



## 이 학 석 사 학 위 논 문

# 1960-2000년대의 한국 동해 명태 (*Gadus chalcogrammus*)의 생물학적 특성



부경대학교 대학원

해양생물학과

김 무 진

이 학 석 사 학 위 논 문

# 1960-2000년대의 한국 동해 명태 (*Gadus chalcogrammus*)의 생물학적 특성 변화와 가입변동

지도교수 김 수 암 이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함. 2017 년 8 월

부경대학교 대학원

해양생물학과

김 무 진

## 김무진의 이학석사 학위논문을 인준함.

2017년 8월 25일



List	of Tables	
1100		
Abst I. 사	et 론	
<b>Ⅱ</b> .ス	·료 및 방법	
1. 🤇	计显	•••••
가	해양환경자료	
	L) 수온 ·····	••••
	2) 동물플랑크톤	•••••
나	명태자료	
	1) 어업별-어획량 자료	

데이터 분석	
가 새무하저 특서치	
1) - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 -	
1) 제상-제중 관계식 ···································	
2) 본 버틀란피 성장식	
3) 군성숙 체장	

4) 비만도	13
5) 상대체장빈도	13
나. 가입변동	······ 14
1) Proportional Size Distribution(PSD)	······ 14
2) 가입량 추정	15
가) 사망률 추정	15
나) 연령-체장 상관표	
다) 코호트 분석	
INTIONAL I	
3. 통계분석	
E E	
Ⅲ. 결과	
1. 해양 환경	
가. 수온 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
나. 동물플랑크톤	······ 23
2. 명태의 어업별 어획량	······ 26
3. 명태의 생물학적 파라미터	
가. 성장	
나. 성 성숙	······ 32
다. 비만도	······ 32
라. 상대 체장 빈도	
4. 가입변동	39
가. Proportional Size Distribution(PSD) ······	
나. 연령별 개체수 추정	41
1) 사망계수	

2)	연령-체장 상관표	41
3)	코호트 분석	44

 5. 가입변동과 환경
 47

 가. 어획량과 환경
 47

 나. 연령별 풍도와 환경
 48

IV. 고찰 ·····	· 55
1. 명태 어획량 및 단위노력당어획량(CPUE) 변동	· 55
2. 명태의 생물학적 특성 변화	· 56
3. 해양환경변화에 따른 명태의 가입변동	· 58
9 9	
V. 참고문헌	· 62
VI <u><u><u></u></u><u><u></u><u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u></u></u></u>	. 73
	10
Ⅶ. 감사의 글	· 74

### LIST OF FIGURES

**Figure 2.** Map of the study area. Shaded area indicates the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) consisting of 4 fishery statistical areas (55, 56, 62, and 63). Numbers on lines (105, 106, and 107) indicate the monitoring stations for oceanographic observation. 10

Figure 3. Vertical profile of December seawater temperature in the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1965-2002. 21

Figure 4. Variation of December seawater temperature in the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1965-2002. (a) 20m, (b) 50m, (c) 75m, and (d) 100m. 22

**Figure 5.** Variation of annual zooplankton biomass (mg/m<sup>3</sup>) in the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1965-2002. 24

Figure 9. Length-weight relationship of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. (a) Period 1 (1958-1958), and (b) Period 2 (1973-1985). ..... 30

Figure 15. Proportional Size Distribution (PSD) of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. Broken, solid, and dotted lines are the mean PSDs at Period 1 (1958-1968), Period 2 (1973-1985), and Period 3 (1991-2002), respectively. 40

**Figure 17.** The relationship between PSD and the abundance  $(log_{10}N)$  of age 2 and 3 of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters in Period 1 (1958-1968) and Period 2 (1973-1985). (a) age-2 abundance, (b) age-3 abundance.

Figure 18. Anomaly of juvenile catch of walleye pollock (Gadus chalcogrammus)

**Figure 19.** Cross correlation between juvenile catch of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and December seawater temperature in Korean waters, 1975-1997. Bars indicate the coefficient and dotted lines present upper and lower confidence limits. (a) 10 m, (b) 20 m, (c) 75 m, and (d) 100 m. ..... 50

ATIONAL

Figure 21. Cross correlation between juvenile catch of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and June zooplankton biomass in Korean waters, 1975-1997. Bars indicate the coefficient and dotted lines present upper and lower confidence limits. 52



## LIST OF TABLES

**Table 1.** The number of aged and unaged walleye pollock (Gaduschalcogrammus) at each size category sampled during Period 1 (1958-1968),and Period 2 (1973-1985).17

**Table 2.** The age proportional of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) ateach size category during Period 1 (1958-1968), and Period 2 (1973-1985). .... 42

 Table 3. The number at age calculated from age-length key of walleye pollock

 (Gadus chalcogrammus).

## Biotic and abiotic impacts on walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) population off the east coast of Korea over the last 5 decades

Moojin Kim

Department of Marine Biology, The Graduate School, Pukyong National University

#### Abstract

Commercial catch of walleye pollock (Gadus chalcogrammus) in South Korean waters has been recorded since the mid 20th century. Based on the availability of fisheries, we could identify three developing stages of fishery over the last 5 decades: the beginning stage of fisheries (Period 1: 1958-1968), peak fishing Period (Period 2: 1973-1985) and after peak fishing (Period 3: 1991-2002). To investigate the recruitment variability, we examined the length frequency of pollock caught from commercial fisheries, and the properties of habitat environment. A significant difference in length frequency distribution was found within study period. Relative length frequency indicated that the large-sized old pollock (>40 cm) as well as the immatures were obviously abundant in Period 1, while the high proportions of middle size pollock (37-43 cm) were common in Period 2 and Period 3, and length range became narrower in Period 3 than Period 2. Assuming the first maturity at 25cm and the 50% maturity at 37cm, the Proportional Size Distribution (PSD) was estimated. PSD in Period 2 (mean=60) was lower than Period 3 (mean=71). Recruitment variability seemed to be stable in Period 2, because it is usually interpreted that the PSD range of 30-70 indicates the stable recruitment. The annual PSDs also showed the opposite trend with the abundance at age-2 and age-3 estimated from the Cohort analysis. The

Cross-Correlation Function analysis showed that there was a significant positive correlation between juvenile walleye pollock catch and zooplankton biomass in June with a time lag of 3 years (r=0.549, p<0.05). Furthermore, there were significant positive correlations between juvenile pollock catch and December seawater temperatures at 10 m and 20 m with a time lag of 3 years (r = 0.515 for 10 m, and 0.507 for 20 m, p<0.05), and with December seawater temperatures at 50 m and 75 m with a time lag of 2 years (r = 0.659 for 50 m, and 0.592 for 75 m, p<0.05). Age-2 abundance estimated from the Cohort analysis was positively correlated with April seawater temperature at 75m with a time lag of 2 years (r = 0.671, p<0.05). These results imply that biotic as well as abiotic environmental factors during the early life stages of pollock have a significant influence on the variability in walleye pollock recruitment.



## I. 서론

명태는 대구과(Family Gadidae) 어류로 비교적 찬 수온인 5℃ 내외를 선 호하는 냉수성 어종이다. 명태는 북태평양의 오호츠크해(Okhotsk Sea), 베 링해(Bering Sea), 알래스카만(Gulf of Alaska)에 광범위하게 분포하고 있 으며, 동해(East Sea)는 미국 캘리포니아 북부 연안과 더불어 명태분포의 남방한계로 알려져 있다(Fishbase, 2017). 명태는 각 해역마다 독립적인 산 란장을 가지고 있으며 각 산란장에서는 일년 중 거의 정해진 기간에 산란 이 일어난다(Kim, 1992; Bailey, 2000). 알래스카 남동 베링해(Southeastern Bering Sea)에서는 4월 중순(Kim and Gunderson, 1988), 알래스카만 쉘리 코프해협(Shelikof Strait)에서는 4월초(Kendall et al., 1996), 일본 홋카이도 의 푼카만(Funka Bay)에서는 1-2월(Maeda, 1986), 우리나라 동해(East Sea)의 원산만(Wonsan Bay)에서는 11-12월(Kim and Kang, 1998)에 산란 활동이 가장 왕성하다. 동해에는 여러 명태 계군이 있는데, Oh et al. (2004)에 의하면 일본 연안에 3개의 계군과 한국 연안에 존재하는 그룹이 있다고 하였으며, 김과 강(1998)은 동해 내의 명태자원은 러시아 연안의 프 리모리에 지역과 타타르 해협 부근, 일본 홋카이도 서쪽 해안, 그리고 원산 만에 산란을 하는 4개의 계군으로 구성된다고 하였다. 하지만 원산만에서 산란을 하는 계군이 가장 크기 때문에 원산만이 동해 명태의 주산란장으로 알려져 있고, 원산만 계군의 일부가 한반도 동해안을 따라 남하하여 한국 동해 연안에 서식한다(Oh et al., 2004).

먼 바다에 서식하던 명태는 산란시기가 되면 연안 가까이에 와서 산란을 하는 습성을 보이지만 산란 수심은 해역마다 다르다. 수심 200m보다 깊은

곳에서 산란을 하는 알래스카만 명태를 제외하고는(Kendall and Kim, 1989), 대체로 연안의 50-100m 수심의 대륙붕 수층에서 산란을 하며, 산란 된 알은 부성란으로서 수층에 떠서 존재한다. 수중에서 수정된 이후에 알 의 비중과 해수의 밀도차이에 따라 수층에서 수직이동을 하면서 배 (embryo)의 개체발생이 진행된다. 부화기간은 배가 노출되는 수온에 따라 다른데, 보통 5℃의 수온에서는 약 2주일, 3℃의 수온에서는 약 3주일의 발 생기간이 필요하다(Haynes and Ignelll, 1983; Nakatani, 1988). 산란 후 2-3주일이 경과하면 명태 알은 표층에서 부화하며, 자치어(larva)는 초여름 에 변태(metamorphosis) 과정을 거쳐 미성어(juvenile)로 성장한다. 미성어 는 여름에 왕성한 섭이활동을 하여 빠른 성장을 보인다. 하지만 성기관이 성숙되어 성어로 변환하기까지에는 약 2-3년의 시간이 필요하며, 미성어는 성장함에 따라 더 깊은 곳으로 내려가 서식하는 경향이 있다(Muigwa, 1988; Kendall et al., 1996; Kim, 1992). 명태 미성어의 성 기관이 발달하여 성숙되면 명태의 생물학적 가입(recruitment)이 발생한다.

가입은 자원량 변동과 수산업의 생산성에 큰 영향을 미치기 때문에 해양 생태학과 수산학에서 중요한 연구주제이다. 생물학적 관점에서는 생식기관 이 성숙되어 산란을 할 수 있는 성어가 되는 것을 말하며, 수산학적 관점 에서는 성어가 되어 어민에게 포획되는 것을 말한다. 1914년 Hjort의 논문 발표 이후, 해양환경의 변화와 초기생활사 시기의 생존은 큰 관련성을 가 지는 것으로 알려졌다(Hjort, 1914). 어류개체군(fish population)의 규모는 초기생활사 시기 및 미성어 시기의 사망률에 의해 결정되고, 이는 가입에 큰 영향을 미친다(Bradford and Cabana, 1997). 또한 이러한 수산생물의 사망률은 기후 혹은 기상변화의 결과로 발생하는 수온, 해류 등의 해양 조 건의 변화에 영향을 받는다(Bakun, 1990; Diaz and Rosenberg, 2008; IPCC, 2014). 한편, 수산자원의 가입은 기후변화 같은 해양환경변화뿐만 아

니라, 어업에 의해 초래된 생물학적 특징의 변화에 의해 결정되기도 한다 (Brander, 2007; Britten et. al., 2016). 명태는 페루연안의 멸치(anchoveta, *Engraulis ringens*)와 더불어 단일어종으로는 어획생산량이 세계에서 가장 많은 어종중의 하나로서, 생태학적 관점뿐만 아니라 경제적으로도 매우 중 요하다. 따라서 명태자원의 가입에 영향을 미치는 요인에 대해서 많은 연 구가 수행되었으며, 태평양 연안의 명태 어업국들은 명태자원의 변동원인 을 규명하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다.

