

Note

연어(*Oncorhynchus keta*)의 밀양강 분포 및 소상 한계선 파악

홍동현¹ · 성기백² · 고의정¹ · 정은송¹ · 조현빈^{1,3} · 주기재^{1,*}

¹부산대학교 생명과학과, ²원진수산영어조합법인, ³부산대학교 환경·에너지연구소

The Distribution and Migration Boundary Lines of *Oncorhynchus keta* in the Milyang River. Donghyun Hong¹ (0000-0002-7712-2685), Ki Baik Seong² (0000-0003-1186-830X), Eui-Jeong Ko¹ (0000-0002-6098-7877), Eunsong Jung¹ (0000-0002-0707-2846), Hyunbin Jo^{1,3} (0000-0001-8064-7880) and Gea-Jae Joo^{1,*} (0000-0002-5617-7601) (¹Department of Integrated Biological Science, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; ²Waterco, Chungnam 32138, Republic of Korea; ³Institute for Environment and Energy, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea)

Abstract In this study, we carried out a distribution and migration boundary lines of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in the Milyang River. We measured the total length of dead chum salmon. As a results, 40 chum salmon were found during the study period, 25 dead salmon and 15 alive individuals. The ratio of female was 64%. We verified the migration boundary lines of chum salmon based on a sighting survey until detecting a structure that chum salmon are not able to migrate upstream. We discovered that chum salmon were not able to migrate up to 13 km in a mainstream of the Milyang River and up to 12 km in the Danjang stream (a tributary of the Milyang River) from upstream of the Yerim Bridge. Therefore, our results indicate that Milyang River should improve a river connectivity by demolishing weirs that disturb chum salmon's migration or installing appropriate fishways. Also, effective legislations are needed to retain naturalness in spawning ground and micro-habitats to increase the survival rate of parrs and smolts.

Key words: *Oncorhynchus keta*, sighting survey, migration boundary lines, weirs, river connectivity

서 론

연어목의 연어과 어류는 대부분 하천과 바다를 회유하는 소하성(anadromous) 어류이며, 현재 한반도에는 10속 11종이 서식하는 것으로 보고되고 있다(Kim and Park, 2002; Chae *et al.*, 2019). 이 중 우리나라 하천으로 회귀하는 연어과는 연어(*Oncorhynchus keta*)와 송어(*Oncorhynchus masou masou*)가 존재하며, 동해안을 비롯하여 일본 북해도,

알래스카, 베링해 등 북태평양에 널리 분포하는 냉수성 어종이다(Groot and Margolis, 1991). 연어 생체량(biomass)의 95%는 해양성 유기물로 이루어져 있어서 산란 후 사망 시 하천-해양 물질순환에 중요한 역할을 하고있으며(Bilby *et al.*, 2003), 모천으로 회귀하는 성질이 대중들에게도 잘 알려져 있어 심미적인 관점에서도 가치가 높다(Kulmala *et al.*, 2012). 뿐만 아니라 북태평양소하성어류 위원회(NPAFC, North Pacific Anadromous Fish Commission)에서는 하천으로 소상하는 연어가 생태계에 주는 영향과 연어 자원 관리에 대한 중요성을 인지하고 있는 등, 연어 생태 및 환경에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(Braton, 1992; Seeb *et al.*, 2004; Esteve, 2005; Urawa *et al.*, 2009).

Manuscript received 20 November 2020, revised 14 December 2020, revision accepted 14 December 2020
* Corresponding author: Tel: +82-51-510-2258, Fax: +82-51-583-0172
E-mail: gjjoo@pusan.ac.kr

우리나라는 북태평양 연어 회귀 국가들 중 최남단에 위치해 있으며(Kim *et al.*, 2007; Kwon *et al.*, 2014), 주요 연어 회귀 하천인 강원도 양양 남대천과 울산 태화강을 중심으로 연어의 성숙란을 채취하고 인공수정-부화시켜 치어방류사업을 정부차원에서 대대적으로 실시하고 있다(Lim, 1990). 하지만 회귀량과 회귀율은 댐 또는 보 건설로 인한 물리적 단절(Gleick, 2001), 자치어 시기의 높은 사망률(Fukuwaka and Suzuki, 2001), 수온 상승(Battin *et al.*, 2007) 등에 의해 크게 좌우되며, 2000년대 이후 회귀율이 1% 미만으로 크게 떨어졌다(Lee *et al.*, 2007). 따라서 연어의 회귀량과 회귀율을 높여 줄 수 있는 하천연결성 강화와 산란처 건강성 회복에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

