

시계열 및 비선형 회귀를 중심으로 한 전 세계

육지-해양 온도 지수의 분석 및 예측 모델링

Global Land-Ocean Temperature Index Analysis and Prediction

Sungjun Eom

January 12, 2025

Abstract

Climate change, driven by global warming, is a critical global issue impacting ecosystems and human activities. This study focuses on the systematic analysis and prediction of global land-ocean temperature indices, key indicators of climate change, using a combination of time series and non-linear regression methods. Using data from NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS) spanning 1880 to 2023, the research employs ARIMA models to capture temporal trends and seasonal patterns, while quadratic regression models reveal the nonlinear acceleration of temperature increases over time.

The findings indicate a persistent upward trend in global temperature indices, with significant acceleration since the 1970s, highlighting the intensification of global warming. Predictive models suggest a gradual rise in temperature indices over the next decade, emphasizing the urgent need for effective climate change mitigation strategies. The study also identifies key limitations, including the need for incorporating external factors such as greenhouse gas concentrations and regional analyses to enhance model robustness. These results provide valuable insights for policymakers and researchers, contributing to a deeper understanding of climate dynamics and supporting data-driven decision-making in addressing the global climate crisis.

By integrating advanced statistical techniques, this research offers a comprehensive approach to analyzing past trends and forecasting future temperature patterns, underscoring the importance of proactive and evidence-based climate action.

The study is done as a term project for an undergraduate class.

Contents

1 서론	3
1.1 연구목적	3
1.2 문헌 연구	4
1.3 데이터 설명	5
1.4 분석 방법	6
1.5 결과 활용 및 기대 효과	6
2 본론	8
2.1 분석 방법 소개	8
2.1.1 더빈-왓슨 검정	9
2.1.2 시계열 분석	9
2.1.3 비선형 회귀 분석	9
2.2 데이터 분석 및 결과 설명	10
2.2.1 더빈-왓슨 검정	10
2.2.2 시계열 분석	10
2.2.3 2차 비선형 회귀분석	12
2.3 분석의 타당성 설명	13
2.3.1 시계열 분석	13
2.3.2 2차 비선형 회귀분석	16
3 결론	17
3.1 분석 결과 요약	17
3.2 분석의 장점 및 한계점 설명	17
3.2.1 통계적 분석의 측면	17
3.2.2 시스템 이론의 측면	18
3.3 추가 연구사항 제안	19
A ARIMA Result	21
B Quadratic Nonlinear Regression Result	22

1 서론

1.1 연구목적

지구 온난화는 전 세계적으로 기후 변화와 환경 문제를 초래하는 중요한 과제로 대두되고 있으며, 이는 인간 활동과 자연 생태계 전반에 심각한 영향을 미치고 있다. 특히, 육지와 해양의 온도 변화는 지구 온난화의 직접적인 지표로 사용되며, 이를 분석하는 것은 기후 변화의 추세를 이해하고 예측하는 데 필수적이다. 이러한 맥락에서, 본 연구는 전 세계 육지-해양 온도 지수를 대상으로 시간적 변화를 체계적으로 분석하고, 이를 기반으로 기후 변화의 미래 양상을 예측하는 것을 목적으로 한다. 특히, 본 연구는 최신 데이터를 활용한 분석을 통해 현재까지의 연구 결과를 확장하고 심화시키고자 한다.

본 연구는 2023년까지의 최신 데이터[3]를 기반으로 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 수행하여 온도 지수의 과거 변화 추세를 정량적으로 평가하고, 주요 패턴과 변동 요인을 도출하고자 한다. 구체적으로, 시계열 분석은 데이터의 시간적 변화를 체계적으로 분석하여 장기적인 상승 또는 하락 추세를 도출하는 데 중점을 둔다. 또한, 단기적인 변동을 파악함으로써 비정상적 패턴이나 이상 현상의 발생 여부를 이해할 수 있다. 이를 통해 데이터의 주요 특성과 기후 변화의 복잡한 동향을 보다 명확히 설명할 수 있는 기반을 제공한다.

비선형 회귀 분석은 온도 지수가 시간에 따라 단순 선형적 경향을 넘어 복잡한 비선형적 특성을 보인다는 점에 착안하여 적용되었다. 이러한 분석 기법은 기후 변화의 가속화나 비대칭적 변화와 같은 비선형적 경향성을 효과적으로 모델링할 수 있는 강력한 도구로, 특히 장기적인 미래 변화를 예측하는 데 유리하다. 이를 통해 단순히 과거 데이터를 해석하는 것을 넘어, 현재와 미래의 온도 변화에 대한 정량적이고 과학적인 통찰을 제공한다.

더 나아가, 시계열 분석과 비선형 회귀 분석의 통합적 활용은 온도 지수 변화에 대한 다각적 접근을 가능하게 한다. 예를 들어, 시계열 분석을 통해 추세 및 계절적 요인을 명확히 이해하고, 비선형 회귀 분석을 통해 데이터의 복잡한 동적 변화를 포착함으로써 보다 정교한 예측 모델을 제시할 수 있다. 이러한 분석 결과는 기후 변화 연구에 중요한 기여를 할 뿐만 아니라, 온도 상승의 주요 원인을 규명하고 이에 대한 정책적 대응 방안을 수립하는 데 실질적인 도움을 제공할 것이다.

특히, 본 연구에서는 1880년부터 2023년까지의 전 세계 육지-해양 온도 지수[3]를 분석 대상으로 삼아, 장기적인 온도 상승 추세와 그에 따른 변화율을 평가할 것이다. 이를 통해 기후 변화의 심각성을 정량적으로 이해하고, 지구 환경의 지속 가능성에 대한 대응 전략을 수립하는 데 유용한 자료를 제공하고자 한다. 또한, 기존의 연구들과 달리 본 연구는 최신 데이터를 활용하여 분석 결과의 신뢰도를 높이고, 현재와 미래의 기후 변화에 대한 보다 정확한 통찰을 제공한다는 점에서 차별화된다.

본 연구는 기후 변화 연구의 최신 동향을 반영하고, 시계열 모델과 비선형 회귀 모델의 조합을 통해 과거

데이터의 패턴을 정밀하게 분석하고 미래를 예측하는 데 기여할 것이다. 이를 통해 정책 입안자와 연구자들에게 과학적 근거를 제공하여, 온도 변화에 따른 생태계의 영향, 해수면 상승 가능성, 그리고 지구 에너지 균형 변화 등을 이해하는 데 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 궁극적으로 본 연구는 기후 변화의 이해를 심화시키고, 환경 보전 및 지속 가능성을 위한 국제적 협력과 정책 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 문헌 연구

지구 온난화로 인한 기후 변화는 전 세계적으로 심각한 환경 및 사회적 문제를 야기하고 있으며, 이에 대한 이해와 예측을 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다. 특히, 육지와 해양의 온도 변화를 분석하여 이러한 변화를 이해하고 예측하려는 다양한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 활용하여 온도 변동의 추세를 파악하고 미래 변화를 예측하는 데 중점을 두고 있다.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 5차 평가보고서[1]에서는 1880년부터 2012년까지의 전 지구 평균 육지-해양 표면온도가 약 0.85°C 상승하였음을 보고하였다. 이는 선형 변화 경향(linear trend)을 사용하여 계산된 결과로, 장기간에 걸친 온도 상승 추세를 명확히 보여준다.

국내 연구로는 기후변화에 따른 지표수의 수온 영향 평가[4]에서 중권역별 기온 자료를 활용하여 수온과의 선형 및 비선형 회귀분석을 수행하였다. 이를 통해 기온과 수온 간의 상관관계를 도출하고, 기후 변화가 수온에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

또한, 한반도 남해 해수면 온도 예측 연구[5]에서는 장단기 기억(Long Short Term Memory, LSTM)과 합성곱 장단기 기억(Convolutional LSTM) 딥러닝 기법을 활용하여 해수면 온도를 예측하였다. 이 연구는 시계열 기계학습을 통해 해수면 온도의 단기 예측 모델을 개발하고, 고수온 발생 건에 대한 예측 가능성을 분석하였다.

IPCC의 6차 보고서[2]에서는 온실가스 농도 시나리오에 기반하여 2100년까지 전 지구 평균 해수면이 0.43m에서 0.84m까지 상승할 것으로 전망하였다. 이는 해양 온도 상승과 밀접한 관련이 있으며, 장기적인 해수면 상승이 연안 생태계와 인간 활동에 미치는 영향을 상세히 다루고 있다.

이러한 선행 연구들은 시계열 분석과 회귀 분석을 통해 기후 변화와 온도 변동 간의 관계를 규명하고, 미래 변화를 예측하려는 노력을 보여준다. 그러나 전 지구적 규모에서 육지와 해양의 온도 지수를 동시에 고려하여 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 수행한 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 본 연구는 이러한 공백을 메우기 위해 최신 데이터를 활용하여 전 세계 육지-해양 온도 지수의 시간적 변화를 분석하고, 이를 기반으로 기후 변화의 미래 양상을 예측하고자 한다.

