

Weed & Turfgrass Science was renamed from both formerly Korean Journal of Weed Science from Volume 32 (3), 2012, and formerly Korean Journal of Turfgrass Science from Volume 25 (1), 2011 and Asian Journal of Turfgrass Science from Volume 26 (2), 2012 which were launched by The Korean Society of Weed Science and The Turfgrass Society of Korea founded in 1981 and 1987, respectively.

생태계 교란식물 cordgrass (*Spartina* spp.)의 효과적인 관리방안 수립을 위한 고찰

김진석*

한국화학연구원 의약바이오연구본부 친환경신물질연구센터

A Research Review for Establishing Effective Management Practices of the Highly Invasive Cordgrass (*Spartina* spp.)

Jin-Seog Kim*

Research Center for Eco-Friendly New Materials, Bio & Drug Discovery Division, Korea Research Institute of
Chemical Technology, Daejeon 34114, Korea

ABSTRACT. Cordgrass (*Spartina* spp.) is recognized as a highly invasive plant in estuaries throughout the world because of remarkable versatility and resiliency, significant reproduction, strong adaptability, rapid spreading, and vigorous growth. In this review, therefore, to provide insights on the effective management practices, the previous research works were summarized and discussed. *Spartina* spp. is a perennial halophyte, warm-season (C4) grass that reproduces both sexually through seeds and asexually by rhizomes. Management strategies for cordgrass have included various physical, biological, and chemical controls. Herbicides are usually the most cost-effective means of control. Currently, glyphosate, imazapyr, fluzifop and haloxyfop have been practically used. To improve the control efficacy, a combination of two more than methods (example, mowing-spraying) is needed to be applied consistently every year for at least 3 to 4 years and to be sprayed with enough dry time (>4-6 hr) at an early growth stage (before flowering). Consistently repeated application of same herbicide have to be avoided to prevent an unexpected emergence of herbicide-resistant lines. On the other hand, *Spartina* spp. have many positive functions for agricultural and eco-engineering purposes. Thus, we have to give more intensive research for effectively managing advantages and disadvantages of *Spartina* plantations.

Key words: Cordgrass, Herbicide, Integrated management, Mowing, *Spartina* spp.

Received on September 02, 2016; Revised on September 06, 2016; Accepted on September 12, 2016

*Corresponding author: Phone) +82-42-860-7026, Fax) +82-42-861-4913; E-mail) jskim@kricr.re.kr

© 2016 The Korean Society of Weed Science and The Turfgrass Society of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

인류 삶의 질 향상과 환경보호 및 생물 자원화에 대한 관심이 증가됨에 따라 전 세계적으로 생물다양성 보전과 유지를 위한 노력이 매우 활발해 가고 있는 상황이다. OECD (2012)에 의하면 평균종풍부도(MSA, Mean Species Abundance)는 1970년부터 2010년까지 거의 11%가 감소되었고, 어떠한 관리 노력을 기울이지 않을 경우 2010년부터 2050년까지 약 10%가 더 감소할 것으로 전망하고 있다. 이러한 차원에서 우리나라의 경우도 생물다양성 보전과 유지를 위해

여러 실천방안을 강구하고 있는데, 그의 일환으로 최근 생태계 “위해우려종”을 기존 55종에서 98종으로 확대 지정하였고(환경부고시 제2016-113호), “생태계교란 생물종”을 18종에서 20종으로 지정함(Table 1, 환경부고시 제2016-112호) 동시에 이들의 모니터링, 제거활동, 생물다양성 위협 외래생물 관리 R&D 사업 추진 등 보다 체계적인 관리를 위해 노력을 기울이고 있다. 추가된 두 가지의 생태계 교란 생물종은 *Spartina*속의 외래식물인 갯줄풀(*Spartina alterniflora*, Smooth cordgrass)과 영국갯끈풀(*Spartina anglica*, Common cordgrass)이다.

Table 1. The list of noxious and exotic plants designated as ecosystem disturbing species in Korea (2016).

Korean name	Scientific name	English name	Classification	Life cycle	Propagators
돼지풀	<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	Ragweed	Broadleaves	Annual	Seed
단풍잎돼지풀	<i>Ambrosia trifida</i>	Great ragweed	Broadleaves	Annual	Seed
미국쑥부쟁이	<i>Aster pilosus</i>	White heath aster	Broadleaves	Perennial	Seed, Rhizome
서양등골나물	<i>Eupatorium rugosum</i>	White snakeroot	Broadleaves	Perennial	Seed, Rhizome
서양금혼초	<i>Hypochaeris radicata</i>	Spotted cats-ear	Broadleaves	Perennial	Seed, Rhizome
가시상추	<i>Lactuca scariola</i>	Prickly lettuce	Broadleaves	Biennial	Seed
물참새피	<i>Paspalum distichum</i>	Joint grass	Grasses	Perennial	Seed, Rhizome
털물참새피	<i>Paspalum distichum</i> var. <i>indutum</i>	Knotgrass	Grasses	Perennial	Seed, Rhizome
애기수영	<i>Rumex acetosella</i>	Sheep sorrel	Broadleaves	Perennial	Seed, Rhizome
가시박	<i>Sicyos angulatus</i>	Bur cucumber	Broadleaves	Annual	Seed
도깨비가지	<i>Solanum carolinense</i>	Horse nettle	Broadleaves	Perennial	Seed, Rhizome
양미역취	<i>Solidago altissima</i>	Tall golden-rod	Broadleaves	Perennial	Seed, Rhizome
갯줄풀	<i>Spartina alterniflora</i>	Smooth cordgrass	Grasses	Perennial	Seed, Rhizome
영국갯끈풀	<i>Spartina anglica</i>	Common cordgrass	Grasses	Perennial	Seed, Rhizome

영국갯끈풀의 국내 서식은 2015년도에 처음으로 공식 보고되었는데(Kim et al., 2015) 실제로는 2012년 강화도 갯벌에서 확인되었다고 하며(Kim et al., 2015), 현재 분포가 130 m² 정도로 확대되었다(국민일보, 2016. 06. 14). 갯줄풀은 전남 진도에서 발견되어 현재 5,700 m² 정도 퍼졌다고 하며(국민일보, 2016. 06. 14), 이 두 외래종은 중국에서 해류를 따라 자연적으로 유입된 것으로 추정된다(헤럴드경제, 2016. 06. 18).

*Spartina*속 식물은 아메리카, 북아프리카 및 유럽의 대서양 연안이 원산지로 17종이 알려져 있으며(Hedge et al., 2003; Peterson et al., 2007), 이들 중 몇 종(*S. anglica*, *S. alterniflora*, *S. densiflora* 등)은 빠르게 성장 번식하면서 주변의 식생을 파괴하고 생물다양성을 감소시키며 염습지의 기능을 상실시키는 위해성이 인지되어 전세계적으로 생태환경 교란 침입성 식물로 간주하게 되었고, 현재 미국, 영국, 호주, 중국 등에서는 이를 방제하고자 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 본 식물의 생태위해성이 인식되기 전에 미국, 영국, 네덜란드, 프랑스, 중국, 뉴질랜드, 호주 등에서는 영국갯끈풀을 가축사료, 간척지 식물, 제방 안정화, 해안선 침식 방지 등의 목적으로 일부러 도입시킨 적이 있었다고 한다(Ranwell, 1967). 미국의 경우, 1940년대까지는 거의 주목을 받지 못하다가 1979년 *Spartina*의 위험성이 공식적으로 보고되어 1990년대 중반부터 이의 방제를 위한 활발한 연구를 진행하였다(Hedge et al., 2003; Dethier and Hacker, 2004). 중국의 경우, 갯줄풀과 영국갯끈풀을 농업 및 생태공학적 목적으로 각각 1979년 미국, 1963년 영국

및 덴마크로부터 처음 도입되어 사용하게 된 이후로 현재 북위 20-40도에 이르는 황해 연안 전체에 퍼져 있으며, 2007년경의 확산면적을 볼 때 영국갯끈풀 (<50 ha)보다는 갯줄풀(112,000 ha)이 월등히 높다고 한다(An et al., 2007). 그리고 갯줄풀은 중국에서 해마다 수백만 달러의 경제적 손실을 가져오는 것으로 알려진 외래식물 상위 16종에 속해 있기 때문에(Chen et al., 2004) 이를 제거하려는 노력을 적극적으로 기울이고 있다(An et al., 2007; Tian et al., 2009), 일본에서는 아직 정착되지 않은 것으로 보고되고 있으나(NIES, 2015) 특정 외래생물로 지정하여(MEJ, 2015) 특별 관리를 하고 있는 상황이다.

침입성 식물은 적응, 성장, 번식력이 상대적으로 우월한 특성을 지니고 있기 때문에 새로운 지역에 유입되어 적응 과정을 거치게 되면 우점화를 통해 기존 식생을 파괴하면서 여러 가지 환경문제를 일으킨다. 따라서 한동안 방치하게 되면 이를 제어하기 위한 사회적 비용이 기하급수적으로 증가하게 되므로(예, 국내에서의 가시박 발생 및 확산 문제), 발생초기에 신속히 근절시키는 것이 가장 바람직 할 것이다. 우리나라에 출현한 영국갯끈풀과 갯줄풀은 해안 침식 방지, 바이오매스 확보 등의 순기능도 있겠지만, 외국 사례를 통해서 볼 때 궁극적으로 국내 갯벌 생태계에 심각한 위협을 초래할 수 있다. 현재 보고된 자료에 의하면 국내 발생면적이 그다지 높은 수준은 아니기 때문에 경제적 방제의 골든타임을 놓친 것 같지는 않다(국민일보, 2016. 06. 14). 따라서 본 연구에서는 외국의 선행 연구사례를 잘 검토하여 보다 효율적인 관리대책(적극적인 제거방안 및

확산 방지)을 수립하고 이를 실행하는데 기초정보를 제공하고자 하였다.

*Spartina*속 식물의 생장 및 번식특성 (영국갯끈풀과 갯줄풀 위주)

식물학적 분류

포아과(Poaceae), *Spartina*속(Genus)에 속하는 화본과 C4식물로서 17종이 알려져 있다(Hedge et al., 2003; Peterson et al., 2007).

생육형

봄에 발아 또는 출아하고 여름에 개화하며 가을에 결실하는 여름형 식물로서 다년생이다. 염습지식물로서 생육 초기부터 완전 침수가 되는 상태임에도 생육과 번식이 왕성하다. 줄기와 잎을 통해 염분을 배출하는 염생식물이지만 고염분보다는 저염도의 기수(brackish water)지역 및 갯벌에서 보다 왕성한 생육을 한다.

