

Article

한국 근해에 서식하는 고래 피하지방의 층별 지방 함량 및 구성 변화

고아라^{1,2} · 주세종^{2*} · 문대연³ · 최석관³ · 김장근⁴ · 신경훈¹

¹한양대학교 과학기술학부 해양환경과학과
(426-791) 경기도 안산시 상록구 사3동 1271

²한국해양연구원 심해·해저자원연구부
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

³국립수산과학원 고래연구소
(680-050) 울산광역시 남구 장생포고래로 250

⁴국립수산과학원 기반연구부
(619-705) 부산광역시 기장군 기장읍 기장해안로 216

Stratification of Lipid Content and Composition in Blubber of Marine Cetacean from Korean Waters

Ah-Ra Ko^{1,2}, Se-Jong Ju^{2*}, Dae-Yeon Moon³, Seok-Gwan Choi³,
Zang Geun Kim⁴, and Kyung-Hoon Shin¹

¹*Department of Environmental Marine Sciences, College of Science and Technology
Hanyang University, Ansan 426-791, Korea*

²*Deep-Sea & Marine Georesources Research Department, KORDI
Ansan P.O Box 29, Seoul 425-600, Korea*

³*Cetacean Research Institute, NFRDI
Ulsan 680-050, Korea*

⁴*Fundamental Research Department, NFRDI
Busan 619-705, Korea*

Abstract : Blubber plays different biological roles in cetaceans, including structural support, physiological demands (thermoregulation, streamlining, buoyancy, etc.), and energy storage. As such, biochemical composition, especially lipid, in the blubber may be vertically stratified in order to effectively assist with these functions. We analysed lipid content, class and fatty acid composition in the blubber of by-catch minke whale (*Balaenoptera acutorostrata*; n = 11), long-beaked common dolphin (*Delphinus capensis*; n = 3) and Pacific white-sided dolphin (*Lagenorhynchus obiquidens*; n = 2) from Korean waters. Lipid content for all three species ranged from 55 to 96% of wet weight, with a dominance of triacylglycerols. Vertical stratification of blubber lipid content was different between species. For minke whale and long-beaked common dolphin, it increased from inner (near the muscle) to outer (near the skin) layer, whereas it decreased for Pacific white-sided dolphin. Thirty-one fatty acids were found in all blubber samples and vertical stratification of fatty acid composition was similar among all three species. Among grouped fatty acids, monounsaturates were the most abundant, gradually increasing from inner to outer blubber layer,

whereas polyunsaturates and saturates decreased. Such vertical stratification of lipid content and composition suggests that the modification and accumulation of lipid occur in the blubber itself in order to help cetaceans with their specific physiological needs.

Key words : cetacean, blubber, lipid, fatty acid, stratification

1. 서 론

한반도 주변해에는 밍크고래(Minke whale; *Balaenoptera acutorostrata*), 긴부리참돌고래(Long-beaked common dolphin; *Delphinus capensis*, 이하 참돌고래), 낫돌고래(Pacific white-sided dolphin; *Lagenorhynchus obiquidens*)를 포함한 약 8과 35종의 고래류(수염고래 3과 8종, 이빨고래 5과 27종)가 서식하고 있다(NFRDI 2000). 그 중 한국 근해를 포함한 북태평양에 가장 많이 분포하는 수염고래과의 밍크고래와 돌고래과의 낫돌고래는 환경에 대한 적응력이 뛰어나 섭취하는 먹이가 서식지의 먹이환경에 따라 매우 유동적이다(Skaug et al. 1997). 하지만, 온대지역에 주로 분포하는 참돌고래는 서식지 먹이환경과 관계없이 오징어를 포함한 소형 어류를 주로 섭취하는 것으로 보고되고 있다(Black 2009). 국제포경위원회(International Whaling Commission; IWC)가 상업포경을 금지시킨 1986년 이후, 우리나라 근해에 출현하는 고래류의 개체수는 점차 증가하고 있다(An et al. 2004). 이에 따라 고래에 대한 관심이 증가하면서 개체군 분포를 파악하기 위한 목시조사뿐만 아니라, DNA를 이용한 고래의 종 동정과 고래류의 체내 유기오염물질에 관련된 연구가 수행되고 있다(Moon et al. 2010a; Moon et al. 2010b; Moon et al. 2010c; Moon et al. 2010d; Park et al. 2010a; Park et al. 2010b; Park et al. 2002). 그러나 우리나라 근해에서 이러한 고래의 개체수 증가가 수산자원(고래의 먹이생물) 및 해양생태계에 미칠 영향에 대해서는 아직 알려진 바가 없다.

해양생태계에서 최상위 포식자인 해양포유류의 먹이 생태에 관한 연구는 해양생태계에서 가장 기본인 먹이망 구조를 파악하는데에도 매우 중요하며, 해양포유류의 역할과 기능을 이해하는데 유용하다. 따라서 해양포유류의 먹이 생태 연구는 주로 전통적인 방법(위내용물 분석, 섭식 실험 등)을 통하여 진행되어 왔으며, 최근에는 동위원소(Abrantes and Sheaves 2009)와 피하지방층의 지방산을 이용한 연구가 진행되고 있다(Bradshaw et al. 2003; Newland et al. 2009; Smith and Worthy 2006).

해양생물의 지방은 쉽게 변성되는 탄수화물, 단백질과는 다르게 체내에서 합성되거나 먹이로부터 섭취된 후, 해양생물의 조직에 저장된다(Iverson 1993). 특히 해양포유

