

거제도 동쪽 해역 표층 퇴적물의 지음향모델

김길영* · 김대철¹ · 신보경¹ · 서영교² · 이광훈¹

*한국해양대학교 해양과학기술연구소, ¹부경대학교 환경탐사공학과, ²지마텍주식회사

Geoacoustic Model of Surface Sediments in the East of Geoje Island, the South Sea of Korea

GIL YOUNG KIM* DAE CHOUL KIM¹, BO KYOUNG SHIN¹, YOUNG KYO SEO² AND GWANG HOON LEE¹

*Research Institute of Marine Science & Technology, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

¹Department of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²Gematek Co. Ltd., Busan 608-020, Korea

대한해협과 거제도 동쪽 사이에 분포하고 있는 표층퇴적물의 지음향모델을 구현하기 위하여 18개 정점에서 채취한 시추 코어를 대상으로 퇴적물 조직, 물리적 성질(공극률, 함수율, 전밀도, 입자밀도, 전단응력) 및 지음향 특성(음파전달속도, 음파감쇠)을 측정하였다. 평균입도, 음파전달속도 및 전밀도는 연구지역의 외해로 갈수록 증가하며, 공극률은 감소하는 경향을 보였다. 퇴적물 특성을 통해 본 연구지역을 3개의 구역(구역 I: 낙동강으로부터 직접 퇴적물이 퇴적되는 지역; 구역 II: 낙동강 부유퇴적물이 남쪽 방향으로 이동 및 퇴적된 니질 퇴적물 지역; 구역 III: 조립질 잔류퇴적물이 퇴적되어 있는 지역)으로 구분 할 수 있었다. 평균입도, 음파전달속도 및 전밀도는 구역 I(각각 7.4 Φ , 1528 m/s, 1.6 g/cm³)에서 구역 II(각각 8.1 Φ , 1485 m/s, 1.5 g/cm³)로 줄어들다가 구역 III(1.4 Φ , 1664 m/s, 2.2 g/cm³)으로 급격히 증가하는 경향을 보인다. 반면, 공극률은 구역 I(64.5%)에서 구역 II(73.9%)로 증가하다 구역 III(32.9%)으로 감소하는 반대의 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서는 이러한 구역별 분석 및 측정된 자료와 계산된 음향특성 값을 이용하여 연구지역을 구역별로 나누어진 세분화된 지음향모델을 제시하고자 한다.

Sediment texture, physical (porosity, water content, bulk density, grain density, and shear strength), and geoacoustic properties (compressional wave velocity and attenuation) were measured on eighteen core samples collected from the shelf off eastern Geoje Island, the South Sea of Korea. Based on these properties, the study area is divided into three different sub-areas: (1) Area I affected directly by the Nakdong River discharge; (2) Area II covered by the southern branch of the Nakdong River discharge; and (3) Area III dominated by relict sediment. Mean grain size, velocity, and bulk density decrease from Area I (7.4 Φ , 1528 m/s, 1.6 g/cm³, respectively) to Area II (8.1 Φ , 1485 m/s, and 1.5 g/cm³), and then increase rather rapidly in Area III (1.4 Φ , 1664 m/s, and 2.2 g/cm³). Porosity, on the other hand, exhibits an opposite trend, increasing from Area I (64.5%) to Area II (73.9%) and then decreasing significantly in Area III (32.9%). From the results measured and calculated, we suggest a specified geoacoustic model in the study area.

Key words: Sediment Texture, Physical and Acoustic Properties, Geoacoustic Model

서 론

해양 퇴적물의 음향 및 물리적 특성은 기본적으로 해양환경을 이해하는데 이용될 수 있으며 더 나아가 지질공학, 수중음향학 및 퇴적학은 물론 고해양을 해석하는데도 효율적으로 이용될 수 있어 이들 각 특성 값 간의 상관관계를 밝히는 연구가 국내외에서 활발히 수행되어 왔다(Hamilton, 1970; Hamilton and Bachman, 1982; 김과 김, 1991; 김 등 1992, 1994, 1996, 1999; Kim and Kim, 2001; Kim *et al.*, 2001, 김 등, 2004).

이러한 이유로 심해저시추기구(Deep Sea Drilling Project)나 그 후속 프로그램인 해저지각굴착프로그램(Ocean Drilling Program)에서는 시추된 모든 코어에 대하여 물성 및 음향특성을 측정하고 있으며 또한 연속적인 자료획득을 위해서 다중검침기(Multi-Sensor Core Logger)를 이용하여 시추코어에 대한 다양한 물성 자료를 측정하고 있다.

특히, 해저지층 탐사시 탄성과 자료를 해석함에 있어 계산치와 실측치간의 차이가 총 계산 시 오류를 범할 수 있기 때문에 정확한 반사면 및 반사계수를 구하기 위해서는 음향입피턴스를 계산하는 것이 바람직하다. 따라서 퇴적물에 대해 직접 측정된 음파전달속도 및 물성자료는 탄성과 자료를 정확히 해석하는데 필요하며, 만약 지

*Corresponding author: gykim@mail1.pknu.ac.kr

역별 및 퇴적환경별로 이러한 값을 알고 있다면 탐사자료 해석 시 아주 용이하다. 이와 같이 물성값이나 지움향 특성값을 이용하여 실제 해저면을 구현하기 위한 연구를 지움향모델링이라 하며, 전 해양을 하나의 모델로 정의할 수는 없기 때문에 다양한 해양환경을 가지는 지역별 지움향모델의 필요성이 여러 연구(Kim and Kim, 2001; Kim *et al.*, 2001; 김 등, 2004)에 의해 대두되어 왔다.

연구지역을 포함하는 한반도 남해에서의 지움향모델에 대한 연구는 Briggs and Fischer(1991), 성(1994), Kim *et al.*(2001)에 의해 전반적인 지움향모델이 제시된 바 있으며, 서(1997), 정(2001), 김 등(2004)에 의해서도 남해 일부 해역을 대상으로 지움향모델을 제시한 연구가 있다. 이 중 Briggs and Fischer(1991)의 모델은 실측자료 없이 계산에 의한 것이며, Kim *et al.*(2001)의 모델은 음파전달속도 측정 방법의 차이로 인한 속도값의 차이가 존재하여 일부 수정이 불가피한 상황으로 이러한 모델이 연구지역을 대표한다고 보기에는 많은 무리가 있다.

본 연구는 대한해협과 거제도 사이에 분포하는 표층퇴적물의 조직, 물리적 및 지움향 특성에 대한 분포를 밝히고, 이들 자료를 이용하여 이전 연구에서 이미 제시되었던 지움향모델(Briggs and Fischer, 1991; 서, 1997; Kim *et al.*, 2001)과 비교하여 보다 더 구체화된 구역별(예, 퇴적물 유형별) 지움향모델을 제시하고자 한다.

연구지역

연구지역을 포함하는 한반도 남해 대륙붕에는 두꺼운 현생 니질 퇴적층이 해안선과 비교적 평행하게 발달되어 있고, 수심 약 70~80 m를 경계로 내대륙붕과 외대륙붕으로 나뉘어 진다(Park, 1985). 본 연구지역(Fig. 1)은 내대륙붕과 일부 외대륙붕 지역을 포함하며, 주변지역의 퇴적물 분포는 섬진강과 낙동강 등 하천의 직접적인 유입에 의한 영향과 지난 빙하기 해수면 하강과 관련 있

는 잔류퇴적물로 분류될 수 있다(Park and Yoo, 1988; 김 등, 1992).

