

기후변화에 따른 초대형 산불 대응 관리기술에 관한 연구

김동현

국립산림과학원 & 국제응용분석연구원

Research on Fire Management Technology against Mega Fire due to Climate Change

Donghyun KIM

Korea Forest Research Institute(KFRI) & International Institute for Applied System(IIASA)

1. 서론

산불은 지구촌에서 발생하고 있는 자연재해 중하나이며 기후 변화로 인한 대규모 산불발생으로 인한 피해가 끊임없이 이어지고 있다. 미국서부지역, 캐나다 중서부, 극동러시아, 호주 남동부, 아프리카 지역뿐만 아니라 한국, 중국, 몽골, 동남아시아를 포함한 세계 전역에서 매년 산불로 인한 피해와 고통을 입고 있다. 산불은 산림과 건축물 파괴 및 사상자 발생 등 물리적인 피해를 가져올 뿐만 아니라 산림훼손으로 인한 전 세계 온실가스 배출량의 20%중 산불로 인한 이산화탄소 배출량 약 0.45천톤/ha(IPCC 가이드라인 기준, 바이오매스 축적량 285천ton/ha 기준)¹⁾을 배출하고 있다. 이러한 대규모 산불로 인한 피해는 비단 한 지역, 한 국가만의 문제뿐만 아니라 인접국가에 까지 영향을 가져다준다. 대표적으로 80만 ha의 산림피해와 251명의 사망자를 기록한 1997년 8월 인도네시아 칼리만탄 산불로 발생한 연무로 인해 인접 7개 국가로 이동되어 7,000만 명의 호흡곤란 환자와 2,000만 명의 입원환자가 발생하였고 이중 17명이 사망하였다. 기후변화에 따른 이산화탄소 흡수원인 산림자원 보호를 위해 각 국에서 산불방지에 대한 정책과 기술개발을 끊임없이 진행하고 있다. 산불관리를 위한 연구는 크게 예방, 완화, 진화로 구분할 수 있는데 넓게는 복구단계도 포함되기도 한다. 특히 산불행태에 관한 연구는 일반화재 성상에 관한 연구처럼 과학적인 기초연구 결과들을 도출하는데 목적이 있다. 이러한 기초연구 결과들은 예방, 완화, 진화 및 복구 등 산불관리 전반에 걸쳐 활용되어진다. 전 세계적으로 산불 기초분야에 대한 연구는 산불성상, 확산예측, 연료특성 등에 대해 이루어지고 있다. 산불관리를 위한 효율적인 방안에 대해 전 세계 연구자들은 GIS와 RS를 이용한 다양한 모니터링 기술 연구와 산불위험지수개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 우리나라에서는 WEB-GIS기반 산불위험예보시스템과 최신 ICT기술을 적용한 산불감시시스템, 산불확산예측알고리즘 개발, 산불방지 급수시설 설치, 산불진화용 친환경소화약제 개발 등의 기술을 개발하여 현장에 적용하고 있으며 산불위험지수 개발에 대한 연구를 추가적으로 수행하고 있다. 또한 우리나라는 임업적 산불방지기술 개발을 통해 산불에 강한 숲 가꾸기를 실시하고 있다. 본 컨퍼런스에서는 우리나라 산불관리 기술 연구결과와 함께 국제 공동연구를 수행 중인 글로벌산불위험지수 개발에 관한 내용을 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 국내 산불관리 기술 연구

국내산불은 1996년 고성산불, 2000년 동해안산불, 2002년 청양예산산불, 2005년 양양산불을 겪으면서 현장에 필요한 실용기술 연구 위주로 진행되었다. 여기서는 산불예방, 산불진화, 산불특성으로 구분하여 다음과 같이 정리하였다.

