

간척지 논 농업배수 처리에 적합한 인공습지 설계 기법

Constructed Wetland Design Method to Treat Agricultural Drainage from Tidal Reclaimed Paddy Areas

장 정 렬* 신 유 리** 정 지 연*** 최 강 원****

Jang, Jeong Ryeol · Shin, Yu Ri · Jung, Ji Yeon · Choi, Kang Won

Abstract

The standard design methodology was suggested to construct wetland system for reducing non-point source pollution from Saemangeum reclaimed paddy land. To set for the design flow and concentrations, runoff and water quality survey were conducted during the irrigation period in 2008 at Gyehwa reclaimed paddy land located at near Saemangeum lake. It is rational that 1ha is the optimum constructed wetland size. To meet this size, the moderate drainage area of reclaimed paddy field was 50ha under the conditions that rainfall is 30mm, average runoff coefficient is 0.83, and runoff capture ratio is 0.6. At these condition, the runoff volume from 50ha was 10,520 m³/d including base flow during irrigation period. To select the optimum wetland system, several case studies were conducted by focusing on the tidal reclaimed land areas having wetland systems in Seokmun. Pond-Wetland system was selected as the standard model because of showing the highest reduction efficiency. Single variable regression equation were delivered to estimate effluent water concentrations from the designed wetland by using long-term monitoring data from the Seokmun experiment site. The effluent concentration from the designed wetland using these equation were showed moderately range.

I. 서 론

새만금 간척지에는 85.7km²의 농업용지를 개발하는 계획이 수립되어 있으며(국무총리실, 2011), 이미 국내에서 대단위 간척사업에 의한

대규모 농업용지가 개발되어 이용되고 있다. 하지만 이들 간척농지는 사업계획 단계에서부터 개발되는 농업용지의 체계적인 수질관리 계획이 포함되어 있지 못한 실정이다. 이로 인해 각종 영농활동에 따른 농업비점오염 물질이

*한국농어촌공사 농어촌연구원 책임연구원 (wgjang@ekr.or.kr)

**한국농어촌공사 농어촌연구원 연구원 (glassy731@ekr.or.kr)

***한국농어촌공사 농어촌연구원 연구원 (stoplotus@ekr.or.kr)

****한국농어촌공사 농어촌연구원 수석연구원 (kwchoi@ekr.or.kr)

키워드 : Gyehwa, Saemangeum, constructed wetland, regression equation, reclaimed paddy land

적정한 처리 없이 직접적으로 담수호로 유입되어 담수호의 수질관리를 어렵게 하는 원인으로 작용하고 있다. 따라서 새만금호에 간척농지가 조성될 경우에는 사업계획 단계에서부터 새만금호 수질보전을 위한 농업용지의 체계적인 수질관리 계획이 필요하다.

간척 농지의 체계적인 수질관리 계획을 수립하기 위해서는 우선적으로 간척농지에서의 오염물질 배출특성 파악이 선행되어야 한다. 국내에서 간척지 논과 일반 논에서의 배출특성을 직접 비교한 연구사례는 드물지만, 간척지 논은 양분함량이 매우 낮은 토양특성에 따른 시비관행과 염해방지를 위한 흘러대기 물 관리 특성 등에 따라 일반 논지역과 다른 오염배출 특성을 보일 수 있다(안 등, 2007; 엄 등, 2008; 여 등, 2009; 윤 등, 2001). 윤 등(2001)은 간척 논에서 영농활동으로 인하여 부하량이 증가한다고 보고하였고, 여 등(2009)은 간척농지에서 오염물질의 유출 특성이 일반 논과 다른 양상을 나타낸다고 하였다.

따라서 이러한 간척지 농지에서의 오염물질 배출특성을 파악하고 이에 적합한 수처리 시스템의 선정과 시스템에 적합한 설계인자의 적용이 필요하다(한국농촌공사, 2006). 인공습지가 수질정화 기능을 포함하여 여러 가지 장점을 가지고 있어 농업배수와 같은 농업비점오염물질 처리에 적합한 것으로 보고되고 있다(김 등, 2006, 2008; 유 등, 2009; 장, 2005; 장 등, 2007, 2010; 한국농어촌공사, 2009a, 2009b; 한국농촌공사, 2006, 2007; 함 등, 2005). 장(2005)은 농업비점오염 저감을 위한 인공습지 설계인자 평가연구를 통해서 유입유량, 유입수질, 습지시스템배열, 체류시간을 설계인자로 제시한 바 있고, 김 등

(2008)과 함 등(2005)은 인공습지의 수처리 효과가 높은 습지시스템에 대하여 연구하였다.

하지만, 국내에서는 농지배수 처리를 위한 인공습지에 대한 일선 현장 조사설계자가 선행 연구자들의 연구결과를 곧 바로 실무에 적용하기에는 경험과 기초지식이 부족한 실정이다(장, 2005; 한국농촌공사, 2007). 따라서 이들 사용자를 위한 효율적인 사업계획과 조사설계에 사용될 수 있는 설계기법의 제시가 필요하다. 본 연구의 목적은 기존 선행연구 사례를 종합적으로 정리하여 장래 개발될 새만금 간척농지 중에서 논에서 배출되는 농업배수 처리를 위한 인공습지의 설계인자를 도출하여 현장조사설계자가 쉽게 적용할 수 있는 설계기법을 제시하는데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 방법

새만금 간척개발지 농업용지에서 배출 되는 농지배수 처리를 위한 인공습지 설계기법을 정립하기 위한 설계인자로는 장(2005)이 제시한 인공습지로의 유입유량, 유입수질과 습지시스템을 선정하였다. 인공습지의 설계유입량과 설계유입수질은 새만금호에 인접한 계화간척지(Fig. 1(b))를 대상으로 수질 및 유량 조사를 실시하고 그 결과(한국농어촌공사, 2009b)를 이용하여 설정하였다. 또한, 국내 간척지의 인공습지 장기운영 자료(한국농어촌공사, 2009a)를 이용하여 수처리 효율이 높은 인공습지 시스템 구성(Fig. 1(b))과 처리수질예측 회귀식을 도출하여 인공습지의 수처리효율과