연구지역에 직접적으로 영향을 주는 낙동강으로부터의 퇴적물 유입은 63×10^9 ton/year(Kim and Park, 1980)로 알려져 있다. 낙동강은 유역 면적이 23,860 km²에 달하며 연간 담수 유출량은 630 억톤에 이르고 그중 약 60~70% 이상이 홍수기인 7, 8월에 집중된다(건교부, 1976). 또한 연간 1000 만톤에 달하는 퇴적물이 연구지역에 유입되고 있으며, 이러한 쇄설성 퇴적물 중 조립한 사질 퇴적물의 대부분은 강하구를 중심으로 퇴적되며 다양한 형태의 모래사주를 포함하는 넓은 삼각주를 형성하고 있다(Kim *et al.*, 1986).

남해 대륙붕해역은 대마난류수와 남해연안수의 세력에 의해 크게 영향을 받으며 연안 해류의 경우는 계절적인 영향이 크지만 일반적으로 동-서 방향이 우세하다(수로국, 1982). 일반적으로 조류는 해저지형에 많은 영향을 받는데 연구지역의 조류는 비교적 강한 편이며, 특히 창조류보다 낙조류의 유속이 더 빠르게 나타난다. 거제도와 부산간의 창조류의 유속은 지형적인 영향을 받는 지역들을 제외하면 0.5~2.2 노트이고 낙조류의 유속은 1.3~2.8 노트며, 연안에서는 해안선과 평행하고 외해에서는 북동-남서 방향이 우세하다(수로국, 1982).

연구지역은 마지막 빙하기 이후 몇 단계의 해침과정을 통해 지금의 해수면으로 상승하였고, 이에 의한 영향으로 탄성과 단면상에는 해수면 변동에 따른 퇴적양상이 뚜렷하게 잘 나타나고 있으며, Yoo(1997)에 의한 퇴적시스템 중 Recent prodelta/shelf depositional system(RPS)과 Transgressive depositional system(TS1)에 해당되어 낙동강 지류가 지나던 곳으로 해석된다.

자료 및 방법

본 연구를 위한 시료 획득은 2000년 7월 한국지질자원연구원

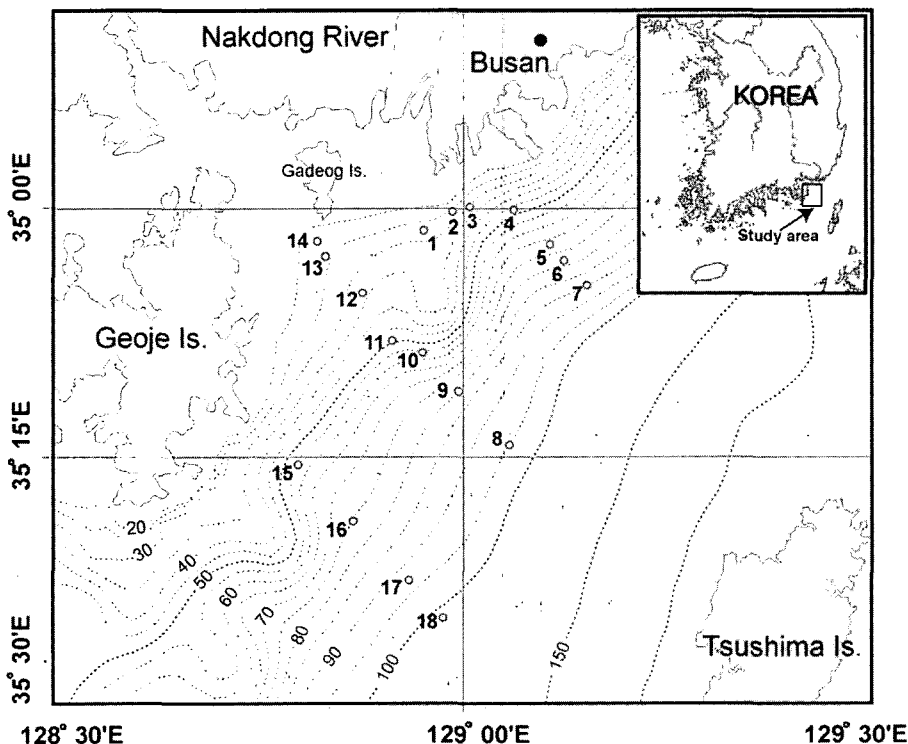


Fig. 1. Bathymetry and piston coring sites of the study area. Contours in meters.

탐사선인 탐해 2호를 이용하여 총 18개의 정점(Fig. 1)에서 피스톤 시추기를 이용하여 채취하였으며, 코어의 길이는 약 84~559 cm이다. 획득된 코어는 냉장 보관된 상태로 실험실로 운송 후, 실험 전까지 냉장 보관하였다. 실험실 분석을 위하여 코어를 반으로 절개한 후 입도 분석, 물리적 성질(공극률, 함수율, 전밀도, 입자밀도, 전단응력)과 음파전달속도 및 감쇠 등을 각각 측정하였다.

입도 분석

시료의 일정량을 취해서 6%의 과산화수소수를 첨가하여 유기물을 제거하고, 증류수로 용해성 염분을 제거하였다. 습식체질(4Φ체)을 통해 4Φ 이상의 사질 및 역질 입자들은 건조시킨 후 로탭요동기(Ro-Tap Sieve Shaker)를 사용하여 1Φ 간격으로 분석하였고, 4Φ 이하의 실트 및 점토 입자들은 자동입도분석기(Sedigraph 5100)를 이용하여 1Φ 간격으로 구분하였다. 각 Φ별로 나온 자료들은 Folk and Ward(1957) 및 Folk(1968)의 모멘트 방법에 따라 입도 및 크기별 함량을 계산하였다.

물리적 성질 측정

물리적 성질(습윤전밀도, 입자밀도, 함수율, 공극률)은 습윤무게(wet sample weight), 건조무게(dry sample weight), 습윤부피(wet sample volume), 건조부피(dry sample volume)를 각각 측정하여 계산하였다. 전자저울(Mettler AJ 100, accuracy ±0.01 g)로 시료의 무게를 측정하였고, 시료의 부피는 밀도측정기(Micromeritics: Pycnometer 1030)를 이용하여 측정하였다. 밀도측정기에는 퇴적물의 공극이나 틈에 침투가 잘되는 헬륨가스를 사용하였고, 자료의 일관성을 위해 가스의 압력은 21 psi로 일정하게 유지하였다. 건조무게와 건조 부피는 건조기에서 110°C에 24시간 건조시킨 다음 테시케이터에서 4시간 동안 냉각시킨 후 각각 측정하였다. 염분보정

은 35%에 대한 해수의 밀도 1.0245를 보정하였다(Boyce, 1976).

비배수전단응력(undrained shear strength)은 니질퇴적물에 대해서만 측정하였고 일정한 강도로 지속적으로 배인을 회전시킬 수 있는 자동응력측정장치(Motorized shear vane, Geotest Model 23500)를 사용하였다.

음파전달속도 및 감쇠 측정

퇴적물의 음파전달속도 및 감쇠는 신호후과법을 기초로 하는 자동속도측정장치(김 등, 1999)를 사용하여 측정하였다. 음파감쇠는 Toksoz *et al.*(1979)의 spectral ratio 방법을 이용하여 측정하였으며, 표준파형으로는 시료와 같은 크기(dimension)를 갖는 알루미늄의 파형을 이용하였다. 속도측정 시 일정한 실험실 온도(약 20°C)를 유지하여 온도 차이에 의한 측정 오차를 최소화 하였다.

결 과

본 연구에 사용된 분석자료는 총 18개 정점에서 획득한 코어자료를 모두 이용했으며 평균입도 및 각 물성값의 분포도에서는 시추시 발생하는 코어 상부의 교란을 고려하여 퇴적층 약 10 cm 깊이의 분석 자료를 이용하여 도시하였다.