Land-Ocean Temperature Index (No Smoothing)

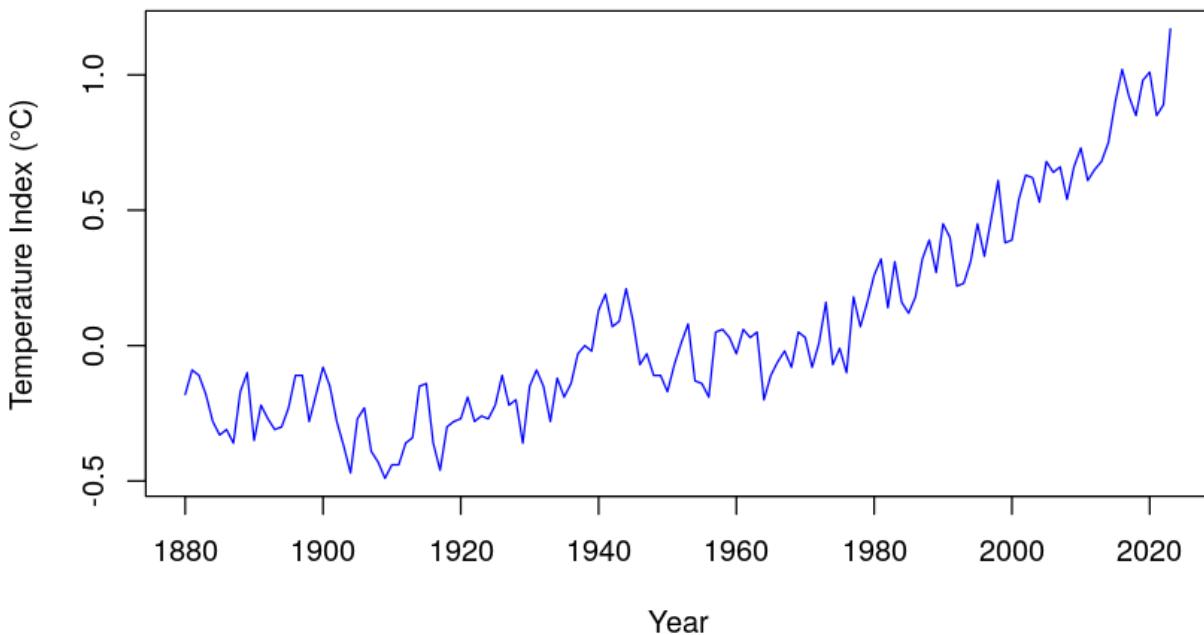


Figure 1: 육지-해양 온도 지수

1.3 데이터 설명

본 연구에서 활용한 데이터는 미국 항공우주국(NASA) 고다드 우주연구소(GISS)에서 제공하는 전 세계 육지-해양 온도 지수(Global Land-Ocean Temperature Index)[3]로, 1880년부터 2023년까지의 지구 평균 표면 온도 변화를 나타낸다. 이 지수는 1951년부터 1980년까지의 평균 온도를 기준으로 한 온도 편차를 측정하여, 장기적인 기후 변화를 분석하는 데 활용된다.

해당 데이터는 NASA의 GISS에서 수집 및 분석한 결과로, 육지의 기상 관측소와 해양의 선박 및 부표로부터 얻은 해수면 온도 데이터를 통합하여 산출되었다. 이러한 데이터는 NOAA의 GHCN-M(Global Historical Climatology Network-Monthly)와 ERSSTv5(Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 5)를 기반으로 하며, GISS는 도시 열섬 효과 및 관측 기법의 변화 등을 보정하여 데이터의 정확성과 일관성을 확보하고 있다.

데이터 변수 및 내용은 아래와 같다.

- **Year:** 각 관측이 이루어진 연도를 나타낸다.
- **No Smoothing:** 연도별 온도 편차의 원시 데이터를 나타내며, 1951-1980년 평균 온도를 기준으로 한 섭씨 온도 변화($^{\circ}\text{C}$)를 의미한다.
- **Lowess(5):** 5년 간격의 Lowess(Locally Weighted Scatterplot Smoothing) 평활 기법을 적용한 값으로, 단기 변동을 제거하고 장기적인 추세를 강조한 온도 편차를 나타낸다.

이러한 변수를 통해 지구 평균 표면 온도의 연도별 변화를 상세히 분석할 수 있으며, 특히 비평활 데이터는 단기적인 변동을, Lowess(5) 데이터는 장기적인 추세를 파악하는 데 유용하다.

전 세계 육지-해양 온도 지수는 지구 온난화와 기후 변화의 추세를 이해하는 데 핵심적인 역할을 한다. 이 지수를 분석함으로써 지구 평균 온도의 상승 경향을 파악할 수 있으며, 이는 기후 변화에 대한 과학적 이해를 높이고, 관련 정책 수립 및 대응 전략 마련에 중요한 근거를 제공한다.

본 연구에서는 이러한 데이터를 활용하여 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 수행함으로써, 과거의 온도 변화를 정량적으로 평가하고 미래의 기후 변화를 예측하고자 한다. 이를 통해 지구 온난화를 고려한 지속 가능한 환경 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1.4 분석 방법

본 연구에서는 전 세계 육지-해양 온도 지수의 변화를 분석하고 미래 추세를 예측하기 위해 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 활용하였다. 먼저, 시계열 분석을 통해 온도 지수의 시간적 변동 패턴을 파악하였다. 이를 위해 5년 이동 평균을 계산하여 단기 변동을 평활화하고 장기적인 추세를 시각적으로 확인하였다. 이러한 이동 평균 기법은 시계열 데이터에서 노이즈를 제거하고 주요 추세를 강조하는 데 유용하다.

다음으로, 자기회귀누적이동평균(ARIMA) 모형을 적용하여 온도 지수의 시계열 데이터를 모델링하였다. ARIMA 모형은 시계열 데이터의 자기상관성과 이동 평균을 동시에 고려하여 미래 값을 예측하는 데 효과적이다. ‘auto.arima’ 함수를 사용하여 최적의 모형을 선택하고, 이를 기반으로 향후 10년간의 온도 지수를 예측하였다. 모형의 적합성을 평가하기 위해 잔차 분석과 더빈-왓슨 검정을 수행하여 잔차의 자기상관 여부를 검토하였다. 더빈-왓슨 검정은 회귀 모형의 잔차에 자기상관이 존재하는지 확인하는 데 사용되며, 이를 통해 모형의 신뢰성을 확보할 수 있다.

또한, 온도 지수의 비선형적 추세를 효과적으로 모델링하기 위해 2차 함수 형태의 비선형 회귀 모형을 적합시켰다. 비선형 최소제곱법을 통해 계수를 추정하고, 계수의 유의성을 평가하였다. 이를 통해 온도 지수의 비선형적인 추세를 효과적으로 모델링하였다. 적합된 모형을 기반으로 예측값을 계산하고, 실제 데이터와 함께 시각화하여 모형의 적합성을 검토하였다.

이러한 분석 방법론을 통해 과거 온도 변화를 체계적으로 분석하고, 이를 기반으로 미래의 기후 변화를 예측함으로써 지구 온난화의 추세를 보다 명확히 이해하고자 하였다. 이를 통해 지속 가능한 환경 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1.5 결과 활용 및 기대 효과

본 연구의 결과는 지구 온난화의 과거 추세를 정량적으로 분석하고 미래 변화를 예측하는 데 활용될 수 있다. 이를 통해 기후 변화의 심각성을 과학적으로 입증하고, 정책 결정자들이 효과적인 기후 변화 대응

전략을 수립하는 데 중요한 자료를 제공할 수 있다. 예를 들어, 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 통해 도출된 온도 상승 추세는 온실가스 감축 목표 설정, 재생에너지 확대, 기후 변화 적응 계획 수립 등 다양한 정책 분야에서 활용될 수 있다.

또한, 이러한 분석 결과는 일반 대중에게 기후 변화의 현황과 미래 전망을 이해시키는 데 중요한 역할을 한다. 기후 변화는 단순히 과학적 논의에 국한되지 않고, 개인과 사회 전반에 걸쳐 심각한 영향을 미치고 있는 만큼, 대중의 인식 제고는 그 자체로 중요한 과제이다. 본 연구에서 도출된 결과는 지구 온난화의 장기적 추세와 그 속도의 가속화 여부를 명확히 보여주며, 이는 대중이 현재 상황의 긴급성과 중요성을 체감하도록 돋는 데 기여할 것이다.

이를 통해 개인은 기후 변화 문제에 대해 보다 책임감 있는 태도를 갖게 되고, 에너지 절약, 재활용, 친환경 제품 구매 등 지속 가능한 생활 방식을 채택하는 데 영향을 받을 수 있다. 예를 들어, 온도 상승이 해수면 상승, 기상이변, 생태계 파괴 등 구체적이고 실질적인 결과로 이어질 수 있다는 사실을 알게 되면 개인은 보다 적극적으로 탄소 발자국을 줄이고 환경 보전에 기여하려는 동기를 가지게 된다.

