

넙치 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정

양용수 · 임한규^{1*} · 이경훈² · 이동길 · 신형호²

국립수산물연구원 수산공학과, ¹목포대학교 해양수산자원학과, ²전남대학교 해양기술학부

Estimation of Green-House-Gas emissions from domestic aquaculture farm for flounders

Yongsu YANG, Han-Kyu LIM^{1*}, Kyoungsoon LEE², Dong-Gil LEE, Hyeong-Ho SHIN²

Fisheries Engineering Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

¹Department of Fisheries and Marine Resources, Mokpo National University, Mokpo 58554, Korea

²School of Marine Technology, Chonnam National University, Yesou 59626, Korea

This study aims to estimate the Green-House-Gas emissions from domestic farmed flounder in the southern sea and Jeju-Do, where is mainly produced, by the assessment of energy consumptions and GHG emissions from domestic fish farms for establishing reduce standards of greenhouse gas from a sustainable perspective. It needs to analyze such GHG emission components as feed, electricity, fuel, fixed capital, fish respiration, and liquid oxygen in two locations by 4 stage running water type farm size of small, small and medium, large and medium, large scale. The result showed that the mean GHG emissions were 36.83 kg·CO₂/year in the southern sea and 24.33 kg·CO₂/year in Jeju-Do, respectively, in the stage of production per fish 1kg at 2 locations and farm size from domestic farmed flounders, and it will give to be useful for policy, planning, and regulation of aquaculture development with establishing GHG reduction standards.

Keywords: Green-House-Gas, Domestic farmed flounder, running water type farm, GHG emission components

서론

국내 양식산업의 대표적 품종인 넙치는 국립수산물학원에서 1984년 인공 종묘 생산 기술을 개발한 이후에 급속하게 성장하였으며, 넙치 양식의 초창기 1987년에 불과 28톤이 양식 생산되었으나 (Choi, 2012), 최근에는 우리나라 전체 어류양식 생산량의 절반이 넘는 40,805톤 (2011년도 기준)을 생산하고 있다 (KOSIS, 2013). 넙치는 미래 대국민 단백질 공급의 역할을 수행

해야할 중요한 양식 품종일 뿐만 아니라, 국내 뛰어난 양식기술과 경제성을 바탕으로 해외 수출을 위한 유망 품종이 될 잠재력을 가지고 있다. 상업적인 양식 생산에 대한 종래의 경제성 분석은 대부분 생산 비용에 대한 이익만을 다룸으로써 생태적 또는 환경적 영향과 관련된 사회적인 비용을 고려하지 않았었다. 그러나 최근 양식 생산량 증가와 함께 무분별한 자원 사용, 오염원 배출 등 자연 환경의 수용량에 미치는 영향 또한 점차

*Corresponding author: limhk@mokpo.ac.kr, Tel : 82-61-450-2395, Fax : 82-61-452-8875

증가하고 있어 사회적인 걱정거리로 자라나고 있다 (Tyedmers, 2000). 앞으로 환경에 미치는 인간 활동의 영향을 최소한으로 줄이는 것이 바람직한 목표이지만, 가능한 효율적이고 환경의 영향을 최소화하여야 하는 환경 친화적 지속가능한 개발은 미래의 식량생산 시스템의 개발 방향이 되어야 할 것이다. 환경파괴 없이 지속 가능성 (sustainability)에 대한 전망은 에너지 분석과 온실가스 배출 등의 분석으로 어느 정도 가능하다. 에너지 분석은 주어진 공정으로 들어가는 직접 및 간접적인 에너지 투입량을 계산하는 형태이며 (Spreng, 1988), 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 탄화플루오르 등 온실가스의 배출 요소는 지구 온난화와 해양 산성화에 미치는 잠재적인 영향과 직접 관련되어 있다.

