

CLIMEX 모델을 이용한 외래 침입 해충, 등검은말벌 (*Vespa velutina nigrothorax*)의 분포 위험 예측

박정준 · 정철의^{1*}

경상대학교 식물의학과(농업생명과학연구원), ¹안동대학교 식물의학과(농업과학기술연구소)

Risk Prediction of the Distribution of Invasive Hornet, *Vespa velutina nigrothorax* in Korea using CLIMEX Model

Jung-Joon Park and Chuleui Jung^{1*}

Dept. Plant medicine (Insti. Agri. & Life Sci.), Gyeongsang National University, Jinju, Korea

¹Dept. Plant medicine (Res. Insti. Ag. Tech), Andong National University, Andong, Korea

(Received 30 August 2016; Revised 7 November 2016; Accepted 7 November 2016)

Abstract

We determined the geographic spread of the invasive hornet, *Vespa velutina nigrothorax* which had established in Young-do, Busan in Southeastern Korean since 2003. After invasion, the hornets is expanding its distribution. Yearly dispersal was estimated as 9.4 Km northward. Distribution area increased exponentially reaching ap. 70% of total districts. CLIMEX model analysis indicates that the ecoclimatic indices (EI) increased as the projection year increased based on RCP8.5 scenario. Because of the lack of the correlation between the estimated EI values and actual distributional value, we project that this type of spread will continue to certain period. Given the important risk and impact on beekeeping, socio-biological as well as ecosystem and biodiversity levels, careful monitoring of phenology, range expansion and preventive efforts mitigating the impact are further required.

Key words: CLIMEX, Invasive species, Spread, Ecoclimatic index, Establishment, Risk

서 론

최근 기후변화는 생물의 계절적 패턴, 분포지역의 변화와 더불어 생물침입을 통한 생태계 교란을 야기하고 있다. 생물침입은 침입 받는 생태계의 구조와 기능에 변화를 야기할 뿐 아니라, 사회 경제적 문제를 불러 오기도 한다(Lockwood *et al.*, 2007). 더욱이 이상 기후 현상으로 인한 국내 생태계의 저항력 감소 및 국

제교역의 증가는 외래 생물 침입 기회를 증가시키고 있다(Williamson, 1996; Hill *et al.*, 2010). 외래 생물은 다른 생태계로의 침입 이후 일정기간의 잠복기를 거치면서 환경에 적응후 정착하게 된다. 정착기 이후 개체군의 크기가 증가하면서 분포가 확산되는 팽창기에 대부분의 생태계적 문제가 노출된다. 그 후 생태계 내 생태적 지위를 확보하면서, 개체군의 크기는 안정화 시기를 맞이하게 된다(Andow *et al.*, 1990). 등검은

*Corresponding author. E-mail: cjung@andong.ac.kr

말벌(*Vespa velutina nigrothorax*)은 2003년 부산 영도구에서 발견된 이후(Kim *et al.*, 2006), 대략 2007년부터 부산인근 경남 지역 양봉장을 중심으로 개체군이 확대되면서 양봉꿀벌(*Apis mellifera*)에 치명적 피해를 주기 시작했다(Jung *et al.*, 2008). 이 말벌은 동남아, 중국 남동부지역이 원산인 포식성 말벌류이며, 2004년에 프랑스로도 침입이 이루어졌다(Villemante *et al.*, 2008). Jung(2012a,b)은 등검은말벌의 생물적 침입 특성과 국내분포 확대 패턴을 프랑스 사례와 비교 분석하였고, Choi *et al.*(2015)은 등검은말벌 포획을 위한 유인제 개발 등의 연구를 진행하고 있다. 또한 침입생물의 분포 확장에 따른 트랩 조사 등을 통하여, 확대지역을 추적 보고하기는 하였으나(Choi *et al.*, 2012; Jung, 2012b), 이 생물의 분포 예측에 대한 정보는 부족한 상황이다.

생물의 분포지역 예측 모형은 크게 두 가지 방향으로 접근할 수 있다. 첫째는 현재 이 생물의 분포가 확인된 지점 등의 환경 정보를 종합하여 그 경향을 추정하는 것이며, 둘째, 특정 생물의 분포에 영향을 미치는 환경요인의 크기를 결정한 후 그 결과를 외삽하는 과정이다. CLIMEX 모형은 후자에 속한다. 본 연구에서 사용하는 CLIMEX 모형은 호주의 CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)에서 개발되었으며, 대표적인 종분포 모형인 GARP(Genetic Algorithm for Rule-set Production), MAXENT(Maximum Entropy) 등과 함께 외래종 분포 예측에 많이 활용되고 있다(Kriticos *et al.*, 2003; Barbosa *et al.*, 2012). 이 모형은 특정생물의 분포에 영향을 미치는 종 특이적인 요인과 환경인자와 관계값을 비교해서 그 결과를 추정한다(Kriticos *et al.*, 2003; Sutherst *et al.*, 2007). CLIMEX에서 나오는 Ecoclimatic Index(EI) 값은 대상지역에 특정생물이 “지속불가능하여 존재할 수 없는 값(EI=0)”부터 기후만을 고려할 때 대상지역에 특정생물이 “환경수용력(Carrying capacity) 밀도로 분포가능한 값(EI=100)”으로 표현된다. 이러한 EI값은 특정생물이 선호하는 기후조건에서 개체의 성장을 나타내는 Annual Growth Index(GI_A)와 비선호기간 생존에 직결되는 Stress Index(SI)와 Stress Interaction

Index(SX)의 복합연산으로 산출된다(Sutherst *et al.*, 2007). EI값은 많은 선행연구결과에 따라 대상생물의 서식처에 대한 선호 및 정착가능성의 범주가 3개로 나뉘며 (Marginal suitability=EI<10; Favorable suitability=10<EI<20~25; Very favorable 20~25<EI), 일반적으로 EI값이 10 이상인 경우 분포가 선호되는 지역이 된다(Vera *et al.*, 2002; Hoddle, 2004; Wang *et al.*, 2010; Shabani *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2014). 등검은말벌의 분포에 영향을 미치는 생물적 속성, 환경적 요인 등(활동기간, 세대수, 임계온도, 세대당 온일도DD 등)은 구체적으로 밝혀진 바 없다. 그러나, 비슷한 그룹의 말벌류에 관한 모수는 추정된 바 있고, 등검은말벌의 기후연관(climate-matching) 연구 등이 있어(Perrard *et al.*, 2009; Ibanez-Justicia and Loomans, 2012), 이를 바탕으로 분포가능역 시뮬레이션을 실시하였다. 이를 통해 향후 등검은말벌의 국내 정착 가능성 및 분포 영역을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

