

Line Transect에서 발견율함수 추정에 사용되는 모델에 따른 상괘이, *Neophocaena phocaenoides*의 자원개체수 추정

박겸준* · 김장근 · 장창익¹
국립수산과학원 고래연구소, ¹부경대학교

Abundance Estimation of the Finless Porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, Using Models of the Detection Function in a Line Transect

Kyum Joon PARK*, Zang Geun KIM and Chang Ik ZHANG¹

Cetacean Research Institute, 139-29 Maeam-Dong, Nam-Gu, Ulsan 680-050, Korea

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

Line transect sampling in a sighting survey is one of most widely used methods for assessing animal abundance. This study applied distance data, collected from three sighting surveys using line transects for finless porpoise that were conducted in 2004 and 2005 off the west coast of Korea, to four models (hazard-rate, uniform, half-normal and exponential) that can use a variety of detection functions, $g(x)$. The hazard-rate model, a derived model for the detection function, should have a shoulder condition chosen using the AIC (Akaike Information Criterion), as the most suitable model. However, it did not describe a shoulder shape for the value of $g(x)$ near the track line and underestimated $g(x)$, just as the exponential model did. The hazard-rate model showed a bias toward overestimating the densities of finless porpoises with a higher coefficient of variation (CV) than the other models did. The uniform model underestimated the densities of finless porpoise, but had the lowest CV. The half-normal model described a detection function with a shape similar to that of the uniform model. The half-normal model was robust for finless porpoise data and should be able to avoid density underestimation. The estimated abundance of finless porpoise was 3,602 individuals (95% CI=1,251-10,371) inshore in 2005 and 33,045 individuals (95% CI=24,274-44,985) offshore in 2004.

Key words: Line transect, Hazard-rate model, Uniform model, Half-normal model, Exponential model, Finless porpoise

서론

목시조사는 한 조사지역에 동물이나 식물의 개체군 밀도를 추정하는데 있어서 아주 효과적인 방법의 하나로, 고래류에 있어서 자원량과 자원의 동태를 파악하는데 필수적인 요소이다. 목시조사는 조사지역을 조사라인으로 설계해서 조사하는 line transect 방법과 정점으로 설계해서 조사하는 point transect 방법이 있다. line transect 방법은 1930년대에 개발되어 먼저 시작되었으며 최근에도 많이 쓰이고 있다. 초기에는 단순히 조사라인을 따라 발견된 개체수만 기록하였으나, Leopold (1933)는 동물의 평균발견거리를 기록하여 유효조사면적의 개념의 시초가 되었으며, Eberhardt (1968)는 거리가 멀어질수록 발견율이 감소하며 발견율 함수의 변화패턴이 조사마다 다르다고 하고 1개의 변수를 가진 보다 탄력적인 모델을 소개하였다. Burnham and Anderson (1976)은 line transect 방법에서 밀도는 $D = n \cdot f(0) / 2L$ 이라는 식을 만들고 $f(0)$ 는 거리표집 자료로부터 구할 수 있다고 하였는데, 이 연구는 line transect 방법에 있어 다른 연구자들에게 많은 통계학적 연구를 유발시

켰다 (Eberhart, 1978; Seber, 1979; Quinn and Gallucci, 1980).

목시조사의 여러 가정을 잘 적용시켜 Buckland (1985)가 Hazard-rate 모델을 제안한 이후 팔목할 만한 새로운 이론은 등장하지 않았으며, 개발된 모델을 컴퓨터를 통해 추정하고 통계값을 산출할 수 있는 프로그램이 개발되어왔다 (Buckland et al., 1993).

Hammond and Laake (1984)는 태평양 동부 열대지역에서 향고래의 밀도를 추정하였고 Buckland (1987a)는 Hazard-rate 모델을 사용하여 남극 밍크고래의 자원량을 추정하였으며, Schweder et al. (1991)은 대서양에서 밍크고래의 자원량을 추정하는 등 line transect 방법을 사용한 목시조사가 고래류의 자원량과 동태를 추정하기 위해 많이 사용되었다. 특히 Hazard-rate 모델은 국제포경위원회 (IWC: International Whaling Commission)에서 가장 적합한 모델로 선정되어 대부분의 목시조사에서 발견율 함수를 추정하기 위해 이 모델을 사용하고 있다 (Buckland, 1987b).

최근에 line transect 방법을 사용한 목시조사에서 수집된 자료를 Hazard-rate 모델에 일괄적으로 적용하는데 문제점을 지적하는 연구들이 수행되었다. 그 예로, Zhang (2001)은 거리 표집자료가 Hazard-rate 모델에서 일반적으로 표현하는 조사

*Corresponding author: mogas@hanmail.net

라인으로부터 일정구간 발견율이 평행한 형태를 보이지 않을 때의 추정방법에 대해 논하였고, Melville and Welsh (2001)는 Hazard-rate 모델에 의한 추정값을 컴퓨터 시뮬레이션과 비교하여 이 모델이 문제점이 있다고 지적하였다. Fewster et al. (2005)은 Melville and Welsh (2001)의 연구에서 Hazard-rate 모델을 적용하는데 문제점이 있음을 지적하였다.

우리나라에서도 고래류의 자원량을 파악하기 위해 line transect 방법을 사용한 목시조사가 수행되었다. Sohn et al. (2001)은 2001년 밍크고래의 자원개체수를 추정하기 위한 목시조사에서 수집된 거리표집 자료가 Half-normal 모델에 적합한 모델인 것으로 추정하였으나 IWC에서 Hazard-rate 모델을 권장하기 때문에 두 모델에 의해 추정된 자원개체수를 각각 제시하였다. Zhang et al. (2004)은 상괭이의 자원개체수를 추정하는데 Hazard-rate 모델과 Uniform 모델을 사용하였다. 그러나 이러한 연구는 Hazard-rate 모델의 비중이 컸으며, 사용되고 있는 각 발견율함수 모델들이 우리나라 연안에 분포하는 고래류의 거리표집 자료에 어떤 특성을 갖는지에 대한 연구가 전무하다.

따라서, 본 논문에서는 2004년과 2005년에 우리나라 서해에서 수행된 line transect 방법을 이용한 목시조사에서 수집된 상괭이 거리표집 자료를 Hazard-rate 모델을 포함한 4가지 모델 (Buckland et al., 1993)에 적용하여 모델의 특성에 대하여 논하였으며, Zhang et al. (2004)의 연구 이후 최근 상괭이의 자원개체수를 추정하였다. 또한, line transect 방법을 사용한 목시조사에서 자원개체수의 과소 또는 과대추정의 위험을 피하기 위해서 모델 선택시 고려해야 할 사항들을 제시하였다.