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

넙치 육상수조식 양식업이 활기를 띠기 시작한 것은 1990년대부터이며, 육상 수조식 양식어업권은 1981년대 중반에 불과 15건 미만이었지만 1980년대 말에 50건으로 증가하였고 1990년에는 571건으로 기하급수적으로 늘어났다 (Choi, 2012). 이와 같이, 넙치 양식 기술 발달과 함께 빠르게 늘어난 육상 수조식 양식장들은 가두리나 축계식 양식장과 비교하여 운영함에 있어서, 많은 에너지를 소비하는 구조를 가지고 있다. 이들 양식장은 육상에 기본 시설인 수조를 설치하고 그밖에 다른 부대시설을 갖추어 넙치를 계획적으로 사육할 수 있다는 장점은 가지고 있지만, 사육 수조 외에 많은 부대시설을 필요로 한다. 즉, 양식용 수조에 해수를 공급하는 양수시스템과 배관, 펌프를 비롯한 각종 기계들에게 전력을 공급하는 전기시설, 넙치의 먹이를 보관하는 사료 저장용 냉장고, 산소를 공급하는 액체질소나 송풍장치, 정전을 대비한 비상발전기 등 다양한 부대시설을

갖추고 있다. 그러므로 넙치 양식장은 초기 건축비용이 많이 소요되고 공사도 어려운 것이 특징이다. 국립수산과학원 (2006)에 따르면 시설비 투자비가 가장 높은 것은 전기 시설로서 전체의 23.5%를 차지하며 두 번째는 사육 시설로 전체의 22.1%를 차지한다고 하였다. 세 번째는 가온시설이라고 하였으나, 최근에는 유류비 상승으로 대부분의 양식장에서 가온을 하고 있지 않다.

현재 국내 넙치 양식업은 국제 경쟁력을 확보한 후 해외시장으로 진출하기 위하여 백신개발, 고효율 배합사료 개발, 육종을 통한 우수품종 개발 등에 집중하고 있다. 또한 육상 수조식 양식장의 배출수로 인한 오염 부하량을 최소화하여 친환경 녹색양식을 실현하기 위하여 순환여과식 양식 시스템 개발에 주력하고 있다. 순환여과식 양식은 외부와 독립된 사육시스템에서 생물의 배설물, 사료찌꺼기 등의 오염원을 자체적으로 여과 처리하여 재사용하는 양식방법이다. 이를 통해 양식장 사육용수 소비량과 배출수를 최소화하고 저에너지 사용에 의해 탄소 배출을 저감할 수 있는 이점을 가지고 있다. 따라서 앞서 제시한 기술 개발에 더하여 순환여과식 양식방법의 개발은 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 감소시킬 수 있는 방안으로 고려될 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 아직 넙치 양식장의 대부분을 차지하고 있는 우수식 육상양식장을 대상으로 규모별 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하였으며, 본 연구의 결과는 향후 온실가스 감축기준 설정 등 양식 개발의 정책, 계획 수립에 활용될 것으로 기대된다.

재료 및 방법

넙치 양식장 선정

넙치 양식장 탄소 배출량 산정은 넙치양식장의 규모가 다양하고 분포도 제주도와 남해안에 집중된 점을 고려하여 남해안과 제주지역으로 나누어 선정하였다. 특히 넙치 양식의 경우 넙치 양식 표준지침서 (NFRDI, 2006)를 토대로 사육 수면적을 기준하여 소규모 (1,650 m²이하), 중소규모 (1,650~3,300 m²), 중대규모 (3,300~4,950 m²), 대규모 (8,250 m²)의 4 단계로 재구분하였다. 그리고 탄소 산정을 위한 넙치 양식장의 배출요소별 분류는 사료, 전기, 유류, 고정 자산, 어류 자체 배출 등으로 구분하였으며, 그 밖의 항목은 배출량이 미미하였으므로 모두 통합하여 기타 배출로 계산하였다.