기업 또한 연구 결과를 기반으로 지속 가능한 경영 전략을 수립하는 데 도움을 받을 수 있다. 예를 들어, 온도 상승 추세와 그로 인한 장기적 환경 변화가 경영 활동에 미칠 영향을 예측함으로써 탄소 중립 목표 설정, 재생 에너지 투자, 환경 친화적 공급망 관리 등 구체적이고 실질적인 대응 방안을 마련할 수 있다. 이러한 변화는 단순히 사회적 책임을 다하는 데 그치지 않고, 기업의 지속 가능성과 경쟁력을 강화하는 전략적 이점으로도 작용할 것이다.

본 연구의 분석 결과는 대중과 기업 모두에게 기후 변화의 심각성과 긴급성을 전달하고, 기후 변화 완화 및 적응을 위한 행동을 촉진하는 데 중요한 과학적 근거를 제공한다. 이를 통해 전 지구적 차원의 환경 보전과 지속 가능한 발전 목표를 실현하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

더 나아가 본 연구는 학계에서 기후 변화와 관련된 후속 연구의 기초 자료로서 중요한 역할을 할 수 있다. 본 연구에서 활용한 시계열 분석 및 비선형 회귀 분석 기법은 기후 변화 데이터의 주요 특성을 체계적으로 이해하고 이를 바탕으로 미래를 예측하는 데 유용한 도구로 평가된다. 이러한 방법론은 다양한 연구 주제에 적용 가능하며 기후 변화에 대한 심층적인 이해를 도모하는 데 기여할 것이다.

특히, 지역별 기후 변화 영향 분석에 본 연구의 결과를 활용할 수 있다. 지역마다 기후 변화의 영향을 받는 방식이 다르므로 본 연구에서 개발된 분석 프레임워크를 활용하여 지역별 온도 변화 패턴, 극단적 기상 현상 발생 빈도, 해수면 상승과 같은 지역적 특성을 평가하는 연구를 진행할 수 있다. 이러한 연구는 지역 맞춤형 기후 변화 적응 전략을 수립하는 데 필요한 과학적 근거를 제공할 것이다.

또한, 특정 산업 분야에서의 기후 변화 적응 전략 연구에도 본 연구의 방법론과 결과를 적용할 수 있다. 예를 들어, 농업 분야에서는 온도 상승이 작물 생산성과 수확 시기에 미치는 영향을 평가하고 이러한 변화를 완화하거나 적응하기 위한 농업 기술 및 정책을 개발할 수 있다. 에너지 산업에서는 기후 변화가

에너지 수요와 공급 패턴에 미치는 영향을 분석하여, 재생 가능 에너지 전환이나 에너지 효율 개선 방안을 구체화하는 데 활용될 수 있다.

아울러, 기후 변화와 관련된 다분야 융합 연구에서도 본 연구의 기초 자료가 될 수 있다. 생태학, 경제학, 사회학 등 다양한 학문과의 접목을 통해 기후 변화가 생태계, 경제적 불평등, 사회적 구조 등에 미치는 영향을 다각적으로 분석할 수 있다. 이는 기후 변화 연구의 범위를 확장하고 복합적인 문제 해결을 위한 통합적 접근 방식을 제시하는 데 기여할 것이다.

이 연구는 기후 변화의 과학적 이해를 심화시키는 데 기여할 뿐만 아니라, 지역별, 산업별, 학제 간 연구의 기초 자료로 활용될 수 있는 잠재력을 가진다. 이를 통해 학계에서 보다 정교하고 실질적인 기후 변화 연구가 진행될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 결과는 다양한 방면에서 활용 가능하며 기후 변화 문제를 해결하기 위한 다각적 접근에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 첫째, 정책적인 측면에서 본 연구는 과학적 근거를 제공하여 기후 변화 대응을 위한 체계적이고 구체적인 전략을 수립하는 데 도움을 줄 수 있다. 온실가스 감축 목표 설정, 재생에너지 확대 정책, 기후 적응 기반 시설 강화 등 다양한 정책 결정에 필요한 데이터를 제공함으로써 보다 효과적인 정책 설계와 실행을 뒷받침할 수 있을 것이다.

둘째, 대중 인식 제고 측면에서, 본 연구의 결과는 기후 변화의 심각성을 보다 명확히 전달하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 구체적이고 정량화된 데이터는 대중이 현재의 상황을 이해하고, 기후 변화의 장기적 영향을 예측하는 데 도움을 준다. 이는 개인과 기업이 친환경적인 생활 방식과 경영 전략을 채택하도록 독려하고 기후 변화 완화 및 적응을 위한 행동을 촉진할 수 있다.

셋째, 학문적 측면에서는 본 연구가 다양한 후속 연구의 기초 자료로 활용될 수 있다. 기후 변화와 관련된 지역적, 산업적, 사회적 영향을 분석하거나 새로운 예측 모델을 개발하는 데 본 연구의 결과를 응용할 수 있다. 나아가, 본 연구는 기존 연구에서 사용된 기법을 확장하고 개선할 수 있는 기회를 제공하며, 학문적 논의의 심화를 도모할 수 있다.

결론적으로, 본 연구는 단순한 데이터 분석을 넘어 기후 변화 문제를 이해하고 해결하는 데 필요한 과학적, 정책적, 사회적 도구를 제공하였다. 이는 지속 가능한 사회로의 전환을 위한 중요한 발판이 될 것이며, 이를 기반으로 한 다양한 연구와 실천이 이어질 것으로 기대된다.

2 본론

2.1 분석 방법 소개

본 연구에서는 전 세계 육지-해양 온도 지수의 변화를 분석하고 미래 추세를 예측하기 위해 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 활용하였다. 이러한 방법론은 기후 데이터의 복잡한 특성을 효과적으로 파악하고

예측하는 데 유용하다.

2.1.1 더빈-왓슨 검정

선형 회귀 모형의 잔차에 자기상관이 존재하는지 확인하기 위해 더빈-왓슨 검정을 수행하였다. 이는 회귀 모형의 가정이 충족되는지 평가하는 중요한 단계로, 잔차의 독립성을 검토하여 모형의 신뢰성을 확보하였다.

2.1.2 시계열 분석

시계열 분석은 시간에 따라 수집된 데이터의 패턴을 식별하고 미래 값을 예측하는 통계적 방법이다. 본 연구에서는 다음과 같은 시계열 분석 기법을 적용하였다.

이동 평균(Moving Average) 계산 및 시각화: 5년 이동 평균을 계산하여 원시 데이터의 단기 변동을 평활화하고 장기 추세를 시각적으로 파악하였다. 이를 통해 온도 지수의 전반적인 상승 또는 하락 경향을 명확히 확인할 수 있었다.

ARIMA 모형 적합 및 예측: 자기회귀누적이동평균(ARIMA) 모형을 활용하여 온도 지수의 시계열 데이터를 모델링하였다. ‘auto.arima’ 함수를 사용하여 최적의 모형을 선택하고, 이를 기반으로 향후 10년간의 온도 지수를 예측하였다. ARIMA 모형은 시계열 데이터의 자기상관성과 이동 평균을 동시에 고려하여 미래 값을 추정하는 데 효과적이다.

잔차 분석 및 모형 진단: ARIMA 모형의 적합성을 평가하기 위해 잔차의 자기상관 함수(ACF)를 분석하고, 잔차의 정상성 및 독립성을 검토하였다. 이를 통해 모형이 데이터에 적합하게 적용되었는지 확인하였다.

2.1.3 비선형 회귀 분석

기후 데이터는 종종 비선형적인 경향을 보이므로, 이를 효과적으로 모델링하기 위해 비선형 회귀 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 2차 함수 형태의 비선형 회귀 모형을 적용하였다.

2차 함수 모형 적합: 온도 지수(No smoothing)를 연도(Year)의 2차 함수로 표현하는 모형을 설정하고, 비선형 최소제곱법을 통해 모수들을 추정하였다. 이를 통해 온도 지수의 비선형적인 추세를 효과적으로 모델링하였다.

모형 적합도 평가: 추정된 모형의 설명력을 평가하기 위해 모수들의 유의성을 검증하였다. 이를 통해 모형이 데이터의 변동을 얼마나 잘 설명하는지 확인하였다.

예측 및 시각화: 적합된 모형을 기반으로 예측값을 계산하고, 실제 데이터와 함께 시각화하여 모형의 적합성을 검토하였다. 이를 통해 비선형 회귀 모형이 온도 지수의 변화를 얼마나 정확하게 추정하는지

평가하였다.

이러한 분석 방법론을 통해 전 세계 육지-해양 온도 지수의 과거 변화를 체계적으로 분석하고, 이를 기반으로 미래의 기후 변화를 예측하였다. 이를 통해 지구 온난화의 추세를 보다 명확히 이해하고, 지속 가능한 환경 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2.2 데이터 분석 및 결과 설명

2.2.1 더빈-왓슨 검정

우선 이 데이터는 시계열 데이터이므로 자기상관이 존재하는지 확인하기 위해 더빈-왓슨 검정을 수행한다.