자료 및 방법

자 료

본 연구에 사용된 자료는 2004년 우리나라 서해 연안과 근해에서 각각 수행된 상괭이 목시조사와 2005년 우리나라 서해 연안에서 수행된 상괭이 목시조사를 통해 수집되었다. 연안조사에서는 국립수산과학원 소속의 시험조사선 탐구 18호 (69 G/T)를 사용하여 위도 35°17'-37°20'N, 경도 126°00'-126°25'E 사이의 해역을 조사하였으며, 근해조사에서는 시험조사선 탐구 3호를 사용하여 위도 33°00'-37°30'N, 경도 126°00'-122°00'E 사이의 해역을 조사하였다. 조사지역에 설계된 조사라인을 따라 항해하면서 관찰자가 상괭이를 발견하면 상괭이와의 거리와 각도를 기록하였다.

각 목시조사 노력량과 시료수는 Table 1과 같다. 2004년에

근해에서 3,331.2 km를 조사하여 70개 군의 상괭이를 발견하였으며, 2004년 연안에서는 577.1 km를 조사해 46개 군을 발견하였다. 2005년에는 446.7 km를 조사하여 28개 군의 상괭이를 발견하였다 (NFRDI, 2004; NFRDI, 2005).

Line transect 방법

Line transect 방법에 따른 목시조사의 설계는 조사지역을 조사라인이 겹치지 않도록 길이(L)와 폭(2w)의 조사라인으로 조사지역을 나누는 방법으로 조사라인을 설정하고, 관찰자는 이 조사라인을 따라 이동하며 발견된 목표종의 거리와 각도를 이용해 수직거리를 계산하였다. 목시조사는 관찰자와의 거리에 따라서 바뀌는 개체 또는 무리 발견확률을 기초로 하고 있으며, 기본적으로 다음과 같은 가정하에 조사를 실시하였다.

1. 목표종은 무작위 분포하며 독립적이다.
2. 조사라인 위의 목표 종은 항상 발견된다.
3. 목표종은 관찰자가 접근하기 전에 있던 위치에서 발견된다.
4. 목표종과의 수직거리는 정밀하게 측정되었으며, 조사라인에 가까울 때 더욱 정밀하다.
5. 모든 목표종은 한번만 계수된다.

밀도(D)를 추정하는 방법은 식 1과 같다.

$$D = \frac{nf(0)}{2L} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 n은 발견된 목표종의 수, f(0)는 거리 0에서의 확률 밀도함수, L은 총 조사거리이다.

조사라인으로부터 수직거리 x까지의 확률밀도함수 f(x)는 식 2와 같다.

$$f(x) = \frac{g(x)}{\int_0^w g(x)dx} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 w는 조사 폭, g(0)=1로 가정하고 거리 0에서의 확률 밀도함수 f(0)는 식 3과 같으며,

$$f(0) = \frac{1}{\int_0^w g(x)dx}$$

따라서 f(0)가 추정되었을 때, 유효조사넓이 (Effective survey width : ESW)는 다음과 같다 (Burnham et al., 1980).

$$ESW = \frac{1}{f(0)} \dots\dots\dots(4)$$

Table 1. Summary of survey effort and results of sightings for the finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, in the WCOK (2004) and the WCIK (2004 and 2005)

	Offshore 2004	Inshore 2004	Inshore 2005
Survey area	116,870.5 km ²	7,357.1 km ²	5,642.2 km ²
Survey effort	3,331.2 km	577.1 km	446.7 km
Number sighted	70	48	28

WCOK, Offshore of the west coast of Korea; WCIK, Inshore of the west coast of Korea.

모 델

발견율함수 추정에 사용된 모델은 Uniform 모델 (식 5), Half-normal 모델 (식 6), Hazard-rate 모델 (식 7), Exponential 모델 (식 8) 이다.

Uniform 모델 : 1/w(5)

여기서 w는 목표종이 발견된 가장 원거리.

Half-normal 모델 : exp(-x^2/2σ^2)(6)

여기서 x^2=수직거리의 제곱, σ^2 = ∑_{i=1}^n x_i^2/n,

Hazard-rate 모델 : 1 - exp(1(x/σ)^-b)(7)

여기서 b는 형태 파라미터, σ는 단위 파라미터.

Exponential 모델 : exp(-x)(8)

모델의 유연성을 높이기 위해 기본 함수에 적용할 수 있는 보정항으로 다음 3가지를 사용했다 (Stuart and Ord 1987).

Cosine, ∑_{j=1}^m a_j cos(jπx/w)

Simple polynomial, ∑_{j=1}^m a_j (x/w)^{2j}

Hermit polynomial, ∑_{j=2}^m a_j H_{2j}(x_s)

따라서 발견율함수를 추정하기 위한 모델의 기본형태는 4가지 모델을 기본함수로 하고, 3가지 보정항을 추가하여 g(x) = key(x)[1 + series(x)]와 같으며, 기본함수와 보정항의 선택은 모델선택은 Akaike's Information Criterion (AIC)와 χ^2 적합도 검정 두 가지 방법을 사용하였다. AIC는 식 9와 같이 계산하였고, AIC 추정값이 가장 낮은 모델을 선택하였으며, χ^2 적합도 검정은 식 10을 사용하였다.

AIC = -2log_e(L) + 2q(9)

여기서 log_e(L)는 maximum likelihood값에서 log-likelihood 값이며, q는 모델에서 파라미터의 숫자이다 (Akaike, 1985).

χ^2 = ∑_{i=1}^u [n_i - E(n_i)]^2 / E(n_i)(10)

여기서 n_i는 관찰된 빈도, E(n_i)는 모델에 의해 추정된 빈도. 이상거리와 원거리에 있는 관찰값이 분석결과에는 큰 영향이 없으나 분산을 크게 하기 때문에 원거리로부터 5%의 자료를 절삭하고 추정한 결과와 자료를 절삭하지 않고 추정한 결과를 비교하였다 (Buckland et al., 1993).

자원개체수 추정

상괭이의 자원개체수 (N)는 모델별로 추정된 확률밀도함수의 f(0)값을 식 11에 대입하여 추정하였으며 분산 var(N)은

델타 방법을 사용하여 식 12와 같이 추정하였다 (Seber, 1982).