등검은말벌 분포 자료의 획득 및 분석

2003년에 국내 침입한 것으로 확인되는 등검은말벌의 분포 지역에 관한 2011년까지의 자료는 Jung(2012a)와 Choi *et al.*(2012)를 재정리하였다. 그리고 2014년 약 225명의 양봉가를 대상으로 등검은말벌의 사진을 보여준 후 지역 내 분포 여부를 설문 조사하였다(Jeong *et al.*, 2016). 추가 문헌으로 Sim *et al.*(2014), Choi *et al.*(2013), Choi *et al.*(2015)에서 발생 보고 지역을 포함하였으며, 등검은말벌의 출현 여부에 대한 양봉인 대상 설명회 또는 개별 접촉, 부정기적 현장 조사를 통해 자료를 수집하였다. 전국적 분포자료화를 위하여 발생지점이 포함된 행정단위(시군)를 기본 단위로 설정하였다.

분포 확대 속도를 추정하기 위하여 침입지점인 부산시 영도구에서 분포가 확인된 지점까지의 직선거리(km)를 구하였다. 그리고 분포 지역(시군 단위)의 농지 및 산림의 면적을 말벌의 서식가능면적으로 보

Table 1. Parameters used in CLIMEX for *Vespa velutina nigrithorax* in Korean environment

Moisture index	SM0	SM1	SM3	SM4		
	0.2	0.6	1.5	2.5		
Temperature index	DV0	DV1	DV2	DV3		
	10	18	26	31		
Light index	Indices are not applied in model					
Diapause index	Indices are not applied in model					
Cold stress	TTCS	THCS	DTCS	DHCS	TTCSA	THCSA
	0	0	10	-0.00014	0	0
Heat stress	TTHS	THHS	DTHS	DHHS		
	32	0.0035	0	0		
Dry stress	SMDS	HDS				
	0.15	-0.008				
Wet stress	SMWS	HWS				
	2.5	0.002				
Cold-dry stress	Indices are not applied in model					
Cold-wet stress	Indices are not applied in model					
Hot-dry stress	Indices are not applied in model					
Hot-wet stress	TTHW	MTHW	PHW			
	28	0.8	0.03			
DayDegree >DV0	DV0	DV3	MTS			
	10	31	7			
DayDegree >DVCS	DVCS	*DV4	MTS			
	10	100	7			
DayDegree >DVHS	DVHS	*DV4	MTS			
	31	100	7			
DayDegree per Generation	PDD					
	462					

고, 그 면적을 국토지리원 자료를 활용하여 추정하였다. 침입 후 시간(년도)에 따른 거리와 면적의 관계를 선형회귀를 이용하여 추정하였다. 분포가 확인된 시군은 ArcGIS 시스템을 활용하여 지도화하였다.

CLIMEX 모델 이용 분포 적합성 예측

호주 CSIRO에서 개발된 CLIMEX 모형을 이용하여 등검은말벌의 국내 분포를 예측하였다. CLIMEX 모의실험에 필요한 기본 자료는 생물정보와 기상정보이다. 모형 모의를 위한 등검은말벌의 생물자료는 별도로 추정된 바 없다. 대신, 등검은말벌의 기초 생태가 땅벌류와 일부 유사하므로, 땅벌류(*Vespa vulgaris* 또는 *Vespa germanica*)의 CLIMEX 기본 모수에 등검은말벌의 기후 연관(climate-matching) 연구결과(Perrard *et al.*, 2009) 등을 보정하였으며, 이는 Ibanez-Justicia and Loomans(2012)가 제시한 바 있다(Table 1). 그러나 본 연구에서는 다양한 모의결과를

바탕으로, Hot-wet stress 변수를 재조정하여, 국내 기후조건에 적합시켰다.

예측에 필요한 기상자료는 기상청 기상자료개방포털(<http://data.kma.go.kr>)에서 수집한 2000년, 2012년 일기상자료(최고기온, 최저기온, 강수량, 평균 상대습도)를 월별 평균하여 70개 관측지점별로 구축하였다(Park *et al.*, 2014). 미래예측을 위한 기후예측 자료는 기상청 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)에서 제공하는 12.5km 격자의 RCP8.5 시나리오 월별 기후자료를 현재와 동일한 70개 관측지점별로 추출하였다. 추출된 기상자료는 2050년과 2080년 두 기간을 대상으로 하였다. CLIMEX 모형은 관측지점의 위치정보를 기후자료와 구분하여 입력하게 되어있으므로 관측지점의 위도, 경도 및 고도를 입력하였으며(Table 2), 추출된 기상자료를 이용하여 기후자료의 구축을 위해 CLIMEX가 필요로 하는 월 평균, 최저, 최고 기온, 강수량, 오전 9시 및 3시의 상대습도를 준비하였