입도분포

퇴적물 평균입도(Fig. 2) 분포를 보면 연구지역의 전체 분포범위는 0.9~8.3Φ로서 역질사(gravelly sand)에서 니(mud)까지 다양하게 분포하고 있으며, 특히 외해로 갈수록 입도가 증가하여 니질사(muddy sand), 모래(sand) 및 역질사가 분포한다. 그러나 낙동강 하구역에서는 사질니가 우세하며 외해로 갈수록 세립화하는 경향을 보인다. 특히, 정점 4(8.0Φ)와 5(2.4Φ) 및 정점 12(8.1Φ)와

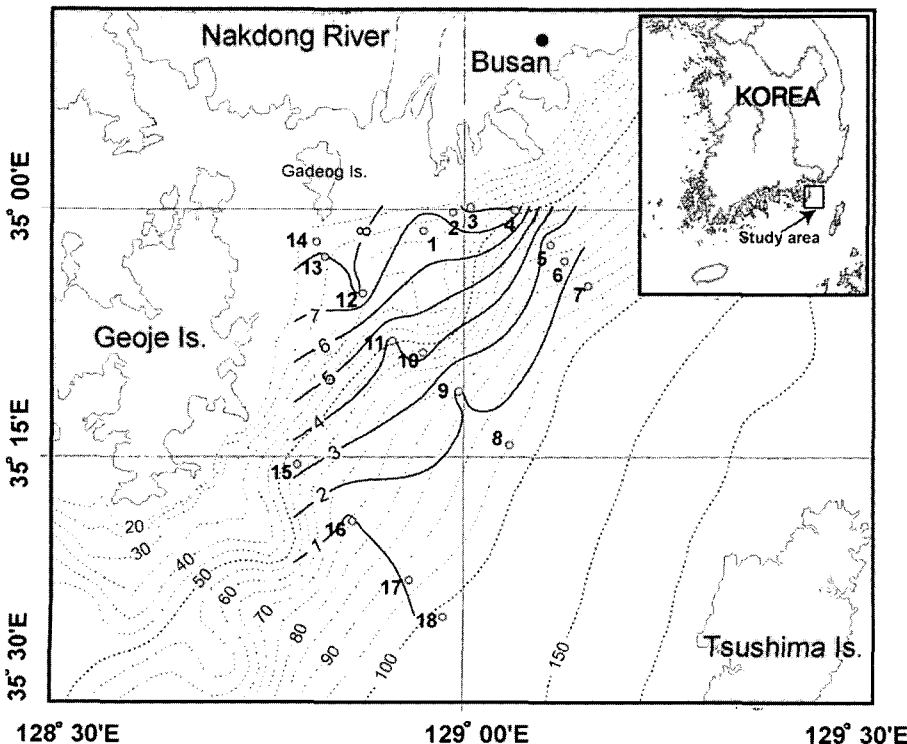


Fig. 2. Distribution of mean grain size (Φ) for sediments of 10 cm downcore.

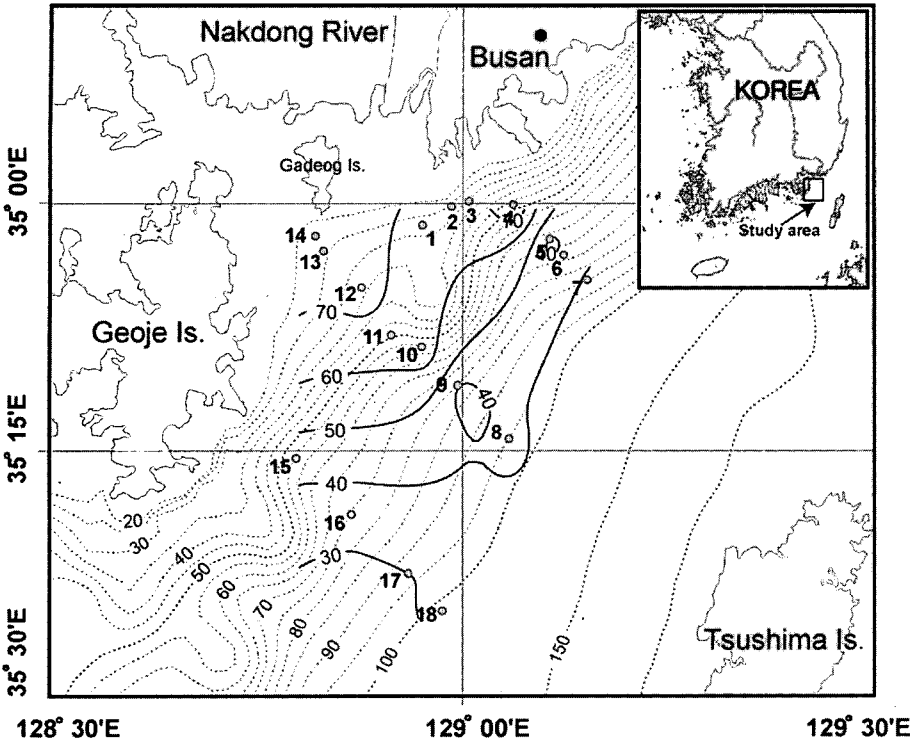


Fig. 3. Distribution of porosity (%) for sediments of 10 cm downcore.

11(3.9Φ) 사이에서 현생 니질 퇴적물(6.6~8.3Φ)과 잔류퇴적물(0.9~4.4Φ)의 경계가 뚜렷하게 나타나고 있다.

공극률

표층 퇴적물의 공극률 분포(Fig. 3)는 낙동강 하구에서 70% 이상으로 가장 높고, 대체로 등수심선과 평행하게 분포하며, 수심의

증가에 따라 30% 이하까지 감소하는 경향을 보인다. 특히, 니질 퇴적물이 우세한 정점(정점 1, 2, 3, 4, 12, 13, 14)은 70%를 기준으로 정점 1, 2 및 3과 정점 4, 12, 13 및 14로 구분할 수 있다. 전자는 64.1~66.0%로 70%를 넘지 않으나, 후자는 73.4~75.4%로 70% 이상의 값을 가진다. 이들 니질 퇴적물이 우세한 정점을 제외한 대부분의 지역은 사질 퇴적물이 우세하며 전체적인 분포양

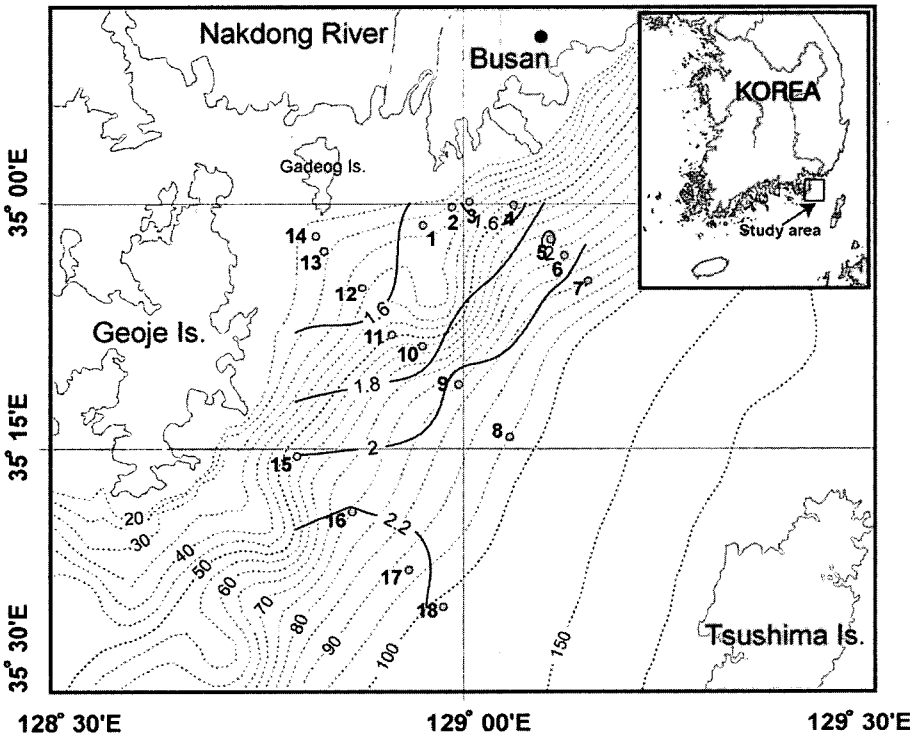


Fig. 4. Distribution of bulk density (g/cm³) for sediments of 10 cm downcore.