① 산불예방

- 산불위험예보시스템

산불발생위험을 예측할 수 있는 전국산불발생위험지수(NFFDRI)의 기본 구조를 일별기상위험지수(DWI), 임상위험지수(FMI), 지형위험지수(TMI) 등 총 3개의 지수로 구성하였다. DWI는 8개도 단위별로 실효습도, 최고온도, 평균풍속 등의 기상적 특성에 의하여 작성되며, 이는 국내 발생된 산불에 대해 지역별 기상변수들과의 로지스틱 모형을 적용하여 산불발생확률모형을 지수화 하였다. FMI와 TMI는 126개소의 산불발생지점에 대한 현장조사에서 얻어진 임상과 방위, 발화지점의 위치에 대한 빈도분석에 의하여 지수화 하였다. 이상의 3개 지수를 적절한 계산과정을 통하여 최종적으로 산불발생위험지수를 개발하여 Web-GIS를 이용하여 시스템을 구축하였다.

- 산불위치관제시스템

산불예방을 위해 전국적으로 운영되고 있는 산불감시원은 약 35천명에 이른다. 산불감시인력의 효율적인 관리와 산불발생시 위치정보를 함께 전송하여 정확한 산불발생 위치를 파악할 수 있도록 LBS(Location Based System)과 ICT(Information Communication Technology) 그리고 Web-GIS를 이용하여 산불위치관제시스템을 개발하였다. 또한 산불진화대원의 안전과 상황실에서 보다 정확한 현장 파악을 위해 스마트폰을 이용한 산불현장관리시스템을 개발하였다. 이 시스템은 위치좌표를 포함한 산불현장 사진과 동영상 그리고 위급상황 문자 메시지 전송기능 등을 포함한다.

- 방화림 및 방화선 조성

산불방지에 대한 예방차원의 피해를 저감시키거나 위험을 완화시키는 대표적인 임업적 기술을 적용하는 방법으로 방화림 조성과 방화선 구축을 들 수 있다. 방화림 조성은 산림내 연소물질 관리 또는 수종을 갱신하여 산불확산으로부터 화재강도를 낮추어 산림의 산불위험성을 낮추는 방법으로 대표적인 기술로는 간벌과 가지치기, 하예작업, 활엽수림 조성 등의 방법이 있다. 방화선 구축작업을 임내 연료물질을 완전히 제거하여 산불이 확산되지 않도록 구축하는 작업을 말하는데 일본과 중국의 산불 방화림 조성과 방화선 구축 사례를 조사 분석하여 국내 적용 가능한 산불에 강한 숲 조성 방법 및 방화선 구축 방법 등을 도출하였다.

② 산불진화

- 산불확산예측 알고리즘 개발

국내 산불확산예측에 대한 국내 연구로는 산림청 국립산림과학원(1992)에서 실내 실험을 통하여 연료와 풍속, 경사와 산불확산율에 대해서 연구한 바 있으며, 박은경(1996)은 래스터 기반으로 산불확산 모델링에 관한 연구를 수행하였다. 산림청 용역과제를 통한 ‘산불확산예측모델 Algorithm 및 Program 개발’ 과제의 김응식(1998) 등은 산불 확산 인자 중 풍속, 풍향 인자 추출을 위해 유동장 이론을 이용한 산불확산예측에 관한 연구를 수행한 바 있다. 국립산림과학원에서는 2003년에 지표화 산불확산예측 프로그램을 개발한 바 있으나 비화 및 수관화를 고려하지 못한 문제점으로 인해 산불확산 적용성 평가 결과, 대형산불의 확산속도 평가에서 약 10~20배 늦은 확산속도결과 값을 나타내었다 따라서 이를 보완하기 위한 산불확산예측 프로그램을 개발연구 수행중에 있으며 이러한 결과로 2005년 산불현장조사를 토대로 산불확산 간이조건표를 개발을 하였고 2006년 미국 Rothermel(1972) 산불확산모델을 이용하여 적용한 바 있다. 이후 2009년 수치해석을 이용한 2차원 산불확산알고리즘을 개발하였고 화염높이 산정식을 함께 개발함으로써 3차원 화염확산 모델을 개발하기 위한 개발을 마친바 있다. 이에 현재 GIS상에 이를 표현하기 위한 신규 연구과제를 추진 중에 있다.