밀양강은 낙동강의 중-하류에 위치한 주요 지천이며 1949년부터 연어 치어 방류 사업이 시행되는 등(Lee *et al.*, 2007), 과거부터 연어가 회유하던 지역이었다. 하지만 1987년 낙동강에 하굿둑 건설이 완료된 이후 연어의 소상이 물리적으로 대부분 차단되었으며, 취수 등의 목적으로 건설된 보로 인해 밀양강으로 회귀하는 연어의 개체수는 급격하게 감소하였다. 그러나 최근 밀양강에서 과거에 비하여 상대적으로 많은 개체수의 소상이(2020년 10월 중순) 낙동강하굿둑 건설 이후 최초로 보고되고 있어, 이에 따라 지속적인 연어 회귀를 장려하기 위해 밀양강 일대에 회귀하는 연어에 대한 체계적이고 정량적인 조사가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 밀양강 일대의 연어 분포 실태 및 소상 한계선을 추정하고, 이를 통해 하천으로 회귀한 연어자원의 효과적인 보전 방안을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

본 조사는 밀양강의 연어의 개체수를 2020년 10월 25일에서 11월 28일까지 확인하였다. 밀양강에 소상한 연어의 개체 확인을 위해 10월 25~31일, 11월 8~28일에 예림교(35°28'12"N, 128°45'49"E)에서 상하류 1 km 구간 내 연어 사체와 생존 개체를 확인하였다. 또한 연어의 소상 한계선 확인을 위한 조사는 10월 31일에 실시하였다. 내수면어법 시행령 17조(시행 2010. 6. 18)에 의거하여 10월 11일부터 11월 31일까지 연어의 채집이 금지되어 있어, 육안으로 연어의 활동을 관찰하는 목시조사(Sighting survey)를 실시하였다. 밀양강의 예림교 인근은 초지 및 산책로가 조성되어 있으며 수심이 얕아 접근이 용이하여(Nakdong River Flood Control Office, 2020) 예림교 아래의 밀양강의 수변부와 하천으로 직접 진입하여 살아있는 개체수와 사체를 육안으로 확인하였다. 살아있는 개체의 경우 인위적인 교란을 최소화하기 위해 5 m 이

상 이격하여 개체수를 측정하였다. 또한 연어의 산란 및 발생 확인을 위해 산란장으로 판단된 지역에서 연어의 난(卵)을 육안으로 확인하였다. 사체의 경우 전장은 cm 단위로(오차범위: 0.1 cm) 측정하였으며, 연어의 암-수 구별은 Kim and Park (2002)을 기준을 따라 판별하였다.

밀양강으로 회귀하는 연어의 소상 실태를 파악하기 위해 밀양강의 하천연결성을 확인하였다. 소상 한계선 설정은 예림교 상류방향에 존재하는 보들을 대상으로 연어의 통과 가능 여부를 확인하였으며, 최종적으로 통과가 불가능한 보가 설치된 지역을 소상 한계선으로 설정하였다.

밀양강 일대의 이화학적 특성을 살펴보기 위하여 수온(°C), 용존산소(D.O, mg L⁻¹, YSI Incorporated, 550A), pH(Thermo Scientific, Orion Star A221), 염분(ppt, YSI Incorporated, 30), 전기전도도($\mu\text{S cm}^{-1}$, YSI Incorporated, 30), 탁도(NTU, HF Scientific, Micro 1000 Turbidimeter) 그리고 알칼리도를 측정하였다. 알칼리도의 경우 채수된 시료를 보냉 상자(4~8°C 유지)를 이용하여 실험실로 운반한 후 측정하였으며, 나머지 항목의 경우 모두 현장에서 측정하였다.