번식특성

종자와 근경(rhizome)으로 번식한다. *Spartina*속 식물이 여러 지역으로 빠르게 확산되는 주된 이유가 이들 식물이 종자에 의한 유성생식과 분얼(tiller) 및 근경(rhizome)에 의한 무성번식 모두가 활발하기 때문이다(Daehler and Strong, 1994; Huang et al., 2007)(Table 2). 따라서 이들의 특성 이해는 *Spartina* 근절 및 확산방지 대책 수립에 필수적일 것이다.

o. 종자생산과 발아특성

침입식물이 어떤 지역의 확산에 영향을 미치는 가장 핵심적인 열쇠는 종자의 착륙율(seed set) 또는 종자번식(seed propagation) 능력이다(Daehler, 1998; Xiao et al., 2009). 영국갯끈풀과 갯줄풀은 종자로부터 발아되어 유묘(seedling)

가 정착한 이후 이듬해가 되면 새로운 이삭이 생긴다.

수분(pollination)은 바람에 의해 이루어지며 자가 및 타가수분 모두가 가능한데 타가수분(cross-pollination)에서 더 많은 종자가 맺는다고 한다(Dethier and Hacker, 2004). 개화는 대부분 6-9월에 일어나나, 11월의 늦은 시기에도 개화하는 것이 있는데 이들은 종자를 형성하지 못한다. 강화도 동막해변에서 발견된 영국갯끈풀의 경우 9월 중순에 개화한다고 한다(Kim et al., 2015). 따라서 *Spartina*의 효과적 관리를 위해서는 우선 개화 이전의 시기에 처리가 진행될 수 있도록 하여야 할 것이다.

종자 생산은 서식 위치 및 서식지 유형에 따라 차이가 있다. 미국 워싱턴주에서 보고한 영국갯끈풀의 평균종자생산수(No. 0.25 m⁻²)를 볼 때, 자갈지역(cobble beach) 175개, 고염도 늪지(high-salinity marshes) 200개, 저염도 늪지(low-salinity marshes) 320개, 갯벌(mudflats) 350개로서 갯벌지역에서 가장 많았다고 한다(Dethier and Hacker, 2004). 이는 갯벌 1 ha에서 1,400만개의 종자가 생산될 수 있음을 의미하며 종자생산량을 감소시키는 것이 *Spartina* 관리의 핵심이 되어야 할 것이다. 영국의 연구보고에서도 영국갯끈풀의 이삭 및 종자 생산수와 시기는 매우 다양하였다(Marks and Truscott, 1985; Mullins and Marks, 1987). 조간대의 성숙한 영국갯끈풀은 이삭수 발생이 많은 반면 소수의 임실율은 5%였으나 좀더 낮은 고도에 서식한 젊은 개체는 88%의 임실율을 보였다. 이는 여러 환경조건에 따라서 종자생산량이 다양하게 변할 수 있음을 의미한다.

종자는 바람과 해류를 따라 이동하는 것 같다. 대부분의 종자는 10일 이내에 물속에 가라앉아 차갑고 습기있는 상태에서 겨울을 지난 후 이듬해 발아한다. 죽은 식물체 더미에(wrack) 떨어져 이동하다가 이듬해 출현하기도 한다. 종자는 건조하거나 따뜻한 조건에 몇 주 이상 지나면 생명력을 잃는다(Goodman et al., 1969; Probert and Longley, 1989). Xiao et al. (2009)에 의하면 자연조건일지라도 종자

Table 2. Reproduction and dispersal potential of *Spartina* spp.

Species	Sexual or asexual production	References
<i>S. anglica</i>	- Number of seeds per m ² was 1,400 at site of mudflats in Washington.	Dethier and Hacker, 2004
<i>S. anglica</i>	- About 9,100,000 ramets were reproduced from one rhizome segment over three successive growth seasons.	An et al., 2007
<i>S. alterniflora</i>	- Number of seeds per m ² was 53,581±10,033 at middle intertidal zone in the Yantze estuary, China.	Xiao et al., 2009
<i>S. alterniflora</i>	- Number of spikeletes (seeds) per m ² was 20,000~30,000 at 32°N in China.	Liu et al., 2016
<i>S. alterniflora</i>	- Number of seeds per m ² was 83,638±11,852.3 at middle intertidal zone in the Yantze estuary, China.	Xiao et al., 2016
<i>S. alterniflora</i>	- The 312 rhizome fragments per m ² within the top 10 cm were produced by roto-tilling. - About 15,600 fragments might be distributed in the open water for every hectare.	Morgan and Sytsma, 2004

발아력이 1년 이상은 되지 않은 것으로 보고하였다. 그러나 냉장보관하면 적어도 4년은 생명력이 유지된다고 한다.

*Spartina*속 식물 종자의 휴면, 발아, 생존 및 확산 특성은 종 또는 생태형, 그리고 서식지 위치마다 다른 것 같다. Elsey-Quirk et al. (2009)의 보고에 의하면 갯줄풀 종자는 수집 후 바로 10-29%의 발아를 나타내었고 저온습윤처리 후에는 2% 이하로 감소되어 전파되는 동안 휴면이 없는 것으로 보고하였다. Li et al. (2010)는 갯줄풀 종자가 휴면의 징조없이 증류수에서 가장 높은 발아율을 나타내었고, pH 6.63-9.95의 저염도(≤ 200 mM)에서도 발아율에 큰 차이 없이 70% 이상 매우 양호하였다. 그러나 그 이상의 pH와 높은 염도에서는 발아가 감소되는 경향을 나타낸다고 하였다. Mooring et al. (1971)의 보고에 의하면 갯줄풀 종자는 보통온도의 건조에 견디기 어려워 종자활력은 22.2°C 건조저장장에서 40일 이내에 소실되었다. 휴면은 관찰되지 않았으며, 6°C 해수저장에서는 종자활력이 8개월간 유지되었다. 염도(NaCl)에 대한 발아반응에 있어서 발아한계 최고농도는 6-8%이었고, 성장반응은 0.5% NaCl용액에서 가장 좋았다. 이상의 보고들과는 상반되게 종자 휴면성이 존재하였다는 결과들도 있다. Plyler and Proseus (1996)의 보고에서는 상처리하는 *S. patens*과 갯줄풀 종자발아를 모두 촉진시켰다. 사전 저온처리(prechilling)는 *S. patens* 종자 휴면타파에 효과적이었지만 갯줄풀 종자에서는 그렇지 않았다. 이와 반대로 fusicoccin 처리는 갯줄풀 종자의 휴면타파에 효과적이었지만 *S. patens* 종자에서는 그렇지 않아 종간에 다른 반응을 보인다고 하였다. Biber and Caldwell (2008)의 보고에서는 갯줄풀 종자가 휴면이 있으며 4°C 암조건의 저온습윤 저장(stratification) 처리시 1개월째부터 발아되기 시작하여 4개월째 35% 정도로서 가장 높았다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 유묘의 생존은 2개월 저온습윤 저장에서 가장 높았다. Marks and Truscott (1985)의 연구에 의하면 영국갯끈풀 종자 발아가 5°C 저온 습윤조건의 60일 저장에 의해 촉진되었다. 그리고 고염도보다는 저염도 조건의 기수(brackish water)에서 발아가 잘 되었다. Wijte and Gallagher (1996)의 보고에서 갯줄풀 종자는 고염도(40 g NaCl L⁻¹)과 저산소함량(2.5와 5%) 조건에서 발아율이 감소되었다.

o. 근경(rhizome)의 발달 특성

줄기와 연결된 지하부 얇은 곳의 근경으로부터 다시 여러 개의 근경이 생겨서 옆으로 뻗거나, 지하 20 cm 이상 깊숙이 들어가며, 지면 위로 솟을 경우 새로운 지상부 줄기가 되면서 점차 원형 균락을 형성하고 이후 대형 균락으로 발달된다(Kim et al., 2015). 뿌리는 수염뿌리 모양이며 본 줄기의 지하부에서 방사상으로 촘촘하게 발생한다. 보

고에 의하면(An et al., 2007) 세 번의 연속성장기동안 영국 갯끈풀의 한 개 근경(rhizome)으로부터 9,100,000 개체(ramet)가 생산될 정도로 높은 영양생장율을 나타낸다고 하였다.

뿌리와 근경은 서로 영커 자라기 때문에 주변 침전물을 모으고 안정화 시킨다. 그리고 키가 크고 밀집한 줄기는 유속을 둔화시키고, 침전물을 엽초 아래에 쌓이게 하여 결국은 비식생지에 비해 침전물 축적을 증가시켜 갯벌 표고를 높이게 된다. 영국갯끈풀은 엽초에 특수한 통기조직(aerenchyma)이 발달되어 있어서 지상부 산소가 지하 근경(속이 비어 있음) 및 침전물 주변부로 공급되어 다른 식물에 비해 혐기조건에서도 상대적으로 건강하게 잘 산다. 그리고 지상부가 무성해지면 엽습지 표면에서의 증발이 둔화되어 비식생지보다는 염도가 낮게 된다. 이러한 낮은 염도와 증진된 산소공급 조건은 주변 식생에 대한 영국갯끈풀의 경합력을 높여주어 빠른 속도로 단일 초지화 되게 한다(Dethier and Hacker, 2004).

*Spartina*속 식물의 확산특성

*Spartina*속 식물이 여러 지역으로 빠르게 침입할 수 있는 주된 이유는 다량으로 생산된 번식체가 효율적으로 전파되어 새로운 환경에 적응을 잘하기 때문일 것이다. 따라서 이들의 특성 이해는 *Spartina* 근절 및 확산방지 대책 수립에 필요한 사항이다.

Liu (2016)의 연구에 의하면 갯줄풀 확산은 저위도보다는 고위도에서 더 빨라 북중국 및 한반도로의 확산이 향후 계속 진행될 것이라고 예측하였다. 그 이유는 갯줄풀의 초장(plant height), 화서당 소수(spikelet)의 수, 착립율(seed set) 변화 양상을 자생지역의 위도간 차이로(20-40°N) 조사해 보았을 때 특히 화서당 소수(spikelet)의 수와 착립율이 위도가 높을수록 증가되는 경향을 보였기 때문이다. 특히 착립율은 저위도에서는 10% 미만이었지만 고위도에서는 80% 이상으로서 현저한 차이를 보였고, 실제 포장에서의 유묘 밀도(seedling density)도 고위도에서 더 높았다.

동일지역이라 할지라도 식생위치에 따라 번식체 생산 및 확산 능력이 다른 것 같다. Xiao et al. (2009)의 연구보고에 의하면 낮은 고도(2.4-2.9 m, LIT) 또는 높은 고도(3.5-3.9 m, HIT)보다는 중간 고도(2.9-3.5 m, MIT)의 구간대에서 자라는 갯줄풀에서 종자생산량이 많았고, 종자의 충실도 및 활력도 상대적으로 높았다. 이들의 종자발아는 저온 습윤(4°C) 3개월 처리에 의해서 3.2%에서 9.9%로 증가되었다(Xiao et al., 2009). 종자의 부유시간(floatation time)은 3-13일 정도였는데 상대적으로 HIT와 MIT의 것이 높았고 종자는 2-6월까지 발아하는데 3-4월이 가장 많았으며, 종자의 활력 유지 시간은 1년을 넘기지 못하였다(Xiao et al.,

2009). 이들 결과를 종합해 볼 때, 전반적으로 MIT와 HIT 유래의 종자가 본 식물의 침입, 확산에 보다 크게 기여하는 것으로 조사되었다(Xiao et al., 2009).