- 뒷불 재발화 관리기술 개발

산불은 진화 후에도 남아 있는 불씨로 인해 다시 산불로 확산된다. 이에 실제 남아 있는 불씨가 재발화될 수 있는 위험성이 얼마나 되는지에 대한 정량 분석을 위해 실험을 실시하였고 그 결과, 뒷불 재발화 유형을 낙엽층, 암석지, 고사목 3가지로 분류하였고 평균 5cm미만의 낙엽층에서는 재발화가 발생하지 않았으며 100℃ 이상 온도가 지속된 시간은 소나무 낙엽층의 경우, 최대 22시간, 굴참나무 낙엽층의 경우에는 20시간 이상 지속되었다. 따라서 최소 24시간 이상은 뒷불 재발화 방지를 위해 감시 및 잔불을 정리할 필요성이 있다.

- 산불진화용 포소화약제 개발

산불진화용 포소화약제는 산불 진화효과 뿐만 아니라 자연환경에 사용되는 화학물질인 만큼 산림에 미치는 환경독성 영향을 고려하여야 한다. 하지만 현재 국내 제조, 사용되고 있는 국내외 산불진화용 포소화약제에 대한 환경독성 및 기타 물리적 특성 기준 등이 마련되어 있지 않다. 특히 산불진화용 포소화약제는 항공기에도 사용되고 있어 항공기 기체 금속부식에 대해 고려되어야 한다. 국내 소화약제는 소방법 기술기준규칙에 적용을 받고 있지만 산불진화용 포소화약제에 대한 사항은 규정된 바 없어 기준이 전무하다. 이에 국내외 제조, 판매되고 있는 산불진화용 포소화약제에 대한 진화능력, 환경 독성, 장비손상 가능성 유무 등을 조사·분석하여 산림환경독성 영향평가와 함께 진화능력단위평가, 기초 물성치 측정 등 우리나라 산불진화에 적합한 시험방법 및 소화약제 제품규격 안을 다음과 같이 마련하였다.

a) 기초 물성치 9개 항목 기준 마련 : pH, 점도, 어는점, 인화점, 비중, 표면장력, 포발생특성, 금속부식, 내후성

b) 소화성능 평가를 위한 측정방법 및 기준 마련

c) 환경독성 영향평가 측정 방법 및 기준 마련 : 어독성, 지렁이독성, 식물독성

- 산불 연무 위험성 분석

소나무와 굴참나무의 낙엽에 대한 연소가스 분석결과, 검출된 가스는 표준 흡수 파장대 분석을 통해 Carbon monoxide, Carbon dioxide, Acetic acid, Butyl acetate, Ethylene, Methane, Methanol, Nitrogen dioxide, Ammonia, Hydrogen Fluoride, Sulfur dioxide, Hydrogen bromide 등 13종이 검

출되었고 굴참나무 낙엽에서는 Nitrogen monoxide가 추가로 검출되었다(표 1). 이중 나무를 구성하는 원소가 아닌 Bromide, Fluoride 등의 화합물 경우, 지표면에 놓여진 낙엽이 토양의 오염에 의한 검출 및 연료의 특정 화합물질로부터 발생할 수 있다. 소나무 낙엽연소시 검출된 13종의 가스농도 분석결과 이산화탄소가 약 90%로 가장 많이 검출되었고 일산화탄소가 약 9.5%로 검출되었다. 굴참나무 낙엽 연소시 검출가스 14종의 농도분석 결과, 이산화탄소가 약 89%, 일산화탄소가 약 10%로 검출되었다. 따라서 탄소복합체로 구성된 셀룰로오스의 연소시 이산화탄소와 일산화탄소의 연소가스가 전체 방출가스의 약 90%이상을 차지하였다. 방출된 연소가스 전체량은 소나무 낙엽이 굴참나무 낙엽에 비해 4.5배 많이 검출되었다. 연소반응시 화염연소와 훈소연소 상태의 각 가스 방출량은 표 2와 같이 소나무 낙엽의 경우, 화염연소 : 훈소연소의 이산화탄소, 일산화탄소 방출 비율은 각각 8 : 2, 8.4 : 1.6이고 굴참나무 낙엽은 각각 5.3 : 4.7, 4.5 : 5.5의 비율로 방출되었다.