Table 2. Geographical information of simulated locations in Korea

Location	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Location	Latitude	Longitude	Elevation (m)
Sokcho	N38°15'00"	E128°34'12"	17.79	Chungnyeong	N36°13'12"	E128°00'00"	242.53
Cheorwon	N38°09'00"	E127°18'36"	154.22	Gumi	N36°07'48"	E128°19'12"	47.86
Inje	N38°03'36"	E128°10'12"	198.60	Geumsan	N36°06'00"	E127°28'48"	171.26
Chuncheon	N37°54'00"	E127°44'24"	76.82	Pohang	N36°01'48"	E129°22'48"	1.88
Dongducheon	N37°54'00"	E127°03'36"	112.49	Gunsan	N35°59'24"	E126°42'36"	25.57
Gangneung	N37°45'00"	E128°53'24"	25.91	Yeongcheon	N35°58'12"	E128°57'00"	94.10
Ganghwa	N37°42'00"	E126°27'00"	45.65	Daegu	N35°52'48"	E128°37'12"	57.64
Daegwallyeong	N37°40'48"	E128°45'36"	842.52	Jeonju	N35°49'12"	E127°09'36"	53.48
Hongcheon	N37°40'48"	E127°52'48"	140.59	Buan	N35°43'48"	E126°43'12"	10.68
Seoul	N37°34'12"	E126°58'12"	86.02	Geochang	N35°40'12"	E127°54'36"	220.88
Donghae	N37°30'00"	E129°07'48"	39.60	Jangsu	N35°39'00"	E127°31'12"	407.01
Yangpyeong	N37°29'24"	E127°30'00"	47.01	Imsil	N35°36'36"	E127°17'24"	246.85
Ulleungdo	N37°28'48"	E130°54'00"	221.00	Ulsan	N35°33'36"	E129°19'12"	34.69
Incheon	N37°28'12"	E126°37'48"	68.85	hapcheon	N35°33'36"	E128°10'12"	32.66
Wonju	N37°19'48"	E127°57'00"	150.00	Jeongeup	N35°33'36"	E126°52'12"	44.11
Suwon	N37°16'12"	E126°59'24"	33.58	Miryang	N35°29'24"	E128°45'00"	12.60
Icheon	N37°15'36"	E127°29'24"	77.79	Sancheong	N35°24'36"	E127°52'48"	138.5
Yeongwol	N37°10'48"	E128°27'36"	239.79	Namwon	N35°24'00"	E127°20'24"	89.70
Taebaek	N37°10'12"	E128°59'24"	713.45	Jinju	N35°12'36"	E128°07'12"	21.32
Jecheon	N37°09'36"	E128°12'00"	263.21	Masan	N35°11'24"	E128°34'12"	12.50
Uljin	N36°59'24"	E129°25'12"	49.42	Gwangju	N35°10'12"	E126°53'24"	70.53
Chungju	N36°58'12"	E127°57'00"	113.10	Busan	N35°06'00"	E129°01'48"	69.23
Bonghwa	N36°56'24"	E128°55'12"	321.52	Geoje	N34°53'24"	E128°36'36"	45.27
Yeongju	N36°52'12"	E128°31'12"	210.21	Tongyeong	N34°50'24"	E128°26'24"	31.70
Cheonan	N36°46'48"	E127°07'12"	24.89	Namhae	N34°48'36"	E127°55'48"	44.41
Seosan	N36°46'12"	E126°30'00"	25.93	Mokpo	N34°48'36"	E126°22'48"	37.88
Cheongju	N36°38'24"	E127°26'24"	57.36	Yeosu	N34°44'24"	E127°44'24"	66.05
Mungyeong	N36°37'12"	E128°09'00"	170.36	Jangheung	N34°41'24"	E126°55'12"	45.22
Andong	N36°34'12"	E128°42'36"	139.39	Heuksando	N34°40'48"	E125°27'00"	73.80
Yeongdeok	N36°31'48"	E129°24'36"	41.23	Goheung	N34°37'12"	E127°16'48"	53.27
Boeun	N36°28'48"	E127°44'24"	174.10	Haenam	N34°33'00"	E126°34'12"	13.74
Daejeon	N36°22'12"	E127°22'12"	68.28	Wando	N34°23'24"	E126°42'00"	34.87
Uiseong	N36°21'00"	E128°41'24"	81.09	Jeju	N33°30'36"	E126°31'48"	19.97
Boryeong	N36°19'12"	E126°33'36"	15.29	Gosan	N33°16'48"	E126°10'12"	71.70
Buyeo	N36°16'12"	E126°55'12"	11.35	Seogwipo	N33°14'24"	E126°34'12"	50.47

다. 기상청 자료의 경우 평균 상대습도가 제공되지만, 오전과 오후 상대습도를 따로 제공하지 않으므로, 기상청 자료를 오전 9시 상대습도로 하여, 오후 3시의 상대습도는 CLIMEX 모형 내부처리과정을 통해 오전 9시 상대습도의 85%로 계산하여 입력하였다 (Sutherst *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2014). CLIMEX 모형 모의실험결과 도출되는 EI(Ecoclimate index) 값은 기상 관측자료가 입력된 지점의 값으로 나오므로, ArcGIS의 Inverse Distance Weighted(IDW) 방법을 이용하여 내삽을 통해 지도화하였다(Park *et al.*, 2014). 또한 현장

조사 등에서 등검은말벌의 발생된 지역을 분포경과 년수로 단순가층치를 두어, 추정된 EI값과 회귀분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

등검은말벌 분포 지역의 변화

등검은말벌은 2003년 국내 침입 이후 2006년 울산 4개 지역에서 발견되기 시작했다. 국내 최초 발견은 부

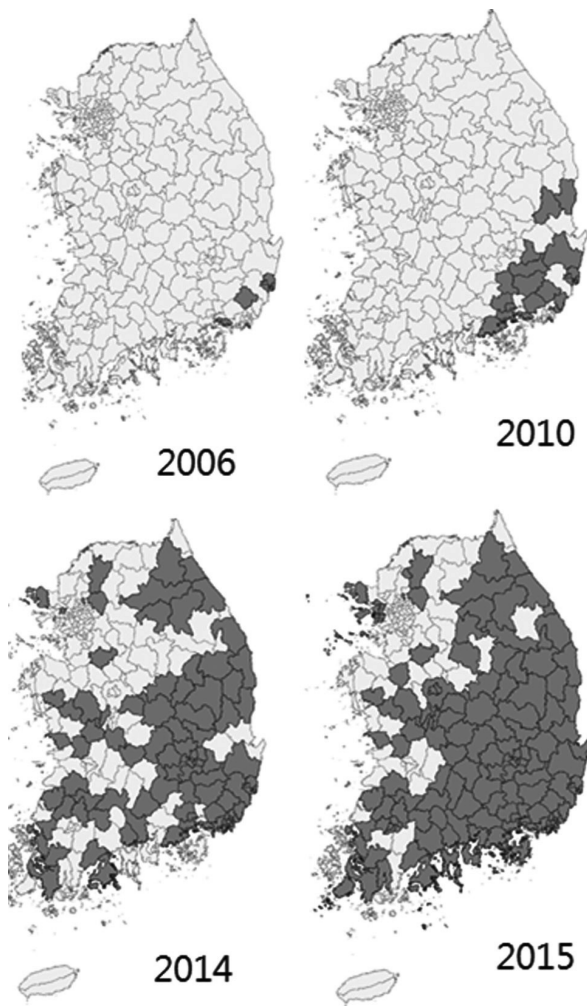


Fig. 1. Temporal change of geographical distribution of the invasive hornet, *Vespa velutina nigrithorax* in Korea.