우리나라 동해는 북서태평양에 위치한 반폐쇄성 지역해로 남서쪽으로는 동중국해와 연결되어 있어 수온이 높고 염분이 많은 대마난류(Tsushima Current)가 흘러들어온다. 대마난류의 일부는 한반도의 동쪽 해안을 따라 북상하다가 북위 38° - 40°N 부근에서 북쪽에서 흘러 들어오는 북한한류 (North Korea Cold Current)와 만나 동쪽으로 흐른다(Senjyu, 1999; Chang et al., 2004). 두 해류는 수온과 염분 특징이 뚜렷하게 구분되며, 흐 름의 강도와 해수 특성이 매년 다르게 나타난다. 이에 따라 각 수괴에 서 식하는 플랑크톤 종류도 현저히 다른데(Ashjian et al., 2005), 해양생태계 의 변화는 식물플랑크톤 엽록소밀도와 상당한 관련이 있다(Britten et al., 2016).

전 지구적으로 진행되고 있는 기후변화는 동해 생태계에도 큰 영향을 미 친다. 동해에서도 기후체제의 변동에 따라서 해수에 녹아있는 영양염 농도, 동식물플랑크톤의 생체량에 많은 변화가 발생하였고(Lee et al, 2008), 어류 개체군과 수산업에 큰 영향을 미쳤다(Tian et al., 2006; Attrill and Power, 2002; Brander, 2010). 즉, 기후변화로 인한 생태계의 구조와 주요 어종 구 성의 변화가 일어났으며, 이러한 변화는 어업자원의 종류와 생산량에도 큰 영향을 미쳤다(Zhang et al., 2004; Kim et al., 2007, Jung et al., 2013)

우리나라 동해 명태에 대한 상업적 어업은 1911년부터 기록되어 있는데,

해방이전에 조선총독부시험장에서 기록된 명태어장의 중심은 북한해역에 형성되어 있었다(朝鮮總督府水産試驗場, 1943). 명태는 여름에 다른 계절보 다 넓게 분포하였으며, 연안의 가까운 곳에서는 기선저인망과 자망으로, 비 교적 연안과 먼 곳은 연승으로 어획하였다. 명태의 중심어장은 38°N 이북 해역으로 추정되는데 남북 분단 이후 북한에서 발간되는 수산통계자료의 획득이 쉽지 않아 명태에 대한 과학적 연구가 활발하지 못하였다(Lee, 1991; Kim and Kang, 1998). 명태는 북한 수산어획량 생산의 절반을 차지 할 정도로 중요한 상업종이었으며, 과거 1930-50년대에는 20-30만톤, 1980 년대에는 150-200만 톤의 명태가 어획되었지만 이후로는 생산량이 격감하 여 1990년대에는 40-50만톤에 불과하였다(Kim and Kang, 1998).

우리나라 동해에서의 명태 어획량은 1950년대부터 2000년대까지 크게 변 화하였다. 1970년대 중반 이후 명태 어획량은 급격히 증가하여 1981년에 약 17만 톤까지 생산되었으며, 1980년대 중반부터 급감하기 시작하였다 (Fig. 1). 1976-1985년까지 연평균 10.7만 톤으로 동해 연근해 총 어획량의 44%를 차지하면서 중요한 위치를 차지하던 명태자원은 2000년대 직후에 3 만톤 이내로 어획되었고 최근에는 명태자원이 완전히 붕괴되었다(Kang et al., 2013). 북한 해역에서도 명태 어업이 거의 붕괴되었다는 비공식 보고는 있으나, 정확한 통계치를 얻지 못하였다.

동해 명태는 수심 200-350m에 분포하며 서식수온은 2-10℃, 성숙체장은 약 25cm로 이때의 연령은 2-3세이다(NFRDI, 2010; Kang et al., 2013). 산 란시기인 겨울이 되면 외해에서 서식하고 있던 명태 성어가 연안의 대륙붕 에 들어와 산란한다(Park and Ok, 1986; Kang et al., 2013). 동해의 명태 가 우리나라 수산업의 중추적 위치에 있었음에도 불구하고, 명태의 주 산 란장이 이북해역에 위치하기 때문에 명태에 대한 과학적 연구는 활발하게 수행되지 않았었다. 과거 동해 명태연구는 성어와 노가리 형태를 통계학적

으로 비교분석한 연구(Huh, 1978), 연령과 성장에 관한 연구(Park et al., 1978), 동해 명태의 생물학적 특징과 분포에 관한 연구(Gong and Zhang, 1986)에 집중되었다. 90년대에 들어서면서는 명태 자원 감소는 이미 1970 년대 후반부터 시작되었다는 것을 밝힌 명태어업의 적정어획 노력량에 관 한 연구(Lee, 1991), 시계열 분석을 이용한 한국 명태어업의 월별 어획량을 예측한 연구가 있다(Park and Yoon, 1996). 이후 해양환경과 명태자원과의 관계를 밝히려는 연구가 차츰 진행되기 시작했다. 동해안 명태의 어획량 변동과 산란장의 수온과의 관계(Oh et al., 2004), Translog Cost Function 를 이용하여 해수온도 변화가 1990년대부터 2005년까지의 명태 어업생산에 미친 영향을 밝힌 연구가 진행되었다(Lee and Kim, 2010). Kang et al.(2013) 은 명태 체장별 어획 마릿수를 추정하여 남획이 명태개체군의 붕괴의 원인 으로 될 수도 있음을 시사하였다. Yoo et al.(2015)은 명태의 초기생활사를 연구하여 서식수온이 명태 자어의 사망률에 영향을 준다고 보고하였다.

지난 50여년 동안 남한 해역에서의 명태 생산량은 큰 변동을 보여 왔다. 그러나 장기간에 걸친 명태 어획량의 변동과, 이에 수반되는 명태의 생물 학적, 자원학적 변화에 관한 연구와, 가입에 영향을 주는 해양환경 연구는 많이 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 국립수산과학원 연구자들로 부터 수집된 우리나라 명태의 생물학적 자료(1958-2002년)와 해양수산부 수산정보포털에서 얻은 어획량 자료(1965-2002년)를 이용하여 자원량의 크 기에 따라 어류의 성장과 성성숙과 같은 생물학적 특성치가 어떻게 변화하 는지 조사하였다. 또한 동해 명태의 시대적 생물학적 특징 변화와 더불어 체장조성의 차이를 분석하여 해양환경변화가 명태의 가입에 미치는 영향을 연구하였다.



**Fig. 1.** Annual catch of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1946-2015. The gray bars indicate the juvenile catch, and line presents the sum of juvenile and adult pollock catch.

## Ⅱ. 자료 및 방법

#### 1. 자료(Dataset)

본 연구에는 명태 서식처의 수온, 명태의 먹이생물인 동물플랑크톤, 명태 의 어획량, 그리고 생물학적 특성치 자료를 이용하였다. 세부적인 자료의 내용은 다음과 같다.

가. 해양환경자료

명태 서식처의 해수 성질을 반영하는 수심별 수온과 명태의 먹이인 동 물플랑크톤 생물량 자료를 한국해양자료센터(Korea Oceanographic Data Center, KODC, http://kodc.nifs.go.kr/)에서 격월로 수집된 자료를 추출하 여 사용하였다.

1) 수온

국립수산과학원에서 수행해오고 있는 격월 수심별 정선관측 자료를 이용하여 수온변화를 분석하였다. 1965년부터 2002년까지의 자료를 이 용하였는데, 해양 정점에서의 관측은 주로 짝수 달에 수행되었으며, 명 태의 주 어획장소(55, 56, 62, 63 해구)에 포함된 각 정점(정선 105-0, 3, 4, 5정점, 정선 106-2, 3, 4, 5정점, 정선 107-1, 2, 3, 4, 5정점)의 수심별 수온을 선택하였다(Fig. 2). 연속적으로 측정된 수온은 표준수심(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200m)에서의 수온으로 변환되었다.

#### 2) 동물플랑크톤

명태의 주어획장소(55, 56, 62, 63 해구)에 포함된 해양정점으로부터 수 집된 동물플랑크톤 자료에서, 전체 동물플랑크톤 생물량(1965-2002)과 4 개의 분류군별 자료(1978-2002: copepod, amphipod, chaetognath, and euphausiid)를 선택하여 이용하였다. 한국해양자료센터의 동물플랑크톤 자료는 자료의 보정을 위하여 일시적으로 online 서비스를 중단하고 있으 므로, 부경대학교 수산해양학 연구실에서 그 이전에 분석을 위하여 수집 해 놓은 자료를 활용하였다.

#### 나. 명태자료

1) 어업별-어획량 자료

명태어업은 해방 이전에는 북한해역에서 활발하였으며 남한해역에서의 어획활동은 미미하였다(Kim and Kang, 1998; Kang et al., 2013). 한국전 쟁이 있었던 1950년대에는 남한 해역에서의 어업활동은 저조하였고, 1960년대에 접어들어 활기를 띠기 시작하였다. 남한해역에서의 명태 생산량 을 어업별로 파악하고, 해양환경변화가 명태에 미치는 영향을 살펴보기 위 하여 1965년부터 2002년까지의 어획량 자료를 수산통계연보에서 얻었다(해 양수산부 수산정보포털, 1965-2002, http://www.fips.go.kr/). 명태어업은 다 양한 어법으로 수행되었으나, 4개의 어법(연승, 자망, 트롤, 기타)으로 정 리하였다(Appendix I). 특히 1975-1997년 동안의 명태어획자료는 명태 와 소형명태로 구분되어 통계 자료가 정리되어 있었으므로, 이 자료를 성어와 미성어의 어획량으로 간주하였다.

#### 2) 생물학적 자료

국립수산과학원(National Institute of Fishery Science, NIFS) 연구자들 은 1958년부터 2002년까지 상업 어선에서 어획된 명태시료를 구입하여 체장, 체중, 연령, 성별, 숙도, 생식소무게 등을 측정하였고, 양륙항, 어업 해구, 사용된 어구, 어획일자와 같은 수산학적 정보도 포함하여 기록하였 다. 본 연구에서는 이 자료를 재정리 하였는데, 동일한 계군을 대상으로 연구하기 위하여 명태의 주 어획장소인 55, 56, 62, 63 해구에서 수집된 자료를 대상으로 하였으며(Fig. 2), 유사한 조건으로부터 만들어진 생물 학적 특성치를 얻기 위하여 연숭(longline)과 자망(gill net) 어업으로부터 주산란시기인 11월에서 2월 사이에 취득된 암컷 자료만을 선택하여 분석 하였다. 명태의 체장은 전장(total length, TL), 가랑이체장(fork length, FL), 표준체장(standard length, SL) 등 여러 가지 방법으로 기록되어 있 었으나, 체장 간의 회귀분석(regression analysis)을 이용하여 가랑이체장 (FL)으로 통일하였다. 또한 가랑이체장-체중 산포도를 그려 그래프에서 크게 벗어나는 값(outlier)들을 제거하였다.

따라서, 본 연구에서는 상기 조건에 부합하는 3,356개의 생물자료를 사용하였다. 그리고 연도는 다르지만 11월 12월 및 이듬해 1, 2월의 자료를 하나의 연령군으로 간주하였다. 체장-체중 관계식 계산과 연령분석의 경우, 수집시기와 장소가 본 연구의 결과를 크게 왜곡시키지 않는다고 가 정하여 상기 조건에 관계없이 모든 자료를 분석에 이용하였다. 생물학적 특징의 시대적 변동을 살펴보기 위해, 명태어획량을 기준으로 3시기로 나 누어 분석하였다. 명태의 생물학적 특성치 변화에 가장 커다란 영향을 미 치는 것은 자원량의 상태라고 생각되기 때문에, 본 연구에서는 어업의 시 작시기(Period 1: 1958-1968), 번성시기(Period 2: 1973-1985), 쇠퇴시기 (Period 3: 1991-2002)로 나누어 명태의 체장, 성숙, 성장 등을 비교하였다.



