

북태평양 기후변화와 연어 생산력 변동

김수암¹ · 강수경^{2*} · 서현주³ · 김은정¹ · 강민호¹

¹부경대학교 자원생물학과

²국립수산과학원 영동내수면연구소

³홋카이도대학교 해양생물자원과학전공

Climate Variability and Chum Salmon Production in the North Pacific

SUAM KIM¹, SUKYUNG KANG^{2*}, HYUNJU SEO³, EUNJUNG KIM¹, AND MINHO KANG¹

¹Department of Marine Biology, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²Cold water Inland Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangwon-do 215-821, Korea

³Division of Marine Bioresource and Environmental Science, Hokkaido University, Hakodate 041-8611, Japan

북태평양 생태계의 연어(*Oncorhynchus keta*) 개체군과 기후 변동과의 관계에 대하여 연구하였다. 1950년 이후의 알류산 저기압, 남방진동, 북극진동, 태평양순년진동에 대한 지수들을 상호상관법(CCF)과 누적합(CuSum) 방법을 이용하여 연어어획량과 비교하였다. CCF와 CuSum 분석 결과는 1970년대 중반에 큰 기후변화가 발생하였음을 보여 주고 있으며, 연어 개체군은 시간 지연 효과를 보이며 기후변화에 반응하였다. 연어회귀량은 태평양순년진동과 3년, 북극진동과는 6~7년의 시간 간격을 가지며 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다. 연어 치어에 유리한 해양환경은 연안역에서 치어의 성장을 향상시켰지만, 초기 발생시기의 높은 성장률이 산란어의 회귀율과 관련이 있는 것 같지는 않았다. 오히려 오희츠크해와 베링해에서의 미성어 시기 성장이 회귀율과 상관관계가 유의하게 나타났으며, 이는 연어 개체군에 '크기연관사망' 과정이 적용된 것이라고 할 수 있다. 향후 우리나라 주변 해양생태계에 대한 기후변동의 영향을 설명하기 위하여 한반도 지역의 기후지수 개발이 시급히 필요하다.

The relationship between North Pacific chum salmon (*Oncorhynchus keta*) population and climate variability was investigated in the North Pacific ecosystem. Time-series for the Aleutian Low Pressure, Southern Oscillation, Arctic Oscillation, and Pacific Decadal Oscillation (PDO) indices dating back to 1950 are compared with the chum salmon catch using a cross-correlation function (CCF) and cumulative sum (CuSum) of anomalies. The results of CCF and CuSum analyses indicated that there was a major change in climate during the mid 1970s, and that the chum salmon population responded to this climate event with a time-lag. The PDO and chum salmon returns showed a highly significant correlation with a time-lag of 3 years, while the AOI with a time-lag of 6~7 years. The favorable environments for fry chum salmon might cause better growth in the coastal areas, but higher growth rate during the early stage does not seem to be related to the improved return rate of spawning adults. Rather, growth in the Okhotsk Sea or the Bering Sea during immature stages has a significant correlation with return rate, which implies the size-related mortality process. The development of a local climate index is necessary to elucidate the effect of climate variability on the marine ecosystem around the Korean Peninsula.

Keywords: Climate variability, Chum salmon, North Pacific, Pacific Decadal Oscillation (PDO)

서 론

지구상에서 기후의 변화는 장기적으로 서서히 진행되었지만, 산업혁명 이후 인류의 활동에 의하여 이산화탄소, 메탄과 같은 온실 가스가 대기중에 급격히 증가하여 지구환경의 균형상태가 깨어지기 시작하였고, 온실가스의 증가는 지구의 온난화(global warming)를 초래하고 있다. 하지만 지구의 변화에 대한 우리의 준비는 아직도 미진한데, 2007년 1월 스위스의 다보스(Davos)에서 개최된 세계

*Corresponding author: kangsk@momaf.go.kr

경제포럼(World Economic Forum: WEF, <http://www.weforum.org/en/events/AnnualMeeting2007/index.htm>) 연차회의에서 '향후 세계에 가장 큰 영향을 끼칠 만한 요인이 무엇인가?'라는 질문에 참석자의 38%가 '기후변화' 문제를 첫손에 꼽았고, '변화 요인 가운데 지구촌이 가장 준비를 안 하고 있는 것은?' 이라는 질문에는 참석자의 55.1%가 '기후변화'를 꼽았다. 20세기 중반까지만 하더라도, 기후의 변화는 너무 임의적이어서 예측이 불가능하다고 생각하였지만, 기상 및 기후에 관련된 자료가 축적됨에 따라, 기후는 일정 기간 동안 경향성(trend)을 보이거나, 주기(period)를 가지고 교대

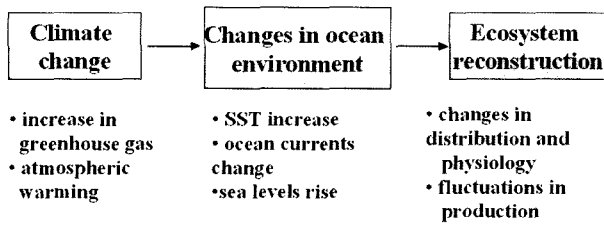


Fig. 1. Some cause-effect relationships between climate-ocean-ecosystem.

로 나타나기도 한다는 것이 알려졌다. 유엔환경계획(UNEP)과 세계기상기구(WMO)가 주도해 1988년에 설립한 ‘정부간 기후변화패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)’ 제4차 보고서 정책부문 요약에 의하면(<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>), 2100년까지 지구 평균기온이 최대 6.4°C까지 올라가고 해수면도 지금보다 무려 59 cm까지 높아질 수 있다고 한다.

지구는 크게 수권, 육권, 대기권으로 구분되며, 이들 각 권역들은 상호 유기적인 관계를 통해서 에너지를 순환시키며, 생태계를 구성하고 있다. 특히, 수권에 해당하는 해양은 지구 기후에 중요한 역할을 하는데, 물의 높은 비열 때문에 열의 저장소 역할을 할 뿐만 아니라, 저위도에서 생성되는 높은 열에너지를 고위도로 운반하는 열 순환계의 역할을 한다. 온실기체의 증가에 의하여 지구 온난화가 일어나면, 대기와 경계를 이루고 있는 해양의 표층도 데워져 해양표층수온(SST)이 상승되어 해수면의 상승이 초래될 뿐만 아니라, 해류의 흐름도 바뀌게 될 것이다(Fig. 1). 또한, 지구온난화는 이러한 과정에서 해양의 생산력에 변화를 유발하여, 동식물의 분포 및 생리 현상을 변화하게 하고, 이에 따른 어류 개체군 증감 등과 같은 생태계의 재편이 일어날 것이다. 해양생태계 안에 서식하는 수산생물자원은 장시간에 걸쳐서 일어나는 기후와 해양환경의 변화에 적응하면서 그들에게 유리한 생존전략을 취한다. 하지만, 갑작스럽게 진행되는 기후변화와 그로 인한 해양환경의 변화는 수산생물자원에 큰 영향을 미친다. 특히, 어류의 초기 생활사에 미치는 환경의 변화가 결국 특정 어종의 가입성공 여부와 직결된다는 것은 이미 주지된 사실이다(Hjort, 1914; Wooster *et al.*, 1983).

지구의 기후가 변화한다면 그 영향은 북태평양에도 미치게 된다. 북태평양의 대양은 아한대 특성을 가지며, 아시아 및 북미대륙의 연안 해역은 일차 생산력이 대단히 높기 때문에 어류의 생산력도 매우 높은 해역이다. 특히 우리나라가 위치한 북서태평양 해역은 FAO 수산통계해구 중에서 가장 어획생산이 많은 해역으로, 대략 세계 해양어류 총 생산량의 30% 정도가 이곳에서 생산된다. 따라서 북태평양에서 기후의 변화가 발생한다면, 해양생태계에 커다란 변화가 생길 뿐만 아니라 국제 어업질서에도 지대한 영향을 미칠 것이다. 예로서, 최근의 온난화 현상은 이 해역에서 생산되는 오징어, 고등어 등과 같은 온수성 어류의 어획량 증가 및 서식처 북상을 유발하였고, 명태와 같은 냉수성 어류의 어획량은 감소되었다(Kim *et al.*, in review). 한편, 북태평양 전체에서 어획되는 연어류(salmons, *Oncorhynchus* spp.)의 변화를 살펴보면, 1920년대 후반에서 1940년대 초반, 1970년대 후반에서 1990년대 중반에 연어류 어획량이 증가하였다. 연어 어획량 변동은 기후지

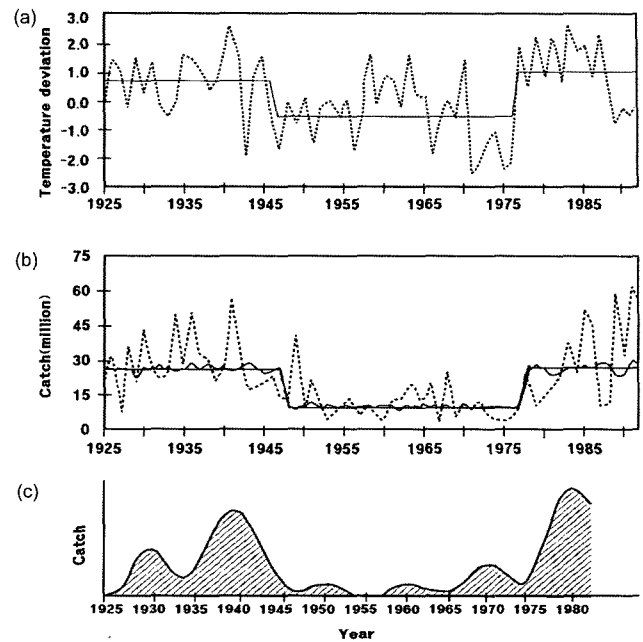


Fig. 2. Indication of (a) climate regime shift (winter temperature at Kodiak, Alaska) and (b) yield of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) in Alaska (Francis and Hare, 1994) and (c) North Korea in 20th century (Ro(로), 1986).

수의 일종인 대기순환지수(Atmospheric Circulation Index: ACI)의 변화 경향과 거의 유사한 경향을 보여주었고 상관관계도 높았다(Beamish *et al.*, 1999). Klyashtorin(2001)은 ACI 이외에도 지구의 자전속도(length of day)가 대양의 어류 자원량에 중요한 영향을 미칠 것이라고 주장하였으며, 이 관찰 결과를 이용하여 향후 태평양과 대서양의 주요 어종에 대한 성쇠를 예견하였다.