Table 1: Durbin-Watson Test Result

Test	Durbin-Watson Test
Data	Linear Model
Durbin-Watson Statistic (DW)	0.37499
p-value	$< 2.2 \times 10^{-16}$
Alternative Hypothesis	True autocorrelation is greater than 0

더빈-왓슨 통계량은 0.37499로 p-value는 2.2×10^{-16} 보다 작게 나왔다. 따라서 오차의 자기상관성이 0이라는 귀무가설을 기각한다. 그러므로 해당 데이터는 시계열 분석을 하기에 적절하다.

2.2.2 시계열 분석

시계열 분석은 시간에 따라 변화하는 데이터의 패턴을 분석하고, 미래 값을 예측하는 데 유용한 통계적 기법이다. 본 연구에서는 전 세계 육지-해양 온도 지수의 시간적 변동을 평가하기 위해 시계열 분석을 수행하였으며, 이동 평균과 ARIMA 모형을 주요 방법론으로 사용하였다. 먼저, 데이터의 단기적 변동을 평활화하고 장기적인 추세를 파악하기 위해 5년 이동 평균을 계산하였다. Figure 2의 빨간 그래프로 확인할 수 있다. 이동 평균은 원시 데이터의 노이즈를 제거하여 주요 패턴을 강조하는 데 효과적이다. 이동 평균을 적용한 결과, 전반적으로 온도 지수는 20세기 중반 이후 상승하는 경향을 보였다. 특히, 1970년대 이후 급격한 상승세가 관찰되었으며, 이는 기후 변화가 가속화되고 있음을 시사한다.

다음으로, 전 세계 육지-해양 온도 지수의 시계열 데이터를 기반으로 ARIMA(Autoregressive Integrated Moving Average) 모형을 적합했다. ARIMA 모형은 데이터의 자기상관성과 이동 평균 성분을 결합하여 과거 패턴을 기반으로 미래 값을 예측하는 데 유용하다. 최적의 모형 선택을 위해 auto.arima 함수를 활용하였으며, 이를 통해 데이터에 가장 적합한 파라미터를 자동으로 결정하였다. 결과는 Appendix의 Table 2에서 확인할 수 있다.

그 결과로 1차의 자기상관항과 3년의 이동평균이 선택되었다. Drift term은 0.0086으로 장기적으로 일정한 증가 추세를 나타낸다. AR(1)의 값은 -0.9410으로 1년 전 시점의 값과 강한 음의 자기상관을 나타낸다.

Land-Ocean Temperature Index (No Smoothing)

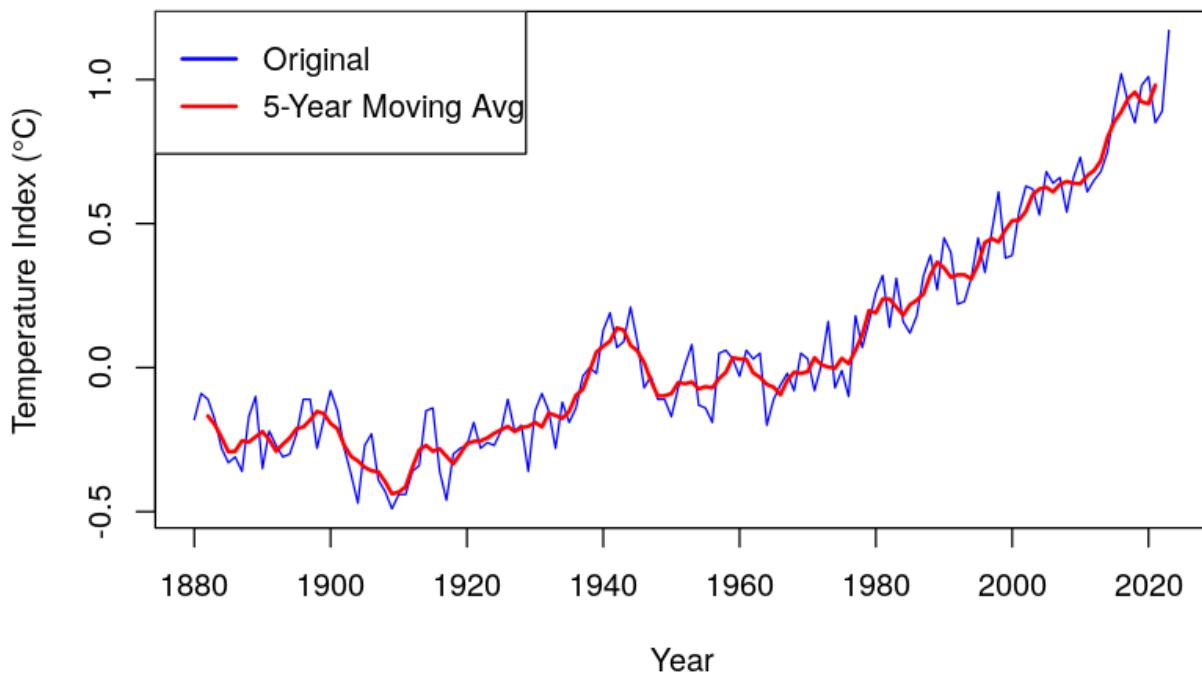


Figure 2: 5년 이동 평균

MA(1), MA(2), MA(3)의 값은 각각 0.6454, -0.5574, -0.3338으로 과거 오차의 영향을 모두 포함하고 있다. AIC와 BIC의 값은 -237.73, -219.95로 낮게 나타났고 해당 모형의 잔차 자기상관도 작게 나타났다. 따라서 모형은 데이터에 잘 적합되었다.

적합된 ARIMA 모형을 기반으로 Figure 3에서 향후 10년간의 온도 지수를 예측하였다. 예측 결과에 따르면, 중앙 추정치(Point Forecast)는 대체로 완만한 상승 추세를 보이며, 약 1.1의 값에서 점진적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 지구온난화로 인해 온도가 지속적으로 상승하고 있음을 반영한다. 또한, 모델이 제공하는 신뢰구간(Confidence Interval, 이하 CI)은 시간 경과에 따라 점진적으로 넓어지는데, 이는 장기 예측에서 발생하는 불확실성을 반영하며, 온도 상승의 폭이 예측하기 어려운 수준으로 확대될 수 있음을 의미한다. 예를 들어, 첫 해인 2024년의 80% CI는 [0.9781, 1.2412]로 좁은 범위를 보이지만, 10년 후인 2033년에는 [0.8943, 1.3279]로 신뢰구간이 확장된다. 이는 지구온난화에 따른 온도 상승의 불확실성이 장기적으로 더욱 커질 수 있음을 보여준다.

온도의 점진적 상승은 전반적으로 관측 데이터를 기반으로 한 안정적인 패턴을 따르고 있다. 그러나 장기 예측에서의 CI는 모델이 기반하고 있는 데이터와 지구온난화의 복잡한 특성으로 인해 예측의 신뢰도를 일정 수준 제한할 수 있음을 시사한다. 따라서 10년 이상의 장기 예측에서는 이러한 불확실성을 고려하여 해석의 신중함이 필요하다.

지구온난화의 맥락에서 본 연구 결과는 특히 중요한 의미를 가진다. 중앙 추정치의 지속적인 상승은 온

Forecast of Temperature Index

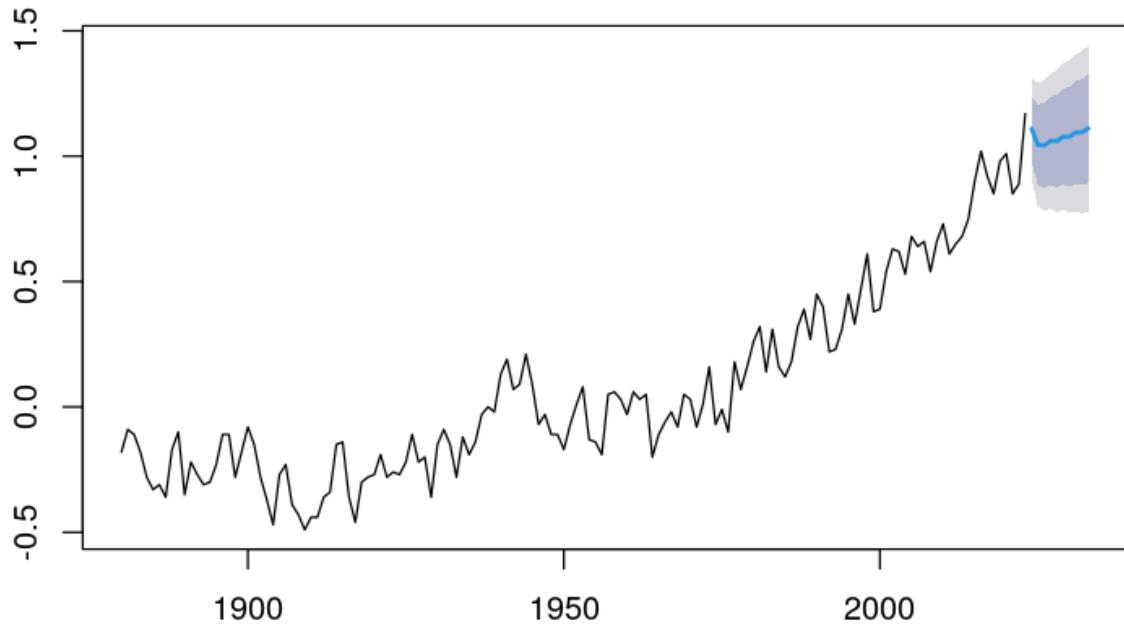


Figure 3: 10 Years Forecast

실가스 배출 증가와 같은 인간 활동이 지구 평균 온도를 점진적으로 상승시키고 있음을 시사한다. 이는 국제 사회가 기후 변화에 대응하기 위해 긴급하고 체계적인 노력이 필요하다는 것을 강조한다. 또한, 본 연구의 예측은 정책결정자와 과학자들이 온도 상승의 장기적인 영향을 평가하고 대응 방안을 마련하는데 유용한 자료로 활용될 수 있다.