산 영도 봉래산에서 2003년에 채집된 개체들이며 (Kim *et al.*, 2006), 2008년까지 부산지역을 중심으로 해운대, 동래, 기장, 김해, 밀양, 울산 등에서 출몰이 확인되었다(Jung *et al.*, 2008). 2008년에는 밀양 등 18개, 2011년 29개 시군으로 분포가 넓어졌으나, 백두대간 동부지역 또는 남부 지역에 국한되어 발생하였다. 그러다가 2014년 서울 경기 및 충청 일부 지역을 제외한 전국 103개 시군으로 확대되었다가 2015년에는 155개 시군으로 확대되었다. 최초 침입지인 부산 영도에서 직선거리 300km가 넘는 인천시까지 확산하였다 (Fig. 1). 실질적으로 구체 자료는 부족하지만 2010년에 이미 대구 및 경북 남부 일대까지, 2014년에는 경남북, 전남 남부는 모두 확인되었다는 의견도 있다

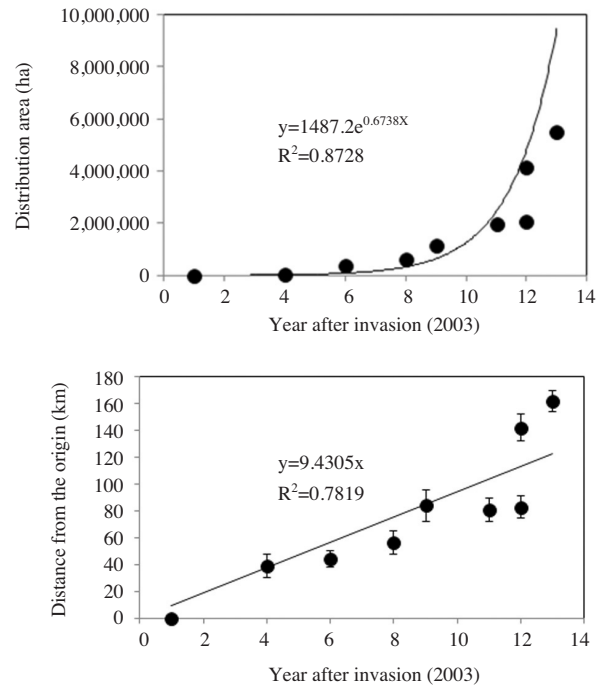


Fig. 2. Regression relationship between year after invasion and distribution area (upper) or distance traveled (lower) by *Vespa velutina nigrithorax* after invasion into Korea since 2003. Error bars indicate the standard error.

(최문보, 개인의견). 초기 확산은 해안가와 도로를 통해 이루어진 것으로 보인다. 국내에는 이미 다양한 종류의 말벌들이 분포하고 있으며, 특히 산림생태계 내에서는 장수말벌을 중심으로 한 말벌류의 먹이사슬이 안정되어 있다(Kim *et al.*, 2006; Jung *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2012). 따라서 외래침입 말벌인 등검은말벌의 산림 깊숙이 침입하거나, 백두대간의 산림지역을 통과하는 데 상당한 기간이 소요된다. 이는 등검은말벌이 주로 주거지나 산기슭을 중심으로 등지를 건설하고 먹이활동을 하며, 밀도가 꾸준히 증가함에 따라 주민들에게 쉽게 노출되며, 소방 활동의 주 대상이 되고 있음이 반증한다고 볼 수 있다. 또한 토착종중에는 털보말벌, 좀말벌 등과 생태적 지위가 중첩될 수 있고 경쟁관계가 형성될 소지가 높다는 보고와도 연관이 있다(Choi *et al.*, 2012).

등검은말벌의 분포 면적은 지수함수적으로 증가하였다. 분포 시군의 면적은 침입 9년차까지만 해도 100만ha 내외이었으나, 그 후 3년 사이에 분포 면적은 5배 늘었다(Fig. 2). 침입지인 부산 영도구에서부터 현

Table 3. Ecoclimatic indices from CLIMEX modeling for *Vespa velutina* in some selected locations Korea based on the past and future weather conditions. Future weather conditions were simulated based on RCP8.5 scenario

Location	Past weather		Future weather		Location	Past weather		Future weather	
	2000	2012	2050	2080		2000	2012	2050	2080
Andong	3	17	17	19	Inje	3	12	13	19
Boeun	7	15	18	19	Jangheung	6	20	21	28
Bonghwa	7	13	13	19	Jangsu	13	17	16	23
Boryeong	8	18	30	33	Jecheon	6	14	13	19
Buan	6	21	24	29	Jeju	11	27	34	50
Busan	17	25	31	39	Jeongeup	5	21	19	23
Buyeo	0	18	18	20	Jeonju	1	20	17	20
Cheonan	8	18	17	19	Jinju	0	22	16	25
Cheongju	6	17	18	18	Masan	7	21	21	26
Cheorwon	3	13	15	17	Miryang	0	21	18	21
Chuncheon	0	13	14	18	Mokpo	11	23	36	44
Chungju	2	18	16	18	Mungyeong	1	18	16	20
Chupungnyeong	4	16	16	20	Namhae	1	22	21	28
Daegu	2	19	16	19	Namwon	3	19	14	21
Daegwallyeong	12	4	8	17	Pohang	0	24	22	24
Daejeon	7	18	18	19	Sancheong	0	18	15	26
Dongducheon	1	14	15	17	Seogwipo	30	29	43	57
Donghae	6	17	22	20	Seosan	8	16	26	36
Ganghwa	7	13	22	33	Seoul	3	16	17	17
Gangneung	0	8	12	17	Sokcho	5	8	12	18
Geochang	4	17	15	23	Suwon	4	18	17	21
Geoje	14	22	30	37	Taebaek	8	4	7	18
Geumsan	6	18	17	20	Tongyeong	18	25	34	43
Goheung	7	25	30	39	Uiseong	0	17	17	19
Gosan	27	27	45	60	Uljin	6	17	20	24
Gumi	0	18	18	20	Ulleungdo	16	25	40	53
Gunsan	11	18	29	33	Ulsan	1	22	22	28
Gwangju	4	18	15	22	Wando	14	19	22	31
Haenam	7	21	27	35	Wonju	2	15	15	17
hapcheon	0	21	16	23	Yangpyeong	0	15	15	17
Heuksando	18	22	41	53	Yeongcheon	0	21	17	22
Hongcheon	1	14	14	18	Yeongdeok	6	18	21	25
Icheon	3	18	15	17	Yeongju	0	15	15	21
Imsil	8	18	16	22	Yeongwol	3	14	14	18
Incheon	3	14	22	33	Yeosu	14	23	28	37