상은 평균입도분포를 잘 반영한다.

고찰

전밀도

연구지역의 전밀도는 1.44~2.33 g/cm³의 분포범위를 나타내며, 공극률과는 상반되게 수심이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다(Fig. 4). 사질퇴적물이 우세한 정점 5, 7, 15, 16, 17 및 18은 2.0 g/cm³ 이상의 높은 전밀도를 보이며, 공극률이 가장 낮았던 정점 17에서 가장 높은 값을 가진다. 반면, 니질 퇴적물이 우세한 나머지 정점들은 1.44~1.67 g/cm³ 사이로 상대적으로 낮은 분포를 보이는데, 하구 인근 지역의 정점 1, 2 및 3은 1.58~1.67 g/cm³이고, 그 주변 지역인 정점 4, 12, 13 및 14는 1.44~1.53 g/cm³의 범위를 가진다.

음파전달속도

음파전달속도의 경우 니질 퇴적물이 분포하는 정점(정점 1, 2, 3, 4, 12, 13 및 14)에서는 양호한 값을 보여주나, 사질 퇴적물이 분포하는 나머지 지역의 경우 측정상의 어려움으로 인하여 측정된 음파전달속도 값이 조직값과 비교할 때 오차가 많이 있는 것으로 나타나 그 값들은 제외하여 분포도를 작성하였다. 분포 양상(Fig. 5)을 보면, 낙동강 하구 인근에 위치한 정점 1, 2 및 3의 음파전달속도는 1524~1536 m/s이고, 그 외 니질 퇴적물이 퇴적되어있는 정점 4, 12, 13 및 14는 1483~1489 m/s이다. 또한 사질 퇴적물이 주로 분포하는 정점 5, 10, 11 및 17에서는 1631~1709 m/s의 값을 가진다. 이러한 음파전달속도 분포 양상은 입도 및 다른 물성값의 분포에서 나타난 것과 마찬가지로 외대륙방 방향으로 등수심선과 거의 평행하게 증가하는 경향을 잘 보여주어 조직, 물성 및 음파전달속도가 서로 연관하다는 것을 잘 지시해준다.

입도, 물리적 특성 및 음파전달속도 분포 특성

본 연구 지역의 평균입도(Fig. 2)는 전반적으로 외해로 갈수록 조립해 지는 경향을 보이고, 현생 니질 퇴적물과 조립질 잔류퇴적물의 구분이 뚜렷하다. 정점 4와 5의 경우 정점 4에서는 8.0Φ인 반면 정점 5는 2.4Φ로 급격한 차이를 보이며, 이런 현상은 정점 11(3.9Φ)과 12(8.1Φ)에서도 나타난다. 이러한 조립질 잔류퇴적물은 마지막 빙하기 이후 해수면이 상승하는 과정에서 니질 퇴적물은 선택적 제거 작용(winning)에 의해 제거되고, 사질 퇴적물만 남아서 형성된 퇴적물로서(Park, 1985) 이는 기존의 많은 연구 결과에 의해 밝혀진 바 있다.

특히, 정점 1, 2 및 3을 보면, 평균입도가 각각 6.6, 7.3, 8.3Φ로, 북서 방향으로 점점 세립화하는 경향을 잘 보여준다. 또한 이 정점들에서의 실트 및 점토함량을 보면 실트함량은 동쪽 방향으로 감소하는 반면, 점토함량은 증가하는 상반된 경향을 보인다(신, 2004). 이러한 현상은 낙동강에서 기원된 퇴적물이 정점 1 및 2를 경유하여 3의 방향으로 이동되고 있음을 잘 반영하는 것으로 이러한 결과는 해저에 분포된 퇴적물의 분포양상뿐만 아니라 최근에 촬영된 인공위성 사진(Fig. 6)에 의해서도 그러한 가능성을 잘 뒷받침 한다.

정점 4, 12, 13 및 14의 경우 정점 1, 2, 3과 같이 현생 니질 퇴적물이고, 평균입도의 분포범위도 유사하나, 실트 및 점토함량에 있어서도 큰 변화 없이 균일한 함량을 가진다. 즉, 실트함량은 42.1~46.6%, 점토함량은 52.3~56.5%로 거의 유사하다(신, 2004). 따라서 정점 1, 2, 3과 정점 4, 12, 13, 14는 현생 니질 퇴적물로 평균입도의 분포범위는 유사하지만 함량에 따른 퇴적물 조직 특성은 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 낙동강에서 유

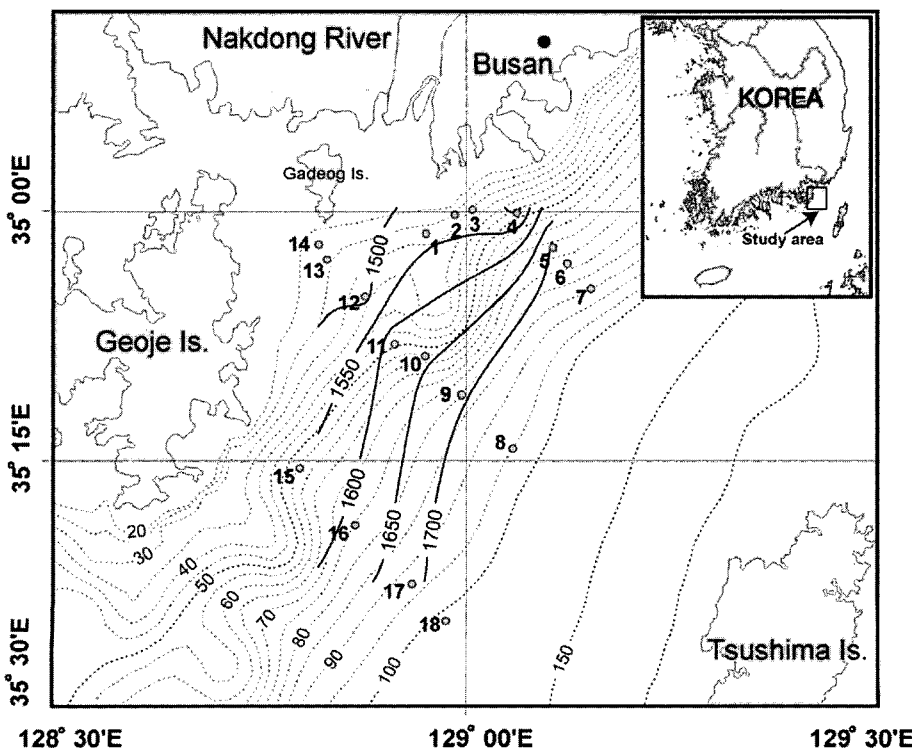


Fig. 5. Distribution of velocity (m/s) for sediments of 10 cm downcore.

출된 퇴적물이 해류를 따라 이동하면서 일어나는 분급 및 퇴적작용에 의한 것으로 해석된다.

이러한 정점별 조직값의 특성은 공극률과 전밀도 같은 물성값의 분포에서도 유사하게 나타난다. 공극률 분포(Fig. 3)의 경우 정점 1, 2, 3과 정점 4, 12, 13, 14 그리고 나머지 정점 간에 분포 대역의 차이가 뚜렷하게 존재한다. 즉, 정점 1, 2, 및 3의 값의 범위(약 63.5~66.0%)가, 정점 4, 12, 13, 14(약 73.4~75.4%)보다 낮다. 또한 사질함량이 높은 잔류퇴적물이 존재하는 정점의 경우 외해로 갈수록 감소하는 특징을 잘 보여주는데, 이런 분포는 실트 및 점토함량이 감소하고, 사질함량이 증가함에 따른 이유로 조직 특성을 잘 반영한다. 전밀도 분포(Fig. 4) 역시 조직값의 영향을 잘 반영하면서 공극률과 반대의 경향을 보인다. 이런 물성의 분포 경향은 본 연구지역주변에서 이미 제시된 Kim *et al.*(2001)과 서(1997)의 결과와도 비교적 잘 일치하는 결과다.

