

지구통계기법을 이용한 소양호퇴적물 분포연구

김기영¹⁾, 황윤구¹⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과, kykim@kangwon.ac.kr

Spatial distribution of sediments in the Soyang Lake based on geostatistical analyses

Ki Young Kim¹⁾, Yoon Gu Hwang¹⁾

¹⁾Department of Geophysics, Kangwon national University

요약 : 소양댐 축조 이후 소양호에 퇴적된 퇴적물의 양과 분포상태를 파악하기 위하여, 227 km에 달하는 측선을 따라 10–20 kHz 음파탐사를 실시하였다. 측선간격은 종단면의 경우 대략 50 m, 횡단면의 경우 500 m 정도이다. 이득조절과 f-k 구조보정 과정을 거친 후, 퇴적물의 경계를 수치화하고, 38개 시추코아 자료와 대비하여 확인하였다. 댐축조 이후 퇴적물의 두께는 평균 0.25 m로 최대 8.25m에 달한다. 댐축조 이후 퇴적물의 총 부피는 이방성을 고려하여 지구통계기법으로 계산할 경우, 등방성을 가정하고 구한 경우보다 2배 이상 증가한 $5.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에 달하는 것으로 분석된다.

주요어 : 소양호, 퇴적물, 음파탐사, 지구통계기법, 이방성

Abstract : To access the volume of sediments deposited after construction of the Soyang Dam and to understand their distribution in the Soyang lake, acoustic profiling using a 10–20 kHz system was conducted along profiles of 227 km length. Profile intervals are approximately 50 and 500 m for longitudinal and cross lines, respectively. The data were gain-controlled and then migrated using the f-k algorithm. After digitization of boundaries of the sediments, the acoustic interpretation was verified through correlating with 38 core samples. Thickness of the sediments averages 0.25 m and reaches to 8.25 m at maximum. Estimated total volume of the sediments based on anisotropic models in geostatistical methods is approximately $5.9 \times 10^6 \text{ m}^3$, which is more than twice greater than the earlier estimation based on an isotropic model.

Keywords : Soyang lake, sediments, acoustic profiling, geostatistical methods, anisotropy

1. 서론

1973년 소양댐 건설로 생성된 소양호는 면적 2703 km^2 에 달하는 국내 최대 인공호수이다. 댐 건설 이후 퇴적된 퇴적물은 댐 자체의 안전성과 함께 수질 오염 등의 환경문제를 야기할 수 있음에도 불구하고, 2000년 이전의 연구는 거의 전무한 상태였다. 2001년과 2002년 실시한 음파탐사 및 코아 조사를 통한 퇴적물 분포연구(김기영 등, 2002) 결과, 퇴적물의 공간적 분포, 양, 종류 등이 대략적으로 밝혀졌다. 당시 퇴적물의 분포와

양은 등방성을 가정하고 구하였는데, 실제 분포양상은 구 소양강 유로를 따라 매우 강한 이방성을 나타낸다. 따라서 이 연구는 이방성 개념을 도입하여 당시 자료를 재분석함으로써 좀 더 정확한 분포양상과 퇴적물의 양을 구하는데 목적이 있다.

2. 배경이론

공간에 분포하는 자료의 통계학적 특성은 분산도(variogram)로 나타낼 수 있으며, 분산도는 공간에 분포하는 임의의 두 자료값 차이의 분산으로 구해진다(Matheron, 1963). 즉,

$$2\gamma(h) = E\left\{\sum [Z(x) - Z(x+h)]^2\right\}$$

으로, 여기서 $2\gamma(h)$ 는 분산도이고, $Z(x)$ 는 임의의 지점 x 에 있는 자료의 값이며, $Z(x+h)$ 는 x 로부터 h 만큼 떨어진 지점의 자료 값이다.

분산도 특성을 나타내는 주요 요소로는 측정오차(nugget effect), 문턱값(sill), 상관거리(range) 등이 사용된다. 분산도 모델은 문턱값 존재 유무에 따라 여러 모델로 구분되며, 대부분 지질관련 자료의 분석에서는 문턱값이 있는 구상형 모델(spherical model), 가우시안 모델(Gaussian model), 지수형 모델(exponential model) 등이 사용된다(Journel and Huijbregts, 1978).

측선간격이 매우 성근 2차원 측선자료들로 구성된 표본의 경우, 지구통계학적 기법을 효과적으로 적용하여 자료를 공간적으로 보간(interpolation)할 수 있다. 대표적으로 크리깅 방법이 있으며, 활용 가능한 표본의 가중선형결합을 계산하기 위하여 분산도 모델을 사용한다. 이 연구에서는 시험과정을 거쳐 구상형 모델(spherical model)을 사용하였다.