표 1. 소나무, 굴참나무 낙엽층 연소시 방출 가스성분 및 농도 분석

| Fuel | Gases | Carbon monoxide | Carbon dioxide | Acetic Acid | Butyl acetate | Ethylene | Methane | Nitrogen dioxide |
|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------|------------------|----------|-------------------|-------------------|
| | | <i>P. densiflora</i> | Concentration(ppm) | 3493.85 | 33225.122 | 57.591 | 25.603 | 21.822 |
| | Emission amount(g) | 174.71 | 1690.8 | 2.93 | 1.3 | 1.11 | 1.08 | 1.04 |
| <i>Q. variabilis</i> | Concentration(ppm) | 850.106 | 7339.321 | 18.69 | 6.292 | 5.434 | 5.239 | 6.42 |
| | Emission amount(g) | 18.08 | 156.09 | 0.39 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.14 |
| Fuel | Gases | Ammonia | Hydrogen fluoride | Sulfur dioxide | Hydrogen bromide | Methanol | Hydrogen chloride | Nitrogen monoxide |
| | | <i>P. densiflora</i> | Concentration(ppm) | 14.373 | 8.539 | 6.845 | 6.567 | 5.562 |
| | Emission amount(g) | 0.73 | 0.43 | 0.35 | 0.33 | 0.29 | 0.12 | None |
| <i>Q. variabilis</i> | Concentration(ppm) | 4.894 | 0.626 | 2.303 | 3.489 | 2.571 | 0.689 | 1.484 |
| | Emission amount(g) | 0.1 | 0.02 | 0.05 | 0.08 | 0.05 | 0.02 | 0.03 |

표 2. 소나무, 굴참나무에 대한 연소가스 방출 환경

| Oxidation gases | | Emission rate(%) | |
|----------------------|-----------------|------------------|------------|
| | | Flaming | Smoldering |
| <i>P. densiflora</i> | CO | 83.55 | 16.45 |
| | CO ₂ | 79.84 | 20.16 |
| <i>Q. variabilis</i> | CO | 45.05 | 54.95 |
| | CO ₂ | 53.13 | 46.87 |

- 산불방지 급수시설 개발

국내 산불로부터 시설물을 보호, 산불을 진화하기 위한 주요시설인 산불방지용 급수시설은 현재 소방관련법령에 따른 ‘옥외소화전’ 설치기준을 참고하여 설치, 운영되고 있다. 하지만 옥외소화전 설치기준의 경우, 살수를 위한 호스반경이 25m로 산불예방 및 진화를 위한 산림으로의 호스 이동 및 유효 살수거리가 보장되지 않아 산불현장에서 효과적으로 운영되기 어려운 단점이 있다. 실제 산불예방 및 진화를 위해서는 호스의 이동거리가 500m이상 도달해야 하며 이에 따른 적정 호스 및 관 부속품, 펌프 성능이 보장되어야 하지만 국내기준이 마련되어 있지 않아 시설물의 효용성이 현저히 떨어지는 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내 설치, 사용되고 있는 산불방지 급수시설에 대한 실태조사와 함께 장비 및 부속품 시장, 기술 조사, 성능시험을 통해 우리나라 산불예방 진화에 적합한 산불방지 급수시설 설치기준을 마련하였다. 그 결과, 기존 설치된 28개소 산불방지 급수시설은 지방서 외에 규격화된 기준 없이 시설되어 있으며 산불방지용 급수시설의 보다 효과적이고 활용성 높게 운영하기 위해서는 각각의 장치 및 시설에 대해 규격 및 기준이 필요한 것으로 나타났고 산불방지 급수시설의 최적화 성능시험을 위해 펌프, 배관, 호스, 노즐, 기타 살수장치에 따른 각각의 부속품 등으로 간소화된 시설을 설치, 4가지 소화방법을 제시하였다. 또한 현황조사 및 최적화 성능시험을 통해 17조항에 걸쳐 산불방지 급수시설 설치기준을 마련하였고 산불방지 급수시설의 유지보수 관리를 위해 7종의 점검표를 작성하였다.