N = (n * f(0) * s-bar * A) / (2 * L)(11)

var(N) = N^2 * [var(2n)/n^2 + var{f(0)}/f(0)^2 + var(s-bar)/s^2] (12)

여기서 n=목시회수, s-bar=군의 평균 크기, A=조사해역 면적 (km^2), L=총 조사거리 (km)이다.

모델별 파라미터와 통계값, 밀도, 자원량 추정은 컴퓨터 프로그램 DISTANCE Ver. 4.1을 사용하였다 (Thomas et al., 2003)

결 과

모델 선택

각 모델에 따른 AIC와 χ^2-p 값은 Table 2와 같다. 2005년 연안조사 자료의 경우, Hazard-rate 모델에서 Hermite 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC가 276.7과 257.3로 가장 작았으며 χ^2-p 도 0.713과 0.778로 가장 컸다. Uniform 모델에서 Cosine 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC가 310.7과 286.6으로 가장 작았으며 χ^2-p 도 0.104과 0.033으로 가장 컸다. Half-normal 모델에서도 Cosine 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC가 307.6과 285.0으로 가장 작았으며 χ^2-p 도 0.228과 0.042로 가장 컸다. Exponential 모델에서는 Cosine 보정항과 Simple polynomial 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 같은 AIC값인 292.1과 271.6으로 가장 작았으나 χ^2-p 값은 Hermite polynomials 보정항이 0.358과 0.090으로 가장 컸다.

2004년 연안조사 자료의 경우, Hazard-rate 모델에서 Simple polynomial 보정항과 Hermite polynomial 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 같은 AIC값인 480.3과 441.7로 가장 작았으나 절삭자료에서 χ^2-p 는 Cosine 보정항이 0.355로 가장 컸다. Uniform 모델에서 Cosine 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC가 506.4와 457.3으로 가장 작았으며 χ^2-p 도 0.004와 0.206으로 가장 컸다. Half-normal 모델에서도 Cosine 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC가 504.4와 457.7로 가장 작았으며 χ^2-p 도 0.012와 0.355로 가장 컸다. Exponential 모델에서는 Simple polynomial 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC가 486.1과 448.1로 가장 작았으며 χ^2-p 도 Simple polynomial 보정항이 0.134와 0.806으로 가장 컸다.

2004년 근해조사 자료의 경우, Hazard-rate 모델에서 Cosine 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC값이 814.9와 724.8로 가장 작았으며 χ^2-p 도 0.177과 0.137로 가장 컸다. Uniform 모델에서도 Cosine 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC가 835.7과 729.3으로 가장 작았으며 절삭자료에서도 χ^2-p 가 0.090으로 가장 컸다. Half-normal 모델에서도 Cosine 보정항이 비절사자료와 절삭자료에서 모두 AIC가

Table 2. Comparison of AIC (Akaike Information Criterion) and goodness of fit χ^2 test probability values calculated by model function for describing frequency distributions of distance for sighting the finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, in the west coast of Korea

Model (key + adjustment)		Not truncated		5% truncated	
		AIC	Chi-p	AIC	Chi-p
Inshore 2005					
Hazard-rate	Cosine	279.0	0.474	260.1	0.192
	Simple	279.0	0.474	260.1	0.192
	Hermite	276.7	0.713	257.3	0.778
Uniform	Cosine	310.7	0.104	286.6	0.033
	Simple	316.5	0.003	293.2	0.003
	Hermite	327.1	0.000	302.3	0.000
Half-normal	Cosine	307.6	0.228	285.0	0.042
	Simple	314.7	0.015	291.6	0.007
	Hermite	317.3	0.004	296.6	0.000
Exponential	Cosine	292.1	0.339	271.6	0.075
	Simple	292.1	0.339	271.6	0.075
	Hermite	293.8	0.358	272.1	0.090
Inshore 2004					
Hazard-rate	Cosine	504.4	0.012	457.7	0.355
	Simple	480.3	0.022	441.7	0.061
	Hermite	480.3	0.022	441.7	0.061
Uniform	Cosine	506.4	0.004	457.3	0.206
	Simple	510.1	0.000	468.5	0.003
	Hermite	516.2	0.000	468.5	0.003
Half-normal	Cosine	504.4	0.012	457.7	0.355
	Simple	507.3	0.004	462.8	0.104
	Hermite	507.3	0.004	467.0	0.014
Exponential	Cosine	493.3	0.089	456.2	0.186
	Simple	486.1	0.134	448.1	0.806
	Hermite	492.6	0.073	455.2	0.206
Offshore 2004					
Hazard-rate	Cosine	814.9	0.177	724.8	0.137
	Simple	818.9	0.165	729.7	0.125
	Hermite	816.6	0.152	728.2	0.131
Uniform	Cosine	835.7	0.000	729.3	0.090
	Simple	858.5	0.000	731.4	0.034
	Hermite	915.9	0.000	740.3	0.001
Half-normal	Cosine	827.1	0.026	728.5	0.074
	Simple	832.8	0.003	730.1	0.052
	Hermite	841.3	0.004	737.9	0.003
Exponential	Cosine	813.9	0.484	727.9	0.082
	Simple	834.9	0.321	733.9	0.079
	Hermite	830.2	0.368	729.9	0.081

827.1과 728.5으로 가장 작았으며 χ^2 -p 도 0.026과 0.074로 가장 컸다. Exponential 모델에서도 Cosine 보정항이 비절사자료와 절사자료에서 모두 AIC가 813.9와 727.9로 가장 작았으며 χ^2 -p 도 0.484와 0.082로 가장 컸다.

발견율함수

AIC값을 기준으로 보정항을 선택하여 각 모델에 거리표집 자료를 적용시킨 결과, 각 조사별 모델에 따른 발견율함수의

변화는 Figs. 1, 2, 3과 같다.

2005년 연안조사에서 조사라인으로부터 가장 가까운 거리에서 발견된 그룹의 발견율 [g(group 1)]은 Uniform 모델이 1.04로 가장 높았고, Hazard-rate 모델이 0.18로 가장 낮았다 (Fig. 1). 2004년 연안조사의 경우도 조사라인으로부터 가장 가까운 거리에서 발견된 그룹의 발견율 [g(group 1)]은 Uniform 모델이 1.17로 가장 높았고, Hazard-rate 모델이 0.25로 가장 낮았다 (Fig. 2). 2004년 근해조사에서도 조사라인으로부터 가장 가까운 거리에서 발견된 그룹의 발견율 [g(group 1)]이 Uniform 모델이 1.11로 가장 높았지만 Exponential 모델이 0.52로 가장 낮았다 (Fig. 3).

