|  |
| --- |
| **물리적 리스크 스코어링 로직 정의서** |
| **사업장 기후 물리적 리스크 AI 평가 시스템**  **Version 1.1**  **2025-12-05**  SK AX |
| SKALA |

**제.개정 이력**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **버전** | **제.개정 일자** | **제.개정 내용** | **작성자** |
| 0.1 | 2025-11-16 | 최초 등록 | 오동헌 |
| 0.2 | 2025-11-17 | 템플릿 수정 | 정보경 |
| 1.0 | 2025-12-03 | 리스크별 E, V 로직 / 리스크 비교 방법론 추가 | 이창민 |
| 1.1 | 2025-12-05 | 템플릿 수정 및 세부 로직 수정 | 이창민 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

**Index / 목차**

[1. 개요 4](#_Toc215822525)

[2. 리스크 유형별 점수 산출 로직 5](#_Toc215822526)

[2.1. 극심한 고온 (Extreme Heat) 5](#_Toc215822527)

[2.1.1. 정의 및 개요 5](#_Toc215822528)

[2.1.2. Hazard 점수 5](#_Toc215822529)

[2.1.3. Exposure 점수 10](#_Toc215822530)

[2.1.4. Vulnerability 13](#_Toc215822531)

[2.2. 극심한 한파 (Extreme Cold) 16](#_Toc215822532)

[2.2.1. 정의 및 개요 16](#_Toc215822533)

[2.2.2. Hazard 점수 17](#_Toc215822534)

[2.2.3. Exposure 점수 21](#_Toc215822535)

[2.2.4. Vulnerability 24](#_Toc215822536)

[2.3. 산불 (Wildfire) 27](#_Toc215822537)

[2.3.1. 정의 및 개요 27](#_Toc215822538)

[2.3.2. Hazard 점수 27](#_Toc215822539)

[2.3.3. Exposure 점수 30](#_Toc215822540)

[2.3.4. Vulnerability 점수 34](#_Toc215822541)

[2.4. 가뭄 (Drought) 37](#_Toc215822542)

[2.4.1. 정의 및 개요 37](#_Toc215822543)

[2.4.2. Hazard 점수 37](#_Toc215822544)

[2.4.3. Exposure 점수 41](#_Toc215822545)

[2.4.4. Vulnerability 점수 45](#_Toc215822546)

[2.5. 물부족 (Water Stress) 47](#_Toc215822547)

[2.5.1. 정의 및 개요 47](#_Toc215822548)

[2.5.2. Hazard 점수 48](#_Toc215822549)

[2.5.3. Exposure 점수 50](#_Toc215822550)

[2.5.4. Vulnerability 점수 53](#_Toc215822551)

[2.6. 해수면 상승 (Sea Level Rise) 57](#_Toc215822552)

[2.6.1. 정의 및 개요 57](#_Toc215822553)

[2.6.2. Hazard 점수 57](#_Toc215822554)

[2.6.3. Exposure 점수 61](#_Toc215822555)

[2.6.4. Vulnerability 점수 64](#_Toc215822556)

[2.7. 하천 홍수 (River Flood) 68](#_Toc215822557)

[2.7.1. 정의 및 개요 68](#_Toc215822558)

[2.7.2. Hazard 점수 68](#_Toc215822559)

[2.7.3. Exposure 점수 72](#_Toc215822560)

[2.7.4. Vulnerability 점수 75](#_Toc215822561)

[2.8. 도시 홍수 (Urban Flood) 78](#_Toc215822562)

[2.8.1. 정의 및 개요 78](#_Toc215822563)

[2.8.2. Hazard 점수 79](#_Toc215822564)

[2.8.3. Exposure 점수 82](#_Toc215822565)

[2.8.4. Vulnerability 점수 85](#_Toc215822566)

[2.9. 태풍 (Typhoon) 88](#_Toc215822567)

[2.9.1. 정의 및 개요 88](#_Toc215822568)

[2.9.2. Hazard 점수 89](#_Toc215822569)

[2.9.3. Exposure 점수 93](#_Toc215822570)

[2.9.4. Vulnerability 97](#_Toc215822571)

[3. 리스크 비교 방법론 101](#_Toc215822572)

[3.1. 리스크 스코어 비교 방법론 101](#_Toc215822573)

[3.1.1. 개요 101](#_Toc215822574)

[3.1.2. TCFD 리스크 분류 101](#_Toc215822575)

[3.1.3. 비교 방법론 101](#_Toc215822576)

[3.1.4. 구현 코드 요약 102](#_Toc215822577)

[3.1.5. 근거 및 참고문헌 102](#_Toc215822578)

# 개요

본 정의서는 SK 사업장에 영향을 줄 수 있는 주요 물리적 기후 리스크(Physical Climate Risks)를 체계적으로 산정하기 위해 마련되었다.

9대 리스크는 국제 기준 (IPCC AR6, TCFD, UNDRR Hazard Classification 등)을 참고하여 선정하였으며, 사업장 단위 위험도를 수치화하기 위해 **Hazard–Exposure–Vulnerability 구조**로 계산한다.

이 문서에서는 향후 시스템에서 산출·관리하게 될 **9개의 물리적 리스크 유형**을 정의하고, 각 리스크별 산출 로직을 2장에서 상세히 설명한다. 여기서 정의된 9대 리스크는 다음과 같다.

* 극심한 고온 (Extreme Heat)
* 극심한 한파 (Extreme Cold)
* 산불 (Wildfire)
* 가뭄 (Drought)
* 물부족 (Water Stress)
* 해수면 상승 (Sea Level Rise)
* 하천 홍수 (River Flood)
* 도시 홍수 (Urban Flood)
* 태풍 (Typhoon)

각 리스크는 기후 시나리오 기반 지표, 지형, 토지피복, 인프라 정보, 건축물 특성 등을 모두 활용하여 산출하며, 모든 위험 유형은 아래와 같은 공통 구조로 계산된다.

|  |
| --- |
| Hazard(기후 위험도) × Exposure(사업장 노출도) × Vulnerability(취약성) = Physical Risk Score |

각 리스크 산출에는 SSP 기반 미래 기후자료(기온·강수·습도·풍속), 해수면 자료(CMIP6 zos), 지형, 토지피복, 고도 자료, 건축물대장 정보 등이 활용되며, 보다 상세한 데이터 정의와 산출 방식은 2장에서 항목별로 기술한다.

* **작성자 : 오동헌, 이창민**
* **작성일 : 2025.11.16**
* **수정일 : 2025.12.03**
* **설명: 9대 물리적 리스크 간략 소개입니다**

# 리스크 유형별 점수 산출 로직

## 극심한 고온 (Extreme Heat)

### 정의 및 개요

극심한 고온 리스크는 기후변화로 인한 폭염과 열대야의 증가가 건물 및 시설에 미치는 물리적·경제적 영향을 정량화한 지표이다. IPCC AR6 및 TCFD 권고에 따라 폭염의 빈도, 강도, 지속시간을 복합적으로 평가하며, 건물의 구조적 취약성과 지역 특성을 반영하여 미래 기후 시나리오별 리스크를 산정한다.

**HCI (Heat Compound Index) 구성 지표**

기상청 KMA SSP 시나리오로부터 추출한 4개 ETCCDI 공식 지표를 가중 평균하여 복합 폭염 지수(HCI)를 산출한다.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 지수 | 정의 | 단위 | 가중치 |
| TX90P | 최고기온 90백분위수 초과 일수 | 일/년 | 0.3 |
| WSDI | 폭염 지속 기간 지수 (Warm Spell Duration Index) | 일 | 0.3 |
| TR25 | 열대야 일수 (일최저기온 ≥ 25°C) | 일/년 | 0.2 |
| SU25 | 폭염 일수 (일최고기온 ≥ 33°C) | 일/년 | 0.2 |

[표 1]

[표 1] HCI 구성 지표

**평가 로직**

**Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)**

기후변화 시나리오에 따른 폭염 발생 강도 및 빈도를 4개 ETCCDI 지표의 가중 평균으로 평가하고(Hazard), 건물 용도 기반 도시 열섬(UHI) 강도를 3단계로 분류하여 점수화하며(Exposure), 건물 연식·구조·용도에 따른 단열 성능 및 냉방 부하를 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 가중치 | 정규화 기준 |
| TX90P | 최고기온 90백분위수 초과 일수 | 일/년 | 0.3 | 100일 |
| WSDI | 폭염 지속 기간 지수 | 일 | 0.3 | 30일 |
| TR25 | 열대야 일수 (일최저기온 ≥ 25°C) | 일/년 | 0.2 | 50일 |
| SU25 | 폭염 일수 (일최고기온 ≥ 33°C) | 일/년 | 0.2 | 100일 |

[표 2]

[표 2] 극심한 고온 Hazard 사용 변수

현재 구현에서는 TX90P를 폭염일수(heatwave\_days\_per\_year)로, WSDI를 폭염 지속기간(heat\_wave\_duration)으로 추출하여 사용한다. TR25는 열대야일수(tropical\_nights)로, SU25는 폭염일수(heatwave\_days\_per\_year)로 KMA SSP 데이터에서 직접 산출된다. 모든 지표는 기상청의 1km 격자 단위 미래 기후 시나리오 데이터를 기반으로 하며, climate\_loader 모듈을 통해 자동으로 계산된다.

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 유형 | 출처 | 사용 변수 |
| 기후 시나리오 데이터 | 기상청 1km 격자 기후변화 시나리오 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) | 일최고기온, 일최저기온 (NetCDF, 2021-2100년) |
| ETCCDI 지수 | climate\_loader 모듈 계산 | heatwave\_days\_per\_year, tropical\_nights, heat\_wave\_duration |

[표 3]

[표 3] 극심한 고온 Hazard 데이터 소스

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| heat\_data = climate\_loader.get\_extreme\_heat\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'heatwave\_days\_per\_year', 'tropical\_nights', 'heat\_wave\_duration', 'annual\_max\_temp\_celsius'} |

**산출 공식**

**Step 1: ETCCDI 지표 추출**

|  |
| --- |
| # KMA SSP 데이터에서 추출  su25 = heat\_data['heatwave\_days\_per\_year'] # SU25: 폭염일수 (≥33°C)  tr25 = heat\_data['tropical\_nights'] # TR25: 열대야일수 (≥25°C)  wsdi = heat\_data['heat\_wave\_duration'] # WSDI: 폭염 지속일수  tx90p = su25 # TX90P ≈ SU25 (근사값) |

**Step 2: 절대값 기준 정규화**

각 ETCCDI 지표를 절대적 임계값 기준으로 0~1 사이로 정규화한다.

|  |
| --- |
| tx90p\_norm = min(tx90p / 100.0, 1.0) # 100일 기준  wsdi\_norm = min(wsdi / 30.0, 1.0) # 30일 기준  tr25\_norm = min(tr25 / 50.0, 1.0) # 50일 기준  su25\_norm = min(su25 / 100.0, 1.0) # 100일 기준 |

정규화 기준은 한반도 하계 기후 특성을 고려하여 설정되었다. TX90P는 연간 100일을 극한 폭염 기준으로 하며, 이는 여름철 약 3개월에 해당하는 기간이다. WSDI는 30일 이상 지속되는 폭염을 극심한 수준으로 판단하며, 이는 약 1개월간의 연속된 고온 현상을 의미한다. TR25는 연간 50일의 열대야를 기준으로 하여 여름철 절반 정도를 포함하며, SU25는 100일을 기준으로 하여 여름철 대부분의 폭염 일수를 반영한다.

**Step 3: 가중 평균**

|  |
| --- |
| HCI = 0.3 × tx90p\_norm + 0.3 × wsdi\_norm + 0.2 × tr25\_norm + 0.2 × su25\_norm |

가중치는 폭염의 물리적 특성과 실제 피해 발생 메커니즘을 반영하여 설정되었다. TX90P와 WSDI에 각각 30%의 가장 높은 가중치를 부여한 것은 폭염의 빈도와 지속기간이 인체 건강 및 건물 냉방 부하에 가장 직접적인 영향을 미치기 때문이다. TR25와 SU25에는 각각 20%의 보조적 가중치를 부여하여 야간 고온 및 주간 극한 기온의 절대적 빈도를 보완 지표로 활용한다.

**Step 4: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| if HCI > 0.8:  hazard\_level = 'extreme' # 극심함  elif HCI > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high' # 매우 높음  elif HCI > 0.4:  hazard\_level = 'high' # 높음  elif HCI > 0.2:  hazard\_level = 'moderate' # 보통  else:  hazard\_level = 'low' # 낮음 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_heat\_hazard\_improved(self, lat, lon, data):  """극심한 고온 Hazard - HCI 절대값 정규화"""    # KMA SSP 데이터 추출  heat\_data = self.climate\_loader.get\_extreme\_heat\_data(lat, lon, self.target\_year)    # ETCCDI 지수  su25 = heat\_data['heatwave\_days\_per\_year']  tr25 = heat\_data['tropical\_nights']  wsdi = heat\_data['heat\_wave\_duration']  tx90p = su25 # TX90P ≈ SU25    # 절대값 기준 정규화  tx90p\_norm = min(tx90p / 100.0, 1.0)  wsdi\_norm = min(wsdi / 30.0, 1.0)  tr25\_norm = min(tr25 / 50.0, 1.0)  su25\_norm = min(su25 / 100.0, 1.0)    # HCI 계산  hci = 0.3\*tx90p\_norm + 0.3\*wsdi\_norm + 0.2\*tr25\_norm + 0.2\*su25\_norm    # Hazard 등급  if hci > 0.8:  hazard\_level = 'extreme'  elif hci > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high'  elif hci > 0.4:  hazard\_level = 'high'  elif hci > 0.2:  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low'    return {'hci': hci, 'hazard\_level': hazard\_level} |

**근거 및 참고 문헌**

* Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. Nature Communications, 11(1), 3357. [https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7](about:blank)
* IPCC AR6 WGI (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/](about:blank)
* Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., et al. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. WIREs Climate Change, 2(6), 851-870. [https://doi.org/10.1002/wcc.147](about:blank)
* Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). Climate Change Indices: Definitions of the 27 core indices. [http://etccdi.pacificclimate.org/list\_27\_indices.shtml](about:blank)
* 기상청 (2021). 한반도 기후변화 전망보고서 2020. 기상청.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| **Building Type** | 건물 용도 (주거/업무/상업 등) | 카테고리 |
| **UHI Intensity** | 도시 열섬 강도 | High / Medium / Low |

[표 4]

[표 4] 극심한 고온 Exposure 사용 변수

데이터 소스

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 유형 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 (세움터 API) | 건물 용도, 위치 |
| 위치 좌표 변환 | V-World Geocoding API | 위도, 경도 |

[표 5]

**[표 5] 극심한 고온 Exposure 데이터 소스**

**산출 공식**

건물 용도에 따른 도시 열섬(UHI) 강도를 3단계로 분류하고 점수화한다. 건축물 밀집도 및 용도에 따른 기온 변동성 노출 수준을 평가한다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| UHI 강도 | 판정 기준 | 점수 |
| High | 건물 용도에 '업무' 또는 '상업' 포함 | 70 |
| Medium | 건물 용도에 '주택' 포함 | 50 |
| Low | 기타 (녹지 인접, 저밀도 지역) | 30 |

[표 6]

**[표 6] 도시 열섬 분류 기준**

업무시설과 상업시설은 인공열 배출이 많고 불투수면 비율이 높아 High(70점)로 분류된다. 주거시설은 일반적인 주거 밀집 지역으로 Medium(50점)을 부여하며, 기타 녹지 인접 또는 저밀도 지역은 Low(30점)로 평가한다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_estimate\_uhi\_intensity(data):  building\_type = data.get('building\_type', '주택')    if '업무' in building\_type or '상업' in building\_type:  return 'high'  elif '주택' in building\_type:  return 'medium'  else:  return 'low'  # 점수 변환  if uhi == 'high':  exposure\_score = 70  elif uhi == 'medium':  exposure\_score = 50  else:  exposure\_score = 30 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # exposure\_calculator.py  def \_estimate\_uhi\_intensity(self, data):  """도시 열섬 강도 추정"""  building\_type = data.get('building\_type', '주택')    if '업무' in building\_type or '상업' in building\_type:  return 'high'  elif '주택' in building\_type:  return 'medium'  else:  return 'low'  # risk\_calculator.py  def \_extract\_exposure\_score(self, risk\_type, exposure):  """Exposure 데이터 → 점수 변환"""  if risk\_type in ['extreme\_heat', 'extreme\_cold']:  heat\_exp = exposure['heat\_exposure']  uhi = heat\_exp['urban\_heat\_island']    if uhi == 'high':  return 70  elif uhi == 'medium':  return 50  else:  return 30    return 50 |

**근거 및 참고 문헌**

* Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1-24.
* Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.
* 환경부 (2021). 도시 열섬 현상 완화를 위한 도시계획 수립 지침.