**Fig. 2.** Map of the study area. Shaded area indicates the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) consisting of 4 fishery statistical areas (55, 56, 62, and 63). Numbers on lines (105, 106, and 107) indicate the monitoring stations for oceanographic observation.

#### 2. 데이터 분석

가. 생물학적 특성치

명태의 성장과 나이별 성숙 정도를 알기 위하여 체장-체중 관계식, von Bertalanffy 성장식, 군성숙 체장, 비만도 등을 계산하였다. 체장-체중 관계식 의 경우 사망률 추정을 위해 연령이 기록되어 있는 자료만을 이용하여 관계 식을 구하였다. 자료수집과 자료측정 기록에 일관성이 결여되어있어 von Bertalanffy 성장식은 Period 1과 Period 2에서만 구해질 수 있었고, 군성숙 체장은 Period 2와 Period 3에서만 계산이 가능하였다. 명태 자원의 개체군구 조 및 가입을 비교하기 위해 Proportional Size Distribution(PSD)와 상대 체 장 빈도(Relative Length Frequency)를 분석하였다. 명태는 성별에 따라 체 장과 체중의 차이가 나타남으로 연령 분석 자료와 체장-체중 관계식을 제외 한 모든 파라미터 추정에 암컷 자료만을 이용하였다

체장-체중 관계식
 사용된 체장-체중 관계식은

 $W = \alpha L^{\beta}$ 

(1)

로서, W는 체중, L는 체장, α, β는 계수이다. 체장-체중 관계식은 척추골 로 연령 사정된 1959, 1960, 1961, 1974년의 자료를 바탕으로 구하였으며, Period 1(1959, 1960, 1961년)에는 1169개, Period 2(1974년)에는 277개의 자 료가 각각 사용되었다. 이 식으로 각 시기별로 추정된 계수 β는 순간자연 사망계수를 구하는데 이용하였다. 2) 본 버틀란피 성장식

명태의 연령별 크기 및 성장을 추정하기 위하여 척추골로 연령사정된 자료를 바탕으로 본 버틀란피 성장식(von Bertalanffy growth equation) 을 구하였다. 체장-체중 관계식에서 이용된 2세부터 6세까지 자료(Period 1은 1169개, Period 2는 277개가 각각 사용되었다. 본 버틀란피 성장식은 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$L_t = L_{\infty} (1 - e^{-K(t - t_0)})$$

(2)

 Lt는 시간 t에서의 체장, L∞는 해당 개체군의 이론적 최대체장, K는 성

 장계수, t0는 체장이 0일 때의 이론적인 연령이다.

#### 3) 군성숙 체장

산란기 명태 암컷의 5단계 생식소 숙도인 미성숙(immature), 성숙 중 (maturing), 완숙 혹은 성숙(mature), 방중 혹은 산란(spawning), 산란 후(spent)자료 3,131개를 이용하여, 군성숙 체장을 추정하였다. 성숙 정도 에서 미성숙, 성숙 중(중숙)은 미성숙한 개체로 완숙, 방중, 방후를 산란 가능개체로 보고 체장 구간을 10mm 간격으로 구분하여 성숙개체 비율 을 구하였으며, Period 2에는 2,732개, Period 3에는 116개가 각각 사용되 었다.

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-b_0 - b_1 F L_i}} \tag{3}$$

P<sub>i</sub>는 i체장계급에서의 군 성숙 비율(%), b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>는 상수, FL<sub>i</sub>는 i 체장계
 급의 가랑이 체장이다.

#### 4) 비만도

명태 개체의 건강성을 측정하기 위해 체장과 체중자료를 이용하여 비만도(Fulton condition factor)를 계산하였다. Period 1에는 247개, Period 2에는 2,881개, Period 3에는 116개의 자료가 이용되었으며, 연 도별 사용된 평균 개수는 약 167개다.

$$K = \frac{BW}{FL^3} \times 10^4$$

(4)

K는 비만도(condition factor 또는 Coefficient of condition), FL는 가 랑이 체장(cm), BW는 체중(g)이다.

5) 상대체장빈도

상대체장빈도(Relative Length Frequency)는 동일종이지만 여러 곳 에 서식하는 어류의 크기구조(size structure)를 평가하고, 성장을 비 교하기 위해 사용하는 방법이다(Bonar, 2002). 본 연구에서는 체장빈 도분포를 바탕으로 각 시기별(Period 1, 2, 3) 체장그룹을 전체기간 (1958-2002년)의 평균체장그룹과 비교함으로써, 시기별 성장변화를 살 펴보았다. 체장 빈도 막대그래프의 폭은 어종 길이를 고려하여 결정하 는데, 명태의 최대 체장이 약 60cm이므로 체장 빈도 폭을 2cm로 정 하여 시기별 성장변화를 살펴보았다. Period 1에는 247개, Period 2에 는 2,821개, Period 3에는 116개의 자료를 이용하여 분석하였다.

#### 나. 가입변동

명태자원의 가입변동을 파악하기 위해 Proportional Size Distribution(PSD)를 분석하였으며, 가입에 미치는 영향을 규명하기 위하 여 명태의 연령별 풍도를 추정할 필요가 있다. 따라서 척추골로 연령사 정 된 1959-1961년(Period 1), 1974년(Period 2)의 자료를 이용하여 Period 1, 2의 사망계수를 추정하였고, age-length key를 구하여 각 연령 별 체장 비율을 어획량 자료에 대입하여 각 연도별 연령별 어획량을 계 산하였다. 본 버틀란피 성장식과 체장-체중 관계식을 통해 구한 연령별 체중자료를 이용하여 연도별 연령별 마릿수를 구한 이후, Pope의 코호트 분석 모델을 이용하여 연도별 풍도를 구하였다(Pope, 1972).

1) Proportional Size Distribution(PSD)

Proportional Size Distribution(PSD)는 호수생태계에서 체장빈도 자료 를 수치화하고 개체의 밀도를 나타내기 위해 고안된 방법으로 개체군 역학에 대한 이해나 예측능력을 제공해 준다. 어류마다 가입이 안정적 이라고 평가하는 값은 다르지만 일반적으로 PSD값이 30-70사이 값이 안정적이라고 평가한다(Willis et al., 1993). 큰 규모의 가입변동은 PSD 값에 영향을 미치기 때문에(Carline et al., 1984), PSD를 명태의 가입량 변동을 나타내는 하나의 지수로 사용하였다. PSD의 계산에는 어류의 체장이 고려되는데, Anderson(1978)에 따르면, stock length는 성숙에 이르는 체장이며, quality length는 낚시꾼들이 좋아하는 최소 크기를 의미하므로, 아래의 식을 이용하여 계산한다.

$$PSD = \frac{Number.Fish \ge \min.qualityLength}{Nmber.Fish \ge \min.stockLength}$$
(5)

본 연구에서는 앞의 기준을 고려하여 stock length는 산란 능력이 처음 으로 생기는 크기로서 명태의 경우 25cm로 설정하였고, quality length 는 50%성숙 체장인 군성숙 체장으로 간주하여 37cm로 정하였다. Period 1에는 247개, Period 2에는 2,821개, Period 3에는 116개의 자료 를 이용하여 분석하였다.

- 2) 가입량 추정
  - 가) 사망률 추정

사망계수 중 순간전사망계수는(Z)는 척추골로 연령사정 된 1959-1961(Period 1), 1974(Period 2)년 자료를 각각 사용하여 어획물 곡선법으로 추정하였다(Pauly, 1984). 순간자연사망계수(M)는 생물학 적 파라미터 중 von Bertalanffy 성장곡선에서 추정된 계수들과 체장 -체중관계식의 계수 β를 사용하여 구하는 Zhang and Megrey(2006) 방법으로 추정하였다. 즉,

$$M = \frac{\beta K}{e^{K(t_{mb} - t_0)} - 1}$$
(6)

β는 체장-체중 관계식의 상수, K는 von Bertalanffy 성장매개변수,
t<sub>0</sub>는 체장이 0일때 이론적 연령, t<sub>mb</sub>는 C<sub>i</sub>×t<sub>max</sub>이고 C<sub>i</sub>는 어종별 상
관계수를 나타낸다. 31종의 표영성과 60종의 저서성 등 총 91종의 생
활사 특성치를 이용하여 구해진 상수이며, 저어류의 경우 0.440, 부어

류의 경우 0.302를 나타낸다(Zhang and Megrey, 2006). 명태의 경우 저서성 어종이므로 0.440을 사용하였고, 순간어획사망계수(F)는 순간 전사망계수(Z)에서 순간자연사망계수(M)를 뺀 값으로 추정하였다 (Zhang, 2010).

나) 연령-체장 상관표

연령-체장 상관표는 많은 어류 표본에서 부표본을 통해 어류의 연 령과 길이의 관계(비율)를 알아내어 전체 표본에 적용하는 방법이다 (Isermann and Knight, 2005). 연령-체장 상관표를 R의 FSA 패키지 의 alkIndivAge 기능을 이용하여 연도별 체장별 연령 구성 비율을 추 정하였다(Ogle, 2016). 이 후 체장자료 기록만 있고 연령자료가 없는 자 료에 연령체장표 비율에 맞게 연령을 채워 넣었다. 연령이 있는 자료 중 체장 범위를 벗어나는 경우 분석이 되지 않으므로 Period 1의 경우 연령자료가 없는 4,027개 자료 중에서 연령자료가 있는 체장 범위에 벗어나는 20cm 미만과 65cm 이상을 제거하여 총 3,928개 자료의 나 이를 추정하였고, Period 2는 연령자료가 없는 19,572개 자료 중에서 25cm 미만 55cm 이상에 해당하는 자료를 제거하여 총 12,049개로 체 장별 연령을 추정하였다(Table 1). 이후 각 연도별 연령별 비율을 구 하여 어획량 자료에 적용하였다. 본 버틀란피 성장식을 이용하여 연 렁별 체장을 구하였다.

	Number								
The range of fork length(cm)	Period 1		Period 2						
	aged	unaged	aged	unaged					
20-25	15	398							
25-30	101	55	19	1,991					
30-35	97	133	35	2,583					
35-40	126	527	105	4,724					
40-45	629	1,809	85	1,715					
45-50	164	786	28	643					
50-55	36	214	5	393					
55-60			C C						
60-65	1	6		/					
sum	1,169	3,928	277	12,049					
A CH OL IN									

**Table 1.** The number of aged and unaged walleye pollock (*Gadus*chalcogrammus) at each size category sampled during Period 1 (1958-1968),and Period 2 (1973-1985).

다) 코호트 분석

Pope(1972) 모델은 어떤 해(year)의 중간에서 어획이 순간적으로 일어나게 되는 것을 가정하여 한 연급군의 연령에서 다음해 연령 사 이에서 자원 개체수의 변화를 보여준다. 최고연령어를 제외한 자원개 체수는 아래의 식으로 계산하였고,

$$N_{ij} = N_{i+1,j+1}e^{M} + C_{ij}e^{\frac{M}{2}}$$
(7)

최고연령어 자원 개체수는 아래의 식을 이용하여 구하였다.

$$N_{ij} = C_{ij} \frac{F_{ij} + M}{1 - e^{-(F_{ij} + M)}}$$
(8)

위 식에서  $N_{ij}$ 는 *i*년도초 *j*연령어의 자원 개체수,  $C_{ij}$ 는 는 *i*년의 *j*연 덩어의 어획 개체수,  $F_{ij}$ 는 *i*년의 *j*연령어의 순간어획사망계수, *M*은 순간자연사망계수이다. 최고연령은 6세 였으며 2세까지 자원개체수를 추정하였다.

### 3. 통계분석

주어획장소(55, 56, 62, 63 해구)에서의 표층수온이 시대적으로 급격한 변화를 보이면서 나타났는지 살펴보기 위해 Sequential t test analysis of regime shifts를 사용하였다(Rodionov, 2004; STARS). Significance level(p)는 0.5, cut-off length(1)는 10, Hurber's weight parameter(h)\는 1로 설정하였다.