성별에 따른 측정된 전장 크기의 차이를 확인하기 위해 Mann-Whitney test를 SPSS 25 (Michigan Avenue, Chicago, IL, USA) 통하여 계산하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서 밀양강에서 확인된 연어는 총 40개체였다. 이 중 25마리는 사체였으며 대부분 예림교 하류방향의 수변부에서 발견되었다(Fig. 1). 살아있는 연어들 중 일부는 예림교 상류부에서 꼬리지느러미를 이용하여 자갈을 파는 등의 산란행동을 하고 있었다. 연어의 산란은 수심 약 20 cm 이상의(McNeil, 1962; Smith, 1973; van den Berghe and Gross, 1984) 유속이 빠른 자갈밭(Schuett-Hams *et al.*, 1999)에서 암컷이 땅을 파 산란처를 만들면서 진행되는데(van den Berghe and Gross, 1984), 해당 지점은 자갈과 돌로 이루어져 있고 수심 약 30 cm인 지역으로 산란장으로 판단하였다. 그리고 1달 후(2020년 11월 28일) 재방문하여 발생한 연어 난의 존재를 확인하였다(Appendix 1).

수질은 수온 15.8°C, pH는 7.88, 용존산소량은 11.40 mg L⁻¹, 탁도는 3.5 NTU, 알칼리도는 62 mg L⁻¹, 전기전도도는 186.2 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 염도는 0.1 ppt로 확인되었다(Table 2). pH의 경우 어류가 서식하기에 적절한 값인 6.5~8.5 이내였다(Park *et al.*, 1995). 용존산소량은 3 mg L⁻¹ 이하에서 성장을 제한하는 요인으로 알려져 있으나(Kim *et al.*, 2012), 조사지역에서는 11.40 mg L⁻¹으로, 매우 높은 용존산소 조건을 갖

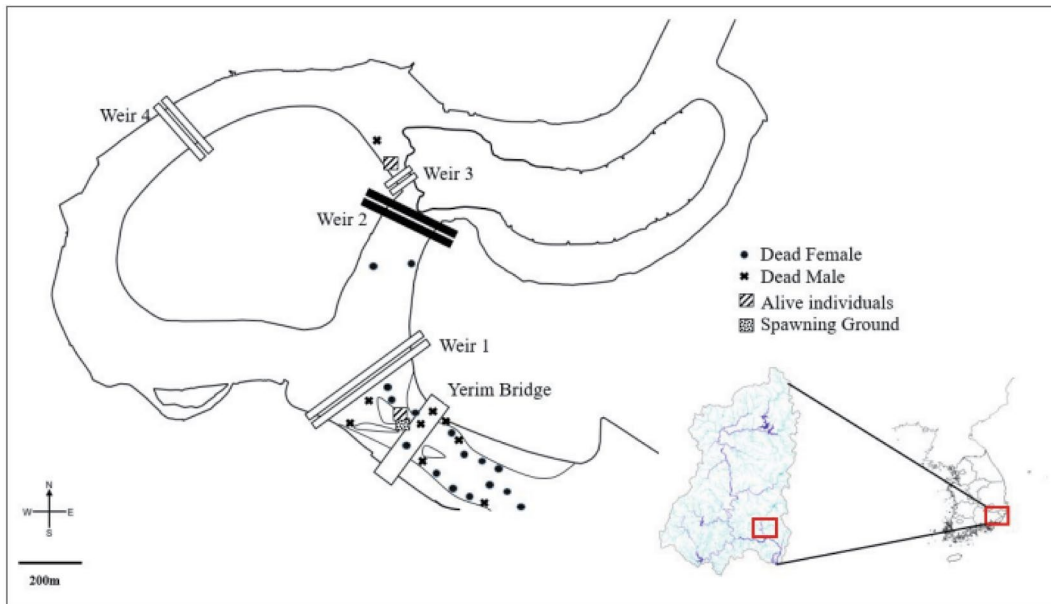


Fig. 1. The distribution of *Oncorhynchus keta* and spawning ground observed near Yerim bridge (Milyang River).

Table 1. Body information and number of individuals of *Oncorhynchus keta* found in Milyang River (*Mann-Whitney test, $p < 0.05$).