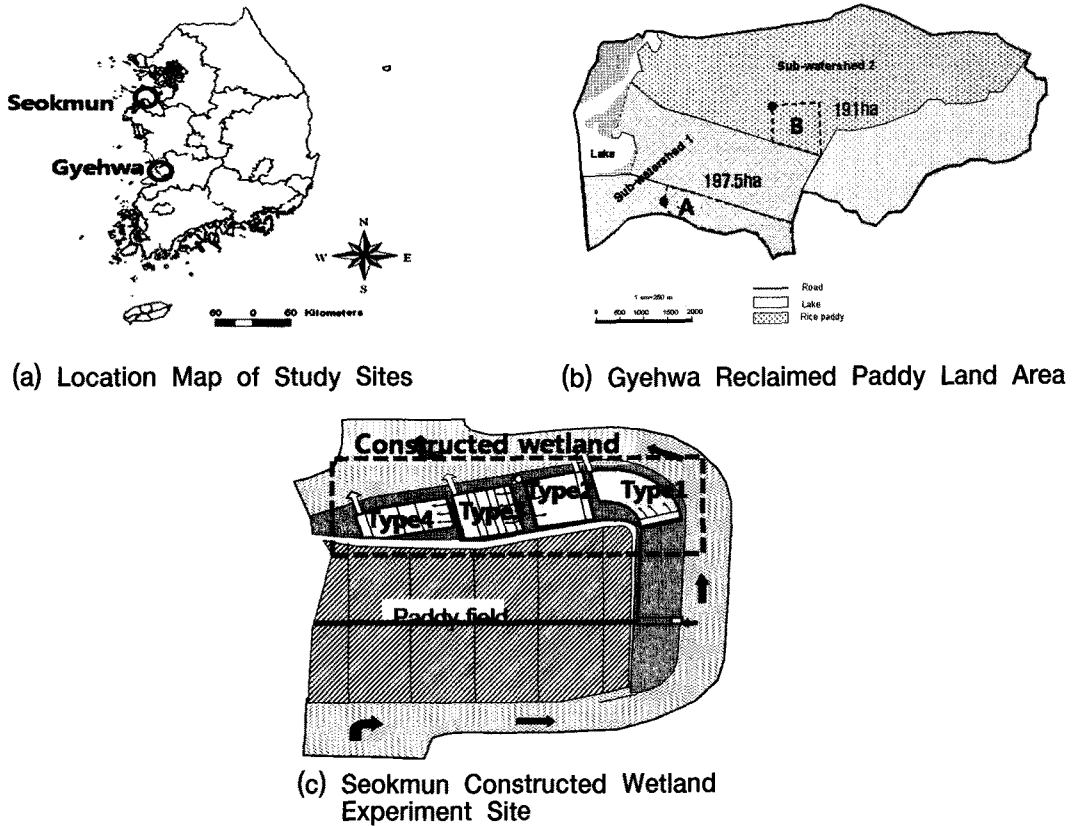


Fig. 1. Study Area

규모의 적정성에 대하여 평가하였다(Fig. 2).

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

2. 연구 재료

1) 인공습지 설계 유입량 및 유입수질 설정

설계 유입량과 설계 유입수질 설정을 위해서는 Fig. 1(b)와 같이 계화간척지의 A, B의 2개 지점에서 유량 및 수질조사는 실시하였다. 배수로의 유량은 2008년 6월부터 2008년 9월 말까지 자동관측장비를 이용하여 10분 단위로 연속 관측하였으며, 강우량 조사를 병행하였다. 설계유량(Q)은 식(1)과 같이 산정하였다.

여기서, Q_1 은 설계강우유출량(m^3/d)이며, Q_2 는 기저유출량(m^3/d)이다.

설계강우유출량은(Q_1)은 식(2)와 같이 산정하였다.

$$Q_1 = R \times C \times A \times C_q \quad (2)$$

여기서, R 은 설계강우량(mm/d), C 는 유출계수, A 는 배수구역면적(ha), C_q 는 강우유출량 포착율이다. R 은 장(2005)이 제안하였고 농업용수 수질개선사업(한국농촌공사, 2007)에서

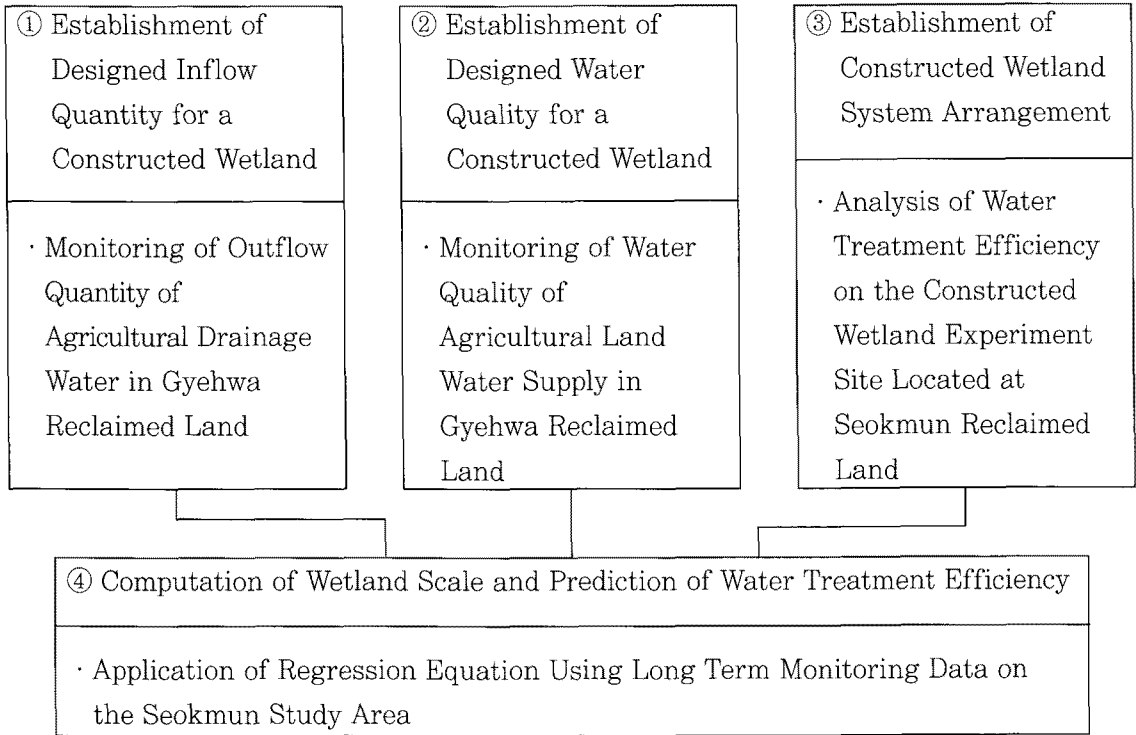


Fig. 2. Flow Chart for Conducting This Study

채택하고 있는 30mm 강우량법을 적용하고, C 와 C_q 는 연구유역에서 조사된 자료로부터 산정한 값을 적용하였다.

