

뱀장어 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정

김종현 · 이경훈* · 이동길¹ · 박성욱¹ · 양용수¹

국립수산과학원 연구기획과 · ¹국립수산과학원 시스템공학과

Estimation of Green-House-Gas emissions from domestic eel farm

Jong-Hyun KIM, Kyounghoon LEE^{1*}, Dong-Gil LEE¹, Seong-Wook PARK¹, Yong-Su YANG¹

Research and Development Planning Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

¹Fisheries System Engineering Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

The purpose of the study is to estimate the Green-House-Gas (GHG) emissions from domestic eel farm in the water recirculation system or still-water system by the assessment of energy consumptions and GHG emissions for establishing to reduce standards of GHG from a sustainable perspective. GHG emission components as seeds, feed, fuel, electricity, fixed capital, fish respiration, and others were analysed at the different culture type between water recirculation system and still-water system by 3 stage farm size of small, medium, large scale. The result showed that the mean GHG emission of the eel farm was 18.7kg · CO₂ in the stage of production per fish 1kg at different culture type and farm size. Therefore it could be useful for policy, planning, and regulation of aquaculture development with establishing GHG reduction standards.

Keywords : Green-House-Gas, Domestic eel farm, water recirculation system, still-water system

서 론

2002년 국제에너지기구(IEA, 2002)의 통계에 의하면, 2000년도 기준 우리나라의 탄소배출량은 약 4.3억톤으로 세계 9위, 세계 전체 배출량의 1.8%를 차지하는 것으로 알려져 있으며, 1990년 이후 배출량 증가가 85.4%로 세계 최고의 증가세를 나타내고 있다. 이에 따라 우리나라에서도 2008년 8월 건국 60주년을 기념하여 저탄소 녹색 성장을 향후 60년 국가비전으로 제시하였고, 우리나라 온실가스 배출량 및 감축목표를 30%로 산정하고 제 2차 녹색성장추진계획안을 마련하였다. 2009년 기준 온실가스 총배출량은 607.6백만톤 · CO₂eq로 GDP 0.3% 성장이라는 낮은 경제성장에도 불구하고, 전년도 대비

약 0.9% 증가하였다. 분야별로는 에너지(84.9%)의 배출량이 가장 많고, 산업공정(9.3%), 농업(3.3%), 폐기물(2.5%) 순이며, 2008년 대비 에너지(1.3%) 및 농업(2.3%) 분야의 배출량은 증가한 반면, 산업공정(-2.7%)과 폐기물(-0.1%)의 배출량은 감소하고 토지와 임업(4.7%)에서의 흡수량은 증가한 것으로 보고되었다(NFRDI, 2012).

상업적인 양식 생산에 대한 종래의 경제성 분석은 대부분 생산 비용에 대한 이익만을 다룸으로써 생태적 또는 환경적 영향과 관련된 사회적인 비용을 고려하지 않고 있다. 그러나 최근 양식 생산량 증가와 함께 무분별한 자원 착취, 쓰레기 배출 등 자연 환경의 수용량에 미

*Corresponding author: khlee71@korea.kr, Tel:82-51-720-2583, Fax:82-51-720-2586

치는 영향 또한 점차 증가하고 있어 사회적으로 문제가 되고 있다 (Tyedmers, 2000). 앞으로 환경에 미치는 인간 활동의 영향을 최소한으로 줄이는 것이 바람직한 목표이지만, 가능한 효율적이고 환경의 영향을 최소화하여야 하는 환경친화적 개발 (sustainable development)은 미래의 식량생산 시스템으로 나아가야 할 것이다. 환경 파괴 없이 지속 가능성에 대한 전망은 에너지 분석과 온실가스 배출 분석으로 가능해진다. 에너지 분석은 주어진 공정으로 들어가는 직접 및 간접 에너지 투입량을 계산하는 형태 (Spreng, 1988)이며, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 온실가스의 배출은 지구 온난화와 해양 산성화에 미치는 잠재적인 영향과 직접 관련지어진다.

최근 미국, 캐나다, 노르웨이 등 수산 선진국에서는 양식 수산물, 배합사료, 양식 시스템 등이 환경에 미치는 영향 평가를 활발히 진행하고 있으며, 온실가스 배출 감축 교토 협약, 지속가능한 수산자원관리 규정 등 이행을 위해 노력하고 있다 (Colt et al., 2008; Ellingsen et al., 2009; Pelletier and Tyedmers, 2007; Tyedmers, 2000). 그러나 우리나라에서는 수산물, 특히 양식 수산물에 대한 환경영향 평가 연구가 거의 없는 실정으로, 2013년 이후 탄소 배출 의무 감축국에 편입될 경우 수산업 존립 기반에 위협이 우려된다. 이에 환경 개선과 온실가스 감축기준 설정을 위하여 수산물에 대한 에너지 사용량, 온실가스 배출량 등 기초자료 확보가 시급한 실정이다.

