나타났다. 라디오존데 기온관측자료는 지상에서 400 hPa 까지 약 0.5 K 의 표준편차를 보였다. 그 이후로는 표준편차가 증가하여 150 hPa 부근에서는 1.5 K 까지 상승하였다. 그 다음으로 겨울철 라디오존데 관측자료는 여름철과 400 hPa 까지는 유사하였지만 그 이상의 고도에서는 약간 더 높은 수치를 보여주었다. 반면 AMDAR 는 전체적으로 라디오존데보다 0.1 K 에서 0.2 K 정도 높았으며 겨울철에는 그 차이가 줄어들었다. EMADDC 의 경우 AMDAR 보다 400 hPa 이하에서 0.1 K 에서 0.5 K 정도 차이가 났으며 그 차이는 지상으로 갈수록 커지는 경향을 보였다. 다만 300 hPa 이상에서는 AMDAR, EMADDC, 라디오존데의 겨울철 관측자료간 차이는 작아졌다. 이를 지상관측자료와 비교하자면 AMDAR 는 지상관측자료의 표준편차와 비슷하였고 EMADDC 는 0.5 K 정도로 크게 나타났다.

바람의 경우 Mode-S 관측자료의 숫자가 EMADDC 보다 적지만 다른 관측장비에 비해 역시 크게 나타난다. 다만

바람의 경우 연직바람관측장비가 추가적으로 수치모델에 사용될 수 있는데 연직바람관측장비의 관측자료가 라디오존데나 AMDAR 보다 훨씬 많았다. 항공기 관측자료는 200 hPa 부근에서 가장 많았으며 연직바람관측장비는 850 hPa 에서 크게 나타나 Mode-S 나 EMADDC 와 비슷한 수치를 보였다. 다만 지상부근에 설치되어 운영되는 지상관측장비나 해양에 설치되는 부이, 특정 항공기를 대상으로 관측자료가 수신되는 AMDAR 의 경우 관측자료가 적은 편이었다. 기온의 경우와 비슷하게 라디오존데는 가장 좋은 품질의 관측자료였는데 지상부근에서는 1.2 m/s, 200 hPa 에서는 1.8 m/s 로 나타났다. 그 다음은 연직바람관측장비가 좋은 결과를 보여주었으며 500 hPa 이하에서는 라디오존데와 비슷한 수준으로 나타났지만 그 이상에서는 관측오차 표준편차가 증가하였는데, 이는 연직바람관측장비의 특성 상 주로 고도 5km 이하에서 관측되고 그 이상에서는 관측자료 개수가 매우 적어지며 노이즈가 심해지기 때문으로 보인다. 계절적으로 보자면 겨울철 연직바람관측장비 관측자료는 여름철 관측자료보다 크게 나타났지만 고도별로 일정한 경향을 보여주었다. AMDAR 와 EMADDC 의 관측오차 표준편차는 겨울보다 여름에 높았지만 두 자료는 비슷한 수치를 보여주었다. Mode-S 의 경우 전체 장비 중에서 가장 높은 관측오차 표준편차를 보여주었다. 가장 품질이 좋은 라디오존데와 Mode-S 를 비교해보자면 두 관측자료의 관측오차 표준편차의 차이는 0.5 m/s 에서 0.7 m/s 이다. 결과적으로 보자면 당연히 라디오존데가 우수하지만 Mode-S 역시 수치모델 시스템에 충분히 활용 가능한 수준을 보여준다. V 성분의 바람에 대해 분석하였을 때 전체적으로 U 성분의 결과보다는 약간 더 넓게 분포하였다.

6. 결론

수치모델 성능향상을 위한 최적관측망의 구축을 위해서는 여러 관측장비를 적절하게 구성할 필요가 있다. 이는 관측장비 도입에는 매우 많은 예산이 소요되며 설치 이후에도 품질관리를 위해 부품교체, 교정, 검정 등 다양한 유지관리가 필요하기 때문이다. 따라서 관측장비는 목적과 수요에 맞게 적절히 구성 및 도입되어야 한다. 위험기상에 대한 예보와 경보, 대국민 서비스를 위해서는 조밀한 지상관측망의 구성이 필수적이지만 수치모델에서는 수평적인 관측망 뿐만 아니라 입체적인 관측망 구축이 필수적이다. 특히 관측장비는 사용 목적, 위치, 대상에 따라 여러 종류로 나뉜다. 그러므로 각 관측장비의 특성에 맞도록 적절히 구성하여 관측공백을 최소화하고 수치모델 성능향상에 기여하는 방향으로 구성되어야 한다. 최근 고해상도 수치모델이 컴퓨터 기술의 발달로 가능해짐에 따라 고해상도 수치모델 생산을 위한 자료동화 시스템 역시 고해상도 관측자료가 필수적이다. 항공기 관측자료는 고해상도 자료로써 수치모델에 활용 가능한 품질을 보여주었다.

고품질 관측자료 생산을 위해 라디오존데 관측망을 기준으로 연직바람관측장비를 통해 바람자료를 보완하고 부족한 고고도의 관측과 기온 관측을 위해 항공기 관측자료를 활용할 필요가 있다. 또한, 본 연구는 관측자료의 품질관리를 위해 수치모델에서 산출된 관측오차 계산 기법을 활용하였으며, 이를 통하여 각 관측장비 별 관측오차 분석을 통한 최적화된 관측망 구축에 활용할 수 있을 것으로 보인다.