Dethier and Hacker (2004)의 보고에서도, 영국갯끈풀 유묘의 생존과 확산에 서식지 유형(habitat type)과 위치가(intertidal height) 매우 중요함을 보여 주었다. 즉 갯벌(mudflats)에서 유묘생장이 가장 좋았고 다음은 저염도 습지(low-salinity marshes)였는데 고염도 습지와 자갈해안에서는 상대적으로 거의 생장이 일어나지 못했다. 각 서식지 유형중에서도 조간대 위치가 낮은 곳에서 유묘생장이 더 좋았다. 이들의 결과를 통해서 볼 때 갯벌, 저염도 습지의 중간 이하 위치, 고염도 습지의 수로가 종자발아 및 유묘의 급속한 확산에 이상적인 위치가 될 것이라고 하였다. 왜냐하면 이들의 장소는 축축한 침전물이 많고, 적당한 염도가 유지되며, 낮은 파도에너지에 기존 식물과의 경합력이 낮기 때문이다. 이는 향후 영국갯끈풀의 체계적 관리를 위해서 어디에 노력을 투입해야 하는지 결정하는데 도움이 될 것 같다.

갯줄풀은 상대적으로 높은 표현형 발현 탄력성(phenotypic plasticity)을 보유한다고 알려져 있다(Castillo et al., 2014; Liu et al., 2016). 즉 다양한 생태형 분화능력이 있음을 보여주기 때문에 향후 더 확산될 가능성이 높다. 그리고 *Spartina* 속 식물은 생존력이 강하여 씨앗 또는 베어낸 후 뿌리나 근경이 붙어있는 작은 식물 조각들이 조류를 타고 이동, 정착하여 확산되는 경우도 많다고 한다(Wu, 1999; Mateos-Naranjo et al., 2012). 침입후 자연조건에서의 확산 전파는 지역환경에 지배를 받는 것 같다. 예를 들면 영국에서는 두 종 중에 영국갯끈풀이 더 많이 확산되었지만 중국에서는 이와 반대로 갯줄풀의 확산이 우월하였다(An et al., 2007).

Morgan and Sytsma (2004)는 갯줄풀 유래 근경 절편체의 확산잠재력을 조사하였다. 지상부 10 cm 범위에서 로타리 작업(ROTO-tilling)을 했을 때 평균 3.7 cm 크기의 근경 절편체가 약 310개 m^{-2} 형성되었고, 이들 중 87%가 적어도 1개의 영양신초(마디줄기) (vegetative shoot, culm)를 보유했다. 이들 근경 절편체는 35 ppt (part per thousands) 염도처리에서는 8% 이하로 낮은 생존력을 보였지만 15 ppt 또는 담수처리에서는 각각 37.3, 87.5%의 생존력을 보였다. 이는 경우에 의해 한 지역에서의 침입 확산을 촉진시킬 수 있음을 의미한다. 만일 이들중 0.5%가 파도나 조수 활동에 의해 쓸려 나온다면 1 ha 면적에서 약 15,600개 절편들이 분산될 것이다. 신초가 붙어있지 않으면 대부분 근경 절편체는 살아남지 못하지만(Hedge et al., 2003; Morgan and Sytsma, 2004) 영양신초가 붙어있는 근경 절편들이 모여 일종의 식물체 덩치(wrack)를 이룬 다음 조류 또는 해류에 의해 이동될 수도 있는데 이의 가능성을 drift card

study 방법으로 조사한 결과, 4주 기간에 270 km까지 확산될 수 있음을 확인하였다. 이들의 결과는 종자보다는 미약하겠지만 영양번식체 절편에 의해서도 타 지역으로 충분히 확산될 수 있음을 보여준다.

한편 *Spartina*속 식물이 자연계에서 적응과 확산이 빠른 이유는 종간잡종(interspecific hybridization)이 활발하고 다중 배수체(polyploidy) 발생이 자주 일어나는 망상진화적(reticulate evolutionary) 과정을 잘 보유하고 있기 때문으로도 해석되고 있다(Ainouche et al., 2004). *Spartina*속 식물은 현재 2배체는 존재하지 않으며 기존 문헌에 보고된 주요 배수성 수준(ploidy level)은 4배체 ($2n = 40$), 6배체 ($2n = 60, 62$) 또는 12배체 ($2n = 10, 122, 14$)로서 기본 염색체 수는 $x = 10$ 개라고 알려져 있다(Marchant 1963, 1968). 그러나 이러한 의견에 의문을 제기하는 연구자도 있다. 즉 염색체 수가 보다 많고 유전적 다양성이 보다 높은 것이 (higher P and H) 필수적으로 보다 높은 적응력을 나타내는 것이 아니라 보다 높은 FST (higher population differentiation)가 갯줄풀의 침입능력과 관련이 있었다. 실제로 중국에서는 120-124개의 염색체를 가진 영국갯끈풀 보다는 62개의 염색체를 가진 갯줄풀의 확산이 월등하게 높다(An et al., 2004).

*Spartina*속 식물의 침입과 확산에 의한 피해

*Spartina*속 식물은 갈대(*Phragmites communis*)나 담수조건의 줄풀(*Zizania latifolia*) 생장에서처럼 지상부의 밀집 성장으로 피복이 빨라 주변식물의 성장을 쉽게 억제하면서 *Spartina*속 단일 종으로 초지화되어 갯벌 생태계 다양성에 심각한 영향을 준다(An et al., 2007). 한편 지하의 뿌리와 근경은 그물망처럼 촘촘히 연결되어 자라고 그 결합력이 매우 강해 토양을 단단히 고정시키는 데는 유용한 점도 있으나(Christiansen et al., 2000) 저서 생물 서식에는 부적합한 환경으로 바꾸며(Normile, 2004), 방대한 뿌리와 밀집한 줄기는 유속을 둔화시키고, 침전물을 가두어 갯벌 표고를 높여 갯벌의 본래 기능을 상실케 한다(Daehler and Strong, 1994; He et al., 2011). 이런 결과는 갯벌의 염생 식물인 지채(*Triglochin maritimum*) 및 칠면초(*Suaeda japonica*) 군락과 농게(*Uca arcuata*)와 같은 패류 군집을 몰아내 갯벌 고유의 생물 다양성이 줄어들면서 도요새(Scolopacidae) 등과 같은 갯벌에 의존하는 조류와 철새에 불리한 영향을 미치고, 인간의 갯벌 이용에도 문제를 일으키며, 갯벌의 위락적 기능도 저하시키게 된다(Kim et al., 2015). 그리고 흙속에 사는 동물들(infauna)의 먹이사슬 변화에 따른 많은 생물들의 피해 또는 군집변화가 일어난다고 한다(Dethier and Hacker, 2004; An et al., 2007).

*Spartina*속 식물 관리 방법

*Spartina*속 식물의 관리를 위해 물리적 수단 (손제거, 예초/베기, 파쇄, 로타리 경운, 태우기, 스팀처리, 굴취, 잠수처리), 화학적 수단(제초제 처리), 생물학적 수단(biological control) 등이 검토되고 있다(Table 3). 여러 방법들 중에서 비교적 실용적인 것은 예초(mowing), 파쇄(crushing), 제초제 처리 등이며 각각의 단독처리보다는 병행하여 사용하는 것이 효과적이고, 향후 보다 효과적인 *Spartina*속 식물 관리기술을 도출하려면 종합적 관리 전략을 구사하는 것이 바람직하다.

물리적 방법

o. 손제거

*Spartina*속 식물의 관리에 적용할 수 있는 방법중의 하나이며 효과적이기는 하나(Norman and Patten, 1997a), 1년 이하의 유효와 소면적 적용시 보다 효과적이다. 2년 이상 성숙된 개체는 지하부 발달이 잘 진행되고 있고(뿌리가 1 m 이상 깊이 뻗어가는 경우가 많음) 뿌리가 서로 엉켜있기 때문에 손으로 제거하는 작업은 많은 노력이 소요된다(Hedge et al., 2003).

o. 예취/베기 (Mowing/Clipping)

*Spartina*속 식물의 관리에 가장 많이 적용되는 방법으로서 단독으로 사용하든지 또는 다른 기술과 함께 활용된다. 종자생산을 감소시키며 뿌리나 근경으로의 양분축적을 억제하여 식물을 약화시키는 효과가 있다. 생육후기보다는 생육초기에 작업하는 것이 보다 효과적이다. 왜냐하면 늦은 시기에 실시하면 지하부의 양분축적이 어느 정도 진전되어 있는 상태이기 때문에 예취를 했을지라도 겨울이나 이듬해에 재생가능성이 높다. 그리고 생육후기에 예취하면 작업장소에 식물체 더미(wrack)를 만들고 여기에 종자들이 혼입되어 주변으로의 전파가능성이 높아질 수 있다. 적절한 시기의 일회 예취는 종자 생산감소에 효과가 있기는 하나, 보다 효과를 거두려면 반복 예취를 3-4년간 지속적으로 수행하여야 한다. 그런데 *Spartina*속 식물의 뛰어난 재생능력 때문에 *Spartina*속 식물의 효율적인 근절을 위해서는 예취 단독으로는 부족하며 제초제 처리가 병행되어야 한다고 한다(Dethier and Hacker, 2004).

개화초기에 1년에 한번 또는 수회의 베기 작업(clipping) 하는 것이 갯줄풀의 제어에 가장 효과적이었다. 기타 다른 시기에 여러번 베기를 하여도 제어효과가 증가되지는 않아, 처리횟수보다는 처리 적정시기가 더 중요함을 나타내

Table 3. The various methods tried for *Spartina* management.