우리나라에서 뱀장어 양식의 급속한 발전은 1980년대에 들어와서 국민소득의 향상과 더불어 양질의 고단백질 수요가 급증함에 따라 뱀장어 양식업의 붐이 조성됨으로써 시작되었다 (NFRDI, 2009). 이 시기에 전국 각 지역에 양식장의 시설구조 변경과 뱀장어 양식 선진 국가인 일본으로부터 양식 기술이 도입되어 점차 양산체제를 구축하게 되었다. 1990년대에 들어서는 중간종묘 생산단계에서 지수식 양식방법에 의한 성만 생산체제로 탈바꿈하게 되었고, 2000년대 들어와서는 실용적인 순환여과식 시스템 도입으로 양식방법의 다변화가 시도되었으며, 현재 양만산업은 전국 양만장 508개소, 수면적 2,320천m², 양식 생산량 7,900톤, 양식 생산금액 1,934억원 등으로 수산업 규모에서 상위에 랭크되는 품목으로 자리매김하고 있다 (KOSIS, 2011).

뱀장어는 담수에서 성장하여 성숙하게 되면 바다에 내려가서 산란 부화하는 강해성 어류로서, 현재까지 양식용 종묘로서 사용되는 실뱀장어는 인공산이 생산되

지 않아 전량 강 어구 주변에서 채집되는 자연산 종묘에 의존하고 있다. 또한 실뱀장어는 우리나라에서 채포된 종묘 외에도 대만, 홍콩 등으로부터 이식되어 국내 반입한 종묘를 양식에 사용하고 있다. 최근 자연산 실뱀장어 채포량이 감소하고 있어 양어가에서 큰 어려움을 겪고 있는데, 이에 국립수산물과학원을 중심으로 인공산 실뱀장어 생산기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 한편 순환여과식 양식은 해양오염원 배출을 최소화하는 친환경 녹색양식으로, 외부와 독립된 사육시스템에서 생물의 배설물, 사료찌꺼기 등의 오염원을 자체적으로 여과 처리해 재사용하는 양식방법이다. 이를 통해 순환여과식 양식은 양식장 사육용수 소비량과 배출수를 최소화하고 저에너지 사용에 의해 탄소 배출을 저감할 수 있는 이점을 나타낸다. 최근 뱀장어 양식장의 시설이 지수식에서 순환여과식 양식방법으로 점차 전환되고 있으므로, 앞서 제시한 인공종묘생산 기술에 더하여 양식방법의 개발은 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 감소시킬 수 있는 방안으로 고려될 수 있다. 본 연구에서는 온실가스 배출량 산정을 위한 모델 어류로서 뱀장어를 선정하였으며, 환경파괴 없이 지속적인 양식 생산을 목표로 하는 뱀장어 양식장 (지수식, 순환여과식)에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하였다.

재료 및 방법

뱀장어 양식장 선정

뱀장어 양식장 탄소 배출량 산정은 지수식 양식과 순환여과식 양식으로 구분하여 실시하였다. 특히, 지수식 뱀장어 양식은 뱀장어 양식 표준지침서 (NFRDI, 2009)를 토대로 사육수 면적을 기준하여 소규모 (2,000m²), 중규모 (4,000m²), 대규모 (8,000m²)로 구분하였으며, 순환여과식 뱀장어 양식장의 경우 일반적인 수면적인 1,000m² 규모로 설정하였다. 그리고 탄소 산정을 위한 뱀장어 양식장의 배출요소별 분류는 종묘, 사료, 유류, 전기, 고정 자산, 어류 자체의 배출 등으로 구분하였으며, 그 밖의 항목은 배출량이 미미하였으므로 모두 통합하여 기타 배출량으로 계산하였다. 또한, 양식장에서 생산되는 뱀장어의 1kg당 생산단계별 탄소 배출량을 기준으로 단위생산량별 탄소 배출량을 산정하였다.

탄소배출량 이론적 산정

본 연구에서는 우리나라 이산화탄소 배출량 산정 체

계에 반영하고 있는 2006년도 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 산정방법을 사용하였다. 2006 IPCC 가이드라인에서는 Tier 1, Tier 2, Tier 3의 3가지 산정방법론을 제시하고 있다. Tier 1은 국가 고유 배출계수가 없을 때 사용하는 방법이며, Tier 2는 국가 고유 배출계수가 있을 때 사용하는 방법이다. Tier 3은 연료 종류, 연소 기술, 작동 조건, 통제 기술, 유지관리 방법, 장비 연식 등에 대하여 국가 고유 자료가 있을 때 사용 가능한 방법이다 (IPCC, 2006).