미성어, 성어 어획량(1975-1996년)이 해양환경요인인 수온과 동물플랑 크톤 생물량과 어떠한 관계가 있는지 입증하기 위하여 IBM SPSS Statistic Software(Version 23)을 사용하여 상관분석을 하였으며, 어느 정도의 시간 차이를 가지며 두 요인이 상관성을 나타내는지 확인하기 위하여 시계열 분석의 교차상관분석(Cross-correlation function, CCF)을 이 용하였다. 또한 어획량과 환경변화의 변화 경향을 비교하기 위하여 Cumulative Sum(CuSum)분석을 이용하여 수온환경과 어획개체수의 시간 적 상태변환을 살펴보았다(Beamish et al., 2001).

대학 씨

## Ⅲ. 결과

#### 1. 해양 환경

가. 수온

명태의 주어획장소(55, 56, 62, 63 해구)의 표층에서의 수온은 시대별로 차이를 보였다. 명태의 주 산란시기인 12월 수온의 경우, 명태 어업의 초 기인 Period 1(1958-1968)에는 전반적으로 수온이 낮았으며, 어업이 번창 한 Period 2(1973-1985)에는 조금 복잡한 양상을 보인다(Fig. 3). 즉, 1970 년대 후반에는 표층수온이 매우 높았는데, 13℃ 이상의 수온이 표층 30m 에서 발견되었으며 80m까지에도 10℃ 이상의 수온이 유지되었다. 하지만 1980년대 초반부터 후반에 이르기까지 중층(50-80m)에서 낮은 수온이 발 견되었다. 어업의 쇠퇴시기인 Period 3(1991-2002)에서는 2000년대 초반까 지 점차적으로 수온이 낮아지는 경향을 보였다. STARS 프로그램을 이용 하여 연구해역에서 명태 미성어의 발달에 영향을 미치는 표층에서의 수온 변화를 깊이별로 살펴보았을 때 전반적으로 비슷한 경향이 나타난다(Fig. 4). 수심 20m에서의 12월 수온은 Period 2에 해당하는 1970년대 중반에는 수온이 높았으며, 1990년대까지는 비교적 균일한 수온을 유지하다 2000년 대 초반에 매우 낮은 수온이 나타났다. 수심 50, 75, 100m에서도 1970년대 중반에 높은 수온을 보이지만, 1980년 초반부터 수온이 낮아지기 시작하 였고, Period 3에 해당하는 1990년대 중반부터는 수온 변화의 폭이 커지면 서 점차적으로 수온이 낮아진다.



Fig. 3. Vertical profile of December seawater temperature in the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1965-2002.


Fig. 4. Variation of December seawater temperature in the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1965-2002. (a) 20m, (b) 50m, (c) 75m, and (d) 100m.

나. 동물플랑크톤

주어획장소에서의 동물플랑크톤 전체 생물량은 1965년부터 1991년까지 약 55mg/m<sup>3</sup>을 유지하다가, 1992년 이후로 급격히 증가하기 시작하여 1998년에 291mg/m<sup>3</sup>으로 최고를 기록하였다(Fig. 5). Period 1에 해당하는 1965-1968년의 평균은 53mg/m<sup>3</sup>, Period 2는 59mg/m<sup>3</sup>, Period 3는 166mg/m<sup>3</sup>으로, Period 3는 다른 두 시기보다 3배 이상의 높은 생물량을 보였다.

동물플랑크톤 자료는 1978년부터 요각류(copepods), 단각류(amphipods), 난 바다곤쟁이류(euphausiids), 화살벌레류(chaetognaths)의 4개의 분류군으로 나 뉘어 생물량이 보고되는데, 화살벌레류를 제외한 나머지 세 그룹은 명태의 성 장과정에서 중요한 먹이 생물로 간주된다. 즉, 명태 치어는 크기가 작은 요각 류를 주로 섭식하지만, 어느 정도 성장한 미성어는 단각류와 난바다곤쟁이를 선택적으로 섭취하기 때문에 4개의 동물플랑크톤 중 요각류, 난바다곤쟁이류, 단각류로 구분하여 생물량 변화 경향을 살펴보았다(Fig. 6a). 요각류의 경우, 1978-1990년까지 연평균 생물량이 서서히 증가하는 패턴을 보이다 1991년에 감소한 이후 낮은 밀도가 1990년대에 유지되었으며 2000년대부터 높은 밀도를 보였다. 난바다곤쟁이와 단각류의 경우, 1990년 이전에는 낮은 밀도를 보이다 가 1990년대에 밀도가 증가하기 시작하였다. 하지만 1998, 1999년 급격히 감소 한 후, 요각류와 마찬가지로 2000년도부터 비정상적인 높은 값을 보이고 있다.

요각류, 난바다곤쟁이류와 단각류의 격월별 밀도를 살펴보았을 때, 요각류는 4, 6월에 많이 번성하여 봄철 식물플랑크톤 번성과 연동됨을 알 수 있었다 (Fig. 6b). 그러나 가을 번성은 발견되지 않았고, 겨울에 이르기까지 매우 낮은 밀도를 보인다. 이에 반하여 크기가 큰 동물플랑크톤인 난바다곤쟁이류와 단각 류는 늦은 봄인 6월에 번성하였다가 여름에 줄어들고, 가을인 10월에 다시 약 간 번성하였다.



**Fig. 5.** Variation of annual zooplankton biomass (mg/m<sup>3</sup>) in the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1965-2002.

ot



**Fig. 6.** Density of zooplankton (copepod and sum of euphausiid and amphipod) in the main fishing area of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1978-2002. (a) annual mean, and (b) seasonal variation.

#### 2. 명태의 어업별 어획량

명태어업은 극심한 변화를 보여주고 있다. 명태 어획량을 어업의 초창기 인 1960년대 중반에는 4만 톤을 기록하였지만 1970년대 중반부터 증가하여 1982년에 최고조인 약 17만 톤을 기록하였다(Fig. 7). 하지만 그 이후부터 는 급격하게 줄어들어 1990년대부터는 매우 미미한 어획량이 보고되었다. 연구기간 동안의 명태의 연 평균 어획량은 44,817톤이며, 어업별 어획량은 트롤(trawl)이 68%, 연승(longline)과 자망(gill net)이 27%를 차지하였다. 트롤은 1972년부터 어획량이 많아지기 시작하여 1980년대에 가장 높은 어 획량을 보였지만, 1990년대 중반에는 거의 어획기록이 없었다. 연승은 1960 년대 중반부터 70년대 초반까지, 자망은 1970년대 말부터 1980년대 중반까 지 높은 비율을 보였다.

성어와 미성어 어획량이 구분되어 있는 1975년부터 1997년까지의 어획량 을 보면 성어 어획량보다 미성어 어획량이 훨씬 많음을 알 수 있다(Fig. 8). 이 기간 동안에 성어는 연평균 18,444톤이 어획되었으며, 특히 1979-1986년까지 높은 어획량을 보였다(Fig. 8a). 이 시기의 어획은 자망이 41%, 트롤 31%, 연승 26%를 차지하여 성어에 대한 트롤어업의 어획물 생 산은 크지 않았다. 반면, 1975-1997년 동안의 미성어 어획량은 연평균 41,484 MT였으며, 미성어 전체 어획량 중 92%가 트롤로 어획되었다(Fig. 8b). 미성어의 어획은 성어와는 달리 자망과 연승으로부터의 어획비율이 상당히 낮았다.



Fig. 7. Annual yields of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1965-2002. Bars with dark, intermediate, and light colors indicate trawl, gill net, and longline fisheries, respectively.



**Fig. 8.** Catch of Korean pollock with respect to fishing tools, 1975-1997. (a) adult, and (b) juvenile. Bars with dark, intermediate, and light colors represent trawl, gill net, and longline fisheries, respectively.

### 3. 명태의 생물학적 파라미터

가. 성장

체장-체중관계식은 Period 1과 Period 2에서만 계산이 가능하였는데, 각 시기별로 아래와 같이 추정되었다.

## Period 1: $W = 0.0065L^{2.958}$

Period 2:  $W = 0.0100L^{2.843}$ 

IONA/

Period 1의 계수 α는 0.0065, β는 2.9578를, Period 2의 계수 α는 0.01, β는 2.843을 나타냈으며 체장-체중 관계식의 기울기를 나타내는 β값은 Period 2일 때 다소 감소하였다(Fig. 9). Figure 9를 보면, 어업의 초기에 는 20-30cm사이의 체장이 작은 명태가 많이 포함되어 있었으며, 50cm 이상되는 큰 어체들도 상당수 있었지만, 어업이 번성했던 Period 2에는 중간 크기의 명태가 많았음을 알수 있다.

연령사정이 가능했던 Period 1과 Period 2의 명태를 대상으로 성장식을 구하였다. 각 시기별 von Bertalanffy 성장식은 아래와 같이 계산되었다.

$$\begin{split} \text{Period 1:} \ & L_t = 56.3 \left(1-e^{-0.341(t+0.06)}\right) \\ \text{Period 2:} \ & L_t = 51.5 \left(1-e^{-0.418(t-0.1098)}\right) \end{split}$$

Period 1의  $L_{\infty}$ 는 56.3cm  $t_0$ 는 -0.06으로 추정되었으며, Period 2에는  $L_{\infty}$ 가 51.5cm,  $t_0$ 는 0.1098였다(Fig 10). Period 1에는 비교적으로 어업활동이 활 발했던 Period 2보다 명태의 최대 체장이 더 큰 값을 보였다.



Fig. 9. Length-weight relationship of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. (a) Period 1 (1958-1958), and (b) Period 2 (1973-1985).



**Fig. 10.** von Bertalanffy growth curve of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. The broken and solid lines indicate the Period 1 (1958-1958) and Period 2 (1973-1985), respectively.

ot n

\$ 2

나. 성 성숙

성 성숙 자료는 Period 2와 Period 3에 기록되어 있었으며, 명태 암컷 자료를 이용하여 군성숙 체장을 구하였다.

> Period 2:  $P_i = \frac{1}{1 + e^{-3.355 + 0.101FL_i}}$ Period 3:  $P_i = \frac{1}{1 + e^{-6.889 + 0.186FL_i}}$

위 식에서  $P_i$ 는 *i*체장 계급의 군 성숙 비율(%)을 나타내는데, 군 성숙 비율이 50%인 어류의 체장을 각 시기별로 추정하면, Period 2에서는 33.4cm Period 3에서는 37.0cm였다(Fig. 11). Period 1의 경우 미성숙 암컷 명태의 개체수가 부족하여 분석할 수 없었다.

다. 비만도

명태의 평균 비만도는 Period 1에는 56.3, Period 2에는 56.8, 그리고 Period 3에서는 62.8이였다(Fig. 12). 어획의 초기 시기와 어획 강도가 강 한 시기의 비만도는 비슷한 값을 보였지만, Period 1의 경우 유용한 자료 가 Period 2의 17% 미만이므로 두 시기의 비교는 적절하지 않을 수도 있다. 어획의 쇠퇴기인 Period 3의 경우 높은 비만도 값을 보여 밀도종속효과 (density-dependent effect)가 현저함을 알 수 있었다.

한편 연도별 명태의 비만도와 전체 동물플랑크톤의 연평균 생물량을 상관분석 한 결과 높은 양의 상관관계(r=0.742, p<0.01)를 보였다(Fig. 13). 또한 격월로 동물플랑크톤의 분류군별 자료와 비만도를 비교하였는 데, 명태 미성어의 주먹이로 이용되는 단각류와 난바다곤쟁이류를 합친 경우, 6월(r=0.624, p<0.05)과 10월(r=0.585, p<0.05)에 높은 양의 상관관 계가 나타났다.





**Fig. 11.** The maturity curve of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. The solid and dotted lines indicate the Period 2 (1973-1985) and Period 3 (1991-2002), respectively.

at



Fig. 12. Annual mean condition factor of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. Broken, solid, dotted lines are mean condition factors at Period 1 (1958-1968), Period 2 (1973-1985), and Period 3 (1991-2002), respectively.

ot n



**Fig. 13.** Comparision of zooplankton biomass (mg/m<sup>3</sup>) and condition factor of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters, 1965-2002.

