

한국 플렉스 관측망의 과거, 현재와 미래

강민석^{1*} · 권효정² · 김준^{3,4,5,6} · 김현석^{1,3,6,7} · 류영렬^{3,4,6} · 이승재¹ · 최태진⁸

¹국가농림기상센터, ²오리건주립대학교 산림생태계 · 사회학부, ³서울대학교 농림기상협동과정,
⁴서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학부, ⁵서울대학교 평창캠퍼스 그린바이오과학기술연구원,
⁶서울대학교 농업생명과학연구원, ⁷서울대학교 산림과학부, ⁸극지연구소 극지기후과학연구부
(2018년 3월 28일 접수; 2018년 3월 29일 수정; 2018년 3월 29일 수락)

Korean Flux Monitoring Network's Past, Present, and Future

Minseok Kang^{1*}, Hyojung Kwon², Joon Kim^{3,4,5,6}, Hyun-Seok Kim^{1,3,6,7},
Youngryel Ryu^{3,4,6}, Seung-Jae Lee¹ and Taejin Choi⁸

¹National Center for AgroMeteorology, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

²Department of Forest Ecosystems & Society, Oregon State University, 342 Richardson Hall,
Corvallis, 97331, Oregon, USA

³Interdisciplinary Program in Agricultural & Forest Meteorology, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

⁴Department of Landscape Architecture & Rural Systems Engineering, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

⁵Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University Pyeongchang Campus, 1447,
Pyeongchang-daero, Deahwa-myeon, Pyeongchang, 25354, Korea

⁶Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

⁷Department of Forest Science, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

⁸Division of Polar Climate Science, Korea Polar Research Institute, 26, Songdomirae-ro,
Yeosu-gu, Incheon, 21990, Korea

(Received March 28, 2018; Revised March 29, 2018; Accepted March 29, 2018)

전통적 정의의 농림기상학은 농림생태계의 일차생 산에 필수불가결한 요소인 복사에너지와 대기 및 생물 간의 관계를 밝혀 농업 혹은 생물산업에 활용하는 학문이다(Yun, 1999). 신기후체제를 맞아 농림기상학은 농림생태계의 지속 가능한 미래를 보장하는 데 필요한 가치, 태도 및 생활 방식을 배울 수 있도록 지속가능성의 모든 측면에서 양질의 교육을 제공한다는 미션을 부여 받게 되었다. 이에 따라 현대적 정의의 농림기상학은 탄력기반 시스템사고와 비저니어링을 통해 지속 가능성과 관련된 핵심 역량을 갖추어 복잡한 생태-사회계의 현재와 미래의 농림업 및 환경 문제에 대한 지

속 가능한 해결책을 계획하고 구현함으로써 글로벌 지속가능성 문제를 해결할 준비가 된 지도자 및 청지기를 창출하려는 비전을 추구하는 학문(Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, 2017)으로 그 범위와 영역이 확장되고 있다.

전통적 정의의 농림기상학에서는 농림생태계와 대기 간의 상호작용으로 일어나는 물질(탄소/물)과 에너지 교환을 포함한 생지화학 및 생태수문학적 현상을 관측하는 것에 중점을 두었다. 농림기상학적 현상은 농림생태계와 대기 사이의 난류수송을 관측하는 미기



* Corresponding Author : Minseok Kang
(ms-kang@ncam.kr)

상학적 기술인 에디 공분산 시스템과 복사, 기온, 습도 등의 일반 기상관측장비를 포함한 에디 공분산 플럭스 타워를 사용하여 효과적으로 관측되어 왔다. 농림기상학의 영역이 확장되면서 플럭스 관측도 농림생태계의 탄소/물/에너지 교환에 관련된 생물기상환경을 관측하는 수준을 넘어서, 복잡계로 대변되는 생태-사회시스템의 원리를 밝히고 지속가능발전의 문제를 해결하는 데에 중요한 역할을 담당하게 되었다.