현재 우리나라는 인벤토리 작성에 필요한 에너지 부분의 배출계수를 개발하여 검증하고 있는 단계로, 아직 확정되지 않아 IPCC에서 제공하는 기본 배출계수를 이용하고 있는 것이다. 따라서 본 연구에서는 IPCC에서 제공하는 기본 배출계수를 이용하는 Tier 1 방법을 사용하였다. Tier 1 방법은 연료별 소비량에 연료별 배출계수를 곱하여 계산한다.

$$CO_2\text{배출량} = \text{연료소비연료} \times \text{배출계수}CO_2\text{연료} \quad (1)$$

본 연구에서는 IPCC 배출계수 적용을 위해 다음과 같은 배출계수를 산정하였다. 우선 사용되는 에너지원에 따른 석유환산톤 (TOE는 국제에너지기구, IEA에서 정한 석유환산톤 단위임)으로 산정한다. 즉, 각각 엔진제원에 대하여 원유 1톤이 발열하는 칼로리 기준으로 표준화하는 것이며, 탄소 배출계수는 각 연료별 발열량을 원유 1kg에 대한 발열량비를 기준으로 한 석유환산계수에 대한 2차 계수를 적용하였다 (Lee et al., 2010). Tier 1에 의한 이산화탄소 배출계수는 연료의 탄소 함유량을 기준으로 하며 연료탄소의 100%산화로 나타내야 한다. 국가 특정 CO₂ 배출계수와 순 발열량 자료를 사용하는 방식이 우선 선행되어야 하지만, IPCC에 표기된 자료를 바탕으로 배출량을 적용하였다. 또한, 연료에 포함되어 있는 모든 탄소가 100% 산화되어 각각 CO₂와 CH₄로 산

화되는 것으로 하여 총 탄소 배출량 식을 도식화하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum CO_2 = \sum CO_2 + \sum CH_4 \quad (2)$$

$$\sum CO_2 = l \times 0.85 \text{ (kg/l)} \times 43 \text{ TJ/Gg} \times 10 \times 74100 \text{ kg/TJ} + l \times 0.85 \text{ (kg/l)} \times 43 \text{ TJ/Gg} \times 10^{-6} \times 3.9 \text{ kg/TJ} \times 21 \quad (3)$$

여기서, *l*은 사용된 총 경유량, 경유 비중은 0.85kg/l, 경유 순 발열량은 43TJ/Gg, 경유 CO₂ 배출계수는 74,100kg/TJ, 경유 CH₄ 배출계수는 3.9kg/TJ, 은 Gg을 Kg로 바꾸기 위해서 사용된 것이고, 아래 쪽의 CH₄ 배출계수에 곱해진 21은 CH₄의 GWP 수치이며, 모든 온실가스를 탄소 배출량으로 표시하기 위해 사용되어진 값이다.

결과 및 고찰

종묘

종묘로부터 산정되는 탄소 배출량은 실뱀장어 어획시 소비되는 선박의 연료량으로부터 계산하였다. 실뱀장어채포협회에 의하면, 우리나라에서 실뱀장어를 어획하는 선박은 70%가 휘발유를 사용하는 정치망 작업선박, 그리고 30%가 경유를 사용하는 바지선 개조 선박이었으며, 실뱀장어 어획 어가수는 총 5,000어가로, 이중 조업 선박은 3,000어가로 조사되었다. 그리고 연중 작업일수는 4개월 동안 월 10일 작업하여 총 40일이며, 1일 작업시 소비되는 선박의 연료량은 휘발유가 50L, 경유가 200L로 조사되었다. 따라서 실뱀장어 어획시 소비되는 선박의 연료 소비량은 다음과 같이 계산되어진다. 휘발유의 경우 50L × 40일 = 2,000L/어가이므로 2,000어가에서 소비되는 연간 휘발유량은 4,000,000L (3,000어의 약 70%)이고, 경유의 경우 200L × 40일 = 8,000L/어가이므로 1,000어가에서 소비되는 연간 경유량은

Table 1. CO₂ emission according to fuel consumption of fishing boat for eels

CO ₂ emission	Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
Fuel consumption(L/yr)				
Gasoline	19,524	35,714	61,429	54,286
Diesel	39,048	71,429	122,857	108,571
CO ₂ emission(t · CO ₂ /yr)				
Gasoline	41.48	75.88	130.51	115.33
Diesel	101.26	185.24	318.61	281.56
Total	142.74	261.12	449.12	396.89

8,000,000L (3,000여가의 약 30%)이다.