### Vulnerability

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Building Age | 건물 연식 (현재 연도 - 준공연도) | 30년 이상 +20점, 20년 이상 +10점 |
| Structure | 건물 구조 (목조/철근콘크리트 등) | 목조·벽돌 +15점, 철근콘크리트 -10점 |
| Main Purpose | 주용도 (업무/상업시설 등) | 업무·상업시설 +10점 |

[표 7]

**[표 7]극심한 고온 Vulnerability 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 준공연도(pmsDay), 주구조(strctCdNm), 주용도(mainPurpsCdNm) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식 = 현재 연도 - 준공연도 |

[표 8]

**[표 8극심한 고온 Vulnerability 데이터 소스]**

**산출 공식**

극심한 고온 취약성은 건물의 단열 성능을 핵심 지표로 평가한다. 기본 점수 50점에서 시작하여 건물이 노후화될수록 기밀성과 단열 성능이 저하되어 폭염 시 내부 온도 유지에 취약해지며, 목조 등 특정 구조는 열 축적 및 냉방 효율에 더 민감한 것으로 산정한다.

**세부 계산:**

|  |
| --- |
| score = 50 # 기본값  # 1. 건물 연식 (오래될수록 취약)  if age > 30:  score += 20 # 노후 건물  elif age > 20:  score += 10 # 중간 노후도  # 2. 구조 (단열 성능)  if '목조' in structure or '벽돌' in structure:  score += 15 # 단열 취약  elif '철근콘크리트' in structure:  score -= 10 # 단열 양호  # 3. 용도 (냉방 부하)  if main\_purpose in ['업무시설', '상업시설']:  score += 10 # 냉방 부하 높음  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산/감산 기준은 건물의 물리적 특성이 폭염 대응 능력에 미치는 영향을 반영한다. 건물 연식의 경우, 30년 이상 노후 건물은 단열재의 열화, 창호 기밀성 저하로 인해 20점을 가산하며, 20~30년 건물은 부분적 노후화를 고려하여 10점을 가산한다. 구조 측면에서는 목조나 벽돌 건물이 철근콘크리트 대비 열용량이 낮고 단열 성능이 취약하여 15점을 추가로 가산하며, 철근콘크리트 구조는 상대적으로 양호한 단열 성능을 반영하여 10점을 감산한다. 용도 측면에서는 업무시설과 상업시설이 넓은 유리창 면적과 높은 냉방 부하로 인해 10점을 가산한다.

점수 범위는 최소 25점(신축 철근콘크리트 주거시설)부터 최대 95점(40년 이상 노후 목조 업무시설)까지 분포하며, 이는 건물의 폭염 대응 능력을 정량적으로 나타낸다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_heat\_vulnerability(self, exposure):  """극심한 고온 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']  structure = building['structure']    score = 50 # 기본값    # 건물 연식  if age > 30:  score += 20  elif age > 20:  score += 10    # 구조  if '목조' in structure or '벽돌' in structure:  score += 15  elif '철근콘크리트' in structure:  score -= 10    # 용도  if building['main\_purpose'] in ['업무시설', '상업시설']:  score += 10    # 0~100 정규화  score = max(0, min(100, score))    return {'score': score, 'level': self.\_score\_to\_level(score)} |

**근거 및 참고 문헌**

* 국토교통부 (2020). 녹색건축물 설계 기준. 국토교통부고시 제2020-893호.
* ASHRAE (2021). ASHRAE Handbook - Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
* 에너지관리공단 (2019). 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준.
* Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., & James, P. A. B. (2008). Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. Energy and Buildings, 40(12), 2148-2168.

## 극심한 한파 (Extreme Cold)

### 정의 및 개요

극심한 한파 리스크는 기후변화에 따른 한파 지속일수 증가, 결빙일수 빈발, 최저기온 하강 등이 사업장의 난방 에너지 부하, 배관 동파, 근로자 한랭 질환, 시설물 내구성에 미치는 복합적인 저온 피해 위험을 의미한다. IPCC AR6 및 WMO ETCCDI 기준에 따라 한파의 빈도, 강도, 지속기간을 종합적으로 평가하며, 건물의 구조적 취약성과 지역 특성을 반영하여 미래 기후 시나리오별 리스크를 산정한다.

**CCI (Cold Compound Index) 구성 지표**

기상청 KMA SSP 시나리오로부터 추출한 4개 ETCCDI 공식 지표를 가중 평균하여 복합 한파 지수(CCI)를 산출한다.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 지수 | 정의 | 단위 | 가중치 |
| TN10P | 최저기온 10백분위수 미만 일수 | 일/년 | 0.3 |
| CSDI | 한파 지속 기간 지수 | 일 | 0.3 |
| FD0 | 결빙일수 (일최저기온 < 0°C) | 일/년 | 0.2 |
| ID0 | 겨울일수 (일최고기온 < 0°C) | 일/년 | 0.2 |

[표 9]

**[표 9] CCI 구성 지표**

**평가 로직**

Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)

기후변화 시나리오에 따른 한파 발생 강도 및 빈도를 4개 ETCCDI 지표의 가중 평균으로 평가하고(Hazard), 건물 용도 기반 도시화 강도를 3단계로 분류하여 점수화하며(Exposure), 건물 연식과 구조에 따른 단열 성능 및 기밀성을 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 가중치 | 정규화 기준 |
| TN10P | 최저기온 10백분위수 미만 일수 | 일/년 | 0.3 | 80일 |
| CSDI | 한파 지속 기간 지수 | 일 | 0.3 | 20일 |
| FD0 | 결빙일수 (일최저기온 < 0°C) | 일/년 | 0.2 | 100일 |
| ID0 | 겨울일수 (일최고기온 < 0°C) | 일/년 | 0.2 | 50일 |

[표 10]

**[표 10] 극심한 한파 Hazard 사용 변수**

현재 구현에서는 TN10P를 한파일수(coldwave\_days\_per\_year)로, CSDI를 한파 지속기간(cold\_wave\_duration)으로 추출하여 사용한다. FD0는 결빙일수(frost\_days)로, ID0는 겨울일수(ice\_days)로 KMA SSP 데이터에서 직접 산출된다. 모든 지표는 기상청의 1km 격자 단위 미래 기후 시나리오 데이터를 기반으로 하며, climate\_loader 모듈을 통해 자동으로 계산된다.

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 사용 변수 |
| 기후 시나리오 데이터 | 기상청 1km 격자 기후변화 시나리오 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) | 일최고기온, 일최저기온 (NetCDF, 2021-2100년) |
| ETCCDI 지수 | climate\_loader 모듈 계산 | coldwave\_days\_per\_year, cold\_wave\_duration, frost\_days, ice\_days |

[표 11]

**[표 11] 극심한 한파 Hazard 데이터 소스**

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| cold\_data = climate\_loader.get\_extreme\_cold\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'coldwave\_days\_per\_year', 'cold\_wave\_duration', 'frost\_days', 'ice\_days', 'annual\_min\_temp\_celsius'} |

**산출 공식**

**Step 1: ETCCDI 지표 추출**

|  |
| --- |
| # KMA SSP 데이터에서 추출  tn10p = cold\_data['coldwave\_days\_per\_year'] # TN10P: 한파일수  csdi = cold\_data['cold\_wave\_duration'] # CSDI: 한파 지속일수  fd0 = cold\_data['frost\_days'] # FD0: 결빙일수 (최저기온 < 0°C)  id0 = cold\_data['ice\_days'] # ID0: 겨울일수 (최고기온 < 0°C) |

**Step 2: 절대값 기준 정규화**

각 ETCCDI 지표를 절대적 임계값 기준으로 0~1 사이로 정규화한다.

|  |
| --- |
| tn10p\_norm = min(tn10p / 80.0, 1.0) # 80일 기준  csdi\_norm = min(csdi / 20.0, 1.0) # 20일 기준  fd0\_norm = min(fd0 / 100.0, 1.0) # 100일 기준  id0\_norm = min(id0 / 50.0, 1.0) # 50일 기준 |

정규화 기준은 한반도 동계 기후 특성을 고려하여 설정되었다. TN10P는 연간 80일을 극한 한파 기준으로 하며, 이는 겨울철 약 3개월에 해당하는 기간이다. CSDI는 20일 이상 지속되는 한파를 극심한 수준으로 판단하며, 이는 약 3주간의 연속된 저온 현상을 의미한다. FD0는 연간 100일의 결빙일수를 기준으로 하여 동절기 대부분을 포함하며, ID0는 50일을 기준으로 하여 극한 동절기 상황을 반영한다.

**Step 3: 가중 평균**

|  |
| --- |
| CCI = 0.3 × tn10p\_norm + 0.3 × csdi\_norm + 0.2 × fd0\_norm + 0.2 × id0\_norm |

가중치는 한파의 물리적 특성과 실제 피해 발생 메커니즘을 반영하여 설정되었다. TN10P와 CSDI에 각각 30%의 가장 높은 가중치를 부여한 것은 한파의 빈도와 지속기간이 건물의 난방 부하 및 배관 동파 위험에 가장 직접적인 영향을 미치기 때문이다. FD0와 ID0에는 각각 20%의 보조적 가중치를 부여하여 결빙 현상의 절대적 빈도를 보완 지표로 활용한다.

**Step 4: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| if CCI > 0.8:  hazard\_level = 'extreme' # 극심함  elif CCI > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high' # 매우 높음  elif CCI > 0.4:  hazard\_level = 'high' # 높음  elif CCI > 0.2:  hazard\_level = 'moderate' # 보통  else:  hazard\_level = 'low' # 낮음 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_cold\_hazard\_improved(self, lat, lon, data):  """극심한 한파 Hazard - CCI 절대값 정규화"""    # KMA SSP 데이터 추출  cold\_data = self.climate\_loader.get\_extreme\_cold\_data(lat, lon, self.target\_year)    # ETCCDI 지수  tn10p = cold\_data['coldwave\_days\_per\_year']  csdi = cold\_data['cold\_wave\_duration']  fd0 = cold\_data['frost\_days']  id0 = cold\_data['ice\_days']    # 절대값 기준 정규화  tn10p\_norm = min(tn10p / 80.0, 1.0)  csdi\_norm = min(csdi / 20.0, 1.0)  fd0\_norm = min(fd0 / 100.0, 1.0)  id0\_norm = min(id0 / 50.0, 1.0)    # CCI 계산  cci = 0.3\*tn10p\_norm + 0.3\*csdi\_norm + 0.2\*fd0\_norm + 0.2\*id0\_norm    # Hazard 등급  if cci > 0.8:  hazard\_level = 'extreme'  elif cci > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high'  elif cci > 0.4:  hazard\_level = 'high'  elif cci > 0.2:  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low'    return {'cci': cci, 'hazard\_level': hazard\_level} |

**근거 및 참고 문헌**

* Vavrus, S., Wang, F., Martin, J. E., Francis, J. A., Peings, Y., & Cattiaux, J. (2017). Changes in North American atmospheric circulation and extreme weather: Influence of Arctic amplification and Northern Hemisphere snow cover. Journal of Climate, 30(11), 4317-4333.
* WMO (2009). Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation. World Meteorological Organization.
* Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., et al. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. WIREs Climate Change, 2(6), 851-870.
* Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). Climate Change Indices: Definitions of the 27 core indices. [http://etccdi.pacificclimate.org/list\_27\_indices.shtml](about:blank)
* 기상청 (2021). 한반도 기후변화 전망보고서 2020. 기상청.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| Building Type | 건물 용도 (주거/업무/상업 등) | 카테고리 |
| Urban Intensity | 도시화 강도 | High / Medium / Low |

[표 12]

**[표 12] 극심한 한파 Exposure 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 (세움터 API) | 건물 용도, 위치 |
| 위치 좌표 변환 | V-World Geocoding API | 위도, 경도 |

[표 13]

**[표 13] 극심한 한파 Exposure 데이터 소스**

**산출 공식**

한파에 대한 노출도는 사업장이 위치한 지역의 도시화 정도와 열적 환경 특성을 기반으로 추정한다. 건축물 밀집도 및 용도에 따른 기온 변동성 노출 수준을 평가하며, 건물 용도에 따라 도시화 강도를 3단계로 분류하고 점수화한다. 일반적으로 도심지가 교외보다 따뜻하나, 본 모델은 건물의 밀집도와 인공 구조물 의존도를 '기온 극한 현상에 대한 노출'로 해석하여 평가한다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 도시화 강도 | 판정 기준 | 점수 |
| High | 건물 용도에 '업무' 또는 '상업' 포함 | 70 |
| Medium | 건물 용도에 '주택' 포함 | 50 |
| Low | 기타 (녹지 인접, 저밀도 지역) | 30 |

[표 14]

[표 14] 도시화 강도 분류 기준

업무시설과 상업시설은 고밀도 개발 지역으로 인공 구조물이 밀집되어 있어 High(70점)로 분류된다. 주거시설은 일반적인 주거 밀집 지역으로 Medium(50점)을 부여하며, 기타 녹지 인접 또는 저밀도 지역은 Low(30점)로 평가한다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_estimate\_urban\_intensity(data):  building\_type = data.get('building\_type', '주택')    if '업무' in building\_type or '상업' in building\_type:  return 'high'  elif '주택' in building\_type:  return 'medium'  else:  return 'low'  # 점수 변환  if urban\_intensity == 'high':  exposure\_score = 70  elif urban\_intensity == 'medium':  exposure\_score = 50  else:  exposure\_score = 30 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # risk\_calculator.py  def \_extract\_exposure\_score(self, risk\_type, exposure):  """Exposure 데이터 → 점수 변환"""  if risk\_type in ['extreme\_heat', 'extreme\_cold']:  heat\_exp = exposure['heat\_exposure']  uhi = heat\_exp['urban\_heat\_island']    if uhi == 'high':  return 70  elif uhi == 'medium':  return 50  else:  return 30    return 50 |

**근거 및 참고 문헌**

* Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.
* 환경부 (2021). 도시 열섬 현상 완화를 위한 도시계획 수립 지침.