- 방화선 구축폭 산정

산불 지표화의 방화선 구축작업은 낙엽 및 관목류 등 지표 연료층을 제거함으로써 화염전파를 차단하는 대표적인 간접진화방법이다. 화재역학적인 의미의 방화선 구축은 화염으로부터 방출되는 열전달에너지에 미연소 연료가 착화되지 않도록 열전달 차단 구간을 설정하는 작업이다. 본 연구에서는 소나무 낙엽층에 대해 복사열전달 점열원 모델을 이용하여 풍속, 경사별로 지표화 화염을 방지할 수 있는 방화선 구축 폭 산정 방법을 제시하였고 평가를 실시하였다. 방화선 구축 폭은 소나무 낙엽 착화 임계 복사

열유속인 4.9kW/m^2 가 미치는 거리를 기준으로 평가하였다. 그 결과, 풍속 $0\sim 5\text{m/s}$, 경사 $0\sim 50^\circ$ 조건에서의 방화선 구축 폭은 평균 화염 기준의 경우, $0.35\sim 0.65\text{m}$, 최대 화염높이 기준의 경우, $0.75\sim 1.05\text{m}$ 로 산정되었다. 따라서 안전율을 고려한 적정 방화선 구축 폭은 최대 화염 높이를 적용한 1.05m 가 적합할 것으로 판단된다.

③ 산불특성

- 국소지역 바람장 해석프로그램 개발

산림의 지형에 따른 국소지역 바람장 변화를 해석하기 위해 전산유체역학을 이용하여 모델을 제시하였다. 유체 및 에너지의 이동현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 비선형연립편미분 방정식으로 공중에서 속도와 위치에너지를 가지고 있는 바람의 입자하나, 하나에 대해 난류 유동해석을 실시하였다. 전산유체역학을 이용하여 바람장 변화를 해석한 결과, 그림 1에 보이는 바와 같이 지표면으로부터 10m 높이의 서풍의 풍속 10m/s 조건으로 주어졌을 때 지형에 따라 최저 0m/s 에서 최고 약 20m/s 까지 차이가 나타남을 알 수 있었다. 특히, 풍향과 사면의 향이 일치하고 능선부위에 가까워질수록 풍속이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 산불의 발생시 능선부에서 발생하는 강한 바람으로 비화가 발생할 수 있는 환경을 제공하는 것으로 판단된다. 또한 해발고가 높은 풍향의 반대 사면의 경우 풍향이 바뀌고 와류가 발생하는 것을 확인할 수 있었고 이때 무풍에 가까운 풍속저하 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 이는 실제 산불확산시 풍향과 반대방향 사면의 경우, 확산속도가 낮은 확산경향과 같다.