기저유출량(Q_2)은 식(3)과 같이 산정하였다.

$$Q_2 = q_d \times A \quad (3)$$

여기서, q_d 는 단위배수면적당 기저유출량 ($m^3/ha/day$), A 는 배수구역면적(ha)이다. 기저유출량(q_d)는 연구지구의 연속관측 유량자료로부터 기저유출량을 구한 후 이를 다시 배수구역면적으로 나누어 산정하였다.

인공습지 설계유입수질 설정을 위한 수질항목은 화학산소요구량(COD), 부유물질(SS),

총질소(TN), 총인(TP)의 4항목으로 하였으며, Fig. 1(b)의 유량조사 지점과 동일지점에서 강우시 채취한 물시료의 유량가중평균농도(Event Mean Concentration)를 이용하여 설정하였다.

2) 인공습지 시스템 선정

인공습지 수처리 시스템 선정과 유출수 수질 예측을 위해서는 Fig. 1(c)와 같이 간척지에서 농지배수 처리를 위해 다양한 인공습지 시험시설이 조성된 충남 당진군 석문간척지에 위치한 인공습지 시험포장을 선정하였다(한국농어촌공사, 2009a). 인공습지 시스템 구성은 Table 1과 같이 연못(Pond, P)과 식생습지(Vegetated Wetland, W)에 대해서, 각 각 단독의 경우와

Table 1. Parameters of the Wetlands and Ponds in Seokmun Study Area

Type	Width (m)	Length (m)	Area (m ²)	Depth (m)	HRT (days)	Flow Rate (m ³ /day)
Wetland	64	126.0	8,000	0.6	16~20	200~300
Pond	64	12.6	800	2.0	6~8	200~300

이들 두 시스템 배열을 연못이 식생습지 앞에 위치한 P-W와 뒤에 위치한 W-P와 같이 모두 4가지 시스템 배열에 대해서 장기모니터링 자료의 수처리 효율을 분석하여 처리효율이 높은 시스템을 선정하였다.

3) 인공습지 유출수 수질예측

인공습지의 유출수 수질예측을 위해서는 2002년부터 2007년까지의 석문 인공습지 실험지구의 장기모니터링 자료를 이용하여 단순 선형회귀식과 쉽게 구득할 수 있는 자료를 제시하여 조사설계자가 이용할 수 있도록 하였다. 실험기간 동안 수집된 자료를 통계용 전산 프로그램인 SPSS for windows 12.0에 의해 통계처리 하였다. 우선 인공습지 유출수 농도에 영향을 미치는 인자를 상관분석을 이용해 결정하였으며, 이 인자를 이용하여 다중회귀 분석을 실시하였다. 회귀분석에 의해 도출된

회귀식의 유의성 검토를 위해 결정계수(R²)를 구함으로써 각 인자를 포함하는 추정식의 정확성을 결정하였다.

III. 결과 및 토의

1. 인공습지 설계 유입수질 설정

인공습지 설계를 위한 유입수의 수질을 설정하고자 Fig.1(b)의 계화시험지구의 A와 B 지점에서 2008. 6.10~2008. 9.20 동안 2008년 6월28일, 7월25일, 8월18일에 3회의 강우사상에 대하여 수질 및 유량조사를 하였다. 강우량은 23.0~66.0mm 범위였다. Table 2는 강우전, 평균, 침투 및 EMC 농도를 정리한 것이며, Fig. 3은 A, B 지점에서 3회 강우조사 중에서 수질항목별로 유량과 농도 변화를 잘

Table 2. The Characteristics of Agricultural Drainage Water Quality in Gyehwa Study Area During the Surveyed Rainfall Events

Site		Before Rain (mg/L)				Mean Concentration (mg/L)				Peak Concentration (mg/L)				EMC (mg/L)			
		COD	SS	TN	TP	COD	SS	TN	TP	COD	SS	TN	TP	COD	SS	TN	TP
A	08. Jun	36.0	2.0	5.9	0.33	44.3	40.9	7.3	0.32	64.0	108.0	9.7	0.52	39.2	41.8	7.2	0.27
	08. Jul	28.0	14.0	2.8	0.47	26.7	41.3	2.4	0.50	36.0	9.5	3.4	0.90	25.0	31.2	2.4	0.48
	08. Aug	8.0	8.5	3.5	0.26	18.1	32.5	2.0	0.40	32.0	78.5	3.7	0.60	18.8	27.8	1.9	0.35
B	08. Jun	32.0	4.0	9.4	0.23	30.4	28.3	10.1	0.27	56	63.0	12.8	0.45	28.2	25.0	7.8	0.27
	08. Jul	24.0	4.7	1.9	0.24	29.6	7.1	1.4	0.23	52.0	11.3	3.2	0.27	25.2	31.4	2.4	0.48
	08. Aug	12.0	7.5	1.3	0.22	19.5	30.5	2.1	0.37	24.0	80.5	2.9	0.60	19.1	25.2	2.1	0.32