한국민물장어생산자협회에 의하면, 2007년 국내 실뱀장어 어획량은 8,400kg, 외국으로부터 실뱀장어 이식량은 4,600kg로 조사된 바 있는데, 본 연구에서는 외국 선박의 연료 소비량 산정을 제외함으로써 실뱀장어의 이식 물량은 탄소 배출량 계산에 이용하지 않았다. 그리고 뱀장어 양식 표준지침서 (NFRDI, 2009)에 의하면, 2007년 양식장에 수용한 실뱀장어의 중량은 소규모 지수식 양식장이 41kg, 중규모 지수식 양식장이 75kg, 대규모 지수식 양식장이 129kg, 순환여과식 양식장이 114kg로 나타났다. 따라서, 양식장별 휘발유 및 경유의 소비량은 국내 실뱀장어 총 어획량, 실뱀장어 어획 시 소비되는 선박의 총 연료 소비량 및 양식장 실뱀장어 수용량으로부터 계산하여 소규모 지수식 양식장이 각각 19,524L 및 39,048L, 중규모 지수식 양식장이 각각 35,714L 및 71,429L, 대규모 지수식 양식장이 각각 61,429L 및 122,857L, 순환여과식 양식장이 각각 54,286L 및 108,571L로 계산되었다 (Table 1). 그리고 실뱀장어 어획 시 탄소 배출량은 연료별 발열량 및 탄소배출계수 (KEMCO, 2011)로부터 계산하여 소규모 지수식 양식장이 142.7t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 261.1t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 449.1t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 396.9t · CO₂/년으로 산정되었다.

사료

뱀장어의 사료 소비에 따른 탄소 배출량은 Table 2와 같다. 뱀장어 양식 표준지침서 (NFRDI, 2009)에 의하면, 양식방법 및 양식장 규모별 연간 사료 소비량은 소규모 지수식 양식장이 58,223kg, 중규모 지수식 양식장이 106,911kg, 대규모 지수식 양식장이 186,882kg, 순환여

과식 양식장이 191,934kg로 나타났다. 그리고 온실가스 산정표 (Colt et al., 2008)에 의하면, 사료 kg당 탄소 배출량은 3,300g로 제시되어 있다. 따라서, 뱀장어의 사료 소비에 따른 탄소 배출량은 소규모 지수식 양식장이 192.1t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 352.8t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 616.7t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 633.4t · CO₂/년으로 산정되었다.

유류

뱀장어 양식시 보일러 등 연료 소비에 따른 탄소 배출량을 산정한 결과는 Table 3과 같다. 뱀장어 양식 표준지침서 (NFRDI, 2009)에 의하면, 양식방법 및 양식장 규모별 연간 벙커-C유 소비량은 소규모 지수식 양식장이 60,000L, 중규모 지수식 양식장이 119,000L, 대규모 지수식 양식장이 173,200L, 순환여과식 양식장이 100,000L로 나타났다. 그리고 유류 소비에 따른 탄소 배출량은 연료별 발열량 및 탄소배출계수 (KEMCO, 2011)로부터 계산하여 소규모 지수식 양식장이 180.0t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 357.0t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 519.6t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 300.0t · CO₂/년으로 산정되었다.

전기

뱀장어 양식시 양수기, 수차 등 전력 소비에 따른 탄소 배출량은 Table 4와 같다. 뱀장어 양식 표준지침서 (NFRDI, 2009)에 의하면, 양식방법 및 양식장 규모별 표준 전기료는 소규모 지수식 양식장이 12,570천원, 중규모 지수식 양식장이 24,780천원, 대규모 지수식 양식장이 41,497천원, 순환여과식 양식장이 60,000천원으로 나

Table 2. CO₂ emission according to feed consumption

CO ₂ emission	Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
Feed consumption(kg/yr)	58,223	106,911	186,882	191,934
CO ₂ emission(t · CO ₂ /yr)	192.14	352.81	616.71	633.38

Table 3. CO₂ emission according to fuel consumption for the boiler

CO ₂ emission	Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
B-C fuel consumption(L/yr)	60,000	119,000	173,200	100,000
CO ₂ emission(t · CO ₂ /yr)	179.99	356.98	519.56	299.98

타났으며, 이를 전력량으로 환산하면 연간 전력 소비량은 소규모 지수식 양식장이 319,231kwh, 중규모 지수식 양식장이 602,473kwh, 대규모 지수식 양식장이 963,654kwh, 순환여과식 양식장이 1,471,978kwh로 계산되었다. 그리고 전력 소비에 따른 탄소 배출량은 발열량 및 탄소배출계수 (KEMCO, 2011)로부터 계산하여 소규모 지수식 양식장이 142.0 t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 268.0t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 428.6t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 654.7t · CO₂/년으로 산정되었다.