류는 체중의 약 15~43%가 지방으로 구성되어 있으며, 대부분의 지방을 피하지방층에 저장하고 있다(Lockyer 1976; Ohsumi et al. 1970). 모든 피하지방은 지방 세포와 콜라겐 섬유질로 구성되어 있으며, 포화지방산(Saturated fatty acids; SAFA), 단일 불포화지방산(Monounsaturated fatty acids; MUFA), 다 불포화지방산(Polyunsaturated fatty acids; PUFA) 등의 다양한 지방산을 포함하고 있다. 이러한 피하지방은 단열판과 같이 몸체를 둘러싸면서 체온 조절(thermoregulation)을 할 뿐만 아니라, 유영(streamlining), 부유(buoyancy), 에너지 저장(energy storage) 등의 다양한 기능을 가지고 있다(Ryg et al. 1988). 그러나 피하지방의 생화학적 구성과 생리·생태적인 기능은 여러 가지 환경적인 변화와 생리적인 요인에 의해 종내 또는 종간에서 다르게 나타난다. 피하지방의 지방 함량은 영양 상태(Aguilar and Borrell 1990), 수온 변화(Worthy and Edwards 1990), 이용 가능한 먹이와 먹이양(Bradshaw et al. 2003)에 따라 차이가 나며, 지방 및 지방산 구성은 종(Krahn et al. 2004), 나이(Koopman et al. 1996)와 부위(Ruchonnet et al. 2006) 심지어는 피하지방의 층(Samuel and Worthy 2004)에 따라 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 특히 해양포유류의 피하지방층에서 근육과 가까운 내층(Inner or Innermost)과 피부와 가까운 외층(Outer or Outermost) 사이에는 지방산 구성의 차이가 뚜렷하게 나타난다. Olsen and Grahl-Nielsen (2003)은 밍크고래 피하지방을 다섯층으로, Ackman et al. (1975)는 북서대서양에 서식하는 보리고래 피하지방을 두층으로 나누어 내층과 외층 사이의 피하지방층별 지방 함량 및 지방산 구성의 차이를 설명하였다. 먹이를 통하여 섭취된 지방은 피하지방층에 흡수, 저장되며, 근육과 가까운 내층은 피부 쪽에 가까운 외층에 비해 먹이의 지방 특성을 더 많이 반영하고 있다. 그리고 외부환경과 근접한 피부 쪽의 피하지방은 보온, 유영 등의 기능 유지를 위한 지방 형태로 변형된다(Aguilar and Borrell 1990, Samuel and Worthy 2004). 본 연구에서는 한국 근해에 서식하는 고래류 피하지방에서의 층별 지방 함량과 구성 변화를 파악하고, 이를 통해 피하지방에서의 지방 대사와 역할에 대한 고래의 종내·종간 차이를 살피고자 한다. 이러한 연구 결과는 고래의 섭식 생태와 생태학적 위치를 파악하는데에도 활용될 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 2002년부터 2009년까지 동해 지역에서 혼획(by-caught)되어 고래연구소에 보관 중인 밍크고래, 닳돌고래, 참돌고래의 피하지방 시료를 이용하였다(Table 1). 모든 시료는 분석 전까지 -20°C 에서 보관되었으며, 분석을 위해 시료를 해동한 후, 시료에서 피부와 근육을 제거하였다. 그리고 피하지방(두께: 밍크고래 2.5~3 cm, 닳돌고래 1.1~1.2 cm)을 수직으로 일정(0.6 cm)하게 절단, 분리(참돌고래와 닳돌고래는 두층, 밍크고래는 다섯층; Fig. 1)하여 각 층의 습중량(mg WW)을 측정하였다.

지방분석에 사용되는 모든 유리용기는 증류수로 세척하여 450°C 에서 3시간 정도 태운 후, 혼합 유기용매 [Dichloromethan:Methanol($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}=1:1$)]로 2~3번 세척하였다. 준비된 시료를 유리용기에 넣고, 혼합 유기용매($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}=1:1$)를 첨가한 후, 약 10분간 초음파

분해(bath sonication)하여 지방을 추출하였다(Bligh and Dyer 1959). 추출된 지방을 혼합 유기용매($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}=2:1$)에 다시 용해시킨 후, 지방 class와 지방산 분석에 사용하였다. 추출된 적정량(약 0.2~1.0 μl)의 지방을 chromarod(Mitsubishi Kagaku Iatron)에 떨어뜨리고, 혼합 유기용매($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}=1:1$)로 농축(focusing)시킨 후, 비극성 유기용매(Hexane:Diethyl ether:Formic acid=85:15:0.2)로 지방 class를 분리하였다. 이렇게 분리된 지방 class는 Iatroscan Mark-V TLC-FID(Thin-Layer Chromatography with Flame-Ionization Detector; IATRON LABORATORIES, Inc.)로 분석되어(Ju et al. 1997), 지방 class standard(Phospholipid: 1,2-Dipalmitoyl-rac-glycero-3-phosphocholine hydrate; Cholesterol: cholesterol; Free Fatty Acid: n-Nonadecanoate; Triacylglycerol: Glyceryl trioleate; Sigma-Aldrich Co.)와 비교하여 시료의 지방 함량과 class를 정성, 정량화하였다. 총 지방 함량은 각 지방 class 함량의 합으로 산출되었다.

지방산 분석을 위하여 추출된 지방의 적정량(약 50 μl)에 0.5 N KOH/MeOH를 넣고 70°C 에서 30분간 가열한 후, 혼합 유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)로 알코올과 스테롤을 분리, 추출하였다. 추출하고 남은 용액에 염산을 넣어 KOH를 침전시킨 후, 혼합 유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)로 지방산을 추출하였다. 추출된 지방산에 BF_3/MeOH 를 첨가하고, 70°C 에서 30분 동안 가열하여 지방산 메틸에스테르(Fatty Acid Methyl Ester)로 유도한 후, 추출 전에 첨가된 internal standard인 n-Nonadecanoic acid (동경화성공업주식회사)와 비교하여 gas chromatography-flame ionization detector(GC-FID; Agilent 7890A)로 정량 분석하였다. 지방산의 분리, 분석에는 GC-FID에 ZB-5MS column(길이 60 m, 내경 0.32 mm, 코팅된 내부 필름 두께 0.25 μm ; Phenomenex)을 사용하였다. 적용된 온도 조건은 시료 주입구 250°C , column 오븐은 50°C 에서 120°C 까지 $10^{\circ}\text{C}/\text{분}$, 120에서 300°C 까지 $4^{\circ}\text{C}/\text{분}$ 으로 설정되었고, 이동상 가스는 헬륨(30 ml/분)을 사용하였다. 각 지방산의 구조(탄소수, 포화도, 이중결합 위치)는 GC-mass spectrometry detector(GC-MSD; Agilent 7890A GC-Agilent 5975C MSD)를 이용하여 70 eV에서 원자 질량 50-700 amu 범위에서 수행되었으며, 나머지 적용 조건(column, 온도, 이동상 가스)은 정량 분석시의 GC-FID와 동일하게 설정하였다. 지방산 성분 중 불포화지방산의 탄소 이중결합(double bond) 위치는 상업용 지방산 standard (Fatty acid methyl ester; FAME, unsaturated kit; Sigma-Aldrich Co.) 또는 FAME을 fatty acid picolinyl ester로 전환하여 GC-MSD로 확인하였다(Destaillats and Angers 2002).