기후가 수십 년의 주기를 가지고 변화할 때, 그 변화가 갑작스럽게 전환하고 있다는 주장이 최근 들어 대두되고 있다. 북태평양에서의 기후도약 혹은 기후체제변화(climate regime shift)라고 불리는 이 현상은 20세기에 여러 번 발생하였으며, 최근에 이르러 그 주기가 점점 짧아지고 있는 경향이 있다. 북태평양의 기후체제 변화 중 1976년의 사건은 가장 유명한데, 1940년 중반부터 겨울철 고기압이 발달하여 비교적 한랭한 겨울 기후가 형성되었던 북동태평양은 1976년부터 갑자기 저기압 세력이 발달하게 되어 따뜻한 해역으로 변화하였다. 이러한 기단의 변화로 이 해역에서는 폭풍의 빈도가 잦아졌으며, 더 나아가 해양의 생산력 및 생태계의 구조 개편이 진행되었다(Francis and Hare, 1994; 김, 2003). 특히, 이 해역에서의 곱사연어(pink salmon, *O. gorbuscha*) 어획량은 1920-1940년대는 많았다가, 1950-1970년대에 큰 폭으로 줄어들었다. 하지만, 1977-1978년을 전후로 하여 다시 크게 증가하였으며, 이러한 변화 양상은 기후체제변화와 2-3년의 시차를 두고 거의 같게 나타났다(Fig. 2a, and 2b). 또한 이 해역과 멀리 떨어진 한반도의 북한쪽 해역에도 곱사연어가 자생하고 있어 20세기 초반부터 어획되고 있었는데, 북한 해역에서의 곱사연어의 생산 증감 상태는 북태평양과 거의 같은 유형을 보이고 있다(Fig. 2c) (로, 1986). 비록 두 개체군이 서로 떨어져 있음에도 불구하고 유사한 형태의 개체군 증감을 보인다는 사실은, 이들 개체군을 지배

하는 공통된 기후환경이 존재하고 있음을 암시하는 것이다(김, 2002).

연어(chum salmon, *O. keta*)는 북태평양 전 해역에 걸쳐 서식하고 있는 대표적인 냉수성 표층어류로서, 서부태평양에서는 한국 동해안이 남방 한계선이다. 북미 연어는 아시아 연어에 비교하여 크고 무거웠지만, 담수에서 해수로 이동하는 크기는 채집시기와 장소에 따라 다르지 않았다(Kang and Kim, 2004). 매년 변동이 있기는 하지만, 최근에 들어와 북태평양에서는 연어류가 약 80여만 톤 정도 어획되고 있으며, 이 중에서 연어의 어획량은 곱사연어에 이어 두 번째로 크다. 태평양 연안국(한국, 일본, 러시아, 캐나다, 미국)들은 20세기 중반부터 연어의 부화장(hatchery)을 건설하여 치어를 방류함으로써 연어 자원량의 증진에 노력해 왔으며, 최근에는 부화장 연어의 풍도가 전체의 약 50% 정도 차지하고 있다(Kaeriyama, 2003). 다른 연어류와 마찬가지로, 연어도 1970년대 후반부터 어획량이 크게 증가하기 시작하였는데, 이 원인이 기후 및 해양환경이 연어가 증식하기에 유리한 조건으로 바뀌어 자원량이 증가하였는지, 아니면 각국에서의 활발한 증식사업(enhancement program)의 결과인지는 분명하지 않다. 만약 치어 방류량과 성어가 되어 회귀하는 성어의 수가 계속 비례하고 있다면, 증식사업의 효과라고 할 수 있겠지만, 두 변수가 무관하게 변동한다면 증식 이외의 다른 요인(즉, 환경변화 혹은 밀도의존과정, density-dependent process)이 생태계에 작용된 것으로 보아야 할 것이다.

방류된 치어가 고수온 혹은 저밀도 먹이생물 등과 같은 생존하기에 적합하지 못한 환경을 경험하게 되면 치어의 대량 폐사로 이어져 연어회귀율에도 영향을 미치게 될 것이다. 특히 방류 직후부터 약 한달 반 정도의 초기 연안 생활 시기에만 약 99%를 넘는 사망률을 보여주고 있으며(Fukuwaka and Suzuki, 2001), Healey(1982)에 따르면 이 시기의 사망은 어린 연어의 크기가 결정적으로 작용하는 크기선택사망(size-selective mortality)이 발생할 것이라 한다. Beamish and Mahnken(2001)에 의해 제안된 크기연관사망(size-related mortality)은, 방류된 연어가 첫해 여름에 충분한 크기만큼 성장하지 못하면 그 해 겨울동안 살아남기 위한 최소한의 대사활동을 하지 못하기 때문에 사망한다는 가설이다. 연어의 경우, 비록 연안에서의 사망률이 매우 큰 것으로 추정되지만, 최종적으로 연급군의 강도를 결정하는 것은 연안을 벗어난 근해에서의 사망률, 즉, 연안을 벗어난 후부터의 여름에서부터 겨울까지의 초기해양생활시기의 사망률 혹은 원양에 머무를 당시 일어나는 기후변화일 가능성이 있다(Bax, 1983). 본 연구는, 북태평양 표영생태계의 우점종을 차지하고 있는 연어가 급변하는 기후환경 속에서 반응하는 양상을 파악하고자 준비되었으며, 연어의 어획량, 회귀율 및 성장 등이 북태평양 기후변동 및 지구온난화와 같은 환경변화와 어떠한 관계에 있는지 규명해 보고자 준비되었다.

연구 방법 및 재료

기후변화가 수산자원에 미치는 영향을 연구하기 위해서는 장기간에 걸친 수산자원 자료와 기후 및 해양 변화에 대한 관측치가 축적되어야 한다. 북태평양 연어 어획량 자료는 북태평양해양과학기구(North Pacific Marine Science Organization, PICES)(PICES, 2004), 북태평양소하성어류위원회(North Pacific Anadromous Fish

Commission, NPAFC; http://www.npafc.org/new/pub_statistics.html), UN의 식량농업기구(Food and Agriculture Organization, FAO; <http://www.fao.org/fi/statist/FISOFT/FISHPLUS.asp#Download>)의 통계를 인용하였다. 어획통계는 1950년부터 2001년까지의 자료를 이용하였으며, 각 대륙에 서식하는 연어자원의 특성을 파악하기 위하여, 아시아(한국, 일본, 러시아)와 북미(캐나다, 미국) 대륙에서의 연어 어획량을 따로 합계하였다. 우리나라 연어 방류량과 생산량 통계는 국립수산물과학원 영동내수면연구소에서 1973년부터 축적한 자료를 이용하였으며(이 등, 미발표 자료), 그 외 타국의 방류량은 1993년부터 NPAFC에서 조사하여 정리한 자료를 인용하였다.

우리나라 연어 시료와 분석은 Seo *et al.*(2006)에서 사용된 것을 이용하였다. 1995년을 제외한 1989~1998년 사이에 총 1,230마리의 3세어와 4세어 암컷이 양양 남대천에서 채집되었으며, 비늘에 나타난 연륜의 길이($r_1, r_2-r_1, r_3-r_2, r_i$, 연령 i 에 형성된 연륜)를 성장지표로서 측정하였다. 연륜은 아니지만 위류(c , check)은 연어 치어의 성장속도가 환경요인의 변화에 의해 급격히 달라질 때 생성되며(Fukuwaka and Kaeriyama, 1994; Fukuwaka, 1998), 치어(fry)가 봄철에 강 하구에서 방류된 이후, 연안 가까운 곳에서의 성장을 나타내는 지시자로서 이용될 수 있기 때문에 r_c, r_1-r_c 자료도 함께 이용하였다. 3세어와 4세어로 회귀한 성어의 비늘을 분석하여 과거 연령 i 였을 때의 성장을 G_i 로 표기하였으며, 이는 연령 i 에 형성된 연륜(r_i)의 길이에서 그 전 해의 성장분(r_{i-1})을 뺀 것이다. 즉,

$$G_i = (r_i - r_{i-1})$$

한국산 연어는 동해에 방류 후 첫해 여름을 오호츠크해에서 보내고 그해 겨울에는 북태평양에 내려와 보내며, 생의 두 번째 여름과 겨울부터는 베링해와 북태평양을 계절별로 왕복하는 것으로 추정된다(Seo *et al.*, 2006). 따라서 G_c 는 연안에서의 성장을 뜻하며 G_1 는 연안을 떠난 후부터 첫 번째 연륜이 생길 때까지의 성장, 즉 오호츠크해에서의 성장을 뜻하고, G_2, G_3 는 각각 베링해에서의 2세어의 성장, 3세어의 성장을 뜻한다. 본 연구에서는, 회귀 연어를 연령 별(즉, 3세와 4세)로 분할하여, 그 어류들이 각 해역에서 서식할 때의 성장률과 환경 요소, 회귀율을 비교하였다.

연어의 생존율을 대변하는 회귀율(return rate, R_i)은 다음과 같이 계산되었다. 매년 가을에 회귀하는 연어 산란어는 주로 3~5세이며, 인공수정된 치어는 그 이듬해에 방류된다. 채집된 산란어의 연령은 4세어가 가장 많으므로, 회귀년도에서 3년을 빼면 치어가 방류된 년도(i , ocean entry year)가 된다. 즉, 특정년도(i)의 전체 방류량(Release $_i$)에 대한 3년 뒤의 회귀량(Catch $_{i+3}$)을 비교함으로써 얼마나 살아남았는지를 구하였다. 한국 연어의 경우, 1990년부터 동해안에서의 연어에 대한 해면 정치망 어업이 허가되어 그 전후의 어획통계가 달라졌으므로, 본 연구에서는 1990년도 어획자료부터 사용하였다. 이는 곧 1987년 연급군의 회귀율 자료부터 사용한 것이 되며, 성장 자료 또한 그에 맞추어 1987년 연급군 자료부터 사용하였다.

$$R_i(\%) = \frac{Catch_{i+3}}{Release_i} \times 100$$

한국 연어의 성장과 생존에 환경변화가 끼친 영향을 알기 위하

여, 연어가 성장기에 거쳐 가는 세 해역(즉, 한국 연안, 오토츠크해, 베링해)에서의 SST와 동물플랑크톤량의 변화를 구하였다. 해역마다 한국산 연어가 머무는 것으로 추정되는 시기를 고려하여, 연어 치어가 연안에서 머무는 4월의 주문진 SST와 동해의 4월 동물플랑크톤 생물량을 한국해양자료센터(KODC)로부터 구하였다. 오토츠크해의 8~11월까지의 SST는 NCEP/NCAR reanalysis (NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, <http://www.cdc.noaa.gov/Timeseries>)에서, 여름 동안의 동물플랑크톤 생물량 자료는 Shuntov and Dulepova(1996)를 사용하였다. 또한 베링해의 6~11월 SST는 NCEP/NCAR reanalysis, 6~7월까지의 동물플랑크톤 생물량은 Sugimoto and Tadokoro(1997)를 인용하였다.