고정 자산

뱀장어 양식장 시설물의 철, 콘크리트, 플라스틱 등 고정 자산의 부식에 따른 탄소 배출량을 산정한 결과는 Table 5와 같다. 뱀장어 양식장 현장조사 결과, 양식방법 및 양식장 규모별 철, 콘크리트 및 플라스틱의 시설물량은 소규모 지수식 양식장이 각각 3,060kg, 718kg 및 7kg, 중규모 지수식 양식장이 각각 6,120kg, 1,436kg 및 14kg, 대규모 지수식 양식장이 각각 12,240kg, 2,872kg 및 28kg,

순환여과식 양식장이 각각 1,530kg, 359kg 및 4kg로 조사되었다. 그리고 온실가스 산정표 (Colt et al., 2008)에 의하면, 연간 철, 콘크리트, 플라스틱 등 고정 자산의 부식에 따른 kg당 탄소 배출량은 철이 166.7g, 콘크리트가 7.5g, 플라스틱이 200.0g로 제시되어 있다. 따라서 철, 콘크리트, 플라스틱 등 고정 자산의 부식에 따른 탄소 배출량은 소규모 지수식 양식장이 0.52t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 1.03t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 2.07t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 0.26t · CO₂/년으로 산정되었다.

어류 호흡

어류 호흡에 따른 탄소 배출량을 산정하기 위해 뱀장어 크기를 100g, 150g, 200g, 250g, 300g 및 350g의 6단계로 분류하여 28° C 조건에서 호흡률 실험을 수행하였다. 그 결과, 뱀장어 kg당 월간 산소 소비량은 시간당 산소 소비량 90.2 – 133mg로부터 0.065 – 0.096kg로 계산되었으며, 이로부터 뱀장어 kg당 월간 탄소 배출량은 0.047 – 0.070kg로 환산되었다 (Table 6).

Table 4. CO₂ emission according to such power consumption for the water turbine and pump etc.

CO ₂ emission	Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
Power consumption(kwh/yr)	319,231	602,473	963,654	1,471,978
CO ₂ emission(t · CO ₂ /yr)	141.99	267.98	428.63	654.74

Table 5. CO₂ emission according to corrosion of the fixed capital such as facilities

CO ₂ emission	Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
Facility amount(kg)				
steel goods	3,060	6,120	12,240	1,530
concrete goods	718	1,436	2,872	359
plastic goods	7	14	28	4
CO ₂ emission(t · CO ₂ /yr)				
steel goods	0.5101	1.0202	2.0404	0.2551
concrete goods	0.0054	0.0108	0.0215	0.0027
plastic goods	0.0014	0.0028	0.0056	0.0007
Total(t · CO ₂ /yr)	0.5169	1.0338	2.0675	0.2584

Table 6. Oxygen consumption and CO₂ emission of farmed fish with its respiration measurement

CO ₂ emission	Fish weight(g)					
	100	150	200	250	300	350
Oxygen consumption(mg · O ₂ /kg/hr)	133.0	106.9	95.3	94.0	93.4	90.2
Oxygen consumption(mg · O ₂ /kg/mo)	0.096	0.077	0.069	0.068	0.067	0.065
CO ₂ emission(kg · CO ₂ /kg/mo)	0.070	0.056	0.050	0.049	0.049	0.047

Table 7. Oxygen consumption and CO2 emission of farmed fish with its respiration measurement

month	mean growth (g)	Total body weight according to fish farmed type and size(kg)			
		Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
1	0.2	41	75	129	114
2	1	205	375	645	570
3	7	1,435	2,625	4,515	3,990
4	15	3,075	5,625	9,675	8,550
5	35	7,175	13,125	22,575	19,950
6	70	14,350	26,250	45,150	39,900
7	100	20,500	37,500	64,500	57,000
8	160	32,800	60,000	103,200	91,200
9	200	35,149	65,210	112,241	112,321
10	250	35,149	65,210	112,241	112,321
11	300	35,149	65,210	112,241	112,321
12	350	35,149	65,210	112,241	112,321

Table 8. CO2 emission produced by domestic farmed eels

CO2 emission	Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
Month(kg · CO ₂ /mo)				
1	2.9	5.2	9.0	8.0
2	14.3	26.2	45.1	39.9
3	100.3	183.5	315.7	279.0
4	215.0	393.3	676.5	597.8
5	501.7	917.7	1,578.5	1,394.9
6	1,003.4	1,835.5	3,157.0	2,789.9
7	1,433.4	2,622.1	4,510.0	3,985.6
8	1,843.6	3,372.4	5,800.6	5,126.1
9	1,759.8	3,264.9	5,619.6	5,623.7
10	1,736.2	3,221.1	5,544.2	5,548.1
11	1,724.8	3,199.9	5,507.8	5,511.7
12	1,666.1	3,091.0	5,320.2	5,324.0
Total(t · CO ₂ /yr)	12.00	22.13	38.08	36.23

양식방법 및 양식장 규모별 어류 자체의 탄소 배출량 산정을 위해서는 사육물량의 계산이 필수적이다. 이에 뱀장어 양식 표준지침서(NFRDI, 2009)에 제시된 월별 평균 체중성장 자료로부터 양식방법 및 양식장 규모별 총 사육물량을 환산하였다 (Table 7). 그리고 Table 7의 월별 사육물량 자료로부터 Table 6의 kg당 월간 탄소 배출량을 적용하여 사육어류 전체의 월별 탄소 배출량을 산정하였으며, 월별 자료를 합산한 어류 탄소 배출량은 소규모 지수식 양식장이 12.0t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 22.1t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 38.1t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 36.2t · CO₂/년으로 산정되었다 (Table 8).