국내 플럭스 관측망이자 과학기술공동체인 KoFlux가 2002년 제주도에서 개최된 제2회 AsiaFlux 국제워크숍에서 공식적으로 출범한 이래, 창립 15주년을

맞이하게 되었다. 지난 15년 동안 KoFlux는 관측망 설립의 기반구축단계, 스케일링 기술정립단계 (CarboKorea/ HydroKorea), 기술이전/확대운용단계 (Carbo(East)Asia/ HydroAsia)를 거치면서 국내외 주요생태계 탄소/물/에너지 플럭스 감시를 기반으로 다양한 관련분야간의 협력과 융합을 추진하고, 생태계 과학 분야의 지식 창출과 정보 서비스를 통해 지속가능한 생태-사회시스템을 실현하는데 기여해왔다 (Kwon and Kim, 2010, 현재까지 출판된 KoFlux 및 KoFlux 관련 특별호는 Table 1 참고). 관측망 운영 주체는 국가농림기상센터, 국립기상과학원, 국립농업

Table 1. List of the KoFlux (related) special issues

	Theme	Journal	Guest editors	Publication year	No. of papers
KoFlux 2002 Synthesis	KoFlux's the 1 st special issue after the official Kick-off in 2002	<i>Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology</i>	Joon Kim, Chae-Sik Rho	2003	11
KoFlux 2004 Synthesis	Coping with climate change protocols by understanding carbon and water cycles in Korean ecosystems	<i>Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology</i>	Joon Kim	2005	13
KoFlux 2006 Synthesis	HydroKorea and CarboKorea: Synthesis of ecohydrological and biogeochemical processes in forest and agricultural ecosystems in Korea	<i>Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology</i>	Joon Kim	2007	8
KoFlux 2009 Synthesis	Energy, water, and carbon exchange at the land-atmosphere interface	<i>Asian-Pacific Journal of Atmospheric Sciences</i>	Joon Kim, Fei Chen, Sung Kim	2009	10
CarboEastAsia 2009 Synthesis	The 1 st special issue of CarboEastAsia, the international collaborative research program among ChinaFLUX, JapanFLUX, and KoFlux	<i>Biogeosciences</i>	Georg Wohlfahrt, Jing Chen, Joon Kim, Yu Guirui, Takashi Hirano	2009-2010	18
KoFlux 2010 Synthesis	Domestic surface flux measurement-model fusion	<i>Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology</i>	Hyojung Kwon, Byong-Lyol Lee	2010	6
CarboEastAsia 2012 Synthesis	Lessons learned from CarboEastAsia: Carbon and water cycles in East Asian terrestrial ecosystems	<i>Journal of Forest Research</i>	Joon Kim, Takashi Hirano, Guirui Yu, Shenggong Li, Koji Tamai	2013	5
KoFlux 2017 Synthesis for the 15 th Anniversary (this issue)	Korean flux monitoring network's past, present, and future	<i>Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology</i>	Minseok Kang, Hyun-Seok Kim, Youngryel Ryu, Seung-Jae Lee, Taejin Choi	2018	8

과학원, 국립산림과학원, 극지연구소, 서울대학교, 연세대학교, 유량조사사업단 등으로, 현재 KoFlux 관측망은 국내 대부분의 기후영역대와 다양한 지표피복을 포함하고 있다. 국외로는 극지(세종기지, 다산기지)에서 플럭스 관측이 2000년대 초반부터 지금까지 진행되고 있으며, 최근에는 아프리카 탄자니아에 플럭스 관측 장비 및 기술이전을 위한 플럭스 관측지를 새롭게 구축 중에 있다.

이렇게 KoFlux가 확장하고 성장할 수 있었던 건, KoFlux 발족 당시의 기반구축-기술정립-기술이전 및 확대운영 단계로 구성된 10년 비전과 KoFlux의 성장과 발전을 위해 함께 수고해 주시고 아낌없는 지원과 격려로 도움을 주신 많은 분들이 있었기 때문이다. KoFlux가 그 동안 이뤄낸 가장 큰 성과인 국내외 플럭스 데이터베이스는 국가농림기상센터가 올해 구축한 자료획득처리시스템(DAPS)을 통해 차례로 배포될 예정이다. 이러한 배경으로 본 KoFlux 15주년 특별호에서는, 그 동안 KoFlux의 성장과 발전을 위해 함께 수고해 주시고 아낌없는 지원과 격려로 도움을 주신 분들께 감사의 드리고 지난 성과들을 정리 및 공유하는 한편, 앞으로 10년을 위한 KoFlux의 새로운 비전을 나누고자 한다.