#### 라. 상대체장빈도

연구기간동안 수집된 명태의 최소 체장은 21.1cm, 최대 체장은 58.0cm 로 나타났다. 전체 기간 동안의 평균 체장빈도분포(Average Length Frequency)와 각 시기별 빈도분포를 비교하였다(Fig. 14). 상대체장빈도 에 의하여 각 기간마다 나타나는 특징이 다른 것을 알 수 있는데, Period 1에서는 2cm 계급 구간이 17개(23-55cm)였다. 이 기간 동안에는 작은 크기의 명태(25-37ccm)가 29%를 차지하며 상대적으로 많이 출현 하였으며, 명태의 가입 상태가 나쁘지 않음을 알 수 있었다. 또한 어업 의 초기 시기이므로 커다란 크기의 명태도 비교적 많이 남아 있어 39-55cm 명태가 전체의 약 66%를 차지하고 있었다(Fig. 14a).

하지만 어업이 번성하였던 Period 2의 체장계급구간은 17개(27-59cm) 였고, 40cm 이상의 크기가 큰 개체가 자취를 감추었음을 알 수 있다. 대 신 중간크기인 37-41cm에 해당하는 명태의 비율이 64%로 높게 나타났 고, 37-39cm 계급구간이 가장 많은 비율로 나타났다. 이 시기에는 작은 크기 명태(25-37ccm)가 20% 미만이었으며, Period 1에 비교하여 40-50cm 크기의 큰 명태의 수가 대폭 감소하였다(Fig. 14b).

Period 3는 계급구간이 9개(31-47cm)로 이전 두 시기에 비해 체장 계 급 범위가 많이 줄어들었으며 밀도종속효과 때문에 Period 2보다 큰 크 기(39-43cm)의 명태 비율이 55%로 높았다. Period 2와 비교하여 최대로 나타난 체장계급구간이 37-39cm에서 39-41cm로 커졌다. 하지만 남획이 이미 심각하게 진행된 상황이었으므로 49cm 이상 되는 크기의 명태를 발견할 수가 없었으며, 가입 직전의 소형어 출현(25-37cm)도 미미하여 명태 자원의 붕괴 징후가 이미 분명해진 상황이었다(Fig. 14c).



**Fig. 14.** Relative Length Frequency of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. Dark bars indicate the average length frequency during the entire study Period. (a) Period 1 (1958-1968), (b) Period 2 (1973-1985), and (c) Period 3 (1991-2002).

## 4. 가입변동

7. Proportional Size Distribution(PSD)

명태의 PSD값은 시기별 차이를 보였다(Fig. 15). Period 1의 PSD값은 최소 62, 최대 98로서 평균 80이었다. 하지만, 추정에 사용된 자료의 수 가 단지 두 개이기 때문에, 이 시기의 값에 어떤 자원학적 해석을 이끌 어 내기에는 무리가 있다. Period 2는 47-85의 범위 값을 보이며, 평균은 60이었다. 전반적으로 PSD의 값이 30-70 범위 안에 들어 다른 시기에 비교하여 상대적으로 비교적 안정적인 가입상태를 보여준다. Period 3는 PSD값이 변동이 심해서 최소 37 최대 81, 평균은 71이었다. Period 3는 30-70범위를 넘는 값들이 Period 2 보다 더 많아 불안정한 가입변동을 보여준다.



**Fig. 15.** Proportional Size Distribution (PSD) of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. Broken, solid, and dotted lines are the mean PSDs at Period 1 (1958-1968), Period 2 (1973-1985), and Period 3 (1991-2002), respectively.

ot n

나. 연령별 개체수 추정

1) 사망계수

명태의 연령조성자료를 이용하여 사망계수를 계산할 수 있었다. 어획 물 곡선법(Pauly, 1984)으로 구한 순간전사망계수(Z)는 Period 1과 Period 2는 각각 1.27/yr, 2.06/yr로 나타났다. 성장매개변수들을 이용하 여 Zhang and Megrey(2006)방법으로 순간자연사망계수(M)를 추정한 결과 Period 1은 0.28, Period 2는 0.24로 나타났다. 순간전사망계수(Z) 에서 순간자연사망계수(M)를 뺀 순간어획사망계수(F)는 각각 0.99/yr, 1.82/yr로 추정되었다.

2) 연령-체장 상관표

연령분석 자료를 각 체장 계급으로 구분하여 연령-체장 상관표를 만 들었다. 유용한 자료의 결핍으로 인하여 Period 1과 Period 2의 시기별 로 체장계급에 해당하는 연령의 비율을 구해보니, 두 시기의 연령에 따 른 체장의 범위가 확연히 다름을 알 수 있었다(Table 2). Period 1는 저 연령어(2-3세)와 고연령어(5-6세)에서 체장범위가 컸지만, Period 2는 중 간 연령인 4세의 체장범위가 크게 나타났다. 코호트 분석을 위해 해양수 산부 수산정보포털에서 수집한 각 연도별 어획량 자료에 생물학적 자료 의 연령별 비율을 적용시켜 어획개체수를 계산하였는데, 구해진 연령-체 장 상관표를 연령자료가 없는 생물학적 체장 자료에 적용하여 각 시기 별 연령별 마리수를 구하였다(Table 3).

	Proportional length at age										
The range of fork length(cm)	Period 1					Period 2					
	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	
20-25	0.733	0.267	5				m				
25-30	0.752	0.248				0.684	0.263	0.053			
30-35	0.320	0.680				0.143	0.543	0.314			
35-40	0.008	0.587	0.389	0.016			0.514	0.448	0.038		
40-45		0.146	0.696	0.153	0.005		0.235	0.671	0.094		
45-50		0.006	0.256	0.604	0.134	1	0.036	0.714	0.214	0.036	
50-55			1	0.528	0.472			1			
55-60											
60-65					1						

 Table 2. The age proportional of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) at each size category during Period 1 (1958-1968), and

 Period 2 (1973-1985).

Age	Period 1	Period 2
2	497	1,750
3	1,052	4,881
4	2,196	5,176
5	1,088	496
6	264	23
	MONNOR AN A CH	NERSI71

**Table 3.** The number at age calculated from age-length key of walleye pollock

 (Gadus chalcogrammus).

3) 코호트 분석

Pope의 코호트 분석 모델을 이용하여 명태의 연령별 자원개체수를 계산하였다. Age-length key를 통해 구해진 각 시기별 어획개체수 (Table 3), 순간자연사망계수(M), 순간어획사망계수(F)를 이용하여 각 시기별 자원개체수를 2세부터 6세까지 추정하였다(Fig. 16). 미성어로 생각되는 2, 3세의 자원개체수는 Period 1의 경우 1966년까지는 개체수 변동이 심하지 않았지만 1966년부터 개체수가 확 줄어들어 1968년에는 2세는 약 38,734,000마리, 3세는 약 39,163,000마리였다(Fig. 16a).

Period 2는 Period 1 보다 개체수 변동이 컸으며, 1980년과 1981년에 는 각각 2세어와 3세어가 가장 많은 수를 보였다(Fig. 16b). 즉, 1978년 도 연급군이 매우 강함을 알 수 있는데, 1978년에는 동물플랑크톤 생물 량이 많았고(Fig. 5), 표층의 수온도 비교적 온난하였다(Fig. 4). 1980년 대 이후로 개체수가 감소하기 시작하여 1985년에는 2세는 97,060,000마 리, 3세는 146,456,000마리로 나타났다(Fig. 16b). 또한 가입량 변동의 하나의 척도로 사용된 PSD와의 회귀분석에서 두 연령 모두 유의한 음의 상관관계가 나타났다(2세어, r=-0.604; 3세어, -0.577 , 모두 p<0.05)(Fig. 17).



**Fig. 16.** Estimated number at age of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters. Numbers were estimated using Pope's Cohort analysis model. (a) Period 1 (1958-1968), and (b) Period 2 (1973-1985).



Fig. 17. The relationship between PSD and the abundance  $(\log_{10}N)$  of age 2 and 3 of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in Korean waters in Period 1 (1958-1968) and Period 2 (1973-1985). (a) age-2 abundance, (b) age-3 abundance.

## 5. 가입변동과 환경

가. 어획량과 환경

미성어 어획량과 깊이별 12월 수온을 아노말리로 나타내었을 때 비슷 한 경향을 보인다(Fig. 18). 1970년대 이래의 미성어 어획량 아노말리를 보면 1970년대 중반부터 1980년대 중반까지 양의 아노말리를 보이고, 그 이후에는 음의 아노말리를 보인다. 표층수온의 변화도 이와 유사하여, 수심 10m와 75m에서의 수온도 전반부에는 후반부에 비하여 높은 것으 로 나타났다. 어획에 미치는 수온의 영향을 명확하게 입증하기 위하여 교차상관분석을 실시하였다. 미성어 어획량은 12월의 10m, 20m 수온과 3년의 시차를 두고 유의한 양의 상관관계(r=0.515, 507, p<0.05)를 나타 났으며, 12월의 75m, 100m 수온과는 2년의 시차를 두고 높은 양의 상관 관계(r=0.659, 0.592, p<0.05)를 나타났다(Fig. 19). 명태는 개체가 성장함 에 따라 서식하는 깊이가 달라지는데, 깊이별로 다른 시차로 높은 양의 상관관계를 보이는 결과는 명태의 치어는 해양의 최상층에서 서식하며, 미성어는 나이가 듦에 따라 서서히 깊은 곳으로 옮겨가는 현상을 생각 할 때, 매우 합리적인 것임을 알 수 있다.

동물플랑크톤이 가장 번성하는 6월의 생물량은 1978년을 제외하고는 1980년대 중반까지는 큰 변동이 없었다(Fig. 20). 어린 명태 미성어가 가 장 활발히 성장하는 시기가 초여름이며, 1978년 6월의 동물플랑크톤 풍 도가 비정상적으로 높은 것은 1978년 명태 연급군에게 좋은 섭식환경이 형성되었음을 의미한다. 이 시기의 미성어 어획량은 상당히 높았으나, 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다. 1990년대 초부터 동물플랑크톤이 증가하는 것과는 달리 미성어의 어획량은 감소하였다. 6월의 전체 동물

플랑크톤 생물량과 미성어 어획량을 교차상관 분석한 결과, 3년 시차를 두고 유의한 양의 상관관계(r=0.549, p<0.05)를 보였다(Fig. 21). 동물플 랑크톤 생물량은 미성어 어획량과 상관관계를 보이지만, Period 2에서의 높은 어획압력으로 줄어든 미성어는 1990년대 이후부터 높아진 동물플 랑크톤 생물량에도 불구하고 높은 어획량을 보이지 못하였다.

나. 연령별 풍도와 환경

코호트 분석으로 추정된 Period 2의 2세 명태의 풍도와 미성어의 서 식깊이인 표층에서의 수온을 비교하였다. CuSum 통계분석 결과는 50, 75m의 4월 수온과 미성어 어획량이 약간의 시간차를 두고 비슷한 경향 을 보였다(Fig. 22). 시계열 분석을 실시한 결과, 2세 명태의 풍도는 4월 의 50, 75m 수온과 2년의 시차를 두고 각각 높은 양의 상관관계 (r=0.673, 0.671, P<0.05)를 나타내었다(Fig. 23). 0세 명태의 서식깊이 수온은 이후 미성어 개체수에 영향을 주었을 것이며, 앞서 분석한 미성 어 어획량과 수온에서의 결과들을 종합해 보면 0세 미성어 명태의 풍도 는 해양환경요인 중 하나인 수온에 큰 영향을 받는다.



**Fig. 18.** Anomaly of juvenile catch of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and seawater temperature in December, 1975-1997. Bars indicate juvenile catch and lines show seawater temperature at depth of 10 m and 75 m.