확률밀도함수

각 모델의 발견율변화에 따른 추정된 확률밀도함수 f(0)와

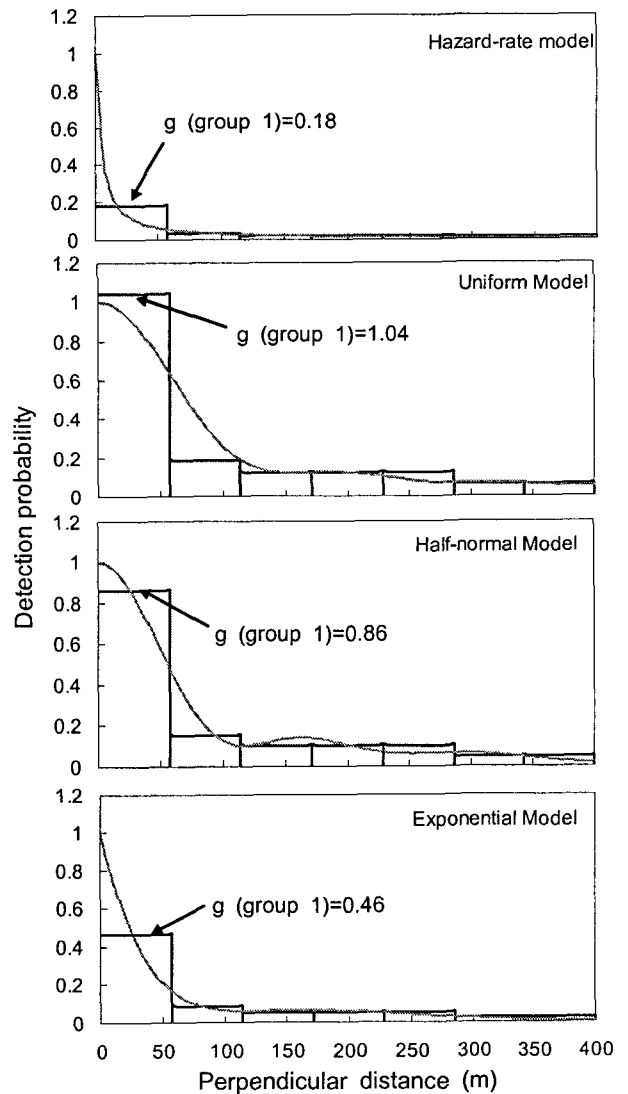


Fig. 1. The model fitting curves for finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, around inshore of the west coast of Korea in 2005.

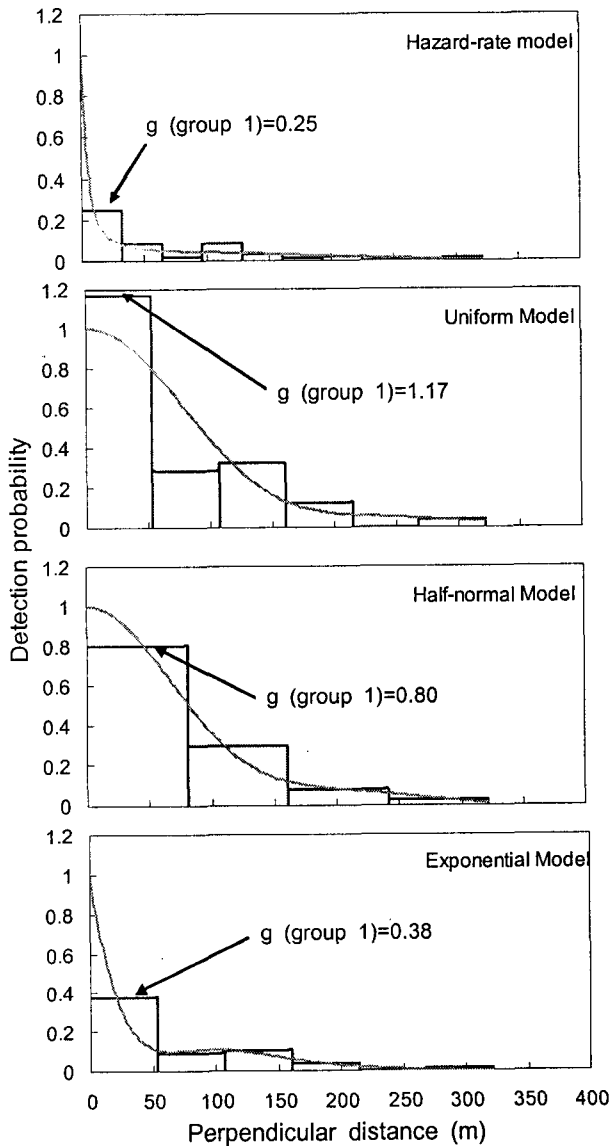


Fig. 2. The model fitting curves for finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, around inshore of the west coast of Korea in 2004.

조사넓이 w 내에서의 발견율 P 는 Table 3과 같다. 모든 조사자료에서 Hazard-rate 모델이 추정된 확률밀도함수 값이 가장 높았는데 2005년 연안조사에서 0.058 (절삭자료의 경우: 0.071), 2004년 연안조사에서 0.061 (절삭자료의 경우: 0.080), 2004년 근해조사에서 0.011 (절삭자료의 경우: 0.014)로 추정되었다. 그 다음으로 Exponential 모델이 2005년 연안조사에서 0.023 (절삭자료의 경우: 0.029), 2004년 연안조사에서 0.030 (절삭자료의 경우: 0.032), 2004년 근해조사에서 0.009 (절삭자료의 경우: 0.010)로 높은 값을 추정하였다.