기후와 해양환경 조건을 설명하기 위하여, 변화의 정도를 나타내는 지수(index)에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 북태평양 연구에서 자주 인용되는 기후 및 환경지수(index) 4개를 골라 변화를 분석하였다. 선택된 지수는 알류산저기압지수(Aleutian Low Pressure Index, ALPI; http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/samfpc/climate/clm_idx_alpi.htm), 남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI; <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/soi.htm>), 북극진동지수(Arctic Oscillation Index, AOI; http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml)이며, 태평양의 표층수온을 지시하고 있는 태평양순년진동지수(Pacific Decadal Oscillation Index, PDOI; <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>)이다. 이들 웹사이트로부터 연간 혹은 계절간 평균지수를 택하여 분석하였으며, 대기에 대한 정보가 비교적 안정적으로 수집된 1950년 이후부터 2005년까지의 자료를 이용하였다.

북태평양의 연어회획량과 북태평양 기후환경의 변동성을 나타내는 환경지수와와의 관계를 알아보기 위해 1950년 이후의 자료를 이용하여 상관분석방법을 이용하였으며, 이 두 자료간의 시간차이

(time-lag) 효과를 알아보기 위해 SPSS의 상호상관법(Cross-Correlation Function, CCF)을 이용하였다. 또한, 시계열자료의 연속성을 강화하기 위해서 전체 자료의 평균값으로부터 편차(anomaly)를 구하여 누적합(Cumulative Sum, CuSum)하였다. 누적합을 구하는 공식은 아래와 같다(Murdock, 1979). 즉, CuSum은

$$S_m = \sum_{i=1}^m (x_i - \mu) = \text{편차의 누적합(accumulative sum, CuSum)}$$

S_m = 특정 연도(i)의 관측치(observation 혹은 estimation)

x_i = 관측치 평균(mean)

m = 최종 연도

이 계산법에서는 하나의 값에 대해 비중에 따로 두지 않으며, 과거 자료에 대한 정보를 포함하고 있기 때문에 지수가 변해가는 경향을 확인하는 것이 가능하다. CuSum 그래프에서 기울기가 양을 나타내는 구간의 값은 평균보다 크거나 증가하는 경향을 나타내며, 음의 기울기를 나타내는 구간은 값이 평균 이하이거나 감소하는 경향을 나타낸다. 특정 년도에서 CuSum 값이 기울기가 변할 때, 그 해에 기후의 변동이 발생되었다는 것을 알 수 있다.

결과 및 토의

연어 방류량과 회귀율

연어자원의 증가 원인이 방류 효과에 의한 것인지, 아니면 그 외의 요인에 의해서인지 확인하기 위하여, 각국의 연어 치어 방류량과 모천로 회귀하는 회귀량을 조사하였다. 아시아 각국의 연어 방류량과 회귀량의 변동경향은 지역에 따라 다르게 나타났다. 우리나라는 1984년 양양내수면 연구소(현 영동내수면 연구소)를 설립한 이래, 치어 방류사업을 활발하게 추진하고 있다. 어느 특정

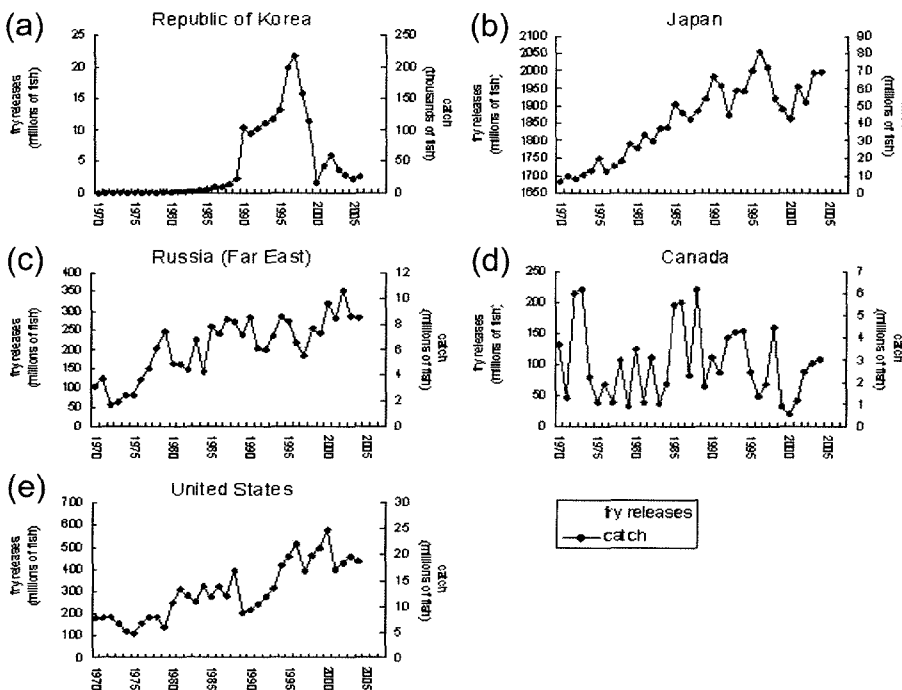


Fig. 3. The numbers of fry released.

Table 1. Selected correlation coefficients (Pearson r) of growth with environmental conditions (SST and zooplankton biomass) and return rate of Korean chum salmon in the 1990s. Growth rates (G_c , G_{1-c} , and G_{2-3} at Korean coastal area, Okhotsk Sea, and Bering Sea, respectively) are derived from returning female salmon to mother stream at age-3 and 4 during 1987-1997. Note that the correlations between growth and environmental conditions were calculated from the data at the year of scale formation and concurrent environments.

	Growth rate		Environmental conditions		Return rate
	Age of adults		SST	zooplankton biomass	
G_c	3		-0.343	0.924**	-0.611
G_c	4		-0.456	0.688	0.017
G_{1-c}	3		-0.444	0.610	0.970**
G_{1-c}	4		-0.023	0.477	0.538
G_2	3		-0.070	0.898*	0.058
G_2	4		0.036	0.319	0.837**
G_3	4		-0.155	0.830*	0.763*

* and ** indicate the significant levels of 0.05 and 0.01, respectively.

연도에 방류한 치어(fry) 방류량과 3년 후의 회귀량을 비교하면, 1980년대 중반부터 1997년까지는 서로 비례하여 증가하였지만, 1990년대 후반에는 회귀량이 감소하기 시작하였다(Fig. 3a). 2000년대 초반에 방류량이 최고에 달한 2000여 만 마리에 이르렀으나, 급격히 하락한 회귀량은 현재까지 지속되고 있다. 일본은 홋카이도 연안과 혼슈의 북부지역에서 매년 18억~20억 마리의 연어 치어를 방류하고 있다. 일본의 연어 생산도 우리나라와 마찬가지로 1980년대부터 1990년대 중반까지는 증가하고 있었으나, 1990년대 중반 이후에 회귀량이 다소 감소하였다. 하지만 2000년대 초반에는 방류량은 줄었지만, 회귀량은 증가하는 양상을 보여 우리나라와는 약간 다르게 나타나고 있다(Fig. 3b). 극동러시아에서는 매년 2억~3억 마리의 치어를 방류하는데, 연어 생산량은 1970년대 이래에 계속 증가하여 왔으며, 1990년대 후반부터 2000년대 초반에 이르기까지 방류량과 회귀량이 거의 비례하고 있다(Fig. 3c).

북미에서의 연어생산도 지역에 따라 다르게 나타나고 있다. 캐나다에서는 치어 방류량의 폭이 매우 크지만, 대체로 1억~2억 마리를 방류하였으며, 방류량과 회귀량과의 관계도 뚜렷하지 않다. 그리고 아시아 국가와는 달리, 과거의 연어 생산은 특별한 경향이 없고, 변동 폭이 매우 컸다. 특히, 우리나라와 마찬가지로 1999~2001년 동안에 방류량은 어느 정도 유지되고 있었으나, 회귀량은 매우 저조하였던 현상이 발견되었다(Fig. 3d). 미국 연어의 경우, 1989년의 급격한 감소를 제외하고는 연어 생산량이 전반적인 증가 추세를 보이고 있다. 지난 10년 간, 방류량은 약 5억 마리, 회귀량은 약 2000만 마리로서 1996년과 2001년의 약한 감소를 제외한다면 방류량과 회귀량이 비교적 안정적으로 나타나고 있다고 할 수 있다(Fig. 3e).