3. 자료 획득 및 처리

2001년과 2002년 소양호에서 기록한 음파탐사는 227 km에 달하며, 평균 측선간격은 종방향 50 m, 횡방향 500 m이다. 음파는 10-20 kHz 대역의 주파수 변조형 스윙으로 발생시켰고, 2-100 kHz 대역의 하이드로폰 8개로 구성된 수신기배열 2개로 수신하였다. 이 음파탐사 장비의 이론적 수직분해능은 7.5 cm 정도이다. 수심변화에 따라 스윙길이는 10 혹은 30 ms, 발파간격은 초당 2 혹은 4회로 조정하였다. 횡측선 5-6 노트, 종측선 7-8 노트의 속력으로 이동하는 조사선 후미 1m에서 송수신 장치를 견인하였다. 조사선 위치는 GPS 및 DGPS 장치를 이용하여 수신하였고, 컴퓨터에 내장된 상용 소프트웨어를 이용하여 실시간으로 기록하였다.

수치형태로 기록된 원시자료는 기하학적 발산효과 및 흡수에 의한 감쇠를 보정하기 위하여, 시험을 통해 결정된 $t^{1.5}$ 에 비례하는 프로그램 이득조절을 실시하였다. 또한 호수 경계부분의 급경사에서 많이 발생한 구조왜곡과 회절파를 제거하기 위하여 1500 m/s의 일정속도로 Stolt 구조보정을 실시하였다. 음파단면을 작성한 이후에 진폭, 연결성, 경사, 회절파 유무, 투명성 등의 반사특성에 따라 퇴적층의 경계를 해석하였고, 38개 지질 코아자료와 대비하여 확인하였다. 해석된 퇴적물의 상하층 경계면 반사시간 차이에 수층에서의 음파속도 절반을 곱하여 두께를 구하였다.

4. 자료 분석

측점간격은 평균 0.8 m 정도로 조밀한 편이나, 측선간격은 평균 50-500 m 정도로 매

우 성근 편이다(Fig. 1). 호수 내의 위치에 따라 퇴적물의 양과 종류가 변하므로 수치자료를 22개의 지역으로 세분화한 후, 지역별로 지구통계학적 분석을 실시하였다. 표본들의 분산도에 가장 적합하다고 판단되는 구상형 모델(spherical model)을 선택하였다. 한편 음과단면의 퇴적층 분포양상은 측선방향에 따라 확연한 차이를 보여서 강한 이방성이 존재함을 나타낸다. 따라서 각 지역의 분산도 모델에서 최대 연속성이 나타나는 주방향과 최소 연속성이 나타나는 부방향을 따라 측정오차(nugget effect), 문턱값(sill), 상관거리(range)를 산출하였다(Table. 1). 이방계수는 주로 유로에 평행한 주방향과 이에 수직에 가까운 부방향의 상관거리 비로 산출하였다(Issaks and Srivastava, 1989).

A4구간의 분산도 모델(Fig. 2)은 최대 및 최소 상관거리가 -32° 의 주방향에서 200 m와 68° 의 부방향에서 60 m임을 보여주며, 이 두 거리의 비가 이방계수이다. 전체적으로 주방향의 측정오차는 0.16 이하, 상관거리는 100~500 m, 문턱값은 0.03~4.00의 범위이고, 부방향의 경우는 측정오차 0.18 이하, 상관거리 30~300 m, 문턱값 0.09~1.25의 범위에 놓인다. 또한 이방계수는 1.5~4.5에 값을 갖는다.

분산도 모델링을 통해 구한 주요 통계학적 인자들을 이용하여, 측정된 퇴적물 두께를 동서 및 남북 방향의 5×5 m 격자 크기로 공간적으로 보간하였다. 크리깅 방법으로 격자화한 후 퇴적물의 등후도를 작성하였으며(Fig. 3), 퇴적물의 부피는 퇴적물 두께에 격자면적 25 m^2 을 곱하여 Simpson 계산방식(Press *et al.*, 1986)에 따라 수치 적분하여 구하였다.