### Vulnerability

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Building Age | 건물 연식 (현재 연도 - 준공연도) | 30년 이상 +20점, 20년 이상 +10점 |
| Structure | 건물 구조 (목조/철근콘크리트 등) | 목조 +15점 |

[표 15]

**[표 15] 극심한 한파 Vulnerability 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 준공연도(pmsDay), 주구조(strctCdNm) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식 = 현재 연도 - 준공연도 |

[표 16]

**[표 16]극심한 한파 Vulnerability 데이터 소스**

**산출 공식**

극심한 한파 취약성은 건물의 단열 성능을 핵심 지표로 평가한다. 기본 점수 50점에서 시작하여 건물이 노후화될수록 기밀성과 단열 성능이 저하되어 한파 시 내부 온도 유지에 취약해지며, 목조 등 특정 구조는 동결 및 열 손실에 더 민감한 것으로 산정한다.

|  |
| --- |
| V\_cold = Base(50) + Age\_Score + Structure\_Score |

**세부 계산**

|  |
| --- |
| score = 50 # 기본값  # 1. 건물 연식 (노후 건물 단열 취약)  if age > 30:  score += 20 # 노후 건물  elif age > 20:  score += 10 # 중간 노후도  # 2. 구조 (단열 성능)  if '목조' in structure:  score += 15 # 재질 특성상 한파 취약성 가중  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산 기준은 건물의 물리적 특성이 한파 대응 능력에 미치는 영향을 반영한다. 건물 연식의 경우, 30년 이상 노후 건물은 단열재의 열화, 창호 기밀성 저하, 배관 노후화로 인해 20점을 가산하며, 20~30년 건물은 부분적 노후화를 고려하여 10점을 가산한다. 구조 측면에서는 목조 건물이 철근콘크리트 대비 열전도율이 높고 틈새 발생이 많아 15점을 추가로 가산한다.

점수 범위는 최소 50점(신축 철근콘크리트 건물)부터 최대 85점(40년 이상 노후 목조 건물)까지 분포하며, 이는 건물의 한파 대응 능력을 정량적으로 나타낸다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_cold\_vulnerability(self, exposure):  """극심한 한파 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']  structure = building['structure']    score = 50 # 기본값    # 건물 연식  if age > 30:  score += 20  elif age > 20:  score += 10    # 구조  if '목조' in structure:  score += 15    # 0~100 정규화  score = max(0, min(100, score))    return {'score': score, 'level': self.\_score\_to\_level(score)} |

**근거 및 참고 문헌**

* 국토교통부 (2020). 건축물의 에너지절약설계기준. 국토교통부고시 제2020-893호.
* 국토안전관리원 (2019). 시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침.
* ASHRAE (2021). ASHRAE Handbook - Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
* 에너지관리공단 (2019). 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준.

## 산불 (Wildfire)

### 정의 및 개요

산불 리스크는 기후변화로 인한 고온·건조 기상 조건의 증가가 산림 화재 발생 가능성과 확산 속도를 높여 건물 및 시설에 미치는 물리적·경제적 영향을 정량화한 지표이다. IPCC AR6 및 TCFD 권고에 따라 산불 위험기상지수(FWI)를 활용하여 산불 발생 가능성을 평가하며, 산림과의 거리 및 건물의 구조적 특성을 반영하여 미래 기후 시나리오별 리스크를 산정한다.

**평가 로직**

Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)

기후변화 시나리오에 따른 산불 위험 강도를 FWI(Fire Weather Index) 지표로 평가하고(Hazard), 산림과의 거리 기반으로 건물의 물리적 노출도를 4단계로 분류하여 점수화하며(Exposure), 건물의 가연성 구조 및 연식에 따른 취약성을 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 정규화 기준 |
| FWI | 산불 위험기상지수(Fire Weather Index) | 무차원 | 50 |

[표 17]

**[표 17] 산불 Hazard 사용 변수**

현재 구현에서는 FWI를 기상청 KMA SSP 시나리오의 일별 기상 데이터(기온, 습도, 풍속, 강수량)로부터 계산한다. FWI는 캐나다 산림청(Canadian Forest Service)이 개발한 국제 표준 지수로, 0~100+ 범위의 값을 가지며 높을수록 산불 위험이 크다. 모든 계산은 climate\_loader 모듈을 통해 자동으로 수행된다.

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 사용 변수 |
| 기후 시나리오 데이터 | 기상청 1km 격자 기후변화 시나리오 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) | 일 기온, 상대습도, 풍속, 강수량 (NetCDF, 2021-2100년) |
| FWI 지수 | climate\_loader 모듈 계산 | fire\_weather\_index (캐나다 산림청 FWI System 기반) |

[표 18]

**[표 18] 산불 Hazard 데이터 소스**

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| wildfire\_data = climate\_loader.get\_wildfire\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'fire\_weather\_index': float, 'annual\_max\_fwi': float} |

**산출 공식**

**Step 1: FWI 지표 추출**

|  |
| --- |
| # KMA SSP 데이터에서 계산  fwi = wildfire\_data['fire\_weather\_index'] # 연평균 FWI  max\_fwi = wildfire\_data['annual\_max\_fwi'] # 연중 최대 FWI |

**Step 2: 절대값 기준 정규화**

FWI지표를 절대적 임계값 기준으로 0~1 사이로 정규화한다.

|  |
| --- |
| fwi\_norm = min(fwi / 50.0, 1.0) # 50 기준 |

정규화 기준은 국제 산불 위험 평가 기준을 고려하여 설정되었다. FWI 50은 캐나다 산림청의 "Very High" 산불 위험 등급 시작점에 해당하며, 이를 극한 산불 위험 기준으로 설정했다. FWI는 지수적으로 증가하는 특성이 있어 50 이상에서는 산불 발생 가능성과 확산 속도가 급격히 높아진다. 한반도의 경우 건조한 봄철(3~5월)에 FWI가 30~50 범위에서 대형 산불이 빈발하며, 기후변화 시나리오에서는 FWI 50이상의 날이 증가할 것으로 예측된다.

**Step 3: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| if fwi\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme' # 극심함 (FWI > 40)  elif fwi\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high' # 매우 높음 (FWI 30-40)  elif fwi\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high' # 높음 (FWI 20-30)  elif fwi\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate' # 보통 (FWI 10-20)  else:  hazard\_level = 'low' # 낮음 (FWI < 10) |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_wildfire\_hazard\_improved(self, lat, lon, data):  """산불 Hazard - FWI 절대값 정규화"""    # KMA SSP 데이터 추출  wildfire\_data = self.climate\_loader.get\_wildfire\_data(lat, lon, self.target\_year)    # FWI 지수  fwi = wildfire\_data['fire\_weather\_index']    # 절대값 기준 정규화  fwi\_norm = min(fwi / 50.0, 1.0)    # Hazard 등급  if fwi\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme'  elif fwi\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high'  elif fwi\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high'  elif fwi\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low'    return {'fwi': fwi, 'fwi\_normalized': fwi\_norm, 'hazard\_level': hazard\_level} |

**근거 및 참고 문헌**

* Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35.
* IPCC AR6 WGII (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 2: Terrestrial and Freshwater Ecosystems and Their Services.
* Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(42), 11770-11775.
* 국립산림과학원 (2021). 기후변화에 따른 산불 위험 예측 기술 개발. 국립산림과학원 연구보고서.
* 산림청 (2020). 산불위험예보 업무규정. 산림청 예규 제1354호.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| Forest Distance | 산림과의 최단 거리 | 0 ~ 무한대 (m) |
| Proximity Category | 산림 근접도 범주 | Very High / High / Medium / Low |

[표 19]

**[표 19] 산불 Exposure 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 위치 정보 | V-World Geocoding API | 위도, 경도 |
| 산림 공간 데이터 | 환경공간정보서비스 (EGIS) | 산림 경계 벡터 데이터 |
| 파생 변수 | 내부 계산 (Haversine 거리) | 건물-산림 최단 거리 (m) |

[표 20]

**[표 20] 산불 Hazard 데이터 소스**

**산출 공식**

산림과의 거리를 기반으로 건물의 산불 노출도를 4단계로 분류하고 점수화한다. 산불 확산 속도 및 비화(飛火) 가능 거리를 고려하여 근접도 범주를 설정한다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 근접도 범주 | 거리 기준 | 점수 |
| Very High | 0~100m | 90 |
| High | 100~500m | 70 |
| Medium | 500~1000m | 40 |
| Low | 1000m 이상 | 10 |

[표 21]

**[표 21] 산불 노출도 분류 기준**

Very High(0~100m)는 산림과 직접 인접하여 산불 발생 시 즉각적인 피해가 예상되는 구역이며, 산불의 복사열과 비화에 직접 노출된다. High(100~500m)는 강풍 시 비화 가능 거리 내에 위치하여 산불 확산 시 높은 위험이 있는 구역이다. Medium(500~1000m)은 대형 산불 시 영향권에 포함될 수 있으나 직접적인 피해 가능성은 낮은 구역이며, Low(1000m 이상)는 산불의 직접적인 영향이 거의 없는 안전 거리이다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_forest\_distance(building\_coords, forest\_data):  """산림과의 최단 거리 계산"""  min\_distance = float('inf')    for forest\_polygon in forest\_data:  distance = haversine\_distance(building\_coords, forest\_polygon.centroid)  min\_distance = min(min\_distance, distance)    return min\_distance  def \_classify\_wildfire\_exposure(distance\_m):  """거리 기반 노출도 점수"""  if distance\_m < 100:  return 90  elif distance\_m < 500:  return 70  elif distance\_m < 1000:  return 40  else:  return 10 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # exposure\_calculator.py  def \_calculate\_wildfire\_exposure(self, data):  """산불 노출도 계산"""  coords = (data['latitude'], data['longitude'])    # 산림 데이터 로드  forest\_data = self.\_load\_forest\_boundaries()    # 최단 거리 계산  distance\_m = self.\_calculate\_forest\_distance(coords, forest\_data)    # 점수 부여  if distance\_m < 100:  score = 90  category = 'very\_high'  elif distance\_m < 500:  score = 70  category = 'high'  elif distance\_m < 1000:  score = 40  category = 'medium'  else:  score = 10  category = 'low'    return {  'forest\_distance\_m': distance\_m,  'proximity\_category': category,  'score': score  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.
* 환경부 (2021). 도시 열섬 현상 완화를 위한 도시계획 수립 지침.

### Vulnerability 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Structure | 건물 구조 (목조/철근콘크리트 등) | 목조 +40점, 철근콘크리트 -5점 |
| Building Age | 건물 연식 (현재 연도 - 준공연도) | 30년 이상 +15점, 20년 이상 +10점 |

[표 22]

**[표 22] 산불 Vulnerability 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 준공연도(pmsDay), 주구조(strctCdNm) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식 = 현재 연도 - 준공연도 |

[표 23]

**[표 23] 산불 Vulnerability 데이터 소스**

**산출 공식**

산불 취약성은 건물의 가연성 구조를 최우선 지표로 평가한다. 기본 점수 50점에서 시작하여 목조 건물은 화재에 매우 취약하며, 노후 건물은 방화 시설 및 내화 성능이 저하되어 있는 것으로 산정한다.

|  |
| --- |
| V\_wildfire = Base(30) + Structure\_Score + Age\_Score |

**세부 계산**

|  |
| --- |
| score = 30 # 기본값  # 1. 구조 (가연성 최우선)  if '목조' in structure:  score += 40 # 가연성 구조 - 산불에 매우 취약  elif ‘철근콘크리트' in structure:  score -= 5 # 가연성 구조 - 산불에 강점  # 2. 건물 연식 (방화 시설 노후화)  if age > 30:  score += 15 # 노후 건물  elif age > 20:  score += 10 # 중간 노후도  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산 및 감산 기준은 건물의 구조적 특성과 노후도가 산불 대응 능력에 미치는 영향을 정량적으로 반영한다. 구조 측면에서는 목조 건물이 비산화(불똥)에 의한 착화 위험이 치명적이므로 40점을 대폭 가산하며, 철근콘크리트 구조는 우수한 내화 성능을 고려하여 5점을 감산한다. 건물 연식의 경우, 30년 이상 노후 건물은 외장재 노후화 및 틈새 발생 가능성을 고려하여 15점을 가산하고, 20년 이상 건물은 10점을 가산한다. 점수 범위는 최소 25점(신축 철근콘크리트 건물)부터 최대 85점(30년 이상 노후 목조 건물)까지 분포하며, 이는 자재의 불연성 여부가 산불 리스크 평가의 핵심 결정 요인임을 나타낸다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_wildfire\_vulnerability(self, exposure):  """산불 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']  structure = building['structure']    score = 30 # 기본값    # 구조 (가연성 최우선)  if '목조' in structure:  score += 40  elif ‘철근콘크리트' in structure:  score -= 5    # 건물 연식  if age > 30:  score += 15  elif age > 20:  score += 10    # 0~100 정규화  score = max(0, min(100, score))    return {'score': score, 'level': self.\_score\_to\_level(score)} |

**근거 및 참고 문헌**

* Manzello, S. L., Blanchi, R., Gollner, M. J., et al. (2018). Summary of workshop large outdoor fires and the built environment. Fire Safety Journal, 100, 76-92.
* Syphard, A. D., Brennan, T. J., & Keeley, J. E. (2014). The role of defensible space for residential structure protection during wildfires. International Journal of Wildland Fire, 23(8), 1165-1175.
* NFPA (2018). NFPA 1144: Standard for Reducing Structure Ignition Hazards from Wildland Fire. National Fire Protection Association.
* 국토교통부 (2019). 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙. 국토교통부령 제635호.
* 소방청 (2020). 화재안전기준. 소방청 고시 제2020-186호.
* 국립산림과학원 (2021). 산불에 강한 숲 조성 및 관리 요령. 국립산림과학원 연구자료.

## 가뭄 (Drought)

### 정의 및 개요

가뭄 리스크는 기후변화로 인한 강수량 감소와 기온 상승에 따른 증발산량(Evapotranspiration) 증가가 결합되어 발생하는 물 부족 및 토양 건조화 영향을 정량화한 지표이다. 단순 강수량 부족을 넘어, SPEI(표준화 강수-증발산 지수)를 활용하여 실질적인 수분 가용성을 평가하며, 토양 수축에 따른 지반 침하(Subsidence) 위험과 건물의 물리적 피해 가능성을 산정한다.

**평가 로직**

Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)

기후변화 시나리오에 따른 가뭄 강도를 SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) 지표로 평가하고(Hazard), 건물 용도에 따른 용수 의존도를 3단계로 분류하여 점수화하며(Exposure), 건물의 지하 구조물 유무 및 연식에 따른 취약성을 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 정규화 기준 |
| SPEI | 표준화강수증발산지수 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) | 무차원 | -2.0 (Extreme) |

[표 24]

**[표 24] 가뭄 Hazard 사용 변수**

정규화 기준은 WMO(세계기상기구)의 가뭄 감시 가이드라인을 따른다. SPEI -2.0은 "극심한 가뭄(Extreme Drought)" 기준으로, 50년 빈도 이상의 극한 가뭄을 의미하며 토양 수분 고갈에 따른 지반 침하 위험이 임계치를 초과하는 단계이다. SPEI -1.5는 "심한 가뭄(Severe Drought)", -1.0은 "중간 가뭄(Moderate Drought)"에 해당한다. 양수 값은 정상 또는 습윤 상태를 나타내므로 위험도 0으로 처리한다. Vicente-Serrano et al. (2010)의 연구에 따르면 SPEI -2.0 이하는 수자원 고갈 및 생태계 파괴를 초래하며, 건물의 물리적 안전성을 위협하는 수준으로 정의된다.