Category	Methods (Tools)	References
Physical control	Hand removal	Hedge and Patten, 2003; Norman and Patten, 1997a
	Mowing, Clipping	Gao et al., 2009; Roberts and Pullin, 2006
	Crushing	Patten, 2004; Roberts and Pullin, 2006
	Roto-tilling, Disking	Hedge and Patten, 2003; Morgan and Sytsma, 2004; Patten, 2004
	Burning, Steaming, Digging	Dethier and Hacker, 2004
	Flooding (waterlogging)	Smith and Lee, 2015; Yuan et al., 2011
Chemical control	Herbicides	Confer Table 4 in this review
	Acetic acid	Anderson, 2007
Biological control	Insect (<i>Prokelisia</i> spp.)	Daehler and Strong, 1997; Hedge et al., 2003; Grevstad et al., 2003; Wu et al., 1999
	Insects (<i>Orphulella pelidna</i> , <i>Orchelimum fidicinum</i>)	Goranson, 2004
	Plant disease (<i>Claviceps purpurea</i>)	Grevstad et al., 2003
	Plant disease (<i>Fusarium subglutinans</i>)	Gong et al., 2012
Integrated control	Snail (<i>Littoraria irrorata</i>)	Grevstad et al., 2004; Silliman and Zieman, 2001
	Mowing/glyphosate	Norman and Patten, 1997a
	Crushing/glyphosate	Dethier and Hacker, 2004; Patten, 2004
	Cutting/Smother	Roberts and Pullin, 2006
	Cutting/Waterlogging	Yuan et al., 2011

주었다. 베기(clipping) 처리는 조건대의 고지대보다는 저지대의 것에서 효과가 높게 나타났다(Gao et al., 2009).

o. 파쇄(Crushing)

생장후반기(늦가을) 또는 성장초반기(이른 봄)에 가장 많은 양의 바이오매스를 마쇄해 버리기 위해 실시한다. 이른 봄에 작업할 경우 제초제 처리 효과를 증진시킬 수 있는데 이는 새롭게 발생한 신초가 제초제 반응에 보다 민감하기 때문이다. 한편 본 방법은 작업후 지상부에 식물체 더미를 쌓게되어 그들로 인해 남아있는 식물체의 재생을 어렵게도 한다. 한 조사에 의하면 파쇄작업 첫해에는 지하부 감소가 잘 나타나지 않았지만 2-3번의 파쇄는 지상부 및 지하부의 감소가 모두 일어나지만 지하부의 감소가 상대적으로 낮은 경향을 보였다(Dethier and Hacker, 2004). 이는 파쇄처리 이후의 잔해물이 분해되면서 지하부에 영양분을 제공하는 것도 한가지 원인이 될 수 있겠다. 예취에서와 마찬가지로 생육후기보다는 생육초기에 작업하는 것이 보다 효과적이다. *Spartina*속 식물의 효율적인 근절을 위해서는 파쇄 단독으로는 부족하며 제초제 처리가 병행되어야 한다고 한다(Dethier and Hacker, 2004).

o. 로타리경운(Roto-tilling)/disking

기계장치를 이용하여 3 cm 폭과 8~12 cm 깊이로 토양을 교반시키는 작업이다. 여름보다는 겨울철의 작업이 보다 효과적이다(Patten and Stenvall, 2002). 그러나 어설픈 작업하여 영양신초(vegetative shoot, culm)가 붙어있는 지하경 절편을 많이 생산하게 되면 오히려 개체 확산을 촉진시킬 수 있다.

o. 태우기(Burning), 스팀처리(Steaming), 굴취(Digging)

근경(rhizome)을 굴취하는 방법도 있을 수 있으나 대면적을 처리하기에는 비효율적이다. 그리고 화염 또는 열수 처리를 할 수도 있겠으나 엽초 및 뿌리가 항상 상당히 젖어있는 상태이기 때문에 많은 에너지가 소요된다.

o. 잠수처리(Flooding, Waterlogging)

중국에서의 갯줄풀을 대상으로 한 연구 결과, 어린 시기에 잠수(waterlogging) 단독처리는 바이오매스 생산과 종자 생산을 현저히 감소시키지만 이후 잠수처리에 대해 신속히 적응하는 양상을 보였다. 그러나 7월의 개화기에 베기(cutting)를 먼저 실시한 후에 약 3개월 동안 잠수처리를 하면 지상 및 지하부 모두가 죽으면서 완전히 근절되는 결과를 보여주었다(Yuan et al., 2011). 미국에서의 갯줄풀을 대상으로 한 연구 결과에서도, 한번의 생장기간동안 계속적으로 담수조건에 두었을 때 갯줄풀을 근절시키는데 충분

한 효과를 나타냈다(Smith and Lee, 2015). 따라서 잠수처리는 *Spartina*속 식물의 관리에 유용하게 적용시킬 수 있는 기술 중의 하나가 될 것 같다.

화학적 방법(제초제 처리)

*Spartina*속 식물의 관리를 위해 여러가지 제초제 처리가 시도되었으며(Table 4) 지금까지 실용적으로 적용되었던 화합물 성분은 glyphosate, imazapyr, haloxyfop, fluazifop 등이었다(Pritchard, 1995; Palmer et al., 1995; Hedge and Kriwoken, 1997; Shaw and Gosling, 1997; Norman and Patten, 1997b; Hammond and Cooper, 2002; Patten, 2002; Hedge et al., 2003; Shimeta et al., 2016). 미국 및 영국에서는 glyphosate와 imazapyr, 호주에서는 fluazifop, 뉴질랜드에서는 haloxyfop를 주로 사용하는 것 같다.

o. Glyphosate

Glyphosate는 방향족 아미노산 생합성과정의 5-enolpyruvyl shikimate-3-phosphate synthase (EPSPS)를 저해하는 비선택성 경엽처리 제초제이다(Kim et al., 2001).

미국에서는 glyphosate 성분을 함유한 Aquamaster®, Rodeo® 라는 상품명의 제초제를 cordgrass 방제 목적으로 처리하였다. 비표적 생물에 대한 영향이 낮은 편에 속하고, 처리효과는 처리방법 및 환경에 따라 상당히 다른 결과를 보여주었는데 대체로 저용량 처리보다는(평균 30% 방제효과) 고용량 처리(Rodeo® 1-5% 용액을 잎이 젖을 정도로 처리)에서 보다 높은 방제효과를 나타내었다(처리 장소에 따라 50-97%의 방제효과). 남아메리카 지역에서 glyphosate 7.2 kg a.i. ha⁻¹처리는 *S. densiflora*에 대한 성장억제와 광합성계 기능 억제효과가 우수하였으며 glyphosate의 대사산물인 AMPA (aminomethylphosphonic acid)도 토양으로부터 유출되지 않았는데 이는 토양내 철분과 aluminium oxide 함량이 높아 이들에 의해 결합되어 있기 때문으로 보였다(Mateos-Naranjo et al., 2009). 미사질 토양입자가 잎에 많이 부착되어 있을 경우, glyphosate 처리효과가 저감되었는데 이는 제초제가 미사질 토양과 흡착되어 잎으로의 흡수 이행이 낮아졌기 때문으로 보여졌다. 그래도 깨끗한 잎의 처리에 비해 50-60%의 방제효과는 지속적으로 나타나는 경향이였다. 가장 처리효과가 좋았던 방법은 예초를 한번 실시하고 신초가 30-45 cm 신장하였을 때 Rodeo®를 처리하는 것이었다(Norman and Patten, 1997b). 그런데 예초와 제초제 처리를(mowing/spraying) 연속적으로 4년간 수행했을 때 제초효과가 88% 정도로 양호하게 나타나는데 만일 처리를 1년간 쉬었을 경우 49% 정도로 효과 감소가 일어났다.

한편 glyphosate 처리시 1-5%의 습윤제(wetter)/계면활성제(surfactant)를 사용하면 처리효과가 증진되는 경향이있

다(Roberts and Pullin, 2006). 이때 계면활성제는 수생태계 독성이 낮아야 할 것이다. 보고에 의하면 육상식물에 사용되었던 Roundup® 제제는 이에 함유된 계면활성제 POEA (polyethoxylated tallowamine)가 수생동물에 대한 독성이 높았기 때문에 이를 R-11 (Nonionic spray adjuvant, 90% alkyl aryl polyethoxylates)로 바꾸어 *Spartina* 방제용 glyphosate 제형(Rodeo®)을 새롭게 제조하여 사용하게 되었다고 한다(Giesy et al., 2000). 또한 glyphosate에 대한 *Spartina*속 식물의 중간 반응차이도 약간 존재하는 것 같다. 즉 영국갯끈풀과 갯줄풀에 대한 방제효과가 각각 43%, 58%를 나타내었다(Roberts and Pullin, 2006). Glyphosate는 염이 존재하는 현지의 해수를 사용하여 처리할 경우 방제효과가 떨어지는 경향이 있다(Nalewaja and Matysiak, 1991).

o. Imazapyr

Imazapyr는 분지아미노산(leucine, valine, isoleucine) 생합성과정에 있어서 첫 번째 효소인 acetolactate synthase (ALS)를 저해하는 imidazolinone계 화합물이다(Kim et al., 2001).

*Spartina*속 식물 관리에 있어서 glyphosate보다 우수한 몇 가지 장점을 가지고 있다고 한다. 우선 처리량이 glyphosate보다 낮다. 즉 갯줄풀 밀생지역에 imazapyr 1.68 kg a.i. ha⁻¹ 처리할 경우 glyphosate 8.4 kg a.i. ha⁻¹ 처리에서 보다는 더 우수한 방제효과를 보였고, imazapyr 0.84 kg a.i. ha⁻¹ 처리는 glyphosate 8.4 kg a.i. ha⁻¹ 처리와 대등한 효과를 나타냈다(Patten, 2002; Roberts and Pullin, 2006). Imazapyr 처리시 부피용량이 높을 때(467 L ha⁻¹)가 낮을 때보다(93 L ha⁻¹) 효과가 높게 나타나지만, 잎이 지상에 노출되어 물기가 없는 상태의 시간(dry time)이 12시간 이상이 된다면 매우 낮은 부피(23-47 L ha⁻¹)의 처리에서도 우수한 방제효과를 나타냈다(Patten, 2002). Glyphosate와는 달리 현지의 해수를 사용하여 처리해도 제초효과가 잘 발현되며(Pritchard, 1994), 환경조건 변화에 따른 효과 발현 변화폭이 크지 않고 지속적으로 나타나는 특징이 있다(Patten, 2004). 그리고 imazapyr 처리시에도 1-5%의 습윤제(wetter)/계면활성제(surfactant)를 사용하면 처리효과가 증진되는 경향이 있었다(Roberts and Pullin, 2006). Imazapyr는 수중에서의 광분해가 빠르고, 약제의 저독성, 저약량 처리 등으로 인해 생태계에 대한 안전성 폭이 glyphosate보다 3-4배 양호하다고 한다(Fisher, 2003). 한편 남아메리카 실험의 경우 동일 계통의 약제인 imazamox를 20-68 g a.i. ha⁻¹ 수준으로 처리했을 때, *S. densiflora*에 대한 생장억제 효과는 거의 없었다고 한다(Mateos-Naranjo et al., 2009).

o. Fluazifop

Fluazifop는 지방산 생합성과정의 acetyl-CoA carboxylase

(ACCCase)를 저해하는 aryloxyphenoxypropionate계의 경엽 처리 제초제로서 화본과 잡초만 선택적으로 고사시키는 화합물이다(Kim et al., 2001).