2.2.3 2차 비선형 회귀분석

비선형 회귀 분석은 데이터가 선형적이지 않은 복잡한 경향성을 보일 때 이를 모델링하기 위한 강력한 통계적 도구이다. 본 연구에서는 전 세계 육지-해양 온도 지수의 비선형적 추세를 효과적으로 파악하기 위해 2차 함수 형태의 비선형 회귀 분석을 수행하였다.

온도 지수 데이터를 설명하기 위해 다음과 같은 2차 함수 형태의 회귀 모형을 설정하였다:

$$E(y) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

여기서 y 는 연도에 따른 온도 지수(No smoothing), x 는 연도(Year)를 나타내며, a , b , c 는 추정해야 할 모수이다. 비선형 최소제곱법(nonlinear least squares)을 활용하여 모수를 추정하였으며, 초기값으로 적절한 추정치를 제공하여 수렴 문제를 최소화하였다. 적합 결과는 Appendix의 Table 3에서 확인할 수

Nonlinear Regression with Quadratic Function

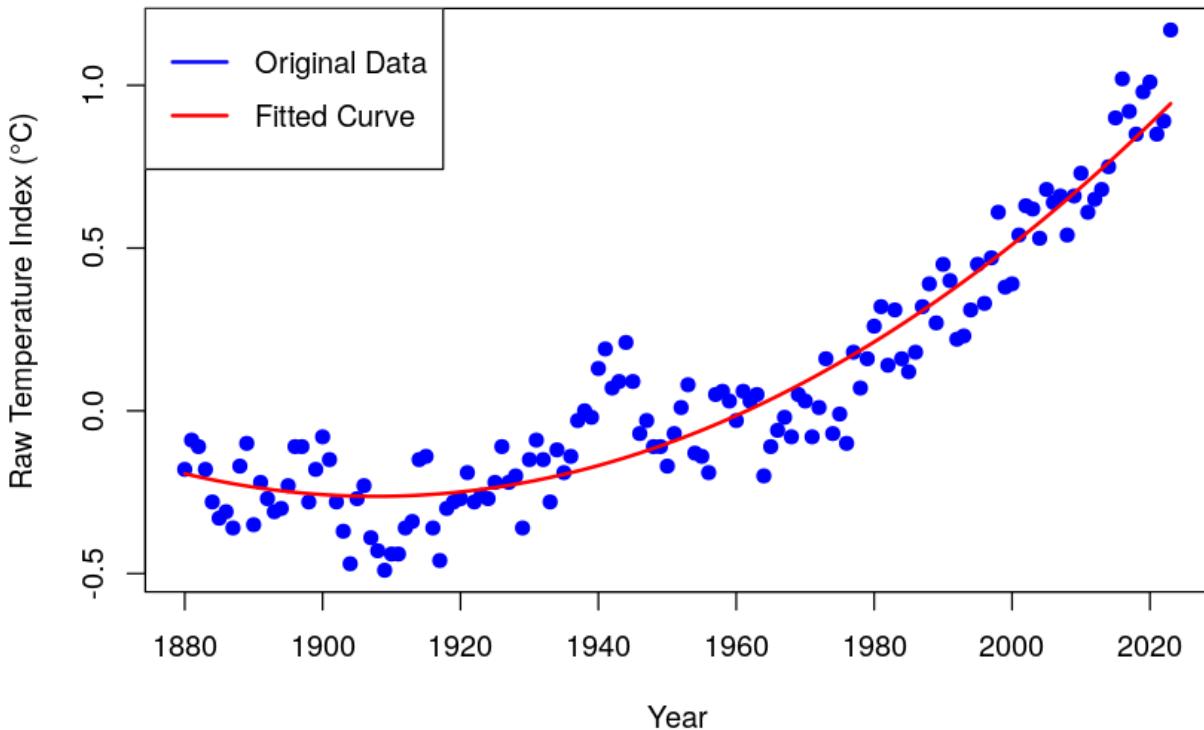


Figure 4: 2차 비선형 회귀

있다. 그 결과, 모형은 데이터의 비선형적 경향을 효과적으로 설명하는 것으로 나타났다. 추정된 모수 a , b , c 모두 통계적으로 유의한 수준($p < 0.05$)을 보였다.

Figure 4에서 적합된 모형을 기반으로 예측값을 계산하고, 이를 실제 데이터와 함께 시각화하였다. 예측된 곡선은 온도 지수의 상승 추세를 명확히 반영하였으며, 특히 20세기 중반 이후의 급격한 상승 경향을 잘 설명하였다. 비선형 회귀 곡선과 실제 데이터의 잔차 분석 결과, 잔차가 무작위 분포를 보임으로써 모형의 적합성이 확인되었다.

분석 결과, 온도 지수는 연도의 제곱항과 강한 상관성을 보였으며, 이는 기후 변화가 단순 선형적 증가를 넘어 $O(x^2)$ 의 속도로 가속화되고 있음을 시사한다. 이러한 비선형적 경향은 온실가스 배출 증가와 기타 복합적인 기후 요인이 온도 상승에 미치는 영향을 반영한 것으로 볼 수 있다.

2.3 분석의 타당성 설명

2.3.1 시계열 분석

본 연구에서 사용된 ARIMA 모형의 타당성을 검토하기 위해 잔차 분석과 모형 진단을 수행하였다. Figure 5, 6, 7은 ARIMA(1,1,3) 모형의 잔차를 평가한 결과로, 잔차의 시간적 패턴, 자기상관 함수(ACF), 그리고 잔차의 분포를 시각적으로 나타내고 있다.