Sex	Total number	*Mean length (Mean \pm Standard Deviation/cm)
Male	9	60.56 \pm 5.84
Female	16	55 \pm 5.48

고 있어 연어가 산란하기 좋은 환경으로 판단된다.

보 상류지역에서는 3마리의 사체와 4마리의 살아있는 개체를 발견하였다(Fig. 1. Weir 2, 3). 예림교 인근의 산란장은 이외에는 연어의 산란행동을 확인할 수 없었다. 사체를 발견한 Weir 2 하류부분은 수심이 약 10 cm~30 cm 정도로 매우 얇고, 유속이 매우 느려 부착조류가 번성하고 있는 환경으로 연어가 산란하기에 좋지 않은 환경인 탓으로 판단된다. 3개체의 죽은 연어 중 2개체는 물리적으로 소상이 불가능한 Weir 2의 하류부분에서 발견되었고, 유량도 적어 상류의 연어 사체가 떠내려왔을 가능성은 없을 것으로 판단된다(Appendix 2(C)).

조사기간 동안 발견된 연어 사체는 수컷 9마리와 암컷 16마리로 암컷의 비율이 64%였으며, 수컷 사체의 전장은 60.56 \pm 5.84 cm, 암컷 사체의 전장은 55 \pm 5.48 cm로, 서로 통계적으로 유의한 차이가 ($p < 0.05$) 존재하였다(Table 1). 양양 남대천의 경우 암, 수 성비는 1:1.34로 암컷이 전체의 42.7%를 차지한 결과와는 다소 다른 결과를 보였는데

Table 2. Water quality of the Milyang River at the Yerim Bridge.

Environmental factors	Value
D.O. (mg L ⁻¹)	11.4
Temperature (°C)	15.8
Conductivity (μ S cm ⁻¹)	186.2
pH	7.88
Salinity (ppt)	0.1
Turbidity (NTU)	3.5
Alkalinity (mg L ⁻¹)	62

(Seong, 1997), 밀양강 소상 개체수가 제한적이어서 발생한 결과로 유추되며, 향후 추가 조사가 수행되어야 할 것으로 판단된다

물리적으로 연어의 소상을 제한하는 구조물(어도가 존재하지 않는 보 등)을 확인하기 위해 밀양강 예림교를 기준으로 상류방향으로 조사를 진행하였다(Fig. 2). 예림교 상류 200 m 지점에 위치한 보는 표준형 어도가 존재하고 유량이 상대적으로 풍부하여 연어가 충분히 소상할 수 있을 것으로 판단하여(Appendix 2(A)) 보 상류에서 추가적으로 연어 조사를 실시하였다. 이를 통해 총 3마리의 사체를 확인하였으며, 이 중 2마리는 어도가 존재하지 않는 보의 하류부분에서 발견되었다. 살아있는 개체들과 사체 1마리는 어도가 존재하지 않는 보의 상류에서 발견되었다(Fig. 1). 이들은 물리적으로 소상이 불가능한 보를 피하여 서쪽으로 소상하여 어