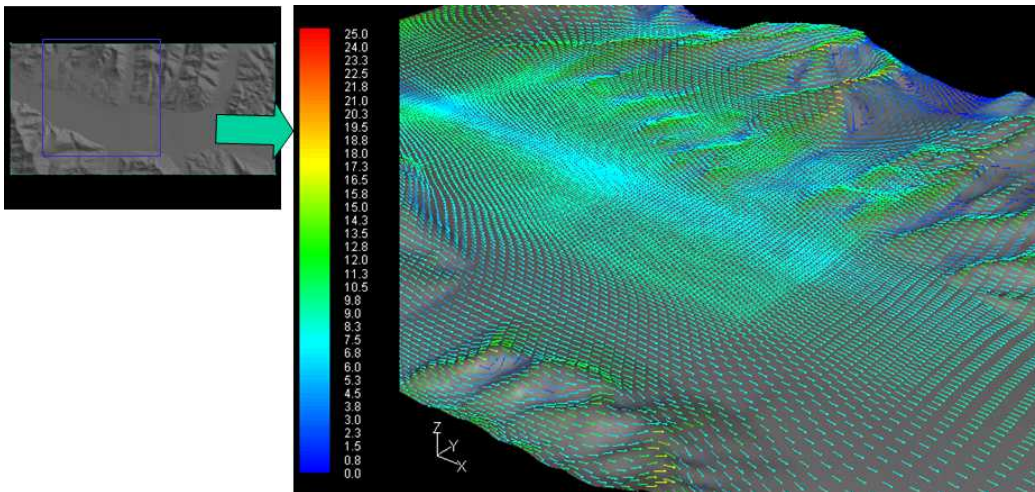


그림 1. 의성군 지역 바람장 해석 결과

- 화염특성분석

산불확산에 있어 화염의 높이는 연료의 특성과 바람, 경사에 의해 달라진다. 일반적으로 무풍-평지(no wind, no slope)조건에서의 Flame Height와 Flame Length는 같지만 경사와 바람에 의해 Flame Height는 Flame Length보다 작은 값을 가진다. 여기서 바람 또는 경사에 의해 화염이 지표 연소물질과 보다 가까워짐으로써 복사 열전달율이 높아지게 되어 보다 빠른 확산이 이루어진다. 따라서 화염의 높이 산정은 산불확산 예측 등 산불의 위험성을 평가하는데 중요하다. 평균 화염높이 H_0 는 간헐성이 0.5 로 떨어지는 발화원 상부의 거리로 간헐성 측정결과에 따른 평균화염높이와 객관적인 판정결과는 육안관찰을 통해 평균을 구한 화염높이와 상당히 일치한다(Zukoski 1985). 본 연구에서는 무풍, 평지 조건에서 열적 두께가 얇은 지표층 낙엽에 대한 화염높이 측정실험을 통해 화염의 간헐성이 0.5 로 떨어지는 발화원 상부로부터의 거리를 측정하여 기존연구결과에서 제시된 화염높이 측정결과와 수치해석을 통해 얻은 산정식 값 그리고 기존 연구되어진 화염높이 예측식을 통해 상호 비교하였다. 산불에 있어서 수치해석을 통한 화염높이 산정에 관한 연구는 무풍, 평지 상태에서 이루어져 있지 않다. 화염높이 예측을 위해 일반적으로 바람이 불지 않는 조건에서의 액체 또는 고체 가연물질의 수평면 화재에 대한 화염높이 산정식을 1)과 같이 제시되었다.

$$H_f = Z_f = 0.027(\dot{Q}')^{2/3} \quad 1) \quad \text{여기서, } \dot{Q}' \text{은 열방출률(Heat Release Rate)이다.}$$

또한 바람과 경사에 의한 화염기울기는 경사면에 대한 바람방향이므로 수평으로 부는 바람인 U_s 에 식 2)에 대입하면 경사와, 바람에 의한 화염기울기를 산정할 수 있다.

$$\tan \phi_s \sin \phi_s = 1.85 \frac{U_s^2}{gL_f}$$

2) 여기서, 화염과 경사면의 사잇각 $\theta_s = 90 - (\beta + \phi_s)$ 이다.