분포지역까지의 거리는 매년 9.4km씩 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 그리고 년 최대 확산거리는 14-28.7km/yr로 추정되었다. Jung(2012)는 초기 자료를 바탕으로 등검은말벌의 국내 확산계수는 12.4km/yr로 프랑스에서의 67.3km/yr보다 느리지만, 향후 확산의 속도는 더 빨라질 것으로 예측한 바 있다. 본 연구의 결과는 등검은말벌이 개체군 확산은 침입초기와 비교하여 더디어지지 않았으며, 오히려 최근에 그 속도

가 빨라짐을 볼 수 있다. 외래에서 생물이 침입하면, 일정 정도의 잠복기를 거치면서 현지 환경에 적응하고 정착하게 된다. 그 후 개체군의 크기가 커지면서 수평적 확대 즉 분포 확대가 이루어진다. 분포 확대는 초기 빠른 속도로 진행되나, 일정 기간이 지나면서 안정화 단계로 접어든다(Kiritani and Yamamura, 2003). 그러나 등검은말벌의 확산은 현재 진행 중인 상태이다. 생물의 확산은 개체군 크기의 증가의 결과이기도

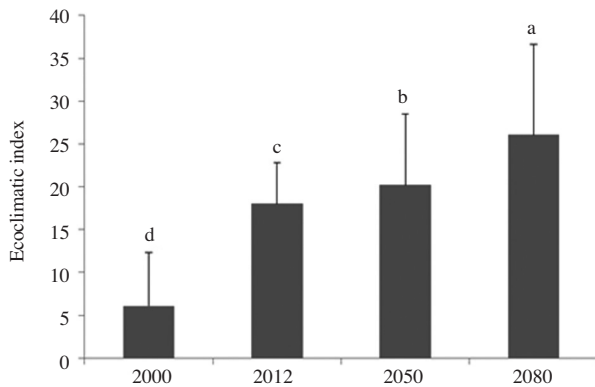


Fig. 3. Change of ecoclimatic index (EI) estimated by CLIMEX modeling using the past and future weather data. Future weather data was simulated based on RCP 8.5 climate change scenario. Error bars indicate the standard deviation of the simulated variables.

하다. 즉 등검은말벌이 지속적으로 확산된다는 것은 개체군 밀도가 높아지고 번식력이 유지되고 있다는 것이다. 최근의 기후변화는 따뜻한 겨울로 인해 말벌 월동 성공률을 높여주고 있으며, 장마철의 감소 및 무더운 여름 날씨는 말벌류의 빠른 번식을 가능케 한다. 등검은말벌의 주 먹이는 꿀벌이다(Abrol, 1994; Tan *et al.*, 2007). 국내의 높은 양봉꿀벌의 봉군밀도는 등검은말벌에게 충분한 양분을 공급하고 있는 셈이다 (Jung and Cho, 2015).

등검은말벌 분포 적합성 예측

CLIMEX 시뮬레이션의 지점별 결과는 Table 3으로 나타내었다. 2000년과 2012년 EI 추정치는 실측기상 자료를 바탕으로 한 것으로, 2000년에는 다수의 “0” 값이 나타나지만, 2012년에는 추정치가 증가하는 것으로 보인다. RCP8.5 기반 미래기후상황에서 시뮬레이션 결과는 2050년 평균 20.2, 2080년 26.1로 뚜렷하게 증가하였음을 볼 수 있다(Fig. 3, 4). CLIMEX 시뮬레이션의 경우 대체로 EI값이 10 이상이면 유의미하게 생물의 정착이 이루어질 수 있을 것으로 판단한다. 2000년에는 전체 시뮬레이션한 70개 지역 중 6곳, 8.5%가 분포가능역으로 추정되었으나, 2012년 이후에는 74%가, 그리고 2080년대에는 전 조사지역이 분포가능역임을 보여줌으로써, 우리나라 전역이 등검

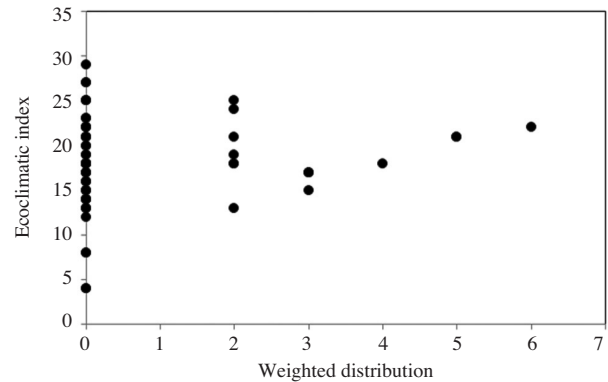


Fig. 4. Relationship between weighted distribution values of *Vespa velutina nigrithorax* and predicted possible establishment (ecoclimatic index) simulated in 2012 in Korea. Regression analysis showed no significant relationship ($P > 0.05$, $R^2 = 0.03$).

은말벌의 서식환경이 될 수 있다는 전망이다. 이는 지도에서도 뚜렷하다(Fig. 5). 2000년에는 등검은말벌의 서식가능지역은 부산 일부에 국한되었으나, 2012년 시뮬레이션 결과는 위도가 낮은 남해안을 비롯한 해안가를 통한 분포확대가 가능할 것으로 제시하였다. 실제 등검은말벌의 분포 확대 과정에서, 부산지역에서 울산, 경주, 영덕, 울진으로 향하는 동해안축과 밀양, 창원, 진주를 거쳐 구례군으로 향하는 남해안축이 두드러지게 나타났던 점은 본 연구 결과와 유사점을 보인다. 비슷한 방식으로 Maxent 모형을 이용하여 Villemante *et al.*(2011)은 유럽과 타대륙의 침입위험을 예측한바 있으며, 그 접근법과 결과는 본 연구방식과 유사하다.