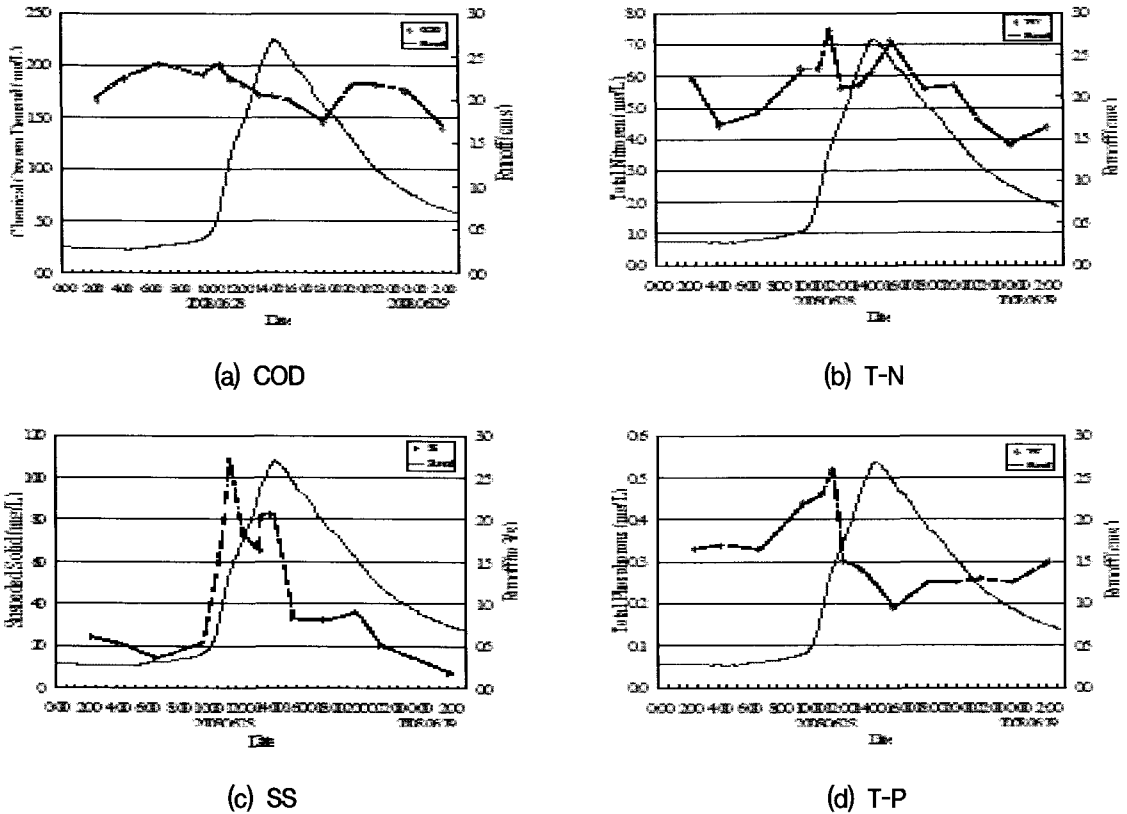


Fig. 3. Hydrograph and Water Concentration Curve in Gyeonha Study Area

보여 주는 것을 나타낸 것이다.

일반 논 지역에서는 COD는 유량변화에 따른 뚜렷한 경향이 없으나, 전체적으로 보았을 경우에는 유량 변화와 비례 관계를 나타내었다(장, 2005; 한국농어촌공사, 2009a). 계화간척지에서는 Fig. 3(a)와 같이 유량의 변화 따른 농도의 변화가 크지는 않지만, 침두유량 부근에서 농도가 감소하는 경향을 보이고 있어 일반 논 지역과 다소 다른 유출경향을 보이고 있다. 이는 Fig. 3(a) 계화간척지 논 지역의 COD가 15~20mg/L인 반면, 엄 등(2009)이 조사한 우기의 전북지역 농업용 하천유역의 1.1~7.8mg/L 보다 월등히 높은 값을 보이고

있어 강우에 의한 희석효과로 판단된다. 이렇게 농도가 높게 나타나는 것은 간척지의 영농 및 시비관행의 영향에 의한 영향(한국농어촌공사, 2009a)으로 판단된다. 일반 논 지역에서는 COD 농도가 인공습지의 배정농도(COD 5mg/L 정도)보다 낮거나 비슷하여 인공습지에서 처리효과가 거의 없다고 보고되고 있으나(김 등, 2008; 장, 2005; 장 등 2007; 한국농어촌공사, 2009a; 한국농어촌공사, 2007), 간척지 논 지역에서는 평시에 유출되는 농업배수의 COD도 처리대상이 됨을 의미한다.

T-N은 Fig. 3(b)와 같이 전반적으로 유량 변화와 유사한 경향을 보이며 초기세척현상도

Table 3. Designed Inflow Water Quality in Saemanguem Reclaimed Agricultural Land of Contaminated Wetland

Factors	COD	SS	T-N	T-P
Designed Concentration (mg/L)	25.9	30.4	3.97	0.36
Ordinary Water Quality (mg/L)	14.9	28.2	3.10	0.28

나타내고 있다. 이는 일반적인 농업지역의 강우시에 TN은 희석효과에 의해 유량피크 시기에 농도가 감소된 후 다시 회복되는 현상(장, 2005)과는 차이를 보이고 있다. 또한 농도도 엄 등(2009) 보다 높은 특징이 있다. Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)와 같이 SS와 T-P는 초기세척 효과가 나타나고 있으며, 유량변화와 비슷한 변화경향을 보이고 있다. 이는 일반 논 지역과 유사한 현상이다.

Table 2를 보면, 강우시 조사의 평균농도, 침투농도, EMC 농도는 강우전의 농도에 비해서 0.54~54.0배의 범위를 보여 조사시기와 수질항목에 따라 차이가 있었다. 먼저 침투농도의 경우, SS 항목에서 강우 직전에 비해 최대 54배까지 높았으며, 그 이외의 항목은 1.2~4.0배 수준으로 강우 직전 평시와 비교하여 농도의 큰 변화가 없는 특징이 있었다. EMC 농도는 SS가 2.2~20.9배로서 평시에 비해 높았고, 그 이외 항목은 0.5~2.4배로 큰 변화가 없었다. 각 항목별 EMC의 평균은 SS 30.4 mg/L, COD 25.9mg/L, T-N 3.97mg/L, T-P 0.36mg/L로서 평시의 1.0~4.5배 이고 SS를 제외한 항목은 평시와 강우시 수질농도의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 하지만, 평시의 수질도 전북지역 농업용 하천유역의 수질(엄 등, 2008)인 SS 3.1mg/L, COD 3.6mg/L, T-N 2.97mg/L, T-P 0.07mg/L 보다는 계화간척지 논 수질농도는 상당히 높은 수준이며 특히 COD와 T-P 항목의 농도가 높았다.