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 사용 변수 |
| 기후 시나리오 데이터 | 기상청 1km 격자 기후변화 시나리오 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) | 일 강수량, 일 평균기온, 잠재증발산량 (NetCDF, 2021-2100년) |
| SPEI 지수 | climate\_loader 모듈 계산 | spei\_12 (12개월 척도 SPEI), spei\_6 (6개월 척도 SPEI) |

[표 25]

**[표 25] 가뭄 Hazard 데이터 소스**

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| drought\_data = climate\_loader.get\_drought\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'spei\_12': float, 'spei\_6': float, 'annual\_precipitation\_mm': float} |

**산출 공식**

**Step 1: FWI 지표 추출**

|  |
| --- |
| # KMA SSP 데이터에서 계산  spei\_12 = drought\_data['spei\_12'] # 12개월 척도 SPEI (장기 가뭄)  spei\_6 = drought\_data['spei\_6'] # 6개월 척도 SPEI (중기 가뭄) |

**Step 2: 절대값 기준 정규화**

SPEI 지표를 절대적 임계값 기준으로 0~1 사이로 정규화한다. SPEI는 음수 값이 가뭄을 의미하므로, 음수 범위를 0~1로 변환한다.

|  |
| --- |
| # 정규화: |SPEI| / 2.0 (단, 최대 1.0) - WMO Extreme 기준  spei\_norm = min(abs(min(spei\_12, 0)) / 2.0, 1.0) |

정규화 기준은 WMO 가뭄 분류 체계를 따른다. SPEI -3.0은 "극심한 가뭄(Extreme Drought)" 기준으로, 100년 빈도 수준의 극한 가뭄을 의미한다. SPEI -2.0은 "심한 가뭄(Severe Drought)", -1.0은 "중간 가뭄(Moderate Drought)"에 해당한다. 양수 값은 정상 또는 습윤 상태를 나타내므로 위험도 0으로 처리한다. Vicente-Serrano et al. (2010)의 연구에 따르면 SPEI -3.0 이하는 농업, 수자원, 생태계에 심각한 영향을 미치며, 건물 기초 침하 및 균열 위험이 급격히 증가한다.

**Step 3: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| if spei\_norm > 0.8: # SPEI < -2.0 (상위 2.3% 수준)  hazard\_level = 'extreme'  elif spei\_norm > 0.6: # SPEI -1.5 ~ -2.0  hazard\_level = 'very\_high'  elif spei\_norm > 0.4: # SPEI -1.0 ~ -1.5  hazard\_level = 'high'  elif spei\_norm > 0.2: # SPEI -0.5 ~ -1.0  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low' |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_drought\_hazard\_improved(self, lat, lon, data):  """가뭄 Hazard - SPEI 절대값 정규화"""    # KMA SSP 데이터 추출  drought\_data = self.climate\_loader.get\_drought\_data(lat, lon, self.target\_year)    # SPEI 지수 (12개월 척도 사용)  spei\_12 = drought\_data['spei\_12']    # 절대값 기준 정규화 (음수만 고려)  spei\_norm = min(abs(min(spei\_12, 0)) / 2.0, 1.0)    # Hazard 등급  if spei\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme'  elif spei\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high'  elif spei\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high'  elif spei\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low'    return {  'spei\_12': spei\_12,  'spei\_normalized': spei\_norm,  'hazard\_level': hazard\_level  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
* WMO (2016). Handbook of Drought Indicators and Indices. *World Meteorological Organization, WMO-No. 1173*. (최신 표준 반영)
* IPCC AR6 WGII (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 4: Water.
* Smit, A., Sterken, G., & Tol, A. F. (2012). Foundation damage risk for clay soils in the Netherlands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 165(ES4), 261-271. (지반 침하 근거 추가)
* 기상청 (2020). 가뭄 감시 및 전망 기술 개발. *기상청 연구개발사업 최종보고서*.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| Building Type | 건물 용도 (주거/업무/상업/공업 등) | 카테고리 |
| Water Dependency | 용수 의존도 | High / Medium / Low |
| Annual Rainfall | 연간 강수량 | 0~ (mm) |

[표 26]

**[표 26] 가뭄 Exposure 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 기후 시나리오 데이터 | 기상청 1km 격자 기후변화 시나리오 (SSP) | 연 강수량 (NetCDF) |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 (세움터 API) | 주용도(mainPurpsCdNm) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 용수 의존도 = f(건물 용도) |

[표 27]

**[표 27] 가뭄 Exposure 데이터 소스**

**산출 공식**

사업장이 위치한 지역의 수자원 부존량(강수량)과 사업의 물 의존도(용도)를 결합하여 가뭄 발생 시의 노출도를 평가한다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 용수 의존도 | 판정 기준 | 점수 |
| High | 공장, 냉각시설, 세차장, 목욕장 등 | 80 |
| Medium | 업무시설, 상업시설 (일반 사무실, 상가) | 50 |
| Low | 주거시설, 창고시설 | 30 |

[표 28]

**[표 28] 용수 의존도 분류 기준**

High(80점)는 제조업 공장, 발전소, 대형 냉각시설, 세차장, 목욕탕 등 대량의 용수를 지속적으로 필요로 하는 시설로, 가뭄 시 운영 중단 위험이 매우 높다. Medium(50점)은 업무시설 및 상업시설로 일반적인 수준의 용수를 사용하며, 가뭄 시 일부 불편이 있으나 심각한 운영 지장은 없다. Low(30점)는 주거시설 및 창고시설로 용수 의존도가 낮으며, 가뭄 시 절수만으로 대응 가능하다. 또한, 연간 강수량이 1,000mm 미만인 물 부족 지역은 점수를 10점 가산한다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_estimate\_water\_dependency(data):  building\_type = data.get('building\_type', '주택')  main\_purpose = data.get('main\_purpose', '')    # High dependency  if any(keyword in main\_purpose for keyword in ['공장', '제조', '냉각', '세차', '목욕', '발전']):  return 'high'    # Medium dependency  elif any(keyword in main\_purpose for keyword in ['업무', '상업', '판매']):  return 'medium'    # Low dependency  else:  return 'low'  # 점수 변환 및 강수량 보정  if water\_dependency == 'high':  base\_score = 80  elif water\_dependency == 'medium':  base\_score = 50  else:  base\_score = 30  # 강수량 보정 (연 1000mm 미만 지역 가산점)  if annual\_rainfall < 1000:  exposure\_score = min(base\_score + 10, 100)  else:  exposure\_score = base\_score |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # exposure\_calculator.py  def \_calculate\_drought\_exposure(self, data):  """가뭄 노출도 계산"""  main\_purpose = data.get('main\_purpose', '')  annual\_rainfall = data.get('annual\_rainfall', 1200) # Default to average    # 1. 용수 의존도 판정  if any(keyword in main\_purpose for keyword in ['공장', '제조', '냉각', '세차', '목욕', '발전']):  water\_dependency = 'high'  score = 80  elif any(keyword in main\_purpose for keyword in ['업무', '상업', '판매']):  water\_dependency = 'medium'  score = 50  else:  water\_dependency = 'low'  score = 30    # 2. 강수량 보정 (물 부족 지역 가중치)  if annual\_rainfall < 1000:  score += 10    return {  'water\_dependency': water\_dependency,  'annual\_rainfall\_mm': annual\_rainfall,  'score': min(score, 100)  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. Water International, 10(3), 111-120.
* 환경부 (2021). 산업용수 수요관리 종합계획. 환경부.
* 한국수자원공사 (2020). 가뭄 취약성 평가 기법 연구. K-water 연구원.

### Vulnerability 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Basement | 지하층 유무 | 지하층 있음 +20점 |
| Building Age | 건물 연식 (현재 연도 - 준공연도) | 30년 이상 +15점, 20년 이상 +10점 |

[표 29]

**[표 29] 가뭄 Vulnerability 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 준공연도(pmsDay), 지하층수(ugrndFlrCnt) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식 = 현재 연도 - 준공연도 |

[표 30]

**[표 30] 가뭄 Vulnerability 데이터 소스**

**산출 공식**

가뭄 취약성은 지하 구조물 유무와 건물 연식을 핵심 지표로 평가한다. 기본 점수 50점에서 시작하여 장기 가뭄 시 토양 건조로 인한 지반 침하 및 기초 구조물 손상 가능성을 평가한다.

|  |
| --- |
| V\_drought = Base(50) + Basement\_Score + Age\_Score |

**세부 계산**

|  |
| --- |
| score = 50 # 기본값  # 1. 지하층 유무 (지반 침하 취약성)  if basement\_floors > 0:  score += 20 # 지하 구조물 있음 - 지반 침하 취약  # 2. 건물 연식 (기초 노후화)  if age > 30:  score += 15 # 노후 건물  elif age > 20:  score += 10 # 중간 노후도  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산 기준은 건물의 물리적 특성이 가뭄에 따른 지반 변화에 미치는 영향을 반영한다. 지하층이 있는 건물은 장기 가뭄 시 토양 함수량 감소로 인한 지반 침하에 취약하며, 기초 균열 및 구조적 손상 위험이 높아 20점을 가산한다. 건물 연식의 경우, 30년 이상 노후 건물은 기초 콘크리트의 열화 및 배수 시스템 노후화로 지반 변화에 대한 저항력이 낮아 15점을 가산하며, 20~30년 건물은 부분적 노후화를 고려하여 10점을 가산한다.

점수 범위는 최소 50점(신축 지상층만 있는 건물)부터 최대 85점(40년 이상 노후 지하층 있는 건물)까지 분포하며, 이는 건물의 가뭄 대응 능력을 정량적으로 나타낸다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_drought\_vulnerability(self, exposure):  """가뭄 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']  basement\_floors = building.get('underground\_floor\_count', 0)    score = 50 # 기본값    # 지하층 유무  if basement\_floors > 0:  score += 20    # 건물 연식  if age > 30:  score += 15  elif age > 20:  score += 10    # 0~100 정규화  score = max(0, min(100, score))    return {'score': score, 'level': self.\_score\_to\_level(score)} |

**근거 및 참고 문헌**

* Smit, A., Sterken, G., & Tol, A. F. (2012). Foundation damage risk for clay soils in the Netherlands. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 165(ES4), 261-271.
* Pritchard, O. G., Hallett, S. H., & Farewell, T. S. (2013). Soil movement in the UK—implications for infrastructure. Engineering Geology, 1-15.
* 국토안전관리원 (2020). 가뭄에 따른 건축물 기초 침하 위험도 평가. 국토안전관리원 연구보고서.
* 한국지반공학회 (2018). 지반 침하 및 팽창에 따른 건축물 피해 방지 기술. 한국지반공학회.

## 물부족 (Water Stress)

### 정의 및 개요

물부족 리스크는 기후변화로 인한 수자원 공급 부족 및 수요 증가가 건물 및 시설의 운영 지속성에 미치는 물리적·경제적 영향을 정량화한 지표이다. IPCC AR6 및 TCFD 권고에 따라 WRI Aqueduct의 물부족 지수를 활용하여 지역별 물 스트레스 수준을 평가하며, 건물의 용수 의존도 및 구조적 특성을 반영하여 미래 기후 시나리오별 리스크를 산정한다.

**평가 로직**

Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)

WRI Aqueduct의 물부족 지수를 기반으로 지역의 물 스트레스 수준을 평가하고(Hazard), 건물 용도에 따른 용수 의존도를 3단계로 분류하여 점수화하며(Exposure), 건물의 저수조 유무, 배관 노후화, 절수 설비 도입 여부에 따른 자체 대응 역량을 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 정규화 기준 |
| Baseline Water Stress | WRI Aqueduct 물부족 지수 | 0~5 스케일 | 5.0 (극심한 물부족) |

[표 31]

**[표 31] 물부족 Hazard 사용 변수**

현재 구현에서는 WRI(World Resources Institute) Aqueduct의 Baseline Water Stress 지수를 사용한다. 이 지수는 연간 물 수요 대비 가용 수자원 비율을 나타내며, 0~5 범위의 값을 가진다. 0에 가까울수록 물이 풍부하며, 5에 가까울수록 극심한 물부족 상태를 의미한다. WRI Aqueduct는 전 세계 물 리스크를 평가하는 국제 표준 도구로, TCFD 및 CDP에서 공식 권장하는 데이터셋이다.

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 사용 변수 |
| 물부족 지수 데이터 | WRI Aqueduct (World Resources Institute) | Baseline Water Stress (0~5 스케일) |
| 공간 해상도 | 유역 단위 (Catchment-level) | - |
| 시간 해상도 | 기준연도: 현재, 미래: 2030, 2050, 2080 | - |

[표 32]

**[표 32] 물부족 Hazard 데이터 소스**

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| water\_stress\_data = climate\_loader.get\_water\_stress\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'baseline\_water\_stress': float (0~5), 'water\_stress\_category': str} |

**산출 공식**

**Step 1: WRI Aqueduct 지표 추출**

|  |
| --- |
| # WRI Aqueduct 데이터에서 추출  baseline\_water\_stress = water\_stress\_data['baseline\_water\_stress'] # 0~5 스케일 |

**Step 2: 절대값 기준 정규화**

WRI Aqueduct의 Baseline Water Stress 지수를 0~1 사이로 정규화한다.

|  |
| --- |
| # 0~5 스케일을 0~1로 정규화  water\_stress\_norm = min(baseline\_water\_stress / 5.0, 1.0) |

정규화 기준은 WRI Aqueduct의 공식 분류 체계를 따른다. Baseline Water Stress 5.0은 "Extremely High (>80%)" 물부족 수준으로, 연간 물 수요가 가용 수자원의 80% 이상을 소비하는 극심한 물 스트레스 상태를 의미한다. WRI의 5단계 분류는 다음과 같다: Low (0-1, <10%), Low-Medium (1-2, 10-20%), Medium-High (2-3, 20-40%), High (3-4, 40-80%), Extremely High (4-5, >80%). 이 지수는 기후변화 시나리오(RCP 4.5, 8.5) 및 사회경제 시나리오(SSP)를 반영하여 2030년, 2050년, 2080년 미래 예측값을 제공한다.

**Step 3: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| hazard\_level = 'low' # 낮음 (SPEI > -0.6) |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| if water\_stress\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme' # 극심함 (수치 > 4.0)  elif water\_stress\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high' # 매우 높음 (수치 3.0-4.0)  elif water\_stress\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high' # 높음 (수치 2.0-3.0)  elif water\_stress\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate' # 보통 (수치 1.0-2.0)  else:  hazard\_level = 'low' # 낮음 (수치 < 1.0) |

**근거 및 참고 문헌**

* Hofste, R. W., Kuzma, S., Walker, S., et al. (2019). Aqueduct 3.0: Updated Decision-Relevant Global Water Risk Indicators. World Resources Institute Technical Note.
* WRI (2023). Aqueduct Water Risk Atlas. World Resources Institute. [https://www.wri.org/aqueduct](about:blank)
* IPCC AR6 WGII (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 4: Water.
* TCFD (2017). Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures. Final Report.
* 환경부 (2021). 국가 물관리 기본계획 (2021-2030). 환경부.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| Building Type | 건물 용도 (주거/업무/상업/공업 등) | 카테고리 |
| Water Dependency | 용수 의존도 | High / Medium / Low |

[표 33]

**[표 33] 물부족 Exposure 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 (세움터 API) | 주용도(mainPurpsCdNm) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 용수 의존도 = f(건물 용도) |

[표 34]

**[표 34] 물부족 Exposure 데이터 소스**

**산출 공식**

건물 용도에 따른 용수 의존도를 3단계로 분류하고 점수화한다. 물부족 시 용수 부족으로 인한 운영 중단 또는 피해 가능성을 평가한다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 용수 의존도 | 판정 기준 | 점수 |
| High | 공장, 냉각시설, 세차장, 목욕장 등 | 80 |
| Medium | 업무시설, 상업시설 (일반 사무실, 상가) | 50 |
| Low | 주거시설, 창고시설 | 30 |

[표 35]

**[표 35] 용수 의존도 분류 기준**

High(80점)는 제조업 공장, 발전소, 대형 냉각시설, 세차장, 목욕탕 등 대량의 용수를 지속적으로 필요로 하는 시설로, 가뭄 시 운영 중단 위험이 매우 높다. Medium(50점)은 업무시설 및 상업시설로 일반적인 수준의 용수를 사용하며, 가뭄 시 일부 불편이 있으나 심각한 운영 지장은 없다. Low(30점)는 주거시설 및 창고시설로 용수 의존도가 낮으며, 가뭄 시 절수만으로 대응 가능하다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_estimate\_water\_dependency(data):  building\_type = data.get('building\_type', '주택')  main\_purpose = data.get('main\_purpose', '')    # High dependency  if any(keyword in main\_purpose for keyword in ['공장', '제조', '냉각', '세차', '목욕']):  return 'high'    # Medium dependency  elif any(keyword in main\_purpose for keyword in ['업무', '상업', '판매']):  return 'medium'    # Low dependency  else:  return 'low'  # 점수 변환  if water\_dependency == 'high':  exposure\_score = 80  elif water\_dependency == 'medium':  exposure\_score = 50  else:  exposure\_score = 30 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # exposure\_calculator.py  def \_calculate\_drought\_exposure(self, data):  """가뭄 노출도 계산"""  building\_type = data.get('building\_type', '주택')  main\_purpose = data.get('main\_purpose', '')    # 용수 의존도 판정  if any(keyword in main\_purpose for keyword in ['공장', '제조', '냉각', '세차', '목욕']):  water\_dependency = 'high'  score = 80  elif any(keyword in main\_purpose for keyword in ['업무', '상업', '판매']):  water\_dependency = 'medium'  score = 50  else:  water\_dependency = 'low'  score = 30    return {  'water\_dependency': water\_dependency,  'score': score  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. Science Advances, 2(2), e1500323.
* 환경부 (2020). 산업용수 수요관리 종합계획 (2021-2030). 환경부.
* 한국수자원공사 (2021). 물산업 통계. K-water.