탄소배출량 이론적 산정

본 연구에서는 우리나라 이산화탄소 배출량 산정 체계에 반영하고 있는 2006년도 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 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.

$$CO_2\text{배출량} = \text{연료소비}_{\text{연료}} \times \text{배출계수}_{CO_2, \text{연료}} \quad (1)$$

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 엔진 제원에 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 포함되어있는 모든 탄소가 100% 산화되어 각각 CO₂와 CH₄로 산화되는 것으로 하여 총 탄소 배출량 식을 도식화하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서, l 은 사용된 총 경유량, 경유 비중은 0.85 kg/l, 경유 순 발열량은 43 TJ/Gg, 경유 CO₂ 배출계수는 74,100 kg/TJ, 경유 CH₄ 배출계수는 3.9 kg/TJ, 10⁻⁶은 Gg을 Kg로 바꾸기 위해서 사용된 것이고, 아래의 CH₄ 배출계수에 곱해진 21은 CH₄의 GWP 수치이며, 모든 온실가스를 탄소 배출량으로 표시하기 위해 사용된 값이다.

결과 및 고찰

사료

넙치 양식 표준지침서 (NFRDI, 2006)에 의하면, 양식방법 및 양식장 규모별 연간 사료 소비량 및 그에 따른 탄소 배출량은 Table 1과 같다. 남해안에 소재한 넙치 양식장들의 규모별 사료 소비량은 소규모 양식장이 126,100 kg, 중소규모 양식장이 179,625 kg, 중대규모 양식장이 286,375 kg, 대규모 양식장이 808,000 kg으로 나타났다. 제주도에 소재한 양식장은 규모에 따라 172,900~819,000 kg으로 남해안과 비교하여 29% 더 공급하고 있었다. 온실가스 산정표 (Colt et al., 2008)에 의하면, 사료 kg당 탄소 배출량은 3,300 g로 제시되어 있다. 따라서, 넙치의 사료 소비에 따른 탄소 배출량은 남해안에 소재한 소규모 양식장이 416.1 t-CO₂/년, 중소규모 양식장이 592.8 t-CO₂/년, 중대규모 양식장이 945.0 t-CO₂/년, 대규모 양식장이 2,666.4 t-CO₂/년으로 산정되었다. 제주도의 경우, 사료 소비에 따른 탄소 배출량은 소규모 양식장이 570.6 t-CO₂/년, 중소규모 양식장이 815.3 t-CO₂/년, 중대규모 양식장이 1,308.9 t-CO₂/년, 대규모 양식장이 2,702.7 t-CO₂/년으로 산정되었다.

전기

넙치 양식에는 양수기, 브로워, 냉동 창고 등 전력 소비에 따른 탄소 배출량은 Table 2와 같다. 넙치 양식 표준지침서 (NFRDI, 2006)에 의하면, 양식 지역과 양식장 규모별 표준 전기료는 소규모 양식장이 23,623천원,

중소규모 양식장이 35,724천원, 중대규모 양식장이 59,485천원, 대규모 양식장이 85,245천원으로 나타났으며, 이를 2006년 전기요금을 기준으로 전력량을 환산하였다. 지역과 규모별 연간 전력소비량은 남해안의 경우 소규모 양식장이 609,855 kwh, 중소규모 양식장이 928,316 kwh, 중대규모 양식장이 1,553,605 kwh, 대규모 양식장이 2,231,500 kwh로 계산되었다. 제주도의 경우에는 소규모, 중소규모, 중대규모, 대규모 양식장이 각각 891,105 kwh, 1,353,625 kwh, 2,261,829 kwh, 3,246,434 kwh였다. 전력 소비에 따른 탄소 배출량은 발열량 및 탄소배출계수로부터 계산하였다 (KEMCO, 2013). 석유환산계수는 순발열량기준 0.230이었고 전기 사용량 (소비 기준) 1 kWh당 탄소 배출량은 0.00047 t-CO₂였다.

따라서, 넙치 양식장의 전력 소비에 따른 탄소 배출량은 남해안에 소재한 소규모 양식장이 286.6 t-CO₂/년,

중소규모 양식장이 436.3 t-CO₂/년, 중대규모 양식장이 730.2 t-CO₂/년, 대규모 양식장이 1048.8 t-CO₂/년으로 산정되었다. 제주도의 경우 탄소 배출량은 소규모 양식장이 418.8 t-CO₂/년, 중소규모 양식장이 636.2 t-CO₂/년, 중대규모 양식장이 1063.1 t-CO₂/년, 대규모 양식장이 1525.8 t-CO₂/년으로 산정되었다.