이상에서 볼 때, 간척지 논 지대에서 강우시 유출수의 수질 농도는 COD와 TN은 일반적인 논 지역과 다소 다른 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있었고, SS와 TP는 일반 논지역과 유사한 경향을 보이고 있었다. 하지만, 그 농도가 일반 논 지역에 비하여 매우 높은 특성이 있어, 인공습지가 간척지 논 지역의 농업배수 처리에 효과가 높을 것으로 판단된다. 여기서는 새만금 내부 간척지 논지역의 인공습지 설계 유입 수질은 Table 3과 같이 각 항목별 3회 조사 EMC의 평균값으로 설정하여도 무리가 없을 것으로 판단되고, 계화간척지의 강우 및 평시의 수질농도가 높아 인공습지에서 처리효과가 높을 것으로 판단된다.

2. 인공습지 설계 유입량 설정

Fig. 1(b)의 계화 시험지구에서 강우시 유출량 조사결과를 정리하면 Table 4와 같다. 강우량은 23.0~66.0mm 범위였고, 강우 지속시간은 4시간~18시간, 평균강우강도는 3.67~5.75mm/hr이었다. 총 유출량은 28,154~140,664m³이었다.

먼저, 설계유입량 결정을 위해 재료 및 방법의 식(1)~식(3)에서 필요한 각 인자를 다음과 같이 구하였다. 유출계수(C)는 계화지구 강우조사에 따르면, 각 강우사상별 C는 0.62~1.0의 범위를 나타냈다. 이는 일반적인 하천유역 관계기 유출계수인 0.7~0.8(윤, 1994)보다

Table 4. Water Flow and Parameters at the Rainy Season in Gyehwa Study Site

Region	Date	Antecedent Dry Day (days)	Rainfall (mm)	Rainfall Duration (hrs)	Water flow (m ³)	Coefficient of Runoff (C)
Site A (197.ha)	'08. 6. 28	6	66.0	18	140,664	1.00
	'08. 7. 25	1	23.0	4	32,294	0.73
	'08. 8. 18	1	23.5	5	38,316	0.85
Site B (191.0ha)	'08. 6. 28	6	66.0	18	103,119	0.79
	'08. 7. 25	1	23.0	4	28,154	0.62
	'08. 8. 18	1	23.5	5	45,765	0.99
Average						0.83

다소 높은 값을 나타내고 있었지만, 간척지 토양특성과 콘크리트 배수로 등의 조건을 고려할 때 금회 실측자료의 유출계수 값은 신뢰할 수 있는 범위에 있는 것으로 판단된다. 따라서 3회 강우사상의 유출계수의 평균값인 0.83을 식(2)의 C로 선정하여 인공습지 설계유량 산정에 적용하였다.

다음으로 식(2)의 C_q 를 결정하여야 한다. 일반적으로는 도시지역의 노면배수와 같이 초기세척 현상이 뚜렷한 경우에는 적은 유량만으로도 많은 오염부하량을 처리가능 하지만(장, 2005), 계화 시험지구와 같이 간척지 논 지대에서는 초기세척 현상이 일반 도시지역과 같이 뚜렷하지는 않았다. 때문에 많은 오염부하량을 처리하기 위해서는 유량도 그 만큼 많이 처리해야 되는 현상이 나타나는 것이 농업배수와 같은 비점오염 처리시설의 설계에 있어 공통된 해결 과제이다. 하지만, 유출량 전량을 처리하기 위해서는 많은 부지가 필요하기 때문에 합리적인 처리량의 결정이 필요하다. 여기서는 새만금 간척지의 내부개답지도 계화지구와 유사한 수질 및 유량 변화특성을 보일 것으로 가정하여, 유량과 수질의 변화 경향을 비교적 잘 나타내고 있는 SS를 목표 수질항목으로 선택

하여 식(2)의 C_q 를 산정하는데 이용하였다.

Fig. 4는 SS에 대한 강우시 수질-유량 자료로부터 누가부하량(P_o)과 누가유량(R_o)을 나타낸 그림이다. 인공습지 설계유량 결정에 있어서 가장 효과적인 그래프는 전반부에서 배가 크게 부른 형태가 유리하지만, Fig. 4는 1:1 선과 큰 차이를 보이지 않고 있어 불리한 형태를 보이고 있다. Fig. 4에서 첨두농도와 첨두유량을 보일 때까지 P_i/P_o 는 약 30%와 40% 수준으로 인공습지 설계유량으로는 부족하다고 판단된다. 일반적으로 농업용수 수질 개선사업(한국농촌공사, 2007)에서는 적정한 P_i/P_o 를 70%수준을 권장하고 있다. 따라서

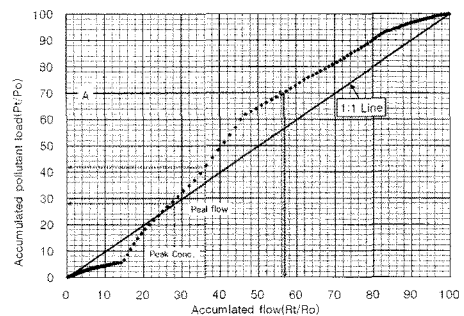


Fig. 4. Accumulated Flow and Accumulated Pollutant Load (SS) Graph at Site B in Gyehwa Study Area for Computing C_q

Fig. 4에서 P_t/P_o 가 70%를 나타낼 때(A라인)의 R_t/R_o 는 약 60%를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 R_t/R_o 비 즉, 식(2)에서 유출포작을 q 를 0.6으로 선정하였다. 이상에서 Q_1 의 산정에 필요한 R , C , q 의 값을 결정하였고 배수면적(A)만 결정하면 인공습지 설계유량을 결정할 수 있다.

다음으로 기저유출량(Q_2)를 결정하기 위해서는 단위면적당 기저유출량(q_d)을 결정하여야 한다. 이를 위해서 계화 시험지구의 B지점에서의 연속 유량관측 자료를 이용하였다(Fig. 5). B지점에서의 관개기 평시배수량은 관측 기간 중 90% 초과 확률을 가지는 값은 약 $500\text{m}^3/\text{hr}$ 이었다. 이 배수량은 상류 배수면적 191ha에서 배출되는 양으로서 단위면적당 기저유출량 C_q 는 약 $61\text{m}^3/\text{ha}/\text{day}$ 이다. 이 값은 농업생산기반정비사업계획설계기준(농림부, 2001)에서 제시하는 관개기 논에서의 평시배수량 값 보다 약 1/5~1/2 수준이며, 비관개기에 배출되는 값과 유사하게 나타났다. 인공습지 규모결정에서 평시 배수량은 그 다지 큰 영향을 미치지 않는다. 왜냐하면 대부분 이들 평시 배출량은 인공습지에서 거의 완벽하게 차집하여 처리할 수 있을 정도의 충분한 규모를

가지도록 설계되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 C_q 는 $61\text{m}^3/\text{ha}/\text{day}$ 로 결정하였다.