Residuals of ARIMA Model

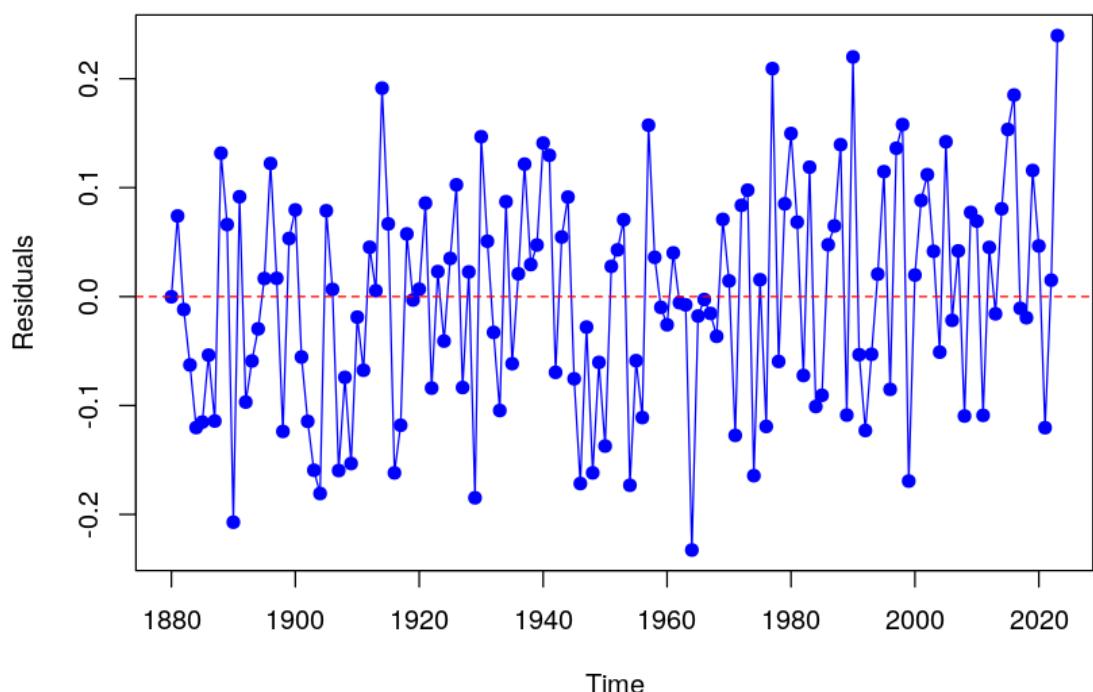


Figure 5: 잔차 그림

ACF of ARIMA Residuals

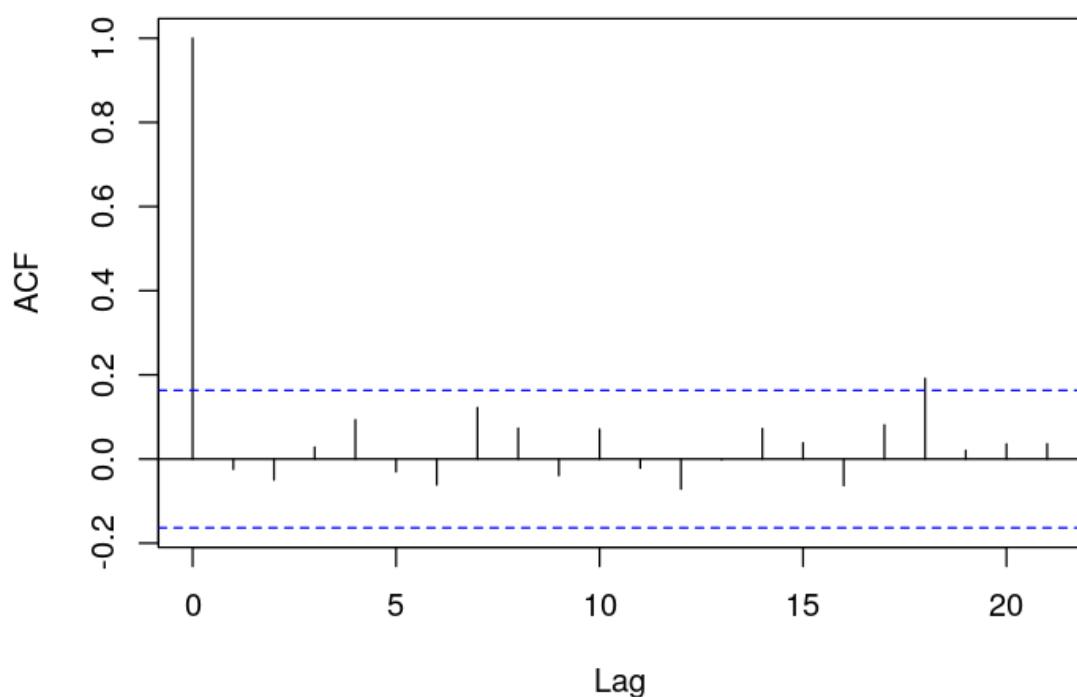


Figure 6: ACF

Figure 5의 그래프는 ARIMA(1,1,3) 모형으로 적합한 후 잔차의 시간적 분포를 보여준다. 잔차는 시간에 따라 무작위적인 패턴을 보이며, 특정한 추세나 주기성이 관찰되지 않았다. 이는 ARIMA 모형이 데이터의 주요 패턴을 효과적으로 제거하고 잔차를 무작위적인 성질로 변환했음을 시사한다.

Figure 6의 ACF 그래프는 잔차의 자기상관성을 분석한 결과를 나타낸다. 대부분의 지연(lag)에서 자기상관 계수는 유의성 한계선(파란 점선) 내에 포함되어 있다. 이는 잔차가 통계적으로 독립적인 성질을 가짐을 나타내며, ARIMA 모형이 적합한 설명력을 제공했음을 의미한다.

Figure 7의 히스토그램과 밀도 곡선은 잔차의 분포를 보여준다. 잔차의 분포는 정규분포에 근사한 형태를 보였으며, 중앙에 집중된 대칭적인 형태를 나타냈다. 이러한 결과는 ARIMA 모형의 잔차가 정규성을 가정하는 분석에 적합하다는 것을 시사한다.

잔차의 무작위성, 자기상관성의 결여, 그리고 정규분포 근사는 ARIMA(1,1,3) 모형이 데이터의 시계열 패턴을 성공적으로 모델링했음을 보여준다. 이러한 결과는 본 연구에서 수행한 예측 분석의 신뢰성을 뒷받침하며, 모형의 타당성을 입증하는 근거로 작용한다. 따라서 ARIMA 모형을 통해 도출된 미래 온도 지수 예측 결과는 데이터 기반의 과학적 근거를 제공한다고 할 수 있다.

다만, 일부 지연에서 약간의 자기상관이 관찰되므로, 향후 연구에서는 ARIMA 모형의 고차 항을 추가하거나 외부 요인을 포함하는 확장 모형을 고려할 수 있다. 또한, 다른 모형과의 비교 분석을 통해 예측 결과의 강건성을 더욱 검증할 필요가 있다.