음파전달속도 분포(Fig. 5)도 측정상의 어려움으로 인한 자료의 부족으로 그 분포양상은 조금 상이하지만 조직 및 물성값의 양상을 반영하면서 사질 퇴적물이 우세하게 분포하는 외해로 갈수록 전반적으로 그 값이 증가한다. 이러한 분포양상은 Kim *et al.*(2001)과 서(1997)가 제시한 분포양상과 유사하나 각 정점 및 지역별 절대값과의 차이는 존재하는데 이는 측정방법의 차이 및 자료의 부족에 의한 원인으로 사료된다.

상기에서 제시한 평균입도 및 물성의 각각의 분포도를 보면 낙동강에서 유입된 부유퇴적물의 주요 이동 경로를 잘 반영하는 결과다. Fig. 6에서와 같이 낙동강에서 유입된 퇴적물은 남쪽 방향과 동쪽 방향의 흐름으로 구분되는데, 전자의 흐름은 거제도 동쪽 앞 바다에 대부분 퇴적되고, 후자의 흐름은 해안선을 따라 더 멀리 북동쪽으로 이동하여 부산-포항 간 남동쪽 해안선을 따라 퇴적되어 니질대(mudbelt)를 이루게 된다. 이와 같은 퇴적물의 이동은

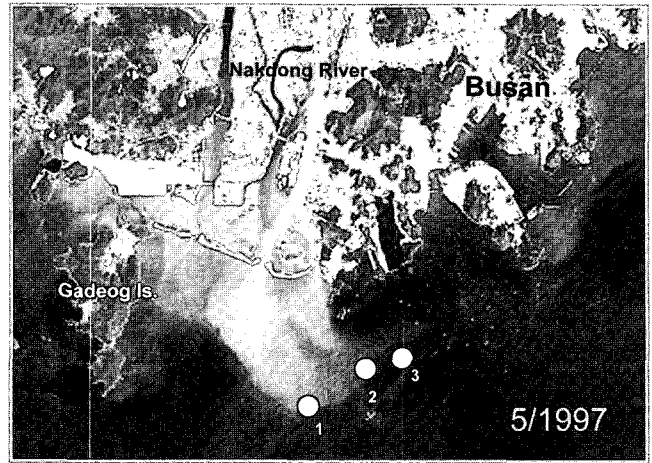


Fig. 6. Landsat image around the study area (modified from NASA). Note that the sediments from the Nakdong river are dispersed to the southeastern of Korea. Numbers 1, 2 and 3 are the core locations.

주변 해양의 조류와 해안선을 따라 진행되는 연안류의 복합적인 작용에 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다(Park, 1985; Kim *et al.*, 1986; Park and Chu, 1991; 김 등, 1996; Park *et al.*, 1999).

본 연구지역에서 알려진 퇴적작용을 고려하고 퇴적물의 특성값을 기초하여 연구지역을 세 지역(구역 I, II, III)으로 구분할 수 있다(Fig. 7, Table 1). 구역 I(정점 1, 2, 3)은 낙동강하구로부터 퇴적물이 직접 퇴적되는 지역, 구역 II는 낙동강 부유퇴적물이 남쪽 방향의 흐름에 의해 이동 퇴적되어 니질 퇴적물이 분포하는 지역, 구역 III은 현생 니질 퇴적물의 영향보다는 조립질 잔류퇴적물이 우세하게 퇴적되어 있는 지역이다. 이러한 퇴적물의 특성 차이에 의한 세부적인 지역분류는 퇴적과정 및 퇴적환경별로 퇴적물의 조

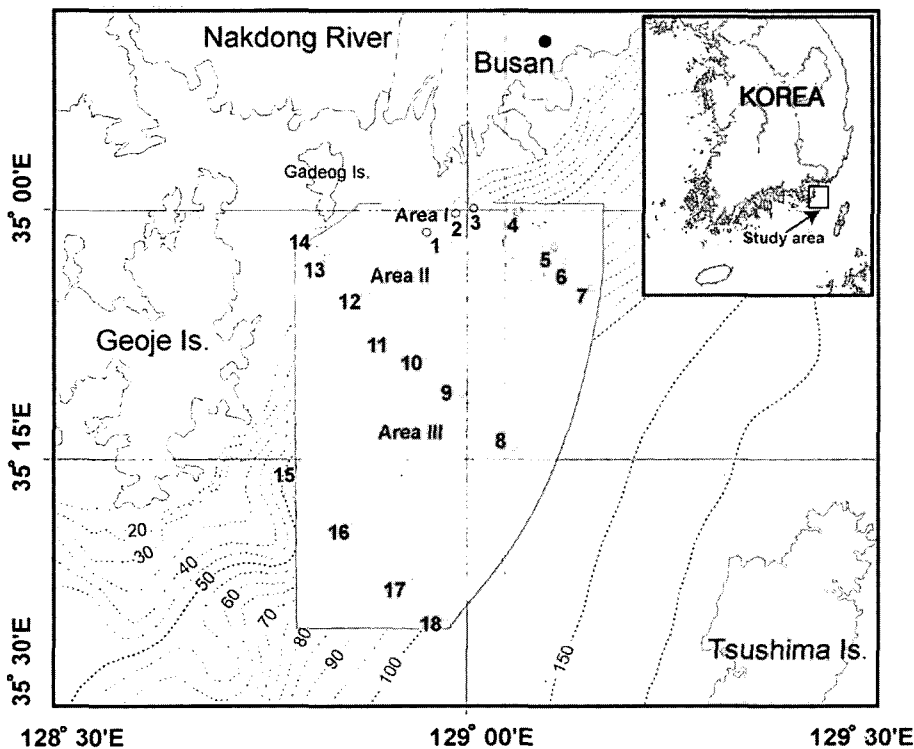


Fig. 7. Geotechnical divides of the study area according to sediment textural parameters and acoustic and physical properties.

Table 1. Sediment textural parameters and acoustic and physical properties of the three areas in the study area.

Area	Sediment Type	Mz (Φ)	Content (%)			Velocity (m/s)	Porosity (%)	Water Content (%)	Bulk Density (g/cm ³)	Grain Density (g/cm ³)	Shear Strength (kPa)
			Sand	Silt	Clay						
I	(g)M	6.6~8.3	1.2~9.1	36.9~64.0	26.8~60.1	1523~1536	63.5~66.0	40.4~44.3	1.58~1.67	2.67~2.79	2.5~4.0
II	(g)M	8.0~8.2	0.8~2.1	42.4~46.6	52.3~56.5	1483~1489	73.4~75.4	51.0~55.5	1.44~1.53	2.72~2.92	1.7~2.4
III	gS	0.9~4.4	38.1~95.4	3.1~23.4	1.5~56.8	1631~1709	29.2~65.5	13.3~42.2	1.65~2.33	2.65~2.86	3.4~8.6

직값이 다름을 의미하며 이는 물성 및 음향특성에 영향을 주기 때문에 지역별 구체화된 지음향모델 구축시 주요한 기준이 된다(Kim and Kim, 2001; Kim *et al.*, 2001; 김 등, 2004).