### Vulnerability 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Water Storage | 용수 저장 시설 유무 | 미보유 +25점 |
| Pipe Aging | 배관 노후화 (건물 연식) | 30년 이상 +15점 |
| Water Saving | 절수 설비 미비 (신축 여부) | 10년 이상 +10점 |

[표 36]

**[표 36] 물부족 Vulnerability 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 준공연도(pmsDay), 연면적(totArea) |
| 건축물 층별 개요 | 국토교통부 건축물대장 API | 기타용도(etcPurps) - 저수조 키워드 |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식, 법적 의무 대상 여부 |

[표 37]

**[표 37] 물부족 Vulnerability 데이터 소스**

**산출 공식**

수자원 스트레스 취약성은 물 공급 중단(단수) 시 사업장의 자체 대응 역량(Resilience)을 평가한다. 기존의 추정 방식을 고도화하여 실제 데이터(API)를 우선 적용하며, 저수조 부재 시 가장 높은 페널티를 부여한다.

|  |
| --- |
| V\_water\_stress = Base(50) + Tank\_Score + Pipe\_Score + Saving\_Score |

**세부 계산**

|  |
| --- |
| score = 50 # 기본값  # 1. 저수조 유무 (API 데이터 우선 확인 -> 법적 기준 추정)  has\_tank = check\_building\_api\_for\_tank(building\_id)  if not has\_tank:  # API 데이터 없을 경우 법적 기준(3,000㎡ or 6층)으로 추정  # 수도법 시행령에 따른 저수조 설치 의무 대상이 아니면 없는 것으로 간주  if total\_area < 3000 and floors < 6:  score += 25 # 저수조 없음 (대응력 부재)  # 2. 배관 노후화 (누수율 리스크)  if age > 30:  score += 15 # 30년 이상 노후 배관은 누수 및 수질 저하 위험 높음  # 3. 절수 설비 (물 사용 효율)  if age > 10:  score += 10 # 10년 이상 건물은 최신 절수 설비 의무화 이전 건축물로 간주  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산 기준은 건물의 물리적 설비가 물 부족 상황에서 얼마나 버틸 수 있는지를 반영한다. 저수조(Water Tank)는 단수 시 운영을 지속할 수 있는 유일한 버퍼이므로, 미보유 시 25점을 가산하여 고위험군으로 분류한다. 배관 노후화는 30년 이상 시 내부 부식 및 누수율 증가로 수자원 손실이 크므로 15점을 가산한다. 절수 설비는 최근 10년 이내 신축 건물의 경우 의무 설치되어 물 사용 효율이 높은 반면, 구축 건물은 효율이 낮아 10점을 가산한다. 점수 범위는 최소 50점(신축, 저수조 보유)부터 최대 100점(30년 이상, 저수조 미보유)까지 분포한다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # vulnerability\_calculator.py  def \_calculate\_water\_stress\_vulnerability(self, exposure):  """수자원 스트레스 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']    score = 50 # 기본값    # 1. 저수조 유무 확인 (API -> 추정)  if not self.\_check\_water\_tank(building):  score += 25    # 2. 배관 노후화  if age > 30:  score += 15    # 3. 절수 설비 미비 (10년 이상 구축)  if age > 10:  score += 10    return {'score': min(100, score), 'level': self.\_score\_to\_level(score)}  def \_check\_water\_tank(self, building):  """API 데이터 및 법적 기준 기반 저수조 확인"""  # 1. API 층별 용도에서 검색  if '저수조' in building.get('facility\_names', []):  return True  # 2. 법적 의무 대상 추정 (연면적 3,000m2 이상 or 6층 이상)  if building['total\_area'] >= 3000 or building['total\_floors'] >= 6:  return True # 의무 설치 대상은 있다고 가정  return False |

**근거 및 참고 문헌**

* McDonald, R. I., Weber, K., Padowski, J., et al. (2014). Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. Global Environmental Change, 27, 96-105.
* 국토교통부 (2019). 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙. 국토교통부령 제635호.
* 환경부 (2020). 물 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행령. 환경부령 제854호.
* 한국수자원공사 (2019). 물 부족 대응 저수조 설치 가이드라인. K-water.

## 해수면 상승 (Sea Level Rise)

### 정의 및 개요

해수면 상승 리스크는 기후변화로 인한 극지방 빙하 및 해빙 융해, 해수 열팽창이 장기적으로 해수면 고도를 상승시켜 해안 지역 건물 및 시설에 미치는 물리적·경제적 영향을 정량화한 지표이다. IPCC AR6 및 TCFD 권고에 따라 CMIP6 모델 기반 해수면 고도 편차를 활용하여 미래 해수면 상승 수준을 평가하며, 해안과의 거리 및 건물의 구조적 특성을 반영하여 미래 기후 시나리오별 리스크를 산정한다.

**평가 로직**

Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)

CMIP6 모델의 해수면 고도 상승량을 기반으로 지역의 해수면 상승 강도를 평가하고(Hazard), 해안선과의 거리 기반으로 건물의 물리적 노출도를 4단계로 분류하여 점수화하며(Exposure), 건물의 지하층 유무 및 지상 1층 고도에 따른 취약성을 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 정규화 기준 |
| Sea Level Anomaly | 기준기간 대비 해수면 고도 상승량 | m | 1.0m (극심한 상승) |

[표 38]

**[표 38] 해수면 상승 Hazard 사용 변수**

현재 구현에서는 CMIP6 모델의 zos(Sea Surface Height Above Geoid) 변수를 사용하여 미래 시나리오별 해수면 상승량을 계산한다. IPCC AR6 Chapter 9에서 제시한 SSP 시나리오별 전지구 평균 해수면 상승 예측값을 기반으로 하며, 한반도 주변 해역의 지역적 특성을 반영한다. 모든 계산은 climate\_loader 모듈을 통해 자동으로 수행된다.

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 사용 변수 |
| 해수면 상승 데이터 | CMIP6 모델 (ACCESS-CM2, CanESM5, UKESM1 MME 평균) | zos (Sea Surface Height Above Geoid, m) |
| 시나리오 | SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 | - |
| 공간 해상도 | 0.25° × 0.25° (약 25km) | - |
| 시간 해상도 | 기준연도: 1995-2014 평균, 미래: 2030, 2050, 2080, 2100 | - |

[표 39]

**[표 39] 해수면 상승 Hazard 데이터 소스**

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| slr\_data = climate\_loader.get\_sea\_level\_rise\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'sea\_level\_rise\_m': float, 'baseline\_sea\_level\_m': float, 'anomaly\_m': float} |

**산출 공식**

**Step 1: 해수면 상승량 추출**

|  |
| --- |
| # CMIP6 zos 데이터에서 추출  slr\_future = slr\_data['sea\_level\_rise\_m'] # 미래 시나리오 해수면 고도 (m)  slr\_baseline = slr\_data['baseline\_sea\_level\_m'] # 기준기간(1995-2014) 평균 (m)  slr\_anomaly = slr\_data['anomaly\_m'] # 상승량 = 미래 - 기준 |

**Step 2: 절대값 기준 정규화**

해수면 상승량(anomaly)을 절대적 임계값 기준으로 0~1 사이로 정규화한다.

|  |
| --- |
| # 1.0m 상승을 극심한 수준으로 설정  slr\_norm = min(slr\_anomaly / 1.0, 1.0) |

정규화 기준은 IPCC AR6 Chapter 9의 해수면 상승 예측 시나리오를 따른다. 1.0m 상승은 SSP5-8.5 시나리오 하에서 2100년까지 예상되는 극단적 상승 수준으로, 많은 해안 도시와 저지대가 침수 위험에 직면하는 임계점이다. IPCC AR6에 따르면 2100년까지의 전지구 평균 해수면 상승량은 SSP1-2.6에서 0.28~0.55m, SSP2-4.5에서 0.32~0.62m, SSP5-8.5에서 0.63~1.01m로 예측되며, 극지방 빙상의 급격한 붕괴 시 최대 2m까지 상승할 가능성도 있다. 0.5m 상승 시 전 세계 인구의 약 5%가 영향을 받으며, 1.0m 상승 시에는 약 10%가 영향을 받을 것으로 예상된다.

**Step 3: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| if slr\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme' # 극심함 (>0.8m 상승)  elif slr\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high' # 매우 높음 (0.6~0.8m)  elif slr\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high' # 높음 (0.4~0.6m)  elif slr\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate' # 보통 (0.2~0.4m)  else:  hazard\_level = 'low' # 낮음 (<0.2m) |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_sea\_level\_rise\_hazard\_improved(self, lat, lon, data):  """해수면 상승 Hazard - 절대값 정규화"""    # CMIP6 데이터 추출  slr\_data = self.climate\_loader.get\_sea\_level\_rise\_data(lat, lon, self.target\_year)    # 해수면 상승량 (anomaly)  slr\_anomaly = slr\_data['anomaly\_m'] # 기준기간 대비 상승량 (m)    # 절대값 기준 정규화 (1.0m 기준)  slr\_norm = min(slr\_anomaly / 1.0, 1.0)    # Hazard 등급  if slr\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme'  elif slr\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high'  elif slr\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high'  elif slr\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low'    return {  'sea\_level\_rise\_m': slr\_anomaly,  'slr\_normalized': slr\_norm,  'hazard\_level': hazard\_level  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., et al. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. IPCC AR6 WGI Chapter 9.
* Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J., et al. (2019). Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Chapter 4.
* IPCC (2021). Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Base. Cambridge University Press.
* 기상청 (2020). 한반도 기후변화 전망보고서 2020. 기상청.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| Coastal Distance | 해안선과의 최단 거리 | 0 ~ 무한대 (m) |
| Proximity Category | 해안 근접도 범주 | Very High / High / Medium / Low |

[표 40]

**[표 40] 해수면 상승 Exposure 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 위치 정보 | V-World Geocoding API | 위도, 경도 |
| 해안선 공간 데이터 | 국토지리정보원 / 환경공간정보서비스 (EGIS) | 해안선 벡터 데이터 |
| 파생 변수 | 내부 계산 (Haversine 거리) | 건물-해안선 최단 거리 (m) |

[표 41]

**[표 41] 해수면 상승 Exposure 데이터 소스**

**산출 공식**

해안선과의 거리를 기반으로 건물의 해수면 상승 노출도를 4단계로 분류하고 점수화한다. IPCC AR6 및 국내 해안침수 예측 모델을 고려하여 근접도 범주를 설정한다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 근접도 범주 | 거리 기준 | 점수 |
| Very High | 0~100m | 90 |
| High | 100~500m | 70 |
| Medium | 500~1000m | 40 |
| Low | 1000m 이상 | 10 |

[표 42]

**[표 42] 해수면 상승 노출도 분류 기준**

Very High(0~100m)는 해안선과 직접 인접하여 해수면 상승 및 폭풍해일 시 즉각적인 침수 위험이 있는 구역이다. High(100~500m)는 1m 해수면 상승 시 만조 및 폭풍해일과 결합하여 침수 가능성이 높은 저지대 구역이다. Medium(500~1000m)은 극단적 해수면 상승(>1.5m) 시 장기적으로 영향권에 포함될 수 있는 구역이며, Low(1000m 이상)는 해수면 상승의 직접적인 영향이 거의 없는 안전 거리이다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_coastal\_distance(building\_coords, coastline\_data):  """해안선과의 최단 거리 계산"""  min\_distance = float('inf')    for coastline\_segment in coastline\_data:  distance = haversine\_distance(building\_coords, coastline\_segment.nearest\_point)  min\_distance = min(min\_distance, distance)    return min\_distance  def \_classify\_slr\_exposure(distance\_m):  """거리 기반 노출도 점수"""  if distance\_m < 100:  return 90  elif distance\_m < 500:  return 70  elif distance\_m < 1000:  return 40  else:  return 10 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # exposure\_calculator.py  def \_calculate\_sea\_level\_rise\_exposure(self, data):  """해수면 상승 노출도 계산"""  coords = (data['latitude'], data['longitude'])    # 해안선 데이터 로드  coastline\_data = self.\_load\_coastline\_boundaries()    # 최단 거리 계산  distance\_m = self.\_calculate\_coastal\_distance(coords, coastline\_data)    # 점수 부여  if distance\_m < 100:  score = 90  category = 'very\_high'  elif distance\_m < 500:  score = 70  category = 'high'  elif distance\_m < 1000:  score = 40  category = 'medium'  else:  score = 10  category = 'low'    return {  'coastal\_distance\_m': distance\_m,  'proximity\_category': category,  'score': score  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., et al. (2014). Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(9), 3292-3297.
* Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., et al. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. Nature Communications, 9(1), 2360.
* 해양수산부 (2019). 해수면 상승 영향 분석 및 적응 대책 수립 연구. 해양수산부.
* 국립해양조사원 (2021). 한국 연안 해수면 변동 분석. 국립해양조사원.

### Vulnerability 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Basement | 지하층 유무 | 있음 +25점 |
| First Floor Elevation | 지상 1층 고도 (해발 기준) | 5m 미만 +20점, 5~10m +10점 |
| Building Age | 건물 연식 (현재 연도 - 준공연도) | 30년 이상 +10점 |

[표 43]

**[표 43] 해수면 상승 Vulnerability 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 준공연도(pmsDay), 지하층수(ugrndFlrCnt) |
| 고도 정보 | V-World 지형 API / DEM(Digital Elevation Model) | 건물 위치 해발 고도 (m) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식 = 현재 연도 - 준공연도 |

[표 44]

**[표 44] 해수면 상승 Vulnerability 데이터 소스**

**산출 공식**

해수면 상승 취약성은 건물의 고도와 지하 구조물 유무를 최우선 지표로 평가한다. 기본 점수 50점에서 시작하여 저지대 또는 지하층이 있는 건물은 해수면 상승 및 침수에 매우 취약한 것으로 산정한다.

|  |
| --- |
| V\_slr = Base(50) + Basement\_Score + Elevation\_Score + Age\_Score |

**세부 계산**

|  |
| --- |
| score = 50 # 기본값  # 1. 지하층 유무 (침수 최우선 위험)  if basement\_floors > 0:  score += 25 # 지하 구조물 있음 - 침수 시 배수 어려움  # 2. 지상 1층 고도 (해발 기준)  elevation\_m = get\_elevation(latitude, longitude)  if elevation\_m < 5:  score += 20 # 매우 낮은 고도 - 침수 위험 높음  elif elevation\_m < 10:  score += 10 # 낮은 고도 - 침수 위험 있음  # 3. 건물 연식 (배수 시설 노후화)  if age > 30:  score += 10 # 노후 건물 - 배수 시설 노후  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산 기준은 건물의 물리적 특성이 해수면 상승 및 침수에 미치는 영향을 반영한다. 지하층이 있는 건물은 해수면 상승 시 지하 침수 위험이 매우 높고 배수가 어려워 25점을 가산한다. 건물의 해발 고도는 침수 위험과 직결되며, 해발 5m 미만은 1m 해수면 상승 시 만조와 결합하여 침수 가능성이 매우 높으므로 20점을 가산하고, 5~10m는 극단적 상승 시 위험이 있어 10점을 가산한다. 건물 연식의 경우, 30년 이상 노후 건물은 배수 펌프 및 방수 시설의 노후화로 침수 대응 능력이 저하되어 10점을 가산한다.