I



**Fig. 19.** Cross correlation between juvenile catch of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and December seawater temperature in Korean waters, 1975-1997. Bars indicate the coefficient and dotted lines present upper and lower confidence limits. (a) 10 m, (b) 20 m, (c) 75 m, and (d) 100 m.

**FH** 

ot n



**Fig. 20.** Changes in juvenile catch of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and zooplankton biomass (mg/m<sup>3</sup>) in June, 1975-1997.

ot y



**Fig. 21.** Cross correlation between juvenile catch of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and June zooplankton biomass in Korean waters, 1975-1997. Bars indicate the coefficient and dotted lines present upper and lower confidence limits.



**Fig. 22.** Cumulative Sum (CuSum) curve of age-2 abundance of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and April seawater temperature in Korean waters, 1975-1985. Black line indicate age-2 abundance, gray and dotted lines show seawater temperatures at depth 50 m and 75 m, respectively.

or u



**Fig. 23.** Cros correlation between age-2 juvenile of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and April seawater temperature in Korean waters, 1975-1985. Bars indicate the coefficient and dotted lines present upper and lower confidence limits. (a) 50 m, and (b) 75 m.

# Ⅳ. 고찰

## 1. 명태 어획량 및 단위노력당어획량(CPUE) 변동

명태는 1970년대 중반부터 1980년대 중반까지 높은 어획량을 보였고 1980년대 중반 이후 급격한 감소 현상을 보였다. 실제로 명태를 주 대상으 로 어획 하는 동해구기선저인망과 트롤어업의 CPUE는 1970-1977년에 증 가하였고 그 후, 1977-1982년에는 높은 값을 보이다 1980년대 초반이후부 터는 매년 감소추세를 보였다(Lee, 1991). 연승과 자망어업의 경우 1970년 대 중반부터 1980년대 중반까지 높은 CPUE 값을 보이고, 이 시기를 기준 으로 이전시기(1960초-1970년대 중반)가 후반 시기(1990년초-2000년대)보 다 비교적 높았으며, 후반시기에는 급격히 감소하여 낮은 값을 보인다(Lee, 1991; Kim, 2017). 따라서 CPUE와 비슷한 경향을 보이는 명태 어획량을 자원량이라 가정하고 어획량이 비교적 중간 정도였던 1958-1968년, 어획량 이 많았던 1973-1985년, 어획량이 적었던 1991-2002년을 세시기로 나누어 생물학적 특징과 가입량 변동을 살펴보았다. 명태 어획량 자료에 따르면 주어구는 트롤, 연승, 자망 이였으며, 생물학적 자료에서도 트롤, 연승, 자 망이 주어구로 나타났다. 연승과 자망의 경우 전반적인 연도에서 성어를 대상으로 어획하였고, 트롤(기선저인망)의 경우 1970년대 중반까지 미성어 를, 1980년대 중반부터 성어 명태를 주로 어획하였다. 따라서 비교적 큰 변 화가 없는 연승과 자망 어구 자료를 사용하여 생물학적 분석을 실시하였 다.

## 2. 명태의 생물학적 특성변화

명태의 성장을 보기 위해 계산된 본 버틀란피 공식에서 Period 1은  $t_0$ 가 음의 값이 나타났고, Period 2는 양의 값을 보였다. King(2007)에 따르면 일반적으로 계산하는 과정에서  $t_0$ 값이 음이 나오지만, 양의 값이 나오기도 한다. Park et al.(1978)의 경우 1974년부터 1976년까지 수집된 명태 558마 리를 이용하여 구한 본 버틀란피 성장식의 최대체장은 65.4cm이였으며, 본 연구의 각 시기별 최대체장보다 컸다. 하지만 연령별 체장이 기록되어있지 않아 본 연구와 구체적인 비교는 하지 못하였다. Yang et al.(2008)은 본 연구의 Period 3에 해당하는 1977-1999년 명태이석을 연령 사정하여 체장 별 연령 자료를 구하였으나, 단지 7개체의 자료로 성장식을 구하여 비교할 수 없었다. 따라서 이후 개체수를 추정하기 위해 연령-체장 상관표를 구하 는 것은 본 연구의 자료로만 시행될 수밖에 없었으며, Period 1, 2에서만 코호트 분석을 통해 2세부터 6세까지 추정할 수 있었다.

많은 연구에서 밀도 종속효과는 어류의 성장 및 성숙과 큰 관련이 있으 며(Overholta, 1987; Junquera and Saborido-Rey, 1996; Stahl and Kruse, 2008), 어류의 풍도/생물량와 어획압력/노력량에 따라, 성장률, 최대체장크 기, 성숙연령, 성숙 체장이 변한다(Rochet, 1998; Jennings et al., 1999). 일 반적으로 자원이 감소하면 개체의 영양상태가 좋아지면서 성장률이 높아져 서 성숙연령이 낮아진다(장, 2010). 알래스카만의 명태는 동부 베링해의 명 태보다 군성숙 비율이 50%인 체장이 더 컸는데, 이는 낮은 개체수밀도로 인한 먹이경쟁의 감소가 명태의 성장에 좋은 영향을 미치고, 이는 더 큰 크 기에서 성숙하는 것으로 알려졌다(Stahl and Kruse, 2008). 또한, 일본 북부 태평양쪽에서 어획된 명태의 연도별 비교 결과에서도, 어류 밀도가 증가할 수록 50% 성숙 체장이 감소하는 경향이 나타났다(Hamatsu and Yabuki,

2007). 본 연구에서도 명태 자원량이 더 적은 Period 3의 50%성숙 체장이 Period 2 보다 4cm 더 컸는데, 이러한 생물학적 변화는 밀도 종속효과와 관 련이 있는 것으로 생각된다.

명태의 성장과 산란가능성에 영향을 주는 신체에너지 축적(somatic energy reserve)은 동물플랑크톤 등의 먹이가 영향을 주는데(Mito et al., 1999), 명 태의 비만도가 동물플랑크톤 생물량이 높은 Period 3에서 높은 값을 보이며, 양의 상관관계를 보였다. 김(1986a)에 따르면 북한해역에서 미성어 명태의 주먹이인 단각류(amphipoda)와 난바다곤쟁이류(euphausiid) 생물량이 6월과 10월에 번성하였는데 이는 본 연구에서의 번성시기와 일치 했으며 명태의 비만도와도 높은 양의 상관관계를 보였다. 이처럼 밀도 종속효과와 먹이생물 은 동해 명태의 성장과 성숙에 있어서 아주 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다.

Bonar(2002)에 의하면 어획노력량이 적을 때 평균크기보다 크거나 작은 체장계급의 비율이 높아진다고 하였는데, 이는 Period 1결과에서 볼 수 있 다. 또한 Period 2와 Period 3에 미성어 비율이 감소하였는데, 이는 1970년 대부터 1990년대까지의 명태 미성어(노가리) 남획이 주요 원인이라 생각된 다(Kang et al., 2013). 1990년대에 들어서도 미성어와 성어에 대한 어획압 력은 변화가 없었지만, 가입 가능한 크기의 미성어 수가 적어지면서 Period 3에서 큰 크기의 명태 비율이 상대적으로 증가하는 경향이 나타났 다. 이렇게 평균 체장범위 구간보다 오른쪽으로 치우치게 된 것은 약해진 가입강도를 뜻한다(Bonar, 2002). Period 3는 Period 1, 2에 비해 체장구간 이 급격히 감소하였는데 이는 과다어획의 결과로 어류의 연급군(즉, 연령 범위)의 수가 감소하고 있으며, 자원량의 변동 진폭이 커져서 자원고갈의 위험성이 점차 증가하고 있다는 것을 보여준다(Kim and Kang, 1998). 상 대체장빈도의 계산에 사용된 시료는 상업어선으로부터 구입한 명태자료이
므로 소형의 미성어가 포함되어 있지 않다. 향후, 연구선에 의한 과학조사 로부터 체장조성의 정밀성을 높여야 할 필요가 있다.

## 3. 해양환경변화에 따른 명태의 가입변동

어류의 가입과 개체군의 풍도는 해양환경변화에 많은 영향을 받는다. 명 태는 초기생활사단계에 직면하는 다양한 환경요인 및 이들의 상호작용으로 인해 가입, 사망률, 성장률 등이 크게 변한다. 많은 연구에서 명태의 풍도 와 어획량은 수온과 관련이 있다고 밝혀졌는데(Oh et al., 2002), 수온이 높 을 때 강한 연급군을 보였으며, 2세 명태와 겨울의 평균수온이 양의 상관 관계가 있는 것으로 나타났다(Shida et al., 2007). 우리나라 동해에서도, 명 태는 서식지 해양환경(산란장)에 따라 알과 미성어의 생존율이 변동하였을 것이며, 이는 명태의 가입과 어획량에 큰 영향을 주었을 것이다. 동해의 겨 울 표층수온은 1970년대 중반부터 1980년대 초반까지 낮은 수온을 보이다 1980년대 중반부터 다시 증가하였다(Yeh et al., 2010). 리(1986)에 의하면 명태의 주 산란장인 원산만의 12월 50m 깊이 수온은 1970년대 중반을 기 준으로 증가하였다가 1980년대부터 다시 낮아지는 경향을 보였다. 본 연구 해역에서도 12월 수온은 Period 2에 해당하는 1975년부터 1980년대 초까지 는 수온이 높아지다 1980년대 중반에 낮은 수온을 보인다.

명태알은 부성란으로 주로 수심 30m 위쪽에서 분포하며(Serobaba, 1974; Kamba, 1977; Nakatani, 1988), 높은 수온에서 명태의 배 발생이 더 빨리 진행된다(김, 1986a). 따라서 Fig. 19에서 볼수 있듯이, 동해 명태의 경우도 3년전 10m, 20m의 수심에서 나타난 높은 수온이 명태 알의 부화에 좋은 영향을 주었을 것으로 생각된다. 12월의 20m 수온은 평균 약 12℃정 도 였는데(Fig. 4), Yoo et al.(2015)은 명태 자치어가 15℃ 이상의 수온에

58

노출되면 사망률이 급격하게 증가하고 있음을 보였다. 또한 Laurel et al.(2016)에 따르면 명태 자치어는 10-15℃ 범위에서 좋은 성장률을 보이고 있지만, 13℃보다 수온이 높아지게 되면 성장률이 급격히 감소한다. 이러한 결과들은 15℃와 같은 아주 높은 수온이 아니라면, 일반적으로 높은 수온 이 명태 자치어의 성장에 좋은 영향을 미친다는 것을 보여준다. 미성어 어 획량은 12월의 75, 100m수온과 2년의 시간차를 가지고 정 상관관계를 나 타났으며, 또한 코호트분석으로 추정된 2세 풍도와 50m, 75m 깊이에서의 4월 수온이 2년의 시차를 두고 양의 상관관계를 보였다. 0세 명태미성어는 50-100m깊이에서 서식하는데(Miyake et al., 1996; Honda et al., 2004), 서 식깊이의 높은 수온이 명태의 가입과 큰 관련이 있는 것으로 생각된다.

물리적 해양환경요인뿐만 아니라, 생물학적 해양환경요인인 동물플랑크 톤 또한 미성어 어획량과 밀접한 관계를 보였다. 명태 미성어 어획량은 동 물플랑크톤 생물량과 3년의 시간차를 난바다곤쟁이류(euphausiid)와는 1년 두고 정 상관관계를 나타냈는데, 이는 지리적, 계절적, 개체발 의 시차를 생적인 변동에 따라 다른 먹이를 섭이하는 명태의 섭이특성과 관련이 있는 것으로 보인다(Dwyer et al., 1987; Mito et al., 1999). 명태는 요각류 (copepoda), 난바다곤쟁이류(euphausiid)와 단각류(amphipod)가 주된 먹이 이며. 동종섭이 현상도 발견되었다(Takahashi and Yamaguchi, 1972; Mito, 1974; Bailev and Dunn, 1979). 또한, 일본 명태의 위내용물 분석결과에 따 르면, 명태크기에 따라 동물플랑크톤의 비율이 다르며 섭이되는 주요먹이 가 요각류(copepoda)에서 난바다곤쟁이류(euphausiid)로 바뀌는 경향이 나타나지만, 명태 미성어는 계절에 상관없이 매우 높은 비율로 동물플랑크 톤을 섭이한다(Yamamura et al., 2002). 본 연구에서도 미성어 어획량과 3 년전의 동물플랑크톤이 높은 정 상관관계를 보였으며, 북한에서 연구된 명 태의 먹이습성에서도 어린 시기의 주요먹이종이 동물플랑크톤으로 나타났

59

다(이, 1986). Period 3에 해당하는 1990년대 초부터는 동물플랑크톤 생물 량이 높고 따뜻한 수온으로 명태가 가입하기에 좋은 환경이지만 남획으로 인해 이미 명태 자원은 붕괴되어 가입이 저조한 것으로 보인다.