이상에서 인공습지 설계유량 설정에 필요한 설계인자들을 설정하였다. 이제 적절한 배수구역면적(A)을 결정하여야 한다. A의 결정을 위해서는 간척지 인공습지 적정규모도 고려하여야 한다. 인공습지에서는 습지 내에서 균등한 물의 흐름을 유도할 수 있어야 하며, 습지 내에서 단락현상이나 정체수역이 발생하지 않는 규모가 되어야 한다(장, 2005; 장 등, 2007). 그리고 습지의 유지관리, 현장 시공의 용이성 등도 함께 고려하여야 한다. 간척지 내부개답시에 인공습지를 별도로 설계하거나 시공하지 않고, 간척지 개답지의 논 구획의 형상을 유지할 수 있는 설계 및 시공이 필요하다. 따라서 이와 같은 조건을 고려할 때 일반적인 논 1필지의 면적은 1.0ha로 조성하고 있다.

만약 A를 100ha로 가정여 식(2)와 식(3)을 이용하여 결정된 R , C , C_q , q_d 를 적용하여 계산하면 Q_1 은 $14,930\text{m}^3/\text{d}$, Q_2 는 $6,100\text{m}^3/\text{d}$ 로서 총유량(Q)는 $23,800\text{m}^3/\text{d}$ 이 된다. 이때 농업용수 수질개선사업 조사설계 매뉴얼(한국농촌공사, 2007)에서 권장하고 있는 습지의 체류시간 6시간, 평균수심을 30cm 이용하여 소요습지 순면적을 계산하면 약 $17,533\text{m}^2$ 로서, 간척지 논 필지 1ha 크기를 초과하게 된다. 따라서 배수구역을 50ha로 한다면, Q_1 은 $7,470\text{m}^3/\text{d}$, Q_2 는 $3,050\text{m}^3/\text{d}$ 으로서 Q는 $10,520\text{m}^3/\text{d}$ 이 된다. 이 때 소요되는 습지 순면적은 $8,767\text{m}^2$ 으로서 관리도로 등 습지의 기타 소요면적을 포함하면 1ha정도의 규모와 비슷하다. 따라서 간척지 논 지대의 인공습지 설계유량은 50ha의 논지대에서 유출되는 양으로 설정하는 것이 합리적으로 판단된다. 이상의

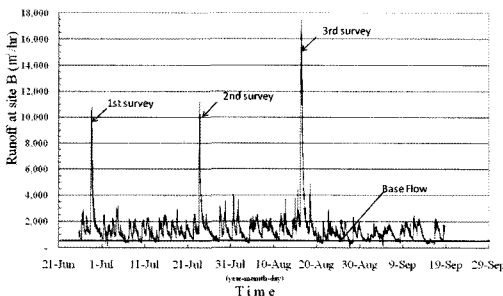


Fig. 5. Surveyed Runoff Graph at Site B in Gyehwa Study Area

Table 5. The Design Parameters at Deciding Design Flow for a Constructed Wetland

Design Rainfall (R)	Runoff Coefficient (C)	Runoff Capture Rate (C _d)	Unit Baseflow (q _d)	Drainage Area (A)	Design Flow (Q)
30mm/d	0.83	0.6	61 m ³ /ha/d	50ha	10,520 m ³ /d

인공습지 설계유량 설정 시에 고려되어야 할 인자를 정리하면 Table 3과 같다.

3. 인공습지 시스템 선정

Table 6은 Fig. 1(c)의 석문 인공습지 시험지구에서 4가지 인공습지 시스템별 2002~2007년 동안 장기모니터링 자료로부터 평균 수처리 효율을 수질항목별로 정리한 것이다.

4가지 시스템 유형별 수처리 효율의 범위는 COD가 -19~16%, 평균이 -6%, SS는 63~93%와 77%, T-N은 55~74%와 65%, T-P는 35~57%와 46%를 나타내었다. 4가지 시스템의 수질항목별 평균 수처리 효율은 COD<T-P<T-N<SS의 순으로 높게 나타났다. COD의 경우는 P-W 시스템을 제외하고는 모두 음의 효율을 보여, 인공습지가 유입수의 COD 농도가 낮은 곳에서는 COD 처리 효과는 낮다는 연구사례(김 등, 2008; 유 등, 2009; 장 등, 2007)와 유사한 경향을 보였다. SS 항목에 대해서는 4가지 시스템 모두가

60% 이상의 높은 수처리 효율을 보이고 있으며, 평균이 77%로서 수질항목 중에서 높은 수처리 효율 나타내고 있었다. T-N과 T-P 항목에 대해서도 평균 수처리 효율이 65%와 46%로서 비교적 높은 수처리효율을 보이고 있다. 따라서 4가지 유형의 인공습지 시스템이 COD를 제외한 항목에 대해서는 모두 높은 수처리를 효율을 나타내었다.

Table 6의 4가지 시스템 중에서 수질항목별로 가장 높은 수처리 효율을 보인 것은 P-W 시스템이었다. P-W는 수처리 효율이 4가지 시스템의 평균값 이상을 나타내면서 유일하게 COD도 양의 값을 나타내고 있었다. 항목별로 살펴보면 COD가 16%, SS는 93%, T-N 74%, T-P 54%로서 높은 수처리 효율을 나타내었다. 이는 개방수역이 식생습지 앞에 위치한 인공습지 시스템의 수처리 효율이 높다는 연구결과(함 등, 2005; 김 등, 2006; 김 등, 2008)와 같이, 연못이 식생습지의 전처리 공정 역할을 하고 식생습지로 산소공급을 통한 물질분해 촉진 등의 긍정적 영향을 미치기 때문에 판단

Table 6. Water Treatment Efficiencies According to the Wetland System Array in Seokmun Study Area

Wetland System	Retention Time (day)	Water Treatment Efficiency (%)			
		COD	SS	T-N	T-P
Pond (P)	1~8	-9	63	55	57
Vegetated Wetland (W)	5~27	-19	76	67	38
Vegetated Wetland + Pond(W-P)	15~20	-12	77	64	35
Pond + Vegetated Wetland(P-W)	15~20	16	93	74	54
Mean	-	-6	77	65	46

된다. 따라서 이상의 시스템별 수처리효율과 선행연구 사례를 종합적으로 고려할 때, 본 연구에서는 4가지 시스템 중에서 가장 높은 수처리 효율을 나타내는 P-W를 인공습지 시스템으로 선정하였다.