점수 범위는 최소 50점(신축 고지대 지상층만 있는 건물)부터 최대 105점(노후 저지대 지하층 있는 건물, 100점 상한 적용 시 100점)까지 분포하며, 이는 건물의 해수면 상승 대응 능력을 정량적으로 나타낸다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_sea\_level\_rise\_vulnerability(self, exposure):  """해수면 상승 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']  basement\_floors = building.get('underground\_floor\_count', 0)  coords = (building['latitude'], building['longitude'])    score = 50 # 기본값    # 1. 지하층 유무  if basement\_floors > 0:  score += 25    # 2. 지상 1층 고도 (해발)  elevation\_m = self.\_get\_elevation(coords)  if elevation\_m < 5:  score += 20  elif elevation\_m < 10:  score += 10    # 3. 건물 연식  if age > 30:  score += 10    # 0~100 정규화  score = max(0, min(100, score))    return {'score': score, 'level': self.\_score\_to\_level(score)}  def \_get\_elevation(self, coords):  """V-World API로 해발 고도 조회"""  # V-World 지형 API 호출  elevation = vworld\_api.get\_elevation(coords[0], coords[1])  return elevation |

**근거 및 참고 문헌**

* Nicholls, R. J., Hanson, S. E., Lowe, J. A., et al. (2014). Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. WIREs Climate Change, 5(1), 129-150.
* Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. Global Environmental Change, 23(2), 485-498.
* 국토교통부 (2018). 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙. 국토교통부령 제565호.
* 해양수산부 (2020). 연안재해 취약성 평가 및 방재대책 수립 지침. 해양수산부.

## 하천 홍수 (River Flood)

### 정의 및 개요

해수면 상승 리스크는 기후변화로 인한 극지방 빙하 및 해빙 융해, 해수 열팽창이 장기적으로 해수면 고도를 상승시켜 해안 지역 건물 및 시설에 미치는 물리적·경제적 영향을 정량화한 지표이다. IPCC AR6 및 TCFD 권고에 따라 CMIP6 모델 기반 해수면 고도 편차를 활용하여 미래 해수면 상승 수준을 평가하며, 해안과의 거리 및 건물의 구조적 특성을 반영하여 미래 기후 시나리오별 리스크를 산정한다.

**평가 로직**

Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)

기후변화 시나리오에 따른 극한강수량을 RX1DAY(일 최대강수량) 지표로 평가하고(Hazard), 하천과의 거리 기반으로 건물의 물리적 노출도를 4단계로 분류하여 점수화하며(Exposure), 건물의 지하층 유무 및 고도에 따른 취약성을 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 정규화 기준 |
| RX1DAY | 연 최대 1일 강수량 (Annual Maximum 1-day Precipitation) | mm/day | 300 mm/day |

[표 45]

**[표 45] 하천 홍수 Hazard 사용 변수**

현재 구현에서는 RX1DAY를 기상청 KMA SSP 시나리오의 일별 강수량 데이터로부터 계산한다. RX1DAY는 WMO ETCCDI가 정의한 공식 극한강수 지수로, 1년 중 가장 많은 비가 내린 날의 강수량을 나타낸다. 이 지수는 단기간 집중호우로 인한 하천 홍수 위험을 직접적으로 반영한다. 모든 계산은 climate\_loader 모듈을 통해 자동으로 수행된다.

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 사용 변수 |
| 기후 시나리오 데이터 | 기상청 1km 격자 기후변화 시나리오 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) | 일 강수량 (NetCDF, 2021-2100년) |
| ETCCDI 지수 | climate\_loader 모듈 계산 | rx1day (연 최대 1일 강수량, mm/day) |

[표 46]

**[표 46] 하천 홍수 Hazard 데이터 소스**

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| flood\_data = climate\_loader.get\_river\_flood\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'rx1day': float, 'rx5day': float, 'annual\_total\_precipitation\_mm': float} |

**산출 공식**

**Step 1: RX1DAY 지표 추출**

|  |
| --- |
| # KMA SSP 데이터에서 계산  rx1day = flood\_data['rx1day'] # 연 최대 1일 강수량 (mm/day) |

**Step 2: 절대값 기준 정규화**

RX1DAY 지표를 절대적 임계값 기준으로 0~1 사이로 정규화한다.

|  |
| --- |
| # 300mm/day를 극한 강수 기준으로 설정  rx1day\_norm = min(rx1day / 300.0, 1.0) |

정규화 기준은 한반도 극한강수 특성 및 하천 홍수 발생 임계값을 고려하여 설정되었다. 300mm/day는 기상청이 정의한 "호우 특보 기준"의 최상위 수준으로, 이 수준의 강수량은 대부분의 하천에서 범람 위험을 초래한다. 한반도의 역사적 극한강수 사례를 보면, 2011년 서울 우면산 산사태(일강수량 300mm), 2020년 장마 기간 중부지방(일강수량 최대 400mm 이상) 등에서 대규모 하천 범람 및 침수 피해가 발생했다. 기상청의 호우 특보 기준은 12시간 110mm 또는 24시간 180mm이며, 300mm/day는 이를 크게 초과하는 극한 수준이다. 기후변화 시나리오에서는 RX1DAY가 지속적으로 증가하여 2100년에는 현재 대비 20~50% 증가할 것으로 예측된다.

**Step 3: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| if rx1day\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme' # 극심함 (>240mm/day)  elif rx1day\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high' # 매우 높음 (180~240mm)  elif rx1day\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high' # 높음 (120~180mm)  elif rx1day\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate' # 보통 (60~120mm)  else:  hazard\_level = 'low' # 낮음 (<60mm) |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_river\_flood\_hazard\_improved(self, lat, lon, data):  """하천 홍수 Hazard - RX1DAY 절대값 정규화"""    # KMA SSP 데이터 추출  flood\_data = self.climate\_loader.get\_river\_flood\_data(lat, lon, self.target\_year)    # RX1DAY 지수  rx1day = flood\_data['rx1day'] # 연 최대 1일 강수량 (mm/day)    # 절대값 기준 정규화 (300mm/day 기준)  rx1day\_norm = min(rx1day / 300.0, 1.0)    # Hazard 등급  if rx1day\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme'  elif rx1day\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high'  elif rx1day\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high'  elif rx1day\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low'    return {  'rx1day': rx1day,  'rx1day\_normalized': rx1day\_norm,  'hazard\_level': hazard\_level  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., et al. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. WIREs Climate Change, 2(6), 851-870.
* IPCC AR6 WGII (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 4: Water.
* Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., et al. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. Reviews of Geophysics, 52(3), 522-555.
* 기상청 (2021). 한반도 기후변화 전망보고서 2020. 기상청.
* 국토교통부 (2019). 하천설계기준·해설. 국토교통부.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| River Distance | 하천과의 최단 거리 | 0 ~ 무한대 (m) |
| Floodplain Zone | 홍수범람 구역 | Inside / Outside |

[표 47]

**[표 47] 하천 홍수 Exposure 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 위치 정보 | V-World Geocoding API | 위도, 경도 |
| 하천 공간 데이터 | 환경공간정보서비스 (EGIS) / 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS) | 하천 중심선 벡터 데이터 |
| 홍수범람지도 | 국토교통부 홍수위험지도 | 100년 빈도 침수예상도 |
| 파생 변수 | 내부 계산 (Haversine 거리) | 건물-하천 최단 거리 (m) |

[표 48]

**[표 48] 하천 홍수 Exposure 데이터 소스**

**산출 공식**

하천과의 거리를 기반으로 건물의 하천 홍수 노출도를 4단계로 분류하고 점수화한다. 국토교통부 하천설계기준 및 홍수위험지도를 고려하여 근접도 범주를 설정한다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 근접도 범주 | 거리 기준 | 점수 |
| Very High | 0~100m (제내지 직접 인접) | 90 |
| High | 100~300m (범람 직접 영향권) | 70 |
| Medium | 300~1000m (범람 간접 영향권) | 40 |
| Low | 1000m 이상 (안전 거리) | 10 |

[표 49]

**[표 49] 하천 홍수 노출도 분류 기준**

Very High(0~100m)는 하천 제방과 직접 인접한 제내지로, 하천 범람 시 즉각적인 침수 위험이 있는 구역이다. 100년 빈도 홍수 시 가장 먼저 침수되며, 유속이 빠르고 수심이 깊어 인명 및 재산 피해가 크다. High(100~300m)는 하천 범람의 직접 영향권으로, 대규모 홍수 시 제방 월류 또는 파제로 침수 가능성이 높은 구역이다. Medium(300~1000m)은 극한 홍수 시 배수 불량으로 침수될 수 있는 간접 영향권이며, Low(1000m 이상)는 하천 범람의 직접적인 영향이 거의 없는 안전 거리이다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_river\_distance(building\_coords, river\_data):  """하천과의 최단 거리 계산"""  min\_distance = float('inf')    for river\_segment in river\_data:  distance = haversine\_distance(building\_coords, river\_segment.nearest\_point)  min\_distance = min(min\_distance, distance)    return min\_distance  def \_classify\_river\_flood\_exposure(distance\_m):  """거리 기반 노출도 점수"""  if distance\_m < 100:  return 90  elif distance\_m < 300:  return 70  elif distance\_m < 1000:  return 40  else:  return 10 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # exposure\_calculator.py  def \_calculate\_river\_flood\_exposure(self, data):  """하천 홍수 노출도 계산"""  coords = (data['latitude'], data['longitude'])    # 하천 데이터 로드  river\_data = self.\_load\_river\_boundaries()    # 최단 거리 계산  distance\_m = self.\_calculate\_river\_distance(coords, river\_data)    # 점수 부여  if distance\_m < 100:  score = 90  category = 'very\_high'  elif distance\_m < 300:  score = 70  category = 'high'  elif distance\_m < 1000:  score = 40  category = 'medium'  else:  score = 10  category = 'low'    return {  'river\_distance\_m': distance\_m,  'proximity\_category': category,  'score': score  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Jongman, B., Ward, P. J., & Aerts, J. C. J. H. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. Global Environmental Change, 22(4), 823-835.
* 국토교통부 (2019). 하천설계기준·해설. 국토교통부.
* 환경부 (2020). 홍수위험지도 작성 및 활용 지침. 환경부.
* 국립재난안전연구원 (2018). 홍수 취약성 평가 기법 개발. 국립재난안전연구원.

### Vulnerability 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Basement | 지하층 유무 | 있음 +30점 |
| First Floor Elevation | 지상 1층 고도 (지표면 기준) | 1m 미만 +20점 |
| Building Age | 건물 연식 (현재 연도 - 준공연도) | 30년 이상 +10점 |

[표 50]

**[표 50] 하천 홍수 Vulnerability 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 준공연도(pmsDay), 지하층수(ugrndFlrCnt) |
| 고도 정보 | V-World 지형 API / DEM(Digital Elevation Model) | 건물 위치 해발 고도 (m) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식 = 현재 연도 - 준공연도 |

[표 51]

**[표 51] 하천 홍수 Vulnerability 데이터 소스**

**산출 공식**

하천 홍수 취약성은 지하층 유무와 지상 1층 고도를 최우선 지표로 평가한다. 기본 점수 50점에서 시작하여 지하 구조물이 있거나 저층 건물은 하천 범람 시 침수에 매우 취약한 것으로 산정한다.

|  |
| --- |
| V\_river\_flood = Base(50) + Basement\_Score + Elevation\_Score + Age\_Score |

**[표 1] 3**

**세부 계산**

|  |
| --- |
| score = 50 # 기본값  # 1. 지하층 유무 (침수 최우선 위험)  if basement\_floors > 0:  score += 30 # 지하 구조물 있음 - 침수 시 배수 극히 어려움  # 2. 지상 1층 고도 (지표면 기준)  first\_floor\_elevation = data.get('first\_floor\_elevation\_m', 0.5)  if first\_floor\_elevation < 1.0:  score += 20 # 저층 건물 - 범람수 직접 침투  # 3. 건물 연식 (배수 시설 노후화)  if age > 30:  score += 10 # 노후 건물 - 배수 펌프 노후  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산 기준은 건물의 물리적 특성이 하천 홍수에 미치는 영향을 반영한다. 지하층이 있는 건물은 하천 범람 시 지하 침수 위험이 매우 높고 배수가 극히 어려워 30점을 가산한다. 2022년 서울 강남역 지하 침수 사례에서 보듯이 지하 공간은 급격한 침수와 인명 피해의 주요 원인이 된다. 지상 1층 고도가 지표면 기준 1m 미만인 저층 건물은 하천 범람수가 직접 침투하여 20점을 가산한다. 국토교통부 하천설계기준에서는 제내지 건물의 최소 기초 높이를 계획홍수위 +1m 이상으로 권장한다. 건물 연식의 경우, 30년 이상 노후 건물은 배수 펌프 및 방수 시설의 노후화로 침수 대응 능력이 저하되어 10점을 가산한다.

점수 범위는 최소 50점(신축 고층 지상층만 있는 건물)부터 최대 110점(노후 저층 지하층 있는 건물, 100점 상한 적용 시 100점)까지 분포하며, 이는 건물의 하천 홍수 대응 능력을 정량적으로 나타낸다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_river\_flood\_vulnerability(self, exposure):  """하천 홍수 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']  basement\_floors = building.get('underground\_floor\_count', 0)  first\_floor\_elevation = building.get('first\_floor\_elevation\_m', 0.5)    score = 50 # 기본값    # 1. 지하층 유무  if basement\_floors > 0:  score += 30    # 2. 지상 1층 고도  if first\_floor\_elevation < 1.0:  score += 20    # 3. 건물 연식  if age > 30:  score += 10    # 0~100 정규화  score = max(0, min(100, score))    return {'score': score, 'level': self.\_score\_to\_level(score)} |

**근거 및 참고 문헌**

* Kreibich, H., Thieken, A. H., Petrow, T., Müller, M., & Merz, B. (2005). Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures–lessons learned from the Elbe flood in August 2002. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5(1), 117-126.
* 국토교통부 (2019). 하천설계기준·해설. 국토교통부.
* 소방청 (2019). 건축물 침수 방지 시설 설치 및 관리 기준. 소방청 고시 제2019-108호.
* 국립재난안전연구원 (2020). 침수 취약 건축물 안전관리 기술 개발. 국립재난안전연구원 연구보고서.

## 도시 홍수 (Urban Flood)

### 정의 및 개요

도시 홍수 리스크는 하천 범람(River Flood)과 달리, 기후변화로 인한 단시간 집중호우가 도시의 \*\*배수 용량(Drainage Capacity)\*\*을 초과하여 발생하는 \*\*내수 침수(Pluvial Flooding)\*\*를 의미한다. 불투수면이 많은 도시 지역의 특성상 빗물이 지하로 스며들지 못하고 표면으로 급격히 유출되는 현상을 반영하며, 도시화 강도(Urban Intensity)와 건물의 구조적 특성을 기반으로 미래 기후 시나리오별 리스크를 산정한다.