가입변동의 하나의 척도로 사용된 PSD분석의 기준 범위는 두 가지 경 우로 나눌 수 있었는데 첫째로 본 연구에서 사용한 기준과, 둘째로 Gabelhouse(1984)에 따라 체장 범위를 5가지로 나누는 방법이다; stock(S: 20-26%), quality(Q:36-41%) preferred(P: 45-55%), memorable(M:59-64%), trophy(T:74-80%). 이 방법의 체장 범위 기준은 최대체장을 주어진 %로 나 눈 것이며, 명태의 최대체장은 91cm(fishbase, http://www.fishbase.org/)이 다. 본 연구에서 정한 stock, quality length의 체장이 Gabelhouse(1984)의 체장 범위 안에 포함된다. 호수 생태계에서는 PSD값이 30-70 범위 안에 서 변동하면 비교적 안정적인 가입을 나타내지만, 어류마다 범위가 약간 의 차이를 보인다. Period 2를 제외한 Period 3에서는 불안정한 가입변동 을 보여줬는데, 이는 상대체장빈도분포 해석과 동일하다. 또한 PSD 값이 낮으면 비교적 작은 크기의 명태(25cm-37cm)가 높은 비율을 차지하여 VPA로 추정된 2, 3세의 개체수와 음의 상관관계를 보인다. 이러한 결과 들은 PSD가 호수생태계 뿐만 아니라 해양생태계 어류에게도 개체의 밀도 와 가입변동을 보여줄 수 있다는 것을 보여준다.

우리나라 동해는 동중국해와 연결되어 있어 대마난류가 흘러들어온다. 대마난류지역(Tsushima Warm Current Region)의 생태계체제변환은 기후 체제변화에 의한 해양환경변화로 어류군집구조 및 주요어종의 서식지분포 변화 등이 나타나며 발생했다(Chung et. al., 2015; Tian et. al., 2006). 동 해에서는 1960년대와 1990년대에 살오징어가 우점한 반면, 1970년대와 1980년대에는 명태가 우점종이었다(Kim et al., 2007). 이것은 동해를 포함 한 북태평양에서 기후체제변환은 생태계 구조 및 주요어종, 수산자원의 생 산에 있어 큰 변화를 야기 시킨 것으로 판단된다(Zhang et al., 2004). 본 연구에서는 명태의 주어획장소인 55, 56, 62, 63 해구에서 수집된 명태자료 와 동해 전체 명태 어획량 자료를 통해 동해 명태의 생물학적 특징 변화 및 자원량 변동이 초기생활사 시기의 해양환경뿐만 아니라 어업에 의해 초 래된 밀도 종속효과로 인해 생물학적 특성 및 가입에 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 하지만 코호트 분석으로 추정하기 위해 사용된 연령정보가 기록 되어 있는 개체수는 다른 해역 연구들에 비해 너무 적었다. 따라서 연도별 로 사망률을 고려하지 못하였고, 어획이 잘 되지 않는 0, 1세 개체수는 추 정할 수 없었다. 향후 자료가 추가 보완하여 코호트 분석을 실시하여 된다 면 더욱 정밀한 결과를 얻을 수 있을 것이다.



## V. 참고문헌

- 김리한. 1986a. 동조선만 명태의 세대수량변동에 영향을 주는 환경요인. 수산과학기술 론문집 (1). 공업출판사. 평양. 81-93.
- 김례진. 1986b. 조선동해 명태의 초기발육특징에 대한 연구. 수산과학기술 론문집 (1). 공업출판사. 평양. 29-36.
- 리용남. 1986. 조선동해북부에서 명태의 먹이습성과 먹이생물에 의한 어황예보지표의 선정. 수산과학기술 론문집 (1). 공업출판사. 평양. 36-42.
- 리제웅. 1986. 우리 나라 동해의 명태어황을 규정하는 물온도조건에 대하여. 수산과학기술 론문집 (1). 공업출판사. 평양. 17-24.
- 장창익, 2010. 수산자원생물의 재생산과 가입. 해양수산자원생태학. 부경대학교 출판부. 153-187.

朝鮮總督府水産試驗場. 1943. 朝鮮のメンタイ漁業に就て. 增補第四販. p. 22.

- Anderson RO. 1978. New approaches to recreational fishery management. pages 73–78 in G.D. Novinger and J.G. Dillard, editors. New approaches to the management of small impoundments. American Fisheries Society, North Central Division, Special Publication 5, Bethesda, Maryland
- Ashjian CJ, Dabis CS, Gallager SM, Alatalo P. 2005. Characterization of the zooplankton community, size composition, and distribution in relation to hydrography in the Japan/East Sea. Deep-Sea Research Part II 52:1363-1392.
- Attrill MJ, Power M. 2002. Climatic influence on a marine fish

assemblage. NATURE. Vol. 417: 275-278

- Bailey K, Dunn J. 1979. Spring and summer foods of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, in the eastern Bering Sea. U.S.Natl. Mar. Fish. Serv. Fish. Bull. 77:304–308.
- Bailey KM. 2000. Shifting control of recruitment of walleye pollock *Theragra chalcogramma* after a major climatic and ecosystem change. Mar Ecol Prog Ser 198, 215–224.
- Bakun A. 1990. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. Science. 247. 198–201.
- Beamish RJ, McFarlane GA, King JR. 2000. Chapter 5 Fisheries climatology: Understanding decadal scale processes that naturally regulate British Columbia fish population. In: P.J. Harrison and T.R Parsons (Eds.), Fisheries Oceanography, Blackwell Science, pp. 94–145
- Bonar SA. 2002. Relative length frequency: a simple, visual technique to evaluate size structure in fish populations. North American Journal of Fisheries Management 22: 1086 - 1094.
- Bradford MJ, Cabana G. 1997. Interannual variability in stage-specific survival rates and the causes of recruitment variation. In Early life history and recruitment in fish populations. Fish and Fisheries Series, Vol. 21: 469 - 493.
- Brander KM. 2007. Global fish production and climate. PNAS(Proceedings of National Academy of the United States of America). Vol. 104. No. 50: 19709–19714.
- Brander K. 2010. Impacts of climate change on fisheries. J Mar Syst. Vol 79: 389–402

- Britten GL, Dowd M, Worm B. 2016. Changing recruitment capacity in global fish stocks. PNAS(Proceedings of National Academy of the United States of America). Vol. 113 No. 1: 134–139.
- Carline RF, Johnson BL, Hall TJ. 1984. Estimation and interpretation of proportional stock density for fish populations in Ohio impoundments. North American Journal of Fisheries Manage-ment 4:139 - 154.
- Chang K, Teague W, Lyu S, Perkins HT, Lee D, Watts DR, Kim Y, Mitchell DA, Lee C, Kim K. 2004. Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review. Progress in Oceanography 61: 105–156.
- Chung SD, Suzaki H, Kasai A, Nakata H. 2015. The Response of Fish Communities to Climate and Human-Induced Changes Inferred from Fishery Landings in an Enclosed Bay. Estuaries and Coasts. Vol. 38(4): 1365–1375.
- Diaz RJ, Rosenberg R. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science 321: 926 - 929.
- Dwyer DA, Bailey KM, Livingston PA. 1987 Feeding habits and daily ration of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the eastern Bering Sea, with special reference to cannibalism. Can J Fish Aquat Sci 44:1972–1984.
- FishBase. 2017. Theragra chalcogramma(Pallas, 1814) Alaska Pollock. Retrived from http://www.fishbase.org/Summary/SpeciesSummary.php?ID=318&A T=walleye+pollockon March 22.
- Gabelhouse DW Jr. 1984a. A length-categorization system to assess fish stocks. North American Journal of Fisheries Management 4: 273

- 285.

- Gong Y, Zhang CI. 1986. The Pollock (*Theragra chalcogramma*) stock in Korean waters. INT. North Pac. Fish. Comm., Bull. 45: 21–38.
- Haynes EG, Ignell SE. 1983. Effects of temperature on rate of embryonic development of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*. Fish. Bull. : 890–894.
- Hamarsu T, Yabuki K. 2007. Density effects on length at maturity of walleye pollock *Theragra chalcogramma* off the Pacific coast of norther Japan in the 1990s. Fisheries Science. 73: 87–97.
- Hjort J. 1914. Fluctuations in the great fisheries of northern Europe. Rapp. Proc. Verb. 20: 1-13.
- Honda S, Oshima T, Nishimura A, Hattori T. 2004. Movement of juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, from spawning ground to a nursery ground along the Pacific coast of Hokkaido, Japan. Fish. Oceanogr. 13(Suppl. 1): 84–98.
- Huh SH. 1978. Morphological comparison between adults and juveniles of Alaska Pollack, *Theragra chalcogramma* (Pallas) (Gadidae: Teleostomi), collected in Korean waters. Seoul National University, Master Thesis, Seoul, Korea.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. contribution of working Group II to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change(COR). Cambridge: Cambridge University Press.
- Isermann DA, Knight CT. 2005. A computer Program for Age-Length Keys Incorporating Age ssignment to Individual Fish. North American Journal of Fisheries Management 25: 1153 - 1160.

- Jennings S, Greenstreet SPR, Reynolds JD. 1999. Structural change in an exploited fish community: a consequence of differential fishing effects on species with constrasting life histories. Jornal of Animal Ecology. 68: 617–627.
- Jung S, Ha S, Na H. 2013. Multi-decadal Changes in Fish Communities Jeju Island in Relation to Climate Change. Kor J Fish Aquat Sci 46(2), 186–194
- Junquera S, Saborido-Rey F. 1996. Histological assessment of sexual maturity of the Flemish Cap cod in 1995. NAFO (Northwest Atlantic Fisheries Organization) Science Council Studies 27: 63 - 67.
- Kamba M. 1977. Feeding habits and vertical distribution of walleye pollock, *Theragra chalcogramma* (Pallas), in early life stage in Uchiura Bay, Hokkaido. Res. Inst. N. Pac. Fish. Hokkaido Univ. Spec. Vol.: 175–197.
- Kang SK, Park JH and Kim S. 2013. Size-class Estimation of the Number of Walleye Pollock *Theragra chalcogramma* Caught in the Southwestern East Sea during the 1970s-1990s. Kor J Fish Aquat Sci 46(4), 445-453.
- Kendall AW Jr, Schumacher JD, Kim S. 1996. Walleye pollock recruitment in Shelikof Strait: applied fisheries oceanography. Fish Oceanogr 5 (Suppl 1) : 4–18.
- Kim KH. 2017. A lengh-based, age-structured model for assessing the walleye pollock (Gadus chalcogrammus) population in the East Sea. M.D. Thesis. Pukyong National University, Korea, p. 122.
- Kim S. 1992b. Status of Fishery and Science of Bering Sea Walleye Pollock : (Π) Biological Characteristics (Early Life History).

Ocean Research 14(2), 149-170.