조사넓이 w 내에서의 발견율 P 는 2005년 연안조사 자료와 2004년 연안조사 자료의 경우, Uniform 모델에서 추정된 값 (절삭자료의 경우)이 0.24 (0.25)와 0.32 (0.32)로 가장 높았고,

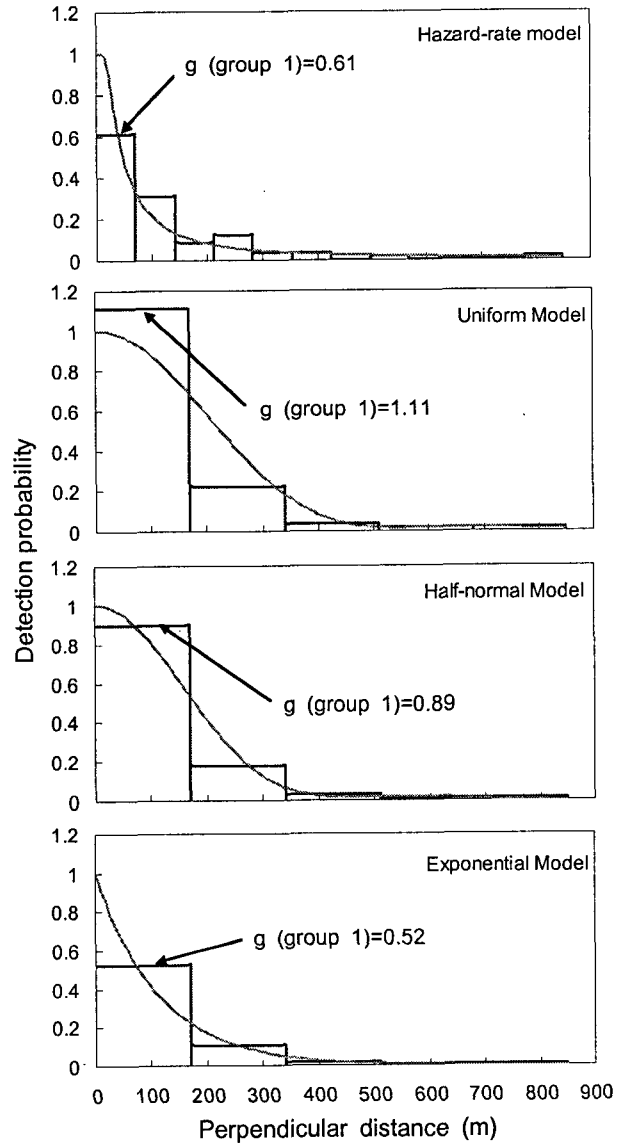


Fig. 3. The model fitting curves for finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, around offshore of the west coast of Korea in 2004.

2004년 근해조사 자료에서는 Half-normal 모델에서 추정된 값이 0.28 (0.37)로 가장 높았다 (Table 3).

밀도

각 조사별 모델에 따른 밀도와 변동계수는 Table 4와 같다. 2005년 연안조사의 경우, 비절삭 자료에서 Hazard-rate 모델에서 추정된 밀도가 2.771 ind./km²로 가장 높았고 Uniform 모델이 0.512 ind./km²로 가장 낮았다. 절삭 자료에서도 Hazard-rate 모델에서 추정된 밀도가 3.212 ind./km²로 가장 높았고 Uniform 모델이 0.634 ind./km²로 가장 낮았다. 변동계수 (cv)는 밀도 추정값이 가장 높은 Hazard-rate 모델에서 0.725로 가장 높았고 Half-normal 모델에서 0.548로 가장 낮았으며,

Table 3. Comparison of probability density function $f(0)$ and detection probability values P calculated by model function for describing frequency distributions of distance for sighting the finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, in the west coast of Korea

Model (key + adjustment)	Not truncated			5% truncated		
	$f(0)$	ESW (m)	P	$f(0)$	ESW (m)	P
Inshore 2005						
Hazard-rate + hermite	0.058	17.24	0.04	0.071	14.08	0.05
Uniform + cosine	0.010	100.00	0.24	0.013	76.92	0.25
Half-normal + cosine	0.012	83.33	0.20	0.014	71.42	0.25
Exponential + cosine or simple	0.023	43.47	0.11	0.029	34.48	0.12
Inshore 2004						
Hazard-rate + simple or hermite	0.062	16.13	0.05	0.101	9.90	0.05
Uniform + cosine	0.010	100.00	0.32	0.016	62.50	0.32
Half-normal + cosine	0.010	100.00	0.30	0.018	55.56	0.29
Exponential + simple	0.032	31.25	0.10	0.032	31.25	0.16
Offshore 2004						
Hazard-rate + cosine	0.011	90.91	0.10	0.014	71.43	0.24
Uniform + cosine	0.005	200.00	0.23	0.009	111.11	0.37
Half-normal + cosine	0.004	250.00	0.28	0.009	111.11	0.37
Exponential + cosine	0.009	111.11	0.13	0.010	100.00	0.33

절삭 자료에서도 Hazard-rate 모델에서 0.781로 가장 높았고 Uniform 모델에서 0.546으로 가장 낮았다.

2004년 연안조사의 경우, 비절삭 자료와 절삭 자료에서 모두 Hazard-rate 모델이 각각 4.212 ind./km²와 6.476 ind./km²로 가장 높은 밀도값을 추정하였고, 변동계수도 각각 0.402와 0.480으로 가장 높았다. 그 다음으로 Exponential 모델이 비절삭 자료와 절삭 자료에서 각각 2.135 ind./km²와 2.171 ind./km²로 높게 추정하였으며 변동계수 또한 각각 0.241과 0.258로 Hazard-rate 모델 다음으로 높았다 (Table 4).

2004년 근해조사에서도 마찬가지로 비절삭 자료와 절삭 자료에서 모두 Hazard-rate 모델이 각각 1.584 ind./km²와 1.853 ind./km²로 가장 높게 추정하였고, 변동계수도 각각 0.235, 0.386으로 가장 높았다. 그 다음으로 Exponential 모델이 1.204 ind./km²와 1.294 ind./km²로 두 번째로 높았으며 변동계수도 각각 0.160과 0.184로 Hazard-rate 모델 다음으로 높았다. 2004년 근해조사에서 Half-normal 모델이 절삭된 자료에서 가장 낮은 밀도를 추정한 것을 제외하고 가장 낮은 밀도를 추정한 모델은 Uniform 모델이었다 (Table 4).

자원개체수

2005년 연안조사에서 모델별로 추정된 상괭이의 자원개체수와 95% 신뢰구간 (CI)은 Fig. 4와 같다. 자료를 절삭한 Hazard-rate 모델에서 18,124 (95%CI: 4,515-72,757)마리로 가장 많은 자원개체수가 추정되었고, 그 다음으로 절삭되지 않은 Hazard-rate 모델, 절삭된 Exponential 모델 순이었다. 가장 작게 추정한 모델은 Uniform 모델로 2,888 (95%CI: 995-8,387)마리로 추정되었다. 모든 모델이 자료를 절삭하여 분석하였을 때 절삭을 하지 않았을 때보다 높은 자원개체수가 추정되었다.