본 연구에 사용한 CLIMEX 모형 계수들은 기본적으로는 한반도가 속한 온대지역 기본 제공 값인 Temperate template를 사용하였으며, 실제 분포지역의 온도, 습도조건 및 생물적 특성에 맞추어 그 값을 조정하였다(Sutherst *et al.*, 2007; Table 1). 조정하는 방법으로는 현재 확인된 등검은말벌의 분포지역과 현재 온도조건상 시뮬레이션 결과를 비교하면서 초기값을 조금씩 조절하는 방법을 이용하였다. 특히 대상 생물의 분포를 제어하는 인자인 Stress 값에 온대지역에서 잘 사용하지 않는 Hot-wet stress를 모형에 포함시켰는데, 이는 말벌의 분포를 주로 결정하는 말벌의 비행이 공기중 습도와 강우에 제한되기 때문이며, 등검은

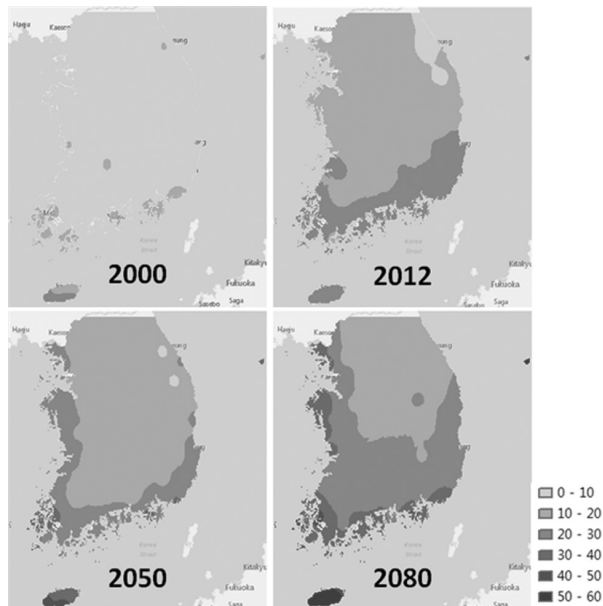


Fig. 5. Simulated geographic distribution of *Vespa velutina nigrithorax* in South Korea using CLIMEX model with past weather data (2000 and 2012) and RCP8.5 climate change simulated weather data (2050 and 2080). Ecoclimatic indices (EIs) with 12.5km resolution were interpolated raster surface, using an inverse distance weighted (IDW) technique (Spatial Analyst) in ArcGIS software, which indicate the suitability of a location for *V. velutina*.

말벌의 분포제한조건(Stress)을 세밀화 하여 최적의 분포 적합도를 구하기 위해 여름철 고온다습한 상황에서 제한조건인 Hot-wet stress를 추가로 사용하였다. Light index는 식물종에서 사용하고, 겨울철 월동이 휴면형태가 아니므로 Diapause index 역시 사용을 하지 않았으며, 복합제한조건 중 고온다습한 상황 이외의 조건은 말벌의 생물적 특징과 한반도 기후의 특징을 감안하여 모형에서 제외시켰다(Sutherst *et al.*, 2007; Table 1).

대개의 외래 생물은 다른 생태계로의 침입 이후 잠복기를 가지면서 현지 적응, 생존과 번식을 이어가면서 국부적으로 정착하게 된다. 침입이 이루어졌다고 해도 정착에 이르는 종은 대개 10% 내외이다. 정착 이후 개체군이 팽창하고 확산되다가 어느 정도 생태계 내 생태적 지위를 획득하게 되면 안정화된다(Ruiz and Carlton, 2003). 정착 개체군 등 일부(약 10%)는 개체군 확장 과정에 밀도가 부분적으로 높아지면서 사회/경제적 문제를 야기하기도 하고, 심각한 해충화

경향도 보이게 된다(10-10 rule, Williamson, 1996).

등검은말벌은 이미 국내 침입 이후 확산과정에서 양봉산업에 막대한 피해를 주고 있을 뿐 아니라(Jung, 2012; Choi *et al.*, 2015), 도심지 출몰로 인해 인명사고도 발생하고 있다. 그러나 등검은말벌의 개체군 증가와 확산은 아직 안정기에 이르지 않은 것으로 보인다. Fig. 5는 현재 등검은말벌이 분포하는 지역에 가중치를 부여한 점수와 CLIMEX 시뮬레이션을 통해 추정된 2012년 정착가능성(EI 값)간의 상관관계를 나타내며, 그 결과 의미있는 상관관계가 보이지 않는다. 즉 EI값이 20보다 높은 지역, 즉 등검은말벌 분포 가능지역임에도 불구하고 아직 등검은말벌이 분포하지 않고 있으며, 이는 공간적으로 등검은말벌이 없는 패치가 존재한다는 것을 나타낸다. CLIMEX결과는 지리적으로 대상생물의 생리적 존재 가능 여부를 보여주고 있으므로, 이러한 결과는 EI값이 높은 대상지역으로 이동을 못하던가, 대상지역에 봉군밀도가 없거나 충분하지 않을 가능성을 배제할 수 없으며, 향후 등검은말벌의 이동에 따라 분포가능한 지역이 늘어날 수 있다는 것을 나타낸다.