KoFlux의 향후 10년동안 전 세계 플럭스 관측망인 FLUXNET (<http://fluxnet.fluxdata.org/>)과 FLUXNET의 아시아 지역 네트워크인 AsiaFlux (<http://www.asiaflux.net/>) 리더들의 비전을 함께 품고 이루고자 한다. 먼저 FLUXNET의 리더인 캘리포니아 대학교 버클리 캠퍼스의 Dennis Baldocchi 교수는 궁극적으로 FLUXNET을 통해 전 세계 어디서나 모든 시간에 걸쳐("everywhere, all of the time") 물과 탄소 플럭스를 평가할 수 있어야 한다고 했다. 국내 실정에 비춰 생각해보면, 비균질성과 복잡성 때문에 에디 공분산 관측에 적합하지 않은 국내 농림생태계에 대해서 보다 높은 정확도로 관측할 수 있는 기술과, 지점 관측인 에디 공분산 관측을 시공간적으로 확장하기 위한 관측-원격탐사 간의 연계기술의 확보가 해당 비전을 이루기 위한 선행 조건일 것이다.

AsiaFlux의 리더였던 서울대학교 복잡계과학연구소의 김 준 교수는 자원, 기반시설, 질 높은 교육과 훈련, 그리고 동기결여의 부족으로 빈곤에 허덕이고 있는 아프리카의 수많은 개발도상국들에 주목하였다. KoFlux는 넬슨만델라아프리카과학기술원(The Nelson Mandela African Institution of Science and

Technology)의 적정기술거점센터(Innovative Technology & Energy Center) 내, 미래지구(Future Earth)가 인가한 농촌 시스템 비저니어링(Rural Systems Visioneering) 지속가능발전목표연구소(Sustainable Development Goals Lab)에 참여하여 2018년 1월 탄자니아에 플럭스 관측 장비 이전을 시작으로 앞서 언급한 탄력기반 시스템사고와 비저니어링의 틀에서 농촌 거주민들에게 도움을 주고자 한다. KoFlux의 새 비전인 농촌 시스템 비저니어링에 대한 자세한 내용은 본 특별호의 Kim *et al.*(2018)을 참고하길 바란다.

이와 같은 맥락에서 이번 특별호에서는 장기 플럭스 관측의 필요성과 중요성, 플럭스 관측 및 DB 구축의 기술적/현실적 어려움, 관측 DB의 활용 사례, 지속가능발전목표를 이루기 위한 농촌 시스템 비저니어링 등을 주제로 다음의 여덟 편의 논문이 게재되었다. 특별호 첫 네 편은 플럭스를 포함한 농림기상관측에 대한 연구들로서, Kang *et al.*(2018)은 표준화된 KoFlux 자료처리 방법의 변화와 그 개선 효과에 대해 문서화하였고, Lee *et al.*(2018)은 무논점과 농법의 기후스마트농업(Climate Smart Agriculture)적인 측면에서의 경쟁력을 평가할 관측자료 생산을 위해 최근에 구축한 HPK 플럭스 관측지를 소개하였으며, Ju *et al.*(2018) 에디 공분산법과 함께 전세계적으로 널리 쓰이는 플럭스 관측법인 챔버법에 대해 고찰하였고, Park *et al.*(2018)은 철원에 위치한 기상청 농업기상관측소와 국가농림기상센터의 CRK 논 플럭스 관측지 간 자료 비교를 통해 현재 운영되고 있는 농업기상관측망의 자료 품질 개선 및 대표성 향상을 위한 방안을 제시하였다. 그 다음으로 이어지는 세 편은 이렇게 실측된 자료들의 분석 및 활용에 대한 농림기상학분야의 최근 연구 결과이다. 먼저 Indrawati *et al.*(2018)은 10년 이상 장기 플럭스 실측자료를 활용하여 네 가지의 다른 벼 품종들이 경작된 해남 농경지를 기후스마트농업의 첫 번째 목표인 생산성과 효율성 측면에서 평가하였다. 다음 두 편은 플럭스 타워에서 생산된 자료의 활용에 대한 내용으로, Lee *et al.*(2018)은 산림지 플럭스 타워 자료와 기상청 지상기상관측망 자료를 통합하여 여름철 도시 인근 산림에 의한 냉각효과를 정량화하였으며, Choi *et al.*(2018)은 2010 농림어업총조사 자료를 기반으로 IPCC 지침에 따라 전국 논에서 발생하는 메탄 배출량을 산정하였고, 이를 실측된 메탄 플럭스 자료를 활용해 평가함으로써 IPCC 지침의 유용성을 확인하고 그 개선방향을 제시하였다. 본 특별호