4. 인공습지 유출수 농도 예측

인공습지를 설계함에 있어 원하는 수처리 효율을 달성하기 위해서는 앞에서 검토한 설계유량, 설계수질 및 인공습지 시스템과 함께 습지 내부의 여러 가지 인자가 영향을 미친다. 유출수의 수질에 영향을 미치는 인자는 식생

종류, 식생피도, 유입수농도, 수온, 수리부하 (Hydraulic Loading Rate) 등으로 다양하다. 따라서 이러한 영향인자를 파악하기 위해서는 많은 자료로부터 도출되는 통계적 방법을 통한 경험식에 의존하게 된다. 하지만, 국내에서 인공습지에 대한 장기운영 모니터링 자료가 부족하여 북미습지 데이터베이스와 같은 많은 자료를 바탕으로 한 경험식의 도출은 어렵다. 본 연구에서는 석문 시험지구에서 2002년부터 2007년 동안의 모니터링 자료를 이용하여, 인공습지 유출수의 수질에 영향을 미치는 인자를 선정하기 위해 상관분석을 실시하고(Table 7), 상관관계가 높은 영향인자를

Table 7. Pearson Correlation Coefficients Among the Various Factors

Year 02~07	H.R. (cm/day)	Cover Index (%)	Water Temp. (°C)	Inf. BOD ₅ (mg/L)	Inf. T-P (mg/L)	Inf. T-N (mg/L)	Inf. TSS (mg/L)	Eff. BOD ₅ (mg/L)	Eff. T-P (mg/L)	Eff. T-N (mg/L)	Eff. TSS (mg/L)
H.R. (cm/day)	1.00										
Cover Index(%)	-0.11*	1.00									
Water Temp.(°C)	-0.04	0.71**	1.00								
Inf. BOD ₅ (mg/L)	0.06	0.06	-0.14*	1.00							
Inf. T-P (mg/L)	0.13*	0.04	-0.09	0.11	1.00						
Inf. T-N (mg/L)	0.20**	-0.43**	-0.55**	0.28**	0.25**	1.00					
Inf. SS (mg/L)	-0.15**	0.21**	0.26**	-0.03	0.25**	-0.10	1.00				
Eff. BOD ₅ (mg/L)	0.15**	-0.15**	-0.31**	0.64**	-0.01	0.23**	-0.13*	1.00			
Eff. T-P (mg/L)	0.20**	0.15**	-0.02	0.10	0.61**	0.17**	0.12*	0.03	1.00		
Eff. T-N (mg/L)	0.22**	-0.60**	-0.66**	0.05	0.22**	0.76**	-0.20**	0.19**	0.22**	1.00	
Eff. SS (mg/L)	-0.16**	-0.19**	-0.20**	0.13*	-0.10	0.01	0.20**	0.29**	-0.05	0.04	1.00

* Significant at 0.05 Level, ** Significant at 0.01 Level, Number of Samples: 304

Table 8. Outflow Water Quality Prediction System in Contaminated Wetland

Items	Simple Regression Analysis
SS	$4.2690 SS_i^{0.2638} q^{-0.1690}$ ($R^2 = 0.62$)
TN	$0.2983 TN_i^{1.2526} q^{0.1268}$ ($R^2 = 0.57$)
TP	$0.3857 TP_i^{0.9621} q^{0.2175}$ ($R^2 = 0.49$)
BOD ₅	$0.6249 BOD_5_i^{1.1012} q^{0.0562}$ ($R^2 = 0.53$)

* Subscript i: Inflow Water Quality Concentration, q: Hydraulic Loading Rate(m/d)

이용하여 단순회귀 및 다중회귀분석을 하였다.

Table 7에서와 같이 대상 항목별로 다르지만, 유출수 농도와 유의수준 99%에서 0.5이상의 높은 상관관계를 나타내는 것은 유입수의 농도였고, 다음으로 수리부하율, 피도, 수온이 상관관계를 나타내었다. TN은 피도와 수온과는 부(-)의 높은 상관관계를 나타내었다. 인공습지 유출수질 예측식은 현장 조사설계자가 설계시에 쉽게 구득이 가능하고 적용할 수 있는 변수가 유리하다. 이러한 변수는 Table 7의 상관관계를 고려할 때, 수리부하율(Hydraulic Loading Rate, q)과 유입수농도로 나타났다. 수리부하율은 습지면적과 설계유량이 결정되면 쉽게 구득이 가능하고, 유입수질은 현장에서 실측이나, 본 연구에서 제시된 값을 적용하면 될 것이다.

위에서 선정한 변수를 대상으로 인공습지 유출수 농도예측식은 Table 8과 같이 단순선형회귀식을 도출하였고, 각 수질항목별로 결정계수(R^2)는 0.49~0.62로 비교적 높게 나타났다.

국내에서 아직 인공습지 유출수 농도예측에 관한 선행연구가 많지 않은 점으로 고려할 때, Table 8의 예측식은 통계학적으로 높은 상관성을 나타내지는 않지만, 현장 조사설계자가 인공습지 효율추정을 위한 기본조사 등의 개략적인 조사설계서 작성에는 적용하여도 무리는 없을 것으로 판단된다.