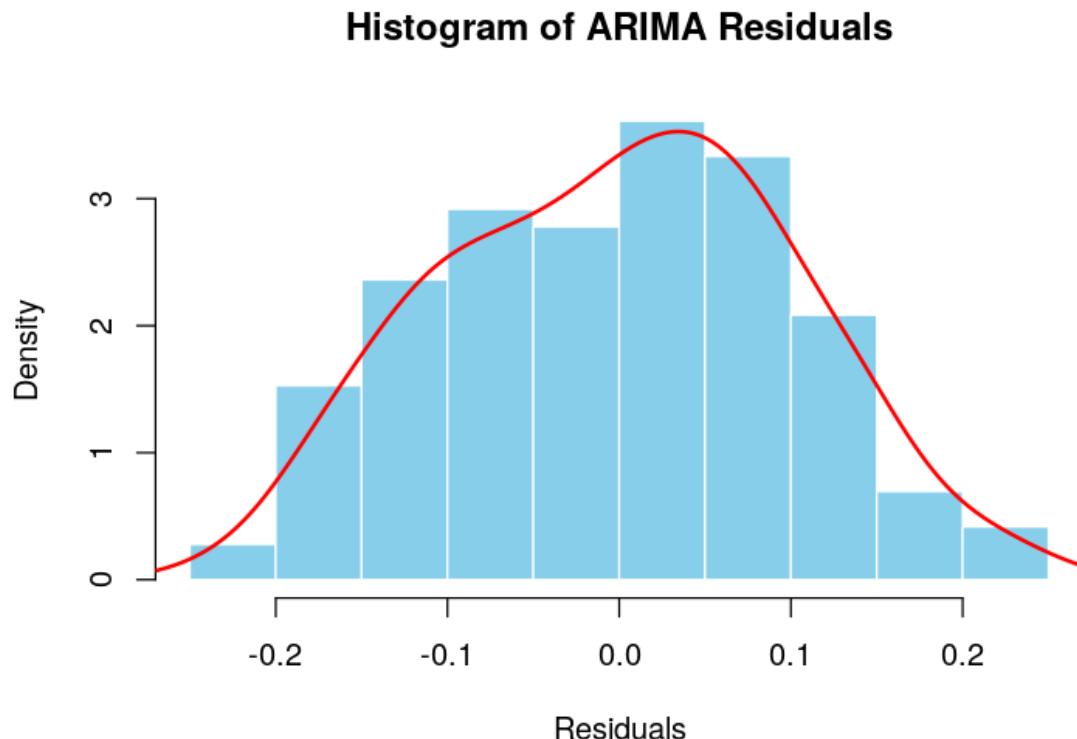


Figure 7: 잔차 그래프

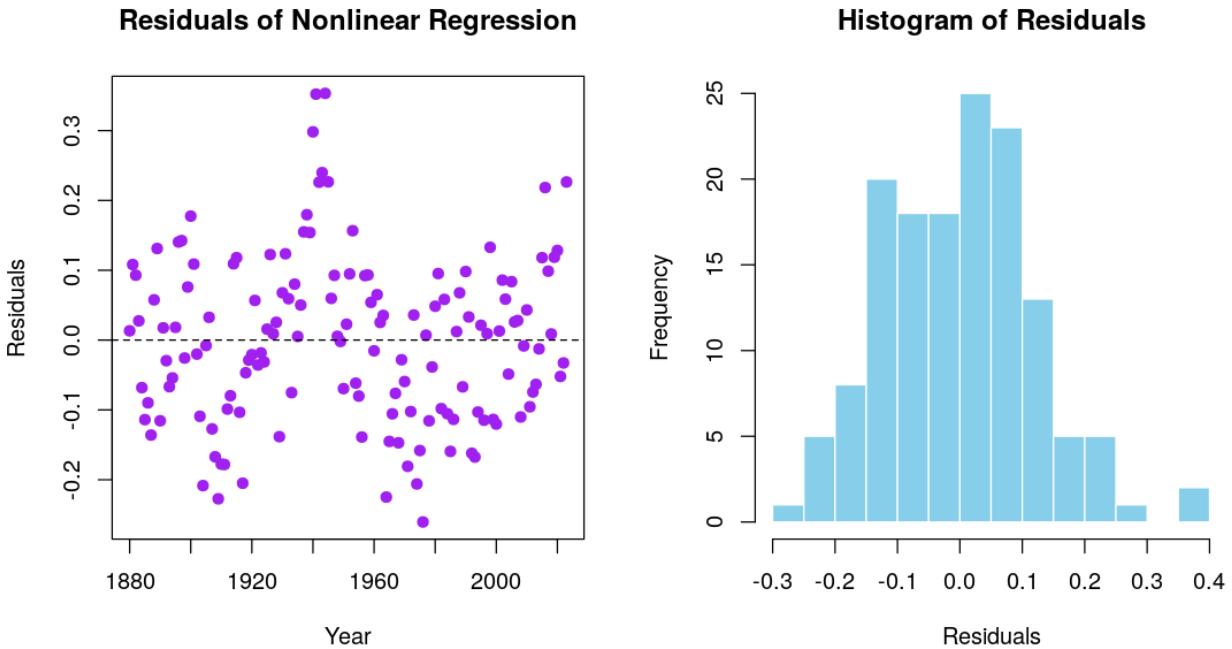


Figure 8: 2차 모형의 잔차 및 잔차 히스토그램

2.3.2 2차 비선형 회귀분석

비선형 회귀 분석의 적합성과 타당성을 평가하기 위해 잔차 분석을 수행하였으며, Figure 8은 잔차의 분포와 시간에 따른 변화를 시각화한 결과를 보여준다. 이는 2차 함수 형태의 비선형 회귀 모형이 데이터에 얼마나 적합한지 검토하기 위한 중요한 단계로, 잔차의 무작위성, 정규성, 및 등분산성을 분석하였다.

왼쪽 그래프는 잔차의 시간적 분포를 나타낸다. 잔차는 대체로 무작위적인 패턴을 보이며, 특정한 구조적 경향이나 주기성이 관찰되지 않았다. 이는 모형이 데이터의 주요 패턴을 효과적으로 설명했음을 시사한다. 오른쪽 히스토그램은 잔차의 분포를 나타내며, 정규성 가정을 검토하는 데 사용되었다. 잔차는 대체로 중심이 0에 가까운 대칭적 형태를 보이며, 정규 분포에 근사한 경향을 나타냈다. 그러나 극단적인 값(outlier)이 소수 존재하여, 잔차의 완전한 정규성을 보장하기 위해 추가적인 점검이 필요할 수 있다.

잔차의 시간적 분포와 히스토그램을 통해 분산의 일정성을 평가한 결과, 잔차의 분산은 대체로 일정한 경향을 보였다. 이는 비선형 회귀 모형이 데이터에 적합하게 적용되었음을 나타내며, 잔차가 데이터의 시간적 구조와 무관하게 무작위적이라는 것을 시사한다.

비선형 회귀 분석에서 추정된 모수의 유의성 검정 결과, 모형은 데이터의 변동성을 효과적으로 설명하는 것으로 나타났다. 또한, 잔차 분석을 통해 모형이 데이터의 비선형적 경향을 포착하는 데 적합하다는 것을 확인하였다.

3 결론

3.1 분석 결과 요약

본 연구는 1880년부터 2023년까지의 전 세계 육지-해양 온도 지수를 분석하여 지구 온난화의 시간적 변화와 미래 예측에 대한 체계적인 이해를 제시하였다. 시계열 분석을 통해 도출된 ARIMA 모형은 온도 지수의 장기적 상승 추세를 효과적으로 모델링하였으며, 향후 10년간의 온도 상승을 예측하는 데 유의미한 결과를 보여주었다. ARIMA 모형은 단기적인 온도 변화 패턴을 정밀하게 반영하였으며, 이동 평균 기법을 통해 데이터의 주요 추세를 명확히 시각화하였다.

2차 비선형 회귀 분석에서는 온도 지수의 비선형적 가속화 현상을 포착함으로써, 단순 선형 증가 이상의 복합적 기후 변화 양상을 설명하였다. 특히, 제곱항을 포함한 비선형 모형은 20세기 중반 이후의 급격한 온도 상승을 정량적으로 나타내며, 온실가스 배출과 같은 복합적 요인의 영향을 반영하였다.

분석 결과, 온도 지수는 시계열적 특성과 비선형적 특성을 동시에 내포하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 기후 변화가 단순한 추세 이상의 복잡한 구조를 가진다는 점을 강조한다. 2차 비선형 회귀 분석에 의하면 그 추세는 $O(x^2)$ 으로 나타났다.

본 연구의 결과는 과거 데이터에 기반하여 미래 온도 상승의 심각성과 그 추세를 과학적으로 입증함으로써, 기후 변화 대응 전략 수립을 위한 실질적 근거를 제공하였다. 따라서 본 연구는 데이터 기반의 분석을 통해 지구 온난화의 현재와 미래에 대한 이해를 심화시켰으며, 이를 통해 기후 변화 연구와 정책 수립에 기여할 수 있는 중요한 인사이트를 제시하였다.

3.2 분석의 장점 및 한계점 설명

3.2.1 통계적 분석의 측면

본 연구는 전 세계 육지-해양 온도 지수의 장기적 추세와 비선형적 특성을 체계적으로 분석함으로써 기후 변화 연구에 여러 가지 중요한 기여를 하였다. 주요 장점은 다음과 같다.

- 1) **다양한 분석 방법의 통합적 적용:** 시계열 분석과 2차 비선형 회귀 분석을 결합하여 데이터를 다각적으로 해석하였다. 이를 통해 데이터의 단기 변동과 장기 추세를 모두 파악하였다.
- 2) **최신 데이터를 활용한 정량적 평가:** NASA GISS의 최신 데이터를 활용하여 연구 결과의 신뢰도와 타당성을 높였다. 이는 현재와 미래의 기후 변화에 대한 보다 정확한 이해를 가능하게 하였으며, 국제적 기후 변화 대응 전략에 기여할 수 있는 실질적 근거를 제시하였다.
- 3) **미래 예측을 위한 견고한 모델 제공:** ARIMA 모형과 비선형 회귀 모형을 활용하여 미래 10년간의 온도 상승 추세를 예측하였다. 이러한 분석은 기후 변화의 가속화 가능성과 과학적으로 뒷받침하며, 정책 결정자들에게 실질적인 정보를 제공하였다.

본 연구는 여러 성과를 거두었으나, 몇 가지 한계점도 존재한다.

- 1) **모델의 단순화:** ARIMA와 2차 비선형 회귀 모형은 데이터의 복잡한 특성을 일정 부분 반영하였지만, 온도 변화에 영향을 미치는 외부 요인(예: 온실가스 배출량, 산업화 수준, 태양 활동 등)을 직접적으로 포함하지 못하였다. 이는 모형의 설명력에 제한을 초래할 수 있다.
- 2) **장기 예측의 불확실성:** 시계열 모델 특성상 예측 기간이 길어질수록 신뢰 구간이 확대되어 예측 결과의 정확도가 저하될 가능성이 있다. 특히, 장기적으로 온도 지수의 변화는 비선형적이고 복잡한 양상을 보이므로, 현재 사용한 모델만으로 완벽히 설명하기 어렵다.
- 3) **잔차의 비정규성과 극단값 문제:** 일부 분석에서 잔차의 비정규성과 극단값(outliers)이 관찰되었으며, 이는 모형의 적합성을 일정 부분 제한할 수 있다. 이러한 문제는 추가적인 데이터 전처리와 고도화된 모형 개발을 통해 보완될 필요가 있다.
- 4) **지역별 세부 분석의 부재:** 본 연구는 전 세계 평균 데이터를 기반으로 수행되었으나, 지역별 온도 변화 특성은 상이할 수 있다. 이를 반영하지 못한 점은 연구 결과의 세부적 활용도를 낮출 가능성이 있다. 본 연구는 시계열 및 비선형 회귀 분석의 장점을 활용하여 지구 온난화의 심각성을 과학적으로 입증하였으나, 외부 요인 반영 부족, 장기 예측의 불확실성, 일부 잔차 문제 등 보완이 필요한 한계점도 확인되었다. 이러한 한계점은 향후 연구를 통해 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

3.2.2 시스템 이론의 측면

기후 모델은 본질적으로 복잡계(complex system)의 성격을 띠며, 다양한 변수와 동적 상호작용을 통해 형성된다. 이 시스템은 대기, 해양, 빙하, 생태계 등의 다양한 요소가 상호작용하며 비선형적이고, 다중 시간 척도에서 작동하는 특징을 가진다. 또한, 이러한 시스템은 외부 입력에 민감하게 반응하며, 작은 변화가 전체 시스템의 동역학에 큰 영향을 미치는 특성을 보인다. 따라서 기후 변화 분석에서는 단순한 통계적 접근뿐만 아니라 시스템 이론적(system-theoretic) 접근 방식이 필수적이다.