구역별(구역 I, II, III) 퇴적물 특성간의 상관관계

해양 퇴적물들은 퇴적물 조직, 물리적 특성 및 음파전달속도 사이에는 특징적인 상관관계가 있음이 알려져 있다(Hamilton, 1970, 1980; Hamilton and Bachman, 1982; Briggs and Fisher, 1991). 또한 이런 연구들은 각각의 상관관계를 이용하여 퇴적물의 조성이 유사할 경우 퇴적물의 조직을 이용하여 속도와 다른 물리적 특성 값을 계산할 수 있고, 그 반대의 경우도 가능하며, 이것을 이용하여 각 지역별 및 퇴적물 유형별 지음향모델을 구현하는데 사용하고 있다.

본 연구에서는 연구지역의 자료(구역 I, II, III)를 지음향모델의 선두주자인 Hamilton(1970)의 자료와 연구지역을 포함하는 주변 지역의 자료인 Kim *et al.*(2001)의 결과와 비교하여 각각의 상관관계 그래프를 도시하였다. 각 그래프들의 회귀곡선식은 부록(Appendix 1)에 기재 하였다.

음파전달속도-평균입도

평균입도는 입도분포를 나타내는 좋은 척도이다. 입도는 공극률과 연관되어 음파전달속도에 영향을 미치는데, 일반적으로 입도가 감소할수록 공극률이 증가하게 되며 따라서 음파전달속도는 감소하게 된다(Hamilton, 1970; Hamilton and Bachman, 1982). 본 연구지역에서도 평균입도가 증가할수록 음파전달속도가 증가하는 일반적인 경향을 보여(Fig. 8), Hamilton(1970)과 Kim *et al.*(2001)

의 회귀곡선과 비교적 유사하다. 구역 I과 II의 경우는 일반적으로 구역 I 보다 II에 분포하는 입자의 크기가 더 조립하나 평균입도에 의한 구분은 사실상 어렵기 때문에 하나의 회귀곡선으로 나타내었다. 각 구역별로 상관관계가 차이가 있음을 알 수 있으며, 특히 구역 I 및 II와 구역 III은 그 분포범위 및 양상에 있어 뚜렷한 차이를 보이고 있다.

음파전달속도-공극률

퇴적물 내의 공극률은 구성 광물입자의 형태, 크기, 조성, 퇴적 구조, 다짐작용에 의한 입자들의 배열 상태의 차이 등에 따라 복잡하게 연관되어 영향을 받는다. 일반적으로 공극률이 75%~90% 사이에서 변화할 경우 음파전달속도는 거의 변화가 없거나 약간 감소하는 경향을 보이고, 그 이하에서는 빠르게 상승한다(Hamilton, 1970, 1980; Hamilton and Bachman, 1982). 본 연구지역 역시 일반적인 경향을 따르고 있다(Fig. 9). 그러나 Hamilton(1970) 및 Kim *et al.*(2001)의 자료와는 절대값의 차이 및 회귀곡선의 차이가 있고 구역별로도 그 차이가 나타나고 있다. Hamilton(1970)의 경우 퇴적환경 및 퇴적물 유형의 차이가 주 요인이 될 것으로 해석되며, 유사한 지역에 대한 Kim *et al.*(2001)의 자료는 조립질 퇴적물의 경우는 음파전달속도 및 물리적 특성 값이 전혀 반영되지 않았고, 세립질의 경우에도 측정 방법의 차이로 인하여 절대값의 차이가 존재하기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

각 구역 별 상관관계 그래프에서도 공극률이 70% 부근에서는 유사한 상관관계를 보여주고 있으나 공극률이 낮은 경우는 회귀선의 형태가 많은 차이를 나타내고 있다. 이러한 원인은 퇴적물의 조직에 의한 차이가 각 속도 및 공극률의 상관관계에도 영향을 끼

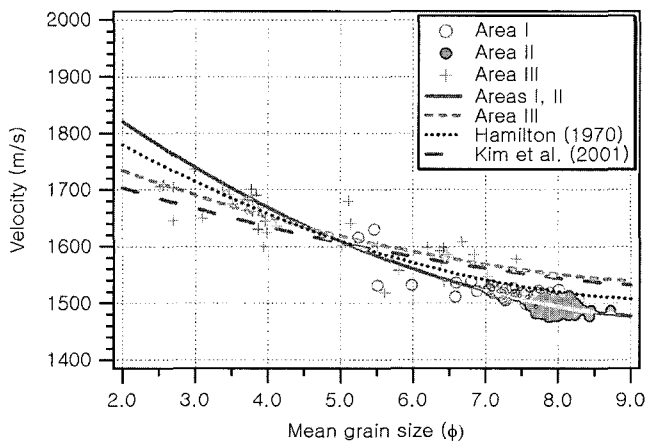


Fig. 8. Velocity (m/s) versus mean grain size (Φ) from this study, Hamilton (1970), and Kim *et al.* (2001).

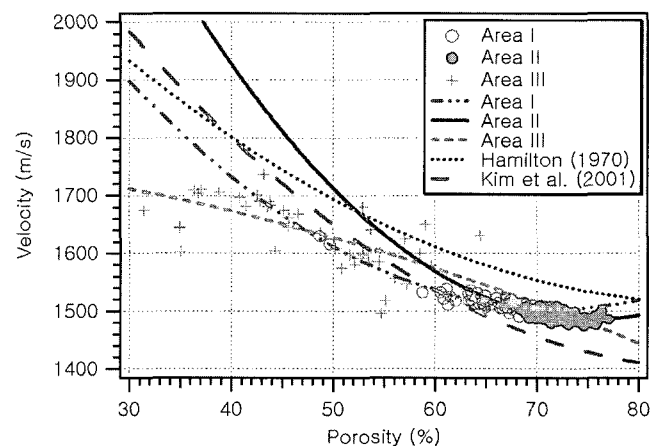


Fig. 9. Velocity (m/s) versus porosity (%) from this study, Hamilton (1970), and Kim *et al.* (2001).

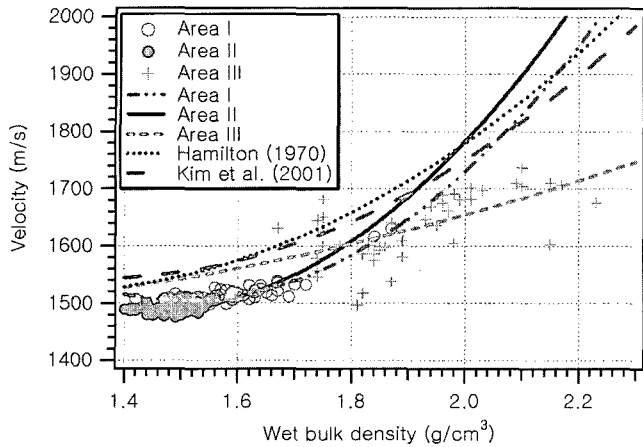


Fig. 10. Velocity (m/s) versus bulk density (g/cm³) from this study, Hamilton (1970), and Kim *et al.* (2001).

치고 있음을 지시해 주며, 따라서 퇴적물의 유형이 다를 경우 상관성 해석에 주의해야 함을 암시한다.

음파전달속도-전밀도

퇴적물의 전밀도는 입자광물의 성분, 속성작용, 원양성 퇴적물, 그리고 미고생물의 종류 및 함량 등에 의해 영향을 받는다(Hamilton, 1970). 전밀도는 특히 음파전달속도를 결정하는 계산식의 변수 중 하나로서 전밀도가 증가함에 따라 체적탄성률과 전단탄성율의 증가로 인해 속도는 이에 비례하여 증가한다(Hamilton, 1970, 1980; Hamilton and Bachman, 1982).