2.2 글로벌 산불위험지수 개발 연구

2012년부터 추진 중인 글로벌 산불위험지수 개발에 관한 연구는 IIASA에서 국제공동연구과제로 진행하고 있으며 전 세계 다양한 산불위험지수를 수집, 분석하고 보다 다양한 기후대와 산림에 대해 포괄적으로 산불위험을 평가하여 나타낼 수 있는 지수를 개발하기 위한 과제이다. 산불 위험은 우선적으로 forest fuel의 수분함유량(FMC)과 직접적인 연관이 있으며 연료의 수분함유량은 기상과 함께 연료의 상태에 따라 많은 영향을 받는다. 이러한 산불의 위험을 판단하기 위해 많은 연구자들이 날씨와 연료와의 상관관계에 관한 연구를 지속해 왔다. 전 세계에서 개발된 산불위험지수는 대부분 기상인자를 이용하고 있으며 부분적으로 연료와 지형인자를 활용하고 있다. Angström Index (Willis et. al., 2001)는 온도와 상대습도를 이용하여 간단한 건조지수로 Scandinavia 지역에서 산불위험지수를 5단계로 구분하여 활용하고 있다. Baumgartner Index는 Potential evapotranspiration과 Precipitation을 이용하여 지수를 계산하며 5단계로 구분하여 산불위험지수로 활용하고 있으며 Scandinavia 지역과 독일에서 활용하고 있다. The Canadian Fire Weather Index (CFWI, Van Wagner, 1987)는 캐나다 침엽수림지역을 대상으로 세 가지 연료층에 대한 Fuel Moisture Content를 계산하는 것으로 the Fine Fuel Moisture Code(FFMC), Duff Moisture Code(DMC) 그리고 the Drought Code(DC)로 나타낸다. 세 가지 code를 바탕으로 Initial Spread Index(ISI), Build Up Index(BUI), Fire Weather Index(FWI)를 산출한다. FWI는 6단계로 구분되며 지금 현재 캐나다를 비롯한 인도네시아 등 동남아시아지역에 활용되고 있으며 Global Mega Fire에 대한 위험지수로 활용되고 있다. 이 밖에도 전 세계적으로 활용되고 있는 산불위험지수는 약 15 모델이 있으며 지역마다 각기 차별화된 위험지수를 제공하고 있다. 본 연구과제 추진은 그림 2와 같이 진행 중에 있다.

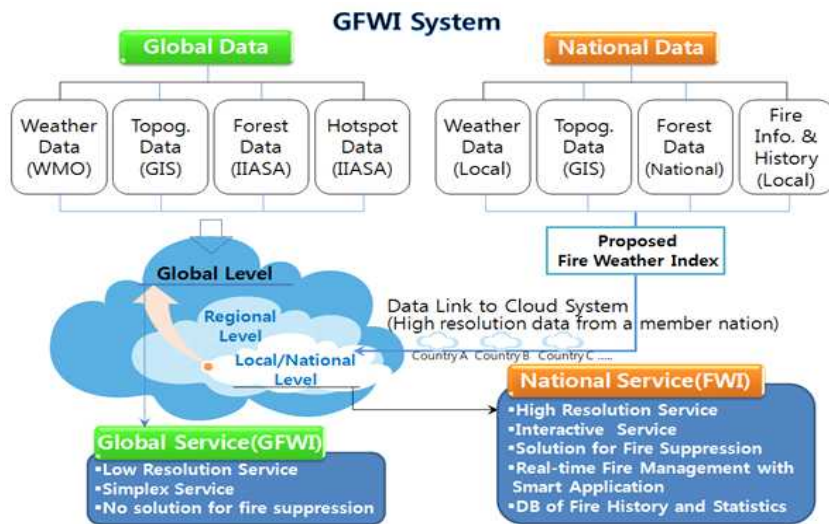


그림 2. GFWI시스템 구축개념도

3. 결론

산불에 관한 연구는 비단 물리, 화학을 기반으로 한 기초연구분야 뿐만 아니라 IT, 기계, 기상, 산림, 지형, 환경 등 다양한 연구 분야들이 융합된 기술개발이 필요하다. 또한 산불의 예방적인 측면은 인문사회학적인 접근법을 통해 주요 산불발생원인인 인간의 활동에 대한 다각적인 예방노력이 이루어져야하고 또한 산불 발생 후 주민들의 정신적 피해에 이르기까지 의학적인 접근법까지 요구되고 있다.