유류

넙치 양식시 보일러 등 연료 소비에 따른 탄소 배출량을 산정한 결과는 Table 3과 같다. 넙치 양식 표준지침서 (NFRDI, 2006)에 의하면, 지역과 양식장 규모별 유류비의 편차는 너무 커 큰 편차를 조절할 수 없다고 기술하고 있다. 따라서, 지역별 조사한 유류비의 평균 값을 가지고 단위면적당 유류비 (보일러 등유 기준)를 산정하였다.

Table 66. CO₂ emission in consequence of feed consumption

CO ₂ emission		S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Southern Sea	Feed consumption(kg/yr)	126,100	179,625	286,375	808,000
	CO ₂ emission(t-CO ₂ /yr)	461.1	592.8	945.0	2,666.4
Jeju-Do	Feed consumption(kg/yr)	172,900	247,050	396,625	819,000
	CO ₂ emission(t-CO ₂ /yr)	570.6	815.3	1,308.9	2,702.7

※ S: Small Scale running water type, SM: Small and Medium scale running water type, LM: Large and Medium scale running water type, L: Large scale running water type

Table 67. CO₂ emission in consequence of power consumption

CO ₂ emission		S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Southern Sea	Power consumption(kg/yr)	609,855	928,316	1,553,605	2,231,500
	CO ₂ emission(t-CO ₂ /yr)	286.6	436.3	730.2	1,048.8
Jeju-Do	Power consumption(kg/yr)	891,105	1,353,625	2,261,829	3,246,434
	CO ₂ emission(t-CO ₂ /yr)	418.8	636.2	1,063.1	1,525.8

※ S: Small Scale running water type, SM: Small and Medium scale running water type, LM: Large and Medium scale running water type, L: Large scale running water type

Table 68. CO₂ emission in consequence of fuel consumption

CO ₂ emission		S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Southern Sea	Fuel consumption(kg/yr)	16,620	24,930	41,550	83,099
	CO ₂ emission(t-CO ₂ /yr)	40.6	60.8	101.4	202.8
Jeju-Do	Fuel consumption(kg/yr)	1,867	2,800	4,667	9,333
	CO ₂ emission(t-CO ₂ /yr)	4.6	6.8	11.4	22.8

※ S: Small Scale running water type, SM: Small and Medium scale running water type, LM: Large and Medium scale running water type, L: Large scale running water type

남해안의 경우 양식장 규모별 연간 16,620~83,099 L의 유류를 사용하였고, 제주도에서는 남해안보다 훨씬 적은 1,867~9,333 L의 유류를 사용하였다. 유류 소비에 따른 탄소 배출량은 연료별 발열량 및 탄소배출계수 (KEMCO, 2013)로부터 계산하였으며, 이때 석유환산계수는 순발열량 기준 0.820이었고 등유 사용량 1 L당 이산화탄소 배출량은 0.00244 t-CO₂였다. 따라서, 남해안의 경우 양식장 규모별 탄소 배출량은 40.6~202.8 t-CO₂/년이었으며 제주도는 이보다 적은 4.6~22.8 t-CO₂/년으로 산정되었다.

고정 자산

넙치 양식장 시설물의 철, 콘크리트, 플라스틱 등 고정 자산의 부식에 따른 탄소 배출량을 산정한 결과는 Table 4와 같다. 넙치 양식장 현장 조사 결과, 양식장이 위치한 지역별로는 차이를 보이지 않았고 양식장 규모별 철, 콘크리트 및 플라스틱의 시설물량은 매우 다양하고 편차가 컸다. 따라서, 탄소배출량 산정을 위해서는 현장 조사한 평균값을 일률적으로 적용하였다.