2004년 연안조사에서도 마찬가지로 가장 많은 자원개체수

를 추정한 모델은 Hazard-rate 모델이었다. 자료를 절삭한 Hazard-rate 모델에서 47,644 (95%CI: 19,061-119,090)마리로 추정되었고, 자료를 절삭하지 않은 Hazard-rate 모델에서 30,991 (95%CI: 14,224-67,523)마리, 자료를 절삭한 Exponential 모델에서 15,976 (95%CI: 9,612-26,554)마리 순으로 높게 추정되었다. 가장 적은 자원개체수를 추정한 모델은 5,136 (95%CI: 3,487-7,565)마리를 추정한 Uniform 모델이었다. 2005년과 마찬가지로 모든 모델이 절삭자료의 자원개체수가 비절삭자료의 자원개체수보다 높게 추정되었다 (Fig. 5).

2004년 근해조사에서 자료를 절삭한 Hazard-rate 모델에서 가장 많은 자원개체수인 108,286 (95%CI: 51,514-227,627)마리가 추정되었고, 그 다음으로 자료를 절삭하지 않은 Hazard-rate 모델에서 92,550 (95%CI: 58,346-146,805)마리, 절삭한 Exponential 모델에서 75,641 (95%CI: 52,634-108,703)마리 순이었다. 절삭하지 않은 Half-normal 모델에서 가장 적은 33,045 (95%CI: 24,274-44,985)마리가 추정되었다 (Fig. 6).

고찰

AIC는 목시조사자료에서 수집된 거리표집 자료에 맞는 모델을 선택하는데 일반적으로 사용되는 통계값이다 (Buckland et al., 1993). 2005년과 2004년에 수행된 상괭이 목시조사자료를 각 모델에 적용했을 때 AIC를 기준으로 선택된 모델의 형태는 Table 3에서처럼 2005년 연안조사에서 Hazard-rate + hermite polynomial 모델과 2004년 연안조사에서 Hazard-rate + simple 또는 hermite polynomial 모델과 Exponential + simple polynomial 모델이 선택된 것을 제외하고 기본함수 + cosine 보정항이 가장 적합하였다. 모든 조사에서 공동적으로 Hazard-rate 모델을 기본항으로 한 모델의 AIC가 가장 낮았다. 따라서 AIC를 기준으로 모든 모델에서 Hazard-rate 모델이

Table 4. Summary of estimated density D and coefficient of variation CV for two truncation values w for describing frequency distributions of distance for sighting the finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, in the west coast of Korea

Model (key + adjustment)	Not truncated		5% truncated	
	D (ind./km ²)	CV	D (ind./km ²)	CV
Inshore 2005				
Hazard-rate + Hermite	2.771	0.725	3.212	0.781
Uniform + cosine	0.512	0.552	0.634	0.546
Half-normal + cosine	0.608	0.548	0.638	0.547
Exponential + cosine or simple	1.080	0.554	1.271	0.557
Inshore 2004				
Hazard-rate + simple or hermite	4.212	0.402	6.476	0.480
Uniform + cosine	0.698	0.197	1.118	0.241
Half-normal + cosine	0.756	0.197	1.247	0.235
Exponential + simple	2.135	0.241	2.171	0.258
Offshore 2004				
Hazard-rate + cosine	1.584	0.235	1.853	0.386
Uniform + cosine	0.565	0.157	1.167	0.179
Half-normal + cosine	0.702	0.139	1.161	0.181
Exponential + cosine	1.204	0.160	1.294	0.184

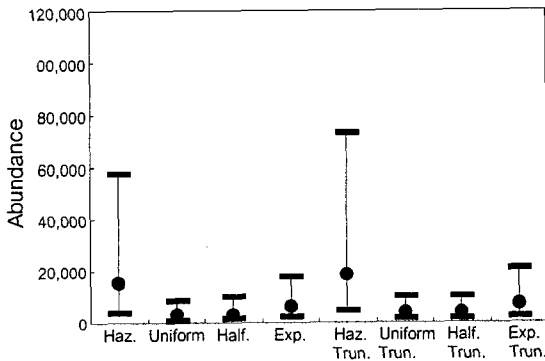


Fig. 4. Abundance estimates and 95% confidence interval for sighting the finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, around inshore of the west coast of Korea in 2005. The closed circles and bars represent estimates and 95% confidence interval, respectively.

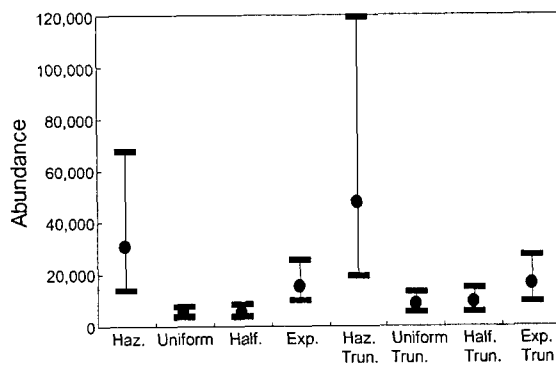


Fig. 5. Abundance estimates and 95% confidence interval for sighting the finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, around inshore of the west coast of Korea in 2004. The closed circles and bars represent estimates and 95% confidence interval, respectively.

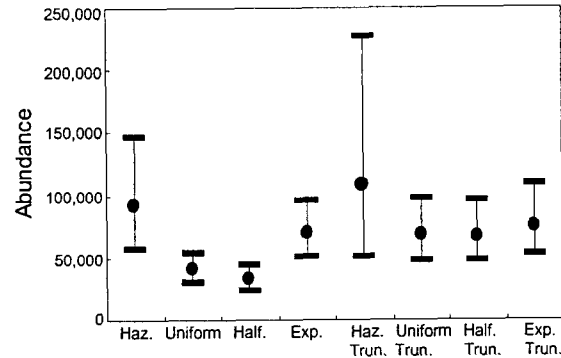


Fig. 6. Abundance estimates and 95% confidence interval for sighting the finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, around offshore of the west coast of Korea in 2004. The closed circles and bars represent estimates and 95% confidence interval, respectively.

가장 적합한 모델이라고 할 수 있다. 그러나 변동계수 또한 Hazard-rate 모델이 가장 높았으며 다른 모델들보다 자원개체수를 과대추정 하였다. Hazard-rate 모델이 추정한 발견을 곡선을 보면 몇 가지 문제점을 발견할 수 있는데 각 모델이 추정한 발견율함수의 특징은 다음과 같다.