우리나라 연어의 회귀율은 1.5% 미만으로서, 여타 NPAFC 국가의 회귀율 3~7%에 비교하여 대단히 낮은 편이다. 일반적으로 어류의 성장속도는 해양에서의 생존률(즉, 궁극적으로 회귀율)을 결정하는데 커다란 요소로 작용하고 있는데, 해양어류는 서식처의 수온과 먹이생물종의 풍도가 성장에 중요하다. 우리나라 연어의 경우, 이미 Seo *et al.*(2006)에 의하여 그들이 살았던 환경수온보다는 먹이생물인 동물플랑크톤의 양이 성장과 높은 상관관계가 있

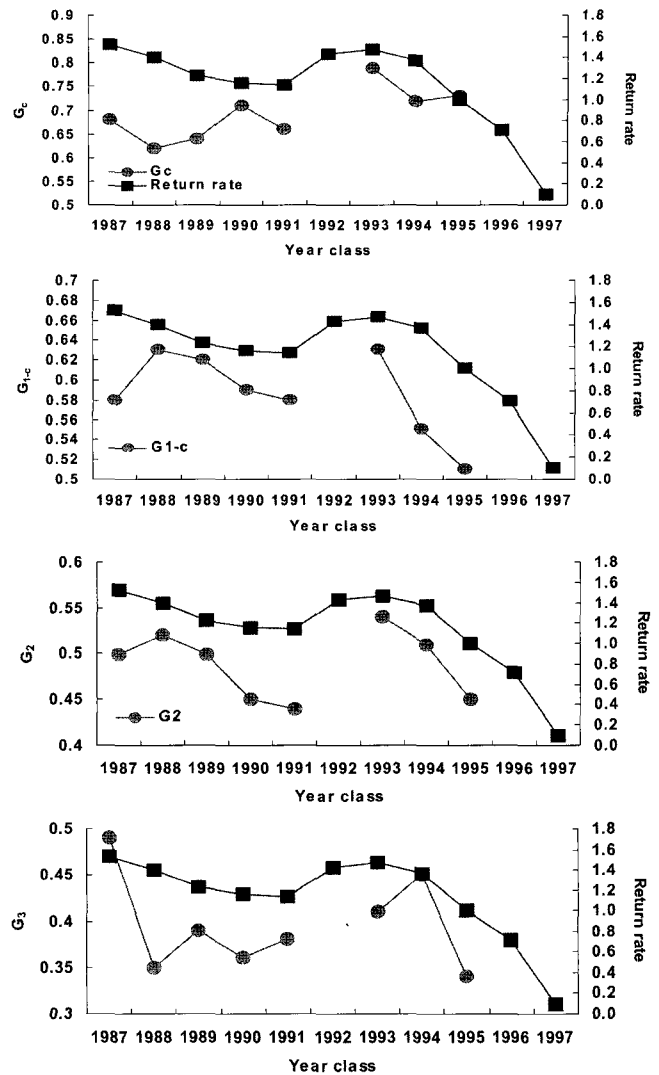


Fig. 4. Growth rates (G_c , G_{1-c} , and G_{2-3} at Korean coastal area, Okhotsk Sea, and Bering Sea, respectively) and return rates from age-4 returning chum salmon into Korean stream.

음이 밝혀졌다. 산란어의 회귀연령을 구분하여 분석한 본 연구에서는, 3세에 회귀한 연어의 경우, 동해에서의 성장과 동해의 동물플랑크톤이 유의하고 높은 상관관계($r=0.924$, $p<0.01$)가 있었지만, 4세에 회귀한 경우에는 유의성이 발견되지 않았다(Table 1). 즉, 어릴 때 먹이를 충분히 취한 연어 치어들은 성장이 좋았고, 상대적으로 성장이 느린 치어들에 비교하여 어린 나이에 산란장으로 회귀하였다고 볼 수 있다. 한편, 회귀하기 전년도 여름동안의 베링해에서의 하계성장은 베링해의 동물플랑크톤과 유의한 상관관계가 있었다(3세 연어, $r=0.898$, $p<0.05$; 4세 연어, $r=0.83$, $p<0.05$). 치어가 서식하는 표층의 수온은 회귀연령을 불문하고 성장률과 유의한 상관관계가 없었다.

우리나라에 4세로 회귀한 연어의 회귀율과 그들의 발생시기별 성장률을 비교하면, 초기발생시기의 성장률과 회귀율은 큰 관련이 없으나, 그 이후의 성장과는 비례하고 있는 것처럼 보인다(Fig. 4). 이들에 대한 상관관계의 분석에서도 동해에서의 초기성

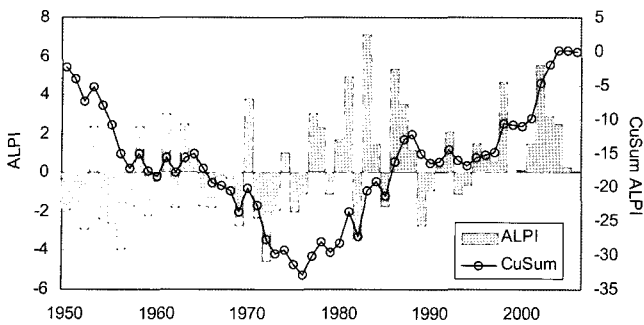


Fig. 5. Aleutian Low Pressure Index(ALPI) from 1950 to 2006 and the CuSum.

장은 회귀율에 커다란 영향이 없는 것으로 나타났다. 오히려 성장이 빨라 3세로 회귀한 연어는 오호츠크해에서의 성장($r=0.970$, $r<0.01$)이, 성장이 느려 4세로 회귀한 연어는 베링해에서의 성장이 각각 회귀율과 유의한 상관관계에 있는 것으로 나타났다(Table 1). 이렇게 동해에서의 성장정도가 회귀율과 유의한 상관관계를 보이지 않은 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다: 회귀율은 연어가 3~5년간 해양을 회유하며 겪은 모든 사망 요인의 최종 결과로 나타나는 것이며, 우리나라 연어는 동해에서의 크기선택사망시기에 성장이 좋았기 때문에 많은 어린 연어가 살아남았지만, 그 다음 위험기인 크기연관사망시기의 성장 정도에 회귀율이 다시 조절된다.

환경 지수의 변화

알류산저기압지수(Aleutian Low Pressure Index: ALPI)

알류산저기압(Aleutian Low Pressure)은 북태평양의 겨울기후 패턴으로, 겨울에 세력이 강해지고, 그 다음해 봄이 되면 약해진다. 이 저기압의 세력에 따라 겨울 폭풍의 강도가 달라지며, 겨울 폭풍은 해류의 수직, 수평이동을 변화시켜 해양의 생산력에 영향을 주게 된다(Venrick *et al.*, 1987; Gargett, 1997). 알류산저기압지수(Aleutian Low Pressure Index: ALPI)는 12월에서 3월까지의 알류산저기압의 강도를 나타내는 기후지수로써 북태평양의 20~70°N, 120°E~120°W 지역의 100.5 kPa의 해수면기압의 범위에 대한 편차로 계산된다. ALPI가 양의 값을 나타내면 상대적으로 알류산저기압의 영향이 강하게 나타남을 의미한다.

ALPI의 변동을 살펴보면, 크게 4가지 경향으로 나뉘는 것을 알 수 있다. 1950년부터 1976년까지는 비교적 낮은 값을 나타내어 비교적 고기압이 우세하였지만, 1977년에서 1988년까지는 저기압이 우세하였다. 1988년~1997년까지는 평균을 유지하였다가, 1998년부터 다시 저기압이 우세하였다. 따라서 CuSum의 변동은 1976년까지는 계속 감소하다가, 1976년을 전환점으로 하여 증가하기 시작한다. 1988년까지 계속 증가하던 CuSum은 1989년 다시 저기압이 약해지면서 증가하지도 감소하지도 않는 평균적 상태를 1997년까지 유지하다가, 그 이후 저기압의 경향이 강하게 나타나면서 다시 증가하였다(Fig. 5).

남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI)

남방진동(Southern Oscillation, SO)은 인도네시아 부근을 중심으로 서부 태평양과 남동 태평양 지역간의 대규모적인 지상 기압

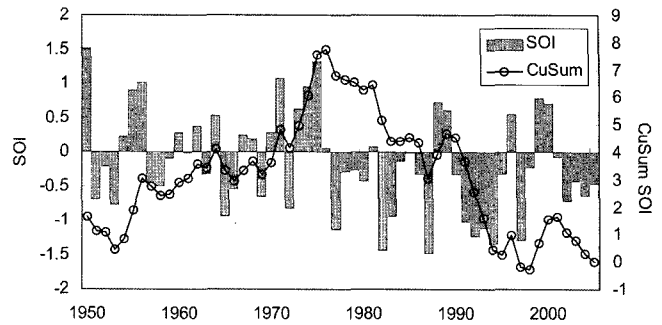


Fig. 6. Southern Oscillation Index (SOI) from 1950 to 2005 and the CuSum.

의 시소(Seesaw)현상으로, 한쪽 지역이 기압이 높을 때 다른 쪽 기압이 낮아지는 현상을 말한다. 1960년대 후반 남방진동과 엘니뇨와의 연관성에 대해 알려지게 되었으며(Trenberth and Shea, 1987), 이러한 대기-해양간의 상호작용을 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation), 또는 줄여서 ENSO라고 한다. 엘니뇨는 3-7년을 주기로 불규칙하게 발생하며, 엘니뇨 시기에는 서부태평양 적도해역의 따뜻한 수괴가 날짜변경선에서 남미 해안까지 도달한다. 남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI)는 이러한 현상을 지수화 한 것으로, 호주 북부 다윈(Darwin)과 남태평양의 타히티(Tahiti)의 월평균 또는 연평균 기압의 차이를 표준편차로 나누어 계산한다. SOI가 음의 값을 나타낼 때, 엘니뇨(El Niño)가 발생하는 해와 일치하고 있으며, 온난기(warm phase)라고 부른다. 그리고 양의 값을 가지는 한냉기(cold phase)는 라니냐(La Niña)가 발생하는 해와 일치하고 있어 SOI를 이용하여 엘니뇨와 라니냐가 발생한 시기와 강도를 알 수 있다.

1950~2005년까지의 SOI의 연변동을 살펴보면, 1950~1976년까지는 엘니뇨와 라니냐의 교대현상이 나타나지만, 라니냐가 약간 우세하였다. 그러나 1977년부터 강한 라니냐는 나타나지 않았으며 1988/1989년과 1999/2000년의 라니냐 해를 제외하고는 엘니뇨가 강세를 보이고 있다. 이 시기에 발생하였던 엘니뇨 현상은 과거에 비교하여 발생주기가 단축되었을 뿐만 아니라 강도가 크게 나타났다. 특히 1982/1983년과 1997/1998년의 엘니뇨는 인류가 경험하였던 그 어느 때의 엘니뇨보다도 강했던 것으로 추정된다. CuSum의 변동을 보면, 1976년을 전후하여 1950~1976년은 기울기가 양의 값을 나타내어 라니냐가 우세한 형국이다가, 그 이후에는 기울기가 음의 값이 나타나 엘니뇨가 강세임을 보이고 있다(Fig. 6). 대체로 SOI와 ALPI는 음의 상관관계를 가진다.