5. 결과 및 토의

소양댐 건설 이후에 쌓인 퇴적물(Fig. 3)은 7.5 m 이하의 두께로 댐체 부근, 구 소양강 유로, 지천 유입부분 등에 주로 분포하며 총 부피는 $5.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에 달한다. 이 값은 이방성을 감안하지 않고 구한 기존 결과(김기영 등, 2002)의 2배 이상에 달하여, 이방성을 감안하지 않을 경우에 퇴적물 부피 계산에 상당한 오류를 범할 수 있음을 지시한다. 또한 등방성 모델에 입각하여 작성한 퇴적층의 분포도(Fig. 3b)는 퇴적물들이 흩어진 작은 주머니 모양으로 군데군데 분포하는 것처럼 보이나, 이방성을 감안하고 구한 분포도(Fig. 3a)에서는 유로방향을 따라 훨씬 연속성이 좋게 나타나며, 실제 주머니 형태로 분포하는 부분을 용이하게 구별해 낼 수 있다.

참고문헌

- 김기영, 김동훈, 조수제, 임경학, 정대교, 황인영, 최동립, 2002, 고주파음원을 이용한 소양호 저층퇴적물 연구. 대한지질학회, 대한환경지질학회, 한국석유지질학회, 한국암석학회 제57회 추계 공동학술발표회 초록집, 118 p.
- Matheron, G. 1963, Principles of geostatistics, *Economic Geology*, **58**, 1246-1266.
- Journel, A. G. and Huijbregts, Ch. J., 1978, Mining Geostatistics, Academy Press, 600 p.
- Issaks, E. H. and Srivastava, R. M., 1989, Applied Geostatistics, Oxford University, 561 p.
- Press, Q.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., and Vetterling, W.T., 1986, Numerical Recipes, Cambridge University Press, New York, 818 p.

Table 1. Key parameters of the anisotropic variogram-based models for the 22 regions in Fig. 1.

area	major direction of anisotropy				minor direction of anisotropy				anisotropy ratio
	nugget effect	sill	range(m)	direction (degree)	nugget effect	sill	range(m)	direction (degree)	
A1	0.05	1.25	140	-73	0.05	1.25	80	18	1.8
A2	0.00	1.22	200	-82	0.00	1.10	60	10	3.3
A3	0.00	4.00	150	-45	0.00	1.00	80	60	2.4
A4	0.00	0.15	200	-32	0.01	0.11	60	68	3.3
A5	0.03	0.37	100	-45	0.05	0.16	60	70	2.5
A6	0.01	0.35	100	10	0.01	0.30	30	-75	3.3
A7	0.11	0.18	330	23	0.10	0.25	220	-67	1.5
A8	0.03	0.18	320	-7	0.00	0.18	70	90	4.5
A9	0.16	0.30	300	-20	0.00	0.17	110	70	2.7
A10	0.00	0.48	120	-40	0.00	0.29	40	40	3.3
A11	0.00	0.25	100	90	0.00	0.22	60	0	1.7
A12	0.02	0.03	255	-87	0.03	0.09	100	0	2.6
A13	0.00	0.40	120	76	0.00	0.15	70	-10	1.7
A14	0.03	0.53	300	-24	0.01	0.4	160	80	1.9
A15	0.00	0.95	300	-28	0.00	0.46	110	75	2.7
A16	0.15	0.10	250	75	0.18	0.13	80	-10	3.1
A17	0.01	0.14	400	81	0.08	0.16	120	-9	3.3
A18	0.00	0.30	100	80	0.00	0.30	70	-10	1.4
A19	0.05	0.16	230	5	0.10	0.17	90	-80	2.5
A20	0.10	0.11	150	67	0.00	0.12	50	-23	3.3
A21	0.10	0.15	500	-70	0.01	0.38	300	20	1.6
A22	0.04	0.12	500	90	0.01	0.21	130	20	3.8