본 연구 자료(Fig. 10) 역시 일반적인 경향을 잘 따르고 있으며, Hamilton(1970) 및 Kim *et al.*(2001)과 비교해 볼 때 절대값의 차이와 회귀곡선의 형태가 상이하나 전반적인 경향은 유사하게 나타난다. 각 구역별 및 지역별 절대값의 차이가 나는 이유는 각 퇴적환경별 차이뿐만 아니라 본 연구 지역의 경우 다른 지역에 비해 사질 퇴적물의 음파전달속도 값이 포함되어 있기 때문이다. 특히, 사질 퇴적물로 구성된 구역 III의 경우 회귀선의 경향이 큰 차이가 나타나 퇴적물의 조직에 의한 값이 속도 및 전밀도의 상관성에 크게 영향을 주고 있음을 반영한다. 또한 조직값의 차이가 미미한 구역 I과 II도 그 상관성이 잘 구분되어 있다.

지음향모델

지음향모델이란 음향특성(음파전달속도, 감쇠)과 관계된 성질들

을 직접 현장 및 실험실에서 측정하거나, 외삽 혹은 예측하여 실제 해저면의 특성을 구현해 내는 것을 의미한다(Hamilton, 1970). 따라서 지역별 및 퇴적환경별로 정확한 지음향모델이 구현될 경우 수중음향학, 지구물리학, 층서학, 퇴적학 등 다양한 분야에서 해저면 및 해저 지층을 해석하는데 효율적으로 이용 될 수 있다. 또한 정확한 모델이 구현될 경우 유사한 환경 및 퇴적물 유형을 지닌 다른 지역에도 그 모델을 적용 할 수 있는 것으로 알려져 있다(Hamilton 1980).

연구지역을 포함하는 주변지역에 대한 기존의 지음향모델로서는 실측치가 아닌 계산치를 이용하여 제시한 Briggs and Fischer (1991)와 일부 실측치 및 계산치를 사용한 서(1997) 및 Kim *et al.* (2001)의 자료가 있으며 이들을 본 연구의 자료와 비교하여 새로운 지음향모델을 제시하고자 한다.

앞에서 이미 설명한 바와 같이 본 연구지역은 퇴적물 조직, 물리적 특성 및 음파전달속도를 기준으로 3개의 구역(구역 I, II, III)으로 구분되며, 구분된 각 구역의 모든 정점에 대한 자료와 계산치를 바탕으로 하여 구현된 구역별 지음향모델은 Table 2와 같다. 또한 연구지역을 포함하고 있는 기존의 모델(Briggs and Fisher, 1991; 서, 1997, Kim *et al.*, 2001)도 함께 제시하였다.

지음향모델에서 구역 I, II, III의 음파전달속도(V_p)와 전밀도, 구역 I, II의 음파감쇠(K_p)는 실측치이며, 구역 III의 음파감쇠와 모든 구역의 횡파전달속도(V_s) 및 횡파감쇠(K_s)는 계산치이다. 또한 구역 III의 종파감쇠(K_p)는 Hamilton(1980)의 식을 이용하였으며, 계산식에 필요한 표층 종파감쇠 값은 Briggs and Fischer(1991)의 구역 중 유사한 구역의 값을 사용하였다. 횡파전달속도(V_s)의 경우 니질퇴적물이 우세한 구역 I, II는 Richardson *et al.*(1991)의 식을 이용하였고, 사질퇴적물이 우세한 구역 III은 Hamilton(1976)의 식을 사용하여 계산하였다. 횡파감쇠(K_s)는 모든 구역에서 Hamilton(1980)의 식을 사용하였으며, 계산에 필요한 표층 횡파감쇠 값은 Briggs and Fischer(1991)가 제시했던 구역 중 유사한 구역의 값을 이용하였다.

Briggs and Fischer(1991)는 동남해역과 남해안 일대를 포함한 지역을 퇴적물 조직과 관련하여 17개의 지음향학적 지역구분을 하였고, 그 중 본 연구지역을 포함하는 구역은 3, 7, 8, 9번 지역들이나, 본 연구지역의 구역 I, II와 비교 가능한 8, 9번 지역의 음파전달속도(V_p), 횡파전달속도(V_s), 음파감쇠(K_p), 및 밀도에서 그 차이값을 확인 할 수 있다.

Kim *et al.*(2001)이 제시한 부산 지역의 지음향모델의 경우 본 연구지역의 구역 II와 비교 할 수 있으나 음파전달속도(V_p) 값이

Table 2. Geoacoustic models (This study, Briggs and Fischer (1991), Seo (1997) and Kim *et al.* (2001)). (V_p : P-wave velocity, V_s : S-wave velocity, K_p : P-wave attenuation, K_s : S-wave attenuation).

Area	Sediment Type	V_p	V_s	K_p	K_s	Density (g/cm ³)
		(m/s)		(m/s)		
I	slightly gravelly mud	1528	67	0.55	17.3	1.63
II	mud	1486	58	0.44	17.3	1.48
III	sand	1664	88	0.60	13.3	1.93
Busan (Kim <i>et al.</i> , 2001)	silty clay	1545	28	0.076	17.3	1.42
Mid-shelf (Seo, 1997)	muddy sand	1707	67	0.556	13.2	1.94
Area 8 (Briggs and Fischer, 1991)	sand-silt-clay	1535	52	0.600	13.3	1.58
Area 9 (Briggs and Fischer, 1991)	silty clay	1473	33	0.075	17.3	1.48

차이가 있으며, 이는 측정 방법의 차이에서 기인하는 것으로 보인다. 또한 음파감쇠(K_p)의 경우도 본 연구는 실측치이며, Kim *et al.* (2001)의 경우 계산치이기 때문에 값의 차이가 나타나는 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에 의해 구현된 부산지역의 지음향모델을 기존의 결과(Kim *et al.*, 2001)에 대한 수정모델 및 연구지역의 새로운 지음향모델로 제시하고자 한다. 또한 서(1997)의 중간 대륙붕(mid-shelf)은 지형적으로 본 연구지역에서 외해 쪽으로의 연장선상에 해당되므로, 본 연구에서 제시한 구역 III의 지음향모델은 서(1997)가 제시한 외해쪽의 모델과 상호보완 할 수 있는 자료로 적용가능하며, 이는 점진적으로 증가하는 음파전달속도(V_p) 및 전밀도 값으로 도 그 가능성을 잘 뒷받침 해준다.

결 론

본 연구결과 표층 퇴적물의 조직, 물리적 성질 및 지음향 특성은 아래와 같이 세 구역으로 구분이 가능하였다. 즉, 구역 I: 낙동강하구로부터 유입된 퇴적물이 직접 퇴적되는 지역, 구역 II: 낙동강 부유퇴적물이 남쪽 방향으로 이동 및 퇴적된 니질 퇴적물 지역, 구역 III: 조립질 잔류퇴적물이 퇴적되어있는 지역.

각 구역별로 퇴적물 특성 중 평균입도, 음파전달속도 및 전밀도는 구역 I(각각 7.4Φ , 1528 m/s , 1.6 g/cm^3)에서 구역 II(각각 8.1Φ , 1485 m/s , 1.5 g/cm^3)로 줄어들다가 구역 II(1.4Φ , 1664 m/s , 2.2 g/cm^3)로 급격히 증가하는 경향을 보이는 반면, 공극률은 구역 I (64.5%)에서 구역 II(73.9%)로 증가하다 구역 III(32.9%)에서 감소한다.

각 구역 별 음파전달속도, 평균입도 및 물리적 특성(공극률, 전밀도, 전단응력)간의 상관관계와 그 회귀곡선을 구한 결과 각 퇴적물 특성간 상관성을 잘 보여주었다. 또한 이 회귀곡선을 기존 자료와 비교한 결과도 전반적인 경향은 유사하나 지역별 환경별 차이가 존재함을 잘 보여주었다. 결론적으로 구역 I, II, III에 대한 각각의 구체화된 지음향모델을 제시하여, 기존의 지음향모델을 수정 및 보완 할 수 있도록 하였다.