철과 콘크리트, 플라스틱의 사용량은 소규모 양식장이 각각 8,350 kg, 116,650 kg 및 26,650 kg, 중소규모

양식장이 각각 12,525 kg, 174,975 kg 및 39,975 kg, 중대규모 양식장이 각각 20,875 kg, 291,625 kg 및 66,625 kg, 대규모 양식장이 각각 41,750 kg, 583,250 kg 및 133,250 kg로 평가되었다. 그리고 온실가스 산정표 (Colt et al., 2008)에 의하면, 연간 철, 콘크리트, 플라스틱 등 고정 자산의 부식에 따른 kg당 탄소 배출량은 철이 166.7 g, 콘크리트가 7.5 g, 플라스틱이 200.0 g로 제시되어 있다. 따라서, 철, 콘크리트, 플라스틱 등 고정 자산의 부식에 따른 탄소 배출량은 소규모 양식장이 7.597 t-CO₂/년, 중소규모 양식장이 11.395 t-CO₂/년, 중대규모 양식장이 18.992 t-CO₂/년, 대규모 양식장이 37.984 t-CO₂/년으로 산정되었다.

어류 호흡

어류 호흡에 따른 탄소 배출량을 산정하기 위해 넙치 크기를 10 g, 200 g, 600 g 및 1,000 g의 4단계로 분류하여 20℃ 조건에서 호흡률 실험을 수행하였다. 그 결과, 넙치 체중 kg당 월간 산소 소비량은 45,216~330,408 mg·O₂/kg 이었으며, 이로부터 뱀장어 1 kg당 월간 탄소 배출량은 0.04~0.26 kg·CO₂/kg으로 환산되었다 (Table 5).

Table 69. CO₂ emission according to corrosion of the fixed capital such as facilities

CO ₂ emission	S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Facility amount(kg)				
Steel goods	8,350	12,525	20,875	41,750
Concrete goods	116,650	174,975	291,625	583,250
Plastic goods	26,650	39,975	66,625	133,250
CO ₂ emission(t-CO ₂ /yr)				
Steel goods	1.392	2.088	3.480	6.960
Concrete goods	0.875	1.312	2.187	4.374
Plastic goods	5.330	7.995	13.325	26.650
Total	7.597	11.395	18.992	37.984

* S: Small Scale running water type, SM: Small and Medium scale running water type, LM: Large and Medium scale running water type, L: Large scale running water type

Table 70. Oxygen consumption and CO₂ emission of farmed fish with its respiration measurement

CO ₂ emission	Fish weight (g)			
	10	200	600	1,000
Oxygen consumption(mg·O ₂ /kg/hr)	458.9	248.9	127.5	62.8
Oxygen consumption(mg·O ₂ /kg/mo)	330,408.0	179,208.0	91,800	45,216.0
CO ₂ emission(kg·CO ₂ /kg/mo)	0.26	0.14	0.07	0.04

* mg·O₂/kg/mo=mg O₂/kg/hr×24(day)×30(month)

* kg·CO₂/kg/mo=mg O₂/kg/mo*0.8/1,000,000

Table 71. fish farmed capacity conversion by individual mean weight growth in the southern sea

Month	Mean growth (g)	Total body weight according to fish farmed type and size (kg)			
		S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
1	14.5	747	1,120	1,867	3,734
2	20.4	1,033	1,550	2,583	5,167
3	45.6	2,271	3,407	5,678	11,357
4	110.5	5,411	8,116	13,527	27,054
5	180.8	8,700	13,051	21,751	43,502
6	270.4	12,784	19,176	31,959	63,919
7	360.8	16,753	25,129	41,882	83,764
8	404.5	18,440	27,660	46,101	92,201
9	430.2	19,249	28,873	48,121	96,243
10	450.8	19,789	29,684	49,474	98,947
11	465.6	20,046	30,069	50,115	100,230
12	490.8	20,716	31,075	51,791	103,582

※ S: Small Scale running water type, SM: Small and Medium scale running water type, LM: Large and Medium scale running water type, L: Large scale running water type

Table 72. fish farmed capacity conversion by individual mean weight growth in Jeju-Do