Hazard-rate 모델

본 연구에서 적용된 상괘이 자료의 경우 2005년과 2004년 연안조사 자료에서 발견율이 조사라인에서 수직거리 약 0.1 m까지만 평행하다가 급격하게 감소하는 경향을 보였으며, 자료의 수가 많은 2004년 근해 조사는 7m까지 발견율이 평행 선을 보이다가 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 결과적으로 자료가 50개 미만인 2005년과 2004년의 연안조사 자료에서 Hazard-rate 모델의 기본형태인 조사라인으로부터 일정간격 평행한 발견율이 잘 나타나지 않았고 오히려 급격히 감소하여

Exponential 모델과 비슷한 형태를 보였으며 (Figs. 1, 2), 자료가 70개인 2004년 근해조사 자료에서도 발견율이 약간의 평생 선만 보이고 Exponential 모델보다 급격하게 감소하였다 (Fig. 3). 모든 조사에서 조사라인에서 가장 가까운 거리에 있는 그룹의 발견율 $[g(\text{group } 1)]$ 이 2005년 연안조사에서 0.18, 2004년 연안조사에서 0.25, 2005년 근해조사에서 0.61로 목시조사에서 가정하고 있는 $g(0)=1$ 보다 크게 낮은 값을 보였다. 또한, 이 모델에서 추정된 확률밀도함수 $f(0)$ 가 가장 컸으며 조사 폭 w 안에서의 발견율 P 는 2005년 연안조사와 2004년 연안 조사에서 0.05를 나타내 정상적인 목시가 이루어지지 않은 결과를 보였다. 따라서 Hazard-rate 모델에서 밀도의 변동계수 (CV)가 다른 모델보다 높았으며, 자원개체수도 다른 모델보다 2-6배 과대추정 되었다 (Table 3).

Hazard-rate 모델이 다양한 형태의 거리표집 자료에 잘 부합된다고 하지만 2005년과 2004년 연안조사 자료에서 비정상적으로 과소추정 되었으며 2004년 근해조사에서도 조사라인에서 가까운 거리의 발견율 곡선이 잘 나타나지 않은 이유는 샘플의 수가 작기 때문인 것으로 사료된다. Buckland (1985)는 Hazard-rate 모델이 여러 가지 형태의 자료에 적용시킬 수 있을 정도로 탄력적이 모델이라고 하였으나 시료가 50개는 되어야 할 것이라고 하였다. 실제로 시료의 숫자가 2005 연안<2004 연안<2004 근해 순인데 이 순서대로 Hazard-rate 모델이 점차 형태를 회복하고 조사 폭 w 에서의 발견율 P 와 조사라인에서 가장 가까운 거리에 있는 그룹의 발견율 $[g(\text{group } 1)]$ 도 증가하는 것을 볼 수 있다 (Figs. 1, 2, 3).

Uniform 모델

각 연도별 조사자료에서 조사라인에서 가장 가까운 그룹의 발견율 $[g(\text{group } 1)]$ 이 목시조사에서의 가정인 $g(0)=1$ 보다 높았으며 발견율이 다른 모델에 비해 완만하게 감소하였다. 이러한 발견율은 자원개체수를 과소 추정할 수 있는데 실제로, 이 모델을 통해 추정된 자원개체수는 다른 모델에 비해 가장 작았고 변동계수 또한 2004년 근해조사를 제외하고 가장 작았다. 그러나 근해자료와 연안자료, 시료 수가 적은 경우에도 발견율의 점진적인 변화를 잘 나타냈다 (Fig. 1, 2, 3).

Half-normal 모델

상괭이 조사자료에서는 2005년 연안과 2004년 연안, 근해 조사자료에서 모두 Half-normal + cosine 조합이 잘 맞았는데 (Table 1), 조사라인으로부터 가장 가까운 그룹의 발견율 $[g(\text{group } 1)]$ 이 각 조사에서 0.86과 0.80, 0.89로 기본 가정인 1보다 낮게 추정되었지만, 조사 폭 w 에서의 발견율 P 가 Uniform 모델과 비슷한 값을 보였다. 2005년 연안과 2004년 연안 조사에서 Uniform 모델 다음으로 낮은 자원개체수가 추정되었고, 2004년 근해에서는 Half-normal 모델에서 가장 낮은 자원개체수가 추정되었다. 자료를 절삭하지 않았을 때와 절삭 했을 때 모두 Half-normal 모델에서 변동계수가 가장 작게 추정되었다. 이 모델은 Uniform 모델과 마찬가지로 2005

년 연안조사와 2004년 연안조사와 같이 시료의 수가 적은 자료에도 발견율 곡선을 잘 나타냈을 뿐 아니라 시료수가 많은 2005년 근해조사에도 잘 부합되었다 (Fig. 1, 2, 3).

Exponential 모델

이 모델은 절삭되지 않은 2004년 근해 자료에서 AIC값이 다른 모델보다 작았다. Exponential 모델에서 추정된 조사라인으로부터 가장 가까운 그룹의 발견율 $[g(\text{group } 1)]$ 이 2005년 연안에서 0.46, 2004년 연안에서 0.38, 2004년 근해조사에서 0.52로 Hazard-rate 모델보다 높았지만 기본 가정인 1보다 낮게 추정되었다 (Figs. 1, 2, 3). 조사넓이 w 에서의 발견율 P 도 연안 조사에서는 0.10-0.15로 Hazard-rate 모델 다음으로 낮게 추정되었다 (Table 3). 자원개체수 추정에 있어서도 이 모델은 hazard-rate 모델 다음으로 높은 자원개체수를 추정하였는데, 2005년 연안조사는 7,172마리, 2004년 연안조사는 15,976마리, 2004년 근해조사는 75,641마리로 각각 추정하여, Uniform 모델이나 Half-normal 모델보다 약 2배 많은 자원개체수를 추정하였다. 변동계수도 Hazard-rate 모델 다음으로 높았다. 이 모델은 샘플의 수가 작을 때에도 초기 감소가 잘 나타나지만 자료가 미흡할 때 사용하는 구체분석방법 (Salvage analysis)으로 권장되지 않은 모델이다 (Buckland et al., 1993). 확률밀도함수를 추정하기 위한 여러 가지 모델이 있는데, 본 연구에서 사용한 4가지 모델은 다양한 형태의 자료에 탄력적으로 잘 적용되는 효과적인 모델이다 (Buckland et al., 1993). 만약 모든 모델이 비슷한 추정값을 산출한다면 모델 선택에 그렇게 엄밀할 필요가 없다. 그러나 본 연구에서 한 모델에서 추정된 자원개체수가 다른 모델에서 추정된 자원개체수의 6배에 달하기도 했다. 따라서 동물의 자원개체수를 추정하는데 있어서 조사뿐만 아니라 모델의 선택은 상당히 중요하다고 할 수 있다. Hazard-rate 모델은 그 모델이 가지고 있는 적용력과 목시조사 가설에 맞는 일정구간 발견율이 평형한 형태를 갖출 수 있어 다양한 목시조사 자료에 권장된다. 그러나 본 연구에서 이 모델은 AIC를 기준으로 적합한 모델로 선택되었지만 모델이 만들어진 의도대로 보여져야 할 평행선을 이루는 발견율을 나타내지 못하였다. 모델이 추정한 조사라인에서의 발견율이 조사라인에서 가장 가까운 그룹의 발견율 $[g(\text{group } 1)]$ 보다 3배 이상 높았다가 급격히 감소하는 형태를 나타내어 조사라인으로부터 가장 가까운 그룹의 발견율을 다른 모델에 비해 과소평가하는 문제점을 드러냈다. 샘플의 수가 많은 2004년 근해자료의 경우 연안자료에 비해 변동계수가 감소하고 가장 가까운 그룹의 발견율 $[g(\text{group } 1)]$ 도 2005년 연안조사와 2004년 연안조사에 비해 증가하였지만 역시 다른 모델에 비해서 자원개체수가 과대추정되었다 (Figs. 4, 5, 6).