대형화 산불이 점차 빈번화 되고 있는 시점에서 본 발표에 소개된 연구 결과들을 지속적으로 보완되고 발전시켜나가기 위하여 국제 공동연구 및 협력을 통해 국가 또는 지역 간의 공동 대응의 필요성이 절실하다.

참고문헌

- 1) IPCC, "Energy; Stationary Combustion", 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2, pp. 47.2006.
- 2) 김동현 등, "소나무, 굴참나무 낙엽의 연소 방출가스 분석 및 건강 위험성 평가", 한국화재소방학회 논문지, 제23권, 제78호, pp.24-31, 2009.
- 3) 김동현 등, "산불초기연소형태 구명 및 뒷불 재발화 관리기술 개발", 국립산림과학원, pp1~105, 2010.
- 4) 이시영, "효율적 산불예방을 위한 산불위험예보시스템", 산림, 통권458호, pp.78-80, 2004.
- 5) 김동현 등, "LBS 기반 U-ICT Disaster Management System of Based on LBS(Location Based System)", 2011년도 한국화재소방학회 춘계학술논문 발표회 논문집, 2011.
- 6) 김동현 등, "국의 산불 방화림 조성 및 방화선 구축 사례연구 : 일본사례를 중심으로", 2012년도 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회 초록집, 2012년
- 7) 김동현 등, "산불 지표화의 1차원 화염전파 모델의 수치해석 연구:평지조건 기반에서", 한국화재소방학회논문지, 한국화재소방학회논문지, 제22권, 제2호, pp.63-69, 2008
- 8) Donghyun KIM, "A Study on the Flame Tilt and Flame Spread Velocity to Up-Slope on Surface Fuel Beds", 6th International Conference on Forest Fire Research, CP12, 2010.
- 9) Donghyun Kim et al. "The Study on Experimental Method of Smoldering Ground fire in Forest Fire", 6th International Conference on Forest Fire Research, CP15, 2010.
- 10) 김동현, "복사열전달 수치해석을 통한 지표화 방화선 구축 폭 산정에 관한 연구" 한국방재학회논문집, 제10권, 제6호, pp59-64, 2010.
- 11) 김동현, 이지희, "산불진화 포 소화약제 성능기준 마련", 2012년 한국방재학회 춘계학술발표대회지, pp162-168, 2012.
- 12) 김동현 등, "소나무, 굴참나무 낙엽의 연소 방출가스 분석 및 건강 위험성 평가", 한국화재소방학회논문지, 제23권, 제5호, pp.24-31, 2009.
- 13) 김동현, "산불방지용 급수시설 설치기준 마련을 위한 연구", 2012년 한국방재학회 춘계학술발표대회지, pp169-173, 2012.
- 14) Donghyun KIM, Byungyoon KIM, "Development and validation of Computational Wind Field Model(Wind scape)", The 4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science 2012 (4th AJWTF), T4C-4, 2012.
- 15) 김동현, "소나무 낙엽층 화염높이 산정식에 관한 연구", 한국화재소방학회논문지, 제23권, 제6호, pp.10-15, 2009.
- 16) Mantzavelas, Antonis et al. "Method to assess with good spatial accuracy the meteorologica and fuel moisture components of the fire risk",Fire Paradox, D5.1-1, p56, 2006.
- 17) J.J. Sharples et al. "A simple index for assessing fire danger rating", Environmental Modelling & Software, 24, pp.764-774, 2009.