Month	Mean growth (g)	Total body weight according to fish farmed type and size (kg)			
		S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
1	30.6	1,943	2,915	4,858	9,716
2	50.4	3,128	4,692	7,819	15,639
3	90.2	5,468	8,201	13,669	27,338
4	175.7	10,397	15,596	25,993	51,986
5	245.6	14,180	21,269	35,449	70,898
6	332.6	18,723	28,084	46,807	93,615
7	425.2	23,323	34,984	58,307	116,614
8	505.3	26,988	40,482	67,470	134,940
9	609.3	31,664	47,497	79,161	158,322
10	698.8	35,308	52,962	88,271	176,541
11	770.9	37,840	56,760	94,600	189,200
12	837.5	39,902	59,853	99,755	199,509

※ S: Small Scale running water type, SM: Small and Medium scale running water type, LM: Large and Medium scale running water type, L: Large scale running water type

사육 물량

지역별 및 양식장 규모별 어류 자체의 탄소 배출량 산정을 위해서는 사육물량의 계산이 필수적이다. 이에 따라, 넙치 양식 표준지침서 (NFRDI, 2006)에 제시된 월별 평균 체중성장 자료와 생존율, 종묘 사육밀도를 적용하여 양식지역 및 양식장 규모별 총 사육물량을 산하였다 (Table 6, 7). 이때 남해안 지역은 통영 인근

에 위치한 양식장 조사 자료를 바탕으로 종묘 입식량은 103마리/3.3 m²이었고, 평균 생존율은 82%였다. 제주 지역의 종묘 입식량은 127마리/3.3 m²이었고, 평균 생존율은 75%였다. Table 6과 7의 월별 사육물량 자료로부터 Table 5의 kg당 월간 탄소 배출량을 적용하여 사육어류 전체의 월별 탄소 배출량을 산정하였다. 월별 자료를 합산한 어류 탄소 배출량은 남해안 지역의 경우

소규모 양식장 12.54 t-CO₂/년, 중소규모 양식장 21.81 t-CO₂/년, 중대규모 양식장 36.52 t-CO₂/년, 대규모 양식장 72.71 t-CO₂/년이었으며, 제주의 경우 소규모 양식장 21.76 t-CO₂/년, 중소규모 양식장 32.64 t-CO₂/년, 중대규모 양식장 54.39 t-CO₂/년, 대규모 양식장 108.78 t-CO₂/년으로 산정되었다 (Table 8, 9).

기타

넙치 양식과정 중 사료, 전력, 유류, 사육어류 및 시설물의 부식에 의한 탄소발생량 외에 탄소를 발생시킬 요인은 액화산소로 탄소 배출량은 Table 10과 같다. 액체산소 소비량은 지역과 규모별로 편차가 크기 때문에, 설문 조사한 결과를 평균한 값을 사용하였다. 넙치 양식장 현장 조사를 수행한 결과, 양식지역과 양식장 규모별 액화산소의 소비량은 소규모 양식장이 7,500 kg, 중소규모 양식장이 11,250 kg, 중대규모 양식장이 18,750 kg 및 대규모 양식장이 37,500 kg으로 조사되었다. 온실가스 산정표 (Colt et al., 2008)에 의하면, 액화산소의 kg당 탄소 배출량은 1.78 g으로 제시되어 있다. 따라서, 액화산소 소비에 따른 탄소 배출량은 소규모 양식장이 0.013 t-CO₂/년, 중소규모 양식장이 0.020 t-CO₂/년, 중대규모 양식장이 0.033 t-CO₂/년, 대규모 양식장이 0.067 t-CO₂/년으로 산정되었다.

넙치 양식장에서 발생하는 탄소 배출량 산정

남해안 넙치 양식장의 양식장 규모별, 탄소 배출요소별 총 탄소 배출량을 산정한 결과는 Table 11과 같다. 양식장 규모별 총 탄소 배출량은 소규모 양식장이 765.41 t-CO₂/년, 중소규모 양식장이 1,123.12 t-CO₂/년, 중대규모 양식장이 1,832.03 t-CO₂/년, 대규모 양식장이 4,028.77 t-CO₂/년으로 나타났다. 제주지역 넙치 양식장의 규모별, 탄소 배출요소별 연간 총 탄소 배출량을 정리한 결과, 소규모 양식장, 중소규모 양식장, 중대규모 양식장 및 대규모 양식장이 각각 1,023.41 t-CO₂/년, 1,502.32 t-CO₂/년, 2,456.83 t-CO₂/년, 4,398.17 t-CO₂/년으로 나타났다.