**평가 로직**

Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)

기후변화 시나리오에 따른 단시간 극한강수량을 RX1DAY(일 최대강수량) 지표로 평가하고(Hazard), 건물 용도 기반의 도시화 강도와 \*\*불투수면 비율(Imperviousness)\*\*을 통해 물리적 노출도를 평가하며(Exposure), 건물의 지하층 유무 및 배수 시설 상태에 따른 취약성을 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 정규화 기준 |
| RX1DAY | 연 최대 1일 강수량 (Annual Maximum 1-day Precipitation) | mm/day | 200 mm/day |

[표 52]

**[표 52] 도시 홍수 Hazard 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 사용 변수 |
| 기후 시나리오 데이터 | 기상청 1km 격자 기후변화 시나리오 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) | 일 강수량 (NetCDF, 2021-2100년) |
| ETCCDI 지수 | climate\_loader 모듈 계산 | rx1day (연 최대 1일 강수량, mm/day) |

[표 53]

**[표 53] 도시 홍수 Hazard 데이터 소스**

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| urban\_flood\_data = climate\_loader.get\_urban\_flood\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'rx1day': float, 'rx5day': float, 'annual\_total\_precipitation\_mm': float} |

**산출 공식**

**Step 1: RX1DAY 지표 추출**

|  |
| --- |
| # KMA SSP 데이터에서 계산  rx1day = urban\_flood\_data['rx1day'] # 연 최대 1일 강수량 (mm/day) |

**Step 2: 절대값 기준 정규화**

RX1DAY 지표를 절대적 임계값 기준으로 0~1 사이로 정규화한다.

|  |
| --- |
| # 200mm/day를 도시 홍수 극한 강수 기준으로 설정  rx1day\_norm = min(rx1day / 200.0, 1.0) |

정규화 기준은 도시 지역의 배수 시설 용량 및 침수 발생 임계값을 고려하여 설정되었다. 200mm/day는 대부분의 도시 배수 시설이 설계된 강우 강도를 초과하는 수준으로, 이 강수량에서 내수침수가 빈발한다. 서울시 하수도 설계 기준은 시간당 95mm(24시간 228mm) 수준이나, 실제 노후 지역은 시간당 50~70mm(24시간 120~168mm) 수준으로 설계되어 있어 200mm/day는 대부분 지역에서 침수를 유발한다. 주요 도시 침수 사례를 보면, 2010년 서울 광화문 침수(일강수량 259mm), 2011년 강남역 침수(일강수량 300mm), 2022년 강남역 재침수(일강수량 141mm, 시간당 최대 100mm) 등이 있다. 특히 단시간 집중호우(시간당 80mm 이상)는 도시 배수 시스템의 처리 능력을 초과하여 급격한 침수를 유발한다. 기후변화 시나리오에서는 도시 지역의 단시간 강우 강도가 지속적으로 증가할 것으로 예측된다.

**Step 3: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| if rx1day\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme' # 극심함 (>160mm/day)  elif rx1day\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high' # 매우 높음 (120~160mm)  elif rx1day\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high' # 높음 (80~120mm)  elif rx1day\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate' # 보통 (40~80mm)  else:  hazard\_level = 'low' # 낮음 (<40mm) |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_urban\_flood\_hazard\_improved(self, lat, lon, data):  """도시 홍수 Hazard - RX1DAY 절대값 정규화"""    # KMA SSP 데이터 추출  urban\_flood\_data = self.climate\_loader.get\_urban\_flood\_data(lat, lon, self.target\_year)    # RX1DAY 지수  rx1day = urban\_flood\_data['rx1day'] # 연 최대 1일 강수량 (mm/day)    # 절대값 기준 정규화 (200mm/day 기준 - 도시 홍수 특화)  rx1day\_norm = min(rx1day / 200.0, 1.0)    # Hazard 등급  if rx1day\_norm > 0.8:  hazard\_level = 'extreme'  elif rx1day\_norm > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high'  elif rx1day\_norm > 0.4:  hazard\_level = 'high'  elif rx1day\_norm > 0.2:  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low'    return {  'rx1day': rx1day,  'rx1day\_normalized': rx1day\_norm,  'hazard\_level': hazard\_level  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., et al. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. WIREs Climate Change, 2(6), 851-870.
* IPCC AR6 WGII (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 6: Cities, Settlements and Key Infrastructure.
* Guerreiro, S. B., Fowler, H. J., Barbero, R., et al. (2018). Detection of continental-scale intensification of hourly rainfall extremes. Nature Climate Change, 8(9), 803-807.
* 환경부 (2020). 도시침수 예방을 위한 하수도정비 중장기계획. 환경부.
* 서울특별시 (2019). 서울시 침수방지 종합대책. 서울특별시.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| Building Type | 건물 용도 (주거/업무/상업 등) | 카테고리 |
| Urban Intensity | 도시화 강도 | High / Medium / Low |
| Imperviousness | 불투수면 비율 (추정) | 0~100% |

[표 54]

**[표 54] 도시 홍수 Exposure 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 (세움터 API) | 주용도(mainPurpsCdNm) |
| 도시화 정보 | 내부 추정 (건물 용도 기반) | 도시화 강도, 불투수면 비율 |

[표 55]

**[표 55] 도시 홍수 Exposure 데이터 소스**

**산출 공식**

하천과의 거리를 기반으로 건물의 하천 홍수 노출도를 4단계로 분류하고 점수화한다. 국토교통부 하천설계기준 및 홍수위험지도를 고려하여 근접도 범주를 설정한다.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 도시화 강도 | 판정 기준 | 불투수면 비율 | 점수 |
| High | 업무시설, 상업시설 밀집 지역 | 80~100% | 80 |
| Medium | 주거시설 밀집 지역 | 50~80% | 50 |
| Low | 녹지 인접, 저밀도 지역 | 20~50% | 20 |

[표 56]

**[표 56] 하천 홍수 노출도**

High(80점)는 도심 업무·상업 지역으로 건물, 도로, 주차장 등으로 거의 전면이 포장되어 있어 빗물이 지면에 침투하지 못하고 배수 시설로 집중된다. 불투수면 비율이 80% 이상으로 단시간 집중호우 시 배수 용량 초과로 침수가 빈발한다. Medium(50점)은 주거 밀집 지역으로 건물과 도로가 많으나 일부 녹지 및 마당이 있어 부분적인 침투가 가능하다. 불투수면 비율은 50~80% 수준이다. Low(20점)는 녹지 인접 또는 저밀도 개발 지역으로 자연 배수가 원활하며 불투수면 비율이 50% 미만이다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_estimate\_urban\_intensity(data):  building\_type = data.get('building\_type', '주택')  main\_purpose = data.get('main\_purpose', '')    # High: 업무·상업 밀집  if '업무' in building\_type or '상업' in building\_type:  return 'high', 80    # Medium: 주거 밀집  elif '주택' in building\_type or '아파트' in building\_type:  return 'medium', 50    # Low: 기타  else:  return 'low', 20  urban\_intensity, exposure\_score = \_estimate\_urban\_intensity(data) |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # exposure\_calculator.py  def \_calculate\_urban\_flood\_exposure(self, data):  """도시 홍수 노출도 계산"""  building\_type = data.get('building\_type', '주택')  main\_purpose = data.get('main\_purpose', '')    # 도시화 강도 판정  if '업무' in building\_type or '상업' in building\_type:  urban\_intensity = 'high'  score = 80  imperviousness = 85 # 불투수면 비율 (%)  elif '주택' in building\_type or '아파트' in building\_type:  urban\_intensity = 'medium'  score = 50  imperviousness = 65  else:  urban\_intensity = 'low'  score = 20  imperviousness = 35    return {  'urban\_intensity': urban\_intensity,  'imperviousness\_percent': imperviousness,  'score': score  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Arnold, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. Journal of the American Planning Association, 62(2), 243-258.
* 환경부 (2018). 물순환 선도도시 조성 가이드라인. 환경부.
* 국토연구원 (2019). 도시 불투수면 관리를 통한 물순환 개선 방안. 국토연구원.

### Vulnerability 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Basement | 지하층 유무 | 있음 +35점 |
| Building Age | 건물 연식 (현재 연도 - 준공연도) | 30년 이상 +15점, 20년 이상 +10점 |

[표 57]

**[표 57] 도시 홍수 Vulnerability 사용 변수**

**[표 1] 극심한 고온 Hazard 점수 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 준공연도(pmsDay), 지하층수(ugrndFlrCnt) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식 = 현재 연도 - 준공연도 |

[표 58]

**[표 58] 도시 홍수 Vulnerability 데이터 소스**

**산출 공식**

도시 홍수 취약성은 지하층 유무를 최우선 지표로 평가한다. 기본 점수 50점에서 시작하여 지하 구조물이 있는 건물은 도시 침수 시 급격한 지하 침수 및 인명 피해 위험이 있으며, 노후 건물은 배수 설비 노후화로 침수에 취약한 것으로 산정한다.

|  |
| --- |
| V\_urban\_flood = Base(50) + Basement\_Score + Age\_Score |

**세부 계산**

|  |
| --- |
| score = 50 # 기본값  # 1. 지하층 유무 (도시 침수 최대 위험)  if basement\_floors > 0:  score += 35 # 지하 구조물 있음 - 급격한 침수 및 인명 위험  # 2. 건물 연식 (배수 설비 노후화)  if age > 30:  score += 15 # 노후 건물  elif age > 20:  score += 10 # 중간 노후도  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산 기준은 건물의 물리적 특성이 도시 홍수에 미치는 영향을 반영한다. 지하층이 있는 건물은 도시 침수 시 지하로 빗물이 급격히 유입되어 인명 피해 위험이 매우 높으므로 35점을 가산한다. 2022년 서울 강남역 지하 주차장 침수 사례에서 단 10분 만에 지하 1층이 완전히 침수되었고, 차량 수백 대가 전손되었다. 지하 공간은 자연 배수가 불가능하여 배수 펌프에 전적으로 의존하며, 펌프 용량 초과 또는 정전 시 매우 위험하다. 건물 연식의 경우, 30년 이상 노후 건물은 배수 펌프, 역류 방지 시설, 지하 방수층의 노후화로 침수 대응 능력이 저하되어 15점을 가산하며, 20~30년 건물은 부분적 노후화를 고려하여 10점을 가산한다.

점수 범위는 최소 50점(신축 지상층만 있는 건물)부터 최대 100점(40년 이상 노후 지하층 있는 건물)까지 분포하며, 이는 건물의 도시 홍수 대응 능력을 정량적으로 나타낸다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_urban\_flood\_vulnerability(self, exposure):  """도시 홍수 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']  basement\_floors = building.get('underground\_floor\_count', 0)    score = 50 # 기본값    # 1. 지하층 유무 (최우선 위험)  if basement\_floors > 0:  score += 35    # 2. 건물 연식  if age > 30:  score += 15  elif age > 20:  score += 10    # 0~100 정규화  score = max(0, min(100, score))    return {'score': score, 'level': self.\_score\_to\_level(score)} |

**근거 및 참고 문헌**

* **Ashley, R. M., Balmforth, D. J., Saul, A. J., & Blanskby, J. D. (2005). Flooding in the future–predicting climate change, risks and responses in urban areas. Water Science and Technology, 52(5), 265-273.**
* **소방청 (2019). 지하공간 침수 안전관리 매뉴얼. 소방청.**
* **서울특별시 (2022). 강남역 침수 원인 분석 및 재발 방지 대책. 서울특별시.**
* **국토안전관리원 (2020). 지하 공간 침수 위험도 평가 기법. 국토안전관리원 연구보고서.**

## 태풍 (Typhoon)

### 정의 및 개요

태풍 리스크는 기후변화로 인한 태풍의 강도 증가 및 이동 경로 변화가 건물 및 시설에 미치는 물리적·경제적 영향을 정량화한 지표이다. IPCC AR6 및 TCFD 권고에 따라 태풍의 파괴력을 결정짓는 핵심 요소인 **강풍**과 **집중호우**를 종합한 복합 지수(TCI)를 활용하여 위험을 평가하며, 해안 근접도 및 건물의 구조적 특성을 반영하여 미래 기후 시나리오별 리스크를 산정한다.

**복합 지수 구성**

**Typhoon Compound Index (TCI)**: 태풍의 강풍 피해, 집중호우, 발생 빈도를 종합한 복합 지수

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 지수 | 정의 | 단위 | 가중치 |
| 강풍 피해 | 연평균 최대풍속 ≥17.2 m/s (풍속 8등급) | m/s | 0.55 |
| 집중호우 | 태풍 동반 일 최대강수량 (Rx1day) | mm/day | 0.45 |

[표 59]

**[표 59] TCI 구성 지표**

**평가 로직**

**Risk = H (Hazard) × E (Exposure) × V (Vulnerability)**

기후변화 시나리오에 따른 태풍의 강도를 복합 지수(TCI)로 평가하고(Hazard), 해안과의 거리 기반으로 건물의 물리적 노출도를 4단계로 분류하여 점수화하며(Exposure), 건물의 구조 및 연식에 따른 취약성을 가산점 모델로 평가한 후(Vulnerability), 세 요소를 곱하여 최종 리스크를 도출한다.

### Hazard 점수

**사용 변수**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 단위 | 가중치 | 정규화 기준 |
| Max Wind Speed | 연평균 최대풍속 | m/s | 0.55 | 40 m/s (태풍 중심 풍속) |
| Max Precipitation | 태풍 동반 일 최대강수량 | mm/day | 0.45 | 400 mm/day (극한 강수) |

[표 60]

**[표 60] 태풍 Hazard 사용 변수**

현재 구현에서는 기상청 KMA SSP 시나리오의 일별 풍속 및 강수량 데이터로부터 태풍 관련 지표를 계산한다. 기존의 불확실성이 높은 '발생 빈도(지속시간)' 변수를 제거하고, 물리적 파괴력의 핵심인 풍속과 강수량에 가중치를 집중하여 평가한다. 모든 계산은 climate\_loader 모듈을 통해 자동으로 수행된다.

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 유형 | 출처 | 사용 변수 |
| 기후 시나리오 데이터 | 기상청 1km 격자 기후변화 시나리오 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) | 일 풍속, 일 강수량 (NetCDF, 2021-2100년) |
| 태풍 지수 | climate\_loader 모듈 계산 | max\_wind\_speed, max\_precipitation |

[표 61]

**[표 61] 태풍 Hazard 데이터 소스**

**데이터 추출 방법**

|  |
| --- |
| typhoon\_data = climate\_loader.get\_typhoon\_data(lat, lon, target\_year)  # 반환값: {'max\_wind\_speed\_ms': float, 'max\_precipitation\_mm': float} |

**산출 공식**

**Step 1: 태풍 지표 추출**

|  |
| --- |
| # KMA SSP 데이터에서 계산  max\_wind\_speed = typhoon\_data['max\_wind\_speed\_ms'] # 연평균 최대풍속 (m/s)  max\_precipitation = typhoon\_data['max\_precipitation\_mm'] # 일 최대강수량 (mm/day) |

**Step 2: 각 지표 정규화**

각 지표를 절대적 임계값 기준으로 0~1 사이로 정규화한다.

|  |
| --- |
| # 1. 강풍 정규화 (40 m/s 기준 - 매우 강한 태풍)  wind\_norm = min(max\_wind\_speed / 40.0, 1.0)  # 2. 강수 정규화 (400 mm/day 기준 - 극한 강수)  precip\_norm = min(max\_precipitation / 400.0, 1.0) |

정규화 기준은 태풍의 물리적 특성 및 피해 임계값을 고려하여 설정되었다.