기타

활어 트럭의 유류, 액화산소, CaCO₃ 등 소비에 따른 탄소 배출량은 표 9와 같다. 뱀장어 양식장 현장조사 결과, 양식방법 및 양식장 규모별 활어 트럭의 경우, 액화산소 및 CaCO₃의 소비량은 소규모 지수식 양식장이 각각 600L, 50,000kg 및 500kg, 중규모 지수식 양식장이 각각 900L, 100,000kg 및 1,000kg, 대규모 지수식 양식장이 각각 1,200L, 172,000kg 및 1,500kg, 순환여과식 양식장이 각각 1,200kg, 172,000kg 및 500kg로 조사되었다.

그리고 활어 트럭의 경유 소비에 따른 탄소 배출량은 연료별 발열량 및 탄소배출계수 (KEMCO, 2011)로부터 계산하여 소규모 지수식 양식장이 1.56t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 2.33t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식

Table 9. CO₂ emission according to live-fish transport consumption

CO ₂ emission	Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
Consumption(L/yr, kg/yr)				
live-fish truck deisel	600	900	1,200	1,200
liquid oxygen	50,000	100,000	172,000	172,000
CaCO ₃	500	1,000	1,500	500
CO ₂ emission(t · CO ₂ /yr)				
live-fish truck deisel	1.556	2.334	3.112	3.112
liquid oxygen	0.089	0.178	0.306	0.306
CaCO ₃	0.0002	0.0003	0.0005	0.0002
Total(t · CO ₂ /yr)	1.645	2.512	3.419	3.418

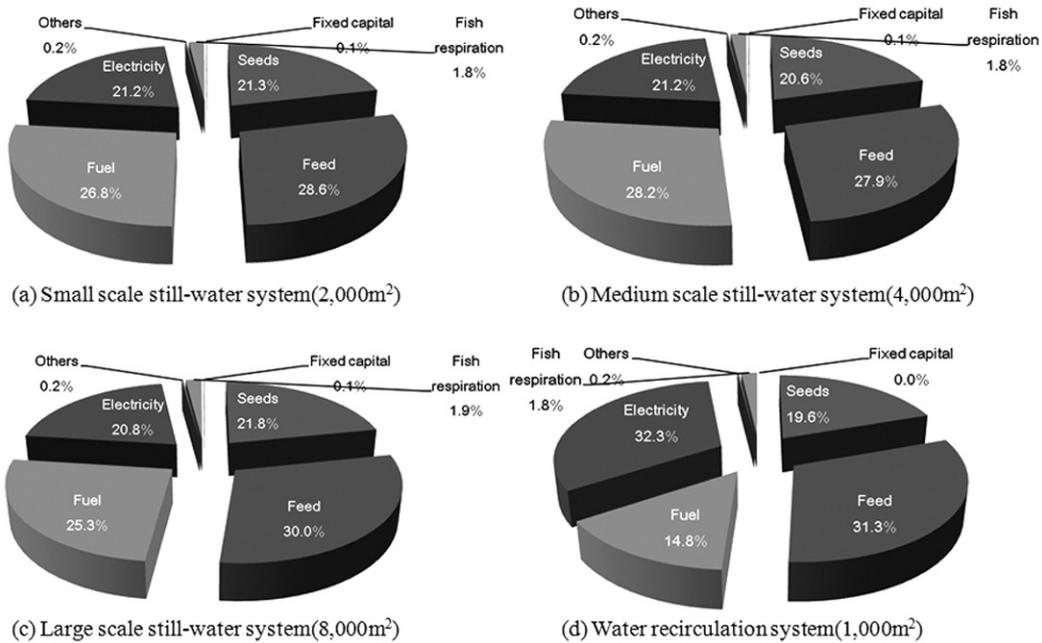


Fig. 1. Comparison of CO₂ emission ratio among each components in fish farm type and size.