본 연구에서 지방산 명명은 총 탄소 개수와 이중결합

Table 1. Information on three cetacean species caught off Korean waters

Species	Size (cm)	Sex	Site*	Date
Minke whale	705	Male	Ventral	2002.8.19
	814	Female	Ventral	2002.9.2
	750	Male	Ventral	2003.7.31
	515	Female	Dorsal	2003.8.30
	550	Male	Ventral	2004.9.13
	540	Female	Dorsal	2004.12.8
	530	Male	Ventral	2005.7.5
	730	Male	Ventral	2005.11.25
	-	-	-	2009.3.10
	-	-	-	2009.2.8
-	-	-	2009.1.20	
Long-beaked common dolphin	206.5	Female	-	2009.6.27
	211	Female	-	2009.7.28
	223	Male	-	2009.9.13
Pacific white-sided dolphin	218	Female	-	2005.12.25
	182	Male	-	2007.12.10

*: where blubber samples were taken

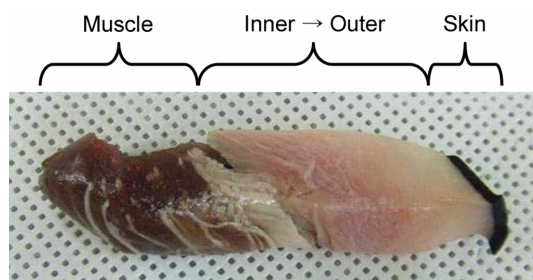


Fig. 1. The blubber of a minke whale sampled from the dorsal surface

개수를 표기한 후, 메틸기(-CH₃)의 탄소를 1번으로 하여 탄소가 이중결합(double bond)되어 있는 첫 번째 탄소 위치를 n 뒤에 숫자로 표기하였다(Table 2).

3. 결 과

밍크고래, 참돌고래 그리고 닳돌고래 피하지방의 지방 함량과 class 구성을 살펴본 결과, 피하지방 내층과 외층 사이에서 지방 함량의 차이가 나타났다(Fig. 2). 다섯 개 층으로 나눈 밍크고래의 피하지방은 내층(습증량의 55%)에서 외층(습증량의 92%)으로 갈수록 지방 함량이 점차 증가하였고, 두 개 층으로 나눈 참돌고래의 피하지방에서도 내층과 외층이 각각 습증량의 91%와 96%로 밍크고래와 유사한 층별 지방 함량의 차이를 보였다. 그러나 닳돌고래의 피하지방에서는 내층(습증량의 81%)이 외층(습증

량의 74%)보다 높게 나타났다.

각 피하지방의 지방 class 구성에서는 밍크고래, 참돌고래 그리고 닳돌고래 모두 트리아실글리세롤(triacylglycerol)이 총 지방의 53~96%로 가장 우점하였다. 밍크고래와 참돌고래에서는 내층에서 외층으로 갈수록 총 지방 중 트리아실글리세롤의 함량이 증가하였으나, 이와 달리 닳돌고래는 감소하였다. 이 밖에 지방 class 중 인지질(phospholipid)과 콜레스테롤(cholesterol)은 밍크고래의 피하지방층에서 미량으로 나타났으나, 참돌고래와 닳돌고래의 피하지방층에서는 발견되지 않았다. 또한 자유지방산(free fatty acid)과 왁스에스테르(wax ester)는 모든 시료에서 검출되지 않았다. 비록 분석 시료수가 충분치 않아 통계적 방법으로 검증할 수는 없지만, 종 내에서의 성별, 시료 부위, 혼획 시기에 따른 지방 함량 및 class 구성의 뚜렷한 차이를 볼 수는 없었다.

한국 근해에서 혼획된 고래의 피하지방층은 탄소 14~24개로 구성된 총 31종류의 지방산을 함유하는 것으로 나타났다(Table 2). 총 지방산 함량은 밍크고래, 참돌고래, 닳돌고래가 각각 습증량의 22, 31, 29%로 참돌고래에서 가장 높게 나타났으며, 밍크고래 피하지방에서 내층이 습증량의 15%, 외층이 습증량의 26%로 층별 지방산 함량에서도 차이를 보였다. 이러한 피하지방에서 총 지방 함량의 층별 변화는 참돌고래의 피하지방에서도 밍크고래와 유사하였으나, 닳돌고래의 피하지방에서는 내층이 외층보다 더 많은 양의 지방산을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 지방산을 포화도에 따라 그룹화하면, 포화지방산(Saturated fatty acids; SAFA), 단일불포화지방산(Monounsaturated fatty acids; MUFA), 다 불포화지방산(Polyunsaturated fatty acids; PUFA)으로 나눌 수 있다. 그 중에서 18:1(n-9)(Oleic acid; 총 지방산의 20~27%)를 포함한 MUFA가 모든 시료에서 가장 우점하였으며, 밍크고래 피하지방의 MUFA는 내층(총 지방산의 45%)에서 외층(총 지방산의 57%)으로 갈수록 점차 증가하였다(Fig. 3). 닳돌고래의 피하지방도 밍크고래와 같은 변화를 보였으나, 참돌고래 피하지방에서는 내층과 외층에서 큰 차이를 발견할 수 없었다. 이 밖에 16:0(Palmitic acid)와 18:0(Stearic acid)을 포함한 SAFA와 20:5(n-3)(Eicosapentaenoic acid; EPA)과 22:6(n-3)(Docosapentaenoic acid; DHA)을 포함한 PUFA는 MUFA와 달리, 내층에서 외층으로 갈수록 구성비가 점차 감소하였으며, 밍크고래는 참돌고래와 닳돌고래에 비해 PUFA의 구성비가 높았다. PUFA 중에서 (n-3)/(n-6) PUFA의 비는 내층이 외층에 비해 더 높았으며, 그 중에서 (n-3) PUFA가 총 PUFA 함량의 대부분을 차지하고 있었다. 또한 닳돌고래보다 참돌고래의 외층에서 (n-3)/(n-6) PUFA의 비가 더 높았다. 모든 피하지방 시료의 층별 변화는 두층으로 나누어 분석한 참돌고래, 닳돌