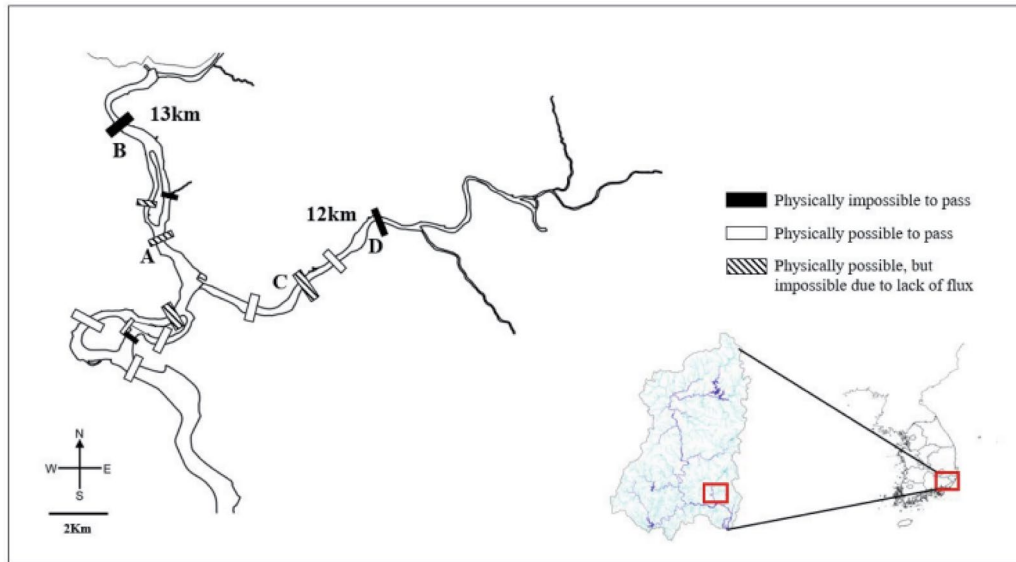


Fig. 2. The distribution of weirs in the mainstream of Milyang River and Danjang stream (A, C: physically possible, but impossible to migrate; B, D: physically impossible to migrate).

도가 존재하는 보를 통과해 해당지점에 존재한 것으로 추정된다. 조사지역 내에서 총 14개의 보를 확인할 수 있었다. 밀양강 본류에서는 총 10개의 보를 확인하였다. 이 중 어도가 존재하고, 유량이 충분한 보는 4개, 어도는 존재하나 유량 부족으로 인하여 연어의 소상을 제한하는 보는 3개였으며, 어도가 존재하지 않은 보는 3개였다(Fig. 2). 밀양강의 지류인 단장천의 경우 어도가 존재하고, 유량이 충분한 보가 2개, 어도가는 존재하나 유량부족으로 연어의 소상을 제한하는 보는 1개였으며, 어도가 존재하지 않은 보는 1개였다.

연어는 유영능력과 장애물 극복 능력이 다른 연어과에 비해 상대적으로 낮아, 최대 3.5 ft(약 1m) 정도의 장애물만 통과할 수 있다(Powers and Orsborn, 1985). 따라서 어도가 존재하지 않는 1m 이상의 높이를 가진 횡구조물까지를 연어의 소상 한계선으로 설정하였다. 밀양강 본류의 상류 부분은 어도가 존재하나 유량이 적어 하천연결성이 단절되어 있어, 조사가 이루어진 2020년의 밀양강 본류의 연어의 현실적인 소상 한계선은 A 지점으로 판단된다. 또한 유량이 충분할 시 더욱 상류로 소상할 수 있으므로, 어도가 존재하지 않고 높이가 1.6 m인(National Fishway Information System, 2020) B 지점까지 소상할 수 있을 것으로 예상된다(Fig. 2). 밀양강의 지천인 단장천에는 횡구조물이 많았음에도 소상할 수 있는 환경이(i.e. 어도의 설치) 비교적 잘 조성되어 있었으나, 합류부 지점으로부터 약 12 km 떨어진 지점에 어도가 존재하지 않고, 높이가 2.3 m인 보가 존재하여(National Fishway Information System, 2020) 연어의 소상을 제한하

였다. 따라서 단장천으로 소상하는 연어는 예림교 아래의 산란처로 추정되는 지역에서 상류방향으로 7 km 지점인 C 지점까지, 유량이 풍부한 조건에서는 12 km 이내의 거리밖에 소상하지 못할 것으로 판단되어 D 지점까지가 소상 한계선으로 판단된다(Fig. 2).