북극진동지수(Arctic Oscillation Index, AOI)

북극진동지수(Arctic Oscillation Index, AOI)는 1월에서 3월까지, 북위 20°에서 북극점(North pole)까지의 해수면 기압 계절 평균값을 평활화 한 것이다. 북극을 중심으로 해서 북대서양과 북태평양 해역의 기상자료를 모두 포함하고 지수가 결정되기 때문에 AOI는 양 대양의 기상현상을 동시에 설명할 수 있다. AOI값이 양의 값을 가지는 경우, 북극의 기압이 평년보다 낮아지고, 북대서양의 표층 바람이 강해지는 현상이 나타난다. 반대로, AOI가 음의 값을 가지는 경우, 북극의 해수면 기압은 평년보다 낮아져 저

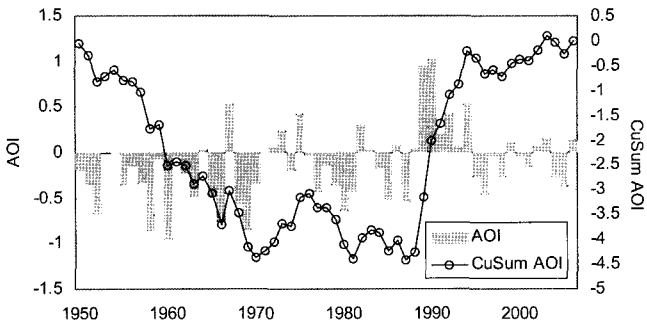


Fig. 7. Arctic Oscillation Index (AOI) from 1950 to 2006 and the CuSum.

기압 흐름이 약해지게 되고, 북대서양의 표층바람 역시 약해지는 현상이 일어난다. 이렇게 AOI 값이 양의 값을 가지는 경우에 북유럽에 온난기(warm phase)가 형성되며, 음의 값을 가질 때는 한냉기(cool phase)가 된다(Thompson and Wallace, 1998; Hodges, 2000).

AOI의 변동을 살펴보면, 1987년까지는 음의 값이 강세를 이루는 한냉기이며, 1988년부터 1994년은 양의 값을 나타내며 온난기를 유지하였다. 하지만 다시 1995년부터는 음의 값이 강세를 이루고 있다. CuSum은 작은 변동은 있지만 음의 기울기를 유지하다가, 1970년부터 1976년까지 양의 기울기를 나타낸다. 그 후 작은 증감을 반복하다가, 1989년에 크게 증가하여 1994년까지 양의

기울기를 나타낸다. 1994년 이후로는 뚜렷한 변화가 없다(Fig. 7).

태평양십년진동지수(Pacific Decadal Oscillation Index, PDOI)

다른 지수들이 대기의 상태를 근간으로 하여 계산된 것과는 달리, 태평양십년진동지수(Pacific Decadal (혹은 Interdecadal이라고도 부름) Oscillation Index, PDOI)는 해양의 SST에 근거하고 있다. 통칭 PDO라고 불리는 PDOI는 북위 20°에서 북극까지의 영역에서, 해수면 온도의 1st mode EOF coefficients 값을 11월에서 다음 해 3월까지 평균한 것이다(Mantua *et al.*, 1997). PDO는 수십 년 주기성분을 가장 강하게 나타내며, 그 변동은 북태평양의 물리, 생물적 변화와 관련되어 있다. PDO가 양의 값을 나타내면 동부태평양은 따뜻한 수온을, 중서부태평양의 중위도 지역은 차가운 수온을 나타낸다. 반대로 PDO가 음의 값을 나타내면, 북미 대륙 연안을 따라 차가운 수온이, 서부태평양에서는 따뜻한 수온이 나타난다. 이러한 냉온의 교대는 갑자기 이루어지며, 1976/77년의 PDO 변동으로 북미해역의 수온이 갑자기 따뜻해진 경우가 이러한 변화의 좋은 예가 될 수 있다.

PDO는 대체로 1950년대와 1960년대에는 음의 값을 가지다가, 1976년을 기점으로 그 값이 급격하게 변하여 1980년대의 후반과 1990년대의 후반에 잠시 음의 값을 보인 것을 제외하고는 전반적으로 양의 값을 유지하고 있다. PDO의 값은 1976/77년에 음에서 양으로 강하게 변화되었는데, 이 시점은 PDO 이외의 북태평양의 기후지수들에서도 변동이 감지된 시기이다. PDO의 CuSum은 1977년에 크게 반전하였지만, 1989년과 1998년에도 짧은 기간 동안 기울기의 반전이 있었다(Fig. 8).

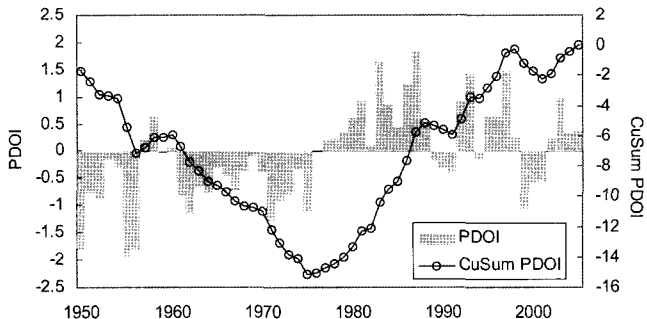


Fig. 8. Pacific Decadal Oscillation Index (PDOI) from 1950 to 2005 and the CuSum.

환경 변동과 연어 생산량 변화와의 연동성

양 대륙에서의 연어 생산량 변화는 1920년대 초의 어획량 자료를 제외하고는 비슷한 양상을 보인다(Fig. 9). 아시아 연어는 1920년대부터 어획량이 증가하여, 1930년대에 어획량이 15만 톤 정도로 증가하였다가, 1940년대 초반부터 1970년대 초반까지 계속 감소하여 대략 5만여 톤의 적은 어획이 이루어졌었다. 그 이후에는 1990년대의 초반과 후반에 일시적으로 감소를 보이기도 하지만, 어획량이 계속 증가하여 지난 10년 동안에는 20만~30만 톤의 어획이 기록되고 있다(Fig. 9a). 어획 초기인 1920년대의 적은 어획량이 자원량의 크기 때문인지, 아니면 연어 포획의 어획노력량이

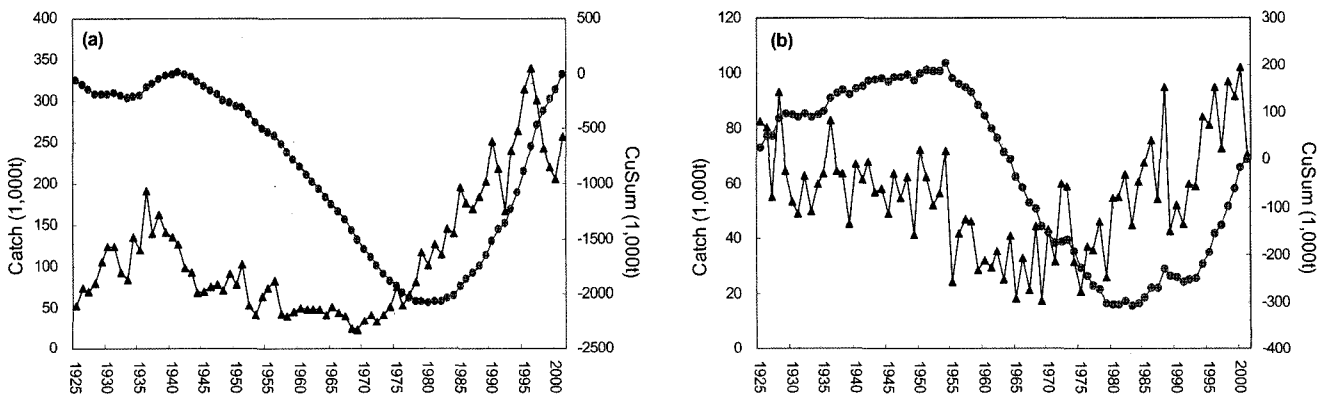


Fig. 9. Trend of chum salmon catch and CuSum, 1925~2001. (a) Asia, and (b) North America.

Table 2. Correlations between chum salmon production and Environmental Indices over the Pacific Ocean during 1950~2001.

	ALPI	SOI	PDOl	AOI
North America	0.202	-0.029	0.326**	0.157
Asia	0.212	-0.167	0.349**	0.301*
Pacific total	0.224	-0.145	0.379**	0.286*

* and ** indicate the significant levels of 0.05 and 0.01, respectively.

적어서인지는 확실하지 않다. 어획량의 CuSum은 1930년대부터 10여 년간은 상승하다가, 1940년대 중반부터 1970년대 후반까지 계속 하강하는 추세를 보이고 있으며, 1980년경을 기점으로 하여 그 이후에는 가파른 상승세가 시작되어 현재에 이르고 있다.

한편, 북미에서의 연어 어획량은 아시아에 비교하여 상대적으로 적으며, 1930~1940년대의 증가가 발견되지 않는다. 어획의 초기인 1920년대 중반에 다소 많은 8만여 톤의 어획이 이루어지다가, 1930년대부터 1950년대 초반까지 약 6만여 톤의 안정된 어획이 이루어졌었다. 하지만, 1950년대 중반부터 감소하기 시작한 연어 어획은 1970년대 후반까지 저조하였다. 그 이후, 아시아 연어와 마찬가지로, 북미 연어는 1980년대 들어와서 생산량이 계속 증가하여 최근에는 10만 톤에 육박하고 있다(Fig. 9b). CuSum의 변화 경향은 아시아 연어의 것과 비슷한 형태를 보이고 있으나, 아시아 연어가 1940년대부터 기울기가 바뀐 것과는 달리, 북미 연어의 경우에는 1950년대 중반부터 음의 부호로 전환되었다. 하지만 아시아 연어의 CuSum 기울기 변화가 발생하였던 1980년대 초반부터는 북미 연어자원에 마찬가지로 기울기가 다시 양으로 바뀌었지만 아시아 연어에 비교하여 그 기울기가 상대적으로 낮았다. 특기할 점은, 1989년 경 잠시 북미에서의 어획량이 반감되었던 시기가 있었는데, 대부분의 환경지수들이 1989년을 전후해서 변동이 있었으므로, 1989년의 기후 및 해양환경의 변화가 어획량에도 영향을 미쳤으리라 생각된다. CuSum 역시 1980년대의 증가 추세가 이 시기에 잠시 주춤한 것으로 나타났다.