호주에서는 fluazifop-*P*-butyl 성분을 함유한 Forte® 또는 Fusilade Forte® 상품을 늦여름에 성분량 기준으로 2.112 kg a.i. ha⁻¹ 수준 처리했을 때, 당해연도의 제초효과는 98% 수준이었고 추가 재처리 없이 3년 후에도 92%의 방제효과(생체피복을 감소)를 나타냈다(Palmer et al., 1995; Pritchard, 1995; Shimeta et al., 2016). Fusilade Forte®의 유효성분은 침전물(sediments)에서의 가수분해가 매우 빠른 편이기 때문에 수중 생물체에 대한 위협이 거의 없는 편이다(Palmer et al., 1995). 따라서 처리후 1-2개월간의 대형 토양동물(macrofauna) 및 중 풍부성과 다양성에 있어서 변화가 없었다. 처리 6개월 후에는 고사후 잔류된 지상부의 분해로 유기물 투입이 많아져 annelids 종이 15배 증가되었고 따라서 이를 먹고사는 총 대형 토양동물이 4배 이상 많았다. 아울러 토양생물을 먹이로 하는 새들의 유입도 더 많았다(Shimeta et al., 2016).

o. Haloxyfop

Haloxyfop도 지방산 생합성과정의 acetyl-CoA carboxylase (ACCCase)를 저해하는 aryloxyphenoxypropionate계의 경엽 처리 제초제로서 화본과 잡초만 선택적으로 고사시키는 화합물이다(Kim et al., 2001).

뉴질랜드에서는 haloxyfop-*P*-methyl 성분을 함유한 Gallant® 라는 상품명으로 제초제를 헬리콥터 등으로 처리하여 영국갯끈풀 방제에 대성공을 거두었다고 보고하였다(Shaw and Gosling, 1997; Patten, 2002; Miller, 2004). 단일처리에 의해 95% 수준의 방제효과가 있었다.

o. 기타 제초제

*Spartina*속 식물 방제를 위해 실험했던 기타 제초제들로서 dalapon, paraquat, fenuron, diuron, bromacil, amitrole-T, 2,2-DPA 등이 보고되었다(Bascand, 1968; Taylor and Burrows, 1968a, 1968b; Roberts and Pullin, 2006). 이들의 처리 효과는 비교적 잘 나타나는 경향이 있지만, 비용, 안전성 등 여러 제한 요인에 의해 사용되지는 않고 있다. 그리고 clethodim (Patten, 2002)과 atrazine도 처리해 보았으나(Lytle and Lytle, 1998) 갯줄풀에는 효과적이지 않았다.

*Spartina*속 식물 방제를 위해 사용된 대부분의 제초제는 경엽처리용 이었다. 그러나 이들은 경우에 따라 사용되기 어려운 때가 있다. 예를 들면, 저지대에서는 밀물시 잠김(tidal flooding) 때문에 경엽처리 제초제 사용이 어렵고, 특수 보호지역에서는 [예, San Francisco 만과 같은 Clapper Rail (*Rallus longirostris*) 보호지역] 제초제 처리 허용기간이

Table 4. The species and site of actions of herbicides that have been tried for *Spartina* management.

Herbicides	Site of action (HRAC group) ²	References
Amitrole	Lycopene cyclase (F3)	Bascand, 1968; Roberts and Pullin, 2006; Taylor and Burrows, 1968a
Atrazine	Photosystem II inhibition (C1)	Lytle and Lytle, 1998
Bromacil	Photosystem II inhibition (C3)	Bascand, 1968; Taylor and Burrows, 1968a
Clethodim	Acetyl-CoA carboxylase (A)	Patten, 2002
Dalapon	Inhibition of lipid synthesis (N)	Roberts and Pullin, 2006; Taylor and Burrows, 1968a
Diuron	Photosystem II inhibition (C2)	Bascand, 1968; Roberts and Pullin, 2006
Fenuron	Photosystem II inhibition (C2)	Bascand, 1968; Roberts and Pullin, 2006; Taylor and Burrows, 1968a;
Fluazifop	Acetyl-CoA carboxylase (A)	Palmer et al., 1995; Patten, 2002; Pritchard, 1995
Glyphosate	5-Enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (G)	Giesy et al., 2000; Nalewaja and Matysiak, 1991; Roberts and Pullin, 2006
Haloxyfop	Acetyl-CoA carboxylase (A)	Miller, 2004; Patten, 2002; Shaw and Gosling, 1997;
Imazamox	Acetolactate synthase (B)	Mateos-Naranjo et al., 2009
Imazapyr	Acetolactate synthase (B)	Patten, 2002; Pritchard, 1994; Roberts and Pullin, 2006
Paraquat	Photosystem I inhibition (D)	Bascand, 1968; Roberts and Pullin, 2006; Taylor and Burrows, 1968a

²Classified by Heap (2016).

가을 몇 개월로 제한되어 있고 이 때는 경엽처리 제초제 사용 효과가 낮다. 따라서 이들의 경우엔 늦가을~초겨울에 토양처리 제초제를 처리할 수 있다면 “*Spartina* 종합관리 프로그램” 운영에 매우 유용할 것이다. 왜냐하면 토양처리 제초제는 겨울~초봄동안 근경(rhizome) 기능을 손상시켜 이듬해의 생육 또는 화기발생 등을 저하시키거나, 종자 및 근경으로부터 나오는 유묘를 고사 시킬 수 있기 때문이다. Anderson (2007)은 본 목적으로 갯줄풀 근경을 초산 1.0% 및 1.5%에 2-4시간 정도 침지처리 함으로서 근경 재생능력이 현저히 억제되었음을 확인하였고, 1.5% 초산에 처리된 근경을 포장에 이식하여 생장시켰더니 처리후 9개월째 싹초 발생수 및 초장이 90% 이상 감소되는 효과를 보였으며 화기형성 수도 감소되었다고 하였다.

생물적 방법(Biological control)

*Spartina*속 식물을 관리함에 있어서 물리적, 화학적 처리 방법은 어느 정도이든 생태계에 부정적 영향을 끼칠 수 있기 때문에 보다 환경친화적인 관리기술을 개발하기 위하여 생물을 이용한 *Spartina*속 식물 관리기술 개발 연구도 여러 나라에서 많이 시도되었다.

가장 효과가 있는 것으로 보고된 사례는 *Spartina*속 식물의 잎내 유관속 즙액을 취해서 살아가는 Homopteran plant hopper (*Prokelesia marginata*)을 이용하는 것이다(Hedge et al., 2003; Grevstad et al., 2003; Grevstad et al., 2004). 본 곤충은 영국갯끈풀과 갯줄풀 모두의 바이오매스를 현저히 감소시키는 능력이 있었으나, Daehler and Strong (1997)은 갯줄풀 계통(clone)들 중에서 *P. marginata*에 저항성을 보이는 계통에 있는 것 같다고 보고하였다.

Grevstad et al. (2004)은 문헌탐색 및 포장조사를 통해 갯줄풀 식물에 대한 생물적 방제 잠재력이 있는 생물종을 목록화 해 보았을 때, 적어도 22종의 곤충, 1종의 병원균, 1종의 달팽이가 있었으며 이들 중 가망성이 높은 것들은 *Chaetopsis aenea*, *Chaetopsis apicalis*, *Trigonotylus uhleri*, *Haliopsis spartinae*, *Prokelisia dolas* 이었다고 하였다. 달팽이도 효과가 있을 수 있었는데 이는 달팽이에 의해 *Spartina*가 섭식될 뿐만 아니라 식물조직의 병원균 감염이 용이해질 수 있기 때문이다(Silliman and Zieman, 2001).

Goranson (2004)은 *Orphulella pelidna*와 *Orchelimum fidicinum*가 갯줄풀 잎의 섭식효과가 있다고 보고하였다. 그런데 *Orphulella*는 저염도 서식지의 것을 더 많이 소비하였으며 반면에 *Orchelimum*는 고염도 서식지의 것을 더 많이 섭식하였다. Gong et al. (2012)은 *Fusarium subglutinans* 병원균의 분생자(conidia)가 갯줄풀 생장을 조절하는 생물제초제로서의 잠재력을 보였다고 하였다. 아울러 다른 흥미로운 연구결과는 나방의 일종인 *Aethes spartinana*라는 곤충은 Prairie cordgrass (*Spartina pectinata*) 식물의 소수(spikelet)를 섭식하여 종자 생산율을 75% 내외까지 감소시키기도 하였다(Prasifka et al., 2012). 이를 이용하면 *Spartina*속 식물의 확산 방지에 사용될 수도 있겠지만, *Spartina pectinata*를 산업적으로 재배 할 경우엔 방제되어야 할 해충으로 취급해야 할 것이다.

종합적 방제법(Integrated Management)

잘 알려진 바와 같이 잡초의 물리적, 화학적, 생물적 방제에는 각각의 장단점이 있다. 환경에 미치는 부정적 영향을 최소화 하면서 경제적으로 *Spartina*속 식물을 관리하려면 무엇보다 방제수단의 특징과 효과를 파악하고 주도 면밀한 계획을 작성하여 종합적 관리 프로그램을 운영하는 것이 가장 바람직할 것이다. 이때 가장 중요하게 고려해야 할 점이 방제 처리시기인 것 같다. 앞서 살펴본 바와 같이 *Spartina*속 식물은 종자전파 비율이 매우 높기 때문에 일차적으로 개화 이전에 예초, 파쇄 또는 제초제 처리가 이루어져야 한다. 그리고 한 가지 처리방법보다는 두가지 이상의 조합처리(예, 물리적 처리 + 화학적 처리의 조합)시 방제 효율이 높고 지속적이다. 아울러 화학적 처리의 경우 dry time과 잎 조직의 활력을 매우 중요하게 여겨야 할 것이다. 이는 약제의 식물체내 흡수와 관계가 있기 때문에 dry time이 길수록(4-6시간 이상), 노화된 잎조직보다는 어린 잎조직에 처리시 높은 방제효과를 거둘 수 있다.

한편 *Spartina*속 식물은 뿌리 및 근경발달이 매우 뛰어나기 때문에 지하부로의 양분저장을 최대한 억제하는 전략을 세워야 할 것이다. 생육후기보다는 생육초기에 처리수단을 동원하여야 지상부 바이오매스를 줄이고 근경의 신

장과 발달을 줄일 수 있다. 그런데 지하부 바이오매스 저감은 매우 천천히 이루어지기 때문에 수년간에 걸쳐서 지속적으로 방제수단을 적용하는 것이 필요하다.

일반 작물과는 달리 *Spartina*속 식물을 관리하는 데는 여러 가지 어려움이 있다. 1) 매우 조밀하게 생장하기 때문에 처리작업을 위한 접근성에 어려움이 있다. 2) 해안에 위치하고 있어서 바람이 많다. 3) 밀물, 썰물이 있고 날마다 수위가 변하기 때문에 작업시기 결정에 어려움이 있다. 4) 습지가 대부분이기 때문에 사람 및 기기이동에 어려움이 많다. 5) 대부분 개방생태계 내에서 자라고 있기 때문에 어떤 처리를 할지라도 그 영향이 주변에 쉽게 전달될 수 있어서 특히 비표적 생물에 대한 영향력이 낮은 수단을 동원해야 한다. 따라서 많은 연구가 필요하며 특히 대면적 관리를 위한 장치 또는 최적화된 기계개발이 이루어져야 할 것이다.