참고 문헌

- Akaike, H. 1985. Prediction and entropy. In: A Celebration of Statistics. Atkinson, A.C. and S.E. Feinberg, eds. Springer-Verlag, Berlin, 1-24.

- Buckland, S.T. 1985. Perpendicular distance models for line transect sampling. *Biometrics*, 41, 177-195.
- Buckland, S.T. 1987a. On the variable circular plot method of estimating animal density. *Biometrics*, 43, 363-384.
- Buckland, S.T. 1987b. An assessment of the performance of line transect models for fitting IWC/IDCR cruise data, 1978/79 to 1984/85. Report of the Intl. Whal. Comm., 37, 277-279.
- Buckland, S.T., D.R. Anderson, K.P. Burnham and J.L. Laake. 1993. Distance Sampling. In: Estimating Abundance of Biological Populations. Chapman & Hall, London, 1-446.
- Burnham, K.P. and D.R. Anderson. 1976. Mathematical models for non-parametric inferences from line transect data. *Biometrics*, 32, 325-336.
- Burnham, K.P., D.R. Anderson and J.L. Laake. 1980. Estimation of density from line transect sampling of biological populations. *Wildlife Monogr.*, 72, 1-202.
- Crain, B.R., K.P. Burnham, D.R. Anderson and J.L. Laake. 1979. Nonparametric estimation of population density for line transect sampling using Fourier series. *Biom. J.*, 21, 731-748.
- Eberhardt, L.L. 1968. A preliminary appraisal of line transect. *J. Wild. Man.*, 32, 82-88.
- Eberhardt, L.L. 1978. Transect methods for population studies, *J. Wild. Man.*, 42, 1-31.
- Fewster, R.M., J.L. Laake and S.T. Buckland. 2005. Line transect sampling in small and large regions, *Biometrics*, 61, 856-861.
- Gates, C.E., W.H. Marshall and D.P. Olson. 1968. Line transect method of estimating grouse population densities. *Biometrics*, 24, 135-45.
- Hammond, P.S. and J.L. Laake. 1984. Estimates of sperm whale density in the eastern tropical Pacific, 1974-1982. Rep. Intl. Whal. Comm., 34, 255-258.
- Hayne, D.W. 1949. An examination of the strip census method for estimating animal populations. *J. Wild. Man.*, 13, 145-57.
- Kelker, G.H. 1945. Measurement and interpretation of forces that determine population of managed deer, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, 1-422.
- Leopold, A. 1933. Game Management, Charles Schribner's Sons, Now York, 1-130.
- Melville, G.J. and A.H. Welsh. 2001. Line transect sampling in small regions. *Biometrics*, 57, 1130-1137.
- NFRDI (National Fisheries Research & Development Institute). 2004. Ecological study of finless porpoise in Korean waters. NFRDI Subject Report, 1-96.
- NFRDI (National Fisheries Research & Development Institute). 2005. Ecological study of finless porpoise in Korean waters. NFRDI Subject Report, 1-108.
- Quinn, T.J.II and V.F. Gallucci. 1980. Parametric models for line transect estimators of abundance, *Ecology*, 61, 293-302
- Schweder, T., N. Øien and G. HØst. 1991. Estimates of the detection probability for shipboard surveys of northeastern Atlantic minke whales, based on parallel ship experiment. Rep. Intl. Whal. Comm., 41, 417-32.
- Seber, G.A.F. 1979. Transect of random length, in sampling biological populations. Cormack, R.M., G.P. Patil and D.S. Robson, eds. International Co-operative Publishing House, Fairland, MD, USA, 183-192.
- Seber, G.A.F. 1982. The Estimation of Animal Abundance and Related Parameters, Macmillan, New York, 1-506.
- Sohn H., Z.G. Kim and T. Miyashita. 2001. Abundance estimate of minke whale, *Blaenoptera acutorostrata*, by sighting survey in the Yellow Sea, spring 2001. *J. Kor. Soc. Fish. Res.*, 4, 51-63.
- Stuart, A. and J.K. Ord. 1987. Kendall's Advanced Theory of Statistics, Vol. 1. Griffin, London, 1-604.
- Thomas, L., J.L. Laake, S. Strindberg, F.F.C. Marques, S.T. Buckland, D.L. Borchers, D.R. Anderson, K.P. Burnham, S.L. Hedley, J.H. Pollard and J.R.B. Bishop. 2003. Distance 4.1. Release "x" 1. Research Unit for Wildlife Population Assessment, University of St. Andrews, UK. <http://www.ruwpa.stand.ac.uk/distance/>
- Zhang C.I., K.J. Park., Z.G. Kim and H. Sohn 2004. Distribution and abundance of finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*) in the west coast of Korea. *J. Kor. Fish. Soc.* 37, 129-136.
- Zhang, S. 2001. Improvements in the kernel estimation in line transect sampling without the shoulder condition. *Stat. Prob. Lett.*, 53, 249-58.

2006년 11월 28일 접수

2007년 8월 3일 수리