기후 및 환경변화와 연어생산량의 상관성을 파악하기 위하여, 1950~2006년까지의 태평양의 연어생산량을 북미, 아시아, 전체 태평양으로 나누어 어획통계와 환경지수와의 상관관계를 계산하였다(Table 2). 대체로, 아시아 연어의 생산량이 북미 연어 생산량보다 상관성이 높았다. 북미, 아시아, 태평양전체지역의 연어생산량과 4개 환경지수와의 상관관계에서 PDOI는 각각 $r=0.326^{**}$, 0.349^{**} , 0.379^{**} 로 유의한 상관관계를 보였으며, AOI는 아시아 지역의 생산량, 그리고 태평양 전체의 생산량과 유의한 관계(각각 $r=0.301^{*}$, $r=0.286^{*}$)가 나타났다. PDOI가 다른 기후지수보다 높은 상관관계를 가지는 것은 PDOI에 이용되는 중요한 요소가 연어가 서식하는 표층생태계에 직접적인 영향을 미치는 해양의 SST이기 때문인 것으로 생각된다. ALPI는 어획량과 양의 상관관계를, SOI는 음의 상관관계를 보이고 있으나 통계적 유의성은 보이지 않는다. 비록 본 분석에서 ALPI와 SOI는 연어 어획량 사이에 유의성이 있는 상관관계는 발견하지 못하였으나, 지난 세기 동안에 ALPI는 다른 북태평양 기후지수와 상당히 큰 연관성을 보이고 있었으며, 다른 연어종 혹은 다른 어류의 생물학적, 수산학적 현상에 영향을 미쳤던 사실은 여러 연구에서 보고되었다(Beamish *et al.*, 1999; Kaeriyama, 2003). 그리고 SOI는 북태평양의 다른 지수들과 그 변

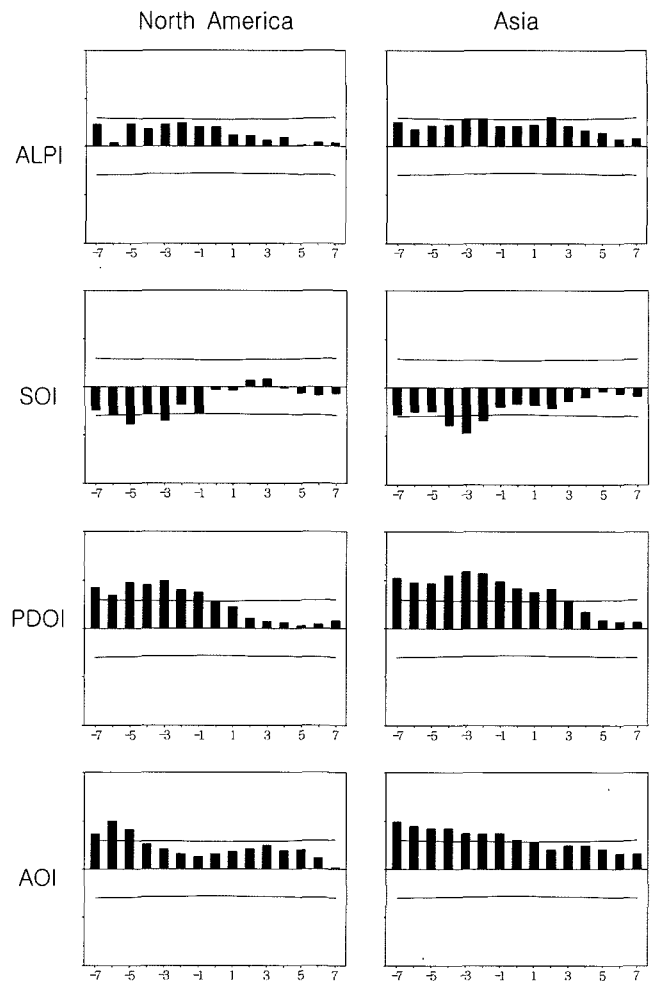


Fig. 10. Result of cross-correlation function analysis between regional chum salmon catches and four environmental indices during 1950~2001. Horizontal lines indicate 95% confidence limit.

화 양상이 대체로 반대 경향을 보이고 있으며, 1940년대 초반과 1970년대 중반의 기후체제변화도 SOI에 잘 나타나고 있다(Minobe, 1997; Zhang *et al.*, 1997). 그러므로 기후-해양생태계-수산자원의 연관성 문제를 연구하기 위해서는 이들 지수들에 대한 더욱 정밀한 분석이 필요할 것이다.

기후환경의 변화는 생물량에 직접적으로 혹은 간접적으로 영향을 미치지만, 아직 환경의 변화와 연어 자원량의 증감에 대한 해양에서의 과정(mechanistic process)이 밝혀지지는 않았다. 북태평양에서 1976/1977년에 발생한 기후체제변화는 동물플랑크톤 생산력의 변화를 보여주고 있으며(Brodeur and Ware, 1992), 기후변화에 의하여 야기되는 동물플랑크톤의 양의 변화는 궁극적으로 수산자원의 번성과 쇠락을 유발한다(Hunt *et al.*, 2002). 베링해에서 수온과 먹이생물의 양에 따라 달라지는 어류의 성장이 기후체제변화를 전후해서 판이하게 달라졌음이 여러 논문에서 보고되고 있다(Jung *et al.*, 2006; Seo *et al.*, 2006). 다년생 어류인 연어의 경우, 연어의 어획량 혹은 풍도가 환경 변화에 의한 영향을 받았는지 확인하기 위해서는 어느 정도의 시간이 경과하여야 할 것이다.

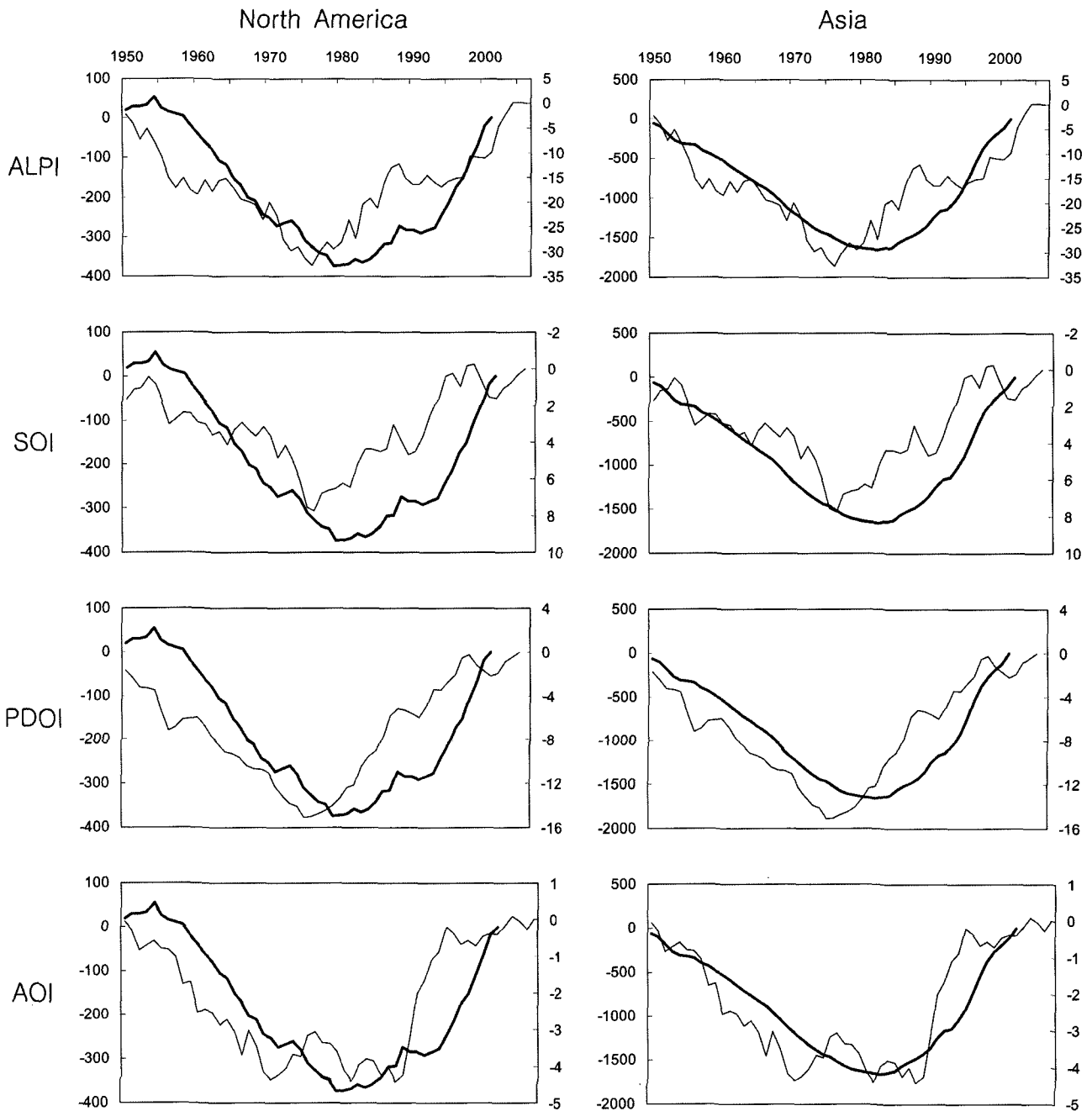


Fig. 11. Trend of CuSum of regional chum salmon catches (thick lines) and four environmental indices (thin lines) during 1950~2001.

가령, 여느 어류와 마찬가지로, 연어의 경우에도 어릴 때의 환경 변화에 따라 초기발생시기의 생존 및 성장, 그리고 성어에 이르는 가입량이 결정된다면, 3~4년이 지나 모천으로 회귀하는 연어 성어의 개체군 수는 연어가 치어의 상태로 산란장에서 해양으로 방출되었던 시기의 환경조건에 따라 크게 좌우될 것이다.

이러한 기후변동에 따른 생물학적 반응에 대한 시간차이(time-lag)를 규명해 보기 위해서 아시아와 북미에서의 연어 생산량과 네 환경 지수를 상호상관법(cross-correlation function)으로 분석하였다(Fig. 10). 전반적으로, 어획량과 환경 지수와의 상관관계는 당해 연도의 관계에서보다 시간차이가 있을 때 높게 나타나고 있었

다. 즉, 환경의 변동이 선행되고 몇 년이 지난 이후에 연어 어획량과 상관관계가 높게 나타났는데, ALPI의 경우에는 북미 연어 어획량과는 유의한 상관관계가 없었지만, 아시아 연어와는 2~3년의 차이를 두고 유의한 값($r = 0.282 \sim 0.285$)이 나타났다. ALPI와 부호가 반대로 나타나는 SOI는 북미 연어와는 3~5년($r = -0.277 \sim -0.385$), 아시아 연어와는 2~4년($r = -0.343 \sim -0.465$) 간격을 두고 유의한 관계가 나타났으며, PDOI는 0~7년이 모두 유의하였으나 3년(북미, $r = 0.490$; 아시아, $r = 0.588$)의 차이가 가장 상관관계가 높았다. 이러한 시간 차이는 연어가 태어나 해양에서 생활하다가 모천으로 돌아오는 나이에 해당되는데, 갓 태어난 연어가 해

양으로 들어가 생활하는 첫 해의 해양환경이 연어의 회귀에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 한편, AOI는 북미 연어와는 5~7년의 차이가 있을 때 상관관계($r = 0.361 \sim 0.497$)가 유의하였다. 아시아 연어는 0~7년 모두 상관관계가 유의하였으나, 시간차이가 클수록 높은 상관관계가 나타나서, 7년의 차이가 있을 때 상관관계가 가장 높았다($r = 0.493$).