본 연구를 통해 밀양강 예림교 인근과 상류지역에서의 연어와 횡구조물의 분포를 확인하여 연어의 산란처와 소상 한계선을 확인하였다. 서두에 언급하였듯 2020년은 연어의 소상이 타년에 비하여 크게 증가하였다. 밀양강을 포함하여 11월 2일에 창원천에서 연어 10마리와 부산의 온천천에서 1마리를 확인하는 등, 전국적인 연어 회귀가 확인되고 있다. 이는 1) 동해안, 남해안 수온 감소로 인한 해양-하천의 수온차 감소와 2) 낙동강 인근 모천(태화강 등)으로 회귀하던 중 길을 잃어 낙동강 수계로 소상하는 연어의 증가 등의 가능성이 존재하여, 이에 대한 면밀한 조사가 필요한 것으로 판단된다. 밀양강은 낙동강 하류의 주요 지천으로 연어 회귀 지역으로 유명하였으며 일제 강점기부터 밀양강에 연어 부화장이 운영되는 등 100여 년의 연어 방류 역사를 갖고 있다(경상남도수자원연구소). 또한 2012년부터 매년 밀양강에 2만 5천~15만 마리 이상 치어방류를 실행하고 있는 상황이다(Table 3). 본 연구의 조사는 단기간에 이루어진 조사 결과로 3~4년의 생활사를 가지고 있는 연어의 회귀에 대한 대표성을 가지기는 힘들다. 따라서 향후 연어의 생활사 기간을 포함하는 장기적인 조사를 실시하여 밀양강 연어에 대한 정확한 개체수, 생태특성 파악을 해야 할 것으로 판단된다.

Table 3. Number of released *Oncorhynchus keta* parrs in south-eastern part of Korea in 2011~2018 (referred Gyeongsangnamdo Institute of Fisheries). (Unit: 1,000×numbers)

Year	Total	Milyang River	Taehwa River	Nakdong River	Yangsan stream	Sumjin River	Ilgwang, Jwagwang stream
2011	1050		500	100		330	120
2012	600	80	320	20		180	
2013	700	100	350	20		180	50
2014	1970	120	870	220	60	700	
2015	2150	150	870	230	20	880	
2016	2200	80	670	230	20	1200	
2017	1357	100	577	30		650	
2018	710	25	360	0		225	100

향후 연어의 회귀를 도울 수 있는 보전 방안이 필요할 것으로 판단되어 본 논문에서는 이번 조사 결과를 바탕으로 하여 연어 보전 방안을 아래와 같이 제안한다.

연어의 소상을 지원하기 위해서는 첫째, 하천연결성 확보가 필요하다. 연어는 산란하기 적당한 장소가 나올 때까지 하천을 소상하는 것으로 알려져 있다. 본 조사 결과 연어의 소상을 가로막는 횡구조물이 13 km 이내에 14개 존재하였으며, 어도가 존재하더라도 유량이 부족하여 하천의 연결성을 확보하지 못하는 보도 다수 존재하였다. 연어가 정상적으로 소상하기 위해서는 어도가 설치되어 있는 보가 존재하거나, 인간의 활동에 필수적인 보가 아니라면 철거하여 연어의 자연적인 소상을 도울 수 있어야 한다. 또한 어도 보수 시기는 연어 치어가 하천에서 먹이 섭식을 하며 생활하는 봄철(3~5월)을 피하여야 할 것으로 판단된다(McCormick, 2012). 어미가 소상하는 시기와 치어가 강하하는 시기에는 유량 확보를 위하여 밀양댐 운영 방안을 탄력적으로 조절할 필요가 있다.

둘째, 연어 개체수 및 치어의 보전방안이 필요하다. 연어가 회귀할 때 바다에서 과도한 정치성 어구와 불법 낚시로 인한 어획으로 하천 소상량이 저해받고 있으며(Lee *et al.*, 2007), 시민들에 의한 불법 낚시가 이루지고 있어 이를 강력하게 단속할 수 있는 수산업법 강화가 필요할 것으로 판단된다. 또한 서두에서 언급하였듯이 연어 알은 부화하기까지 수온(°C), BOD (Biological Oxygen Demand)가 적절하게 유지되어야 하나, 연어 소상 하천의 정비공사 및 오폐수 유입에 따른 환경오염 등으로 하천 지반 및 형태가 변화하여 연어의 소상을 제한하고 있다(Lee *et al.*, 2007). 따라서 이를 극복하기 위한 지속적인 시민 인식 증진과 관련지방 관청의 수질환경 개선과 환경보존 등 지속적인 관심과 관리 노력이 필요하다. 연어치어가 방류되어 생활하는 미소서식처의 자연성을 확보하여 충분한 먹이를 제공하면 치어의 낮은 생존