- Kim S, Kang SK. 1998. The Status and Research Direction for Fishery Resources in the East Sea / Sea of Japan. J Korean Soc Fish Res 1(1), 44–58.
- Kim S, Gunderson DR. 1988. Walleye pollock in the Gulf of Alaska. P. 70-82. In W.S. Wooster ed., Species synopses: Life histories of selected fish and shellfish of the northeast Pacific and Bering Sea. Washington Sea Grant Publication. Univ. of Washington, Seattle.
- Kim S, Zhang CI, Kim JY, Oh JH, Kang S, Lee JB. 2007. Climate variability and its effects on major fisheries in Korea. Ocean Sci J 42, 179–192.
- King M. 2007. Fisheries Biology Assessment and Management. 400p
- Laurel B, Spencer M, Iseri P, Copeman LA. 2016. Temperature-dependent growth and behavior of juvenile Arctic cod (Boreogadus saida) and co-occurring North Pacific gadids. Polar Biol 39: 1127-1135
- Lee CI, Lee JY, Choi KH, Park SE. 2008. Long-term Trends in Pelagic Environments of the East Sea Ecosystem. Ocean Sci J 43: 1-7
- Lee JU. 1991. Estimation on optimum fishing effort of walleye pollock fishery in the east coast of Korea: Based on the economic analysis between Danish seine fishery and trawl fishery for walleye pollock. Susan-gyungyoung-nongib 22, 75-99.
- Lee JU, Hur YH. 1993. Comparative Study on Age Determination Using Scales and Otoliths of Walleye Pollock *Theragra chalcogramma* in the Bering Sea and Gulf of Alaska. Korean J. Ichthyrol. 5(2): 177–183.

- Lee Y, Kim DY. 2010. Measuring surface water temperature effects on the walleye pollock fishery production using a translog cost function approach. Environmental and Resource Economics Rev 19, 897–914.
- Maeda T. 1986. Life cycle and behavior of adult Pollock (*Theragra chalcogramma* [Pallas]) in water adjacent to Funka Bay, Hokkaido Island. Bull Int North Pac Fish Comm 45: 39–65.
- Mito K. 1974. Food relationships among benthic fish populations in the Bering Sea. M.S. Thesis. Hokkaido University, Hakodate, Japan. 135p.
- Mito K, Nishimura A, Yanagimoto T. 1999. Ecology of groundfishes in the eastern Bering Sea, with emphasis on food habits. n T. R. Loughlin, & K. Ohtani (Eds.), Dynamics of the Bering Sea (pp. 537 - 580). Fairbanks AK: Alaska Sea Grant.
- Miyake, H., Yoshida, H., Ueda, Y., 1996. Distribution and abundance of age-0 juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, along the Pacific coast of southeastern Hokkaido. NOAA Technical Report NMFS 126, 3 - 10.
- Muigwa NM. 1988. Vertical distribution patterns of prespawning and spawning pollock (*Theragra chalcogramma*) in Shelikof Strait. p. 403-432. In: Proc. Int. Symp. Biol. Mgmt. Walleye pollock, November 14-16.
- Nakatani T. 1988. Studies on the early life history of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in Funka bay and Vicinity, Hokkaido. Mem. Fac. Fish. Hokkaido Univ. Vol. 35. No. 1: 1-46.
- NFRDI. 2010. Ecology and fishing ground of fisheries resourcesin Korean waters. National Fisheries Research and Development

Institute, Busan, Korea. 118-125.

- Ogle DH. 2016. Introductory Fisheries Analyses with R. Availavle from http://cran.r-project.org/web/packages/FSA/FSA.pdf
- Oh TG, Sakuramoto K, Lee SG. 2004. The Relationship between spawning area water temperature and catch fluctuation of walleye pollock in the East Sea/Sea of Japan. J Korean Soc Fish Res 6, 1–13.
- Oh T, Sakuramoto K, Hasegawa S. 2002. On the relationship between water temperature and catch fluctuations of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the northern waters of the Japan Sea. Nippon Suisan Gakkaishi 68 (6), 866–873 (in Japanese, with English Abstr.).
- Overholtz WJ. 1987. Factors relating to the reproductive biology of Georges Bank haddock (Melanogrammus aeglefinus) in 1977 - 83. Journal of Northwest Atlantic Fisheries Science 7:145 - 154.
- Park BH, Hue JB, Kim HK. 1978. Age and growth of Alaska pollack, *Theragra chalcogramma*, in the Eastern Sea of Korea. Bull. Fish. Res. Dev. Agency 20: 33–42
- Park HH, Yoon GD. 1996. Prediction of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, landings in Korea by time series analysis : AIC. Bull Korean Soc Fish Tech 32, 235–240.
- Park SK, Ok YS. 1986. Bio-economic research in fishery resource management: walleye Pollock. Nongchon-gyungje 9, 59-68.
- Pauly D. 1984. Length-converted catch curves. A powerful tool for fisheries research in the tropic (Part 2). ICLARM Fishbyte 2, 9-10.

- Pope JG. 1972. An Investigation of the Accuracy of Virtual Population Analysis Using Cohort Analysis. Res. Bull. int. Comm. Northw. Atlant. Fish., this volume p. 65–74.
- Rochet MJ. 1998. Short-term effects of fishing on life history traits of fishes. ICES Jornal of Marine Science. 55: 371-391.
- Rodionov S. 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. Geophysical Research Letters 31, L09204. doi:10.1029/2004GL019448.
- Serobaba II. 1974. Spawning ecology of the walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the Bering Sea. J. Ichthyol. 14: 544–552.
- Senjyu T. 1999. The Japan sea intermediate water; Its characteristics and circulation. Journal of Oceanography 55: 111-122.
- Shimizu M, Isoda Y. 1997. The transport process of walleye pollock eggs into Funka Bay in winter. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography 61 (2), 134 - 143 (in Japanese, with English Abstr.).
- Shida O, Hamatsu T, Nishimura A, Suzaki A, Yamamoto J, Miyashita K, Sakurai Y. 2007. Interannual fluctuations in recruitment of walleye pollock in the Oyashio region related to environmental changes. Deep–Sea Research II. 54: 2822–2831.
- Stahl JP, Kruse GH. 2008. Spatial and Temporal Variability in Size at Maturity of Walleye Pollock in the Eastern Bering Sea. Transactions of the American Fisheries Society 137: 1543–1557.
- Takahash Y, Yamaguchi H. 1972. Stock of the Alaska pollock in the eastern Bering Sea. Bull. Jpn, Soc. Sci. Fish. 38: 389–399(In Japanese, English summary).

- Tian Y, Kidokoro H, Watanabe T. 2006. Long-term changes in the fish community structure from the Tsushima warm current region of the Japan/East Sea with an emphasis on the impacts of fishing and climate regime shift over the last four decades. Progress in Oceanography 68: 217–237.
- Willis DW, Murphy BR, Guy CS. 1993. Stock density indices: development, use, and limitations. Reviews in Fisheries Science 1:203-222.
- Yamamura O, Honda S, Shida O, Hamarsu T. 2002. Diets of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the Doto area, northern Japan: ontogenetic and seasonal variations. Mar Ecol Prog Ser. Vol. 238: 187-198.
- Yang YS, Kang S, Kim S, Kim S. 2008. Relationship between Oxyzen Isotopic Composition of Walleye Pollock (*Theragra chalcogramma*) Otoliths and Seawater Temperature. Ocean and Polar Research. Vol. 30(3): 249–258.
- Yeh S, Park Y, Min H, Kim C, Lee J. 2010. Analysis of characteristics in the sea surface temperature variability in the East/Japan Sea. Prog Oceanogr. 85:213 - 223.
- Yoo HK, Byun SG, Yamamoto J, Sakurai Y. 2015. The Effect of Warmer Water Temperature of Walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) Larvae. J of the Korean Society of Marine Environment. Vol. 21. No. 4: 339–346.
- Zhang CI. 2010. Fisheries Science Series #1. Marine Fisheries Resources Ecology. Pukyong National University Press, Busan, Korea, 1–561.
- Zhang CI, Lee J, Seo Y, Yoon S, Kim S. 2004. Variations in the

abundance of fisheries resources and ecosystem structure in the Japan/East Sea. Progress in Oceanography 61: 245-265.

Zhang CI, Megrey BA. 2006. A revised Alverson and Carney model for estimating the instantaneous rate of natural mortality. Trans. Amer. Fish. Soc. 135(3), 620–633.



## Ⅵ. 부록

								1	10	MAI	
Appendix	Ι.	The	list of	fishing	gears	used	in	three	main	fisheries.	11

	어구(Fishing gear)
트롤(Trawl)	트롤(trawl), 대형트롤(otter trawl), 새우트롤·동해구트롤(shrimp trawl), 수인대형기선저인망(trawl large-one boat), 수인대형기선저인망(trawl large-two boat), 수인중형기선저인망(trawl large-one boat), 수인중형기선저인망(trawl large-two boat), 서남해구기선저인망(쌍끌이), 서남해구기선저인망(외끌이), 기타저인망(other trawl), 범선저인망(sailing trawl)
연숭(Longline)	연승(long line), 근해연승(offshore long line), 연안연승(coastal long line), 기선명태연승(alaska pollock long line), 기타기선연승(other powered long line), 상어연승, 장어 연승(shark long line), 기타연승(other long line)
자망(Gill net)	유자망(drift gill net), 근해유자망(large gill net), 연안유자망(small gill net), 근해자망, 연안자망, 명태자망(alaska pollock gill net) 기타자망(other gill net), 기타기선유망(other powered drift gill net),멸치유망(anchovy gill nets)
기타	기선형망(powered dredge net), 대형안강망(large staw net), 소형안강망(small staw net), 기타부망(other life nets), 소형선망(small powered purse seine), 대형선망(large powered purse seine), 범선선망, 근해안강망(large staw net), 연안안강망, 근해채낚기(off-shore angling), 기선권현망(anchovy drag net), 연안채낚기(coastal angling), squid angling, 연안통발(coastal trap), 근해통발, 대형정치망(set net-large), 소형정치망(set ent-small), 정치망, 잠수기(diving), 기타어업(other fisheries), 정치성구획어업, 제 2·3 종 공동체포어업(other apparatus)

## Ⅶ. 감사의 글

논문이 나오기까지 많은 가르침을 주신 김수암 교수님께 가장 먼저 감사의 말 을 전합니다. 학부 졸업을 앞두고 방황하던 저를 이끌어주시고, 많은 학문적 기회 를 주신 덕분에 무사히 졸업할 수 있었습니다. 말괄량이 막내제자를 학문의 길로 접어들게 해주신 김수암 교수님께 다시 한 번 진심으로 감사드립니다.

바쁘신 와중에서 논문 심사를 정성껏 해주시고, 따뜻한 격려를 아끼지 않으신 김진구 교수님, 강수경 박사님께 정말 감사드립니다. 두 분의 조언 덕분에 논문을 잘 마무리 할 수 있었습니다.

많은 가르침으로 학문의 시야를 넓혀 주신 남기완 교수님, 백혜자 교수님, 오철 응 교수님, 김현우 교수님, 박원규 교수님, 현상윤 교수님께도 감사드립니다.

아울러 가장 오랜 시간을 실험실에서 함께하면서 다양한 지식들을 심어 준 친 언니 같은 화현언니, 바쁜 주말에도 선뜻 나와서 많은 것들을 알려주시고 힘껏 도 와주신 정상덕 박사님, 결혼에서부터 학문까지 완벽하게 소화해내고 계시는 경수 선배, 저 멀리 안산에서 박사과정을 공부하면서 애틋한 연인감정을 느끼게 해주는 민경언니, 보기만 해도 멋지고 카리스마 넘치는 아리언니, 긍정적 에너지가 넘치는 소언이 언니, 항상 응원해주신 정경미 박사님, 이혜은 박사님, 서현주 박사님, 김현 우 박사님, 김은정 박사님, 김중진 박사님께도 감사드립니다.

힘들 때마다 응원해준 민유언니, 항상 밝은 예니언니, 동갑내기 좋은 친구 서하, 부지런한 의철오빠, 똑똑한 동생 유리에게도 감사의 말을 전합니다.

마지막으로 못난 딸을 믿어주시고 든든한 버팀목이 되어주신 부모님, 상남자 같 지만 마음여린 경신이, 중국에서 맘고생 많은데도 응원을 아끼지 않는 지현이, 우 리집 활력소 율이에게 감사의 말을 전합니다.

74