환경변화와 연어의 어획량 변화가 시작된 시기를 확인하기 위하여, 어획 생산량과 환경 지수에 대한 편차의 누적합(CuSum)을 1950년 이후의 자료를 이용하여 동시에 비교하였다. 어획량에 대한 CuSum과 네 개의 환경 지수는 대체로 같은 유형의 변화를 보여주고 있다. 즉, 대부분의 CuSum 곡선이 1970년대 중반 혹은 후반을 기점으로 해서 기울기가 바뀌는 대전환점을 맞이하였는데, ALPI와 SOI는 1976년, PDOI는 1975년에 기울기가 변화하였으며, 어획량 자료의 CuSum과 약간의 시차를 가지고 거의 평행하게 변화하고 있다(Fig. 11). 하지만, AOI의 CuSum에서는 다른 지수들과는 다르게 1970~1987년 사이에 갑작스러운 기울기 변화가 일어나지 않고 소규모의 잦은 전환만 보이고 있다. AOI는 다른 어느 지수들보다도 1989년의 환경변화를 극명하게 나타낸다. 연어 어획량의 경우, 북미에서는 연어의 어획량이 1979년을 기점으로 바뀌고 있었으며, 아시아에서는 이보다 조금 늦은 1982년이 전환점이 되고 있다. 따라서 북미에 서식하는 연어는 태평양에서 기후와 환경의 변화가 발생한지 3년 정도 지나면 어획량 변동이 야기되고, 아시아 연어는 약 6~7년의 시간이 지나야 어획량의 변동이 유발됨을 보이고 있다. 아시아 연어의 이러한 시간차이는 CCF 분석에서 AOI와 아시아 연어 어획이 최대로 높은 상관관계를 가지는 시간에 해당된다.

결론 및 향후의 연구

기후의 변화는 예측하기가 매우 어렵다. 비록 IPCC에서는 금세기 말까지 지구의 평균기온이 평균적으로 대폭 상승할 것으로 예견하고 있지만, 현재의 과학지식으로는 각 해양에서의 수온 상승 폭 혹은 하강폭을 정확하게 계산하기가 어렵다. 해양에서의 해류 경로의 변경과 같은 대변화를 예측하기란 더욱 어려우며, 따라서 그 생태계에 서식하고 있는 생물들의 번성여부를 미리 판단한다는 것이 거의 불가능할 것이다. 하지만, 세계 각 지역에 산재해 있는 해양생태계에서 과거의 자료를 가지고 기후변화의 시각으로 재분석하며, 해양에서의 생태학적 과정 연구와 모델링 연구를 꾸준히 병행하여 해양 전체의 모습을 통합적(integration and synthesis)으로 해석할 수 있다면, 궁극적으로 기후 변화에 따른 해양생태계의 새로운 모습을 예측할 수 있을 것이다(김, 2000).

동해의 수온은 1997년 이후에는 그 전에 비해 높은 수준을 유지하고 있으며, 장기적으로 볼 때 지구온난화의 영향으로 인한 수온상승이 발생할 가능성이 높다. 연어는 냉수성 어종이기 때문에, 일본 해역의 어린 연어는 일반적으로 14°C 정도의 쓰시마 해류의 따뜻한 물이 북상할 때 이와의 접촉을 피하여 6월 중순까지는 연안을 떠나 북쪽으로 이동한다. Mayama and Ishida(2003)는 어린 연어의 한계수온으로 14°C를 제시하였는데, 홋카이도 연안에서의 어린 연어의 풍도는 주로 8~13°C의 수온 범위에서 높게 나타났고, 13°C를 넘자 급감한다(Seki, 2005). 동해 연안의 경우 4월의 평균

수온은 13°C를 넘지 않으나, 5월만 되어도 이미 14°C에 가까우며 6월은 최고 17°C까지도 나타난다. 하지만 일본산 연어가 오호츠크해로 상대적으로 빠르게 진입할 수 있는 반면 한국산은 먼 거리를 가야 하므로 일본산보다는 빠른 시기에 연안을 떠날 것으로 생각된다. 하지만 최근의 연어에 대한 연구들이 지구온난화에 의해 영향을 받을 가능성을 지적하고 있듯(Ishida *et al.*, 2001), 차후 한국연안에서도 영향이 나타날 가능성이 있다.

본 연구에서는 성장이 빠른 연어는 오호츠크해에서의 성장률, 느린 연어는 베링해에서의 성장률이 연어의 회귀 성공률에 가장 큰 영향을 미치는 요소가 될 것이라고 보았으며, 이 과정에는 크기연관사망이 개입되었을 것이라고 보았다. 그러나, 연어의 사망과 회귀율에 작용하는 또 다른 요소는 연어 치어가 방류될 때의 이상수온이 될 것이다(Kim *et al.*, in review). 일반적으로 연어 치어가 방류될 때, 13~14°C보다 높은 수온이 형성되어 있다면 치어의 대량 치사가 발생할 수 있다(Mayama and Ishida, 2003; Seki, 2005). 우리나라 연어의 회귀율이 낮았던 2000~2001년의 경우, 이들이 방류된 1997년과 1998년의 4월 15일과 5월 15일 사이에 14°C보다 높은 수온이 형성되었던 일수가 각각 14일, 16일로 다른 연도에 비하여 월등히 많았다는 사실을 고려한다면, 해양수온의 변화가 연어의 회귀율에 직접적인 영향을 미친다고 볼 수 있다. 향후, 이에 대한 정밀한 분석이 요구된다.

이 논문의 분석 결과 중 중요한 사실은 아시아 연어와 북미 연어가 환경변화에 대응하는 시간차이가 다르다는 것이다. 연어 회귀량과 환경변화와의 관계에서, PDO는 동태평양과 서태평양 연어에 공통적으로 영향을 미치고 있으며, 시간차이가 3년일 때에 최대의 상관관계를 나타냈다. 하지만, AOI의 경우에는 상관관계가 6~7년 후에 최대로 나타났다. 그러므로 태평양 연어에 대해서는 PDO, AOI가 동시에 영향을 미치는 것으로 나타나는데, 두 환경요인이 연동되어 있을 가능성이 높다. 그리고 이렇게 다른 두 환경요인이 연어자원에 다른 시간차이를 가지며 영향을 미치고 있을 때, 생태학적 현상을 구분해서 해석하기는 불가능하였다. 아직 이러한 시간 차이가 왜 나는지는 규명되지 않았으며, 후일 해양에서의 생태학적인 과정을 감안하여 가설이 제시되어야 할 것이다.

북반구에서의 기상 및 기후현상과 연어자원의 변동은 분명히 연관이 있는 것처럼 보이는데, 가장 풍도가 큰 곱사연어와 연어의 어획기록에서 볼 수 있듯이, 1930~1940년대의 높은 어획에 이어, 1950~1970년대의 저조한 어획, 그리고 그 이후의 급격한 증가현상(Fig. 2과 Fig. 3)은 북동태평양에서의 기후체제변화로 설명되고 있다(Francis and Hare, 1994). 특히 아시아 연어는 알래스카 만까지 분포하고 있으므로(Urawa *et al.*, 2001; Urawa, 2003), 북미 연어에 비하여 더욱 넓은 범위에 걸쳐 서식하고 있고, 이러한 이유 때문에 북태평양에서 발생하고 있는 기후의 변동에 더욱 민감하게 반응하는 것 같다. 우리나라와 같이 부화장이 연어 서식수온의 남방한계선에 위치하고 있는 곳에서는, 지구온난화에 의한 SST의 상승이 방류된 치어의 치사율을 높게 만들어 금세기 이후에는 연어가 분포하기 어려운 해역이 될 가능성도 있다. 만약 한반도의 동해가 연어의 서식처로 부적합한 해역이 된다면 현재의 연어사업은 재고되어야 할 것이며, 이를 타개하기 위한 국가적 대책도 시급히 마련되어야 할 것이다.

동해는 한반도의 약 5배에 이르는 넓은 해역이지만, 남쪽의 거

의 대부분은 쓰시마 해류에서 기인한 따뜻한 해수가 표층을 차지하고 있다. 그러므로 우리나라에서 방류된 연어 치어가 북태평양으로 나가는 주요한 출구는 일본 홋카이도와 사할린 섬 사이의 소야 해협(Soya Strait)이다. 우리나라 연어의 회귀율이 낮은 이유가 여러 가지 있을 수 있겠으나, 북태평양으로 빠져 나갈 출구를 찾지 못한 연어 치어가 동해상에서 여름의 높은 SST를 견뎌내지 못하고 사망하는 이유도 있을 것이다. 동해의 북쪽은 냉수가 차지하고 있다고 하더라도, 여름에는 20°C 이상의 높은 수온이 형성되어 연어가 서식하기에 적합한 수온이 되지 못하기 때문이다. 하지만 만약 연어보다도 따뜻한 해수온을 견뎌낼 수 있는 다른 연어종이 있다면, 그리고 그들이 꼭 북태평양으로 나가지 않고 동해의 약간 깊은 곳에 서식할 수 있는 가능성이 있다면, 동해를 연어의 목장으로 만들 수도 있을 것이다. 몇몇 해양목장사업의 연구결과에서 보듯이(변재형 외, 1997; Ray Buck, Univ. of Washington, pers. comm.), 치어와 같은 작은 어류를 방류하는 것보다, 육상의 사육수조에서 어느 정도 키운 중형의 어류를 바다에 방류한다면, 그들의 분포가 방류지에 인접한 해역으로 국한될 수도 있을 것이다. 또한 시간-수심기록계(Time-Depth Recorder)를 이용한 표지방류 실험에 의하면, 연어 성어가 모천으로 회귀할 때에는 연안 부근에서 수심 200-300 m까지 잠수할 수 있는 것으로 밝혀졌는데, 만약 1년 정도 사육수조에서 키워서 방류를 한다면 치어와는 달리 미성어들은 해양표층의 더운 수온을 피하여 더 깊은 곳에 들어가 살 가능성도 있을 것이다.