률과 성체의 회귀율을 높일 수 있을 것이다. 그러므로 연어 치어의 생존률을 증가시키기 위한 연구도 수반되어야 할 것으로 판단되며, 연어 성체 및 치어의 미소서식처 이용 실태 연구와 치어의 먹이원, 연안으로 강하할 때까지의 생활사 파악 등의 연구를 추가적으로 수행해야 할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 낙동강지류인 밀양강에 소상한 연어를 대상으로 소상, 산란 분포를 최초로 파악하고 소상 한계선을 확인하였다. 2020년 10월 25일부터 11월 28일까지 확인된 개체들 중, 사체는 전장을 측정하고 암·수 구별을 하였다. 조사 결과 총 40개체의 연어를 발견하였으며 이 중 사체는 25마리, 살아있는 개체는 15마리였다. 대부분 산란장으로 판단되는 지점 인근 수변부에서 살아있는 개체와 사체가 발견되었다. 연어의 소상 한계선 파악의 경우 연어가 소상할 수 없는 형태의 보가 등장할 때까지 상류방향으로 이동하여 확인하였으며, 밀양강 본류의 경우 예림교 기준 상류 13 km, 지천인 단장천의 경우 밀양강 합류부에서부터 12 km까지 연어의 소상이 가능할 것으로 확인하였다. 따라서 연어가 소상하기 위한 보의 철거 및 어도설치와 같은 하천연결성 확보가 필요한 것으로 판단되며, 연어의 치어생존률을 높이기 위한 산란장 및 미소서식처 자연성 확보 방안이 필요할 것으로 판단된다.

저자정보 홍동현(부산대학교 생명과학과 석사과정), 성기백(원진수산영어조합법인 이사), 고의정(부산대학교 생명과학과 박사과정), 정은송(부산대학교 생명과학과 박사과정), 조현빈(부산대학교 환경·에너지연구소 연구교수), 주기재(부산대학교 생명과학과 교수)

저자기여도 개념설정: 홍동현, 방법론: 조현빈, 원고 초안작성: 홍동현, 정은송, 고의정, 원고 교정: 조현빈, 성기백, 원고 편집: 홍동현, 조현빈, 연구지도: 주기재

이해관계 본 연구에 참여한 모든 저자들은 학술출판에 있어서 어떠한 이해충돌의 여지가 없음을 알려드립니다.