지금까지의 논의는 등검은말벌의 분포가능한 기상환경의 범위에 국한되었다. 향후 등검은말벌의 국내 생태계 내 지위 점유 및 안정화 과정에서 다양한 생물적 상호작용의 영향을 받을 가능성이 있다. 특히 국내 서식하는 장수말벌, 꼬마장수말벌, 말벌 등과의 서식처간 경쟁, 좀말벌, 털보말벌 등과의 서식처 내의 경쟁(Jung *et al.*, 2007a,b) 및 각종 세균, 곰팡이 등의 미생물적 길항인자 및 포식자 등의 관계는 등검은말벌의 국내 생태계 내 정착에 영향을 미칠 수 있다(Jung *et al.*, 2008). 말벌과의 생물 중 땅벌류는 다른 생태계 침입 사례가 보고되곤 하지만 *Vespa*속에 속하는 말벌의 예는 흔치 않다(Shaw and Weidhaas, 1959; Beggs, 2011; Beggs *et al.*, 2011). 등검은말벌은 특이한 사례에 속하며, 2003~2004년에 한국과 프랑스에 침입하였다(Jung *et al.*, 2008; Villemante *et al.*, 2008). 이 두 개체군은 모두 중국 저장성 개체군과 유전형이 가장 비슷하고, 아마도 다중교미한 여왕벌 한 마리에 의해서 개체군이 시작되었을 것으로 추정하고 있다(Arca *et al.*, 2015). 그럼에도 불구하고 등검은말벌은 새로운 환경에 적응

하는 다양한 기재를 가지고 있다. 높은 곳에 둥지를 만들어 포식자를 피하고, 봉군 증식 속도가 빨라 개체군 크기가 크기 때문에 다양한 경쟁에서 수적 우위를 차지할 수 있고, 일주가 활동기간이 길며, 늦가을까지 활동하기 때문에 토종 말벌들이 활동하지 않는 기간을 확보할 수 있다(Jung *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2012; Jung, 2012). 또한 사회성 생물로써, 집단 내 행동의 가변성, 집단의 내외부 환경조절 능력, 분화된 생식계급으로 인해 단일 봉군만으로도 집단 형성 가능성 등은 침입종의 생존 가능성을 높여주는 주요 특징이 될 수 있다(Mack *et al.*, 2000; Beggs, 2001). 등검은말벌은 경제적인 면 뿐 아니라 사회적으로도 매우 중요한 이슈를 제공하고 있다. 본 연구에서는 개체군 확산 속도에 관한 정보를 제공하고, 이 말벌의 분포에 적합한 기상환경 요인을 분석하여, 미래 기후상황에서 등검은말벌의 분포지역을 추정하여 지도화하였다. 또한 등검은말벌의 분포확산은 당분간 꾸준히 지속될 것으로 전망하는 바, 지속적인 분포와 계절상 모니터링은 물론, 사회경제적 피해 방지 방안, 생태계 영향 평가 방안에 대한 새로운 대책이 연구 개발되어야 할 것으로 판단된다.

적 요

등검은말벌, *Vespa velutina nigrithorax*은 2003년 부산 영도구에 침입한 이래, 매년 평균 9.4km씩 분포면적을 확대해 가고 있다. 현재 북쪽으로 서울경기권과 강원일부지방까지 분포 범위를 확대하였으며, 전체 서식가능시군 면적의 70% 정도를 점유하였다. CLIMEX 모델을 기반으로 분포가능역을 시뮬레이션을 통해 분포가능 지역을 지도화하여 제시하였다. 2000년에는 부산경남 일부에서만 생존 가능하였으나, 2012년에는 경남과 일부 경북지역이 분포가능하다고 모의되었으며, 미래기후를 기반으로 추정한 결과, 2050년에는 모의 지역의 95%가 분포 가능함을 보였다. 현재 분포지의 분포지속가중치를 부여한 값과 모형이 제시한 분포가능지수(EI)와는 아직 상관관계를 보이지 않았다. 즉 앞으로 지속적 서식지역의 점유가 일어날 것으로 파악된다. 이에 지속적인 분포와 계

절상 모니터링은 물론, 사회경제적 피해 방지 방안, 생태계 영향 평가 방안에 대한 새로운 대책이 연구 개발되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 농촌진흥청 아젠다 연구과제(PJ01085102)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

인 용 문 헌

- Abrol, D. P. 1994. Ecology, behaviour and management of social wasp, *Vespa velutina* Smith (Hymenoptera: Vespidae), attacking honeybee colonies. Korean J. Apic. 9: 5-10.
- Andow, D. A., P. M. Kareiva, S. A. Levin and A. Okubo. 1990. Spread of invading organisms. Landscape Ecology 4: 177-188.
- Arca, M., F. Mougel, T. Guillemaud, S. Dupas, Q. Rome, A. Perrard, F. Muller, A. Fossoud, C. Capdevielle-Dulac, M. Torres-Leguizamon, X.X. Chen, J.L. Tan, C. Jung, C. Villemant, G. Arnold, and J.F. Silvain. 2015. Reconstructing the invasion and the demographic history of the yellow-legged hornet, *Vespa velutina*, in Europe. Biol. Invasion 17: 2357-2371.
- Barbosa, F. G., F. Schneck and A.S. Melo. 2012. Use of ecological niche models to predict the distribution of invasive species: a scientometric analysis. Brazilian Journal of Biology. 72: 821-829.
- Beggs, J. R. 2001. The ecological consequences of social wasps (*Vespula* spp.) invading an ecosystem that has an abundant carbohydrate resource. Biol. Conservation, 99: 17-28.
- Beggs J. R., E. G. Brockerhoff, J. C. Corley, M. Kenis, M. Masciocchi, F. Muller, Q. Rome and C. Villemant. 2011. Ecological effects and management of invasive alien Vespidae. Biocontrol, 56: 505-526.
- Choi, M. B., S. J. Martin and J. W. Lee. 2012. Distribution, spread and impact of the invasive hornet *Vespa velutina* in South Korea. J. Asia-Pac. Entomol. 15: 473-477.
- Choi, M. B., K. K. Jeong and J. W. Lee. 2013. Checklist and Distribution of Korean Vespidae Revisited. Korean J. Appl. Entomol. 52: 85-91.
- Choi, Y. S., M. L. Lee, M. Y. Lee, H. K. Kim, M. Y. Yoon and A. R. Kang. 2015. Trapping of *Vespa velutina nigrithorax* Buysson (Hymenoptera: Vespidae) Queen Near Apiaries Honeybee Comb Extract in South Region of