의 대미를 장식할 Kim *et al.*(2018)은 KoFlux의 새로운 비전인 농촌 시스템 비저너리링을 소개하고, KoFlux가 추구하는 연구가 플렉스 관측에서 지속가능성 과학으로 그 패러다임이 왜, 그리고 어떻게 변화하여야만 하는지 논하였다.

2016년 이세돌 9단과 강화학습기반 바둑인공지능 프로그램인 알파고(AlphaGo)의 대결을 기억하는가? 알파고와의 다섯 번의 대결 중, 이세돌 9단의 1승은 인류가 알파고에게 승리한 최초이자 마지막이 될 것으로 여겨진다. 그 당시 알파고는 과거 인간이 둔 수많은 기보들을 통해 학습하면서 세계최강의 자리에 올랐다. 알파고에 대한 최신 연구결과는 우리에게 또 다른 충격을 안겨준다. 짧은 기간 동안 기보없이 스스로와의 대국을 통해 성장한 알파고 제로(AlphaGo Zero)가 이세돌 9단을 비롯한 수많은 기사들에게 패배를 안겼던 기존의 알파고에게 압승했다는 내용이다(Silver *et al.*, 2017). 농림기상학의 관점에서 보면, 이러한 대결은 인간이 생태-사회시스템을 관찰하여 깨달은 원리들의 결정체인 지구시스템모델과 컴퓨터와 통계에 기반을 둔 기계학습이 만들어낸 생태-사회시스템을 모사하는 블랙박스 간의 예측가능성 대결과 통하는 부분이 많다. 그러나 바둑에 비하면 생태-사회시스템은 너무나도 복잡(complex)하기에 무엇이 더 나은 접근법인지는 아직 불분명하다. 다만 확신할 수 있는 건, 우리 생태-사회시스템을 지배하는 기본 원리를 인간이 이해하거나 기계를 학습시키기 위해선 더 많은 (관측)자료가 필요하다는 것이다.

감사의 글

지난 15년간 KoFlux의 성장과 발전을 위해 함께

수고해 주시고 아낌없는 지원과 격려로 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다. KoFlux 15주년 기념행사의 일환으로 진행된 AsiaFlux workshop 2017의 KoFlux special session과 한국농림기상학회 연차학술대회와 KoFlux 워크숍에 참여해주시고 도와주신 모든 분들께 감사드립니다. 본 특별호에 논문을 투고해 주신 저자분들, 논문들의 품위를 크게 높여 주신 심사위원분들, 그리고 특별호가 출판되기까지 아낌없이 지원해주신 한국농림기상학회 김광수 편집장님과 박진유 편집간사님을 비롯한 편집위원회분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, 2017: About Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, available at: <http://hosting02.snu.ac.kr/~snuagfm/index.php/about-agfm/mission-vision/> (last access: 7 March 2018)
- Kwon, H. J., and J. Kim, 2010: KoFlux's progress: background, status and direction. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**, 241-263. (in Korean with English abstract)
- Silver, D., J. Schrittwieser, K. Simonyan, I. Antonoglou, A. Huang, A. Guez, T. Hubert, L. Baker, M. Lai, A. Bolton, Y. Chen, T. Lillicrap, F. Hui, L. Sifre, G. van den Driessche, T. Graepelm, and D. Hassabis, 2017: Mastering the game of go without human knowledge. *Nature* **550**, 354-359.
- Yun, J. I., 1999: *Agricultural Meteorology*. Arche Publishing House, 333pp.