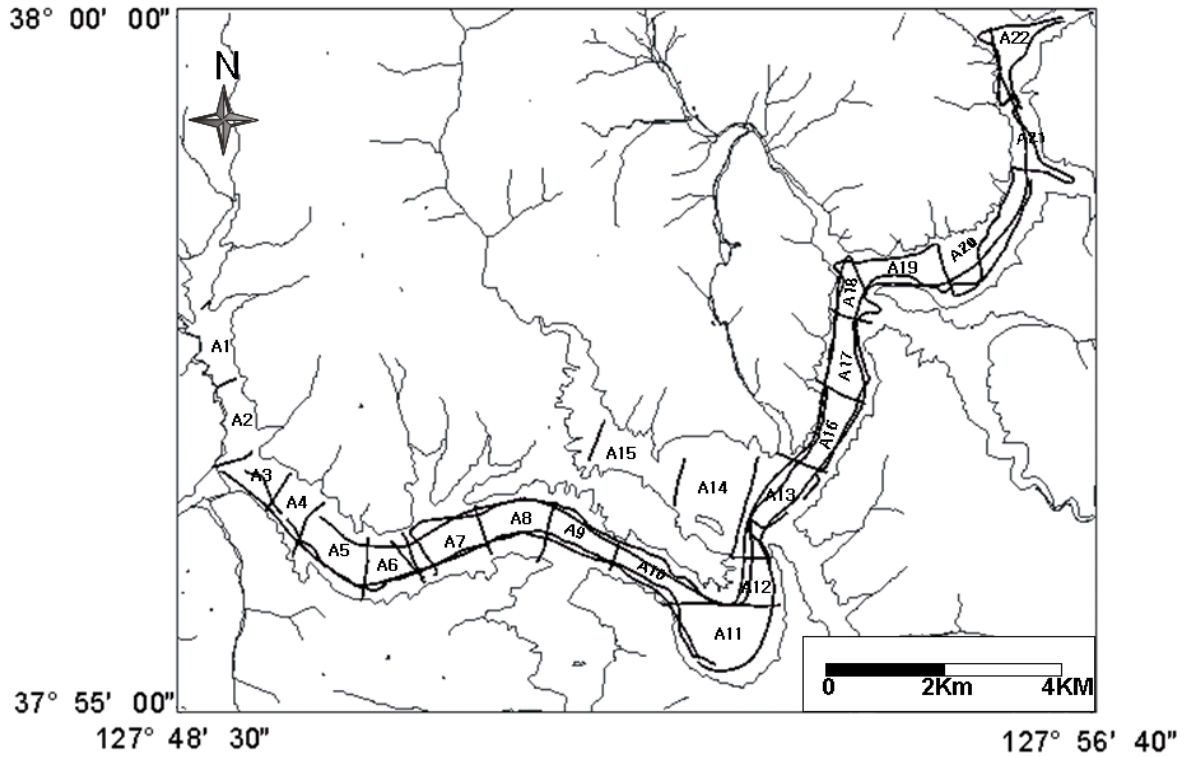


Fig. 1. Location map showing the acoustic profiles and 22 regions for the geostatistical analyses.

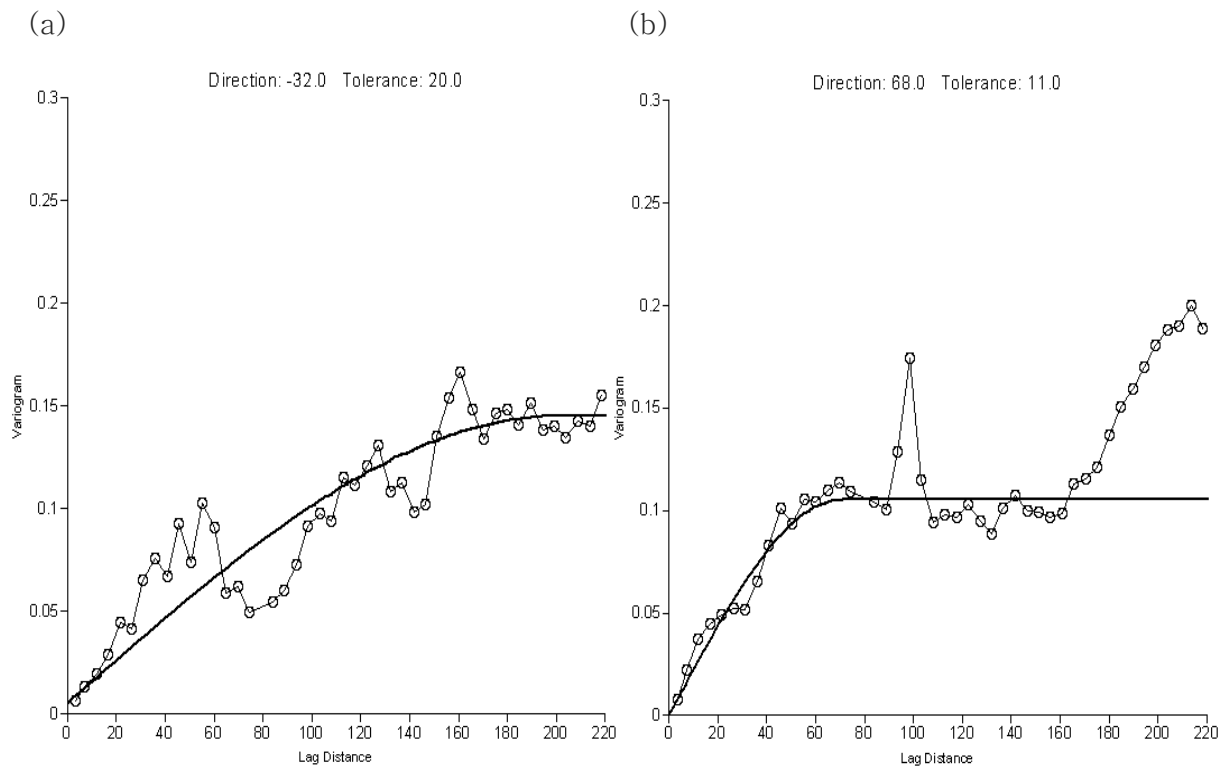


Fig. 2. Directional variogram models in Area 4 for the anisotropic analysis : (a) the major and (b) the minor directions, respectively.