*Spartina*속 식물 바이오매스 활용을 통한 경제적 관리

*Spartina*속 식물이 대면적으로 확대되어 근본적으로 근절시키기 어렵거나 산업적으로 바이오매스 수요가 급증하게 될 경우, 예취된 *Spartina*속 식물 바이오매스를 경제적으로 이용할 수 있는 방안이 있다면 발생지역에 따라 보다 효과적으로 경제적 관리를 할 수 있을 것이기 때문에 이의 가능성도 고려해 볼 필요가 있을 것 같다.

*Spartina*속 식물은 switchgrass (*Panicum virgatum*), reed canarygrass (*Phalaris arundinacea*), giant reed (*Arundo donax*), 억새(*Miscanthus* spp.), 갈대(*Phragmites* spp.) 등의 여러 가지 화본과 식물(잡초)와 더불어 바이오에너지 작물(bioenergy crops)로서의 가능성이 검토되었다(Potter et al., 1995; Lewandowski et al., 2003; Ho et al., 2014).

배수지역(Boe and Lee, 2007) 또는 한계토양(marginal soil)에서의(Boe et al., 2009) cordgrass 생장은 switchgrass를 능가하였다. 락(*Imperata cylindrica*)나 갈대(*Phragmites australis*)보다 높은 생산성을 나타낸다고 소개되었다(Chung et al., 2006; An et al., 2007). Prairie cordgrass의 대량생산 경작을 위해 사용할 제초제 선별 연구도 진행되었다(Sekutowski and Dziagwa, 2012; Anderson et al., 2014).

초지에서의 *Spartina*속 식물 바이오매스 생산량은 지역 및 환경에 따라 보통 건물중 기준으로 10-15 ton ha⁻¹이고 수년간의 생산성도 거의 변함없이 지속되었다(Potter et al., 1995; Yang et al., 2009). 그러나 양분이 풍부한 중국 Jiangsu 연안지역에서는 갯줄풀이 30 ton ha⁻¹ 정도의 높은 생산성을 기록하기도 하였다(Qin and Xie, 1998). 최적조건에서는 40 ton ha⁻¹ 도 가능하다고 한다(Yang et al., 2009).

*Spartina*속 식물은 해양 침식방지, 간척지, 염류토양 개선, siltation 조정 등을 위한 생태공학 재료로서 매우 높은 가치가 있을 뿐만 아니라 생산된 바이오매스는 녹색거름(green manure), 동물 및 어류 사료, 바이오미네랄, 바이오연료로서의 사용가치가 있어, 중국 Jiangsu 지역에서만 갯줄풀의 생태적 가치가 1.08×10^9 위안 정도라고 소개하고 있다 (Chung et al., 2006; Lu and Zhang, 2013). 바이오가스 생산을 위한 혐기소화 재료로서 사용가치가 있으며 보다 소화율을 높이려면 체내 무기염류함량을 낮추는 것이 필요하다고 하였다(Yang et al., 2009). 그리고 당용액 생성 원료(Larran et al., 2015), 수질오염 제거(Li et al., 2013), 펄프 재료(Chen et al., 2011)로도 사용될 수 있으며, 최근에는 갯줄풀을 동물사료의 약 25% 이내로 배합 함으로서 반추동물 조사료로서의 이용 잠재력이 있음을 보고하였다(Qin et al., 2016). 따라서 적절한 기술개발을 통해 이들의 활용도를 높이면 *Spartina* 확산문제를 보다 경제적으로 잘 대처할 수 있을 것이다.

우리는 현재 지속적인 산업발전을 추구해야함과 동시에 도전받고 있는 여러 문제들(석유자원의 고갈, 지구온난화와 CO₂ 배출 문제, 환경규제 강화 등)을 슬기롭게 극복하기 위해서 자원/환경/산업발전이 종합적으로 고려된 일석삼조 기술이 필요한 상황이며, 이를 위한 가장 적합한 개발 수단은 식물자원을 활용하는 길이라고 여겨진다. 왜냐하면 식물은 성장하면서 대기중의 CO₂ 저감, 수질정화 등에 크게 기여할 뿐만 아니라 성장한 개체는(biomass, green feedstock) 여러 가지 기능성 물질, 바이오에너지, 바이오화학제품 등의 생산 원료로서 활용될 수 있는 종들이 많기 때문이다. 따라서 식물들 중에서 이러한 멀티플레이어 기능을 잘 수행할 수 있는 것들을 탐색하여 CO₂ 저감/환경정화/대체에너지 및 친환경 산업원료 생산 등의 다중효과를 연계 창출할 수 있는 통합 신기술을 개발하는 것은 매우 의미 있는 일이 될 것이다(Kim et al., 2014). 그런데 일석삼조기술의 실용화 여부는 바이오매스 생산성에 있다고 해도 과언이 아니기 때문에 *Spartina*속 식물을 멀티플레이어로서 키워 볼 가치도 충분히 있을 것 같다. 물론 *Spartina*속 식물의 순기능과 역기능을 잘 관리할 수 있는 기술보유와 운용을 전제로 해야 할 것이다.

결 론

*Spartina*속 식물은 종자와 근경을 통한 강한 번식/전파력, 기수지역에서의 급속한 성장 등의 생물학적 특성 때문에 인류에게 상당한 순기능과 역기능을 끼치는 것 같다. 해양연안의 생태공학적 가치가 높아 초기에 도입되었던 *Spartina*속 식물이 현재는 생태 다양성을 위협하는 침입식물(생태

계 교란식물)로도 인식되어 미국, 중국, 호주 등 세계 여러 나라에서 관리대상 식물이 되어가고 있기 때문이다. 우리나라에서도 2016년 생태계 교란식물로 지정되어 집중 관리에 들어갔다. 이미 문제가 되었던 나라들의 연구결과를 검토해 보았을 때 *Spartina*속 식물의 관리를 잘 하기 위해서는 다음의 사항을 잘 이해하면서 정책적, 기술적 관리방안을 세우는데 유념해야 할 것으로 판단된다.

1. *Spartina*속 식물은 봄에 발아하여 여름에 개화하고 가을에 결실하는 여름형 식물이고, 근경으로 번식하는 다년생 식물이지만 종에 따라 약간씩 차이가 있을지라도 종자로의 번식력도 매우 왕성하다. 그리고 종자는 해초 같은 식물체 더미(wrack)를 통해 수백 km까지 이동, 발아시킬 수 있고, 지상부가 일부 붙어있는 근경 절편은 재생력이 매우 양호하다. 따라서 우리나라의 경우, 중국 황해로부터의 해류에 의한 침입 가능성에 보다 관심 두어야 할 것 같다.

2. *Spartina*속 식물은 매우 다양한 환경조건에서 적응, 성장하는 식물이지만 저염도의 습지 및 갯벌에서의 생장이 상대적으로 양호하기 때문에 외부로부터의 침입과 확산방지를 위해서는 이들 장소가 우선적으로 집중 관리되어야 할 것이다.

3. *Spartina*속 식물의 관리를 위해서는 물리적/화학적 처리방법을 병행하는 것이 바람직하며, 3-4년 지속적으로 이루어져야 한다. 만일 1년 정도 방제를 생략하게 되면 처리효과가 급감하여 비용손실이 크게 되는데 그 이유는 본 식물의 재생 회복능력이 높기 때문이다.

4. 예초후 제초제 처리(mowing/herbicide spraying) 등의 작업은 개화기 이후의 늦여름-초가을보다는 8월 이내의 이른 생장기에 실시하는 것이 필요하다. 지상부 바이오매스를 줄여 종자생산도 줄이고 아울러 지하부의 영양분 이동을 제한하여 근경의 활력을 줄이기 위함이다.

5. 경엽처리용 제초제 처리시에는 잎의 물기없는 시간(dry time)이 4-6시간 이상되게 하여야 하고, 바람이 불지 않을 때 살포하여야 한다. 잎에 흙이 많이 묻어 있으면 glyphosate 처리를 피하는 것이 좋을 것 같다. 무엇보다 주의할 것은 동일한 제초제를 해마다 계속 사용하지 않도록 해야 한다. Glyphosate, imazapyr, fluazifop, haloxyfop 모두 약제 연용에 의해 저항성 잡초 출현이 용이하게 일어난다고 알려진 작용점(ALS, ACCase, EPSPS)들을 가지고 있다(Deilye et al., 2013; Heap, 2016). *Spartina*속 식물은 자가 및 타가 수정이 잘되고 종자번식이 용이 하기 때문에 저항성 계통 출현 잠재력이 높다고 할 수 있겠다. 제초제 저항성 종이 일단 출현하면, 이후 화학적 처리 효과는 거의 기대하기 어렵기 때문에 절대적으로 주의해야 할 것이다. 그리고 최근 국제암연구소(IRAC)가 glyphosate를 2등급 발암성 물질로 분류하여(Guyton et al., 2015) 사용제한이 권고되고

있다. 따라서 이들을 대비하여 새로운 유형의 안전하고 친환경적인 제초제 탐색이 추가적으로 이루어져야 할 것이다. 특히 국내에서는 수생잡초에 대한 방제기술이 약하기 때문에 외국에서의 연구사례를 잘 검토하고(Pyon et al., 2015) 이에 대한 기술적 보완 및 개선도 함께 이루어져야 하겠다.

6. 지상부를 제거한 다음, 이를 자리에 두면 썩어서 지하부의 영양원이 될 수 있고, 때에 따라서는 종자전파 수단을 제공할 수 있기 때문에 가능한 다른 장소로 이동시켜 폐기하는 것이 바람직 할 것이다.

7. *Spartina*속 식물은 해양 연안의 생태공학적 가치가 충분히 있고, 산업용 바이오매스로서의 장점을 보유하고 있다. 그렇기 때문에 관리만 잘 되면 향후 석유자원 고갈에 대비하여 중요한 바이오 자원이 될 수 있을 것이다. 따라서 *Spartina*속 식물의 순기능과 역기능 모두에 대한 보다 심층적인 연구가 앞으로 계속 진행되어야 하겠다.