강풍 (40 m/s): 기상청 태풍 등급 중 "매우 강한 태풍" 기준(44 m/s)에 근접한 수준으로, 이 풍속에서는 건물 지붕 파손, 창문 파손, 간판 및 비산물 발생 등 심각한 피해가 발생한다. 풍속 40 m/s는 약 144 km/h에 해당하며, 사피어-심슨 허리케인 등급(SSHWS)의 Category 2에 해당한다.

강수 (400 mm/day): 태풍 동반 극한 강수량으로, 태풍 루사(2002년, 일강수량 최대 870mm), 태풍 매미(2003년), 태풍 나리(2007년) 등 역대 피해 태풍의 강수량을 고려한 기준이다. 400mm/day는 일반적인 월 강수량을 하루에 내리는 극한 수준이다.

**Step 3: 가중 평균**

|  |
| --- |
| TCI = (wind\_norm \* 0.55) + (precip\_norm \* 0.45) |

가중치는 Emanuel (2005) 등의 연구에 따라 태풍의 파괴력(PDI)이 풍속의 3승에 비례함을 반영하여 풍속(0.55)에 더 높은 비중을 두었으며, 침수 피해를 유발하는 강수(0.45)를 보완적으로 결합하였다.

**Step 4: Hazard 등급 분류**

|  |
| --- |
| if TCI > 0.8:  hazard\_level = 'extreme' # 극심함  elif TCI > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high' # 매우 높음  elif TCI > 0.4:  hazard\_level = 'high' # 높음  elif TCI > 0.2:  hazard\_level = 'moderate' # 보통  else:  hazard\_level = 'low' # 낮음 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_typhoon\_hazard\_improved(self, lat, lon, data):  """태풍 Hazard - 복합 지수 (강풍 + 강수)"""    # KMA SSP 데이터 추출  typhoon\_data = self.climate\_loader.get\_typhoon\_data(lat, lon, self.target\_year)    # 태풍 지표  max\_wind\_speed = typhoon\_data['max\_wind\_speed\_ms']  max\_precipitation = typhoon\_data['max\_precipitation\_mm']    # 각 지표 정규화  wind\_norm = min(max\_wind\_speed / 40.0, 1.0) # 40 m/s 기준  precip\_norm = min(max\_precipitation / 400.0, 1.0) # 400 mm/day 기준    # 가중 평균 (TCI) - 풍속 중심 평가  TCI = (wind\_norm \* 0.55) + (precip\_norm \* 0.45)    # Hazard 등급  if TCI > 0.8:  hazard\_level = 'extreme'  elif TCI > 0.6:  hazard\_level = 'very\_high'  elif TCI > 0.4:  hazard\_level = 'high'  elif TCI > 0.2:  hazard\_level = 'moderate'  else:  hazard\_level = 'low'    return {  'max\_wind\_speed\_ms': max\_wind\_speed,  'max\_precipitation\_mm': max\_precipitation,  'TCI': TCI,  'hazard\_level': hazard\_level  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C. L., et al. (2020). Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303-E322.
* IPCC AR6 WGI (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate.
* Emanuel, K. A. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686-688.
* 국립재난안전연구원 (2019). 태풍 피해 저감 기술 개발. *국립재난안전연구원 연구보고서*.

### Exposure 점수

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 값 범위 |
| Coastal Distance | 해안선과의 최단 거리 | 0 ~ 무한대 (m) |
| Proximity Category | 해안 근접도 범주 | Very High / High / Medium / Low |

[표 62]

**[표 62] 태풍 Exposure 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 유형 | 출처 | 변수 |
| 건축물 위치 정보 | V-World Geocoding API | 위도, 경도 |
| 해안선 공간 데이터 | 국토지리정보원 / 환경공간정보서비스 (EGIS) | 해안선 벡터 데이터 |
| 파생 변수 | 내부 계산 (Haversine 거리) | 건물-해안선 최단 거리 (m) |

[표 63]

**[표 63] 태풍 Exposure 데이터 소스**

**산출 공식**

해안선과의 거리를 기반으로 건물의 태풍 노출도를 4단계로 분류하고 점수화한다. 태풍은 해안 상륙 후 급격히 약화되므로, 해안 근접도가 핵심 지표이다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 근접도 범주 | 거리 기준 | 점수 |
| Very High | 0~5km (해안 직접 인접) | 90 |
| High | 5~20km (태풍 강풍권) | 70 |
| Medium | 20~50km (태풍 영향권) | 40 |
| Low | 50km 이상 (내륙 안전 지역) | 10 |

[표 64]

**[표 64] 태풍 노출도 분류 기준**

Very High(0~5km)는 해안선과 직접 인접하여 태풍의 최대 풍속 및 폭풍해일에 직접 노출되는 구역이다. 태풍 상륙 시 가장 큰 피해를 받으며, 강풍, 집중호우, 해일이 동시에 발생한다. High(5~20km)는 태풍의 강풍권 내에 위치하여 강풍 피해 및 집중호우 위험이 높은 구역이다. Medium(20~50km)은 태풍의 영향권 내에 있으나 풍속이 감소하고 해일 영향은 없는 구역이며, Low(50km 이상)는 내륙 깊숙이 위치하여 태풍의 영향이 크게 약화되는 안전 지역이다.

**세부 계산**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_coastal\_distance(building\_coords, coastline\_data):  """해안선과의 최단 거리 계산"""  min\_distance = float('inf')    for coastline\_segment in coastline\_data:  distance = haversine\_distance(building\_coords, coastline\_segment.nearest\_point)  min\_distance = min(min\_distance, distance)    return min\_distance  def \_classify\_typhoon\_exposure(distance\_m):  """거리 기반 노출도 점수"""  if distance\_m < 5000: # 5km  return 90  elif distance\_m < 20000: # 20km  return 70  elif distance\_m < 50000: # 50km  return 40  else:  return 10 |

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| # exposure\_calculator.py  def \_calculate\_typhoon\_exposure(self, data):  """태풍 노출도 계산"""  coords = (data['latitude'], data['longitude'])    # 해안선 데이터 로드  coastline\_data = self.\_load\_coastline\_boundaries()    # 최단 거리 계산  distance\_m = self.\_calculate\_coastal\_distance(coords, coastline\_data)    # 점수 부여  if distance\_m < 5000: # 5km  score = 90  category = 'very\_high'  elif distance\_m < 20000: # 20km  score = 70  category = 'high'  elif distance\_m < 50000: # 50km  score = 40  category = 'medium'  else:  score = 10  category = 'low'    return {  'coastal\_distance\_m': distance\_m,  'proximity\_category': category,  'score': score  } |

**근거 및 참고 문헌**

* Needham, H. F., Keim, B. D., & Sathiaraj, D. (2015). A review of tropical cyclone-generated storm surges: Global data sources, observations, and impacts. Reviews of Geophysics, 53(2), 545-591.
* 기상청 (2018). 태풍 영향 분석 및 피해 저감 방안. 기상청 연구개발사업 최종보고서.
* 국립해양조사원 (2020). 폭풍해일 위험지도. 국립해양조사원.

### Vulnerability

**사용 변수**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 변수 | 정의 | 영향 범위 |
| Structure | 건물 구조 (목조/경량철골/철근콘크리트 등) | 목조/경량철골 +30점 |
| Building Age | 건물 연식 (현재 연도 - 준공연도) | 30년 이상 +15점, 20년 이상 +10점 |
| Building Height | 건물 층수 | 10층 이상 +10점 |

[표 65]

**[표 65] 태풍 Vulnerability 사용 변수**

**데이터 소스**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 데이터 | 출처 | 변수 |
| 건축물 기본 정보 | 국토교통부 건축물대장 API | 주구조(strctCdNm), 준공연도(pmsDay), 층수(flrCnt) |
| 파생 변수 | 내부 계산 | 건물 연식 = 현재 연도 - 준공연도 |

[표 66]

**[표 66] 태풍 Vulnerability 데이터 소스**

**산출 공식**

극심한 고온 취약성은 건물의 단열 성능을 핵심 지표로 평가한다. 기본 점수 50점에서 시작하여 건물이 노후화될수록 기밀성과 단열 성능이 저하되어 폭염 시 내부 온도 유지에 취약해지며, 목조 등 특정 구조는 열 축적 및 냉방 효율에 더 민감한 것으로 산정한다.

|  |
| --- |
| V\_typhoon = Base(50) + Structure\_Score + Age\_Score + Height\_Score |

**세부 계산:**

|  |
| --- |
| score = 50 # 기본값  # 1. 구조 (강풍 저항력)  if '목조' in structure or '경량철골' in structure:  score += 30 # 경량 구조 - 강풍 취약  # 2. 건물 연식 (구조 노후화)  if age > 30:  score += 15 # 노후 건물  elif age > 20:  score += 10 # 중간 노후도  # 3. 건물 높이 (풍압 증가)  if floors >= 10:  score += 10 # 고층 건물 - 풍압 증가  # 최종 정규화  score = max(0, min(100, score)) |

가산 기준은 건물의 물리적 특성이 태풍에 미치는 영향을 반영한다. 구조 측면에서는 목조 건물 및 경량철골 구조물이 강풍에 매우 취약하여 30점을 가산한다. 태풍 매미(2003년) 당시 해안 지역의 목조 주택 및 경량철골 건물이 전파되거나 지붕이 날아가는 피해가 발생했다. 철근콘크리트 구조는 강풍에 강하여 가산점이 없다. 건물 연식의 경우, 30년 이상 노후 건물은 외벽, 창문, 지붕의 결합력 저하 및 부식으로 강풍 저항력이 감소하여 15점을 가산하며, 20~30년 건물은 부분적 노후화를 고려하여 10점을 가산한다. 건물 높이의 경우, 10층 이상 고층 건물은 지상 대비 풍속이 1.5~2배 증가하고 풍압이 크게 작용하여 10점을 가산한다.

점수 범위는 최소 50점(신축 저층 철근콘크리트 건물)부터 최대 105점(노후 고층 목조 건물, 100점 상한 적용 시 100점)까지 분포하며, 이는 건물의 태풍 대응 능력을 정량적으로 나타낸다.

**구현 코드 요약**

|  |
| --- |
| def \_calculate\_typhoon\_vulnerability(self, exposure):  """태풍 취약성"""  building = exposure['building']  age = building['building\_age']  structure = building['structure']  floors = building.get('total\_floors', 1)    score = 50 # 기본값    # 1. 구조 (강풍 저항력)  if '목조' in structure or '경량철골' in structure:  score += 30    # 2. 건물 연식  if age > 30:  score += 15  elif age > 20:  score += 10    # 3. 건물 높이  if floors >= 10:  score += 10    # 0~100 정규화  score = max(0, min(100, score))    return {'score': score, 'level': self.\_score\_to\_level(score)} |

**근거 및 참고 문헌**

* Li, S., Hong, H. P., & Poon, D. C. (2018). Typhoon loss estimation in China using a new framework. Natural Hazards, 93(3), 1293-1319.
* 국토교통부 (2019). 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙. 국토교통부령 제635호.
* 한국건설기술연구원 (2020). 강풍에 의한 건축물 피해 저감 기술. 한국건설기술연구원.
* 대한건축학회 (2016). 건축구조설계기준 - 하중 및 하중조합(KDS 41 10 15). 대한건축학회.
* **작성자 : 오동헌, 이창민**
* **작성일 : 2025.11.16**
* **수정일 : 2025.12.03**
* **설명: 9대 물리적 리스크 스코어링 로직 설명입니다**

# 리스크 비교 방법론

## 리스크 스코어 비교 방법론

### 개요

9개 물리적 리스크 간 상대적 중요도를 평가하고 우선순위를 결정하기 위한 비교 방법론이다. TCFD 권고사항에 따라 Acute Physical Risks와 Chronic Physical Risks를 구분하여 평가하며, 전체 리스크 순위를 제공한다.

본 방법론은 TCFD 국제 표준을 준수하여 급성 리스크와 만성 리스크를 명확히 분류하고, 과학적 근거에 기반한 투명한 순위 산정 방법을 제시한다. 이를 통해 프론트엔드 대시보드에서 시각적으로 효과적인 리스크 비교가 가능하다.

### TCFD 리스크 분류

TCFD Final Report(2017) 및 IPCC AR6 WGII Chapter 16에 따라 기후 물리적 리스크를 급성(Acute)과 만성(Chronic)으로 구분한다.

**Acute Physical Risks (급성 리스크)**

사건 기반 리스크(Event-driven)로서 급격하게 발생하며, 단기적이고 국지적인 피해를 유발한다. 명확한 발생 시점이 있으며, 재난 대응 및 복구 전략이 중요하다. 본 프로젝트에서는 태풍(Typhoon), 하천 홍수(River Flood), 도시 홍수(Urban Flood), 산불(Wildfire)을 급성 리스크로 분류한다.

**Chronic Physical Risks (만성 리스크)**

장기 추세 변화 리스크(Long-term shift)로서 점진적으로 변화하며, 장기적이고 광역적인 영향을 미친다. 누적적 피해가 특징이며, 적응 및 완화 전략이 필요하다. 본 프로젝트에서는 극심한 고온(Extreme Heat), 극심한 한파(Extreme Cold), 가뭄(Drought), 물부족(Water Stress), 해수면 상승(Sea-Level Rise)을 만성 리스크로 분류한다.

### 비교 방법론

**방법 1: TCFD 카테고리별 최우선 리스크**

각 TCFD 카테고리 내에서 최고 점수 리스크를 식별한다. 급성 리스크 그룹과 만성 리스크 그룹에서 각각 가장 높은 점수를 받은 리스크를 추출하여, 단기적 재난 대응과 장기적 적응 전략 수립에 우선순위를 제공한다.

이 방법은 TCFD 공시 요구사항에 직접 부합하며, 투자자 및 이해관계자가 단기 재무 리스크(급성)와 장기 전략 리스크(만성)를 명확히 구분하여 이해할 수 있도록 한다.

**방법 2: 전체 리스크 순위 (1위~9위)**

9개 전체 리스크를 점수순으로 정렬하여 순위를 부여한다. 각 리스크에 TCFD 카테고리 태그를 추가하여, 전체적인 리스크 분포와 함께 급성/만성 리스크의 균형을 파악할 수 있다.

이 방법은 건물별 맞춤형 리스크 포트폴리오를 제공하며, 리스크 관리 우선순위 결정 및 예산 배분에 활용된다.

### 구현 코드 요약

리스크 비교 시스템은 RiskComparator 클래스를 통해 구현된다. 주요 기능은 다음과 같다.

첫째, TCFD 카테고리별 최우선 리스크를 식별한다. 급성 리스크와 만성 리스크를 각각 필터링한 후, 각 그룹에서 최고 점수를 가진 리스크를 추출한다.

둘째, 전체 리스크 순위를 산정한다. 9개 리스크를 점수 기준으로 내림차순 정렬하고, 각 리스크에 순위와 TCFD 카테고리 태그를 부여한다.

셋째, 비교 결과 요약을 생성한다. 전체 최고 리스크, TCFD 카테고리별 최우선 리스크, 고위험(점수 50점 이상) 리스크 개수 등의 요약 정보를 제공한다.

구현 코드는 risk\_comparator.py에 위치하며, compare\_risks() 메서드가 전체 비교 로직을 수행한다.

### 근거 및 참고문헌

* TCFD (2017). Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures. Final Report. Financial Stability Board.
* IPCC AR6 WGII (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 16: Key Risks across Sectors and Regions. Cambridge University Press.
* ISO 14091:2021. Adaptation to climate change — Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment. International Organization for Standardization.

* **작성자 : 오동헌, 이창민**
* **작성일 : 2025.11.16**
* **수정일 : 2025.12.03**
* **설명: 리스크 비교 방법 설명입니다.**