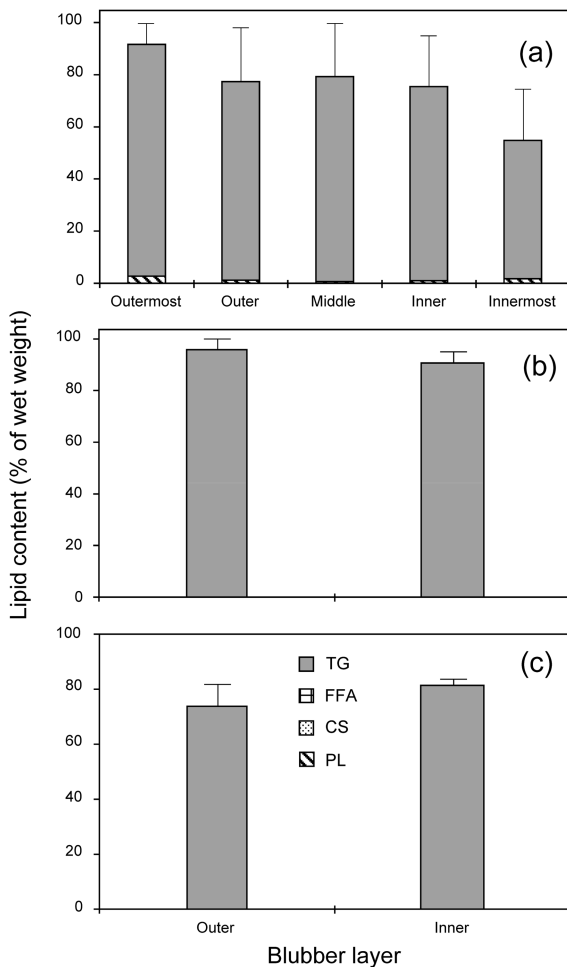


Fig. 2. The content of lipid classes (% of wet weight: presented mean values with standard deviations) in the blubber of minke whale (a), long-beaked common dolphin (b), and Pacific white-sided dolphin (c)

Table 2. The relative abundance of fatty acids (% of total FAs; mean value with standard deviation) from blubber samples on the three analyzed species (Minke whale, Long-beaked common dolphin and Pacific white-sided dolphin). Tr : trace amount (<0.1% of total concentration); - : not detected; * : indicates all isomers combined

Fatty acids	Minke whale (n=11)					Long-beaked common dolphin (n=3)		Pacific white- sided dolphin (n=2)	
	Outer most	Outer	Middle	Inner	Inner most	Outer	Inner	Outer	Inner
Saturates									
14:0	4.2 (0.8)	4.2 (0.7)	4.3 (0.9)	4.3 (1.2)	4.6 (1.3)	5.0 (1.0)	4.0 (1.6)	6.2 (1.0)	6.9 (0.0)
15:0	0.6 (0.2)	0.6 (0.2)	0.7 (0.2)	0.7 (0.3)	0.8 (0.3)	1.7 (0.5)	1.3 (0.1)	1.9 (0.2)	1.5 (0.3)
16:0	12.9 (2.8)	14.1 (2.7)	15.0 (2.6)	15.8 (2.8)	17.1 (2.8)	8.8 (1.8)	7.9 (1.0)	5.4 (0.9)	7.4 (1.3)
17:0	0.6 (0.1)	0.6 (0.2)	0.7 (0.2)	0.8 (0.2)	0.9 (0.3)	0.6 (0.1)	0.5 (0.1)	0.4 (0.0)	0.6 (0.1)
18:0	4.3 (0.4)	5.0 (0.7)	5.7 (0.9)	6.5 (0.8)	6.9 (0.9)	2.7 (0.8)	2.7 (0.5)	1.7 (0.3)	3.0 (1.3)
20:0	0.4 (0.2)	0.4 (0.2)	0.5 (0.2)	0.6 (0.3)	0.5 (0.3)	0.2 (0.1)	0.2 (0.0)	0.1 (0.0)	0.2 (0.1)
21:0	0.3 (0.2)	0.3 (0.1)	0.4 (0.1)	0.5 (0.1)	0.4 (0.0)	0.1 (0.1)	0.2 (0.0)	0.1 (0.0)	0.2 (0.1)
ΣSAFA	23.3 (4.7)	25.3 (4.7)	27.3 (5.2)	29.2 (5.8)	31.2 (6.0)	19.1 (4.4)	16.9 (3.3)	15.9 (2.5)	19.8 (3.2)
Monounsaturates									
14:1(n-5)	0.4 (0.4)	0.2 (0.3)	0.2 (0.2)	0.1 (0.1)	0.1 (0.1)	1.4 (0.4)	1.2 (0.4)	6.6 (1.6)	1.9 (0.3)
15:1*	0.1 (0.1)	Tr	Tr	Tr	0.1 (0.1)	0.1 (0.0)	0.1 (0.0)	0.4 (0.0)	0.2 (0.1)
16:1(n-9)	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	0.2 (0.0)	0.3 (0.0)	0.3 (0.1)	1.3 (0.3)	1.3 (0.2)	3.2 (0.3)	1.4 (0.3)
16:1(n-7)	14.6 (1.1)	12.4 (1.7)	10.5 (1.9)	9.1 (2.3)	8.7 (2.1)	20.2 (5.6)	19.4 (3.7)	29.7 (3.1)	14.3 (0.3)
16:1(n-5)	0.3 (0.1)	0.3 (0.0)	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	0.7 (0.8)	0.2 (0.1)	0.3 (0.1)	0.4 (0.1)
17:1*	0.8 (0.4)	0.7 (0.3)	0.7 (0.2)	0.6 (0.2)	0.7 (0.3)	1.0 (0.4)	1.1 (0.0)	1.4 (0.2)	1.0 (0.1)
18:1(n-9)	25.8 (2.8)	24.2 (3.3)	22.8 (4.4)	21.4 (4.3)	21.5 (4.4)	22.6 (5.2)	26.9 (1.8)	22.9 (2.5)	20.2 (2.5)
18:1(n-7)	6.8 (2.4)	6.7 (2.5)	6.8 (2.1)	7.1 (2.1)	7.1 (2.1)	8.1 (6.8)	4.9 (1.2)	2.1 (0.4)	2.7 (0.3)
18:1(n-5)	0.4 (0.1)	0.4 (0.1)	0.4(0.1)	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	0.4 (0.2)	0.3 (0.1)	0.4 (0.1)	0.5 (0.1)
20:1(n-11)	3.6 (3.1)	3.2 (2.6)	2.9 (2.1)	2.6 (1.8)	2.5 (1.7)	4.4 (1.0)	5.5 (0.7)	5.5 (1.2)	13.1 (3.1)
20:1(n-9)	0.4 (0.2)	0.4 (0.2)	0.4 (0.2)	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	0.9 (1.0)	0.3 (0.0)	0.2 (0.2)	0.3 (0.1)
22:1(n-9)	3.0 (1.9)	3.1 (2.1)	2.9 (1.7)	2.6 (1.5)	2.5 (1.5)	1.7 (0.7)	1.9 (0.9)	2.2 (0.6)	7.8 (2.4)
24:1(n-9)	0.2 (0.1)	0.3 (0.2)	0.3 (0.3)	0.3 (0.2)	0.3 (0.2)	0.1 (0.0)	0.2 (0.0)	0.3 (0.0)	0.3 (0.1)
ΣMUFA	56.6 (12.6)	52.2 (13.4)	48.3 (13.7)	45.1 (12.8)	44.8 (12.8)	63.0 (22.3)	63.4 (9.4)	75.2 (10.3)	64.1 (9.8)
Polyunsaturates									
16:2+3*	0.3 (0.3)	0.3 (0.4)	0.3 (0.4)	0.3 (0.5)	0.4 (0.5)	0.1 (0.1)	0.1 (0.0)	0.3 (0.0)	0.2 (0.0)
18:2(n-6)	2.2 (0.5)	2.2 (0.5)	2.5 (0.6)	2.2 (0.7)	2.7 (0.5)	2.3 (0.1)	2.2 (0.3)	2.5 (0.3)	1.9 (0.0)
20:2(n-6)	1.8 (2.0)	2.3 (3.2)	2.6 (3.9)	2.6 (4.6)	2.5 (4.3)	Tr	Tr	Tr	Tr
20:3(n-3)	0.5 (0.5)	0.5 (0.5)	0.7 (0.6)	0.6 (0.7)	0.4 (0.5)	0.1 (0.0)	0.1 (0.0)	0.1 (0.0)	0.1 (0.0)
20:4(n-3)	1.9 (0.5)	1.9 (0.4)	2.1 (0.5)	2.3 (0.5)	2.1 (0.4)	1.6 (0.5)	1.8 (0.1)	1.0 (0.0)	1.5 (0.8)
20:5(n-3)	4.3 (1.4)	4.7 (0.9)	5.2 (1.5)	5.9 (2.0)	5.2 (1.6)	2.9 (1.1)	3.3 (0.3)	2.3 (0.4)	3.6 (2.9)
22:2(n-6)	0.6 (0.8)	0.7 (0.9)	0.5 (0.7)	0.2 (0.5)	0.2 (0.4)	-	-	-	-
22:4(n-6)	0.6 (0.6)	0.6 (0.7)	0.6 (0.6)	0.3 (0.6)	0.4 (0.6)	-	-	-	-
22:5(n-3)	3.3 (0.7)	3.7 (0.7)	4.0 (1.1)	4.5 (1.1)	4.2 (1.2)	3.0 (1.9)	3.3 (0.8)	0.9 (0.1)	2.8 (1.9)
22:6(n-3)	4.7 (1.3)	5.5 (1.6)	6.0 (1.7)	6.7 (2.5)	5.9 (2.3)	7.9 (6.3)	8.9 (2.4)	2.0 (0.4)	6.0 (4.9)
ΣPUFA	20.1 (8.7)	22.5 (9.8)	24.4 (11.7)	25.7 (13.7)	24.0 (12.5)	17.9 (10.0)	19.7 (4.1)	9.0 (1.3)	16.1 (10.5)
Σ(n-3) PUFA	14.6	16.4	17.9	19.9	17.8	15.5	17.3	6.2	14.0
Σ(n-6) PUFA	5.2	5.8	6.2	5.4	5.8	2.3	2.2	2.5	1.9
Σ(n-3)/(n-6) PUFA	2.8	2.8	2.9	3.7	3.1	6.7	7.9	2.5	7.4
Total concentration ($\mu\text{g mg}^{-1}$ wet weight)	258.9	276.1	254.6	207.3	148.5	325.8	301.1	262.2	330.2