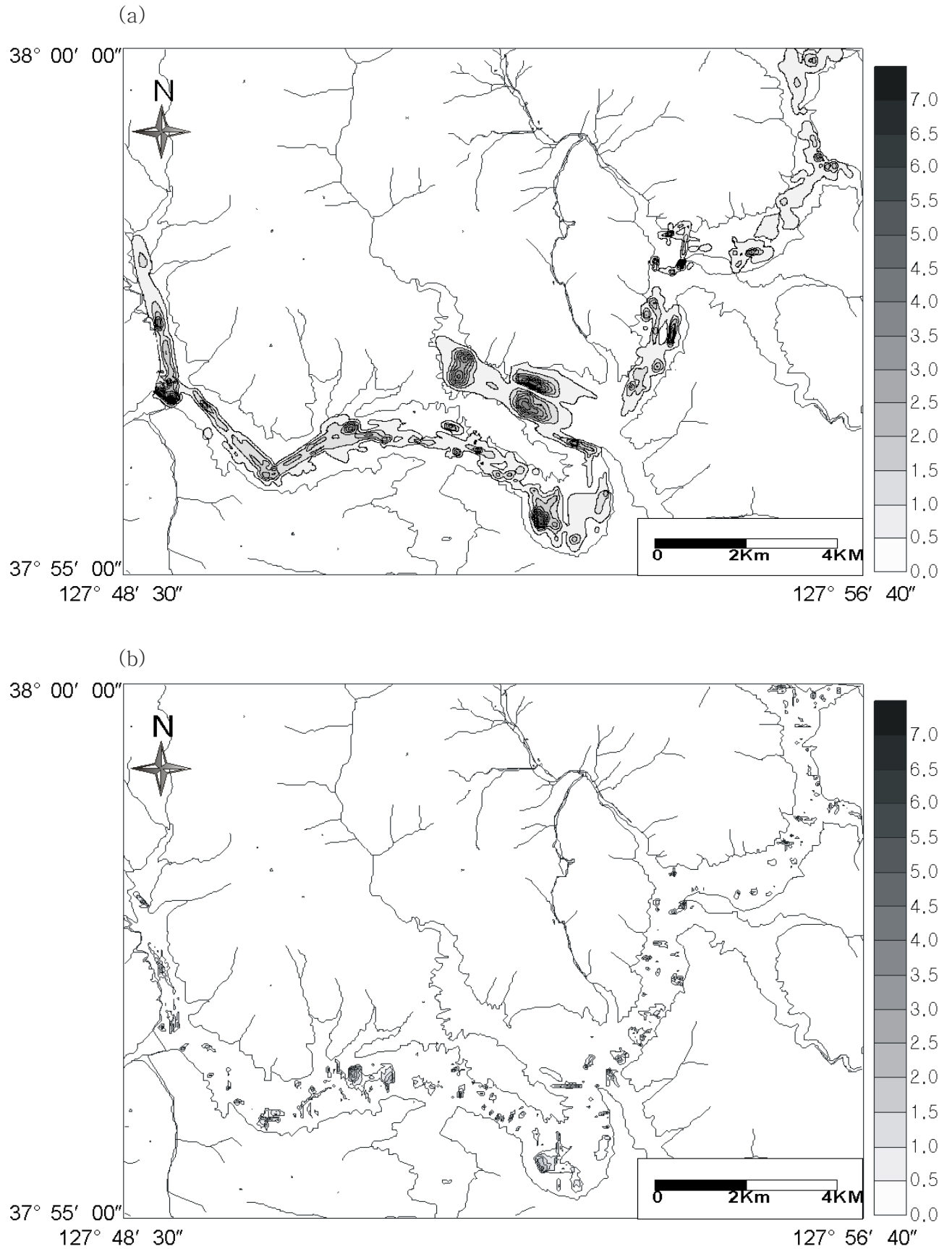


Fig. 3. Thickness maps of sediments deposited after construction of the dam: (a) based on anisotropic and (b) isotropic variogram models (after Kim *et al.*, 2002), respectively.