한편, Table 6과 7에 제시된 생산량 자료와 Table 11과 12에 산정된 탄소 배출량 자료로부터 넙치 1 kg을 생산하는데 배출되는 탄소량을 산정하였다 (Table 13). 남해안의 경우 넙치 1 kg당 탄소 배출량은 소규모 양식장이 36.9 kg-CO₂/년, 중소규모 양식장이 36.1 kg-CO₂/년, 중대규모 양식장이 35.4 kg-CO₂/년, 대규모 양식장이 38.9 kg-CO₂/년으로 산정되었다. 제주의 경우 소규모 양식장이 25.6 kg-CO₂/년, 중소규모 양식장이 25.1 kg-CO₂/년, 중대규모 양식장이 24.6 kg-CO₂/년, 대규모 양식장이 22.0 kg-CO₂/년으로 산정되었다.

Table 73. CO₂ emission produced by farmed flounder in the southern sea

CO ₂ emission	S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Month (kg-CO ₂ /mo)				
1	194	291	485	971
2	269	403	672	1,343
3	591	886	1,476	2,953
4	758	1,136	1,894	3,788
5	1,218	1,827	3,045	6,090
6	1,790	2,685	4,474	8,949
7	2,345	3,518	5,863	11,727
8	1,291	1,936	3,227	6,454
9	1,347	2,021	3,368	6,737
10	1,385	2,078	3,463	6,926
11	1,403	2,105	3,508	7,016
12	1,450	2,175	3,625	7,251
Total(t-CO ₂ /yr)	14.5	21.8	36.4	72.7

Table 74. CO₂ emission produced by farmed flounder in Jeju-Do

CO ₂ emission	S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Month (kg·CO ₂ /mo)				
1	505	758	1,263	2,526
2	813	1,220	2,033	4,066
3	1,422	2,132	3,554	7,108
4	1,456	2,183	3,639	7,278
5	1,985	2,978	4,963	9,926
6	2,621	3,932	6,553	13,106
7	1,633	2,449	4,081	8,163
8	1,889	2,834	4,723	9,446
9	2,217	3,325	5,541	11,083
10	2,472	3,707	6,179	12,358
11	2,649	3,973	6,622	13,244
12	1,596	2,394	3,990	7,980
Total (t·CO ₂ /yr)	21.8	32.6	54.4	108.8

Table 75. CO₂ emission in consequence of consumption of liquid oxygen

CO ₂ emission	S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Consumption(L/yr, kg/yr)				
Liquid oxygen	7,500	11,250	18,750	37,500
CO ₂ emission(t·CO ₂ /yr)				
Liquid oxygen	0.01	0.02	0.03	0.07

Table 76. Total CO₂ emission produced by each components for flounder in the southern sea

CO ₂ emission (t·CO ₂ /yr)	S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Feed	416.1	592.8	945.0	2,666.4
Electricity	286.6	436.3	730.2	1,048.8
Fuel	40.6	60.8	101.4	202.8
Fixed capital	7.6	11.4	19.0	38.0
Fish respiration	14.5	21.8	36.4	72.7
Liquid oxygen	0.01	0.02	0.03	0.07
Total	765.41	1,123.12	1,832.03	4,028.77

Table 77. Total CO₂ emission produced by each components for flounder in Jeju-Do

CO ₂ emission (t·CO ₂ /yr)	S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Feed	570.6	815.3	1,308.9	2,702.7
Electricity	418.8	636.2	1,063.1	1,525.8
Fuel	4.6	6.8	11.4	22.8
Fixed capital	7.6	11.4	19.0	38.0
Fish respiration	21.8	32.6	54.4	108.8
Liquid oxygen	0.01	0.02	0.03	0.07
Total	1,023.41	1,502.32	2,456.83	4,398.17

Table 78. CO₂ emission in consequence of 1 kg production by location and size for farmed flounder.