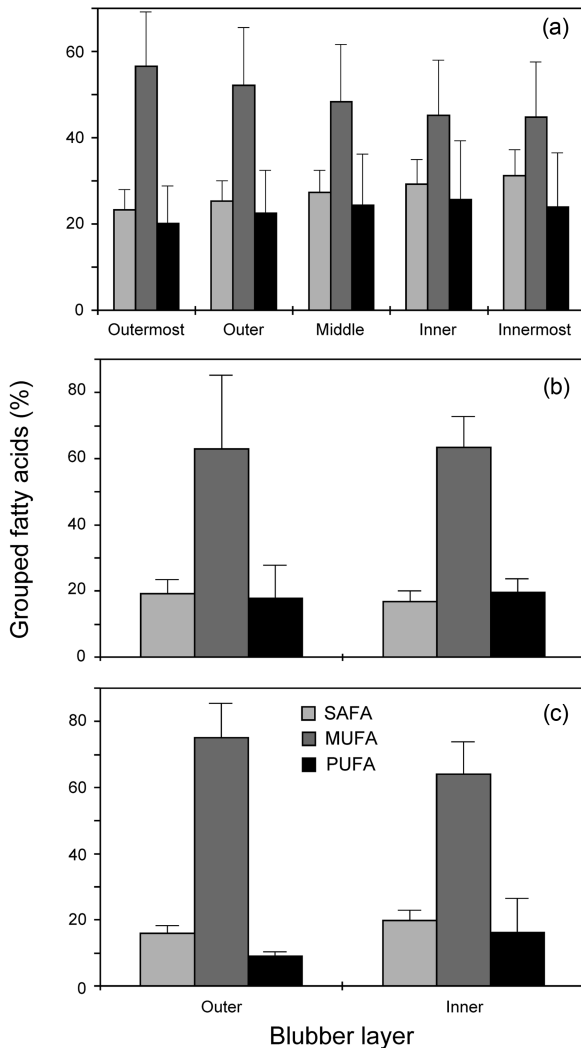


Fig. 3. The relative abundance of grouped fatty acids (saturated, monounsaturated, and polyunsaturated) in blubber layers of minke whale (a), long-beaked common dolphin (b), and Pacific white-sided dolphin (c). Presented mean with one standard deviation

고래의 피하지방보다 다섯층으로 나누어서 분석한 밍크고래의 피하지방에서 더 뚜렷하게 나타났다.

4. 토 의

밍크고래와 참돌고래 피하지방의 지방 함량은 내층(근육쪽)에서 외층(피부쪽)으로 갈수록 증가하였으며, 이러한 결과는 다른 고래류의 피하지방에서 나타나는 층별 지방 함량의 변동성과 유사하였다. 특히 긴수염고래(fin whale; *Balaenoptera physalus*)의 피하지방을 연구한 Ruchonnet et al. (2006)의 결과에 따르면, 피하지방의 외층이 내층에