장이 3.11t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 3.11t · CO₂/년으로 산정되었다. 또한 온실가스 산정표 (Colt et al., 2008)에 의하면, 액화산소 및 CaCO₃의 kg당 탄소 배출량은 각각 1.78g · CO₂ 및 0.34g · CO₂로 제시되어 있다. 따라서 액화산소 및 CaCO₃ 소비에 따른 탄소 배출량은 소규모 지수식 양식장이 각각 0.089t · CO₂/년 및 0.0002t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 각각 0.178t · CO₂/년 및 0.0003t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 각각 0.306t · CO₂/년 및 0.0005t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 각각 0.306t · CO₂/년 및 0.0002t · CO₂/년으로 산정되었다. 그 결과, 활어 트럭의 유류, 액화산소, CaCO₃ 등 소비에 따른 탄소 배출량의 합은 소규모 지수

식 양식장이 1.65t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 2.51t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 3.42t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 3.42t · CO₂/년으로 산정되었다.

뱀장어 양식장의 양식방법별, 양식장 규모별, 탄소 배출요소별 총 탄소 배출량을 정리한 결과는 Table 10과 같다. 여기서 취합된 양식방법별, 양식장 규모별 총 탄소 배출량은 소규모 지수식 양식장이 671t · CO₂/년, 중규모 지수식 양식장이 1,265t · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 2,058t · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 2,025t · CO₂/년으로 나타났다. 그리고 뱀장어 양식장의 양식방법별, 양식장 규모별 탄소 배출요소간 배출 비율을 비교한 결과, 모든 양식장에서 종묘, 사료, 유류, 전기

Table 10. CO₂ emission produced by each components fish in domestic farmed eels

CO ₂ emission (t · CO ₂ /yr)	Small scale still-water system (2,000m ²)	Medium scale still-water system (4,000m ²)	Large scale still-water system (8,000m ²)	Water recirculation system (1,000m ²)
Seeds	142.7	261.1	449.1	396.9
Feed	192.1	352.8	616.7	633.4
Fuel	180.0	357.0	519.6	300.0
Electricity	142.0	268.0	428.6	654.7
Fixed capital	0.5	1.0	2.1	0.3
Fish respiration	12.0	22.1	38.1	36.2
Others	1.6	2.5	3.4	3.4
Total	671.0	1,264.6	2,057.6	2,024.9

등 4가지의 배출요소가 전체 배출의 약 98%를 차지하였다 (Fig. 1). 또한, 탄소 배출 비율은 지수식 양식장의 경우 사료 및 유류가 25.3–30.0%로 높게 나타난 반면, 순환여과식 양식장의 경우 사료 및 전기가 각각 31.3% 및 32.3%로 높게 나타났다. 이에 대해서는 순환여과식 양식장이 지수식 양식장에 비해 보일러 등 유류 소비량이 적은 대신 사육수의 순환을 위한 전력 소비량이 큰 원인의 결과로 사료된다.

Table 10에 제시된 양식방법별, 양식장 규모별 총 탄소 배출량 자료로부터 Table 7의 생산량 자료를 적용하여 어류 생산단계별 kg당 탄소 배출량을 계산한 결과, 어류 kg당 탄소 배출량은 소규모 지수식 양식장이 19.09kg · CO₂/년, 중 규모 지수식 양식장이 19.39kg · CO₂/년, 대규모 지수식 양식장이 18.33kg · CO₂/년, 순환여과식 양식장이 18.03kg · CO₂/년으로 환산되었다. 다른 어류에서 연구된 어류 kg당 탄소 배출량 결과를 보면, 지수식으로 양식한 송어의 경우 4.1–4.5kg · CO₂, 가두리에서 양식한 연어의 경우 3.0–4.2kg · CO₂로 보고된 바 있는데, 조사기간의 차이로 본 연구의 결과와는 다소 큰 차이를 나타내었다 (Pelletier and Tyedmers, 2007; Ellingsen et al., 2009). 그러나, Colt et al. (2008)이 대서양 연어에서 보고한 양식방법별 탄소 배출량 결과에 의하면, 어류 kg당 탄소 배출량은 중력수 공급 유수식 양식장이 7.19kg · CO₂/년, 펌핑 유수식 양식장이 23.93kg · CO₂/년, 산소공급 유수식 양식장이 13.71kg · CO₂/년, 부분 순환 양식장이 9.58kg · CO₂/년, 난방 부분순환 양식장이 32.50kg · CO₂/년, 완전 순환 양식장이 11.05kg · CO₂/년으로 나타난 결과와 본 연구의 결과와 유사한 범위를 나타내었다.