CO ₂ emission (t·CO ₂ /yr)	S Farm (1,650m ²)	SM Farm (1,651~3,330m ²)	LM Farm (3,301~4,950m ²)	L Farm (4,951~8,250m ²)
Southern Sea	36.9	36.1	35.4	38.9
Jeju-Do	25.6	25.1	24.6	22.0

다른 어류에서 연구된 어류 1 kg당 탄소 배출량 결과를 보면, 지수식으로 양식한 송어의 경우 4.1~4.5 kg·CO₂, 가두리에서 양식한 연어의 경우 3.0~4.2 kg·CO₂로 보고된 바 있는데, 조사기간의 차이로 본 연구의 결과와는 다소 차이를 나타내었다 (Pelletier and Tyedmers, 2007; Ellingsen et al., 2009). 그러나, Colt et al (2008)이 대서양연어에서 보고한 양식방법별 탄소 배출량 결과에 의하면, 어류 kg당 탄소 배출량은 펴핑 유수식 양식장이 23.93 kg·CO₂/년, 난방 부분순환 양식장이 32.50 kg·CO₂/년으로 나타나 1년 동안 조사한 본 연구의 결과와 유사한 범위를 나타내었다. 또한, 국내에서 연구한 뱀장어의 경우도 지수식 양식장은 18.33~19.39 kg·CO₂/년으로 본 연구보다는 다소 낮았지만 비교적 높은 값을 보였다 (Kim et al, 2014; NFRDI, 2012).

결론적으로 본 연구에서는 넙치의 경우 수온 조건이 좋아 성장이 빠르고 생산성이 좋은 제주도가 남해안에 분포하는 양식장보다 규모별로 큰 차이를 보이지는 않았으나, 탄소 배출량이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

결론

현재 수산업 분야의 기후변화 대응과 관련하여 지속적인 수산양식물 생산을 목표로 온실가스 감축기준 설정을 위한 양식어업별 온실가스 배출량 등에 관한 기초 자료 확보가 시급한 실정이다. 본 연구에서는 우리나라 넙치 양식장의 규모가 다양하고 지역분포가 집중되어 있는 남해안과 제주도를 중심으로 넙치 양식품종을 대상으로 양식장 탄소 배출요소로 사료, 전기, 유류, 고정 자산, 어류, 액화산소로 분류하여 지역별 탄소배출량과 양식장 규모별 탄소배출량을 산정하였다. 그 결과, 남해안 해역 생산단계에서 발생하는 넙치 1kg당 탄소 배출량은 평균 36.83 kg·CO₂/년, 수온조건이 좋아 성장이 빠르고 생산성이 좋은 제주도 생산단계에서 발생하는

넙치 1 kg당 탄소 배출량은 평균 24.33 kg·CO₂/년으로 산정되었으며, 본 연구 성과는 우리나라 양식산업의 온실가스 감축기준 설정 등 양식 개발의 정책 및 계획 수립에 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 국립수산물과학원 수산시험연구사업 (R2015042) 및 해양수산부 지속가능한 어업생산체계구축 정책과제의 지원에 의해 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

References

- Choi JY. 2012. Study on the changing of fishing ground use and regulation of aquaculture fishery. pp 1-331.
- 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: 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: 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.
- Kim JH, Lee K, Lee DG, Park SW and Yang YS. 2014. Estimation of Green-House-Gas emissions from domestic eel farm. *J Kor Soc Fish Tech* 50(1), 58-66. (doi: 10.3796/ksft.2014.50.1.058)
- 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(1), 78-82.
- Pelletier N and Tyedmers P. 2007. Feeding farmed salmon: Is organic better? *Aquaculture* 272, 399-416. (doi: 10.1016/j.aquaculture.2007.06.024)
- Spreng DT. 1988. Net-energy Analysis and the Energy

- Requirements of Energy Systems. Praeger, NewYork, pp 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, Canada, p 258.
- National Fisheries Research & Development Institute. 2006. Standard manual of flounder aquaculture. 1-192.
- 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 COrporation (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.
-
2015. 11. 02 Received
2015. 11. 25 Revised
2015. 11. 26 Accepted