단순회귀식에서 수리부하율은 간척지의 인공습지 제안면적 1ha 중에서 순수 습지면적으로 0.85ha로 가정하고 Table 5에서 제시된 배수구역 50ha에서의 설계유량 10,520m³/d가 유입되는 조건으로 하였다. 다만, 본 연구에서 계화사레지구의 강우시 수질조사에서 BOD₅에 대한 자료가 획득되지 않은 관계로 BOD₅는 예측에서 제외하였다. 제안된 회귀식에 의한 유출수의 농도와 수처리효율은 선행연구사례(김 등, 2008; 장 등; 2007; 한국농촌공사, 2009a)의 범위에 포함되는 것으로 판단된다. 따라서 Table 9의 예측식은 간척지 논 지역 농지배수 처리용 인공습지의 유출수

Table 9. Estimated Water Treatment Efficiencies and Concentrations by the Suggested Regression Equations

	SS	TN	TP
Inflow Concentration (Ci)	30.4	3.10	0.28
Outflow Conc. (Co)	10.1	1.26	0.12
Treatment Efficiency (%)	66	59	57

농도 예측에 이용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

이상에서 앞으로 간척지 논 지역에서 배출되는 농지배수 처리를 위한 인공습지의 설계 기법을 제안하고자 새만금호에 인접한 계화간척지에서 강우시 수질 및 유량조사를 실시하고 그 결과를 이용하여 인공습지의 설계유입량과 설계유입수질을 설정하였다. 또한, 국내 간척지 인공습지 장기 운영자료를 분석하여 인공습지 시스템과 유출수 농도예측 회귀식을 제안하였다.

설계유입수질과 설계유입량은 계화간척지 논 시험지역에서의 강우시 수질-유량 조사자료로부터 산정하였다. 설계유입수질은 각 수질항목별 평균EMC인 COD 25.9, SS 30.4, TN 3.97, 및 TP 0.36mg/L로 검토되었다. 인공습지 설계유입량 산정을 위한 인자로서 유출계수(C)는 0.83으로, 기저유출량(q_b)은 $61\text{m}^3/\text{ha}/\text{day}$ 으로, 유출량포착율(C_q)은 0.6으로 산정되었다. 인공습지에서의 유량의 균등분배, 일정한 수심유지와 유지관리 및 수처리 효율, 설계 및 시공 측면을 고려하였을 경우에 적절한 인공습지 면적은 1ha로 나타났고, 적절한 논지역 배수면적(A)은 50ha이며, 이상의 인자를 적용하여 산정된 인공습지 1ha에서 처리 가능한 유량은 $10,520\text{m}^3$ 로 나타났다. 인공습지 시스템은 가장 높은 정확효율을 나타내는 연못-식생습지(P-W)로 선정하였으며, 시험대상 인공습지 시스템의 유출수농도 예측은 유의수준 99%에서 높은 상관관계를 나타내는

유입수농도와 수리부하율을 이용한 단순선형 회귀식으로부터 도출하였다. 제안된 회귀식은 조사설계자가 현장에서 구득이 쉬운 간편한 인자만으로 구성되었고 기본조사 등 개략적인 조사설계시에 인공습지의 수처리 효율추정에 적용 하여도 무리가 없으므로 것으로 판단되었다.

따라서 이상에서 제시한 설계유량, 설계유입수질, 연못-습지 시스템 및 유출수질 예측식은 앞으로 조성될 새만금 간척지 논 지역에서 배출되는 농지배수 처리를 위한 인공습지 설계에 이용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다. 하지만 국내에서 간척지 논 지역을 대상으로 한 장기간의 유량 및 수질 모니터링 자료가 부족하므로 앞으로 이 부분에 대한 추가적인 연구를 통하여 제안된 설계인자의 지속적인 보완이 필요하다.

참고문헌

1. 국무총리실 등 관련부처 합동, 2011, 새만금종합개발계획.
2. 김형철, 윤춘경, 엄한용, 김형중, 함종화, 2008, 인공습지 내 개방수역 조성에 따른 처리효율분석, 한국물환경학회지, 24회 6호, pp. 709~717.
3. 김형철, 윤춘경, 함종화, 한정윤, 2006, 비점원오염제어를 위한 인공습지의 초기단계 연구, 한국하천호수학회지, 39권 4호, pp. 481~488.
4. 농림부, 농업기반공사, 2001, 농업생산기반정비사업계획설계기준 배수편, 대성사.
5. 안익성, 김영철, 이동률, 2007, 경작기 농경배수에 의한 오염물질의 배출, 한국물환경학회지, 23권 2호, pp. 266~273.
6. 엄미정, 문영훈, 안병구, 신용규, 2008, 전북지역 농업용 하천유역의 수질과 부하량 특성, 한국환경농학회지, 27권 2호, pp. 111~119.
7. 여미미, 이재도, 우강화, 김영철, 2009, 계화 간척지구 강우 유출수의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, 한국습지학회지, 11권 3호, pp. 9~19.
8. 윤광식, 최수명, 양홍모, 한국현, 한경수, 2001, 담수호 유입 오염부하량의 간척농지 영농 전·후 변화 예측, 농촌계획 : 한국농촌계획학회지, 7권 1호, pp. 27~36.

9. 윤용남, 1994, 공업수문학, 청문각, p. 282.
10. 유훈선, 강동환, 권병혁, 2009, 고흥만 간척지 내 인공습지에 의한 농경배수 정화효율에 관한 연구, 한국습지학회지, 11권 3호, pp. 37~47.
11. 장정렬, 2005, 농업유역 비점원오염 저감을 위한 자유수면형 인공습지 설계인자 평가, 서울대학교 박사학위 청구 논문, 서울대학교.
12. 장정렬, 최선화, 권순국, 2007, 식생습지와 개방수역의 배열에 따른 인공습지의 수처리특성, 수질보전 한국물환경학회지, 23권 1호, pp. 122~130.
13. 장정렬, 홍대벽, 김영철, 2010, 간척지 논지역 농지배수 처리를 위한 인공습지 설계, 한국습지학회 정기학술발표회 논문집, pp. 290~294.
14. 한국농어촌공사, 2009a, 담수호 수질개선시험조사 및 실용화 보고서.
15. 한국농어촌공사, 2009b, 새만금 배후지 수질개선 대책 연구, SH-01-13-02-09.
16. 한국농촌공사, 2006, 인공습지에 의한 수질개선 기법개발.
17. 한국농촌공사, 2007, 농업용수 수질개선 조사설계 매뉴얼.
18. 함중화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 신현범, 2005, 물리적 설계인자가 인공습지의 처리효율에 미치는 영향, 한국농공학회논문집, 47권 5호, pp. 87~97.