그러나 본 연구는 기후 시스템의 이러한 복잡성을 완전히 반영하지 못하였으며, 시스템 이론적 접근을 활용하지 못하였다. 예컨대, 본 연구는 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 통해 온도 변화의 주요 추세를 도출하였으나, 기후 시스템의 상호작용 구조를 모델링하지 못하였다. 기후 시스템은 온실가스 농도, 해양 순환, 태양 복사, 생물권 활동 등 다양한 변수들이 동적으로 결합된 네트워크로 작동하며, 이러한 변수들 간의 상호작용이 시스템의 비선형적 변화를 초래한다. 하지만 본 연구의 분석에서는 이러한 복잡한 상호작용이 통계적 모형으로 단순화되었으며, 기후 시스템의 동적 특성을 반영하는 데 한계가 있었다. 또한, 본 연구는 기후 시스템의 안정성과 복원력을 평가하거나 시스템의 임계점(bifurcation point)을 탐구하지 않았다. 복잡계에서는 특정 조건에서 시스템이 급격히 새로운 상태로 전환(tipping point)될 수 있는 가능성이 존재하며, 이는 기후 변화 예측에서 중요한 요소로 간주된다. 그러나 본 연구는 이러한 체

계적 전환이나 안정성 분석을 포함하지 않아서 기후 시스템이 변화에 어떻게 반응할지를 충분히 설명하지 못하였다.

마지막으로, 제어 이론적(control-theoretic) 관점에서도 분석이 부족하였다. 기후 시스템을 안정적으로 유지하거나 온도 상승을 억제하기 위한 제어 전략은 시스템 이론의 핵심 요소이다. 예컨대, 온실가스 배출 감소나 탄소 흡수 기술 같은 외부 입력을 '제어 입력(control input)'으로 간주하고, 이를 통해 시스템의 상태를 목표 상태로 유도하는 분석은 이루어지지 않았다. 이는 본 연구가 단순히 과거 데이터를 기반으로 추세를 예측하는 데 그쳤을 뿐, 기후 변화 문제 해결에 기여할 수 있는 구체적인 실행 방안을 제시하지 못하였음을 보여준다.

따라서 기후 시스템의 복잡성과 동적 특성을 충분히 반영하기 위해서는 시스템 이론적 접근이 필수적이다. 이러한 접근은 기후 모델 내에서의 주요 변수 간 상호작용을 정량적으로 설명하고, 시스템의 안정성과 임계점을 평가하며, 최적 제어 전략을 설계하는 데 중요한 도구를 제공할 수 있다. 향후 연구에서는 시스템 이론과 통계적 방법론을 결합하여 기후 시스템의 복잡성을 보다 정밀하게 분석하고, 기후 변화 대응을 위한 실질적인 전략을 제시할 필요가 있다.

3.3 추가 연구사항 제안

본 연구는 전 세계 육지-해양 온도 지수를 대상으로 시계열 분석과 비선형 회귀 분석을 통해 지구 온난화의 추세를 체계적으로 분석하였다. 그러나 본 연구에서 확인된 한계점을 보완하고 기후 변화에 대한 보다 심층적인 이해를 위해 추가적인 연구가 필요하다. 이에 따라 다음과 같은 연구 방향을 제안한다.

- 1) **외부 요인을 포함한 복합 모델 개발:** 온도 변화에 영향을 미치는 다양한 외부 요인(예: 온실가스 배출량, 태양 복사 변화, 산업화 수준, 해양 순환 등)을 포함하는 복합적인 예측 모델을 개발할 필요가 있다. 이는 기존 시계열 모델 및 비선형 회귀 모델의 설명력을 확장하여, 온도 변화의 주요 원인을 정량적으로 평가할 수 있게 할 것이다.
- 2) **지역별 분석 및 비교 연구:** 전 세계 평균 데이터를 기반으로 한 분석을 지역별로 세분화하여 기후 변화의 지역적 특성과 차이를 파악하는 연구가 필요하다. 이를 통해 특정 지역의 기후 변화 양상을 더 정밀히 이해하고, 지역별로 최적화된 기후 변화 대응 전략을 수립할 수 있을 것이다.
- 3) **장기 예측을 위한 고도화된 모델링 기법 적용:** 장기 예측의 불확실성을 줄이기 위해 기계 학습 기반의 비선형 모델(예: 딥러닝, 강화학습 등) 및 동적 시스템 모델을 적용하는 연구를 제안한다. 이러한 기법은 복잡한 데이터 패턴을 더 잘 포착하고, 장기적인 추세와 변동성을 더 정확히 예측할 수 있을 것이다.
- 4) **다중 변수 분석으로의 확장:** 온도 지수 외에도 해수면 상승, 극단적 기상 현상, 빙하 감소 등의 관련 변수를 통합적으로 분석하여, 기후 변화가 생태계와 인간 활동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 연구가 필요하다. 이를 통해 다차원적인 기후 변화 대응 전략을 마련할 수 있을 것이다.

5) 모델 검증을 위한 추가 데이터 활용: 본 연구는 NASA GISS의 온도 지수를 기반으로 하였으나, 다양한 출처의 데이터(예: NOAA, IPCC 데이터베이스 등)를 추가적으로 활용하여 분석 결과의 신뢰성과 일반성을 높이는 연구가 요구된다. 이를 통해 동일한 연구 방법론이 다양한 데이터에서 동일하게 적용될 수 있는지를 검증할 수 있을 것이다.

6) 정책적 시사점에 대한 연구 강화: 분석 결과를 바탕으로 도출된 시사점을 정책적으로 구체화하는 연구가 필요하다. 예를 들어, 온도 상승 추세에 기반한 재생 에너지 확대 전략, 탄소 배출 감소 목표 설정, 기후 변화 적응 방안 마련 등을 체계적으로 도출하여 정책 결정자들에게 실질적인 지침을 제공할 수 있을 것이다.

추가 연구는 기후 변화 연구의 범위와 깊이를 확장하여 현재와 미래의 온도 변화를 보다 정교하게 이해하는 데 기여할 것이다. 이를 통해 국제 사회가 직면한 기후 변화 문제에 대해 보다 효과적이고 지속 가능한 해결책을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Pachauri Core Writing Team et al. Climate change 2014: synthesis report. *Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 151, 2014.
- [2] Hoesung Lee, Katherine Calvin, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter Thorne, Christopher Trisos, José Romero, Paulina Aldunce, Ko Barret, et al. Ipcc, 2023: Climate change 2023: Synthesis report, summary for policymakers. contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [core writing team, h. lee and j. romero (eds.)]. ipcc, geneva, switzerland. 2023.
- [3] GISTEMP Team. 2024: Giss surface temperature analysis (gistemp), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. Accessed: 2024-12-04.
- [4] 안종호 and 한대호. 기후변화에 따른 지표수의 수온 영향평가. *수질보전*, 26(1):133–139, 2010.
- [5] 정시훈, 김영준, 박수민, and 임정호. 시계열 기계학습을 이용한 한반도 남해 해수면 온도 예측 및 고수온 탐지. *대한원격탐사학회지*, 36(5):1077–1093, 2020.

A ARIMA Result

Table 2: ARIMA(1,1,3) Model Summary

Series	Temperature Time Series (temperature_ts)
Model	ARIMA(1,1,3) with drift
Coefficients:	
AR(1) (ϕ_1)	-0.9410 (SE: 0.0563)
MA(1) (θ_1)	0.6454 (SE: 0.0946)
MA(2) (θ_2)	-0.5574 (SE: 0.0795)
MA(3) (θ_3)	-0.3338 (SE: 0.0769)
Drift	0.0086 (SE: 0.0033)
Model Metrics:	
σ^2 (Variance)	0.01054
Log Likelihood	124.86
AIC	-237.73
AICc	-237.11
BIC	-219.95
Training Set Error Measures:	
ME (Mean Error)	-0.0005357617
RMSE (Root Mean Square Error)	0.1004872
MAE (Mean Absolute Error)	0.08336728
MPE (Mean Percentage Error)	Inf
MAPE (Mean Absolute Percentage Error)	Inf
MASE (Mean Absolute Scaled Error)	0.8929978
ACF1 (Autocorrelation of Residuals at Lag 1)	-0.02413904

B Quadratic Nonlinear Regression Result

Table 3: Regression Analysis Results

Parameter	Estimate	Std. Error	t Value	Pr(> t)
a	9.075×10^{-5}	6.445×10^{-6}	14.08	$< 2 \times 10^{-16}$ ***
b	-3.462×10^{-1}	2.516×10^{-2}	-13.76	$< 2 \times 10^{-16}$ ***
c	3.300×10^2	2.454×10^1	13.45	$< 2 \times 10^{-16}$ ***

Significance Codes: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, . $p < 0.1$, 1

Residual Standard Error: 0.1195 (on 141 degrees of freedom)

Iterations to Convergence: 2

Convergence Tolerance: 2.426×10^{-6}