비해 더 많은 양의 지방을 함유하고 있었다. 외부 환경과 가장 근접한 피하지방의 외층은 열 손실을 줄이기 위해 많은 양의 지방을 저장하는 부위로서 대사 활동이 안정적이지만, 섭취한 먹이가 일차적으로 저장되는 내층은 지방의 변형, 이동, 저장이 일어나기 때문에 외층에 비해서 지방 함량이 낮다(Aguilar and Borrell 1990). 그러나 고래 몸체에서 시료의 부위, 채집시 고래의 생리상태, 고래 종에 따라 외층과 내층의 지방 함량이 다르게 나타났다. 예를 들어, 긴수염고래의 지방 함량은 고래의 등(dorsal) 부분이 가장 높았으며, 이러한 차이는 배(ventral)가 등 부분보다 더 단단하고 탄력성이 강하며, 등 부분은 주로 에너지를 저장하기 때문인 것으로 확인되었다(Lockyer et al. 1984, Ruchonnet et al. 2006). 또한 긴수염고래의 피하지방을 분석한 다른 연구에서는 임신한 암컷의 경우 본 연구의 낫돌고래 지방 함량의 변화와 유사하게 피하지방의 내층이 외층에 비하여 지방 함량이 더 높은 것으로 나타났다(Aguilar and Borrell 1990). 본 연구에서는 피하지방의 대부분이 트리아실글리세롤로 구성되어 있었지만, 다른 연구에서는 피하지방의 지방 class 성분이 다양하게 나타났다. 흰고래(white whale; *Delphinapterus leucas*)의 경우는 트리아실글리세롤이 가장 많았으나 범고래(killer whale; *Orcinus orca*)의 경우에는 피하지방의 외층에서 왁스 에스테르가, 내층에서 트리아실글리세롤의 함량이 가장 높은 것으로 보고되었다(Krahn et al. 2004). 또한 북대서양에서 서식하는 큰돌고래(bottlenose whale; *Hyperoodon ampullatus*) 피하지방에서 가장 우점한 지방은 왁스 에스테르였으며, 내층에서 외층으로 갈수록 트리아실글리세롤의 함량이 점차 증가하는 양상을 보였다(Hooker et al. 2001). 보온과 에너지 저장에 가장 많이 사용되는 지방은 트리아실글리세롤과 왁스 에스테르로서, 고래가 서식하는 해역의 수온과 각 개체군의 생리적 기작에 따라 선택적으로 지방을 저장한다. 특히 왁스 에스테르는 트리아실글리세롤에 비해 녹는점이 낮고 에너지 함량이 높기 때문에 고위도와 같이 수온이 낮은 해역의 해양포유류에서 가장 많이 발견되는 지방의 형태이다(Sargent and Henderson 1986). 이러한 연구를 통해서 서식 해역의 수온과 종에 따라 우점하는 지방 class 성분이 달라진다는 것을 확인하였다. 그러나 본 연구에서는 지방 함량을 제외한 지방 class 구성의 변화가 발견되지는 않았다.

본 연구의 피하지방층별 지방산 구성의 변동성은 Møller et al. (2000)가 149마리의 밍크고래 피하지방을 분석한 결과와 유사하게 나타났다. 해양포유류 피하지방의 지방산을 연구하기 시작한 초기에는 피하지방의 층별 차이를 정확하게 해석할 수 없었지만, Kåkelä et al. (1993)의 연구를 통해 고리무늬물범(ringed seal; *Phoca hispida botnica*)과 회색바다표범(grey seal; *Halichoerus grypus*)의

피하지방에서 내층과 외층의 지방산 구성이 다르다는 사실을 확인하였다. 그 후, 쇠돌고래(harbour porpoise; *Phocoena phocoena*) 피하지방의 지방산 연구를 통해 다른 연구 결과와 유사한 층별 지방산 구성의 변동성을 재확인하였다(Koopman et al. 1996). 하지만 피하지방을 두 층으로만 나누어 분석한 경우, 피하지방층에서의 지방 변형과 축적과정에 대한 자세한 정보를 얻기는 어려웠다.

본 연구에서는 그룹화된 지방산 중에서 16:1(n-7), 18:1(n-9), 18:1(n-7)을 포함한 MUFA의 상대적 구성비가 가장 높았으며, 밍크고래와 닳돌고래의 피하지방에서는 내층에서 외층으로 갈수록 이들 지방산의 상대적 구성비가 점차 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 불포화지방산이 포화지방산에 비해 열 손실을 줄이는데 더욱 효율적이기 때문이다(Fredheim et al. 1995). 그러나 참돌고래에서는 내층과 외층사이의 MUFA 구성비가 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 참돌고래의 층별 분석이 세분화되지 않았기 때문이거나, 분석한 참돌고래 시료 중 2개의 시료가 암컷으로부터 채집되어 임신과 같은 특수한 생리 상태에 따른 결과에서 기인된 것으로도 추측할 수 있다(Aguilar and Borrell 1990). 이밖에 다른 지방산 중, 총 지방산의 4% 이상을 차지하는 지방산으로는 SAFA 중에서 14:0, 16:0, 18:0, PUFA 중에서 20:5(n-3), 22:6(n-3)이 나타났다. SAFA와 PUFA의 상대적 구성비는 MUFA와 달리 외층보다 내층에서 더 높아 그룹화된 지방산 구성비의 뚜렷한 층별 차이를 확인할 수 있었다. MUFA 중에서 22:1(n-9)와 20:1(n-11)의 구성비도 총 지방산의 3% 이상으로 나타났다는데, 이 지방산들은 calanoid 요각류에 의해 주로 합성되는 것으로 알려져 있다(Lee et al. 1971). 또한 20:5(n-3)이나 22:6(n-3)은 동물 체내에서 합성될 수 없고, 해양식물 즉 기초 생산자에 의해서만 합성될 수 있는 것으로 알려져 있다(Sargent and Henderson 1986). 따라서 고래 피하지방에서의 이러한 지방산과 알코올의 검출은 고래가 먹이를 통하여 이들을 직·간접적으로 획득·저장하였을 것으로 판단된다(Samuel and Worthy 2004; Sargent and Henderson 1986). 이밖에도 두건물범(hooded seal; *Cystophora cristata*)의 새끼(Iverson et al. 1995)와 phocid seals(Gurr et al. 2002)을 제외한 다른 해양포유류에서 거의 검출되지 않은 14:1(n-5) (Myristoleic acid)이 밍크고래, 참돌고래, 닳돌고래에서 검출되었으며(총 지방산의 0.1-6.6%), 피하지방 내층보다 외층에서 더 높은 구성비를 보였다. 이는 16:1(n-7) (Palmitoleic acid) 지방산과 함께 지방산의 카르복실기 말단에서부터 9번째 탄소에 이중결합을 만들어주는 9 desaturase가 외층에서 더 활발하게 작용한 결과라고 볼 수 있다(Gurr et al. 2002). 따라서 14:1(n-5)는 쉽게 변형되지 않으며, 대사활동이 활발한 내

층보다 외층에 축적되는 것으로 보인다(Koopman et al. 1996). 또한 피하지방의 지방산 중 (n-3)/(n-6) PUFA 구성비는 계절에 따라 차이를 보이는 것으로 보고되고 있다(Samuel and Worthy 2004). (n-6) PUFA의 농도는 계절적으로 변화가 없는 대신 (n-3) PUFA는 여름보다 겨울에 더 풍부한 것으로 나타났다. 이러한 계절적 변화는 (n-3) PUFA가 (n-6) PUFA보다 수온이 낮은 시기에 해양포유류의 생리작용을 유지하는데 더 유용하기 때문인 것으로 보인다(Olsen 1999). 본 연구에서 (n-3)/(n-6) PUFA의 구성비에 대한 계절적 차이를 확인할 수는 없었지만, 종 간의 차이는 확인할 수 있었다.