요 약

우리나라에서는 2016년 *Spartina*속의 외래식물인 갯줄풀(*Spartina alterniflora*, Smooth cordgrass)과 영국갯끈풀(*Spartina anglica*, Common cordgrass)을 생태계 교란식물로 지정하였다. 따라서 본 연구에서는 외국의 선행 연구사례를 잘 검토하여 보다 효율적인 관리대책(적극적인 제거 방안 및 확산 방지)을 수립하고 이를 실행하는데 기초정보를 제공하고자 하였다. *Spartina*속 식물은 종자와 근경을 통한 강한 번식력과 전파력을 가지고 있고, 다양한 환경조건에서 적응, 성장하는 식물이지만 저염도의 습지(low-salinity marshes) 및 갯벌(mudflats)에서의 생장이 상대적으로 양호하다. *Spartina*속 식물의 관리를 위해서 그동안 여러가지 물리적, 화학적, 생물학적 처리방법이 시도되어 왔는데 현재 예초, 파쇄, 잠수처리(flooding), 제초제(glyphosate, imazapyr, fluazifop, haloxyfop) 처리 등이 실용적으로 적용되고 있다. 보다 확실한 효과를 거두려면 두가지 이상의 처리를(예, 예초/제초제 처리) 개화기 이전의 이른 생장시기에 실시하도록 하고 이를 3-4년간 중단없이 지속적으로 수행하는 것이 필요하다. 제초제 경엽처리시에는 물기가 없는 상태의 시간(dry time)이 4-6시간 이상되게 하여야 하고, 바람이 불지 않을 때 살포한다. 앞에 흙이 많이 묻어 있으면 glyphosate 처리를 피하는 것이 좋을 것 같다. 무엇보다 주의할 것은 제초제저항성 계통의 출현을 예방하기 위해서 동일 제초제의 연용을 피해야 할 것이다. 한편 *Spartina*속 식물은 해양 연안의 생태공학적 가치가 충분히 있고, 산업용 바이오매스로서의 장점을 많이 보유하고 있기 때문에 관리만 잘 되면 향후 석유자원 고갈에 대비하여 중요한 바이오 자원

이 될 수도 있을 것이다. 따라서 *Spartina*속 식물의 순기능과 역기능 모두에 대한 보다 심층적인 연구가 앞으로 계속 진행되어야 하겠다.

주요어: 제초제, 종합관리, 예취, Cordgrass, *Spartina* spp.

References

- Ainouche, M.L., Baumel, A., Bayer, R., Fukunaga, K., Cariou, T., et al. 2004. Speciation, genetic and genomic evolution in *Spartina*. Proc. 3rd Int. Conf. on Invasive *Spartina*, Sanfrancisco, 8-10 Nov. 2004. pp. 15-21.
- An, S., Xiao, Y., Qing, H., Wang, Z., Zhou, C., et al. 2004. Varying success of *Spartina* spp. invasions in China: Genetic diversity or differentiation. Proc. 3rd Int. Conf. on Invasive *Spartina*, Sanfrancisco, 8-10 Nov. 2004. pp. 33-36.
- An, S.Q., Gu, B.H., Zhou, C.F., Wang, Z.S., Deng, Z.F., et al. 2007. *Spartina* invasion in China: implications for invasive species management and future research. Weed Res. 47:183-191.
- Anderson, E.K., Hager, A.C., Voigt, T.B. and Lee, D.K. 2014. Switchgrass and prairie cordgrass response to foliar- and soil-applied herbicides. Weed Technol. 28:633-645.
- Anderson, L.W.J. 2007. Potential for sediment-applied acetic acid for control of *Spartina alterniflora*. J. Aquat. Plant Manag. 45:100-105.
- Bascand, L.D. 1968. The control of *Spartina* species, Proc. 26th NZ Weed Pest Control Conf., pp. 108-113.
- Biber, P.D. and Caldwell, J.D. 2008. Seed germination and seedling survival of *Spartina alterniflora* Loisel. Am. J. Agric. Biol. Sci. 3(3):633-638.
- Boe, A. and Lee, D.K. 2007. Genetic variation for biomass production in prairie cordgrass and switchgrass. Crop Sci. 47:929-34.
- Boe, A., Owens, V., Gonzalez-Hernandez, J., Stein, J., Lee, D.K., et al. 2009. Morphology and biomass production of prairie cordgrass on marginal lands. GCB Bioenergy 1:240-250.
- Castillo, J.M., Grewell, B.J., Pickart, A., Bortolus, A., Pena, C., et al. 2014. Phenotypic plasticity of invasive *Spartina densiflora* (Poaceae) along a broad latitudinal gradient on the Pacific Coast of North America. Am. J. Bot. 101:448-458.
- Chen, J., Qin, Z., Xu, Z., Wu, L., Wei, Y., et al. 2011. Utilization of an invasive species (*Spartina alterniflora*) in the molded pulp industry. Proc. 23rd Asian-Pacific Weed Sci. Soc. Conf., 26-29 Sept., The Sebel Cairns, pp. 120-127.
- Chen, Z.Y., LI, B., Zhong, Y. and Chen, J.K. 2004. Local competitive effects of introduced *Spartina alterniflora* on *Scirpus mariqueter*

- at Dongtan of Chongming Island, the Yangtze River estuary and their potential ecological consequences. *Hydrobiologia* 528:99-106.
- Christiansen, T., Wilberg, P.L. and Milligan, T.G. 2000. Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 50:315-331.
- Chung, C.H. 2006. Forty years of ecological engineering with *Spartina* plantations in China. *Ecol. Eng.* 27:49-57.
- Daehler, C.C. 1998. Variation in self-fertility and the reproductive advantage of self-fertility for an invading plant (*Spartina alterniflora*). *Evol. Ecol.* 12:553-568.
- Daehler, C.C. and Strong, D.R. 1994. Variable reproductive output among clones of *Spartina alterniflora* (Poaceae) invading San Francisco Bay, California: the influence of herbivory, pollination, and establishment site. *Am. J. Bot.* 81(3):307-313.
- Daehler, C.C. and Strong, D.R. 1996. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in Pacific estuaries, USA. *Biol. Conserv.* 78(1-2):51-58.
- Daehler, C.C. and Strong, D.R. 1997. Reduced herbivore resistance in smooth cordgrass (*Spartina alterniflora* L.) after a century of herbivore free growth. *Oecologia* 110:99-108.
- Deilye, C., Jasieniuk, M. and Le Corre, V. 2013. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends Genet.* 29(11):649-658.
- Dethier, M.N. and Hacker, S.D. 2004. Improving management practices for invasive cordgrass in the Pacific Northwest: A case study of *Spartina anglica*. Washington Sea Grant Program (Grant #NA04OAR4170032), University of Washington, USA.
- Elsley-Quirk, T., Middleton, B.A. and Proffitt, C.E. 2009. Seed flotation and germination of salt marsh plants: The effects of stratification, salinity, and/or inundation regime. *Aquat. Bot.* 91:40-46.
- Fisher, J.P. 2003. Ecological risk assessment of the proposed use of the herbicide imazapyr to control invasive cordgrass (*Spartina* spp.) in Estuarine Habitat of Washington State. Project No. 300901, Washington State Department of Agriculture, USA.
- Gao, Y., Tang, L., Wang, J., Wang, C., Liang, Z., et al. 2009. Clipping at early florescence is more efficient for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora*. *Ecol. Res.* 24:1033-1041.
- Giesy, J.P., Dobson, S. and Solomon, K.R. 2000. Ecotoxicological risk assessment for Roundup herbicide. *Rev. Environ. Contam. T.* 167:35-120.
- Gong, L.B., Wang, Y.P., Ling, X. and Yuan, J. 2012. Biological control of *Spartina alterniflora* by a fungal-*Fusarium subglutinans*. *Proc. 2012 Int. Conf. on Biomedical Engineering and Biotechnology (iCBEB)*, Macao, 28-30 May 2012. pp. 97-100.
- Goodman, P.J., Braybrooks, E.M., Marchant, C.J. and Lambert, J.M. 1969. Biological flora of the British Isles. *Spartina x townsendii* H. & J. Groves sensu lato. *J. Ecol.* 57:285-313.
- Goranson, C.E., Ho, C.K. and Pennings, S.C. 2004. Environmental gradients and herbivore feeding preferences in coastal salt marshes. *Oecologia* 140:591-600.
- Grevstad, F.S., Strong, D.R., Garcia-Rossi, D., Switzer, R.W. and Wecker, M.S. 2003. Biological control of *Spartina alterniflora* in Willapa Bay, Washington using the planthopper *Prokelisia marginata*: agent specificity and early results. *Biol. Control* 27:32-42.
- Grevstad, F.S., Wecker, M.S. and Strong, D.R., 2004. Biological control of *Spartina*. *Proc. 3rd Int. Conf. on Invasive Spartina*, San Francisco, 8-10 Nov. 2004. pp. 267-272.
- Guyton, K.Z., Loomis, D., Grosse, Y., Ghissassi, E.L., Benbrahim-Tallaa, F., et al. 2015. Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate. *Lancet Oncol.* 16(5):490-491.
- Hammond, M.E.R. and Cooper, A. 2002. *Spartina anglica* eradication and inter-tidal recovery in Northern Ireland estuaries. pp. 124-131. In: Veitch, C.R. and Clout, M.N. (Eds.). *Turning the Tide: the Eradication of Invasive Species*. Gland, Cambridge, UK.
- He, Y., Li, X., Craft, C., Ma, Z. and Sun, Y. 2011. Relationships between vegetation zonation and environmental factors in newly formed tidal marshes of the Yangtze River estuary. *Wetl. Ecol. Manag.* 19(4):341-349.
- Heap, I. 2016. International survey of herbicide of resistance weeds. <http://www.weedsic.org> (Accessed Aug. 30, 2016).
- Hedge, P., Kriwoken, L.K. and Patten, K. 2003. A review of *Spartina* management in Washington State, US. *J. Aquat. Plant Manag.* 41:82-90.
- Hedge, P.T. and Kriwoken, L.K. 1997. Managing *Spartina* in Victoria and Tasmania, Australia. *Proc. 2nd Int. Spartina Conf.*, Olympia, Washington, 20-21 Mar. 1997. pp. 93-95.
- Ho, D.P., Ngo, H.H. and Guo, W. 2014. A mini review on renewable sources for biofuel. *Bioresource Technol.* 169:742-749.
- Huang, H.M., Zhang, L.Q. and Yuan, L. 2007. The spatio-temporal dynamics of saltmarsh vegetation for Chongming Dongtan National Nature Reserve, Shanghai. *Acta Ecol. Sin.* 27:4166-4172. (In Chinese)
- Kim, E.-K., Kil, J., Joo, Y.-K. and Jung, Y.-S. 2015. Distribution and botanical characteristics of unrecorded alien weed *Spartina anglica* in Korea. *Weed Turf. Sci.* 4(1):65-70. (In Korean)
- Kim, J.-S. 2014. For the identification and application of useful function of weeds (Let's make weeds a multiplayer in future society). *Proc. Kor. Weed Sci. Soc. Conf.* 34(1):21-22. (In Korean)
- Kim, J.-S., Kim, S., Ma, S.Y. and Park, J.-E. 2001. Recent and future