따라서, 본 연구에서 순환여과식은 사육수 면적이 1,000m²로서, 대규모 지수식의 8,000m²와 비슷한 생산

결과를 보여 단위면적당 높은 생산량의 이점이 나타났다. 그러나 탄소 배출량에서는 양식 방법간 차이가 매우 적게 나타남으로써 순환여과식에서 탄소 저감의 이점이 크게 나타나지 않았다. 한편, 어선어업분야에서는 중층트롤어구의 고강도 망사의 적용에 따른 탄소저감효율은 기존 어구에 비해 약 23%정도 높은 것으로 나타났으나, 높은 가격과 마찰력에 약한 점 등의 경제성 부분에서 경쟁력이 낮은 것으로 평가되는 것과 같은 현 시점에서의 적용에 따른 기대가 적은 부분이 존재하는 선행 결과 (Lee et al., 2012; Park et al., 2012)를 토대로, 향후 뱀장어 양식에서 에너지 사용량 및 온실가스 배출량 저감을 위하여 에너지 저감형 저탄소 순환여과식 양식 시스템의 요소 기술 개발에 따른 평가와 함께 비용-편익분석을 바탕으로 경제성 분야의 검토도 고려하여 어업정책에 반영하여야 할 것으로 판단된다.

결론

현재 수산업 분야의 기후변화 대응과 관련하여 환경 파괴 없는 지속적인 수산양식물 생산을 목표로 온실가스 감축기준 설정을 위한 에너지 사용량, 온실가스 배출량 등 기초 자료 확보가 시급한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라 뱀장어 양식장에서 사용하고 있는 지수식 및 순환여과식 양식 시스템에서 생산되는 뱀장어 양식품종을 대상으로 양식장 탄소 배출요소로 종묘, 사료, 유류, 전기, 고정 자산, 어류, 기타 등으로 분류하여 지수식 및 순환여과식에 따른 양식방법별 탄소배출량과 양식장 규모별 탄소배출량을 산정하였다. 그 결과, 소규모 지수식 양식장 (2,000m²)은 뱀장어 1kg 생산단계에서 연간 19.09kg · CO₂, 중규모 지수식 양식장 (4,000m²)은 연간 19.39kg · CO₂, 대규모 지수식 양식장 (8,000m²)은 연간 18.33kg · CO₂가 배출되는 것으로 산

정되었으며, 순환여과식 양식장 (1,000m²)은 연간 18.03kg · CO₂가 배출되는 것으로 산정되었다. 따라서, 우리나라 뱀장어 양식장에서 생산단계별 단위 생산당 평균 18.7kg · CO₂가 배출되는 것으로 산정되었으며, 본 연구 성과는 우리나라 양식산업의 온실가스 감축기준 설정 등 양식 개발의 정책 및 계획 수립에 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 국립수산물학원 수산시험연구사업 및 해양수산부 지속가능한 어업생산체계구축 정책과제 (RP-2014-FE-001)의 지원에 의해 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

References

- Colt J, Summerfelt S, Pfeiffer T, Fivelstad S and Rust M. 2008. Energy and resource consumption of land-based Atlantic salmon smolt hatcheries in the Pacific Northwest (USA). *Aquaculture* 280, 94 – 108. (DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture/2008.05.014)
- Ellingsen H, Olaussen JO and Utne IB. 2009. Environmental analysis of the Norwegian fishery and aquaculture industry-A preliminary study focusing on farmed salmon. *Marine Policy* 33, 479 – 488. (DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2008.11.003)
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- Lee DW, Lee JB, Kim Y, Jung S, Lee H, Hong BK and Son MH. 2010. Calculation of CO₂ Emissions from Fuel combustions in Korean Fishery Industry. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 78 – 82. (DOI:http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2010.43.1.078)
- Lee K, Lee CW, Yang YS and Lee J. 2012. Development of a low-energy used large midwater trawl using a numerical method. *J Kor Soc Fish Tech* 48, 195 – 207. (DOI:http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2012.49.3.175)
- Park SW, Lee KH, Kang MJ and Park SK. 2012. Economic analysis of development of low-carbon trawl gear. *J Kor Soc Fish Tech* 48, 360 – 369. (DOI:http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2012.48.4.360)
- Pelletier N and Tyedmers P. 2007. Feeding farmed salmon: Is organic better? *Aquaculture* 272, 399 – 416. (DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.06.024)
- Spreng DT. 1988. *Net-energy Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems*. Praeger, NewYork, 11 – 289.
- Tyedmers PH. 2000. *Salmon and sustainability: the biophysical cost of producing salmon through the commercial salmon fishery and the intensive salmon culture industry*. Ph.D. thesis, University of British Columbia, 1 – 258.
- National Fisheries Research & Development Institute. 2009. *Standard manual of eel aquaculture*. 1 – 246.
- National Fisheries Research & Development Institute. 2012. *Assessment of Green House Gas emission and construction of Zero emission plan in Fisheries*, 1 – 225.
- Korea Energy Management COporation (National GHG Emission Total Information). URL <http://co2.kemco.or.kr/toe/toe.aspx>. Accessed December 2011.
- KOrean Statistical Information Service. URL <http://fs.fips.go.kr>. Accessed December 2011.

2014.2.3 Received

2014.2.14 Revised

2014.2.14 Accepted