사 사

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-050-C00017). 본 연구를 위한 시료 채취에 도움을 주신 한국지질자원연구원 탐해 2호 승무원 및 동 연구원 연구원님들께 진심으로 감사드립니다. 또한 시료분석에 도움을 주신 부경대학교 환경탐사공학과 퇴적물음향학 연구실의 대학원생께 고마움을 전하며, 부족한 논문을 심사하여주신 최진혁박사님 및 이희준박사님께도 감사드립니다.

참고문헌

건교부, 1976. 낙동강 조사보고서. 건교부, pp. 1-56.
 김길영, 김대철, 박수철, 유동근, 최진혁, 김정창, 1996. 한국 남동해역 사질퇴적물의 물리적 성질. 한국수산학회지, **29**: 663-676.
 김길영, 성준영, 김대철, 김정창, 1994. 여수해만 주변해역 퇴적물의 물리적 및 음향학적 성질. 한국수산학회지, **27**: 434-444.

김대철, 김길영, 1991. 광양만 미고결퇴적물의 물리적 및 음향학적 성질: 북태평양 대륙붕 및 사면자료와의 비교. 한국수산학회지, **24**: 289-302.
 김대철, 박용안, 이창복, 강효진, 최진혁, 1992. 남해 대륙붕지역의 퇴적작용과 물성특성. 지질학회지, **28**: 604-614.
 김대철, 김길영, 서영교, 하덕호, 하인철, 윤영석, 김정창, 1999. 해양퇴적물의 자동음파전달속도 측정장치. 한국해양학회지 '바다', **4**: 400-404.
 김대철, 서영교, 정자현, 김길영, 2004. 남해 및 남동해역 대륙붕 퇴적물의 지음향 특성, 한국수산학회지, **37**: 312-322.
 서영교, 1997. 대한해협 퇴적물의 음향 및 물리적 특성. 석사학위논문, 부산수산대학교, 77 pp.
 성준영, 1994. 남해 대륙붕 퇴적물의 퇴적환경과 음향모델. 석사학위논문. 부산수산대학교, 114 pp.
 수로국, 1982. 한국해양환경도. 38 pp.
 신보경, 2004. 거제도 동쪽 해역 대륙붕 퇴적물의 지음향모델, 석사학위논문, 부경대학교 대학원 해양학과, 95 pp.
 정자현, 2001. 남해 내대륙붕 퇴적물의 현장음파전달속도와 실험실 음파전달속도 비교. 석사학위논문, 부경대학교 대학원 응용지질학과, 61 pp.
 Boyce, R.E. 1976. Definition and laboratory techniques of compressional sound velocity parameter and wet-water, wet bulk density, and porosity parameter by gravimetric and gamma ray attenuation Zion techniques. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 33, Washington, DC, U.S. Government Printing Office. pp. 931-958.
 Briggs, K. and R. Fisher, 1991. Geoacoustic model of the strait of Korea. NOARL Technical Note, pp. 1-44.
 Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. A study in the significance of grain-size parameters. J. Sed. Petrology, **27**: 3-27.
 Folk, R.L., 1968. Petrology of sedimentary rocks. Hamphill's Austin, Texas, 170 pp.
 Hamilton, E.L., 1970. Sound velocity and related properties of marine sediments, North Pacific. J. Acoust. Soc. Am., **72**: 1891-1904.
 Hamilton, E.L., 1976. Shear wave velocity depth in marine sediments. A Review. J. Geophysics, **41**: 985-996.
 Hamilton, E.L., 1980. Geoacoustic modeling of the sea floor. J. Acoust. Soc. Am., **68**(5): 1313-1340.
 Hamilton, E.L and R.T. Bachman, 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. J. Acoust. Soc. Am., **72**(6): 1891-1904.
 Kim, D.C., J.Y. Sung, S.C. Park, G.H. Lee, J.H. Choi, G.Y. Kim, Y.K. Seo and J.C. Kim, J.C. 2001. Physical and acoustic properties of shelf sediments, the South Sea of Korea. Mar. Geol., **179**: 39-50.
 Kim, G.Y. and D.C. Kim, 2001. Comparison and correlation of physical properties from the plain and slope sediments in the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). J. Asian Earth Sciences, **19**: 669-681.
 Kim, M.S., K.S. Chu and O.S. Kim, 1986. Investigation of some influence of the Nakdong River water on marine environment in the estuarine area using Landsat Imagery. Rot. Korea Ministry Sci. Technology, pp. 93-147.
 Kim, W.H. and Y.A. Park, 1980. Microbiogenic sediments in the Nakdong Estuary, Korea. J. Oceano. Soc. Korea, **15**: 34-48.

- Park, S.C. and D.G. Yoo, 1988. Depositional history of Quaternary sediments on the continental shelf off the southeastern coast of Korea (Korea Strait). *Mar. Geol.*, **78**: 65–75.
- Park, S.C. and K.S. Chu, 1991. Dispersal patterns of river-derived fine-grained sediments on the inner shelf of Korea Strait. *Elsevier Oceanography Series*, **54**: 231–240.
- Park, S.C., D.G. Yoo, K.W. Lee and H.H. Lee, 1999. Accumulation of recent muds associated with coastal circulations, southeastern Korea Sea (Korea Strait). *Cont. Shelf Res.*, **19**: 589–608.
- Park, Y.A., 1985. Late Quaternary sedimentation of the continental shelf off the southeast coast of Korea, a further evidence of relict sediments. *Jour. Oceano. Soc. Korea*, **20**: 55–61.
- Richardson, M.D., E. Muzi, B. Miasch and F. Turgutcan, 1991. Shear wave velocity gradients in near-surface marine sediment. *Shear Waves in Marine Sediments*, pp. 295–304.
- Toksoz, M.N., D.H. Johnston and A. Timur, 1979. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements, *Geophysics*, **44**: 681–690.
- Yoo, D.G., 1997. Sequence stratigraphy, depositional history and environment of the Plio-Quaternary deposits on the Korea Strait Shelf. Ph.D Thesis, Chungnam National University Daejeon, 212 pp.

2005년 1월 11일 원고접수
 2005년 4월 22일 수정본 채택
 담당편집위원: 강효진

Appendix. Equations for the regression curves

I: area I, II: area II, III: area III, Kim: Kim *et al.*'s Busan (Kim *et al.*, 2001), H: Hamilton's North Pacific (Hamilton, 1970).

Velocity (m/s, V_p) vs. Mean Grain Size (Φ , M_z)

$$(I\&II) \quad V_p = 2015.5 - 107.96M_z + 5.3524M_z^2$$

$$(III) \quad V_p = 1838.2 - 57.10M_z + 2.6553M_z^2$$

$$(H) \quad V_p = 1938.2 - 87.8M_z + 4.44M_z^2$$

$$(Kim) \quad V_p = 1787.4 - 45.7M_z + 1.92M_z^2$$

Velocity (m/s, V_p) vs. Porosity (% , n)

$$(I) \quad V_p = 2666.6 - 32.35n + 0.2251n^2$$

$$(II) \quad V_p = 34.95 - 53.38n + 0.3544n^2$$

$$(III) \quad V_p = 1781.6 - 1.206n - 0.0357n^2$$

$$(H) \quad V_p = 2479.1 - 21.9n + 0.124n^2$$

$$(Kim) \quad V_p = 2745.5 - 30.6n + 0.194n^2$$

Velocity (m/s, V_p) vs. Density (g/cm^3 , ρ)

$$(I) \quad V_p = 3622.2 - 2807.9\rho + 930.84\rho^2$$

$$(II) \quad V_p = 3464.1 - 2744.4\rho + 951.8\rho^2$$

$$(III) \quad V_p = 1518 - 139.47\rho + 103.88\rho^2$$

$$(H) \quad V_p = 2249.7 - 1167.6\rho + 466.2\rho^2$$

$$(Kim) \quad V_p = 2430.0 - 1315.1\rho + 487.5\rho^2$$