모든 해양포유류에서 일반적으로 나타나는 피하지방의 층별 변동성은 지방의 층별 기능과 직접적으로 관련되어 있다(Ackman et al. 1975). 피하지방의 지방은 다양한 기작과 여러 가지 경로를 통해 저장, 축적, 변형되며, 피하지방의 내층과 외층은 다른 생리적 역할을 한다. 단기간의 에너지 저장을 위해 사용되는 내층의 지방은 외층에 비해 섭취한 먹이의 지방 특징을 많이 반영하고 있으나(Ackman et al. 1975), 이와 달리 외층의 지방은 보온, 유영, 부양, 골격 구조를 위한 성분으로 구성되어 있다(Lockyer et al. 1984). 먹이를 통해 섭취된 지방은 일차적으로 내층에 저장된 후, 피하지방의 층별 기능에 따라 필요한 지방의 형태로 변형되어 외층으로 이동하게 된다(Samuel and Worthy 2004). 이밖에도 Pond (1998)는 특정한 지방산 구성이 외부 환경과 가장 근접한 외층에서 골격 구조와 세포막 유동성에 유용하게 사용된다고 발표하였으며, Käkälä and Hyvärinen (1996)은 피하지방에서 나타나는 층별 지방산 구성의 변동은 외부로부터 열 손실을 줄이는데 효율적이라고 보고했다.

국제포경위원회는 한반도 근해에서 상업적 포경뿐만 아니라 연구를 목적으로 하는 과학적인 포경도 금지시켰기 때문에 국내에서 고래에 관한 연구는 매우 제한되어 있으며, 연구를 위한 시료 확보는 흔희 또는 좌초된 고래로부터만 가능하다. 따라서 고래시료를 연구계획(종, 지역, 성별 등)에 따라 선택적으로 확보하기에는 큰 어려움이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서는 새로운 시료채집 방법의 활용과 더 적극적인 연구비의 투자가 필요하다. 예를 들면, 최근에 국외에서는 해양포유류를 희생시키지 않으면서 필요한 피하지방 생체시료를 확보할 수 있는 화살촉과 같이 생긴 biopsy dart를 사용하고 있다.

본 연구를 통해 한국 근해에 서식하는 주요 고래종의 피하지방 내에서 지방 함량 및 구성의 층별 변동성을 파악할 수 있었다. 이러한 연구와 더불어 추가적인 분석(각 지방산의 동위원소비) 및 시료 확보를 통해 고래의 생태학적 위치와 지방 대사과정을 좀 더 정확하게 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

한국 근해에 서식 및 출현하는 밍크고래와 참돌고래는 피하지방층별로 지방 함량과 구성의 차이를 보였다. 특히, 외부 환경과 가장 근접한 외층은 열 손실을 최소화하는데 가장 효율적인 형태의 지방산(MUFA)이 가장 우점하였으나, 먹이를 통해 섭취된 것으로 여겨지는 지방산(PUFA)은 외층에 비해 내층에서 높게 나타났다. 본 연구를 통해 한국 근해에 서식하는 고래들도 피하지방의 층별 기능에 따라 지방 함량과 구성의 차이를 가지며, 선택적으로 지방을 저장, 변형, 이동시키고 있음을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 개인창의과제(PE9841C), 국토해양부 R&D 과제(PM55653), 국립수산과학원 고래연구소 과제(RP-2011-FR-004)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Abrantes K, Sheaves M (2009) Use of a $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ relationship to determine animal trophic positions in a tropical Australian estuarine wetland. *Austral Ecol* **31**:96-103
- Ackman RG, Hingley JH, Eaton CA, Logan VH, Odense PH (1975) Layering and tissue composition in the blubber of the northwest Atlantic sei whale (*Balaenoptera borealis*). *Can J Zool* **53**:1340-1344
- Aguilar A, Borrell A (1990) Patterns of lipid content and stratification in the blubber of fin whales (*Balaenoptera physalus*). *J Mammal* **71**:544-554
- An YR, Kim ZG, Sohn H, Yang WS (2004) By-catch of small cetaceans in the eastern coastal waters of Korea. *J Korean Soc Fish Res* **6**:163-172
- Black NA (2009) Pacific white-sided dolphin. In: Perrin WF, Würsig B, Thewissen JGM (eds) *Encyclopedia of marine mammals*, Second. Elsevier Inc, Canada, pp 817-818
- Bligh EG, Dyer WJ (1959) A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can J Physiol Pharmacol* **37**:911-917
- Bradshaw CJA, Hindell MA, Best NJ, Phillips KL, Wilson G, Nichols PD (2003) You are what you eat: describing the foraging ecology of southern elephant seals (*Mirounga leonina*) using blubber fatty acids. *Proc Roy Soc London B* **270**:1283-1292
- Budge SM, Springer AM, Iverson SJ, Sheffield G, Rosa C (2008) Blubber fatty acid composition of bowhead whales, *Balaena mysticetus*: Implications for diet assessment and ecosystem monitoring. *J Exp Mar Biol Ecol* **359**:40-46
- Destailats F, Angers P (2002) One-step methodology for the synthesis of FA Picolinyl esters from intact lipids. *J Am Oil Chem Soc* **79**:253-256
- Fredheim B, Holen S, Ugland KI, Grahl-Nielsen O (1995) Fatty-acid composition in blubber, heart and brain from phocid seals. *Dev Mar Biol* **4**:153-168
- Gurr MI, Harwood JL, Frayn KN (2002) *Lipid biochemistry*. Blackwell Science, Cornwall, 336 p
- Hooker SK, Iverson SJ, Ostrom P, Smith SC (2001) Diet of northern bottlenose whales inferred from fatty-acid and stable-isotope analyses of biopsy samples. *Can J Zool* **79**:1442-1454
- Iverson SJ (1993) Milk secretion in marine mammals in relation to foraging: can milk fatty acids predict diet? *Symp Zool Soc London* **66**:263-291
- Iverson SJ, Oftedal OT, Bowen WD, Boness DJ, Sampugna J (1995) Prenatal and postnatal transfer of fatty acids from mother to pup in the hooded seal. *J Comp Physiol B* **165**:1-12
- Ju SJ, Kucklick JR, Kozlova T, Harvey HR (1997) Lipid accumulation and fatty acid composition during maturation of three pelagic fish species in Lake Baikal. *J Great Lakes Res* **23**:241-253
- Käkelä R, Hyvärinen H, Vainiotalo P (1993) Fatty acid composition in liver and blubber of the saimaa ringed seal (*Phoca hispida saimensis*) compared with that of the ringed seal (*Phoca hispida botnica*) and grey seal (*Halichoerus grypus*) from the Baltic. *Comp Biochem Physiol B* **105**:553-565
- Käkelä R, Hyvärinen H (1996) Site-specific fatty acid composition in adipose tissues of several northern aquatic and terrestrial mammals. *Comp Biochem Physiol Part B* **115**:501-514
- Koopman HN, Iverson SJ, Gaskin DE (1996) Stratification and age-related differences in blubber fatty acids of the male harbour porpoise (*Phocoena phocoena*). *J Comp Physiol B* **165**:628-639
- Krahn MM, Herman DP, Ylitalo GM, Sloan CA, Burrows DG, Hobbs RC, Mahoney BA, Yanagida GK, Calambokidis J, Moore SE (2004) Stratification of lipids, fatty acids and organochlorine contaminants in blubber of white whales and killer whales. *J Cetacean Res Manage* **6**:175-189
- Lee RF, Nevenwel JC, Paffenhoefer GA (1971) Importance of wax esters and other lipids in the marine food chain:

- phytoplankton and copepods. *Mar Biol* **9**:99-108
- Lockyer C (1976) Body weights of some species of large whales. *J Cons Int Explor Mer* **36**:259-273
- Lockyer CH, McConnell LC, Waters TD (1984) The biochemical composition of fin whale blubber. *Can J Zool* **62**:2553-2562
- Møller P, Born EW, Dietz R, Ruzzante D, Haug T, Øien N (2000) Differences in fatty acid composition of blubber in minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) from Greenland, the NE Atlantic Ocean and the North Sea, 1998. In: Pare SC/52/AS9 presented to the IWC Scientific Committee, June 2000, Adelaide, Australia
- Moon HB, Choi HG, An YR, Park GJ, Choi SG, Moon DY, Kannan K (2010a) Contamination status and accumulation features of PCDDs, PCDFs and dioxin-like PCBs in finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides*) from Korean coastal waters. *J Hazard Mater* **183**:799-805
- Moon HB, Kannan K, Choi HG, An YR, Choi SG, Park JY, Kim ZG (2010b) Concentrations and accumulation features of PCDDs, PCDFs and dioxin-like PCBs in cetaceans from Korean coastal waters. *Chemosphere* **79**:733-739
- Moon HB, Kannan K, Choi M, Yu J, Choi HG, An YR, Choi SG, Park JY, Kim ZG (2010c) Chlorinated and brominated contaminants including PCBs and PBDEs in minke whales and common dolphins from Korean coastal waters. *J Hazard Mater* **179**:735-741
- Moon HB, Kannan K, Yun S, An YR, Choi SG, Park JY, Kim ZG, Choi HG (2010d) Perfluorinated compounds in minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) and common dolphins (*Delphinus capensis*) from Korean coastal waters. *Mar Pollut Bull* **60**:1130-1135
- Newland C, Field IC, Nichols PD, Bradshaw CJA, Hindell MA (2009) Blubber fatty acid profiles indicate dietary resource partitioning between adult and juvenile southern elephant seals. *Mar Ecol Prog Ser* **384**:303-312
- NFRDI (2000) Whales and Dolphins off Korean Peninsula. Hanguel & Graphics, Busan, 130 p (In Korean)
- Ohsumi S, Masaki Y, Kawamura A (1970) Stock of the Antarctic minke whale. *Sci Rep Whales Res Inst* **22**:75-126
- Olsen Y (1999) Lipids and essential fatty acids in aquatic food webs: what can freshwater ecologists learn from mariculture? In: Arts MT and Wainman BC (eds) *Lipids in freshwater ecosystems*. Springer-Verlag Inc, New York, pp 167-173
- Olsen E, Grahl-Nielsen O (2003) Blubber fatty acids of minke whales: stratification, population identification and relation to diet. *Mar Biol* **142**:13-24
- Park BK, Park GJ, An YR, Choi HG, Kim GB, Moon HB (2010a) Organohalogen contaminants in finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides*) from Korean coastal waters: contamination status, maternal transfer and ecotoxicological implications. *Mar Pollut Bull* **60**:768-774
- Park JY, Kim JH, An YR, Kim MJ, Lee WS, An CM, Jung JW, Kang JH, Moon HB, Hwang SY (2010b) A DNA microarray for species identification of cetacean animals in Korean water. *BioChip J* **4**:197-203
- Park KJ, Zhang CI, Kim ZG, Sohn H (2002) Feeding habits and trophic level of finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides* in the Yellow Sea. *J Korean Soc Fish Res* **5**:52-63 (In Korean)
- Pond C (1998) *The fats of life*. Cambridge university press, Cambridge, 20 p
- Ruchonnet D, Boutoute M, Guinet C, Mayzaud P (2006) Fatty acid composition of mediterranean fin whale *Balaenoptera physalus* blubber with respect to body heterogeneity and trophic interaction. *Mar Ecol Prog Ser* **311**:165-174
- Ryg M, Smith TG, Øritsland NA (1988) Thermal significance of the topographical distribution of blubber in ringed seals (*Phoca hispida*). *Can J Fish Aquat Sci* **45**:985-992
- Samuel AM, Worthy GAJ (2004) Variability in fatty acid composition of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) blubber as a function of body site, season, and reproductive state. *Can J Zool* **82**:1933-1942
- Sargent JR, Henderson RJ (1986) Lipids. In: Corner EDS and O'Hara SCM (eds) *The biological chemistry of marine copepods*, Clarendon Press, London, pp 59-108
- Skaug HJ, Gjosæter H, Haug T, Nilssen KT, Lindstrøm U (1997) Do minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) exhibit particular prey preferences? *J Northw Atl Fish Sci* **22**:91-104
- Smith HR, Worthy GAJ (2006) Stratification and intra- and inter-specific differences in fatty acid composition of common dolphin (*Delphinus* sp.) blubber: implication for dietary analysis. *Comp Biochem Physiol B* **143**:486-499
- Worthy GAJ, Edwards EF (1990) Morphometric and biochemical factors affecting heat loss in a small temperate cetacean (*Phocoena phocoena*) and a small tropical cetacean (*Stenella attenuata*). *Physiol Zool* **63**:432-442

Received Oct. 19, 2010

Revised Dec. 23, 2010

Accepted Jan. 13, 2011