- Korea. Korean J. Apic. 30: 281-285.
- Hill, J. K., H. M. Griffiths and C. D. Thomas. 2010. Climate change and evolutionary adaptations at species' range margins. *Annu. Rev. Entomol.*, 56: 143-159.
- Hoddle, M. S. 2004. The potential adventive geographic range of glassy-winged sharpshooter, *Homalodisca coagulata* and the grape pathogen *Xylella fastidiosa*: implications for California and other grape growing regions of the world. *Crop Protection*. 23: 691-699.
- Ibanez-Justicia, A. and A. JM. Loomans, 2012. Mapping the potential occurrence of an invasive species by using CLIMEX: case of the Asian hornet (*Vespa velutina nigrithorax*) in the Netherlands. In *Proceedings Netharlands Entomol. Soc. Mt. Amsterdam*.
- Jeong, S. Lee C. D. Kim, C. Lee and C. Jung. 2016. Questionnaire study on the overwintering success and pest management of honeybee and damage assessment of vespa hornets in Korea. *Korean J. Apic.* 31: 201-201.
- Jung, C., D. Kim, H. S. Lee and H. Baek. 2008. Some biological characteristics of a new honeybee pest, *Vespa velutina nigrithorax* Buysson 1905 (Hymenoptera: Vespidae). *Korean J. Apic.* 24: 61-65.
- Jung, C. 2012a. Spatial Expansion of an Invasive Hornet, *Vespa velutina nigrithorax* Buysson (Hymenoptera: Vespidae) in Korea. *Korean J. Apic.* 27: 87-93.
- Jung, C. 2012b. Initial state risk assessment of an invasive hornet, *Vespa velutina nigrithorax* Buysson (Hymenoptera: Vespidae) in Korea. *Korean J. Apic.* 27: 95-104.
- Jung, C. and S. K. Cho. 2015. Relationship between honeybee population and honey production in Korea: A historical trend analysis. *J. Apic.* 30: 7-12.
- Jung, C., M. S. Kang, D. Kim and H. S. Lee. 2007a. Vespidae wasps (Hymenoptera) occurring around apiaries in Andong, Korea I. Taxonomy and life history. *Korean J. Apic.* 22: 53-62.
- Jung, C., M. S. Kang and D. Kim. 2007b. Vespidae wasps (Hymenoptera) occurring around apiaries in Andong, Korea : II. Trap catches and seasonal dynamics. *Korean J. Apic.* 22: 63-70.
- Kim, J. K., M. B. Choi and T. Y. Moon. 2006. Occurrence of *Vespa velutina* Lapeletier from Korea, and a revised key for Korean *Vespa* species (Hymenoptera: Vespidae). *Entomological Research* 36: 112-115.
- Kiritani, K. and K. Yamamura. 2003. Exotic insects and their pathways for invasion. pp 44-67. In (eds) Ruiz, G.M. and J.T. Carlton. *Invasive species. Vectors and management strategies*. Island Press. Washington. USA.
- Kriticos, D. J., R. W. Sutherst, J. R. Brown, S. W. Adkins and G. F. Maywald. 2003. Climate change and the potential distribution of an invasive alien plant: *Acacia nilotica* ssp. *indica* in Australia. *Journal of Applied Ecology*. 40: 111-124.
- Lockwood, J. L., M. F. Hoopes and M.P. Marchetti. 2007. *Invasion ecology*. 2nd ed. Wiley-Blackwell. p. 444.
- Mack, R. N., D. Simberloff, W. M. Lonsdale, H. Evans, M. Clout and F. A. Bazzaz. 2000. Biotic invasions: Causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, 10: 689-710.
- Park, J., H. H. Mo, G. S. Lee, S. E. Lee, J. H. Lee and K. J. Cho. 2014. Predicting the potential geographic distribution of *Thrips palmi* in Korea, using the CLIMEX model. *Entomological Research*. 44: 47-57.
- Perrard, A., J. Haxaire, A. Rortais, and C. Villemant. 2009. Observations on the colony activity of the Asian hornet *Vespa velutina* Lapeletier 1836 (Hymenoptera: Vespidae: Vespinae) in France. *Ann. Soc. Entomol. Fr.* 45: 119-127.
- Ruiz, G. M. and J. T. Carlton. 2003. *Invasive species. Vectors and management strategies*. Island Press. Washington. USA pp. 518.
- Shabani, F., L. Kumar and A. Esmaeili. 2013. Use of CLIMEX, Land use and Topography to Refine Areas Suitable for Date Palm Cultivation in Spain under Climate Change Scenarios. *Journal of Earth Science and Climatic Change*. 4: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7617.1000145>.
- Shaw, F. and J. Weidhaas. 1956. Distribution and habits of the giant hornet in North America. *Journal of Economic Entomology*, 49: 275.
- Sim, H. S., M. Y. Lee, Y. S. Choi, H. G. Kim, I. P. Hong, S. O. Woo, K. H. Byeon and M. Y. Lee. 2014. Pattern of Emergence of *Vespa velutina nigrithorax* Buysson (Hymenoptera: Vespidae) on Spring in South Part of Korea. *Korean J. Apic.* 29: 353-358.
- Sutherst, R. W., G. F. Maywald and D. Kriticos. 2007. CLIMEX version 3 User's Guide, CSIRO, Australia.
- Tan, K. S. Radloff, J. J. Li, H. R. Hepburn, M. X. Yang, L. J. Zhang, and P. Neumann. 2007. Bee-hawking by the wasp, *Vespa velutina*, on the honeybees *Apis cerana* and *A. mellifera*. *Die Naturwissenschaften*, 94: 469-72.
- Vera, M. T., R. Rodriguez, D. F. Segura, J. L. Cladera and R. W. Sutherst. 2002. Potential geographical distribution of the mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae), with emphasis on Argentina and Australia. *Environmental Entomology*. 31: 1009-1022.
- Villemant, C., A. Perrard, Q. Rome, O. Gargominy, J. Haxaire, E. Darrouzet and A. Rortais. 2008. A new enemy of honeybee in Europe: the invasive Asian hornet *Vespa velutina*. In the *Proceeding of 10th International Congress of Zoology*. Paris, France.
- Villemant, C., M. Barbet-Massin, A. Perrard, F. Muller, O. Gargominy, F. Jiquet, and Q. Rome. 2011. Predicting the invasion risk by the alien bee-hawking yellow-legged hornet *Vespa velutina nigrithorax* across Europe and other continents with niche models. *Biol.*

-
- Conservation 144: 2142-2150.
- Wang, Y., G. W. Watson and R. Zhang. 2010. The potential distribution of an invasive mealybug *Phenacoccus solenopsis* and its threat to cotton in Asia. *Agricultural and Forest Entomology*. 12: 403-416.
- Williamson, M. 1996. *Biological invasions*. Chapman & Hall. London. pp. 244.