각국의 연어 방류량과 어획량을 비교한 결과, 1980년대의 활발한 치어방류사업은 연어 생산량 증대에 기여한 바가 큰 것처럼 보인다. 이러한 인위적인 활동 이외에도 기후의 변동에 따른 동물플랑크톤의 생산력 증가는 연어 개체군의 증식에 긍정적인 효과를 보이고 있지만, 지구온난화에 의한 수온의 상승은 치어의 높은 사망률을 야기하여 연어자원 증식에 부정적인 요인으로 작용하기도 한다. 연어 방류량과 어획량이 비례하지 않았던 시기에 대한 과학적인 해석이 아직 불충분하며, 성장률과 회귀율에 영향을 미치는 환경의 변화에 대한 근거도 부족하다. 우리의 분석에서는 연어 어획량과 ALPI와 SOI가 상관성이 나타나지는 않았지만, 1920~1990년 사이의 주요 연어류 3종(연어, 굽사연어, 홍연어)에 대한 북태평양에서의 환경수용력(carrying capacity) 추정치도 ALPI와 높은 상관관계를 보이고 있는 것으로 보아, 환경 지수에 대한 심도 깊은 연구가 필요할 것이다(Kaeriyama, 2003; Kaeriyama and Edpalina, 2004). 그리고 우리가 분석에 이용한 기후 및 환경 지수 이외에도, 다른 중요한 환경의 변화요인(예: 문순, 바람 등)이 연어자원에 영향을 미칠 수도 있을 것이므로, 향후 우리나라 연안역에 환경의 변화를 지시하는 지역적 기후 지수를 개발하여, 이들의 영향이 연어류를 포함한 우리나라 연안역의 수산자원에 영향을 미치고 있는지 확인하는 연구가 필요하다.

감사의 글

분석된 시료의 일부는 국립수산물과학원 영동내수면연구소에서 장기간에 걸쳐 수집된 것임을 밝힌다. 성기백 박사님과 시료의 수집에 기여한 연구소 관계자들에게 감사를 드린다. 그리고 본 원고의 초고를 심사해 주시고, 귀한 조언을 해 주신 심사자 두 분께 감

사드린다. 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-4503: 기후변화가 북태평양 생태계에 미친 영향 평가)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 김수암, 1995. 기후변화와 북태평양의 수산자원 변동에 관한 고찰. 해양정책연구, 10: 107-142.
- 김수암, 2000. GLOBEC 프로그램의 목적, 운영체계 및 최근의 동향에 대하여. 바다, 5: 10-15.
- 김수암, 2002. 기후변화에 대비한 해양환경연구의 방향. 환경정책연구, 1: 1-24.
- 김수암, 2003. 어류자원의 변동에 미치는 해양환경의 영향. 한국수산자원학회지, 6: 11-20.
- 로춘봉, 1986. 곱추송어의 성장과 수량변동 경향에 대한 연구. 수산과학기술논문집. 농업출판사, 평양, pp. 17-24.
- 변재형, 김영섭, 김창훈, 남기완, 양한섭, 이춘우, 장영진, 정현도, 허민도, 1997. 해양목장. 한국학술진흥재단 번역 총서 211. 동화기술, pp. 809.
- 이채성, 성기백, 강수경, 이철호. 미발표 자료. 우리나라 연어 포획 및 치어방류 현황. 국립수산물과학원, 영동내수면연구소, 양양.
- Bax, N.J. 1983. Early marine mortality of marked juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) released into Hood Canal, Puget Sound, Washington, in 1980. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 426-435.
- Beamish, R.J., D.J. Noakes, G.A. McFarlane, L. Klyashtorin, V.V. Ivanov, and V. Kurashov, 1999. The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56: 516-526.
- Brodeur, R.D. and D.M. Ware, 1992. Long-term variability in zooplankton biomass in the subarctic Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.*, 1: 32-39.
- Francis, R.C. and S.R. Hare, 1994. Decadal-scale regime shifts in the large marine ecosystem of the North-east Pacific: a case for historical science. *Fish. Oceanogr.*, 3: 279-291.
- Fukuwaka, M. 1998. Scale and otholith patterns prove growth history of Pacific salmon. *N. Pac. Anadr. fish Comm. Bull.*, 1: 190-198.
- Fukuwaka, M. and Kaeriyama, M. 1994. A back-calculation method for estimating individual growth of juvenile chum salmon by scale analysis. *Sci. Rep. Hokkaido Salmon Hatchery*, 48: 1-9. (In Japanese)
- Fukuwaka, M. and Suzuki, T. 2001. Early sea mortality of chum salmon juveniles in the open coastal waters of the Japan Sea. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull. Technical report* 2: 7-8.
- Gargett, A.E., 1997. The optimal stability "window": a mechanism underlying decadal fluctuations in North Pacific salmon stocks. *Fish. Oceanogr.*, 6: 1-9.
- Healey, M.C. 1982. Timing and relative intensity of size-selective mortality of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during early sea life. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 39: 952-957.
- Hjort, J., 1914. Fluctuations in the great fisheries of northern Europe. *Rapp. Proc. Verb.*, 20: 1-13.
- Hodge, G., 2000. The new cold war. Stalking arctic climate change by submarine. *National Geographic*, March, 30-41.

- Hunt, G.L., Jr., P. Stabeno, G. Walters, E. Sinclair, R.D. Brodeur, J.M. Napp, and N.A. Bond, 2002. Climate change and control of the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem. *Deep-Sea Res. II*, **49**: 5821–5853.
- Ishida, Y., Hariu, T., Yamashiro, J., Mckinnell, T., and Kaneko, H. 2001. Archeological evidence of Pacific salmon distribution in northern Japan and implication for future global warming. *Prog. Oceanogr.* **49**: 539–550.
- Jung, K.M., S. Kang, S. Kim, and A.W. Kendall, Jr., 2006. Ecological characteristics of walleye pollock eggs and larvae in the southeastern Bering Sea during the late 1970s. *J. of Oceanogr.*, **62**: 859–871.
- Kaeriyama, M., 2003. Evaluation of carrying capacity of Pacific salmon in the North Pacific Ocean for ecosystem-based sustainable conservation management. *NPAFC Tech. Rep.*, **5**: 1–4.
- Kaeriyama, M. and R.R. Edpalina, 2004. Evaluation of the biological interaction between wild and hatchery population for sustainable fisheries management of Pacific salmon. In: K.M. Leber, S. Kitada, H.L. Blankenship, and T. Svasand (eds.), Stock enhancement and sea ranching. Blackwell Publishing, Oxford., pp. 247–259.
- Kang, S. and S. Kim, 2004. Comparison of biological characteristics of chum salmon, *Oncorhynchus keta* from the eastern and western North Pacific. *J. Korean Soc. Fish. Res.* **6**: 153–162.
- Kim, S., C.I. Zhang, J.-Y. Kim, J.-H. Oh, S. Kang, and J.B. Lee, in review. Climate variability and its effects on major fisheries in Korea. *Ocean Science Journal*.
- Klyashtorin, L.B., 2001. Climate change and long-term fluctuations of commercial catches: The possibility of forecasting. *FAO Fisheries Tech. Paper 410*, pp. 86.
- Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, and R.C. Francis, 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**: 1069–1079.
- Mayama, H., and Y. Ishida, 2003. Japanese studies on the early ocean life of juvenile salmon. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.*, **3**: 41–67.
- Minobe, S., 1997. A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, **24**: 683–686.
- Murdoch, J., 1979. Control charts. Macmillan Press Ltd., London, U.K.
- PICES., 2004. Marine Ecosystems of the North Pacific. *PICES Special Publ.*, **1**, pp. 280.
- Seki, J., 2005. Study of characteristic of feeding habitat of juvenile chum salmon and their food environment in the Pacific coastal waters, central part of Hokkaido. *Bulletin of the National Salmon Resources Center*, **7**: 1–104.
- Seo, H., S. Kim, K. Seong, and S. Kang, 2006. Variability in scale growth rates of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in relation to climate changes in the late 1980s. *Prog. in Oceanogr.*, **68**: 205–216.
- Shuntov, V.P., Dulepova, Y.P. 1996. Biota of Okhotsk Sea: structure of communities, the interannual dynamics and current status. *PICES Scientific Report*, **6**: 263–273.
- Sugimoto, T., Tadokoro, K. 1997. Interannual-interdecadal variations in zooplankton biomass, chlorophyll concentration and physical environment in the subarctic Pacific and Bering Sea. *Fish. Oceanogr.*, **6**: 74–93.
- Thompson, D.W.J., and J.M. Wallace, 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**: 1297–1300.
- Trenberth, K.E. and D.J. Shea, 1987. On the evolution of the Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.*, **115**: 3078–3096.
- Urawa, S., 2003. Stock identification studies of high seas salmon in Japan: A review and future plan. *NPAFC Tech. Rep.*, **5**: 9–10.
- Urawa, S., Y. Ueno, Y. Ishida, L.W. Seeb, P.A. Crane, S. Abe, and N.D. Davis, 2001. A migration model of Japanese chum salmon during early ocean life. *NPAFC Tech. Rep.*, **2**: 45–45.
- Venrick, E.L., J.A. McGowan, D.R. Cayan, and T.L. Hayward, 1987. Climate and chlorophyll a: long-term trends in the central North Pacific Ocean. *Science.*, **238**: 70–72.
- Wooster, W.S., K. Banse, and D.R. Gunderson, 1983. On the development of strategies for the study of ocean fish interactions. In: W.S. Wooster (ed.) From year to year. Washington Sea Grant Publication, Univ. of Washington, Seattle, WA.
- Zhang, Y., J.M. Wallace, and D.S. Battisti, 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J. Climate*, **10**: 1004–1020.
- ALPI http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/sa-mfpd/climate/clm_idx_alpi.htm.
- AO http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml.
- FAO <http://www.fao.org/fi/statist/FISOFT/FISHPLUS.asp#Download>.
- 한국해양자료센터(KODC) <http://kodic2.nfrdi.re.kr:8001/home/eng/main/index.php>
- NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center(NCEP/NCAR reanalysis) <http://www.cdc.noaa.gov/Timeseries>.
- NPAFC http://www.npafc.org/new/pub_statistics.html.
- PDO <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>.
- SOI <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/soi.htm>.

2007년 4월 10일 원고접수

2007년 4월 18일 수정본 채택

담당편집위원: 이채성