- outlooks of herbicide physiology. Kor. J. Weed Sci. 21(2):122-145. (In Korean)
- Larran, A., Jozami, E., Vicario, L., Feldman, S.R., Podesta, F.E., et al. 2015. Evaluation of biological pretreatments to increase the efficiency of the saccharification process using *Spartina argentinensis* as a biomass resource. Bioresource Technol. 194:320-325.
- Lewandowski, I., Scurlock, J.M.O., Lindvall, E. and Christou, M. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. Biomass and Bioenergy. 25:335-361.
- Li, M., Liu, Q., Guo, L., Zhang, Y., Lou, Z., et al. 2013. Cu(II) removal from aqueous solution by *Spartina alterniflora* derived biochar. Bioresource Technol. 141:83-88.
- Li, R., Shi, F. and Fukuda, K. 2010. Interactive effects of salt and alkali stresses on seed germination, germination recovery, and seedling growth of a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae). S. Afr. J. Bot. 76:380-387.
- Liu, W., Maung-Douglass, K., Strong, D.R., Pennings, S.S. and Zhang, Y. 2016. Geographical variation in vegetative growth and sexual reproduction of the invasive *Spartina alterniflora* in China. J. Ecol. 104:173-181.
- Lu, J. and Zhang, Y. 2013. Spatial distribution of an invasive plant *Spartina alterniflora* and its potential as biofuels in China. Ecol. Eng. 52:175-181.
- Lytle, J.S. and Lytle, T.F. 1998. Atrazine effects on estuarine macrophytes *Spartina alterniflora* and *Juncus roemerianus*. Environ. Toxicol. Chem. 17:1972-1978.
- Marchant, C.J. 1963. Corrected chromosome numbers for *Spartina x townsendii* and its parent species. Nature 31:929.
- Marchant, C.J. 1968. Evolution in *Spartina* (Gramineae). II. Chromosomes, basic relationships and the problem of *S. x townsendii* agg. Bot. J. Linn. Soc. 60:381-409.
- Marks, T.C. and Truscott, A.J. 1985. Variation in seed production and germination of *Spartina anglica* within a zoned saltmarsh. J. Ecol. 73:695-705.
- Mateos-Naranjo, E., Cambrolle, J., De Lomas, J.G., Parra, R. and Redondo-Gomez, S. 2012. Mechanical and chemical control of the invasive cordgrass *Spartina densiflora* and native plant community responses in an estuarine salt marsh. J. Aquat. Plant Manag. 7:106-110.
- Mateos-Naranjo, E., Redondo-Gómez, S., Cox, L., Cornejo, J. and Figueroa, M.E. 2009. Effectiveness of glyphosate and imazamox on the control of the invasive cordgrass *Spartina densiflora*. Ecotox. Environ. Safe. 72:1694-1700.
- Miller, G. 2004. Controlling invasive *Spartina* spp.: The New Zealand success story. Proc. 3rd Int. Conf. on Invasive *Spartina*, Sanfrancisco, 8-10 Nov. 2004. pp. 247-248.
- Mooring, M.T., Cooper, A.W. and Seneca, E.D. 1971. Seed germination response and evidence for height ecophenes in *Spartina alterniflora* from North Carolina. Amer. J. Bot. 58(1):48-55.
- Morgan, V.H. and Sytsma, M. 2004. Fragment propagules of *Spartina alterniflora* and potential Eastern Pacific dispersal. Proc. 3rd Int. Conf. on Invasive *Spartina*, Sanfrancisco, 8-10 Nov. 2004. pp. 255-261.
- Mullins, P.H. and Marks, T.C. 1987. Flowering phenology and seed production of *Spartina anglica*. J. Ecol. 74:1037-1048.
- Nalewaja, J.D. and Matysiak, R. 1991. Salt antagonism of glyphosate. Weed Sci. 39:622-628.
- Norman, M. and Patten, K. 1997a. Cost-efficacy of integrated *Spartina* control practices in Willapa Bay, Washington. Proc. 2nd Int. *Spartina* Conf., Olympia, Washington, 20-21 Mar. 1997. pp. 93-95.
- Norman, M. and Patten, K. 1997b. Evaluation of simulated Rodeo (glyphosate) aerial treatments for *Spartina* control in Willapa Bay, Washington. Progress Report: July 16 to October 15, 1997 for the Minor Crop Pesticide Research Fund, Wash. State Univ., Olympia, Washington State, USA. p. 13.
- Normile, D. 2004. Expanding trade with China creates ecological backlash. Science. 306:968-969.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). 2012. OECD Environmental outlook to 2050: The consequences if inaction. Key findings on biodiversity. <http://www.oecd.org/environment/outlookto2050> (Accessed July 30, 2016).
- Palmer, D., Parry, G., Hart, C., Greenshields, P., Crookes, D., et al. 1995. Toxicity of fusilade to seagrass and near-shore marine fauna. How green is your mudflat?. Proc. Australasian Conf. on *Spartina* Control. Victoria, 10-12 May. 1995. pp. 30-39.
- Patten, K. 2002. Smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) control with imazapyr. Weed Technol. 16:826-832.
- Patten, K. 2004. Comparison of chemical and mechanical control efforts for invasive *Spartina* in Willapa bay, Washington. Proc. 3rd Int. Conf. on Invasive *Spartina*, Sanfrancisco, 8-10 Nov. 2004. pp. 249-254.
- Patten, K. and Stenvall, C. 2002. Control of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora* L.): A comparison between various mechanical and chemical control methods for efficacy, cost and aquatic toxicity. Proc. of the 11th Int. Conf. on Aquatic Invasive Species. Alexandria, 25-28 Feb. 2002. pp. 340-350.
- Peterson, P.M., Columbus, J.T. and Pennington, S.J. 2007. Classification and biogeography of new world grasses. Chloridoideae. Aliso 23:580-594.
- Plyler, D.B. and Proseus, T.E. 1996. A comparison of the seed

- dormancy characteristics of *Spartina patens* and *Spartina alterniflora* (Poaceae). Am. J. Bot. 83(1):11-14.
- Potter, L., Bingham, M.J., Baker, M.G. and Long, S.P. 1995. The potential of two perennial C4 grasses and a perennial C4 sedge as ligno-cellulosic fuel crop in N.W. Europe. Crop establishment and yields in E. England. Ann. Bot.- London 76:513-520.
- Prasifka, J.R., Lee, D.K., Bradshaw, J.D., Parrish, A.S. and Gray, M.E. 2012. Seed reduction in prairie cordgrass, *Spartina pectinata* Link., by the floret-feeding caterpillar *Aethes spartinana* (Barnes and McDunnough). Bioenerg. Res. 5:189-196.
- Pritchard, G. 1994. *Spartina* - Progress Trial Report. Frankston, Victoria, Australia. Keith Turnbull Research Institute.
- Pritchard, G.H. 1995. Herbicide trials on *Spartina*. How green is your mudflat?. Proc. Australasian Conf. on *Spartina* Control. Victoria, 10-12 May. 1995. p. 66.
- Probert, R.J. and Longley, P.L. 1989. Recalcitrant seed storage physiology in three aquatic grasses (*Zizania palustris*, *Spartina anglica*, and *Porteresia coarctata*). Ann. Bot.- London 63:53-63.
- Pyon, Y., Kim, S.W., Lee, J.J. and Park, K.W. 2015. Distribution and control of aquatic weeds in waterways and riparian wetlands. Weed Turf. Sci. 4(1):1-9. (In Korean)
- Qin, F., Tang, B., Zhang, H., Shi, C., Zhou, W., et al. 2016. Potential use of *Spartina alterniflora* as forage for dairy cattle. Ecol. Eng. 92:173-180.
- Qin, P. and Xie, M. 1998. *Spartina* green food ecological engineering. Ecol. Eng. 1:147-156.
- Ranwell, D.S. 1967. World resources of *Spartina townsend* II (sensu lato) and economic use of *Spartina* marshland. J. Appl. Ecol. 4:239-256.
- Roberts, P.D. and Pullin, A.S. 2006. The effectiveness of management options used for the control of *Spartina* species. CEE review 06-001 (SR22). Collaboration for Environmental Evidence. <http://www.environmentalevidence.org/SR22.html> (Accessed Aug. 30, 2016).
- Sekutowski, T.R. and Dziagwa, M. 2012. Weed problem on the newly established prairie cordgrass (*Spartina pectinata*) plantations intended for energetic purposes. J. Cent. Eur. Agric. 13:253-261.
- Shaw, W.B. and Gosling, D.S. 1997. *Spartina* ecology, control and eradication: Recent New Zealand experience. Proc. 2nd Int. *Spartina* Conf., Olympia, Washington, 20-21 Mar. 1997. p. 32-38.
- Shimeta, J., Saint, L., Verspaandonk, E.R., Nugogoda, D. and Howe, S. 2016. Long-term ecological consequences of herbicide treatment to control the invasive grass, *Spartina anglica*, in an Australian saltmarsh. Estuar. Coast. Shelf Sci. 176:58-66.
- Silliman, B.R. and Zieman, J.C. 2001. Top-down control of *Spartina alterniflora* production by periwinkle grazing in a Virginia salt marsh. Ecology 82:2830-2845.
- Smith, S.M. and Lee, K.D. 2015. The influence of prolonged flooding on the growth of *Spartina alterniflora* in Cape Cod (Massachusetts, USA). Aquat. Bot. 127:53-56.
- Taylor, M.C. and Burrows, E.M. 1968a. Chemical control of fertile *Spartina townsendii* (S.L.) on the Cheshire shore of the Dee estuary I. Field trials on *Spartina sward*. Weed Res. 8(3):170-184.
- Taylor, M.C. and Burrows, E.M. 1968b. Chemical control of fertile *Spartina townsendii* on the Cheshire shore of the Dee estuary. II. Response of *Spartina* to treatment with paraquat. Weed Res. 8(3):185-195.
- Tian, J.Y., Shen, B.Z., Li, J.Q., Yu, X. and Shi, D.L. 2009. Yellow River Delta *Spartina* spp. distributed shoal zoobenthos. Mar. Environ. Sci. 28(6):687-690.
- Wijte, A.H.B.M. and Gallagher, J.L. 1996. Effect of oxygen availability and salinity on early life history stages of salt marsh plants. I. Different germination strategies of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* (Poaceae). Am. J. Bot. 83(10):1337-1342.
- Wu, M.Y., Hacker, S., Ayres, D. and Strong, D.R. 1999. Potential of *Prokelisia* spp. as biological control agents of English cordgrass, *Spartina anglica*. Biol. Control 16(3):267-273.
- Xiao, D., Zhang, L. and Zhu, Z. 2009. A study on seed characteristics and seed bank of *Spartina alterniflora* at saltmarshes in the Yangtze Estuary, China. Estuar. Coast. Shelf Sci. 83:105-110.
- Yang, S.G., Li, J.H., Zheng, Z. and Meng, Z. 2009. Characterization of *Spartina alterniflora* as feedstock for anaerobic digestion. Biomass Bioenerg. 33:597-602.
- Yuan, L., Zhang, L., Xiao, D. and Huang, H. 2011. The application of cutting plus waterlogging to control *Spartina alterniflora* on saltmarshes in the Yangtze Estuary, China. Estuar. Coast. Shelf Sci. 92:103-110.