연구비 이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

- Barton, L.H. 1992. Tanana River, Alaska, fall chum salmon radio telemetry study. Alaska Department of Fish and Game, Division of Commercial Fisheries, Fishery Research Bulletin No.92-01, Juneau.
- Battin, J., M.W. Wiley, M.H. Ruckelshaus, R.N. Palmer, E. Korb, K.K. Bartz and H. Imaki. 2007. Projected impacts of climate change on salmon habitat restoration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**(16): 6720-6725.
- Bilby, R., E.W. Beach, B.R. Fransen, J.K. Walter and P.A. Bisson. 2003. Transfer of Nutrients from Spawning Salmon to Riparian Vegetation in Western Washington. *Transactions of the American Fisheries Society* **132**(4): 733-745.
- Chae, B.S., H.B. Song and J.Y. Park. 2019. A Field Guide to the Freshwater Fishes of Korea. LG Evergreen Foundation, Seoul.
- Esteve, M. 2005. Observations of spawning behavior in Salmoninae: *Salmo*, *Oncorhynchus* and *Salvelinus*. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **15**: 1-21.
- Fukuwaka, M. and T. Suzuki. 2001. Early sea mortality of chum salmon juveniles in the open coastal waters of the Japan Sea. *North Pacific Anadromous Fish Commission*. Bulletin. Technical Report **2**: 7-8.
- Gleick, P.H. 2001. Making every drop count. *Scientific American* **284**(2): 40-46.
- Groot, C. and L. Margolis. 1991. Pacific Salmon Life Histories. University of British Columbia Press, Vancouver.
- Kim, G.E., C.G. Kim and Y.H. Lee. 2007. Genetic similarity-disimilarity among Korea Chum salmon of each stream and their relationship with Japan salmon. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography* **12**: 94-101.
- Kim, I.S. and J.Y. Park. 2002. Freshwater fishes of Korea. Kyo-Hak Publishing, Seoul.
- Kim, S.J., M.S. Shin, J.K. Kim, J.Y. Lee, K.J. Jeong, B.Y. Ahn and B.C. Kim. 2012. Oxygen fluctuation monitored with high frequency in eutrophic urban stream (the Anyang Stream) and the effect of weather condition. *Korean Journal of Ecology and Environment* **45**: 34-41.
- Kulmala, S., P. Haapasaaari, T.P. Karjalainen, S. Kuikka, T. Pakarinen, K. Pakkila, A. Romakkaniemi and P.J. Vuorinen. 2012. Ecosystem services provided by Baltic salmon: a regional perspective to the socio-economic benefits associated with a keystone migratory species. In *Socio-economic Importance of Ecosystem Services in the Nordic Countries: Synthesis in the Context of The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB)*, pp. 266-276.
- Kwon, O.N., J.K. Kim, M.G. Yoon, D.H. Kim and K.E. Hong. 2014. Marine prey selectivity of released juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during early marine migration in Korean waters. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* **26**: 421-429.
- Lee, H.S., K.B. Seong and C.H. Lee. 2007. History and Status of the Chum Salmon Enhancement Program in Korea. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography* **12**: 73-80.
- Lim, J.Y. 1990. A study on the production and the effect of sea ranching fingerling of anadromous chum salmon, *Oncorhynchus keta* (WALBAUM) in the eastern coast of Korea. Department of Aquaculture, Graduate School of Industry National Fisheries University of Pusan, Pusan.
- McCormick, S.D. 2008. Smolt Physiology and Endocrinology. *Fish Physiology* **32**: 199-251.
- McNeil, W.J. 1962. Mortality of pink and chum salmon eggs and larvae in southeast Alaska streams. Ph.D. dissertation, University of Washington, Seattle.
- Nakdong River Flood Control Office. 2020. <http://www.nakdongriver.go.kr/main.do>. Accessed in 2020.11.19.
- National Fishway Information System. 2020. <http://www.fishway.go.kr>. Accessed in 2020.12.01.
- Park, H.Y., J.M. Yoon, G.N. Jang and H.T. Hur. 1995. Fish biology. Jungmunkag, Seoul, p. 50.
- Powers, P.D. and J.F. Orsborn. 1985. New Concepts in Fish Ladder Design: Analysis of Barriers to Upstream Fish Migration, Volume IV of IV, Investigation of the Physical and Biological Conditions Affecting Fish Passage Success at Culverts and Waterfalls, 1982-1984 Final Report. Washington State University, Albrook Hydraulics Laboratory.
- Schuett-Hames, D.E., N.P. Peterson, R. Cornad and T.P. Quinn. 2000. Patterns of Gravel Scour and Fill after Spawning by Chum Salmon in a Western Washington Stream. *North American Journal of Fisheries Management* **20**(3): 610-617.
- Seeb, L.W., P.A. Crane, C.M. Kondzela, R.L. Wilmot, S. Urawa, N.V. Varnavskaya and J.E. Seeb. 2004. Migration of pacific rim chum salmon on the high seas: insights from genetic data: insights from genetic data. *Environmental Biology of Fishes* **69**: 21-36.
- Smith, A.K. 1973. Development and application of spawning velocity and depth criteria for Oregon salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society* **102**(2): 312-316.
- Seung, K.B. 1997. Biological characteristics and population genetics of salmonid species from Korea. Department of

- Biotechnology, Graduate School, Pukyong National University.
- Urawa, S., S. Sato, P.A. Crane, B. Agler, R. Josephson and T. Azumaya. 2009. Stock-specific ocean distribution and migration of chum salmon in the Bering Sea and North Pacific Ocean, North Pacific Anadromous Fish Commission, Bulletin 5. npafc.org/new/pub_bulletin.html. (June 2010).
- Van den Berghe, E.P. and M.R. Gross. 1984. Female size and nest depth in coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* **41**: 204-206.



Appendix 1. The landscape of Milyang River (A), The place regarded as spawning area of salmons (B), Dead salmon found near the spawning area (C), Salmon eggs found in the spawning area (D).



Appendix 2. Weirs in Milyang River (Physically possible for upstream migration (A, B), Physically unable to go upstream (C), Physically possible, but impossible due to lack of flux (D)).