

퇴적물속도측정기를 이용한 대한해협 사질퇴적물의 음향특성

Acoustic Property of Sandy Sediment in the Korea Strait Using Sediment Sound Velocimeter

서 영 교*, 김 대 철**
(Young Kyo Seo*, Dae Choul Kim**)

* 본 연구는 한국학술진흥재단의 '94 대학부설연구소 지원프로그램에 의해 수행되었습니다.

요 약

사질퇴적물의 함량이 높은 대한해협 퇴적물에 대해 새로운 음파전달속도 측정 장비(sediment sound velocimeter)를 이용 음파전달속도와 물리적 성질을 측정하여, 연구지역의 지음향 및 물리적 특성을 제시하였다. 연구지역 퇴적물의 물성 및 음파전달속도 변화는 조직의 변화에 의해 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 연구결과 음향 및 물성 값을 바탕으로 연구지역을 3개 지역(provinces; mid-shelf, shelf margin and trough)으로 구분할 수 있었으며, 이러한 결과는 탄성과 단면 분석을 통해 시스템 트랙과 퇴적계로 지역구분한 기존의 결과[14]와 잘 일치한다. 연구를 통해 새롭게 제시된 3개 지역의 지음향모델은 Briggs and Fischer[5]가 제시한 기존의 대한해협 지음향모델의 수정모델로 제시한다.

핵심용어: 음파전달속도, 물리적 성질, 지음향모델, 퇴적물속도측정기, 대한해협

ABSTRACT

Laboratory determinations of acoustic and physical properties in Korea Strait sediment were carried out. Sediment sound velocimeter(SSV) was employed to measure the sound velocity of sandy sediment. Distribution patterns of the acoustic and physical properties are controlled by sediment texture. The study area is divided into three provinces(mid-shelf, shelf margin and trough) based on the acoustic and physical properties. This classification matches well with the previous result[14] based on the systems tracks and depositional systems. We suggest a geoacoustic model of the Korea Strait that replacing the old model of Briggs and Fisher[5].

Key words: Sound Velocity, Physical property, Geoacousti model, Sediment sound Velocitmeter, Korea Strait

투고분야: 수중음향(5.3)

1. 서 론

해저퇴적물의 음파전달속도에 대한 연구는 1950년대부터 시작되었으며, 1960년대를 거치면서 많은 양의 자료들이 축적되기 시작하였다. 이들 자료 축적을 통해 해저퇴적물의 퇴적환경 차이, 조직 및 음향특성간의 상호관계 및 탄성 특성 등의 연구에 관한 새로운 접근을 가능하게 하였다. 해저퇴적물의 지음향모델(geoacoustic model)은 음파전달과 관계된 지구물리학의 한 분야에 속하며, 수중 음향학의 측면에서 중요한 의미를 가지는 성질들을 실측, 외삽, 예측 등에 그 초점을 맞추어 실제 해저면의 모델을 만드는 것이다[1].

해양퇴적물의 음파전달속도와 물리적 성질은 지질공학이나 탐사물리학, 그리고 군사적으로도 매우 중요한 역할을 한다. 심해에서 광각의 탄성과 반사법을 이용한 탐사를

할 때 퇴적층의 두께를 계산하기 위하여 각층별도 음파 전달속도를 알고 있어야 한다[2]. 그런데, 탄성과 자료분석을 통해 계산해 낸 값과 실측치간에 차이가 나는 경우 층후계산이 틀리게 되므로 실측치가 필요하다. 정확한 반사면의 위치와 반사계수와 직접적인 관계가 있는 음향임피던스를 계산하기 위하여도 시추코어에 대한 음파전달속도와 물리적 성질의 측정이 필요하다[3].

한반도 주변 해역에서의 퇴적물내의 음파전달속도와 물리적 성질 등에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 특히 측정장비와 기술상의 문제로 사질퇴적물이 우세한 지역에 대한 연구는 김 등[4]의 연구를 제외하고는 주 연구대상이 니질 퇴적물(muddy sediment)이었다. 그리고, 지음향모델과 관련된 연구는 Briggs and Fischer[5]와 성[6]의 연구에 국한되었다.

대한해협의 해양지질학적 연구는 비교적 많은 편인데 주로 퇴적물 분포와 퇴적상에 관한 연구, 탄성과 단면을 이용한 퇴적환경에 관한 연구 등에 국한되어 있고 실측 자료는 거의 없다. 따라서 지음향 모델도 제대로 만들어

* 부경대학교 응용지질학과

** 부경대학교 탐사물리학과

접수일자: 1999년 11월 10일

지지 않고 있는데 유일하게 대한해협을 포함하고 있는 Briggs and Fisher [5]의 자료도 실측치에 근거하지 않고 퇴적물 조식을 이용한 간접 계산에 의한 모델이기 때문에 신뢰도에 문제가 있다. 실제로 성[6]은 남해대륙붕 지역에서 Briggs and Fisher[5]모델의 오류를 지적한 바 있다.

본 연구는 새로운 장비인 퇴적물속도측정기(sediment sound velocimeter)와 기존에 사용되어 온 밀도측정기(pycnometer)를 이용하여 사질퇴적물의 함량이 높은 대한해협 퇴적물의 음파전달속도와 물리적 성질을 측정하여 음향 및 물리적 특성과 각 계수간의 상관관계를 이용하여 지음향모델을 제시함을 목적으로 한다.

II. 연구지역

연구지역의 해저지형은 부산을 기점으로 남동 방향으로 수심 약 80m까지의 경사도가 5.7°로서 비교적 가파르며 수심 80 ~ 120m 사이에서는 최저 기울기가 0.65°인 비교적 평탄한 지형을 보이나 수심 120m를 경계로 급경사가 나타난다(그림 1). 거제도를 기점으로 한 해저지형은 남동방향으로 수심 120m까지 비교적 평탄한 경사도(0.65°이하)를 가진다. 북동-남서방향의 대한해협(Korea Trough)은 한국 쪽으로는 최대 15.6°, 대마도 쪽으로 최대 10.2°의 기울기를 갖고 발달하고 있으며, 해곡 바닥의 폭은 최대 20km이고 최대수심은 227m이다[7].

연구지역을 포함하는 동남해역의 일반적인 해수유동은 쿠로시오 지류인 쓰시마 난류가 연구지역의 북동방향으로 흘러 동해로 유입되며, 대한해협에서의 유속은 30 ~ 90cm/s로 하계동안에 더 강한 속도를 보인다. 연안지역에서 조류의 흐름은 밀물 때(flood tide) 연구지역을 중심으로 서-남서 방향, 썰물 때(ebb tide) 동-북 방향으로 흐른다[8][9].

동남해역의 현생 세립질 퇴적물은 대부분 낙동강에서 기원한 것이며 주로 수심 70m 이내에 분포한다[10][11]. 중간대륙붕과 외대륙붕에 존재하는 조립질 퇴적물들은 후기 플라이스토세 시기 해수면이 낮았을 때 해안선 가까이에서 형성된 잔류퇴적물로 밝혀진 바 있다[12][13]. 이들 연구 중 Yoo[14]에 의하면 플라이스토세 후기 - 현재까지 대한해협 대륙붕을 5단계(stage)의 큰 해수면 변화와 관련지어 7개의 퇴적계(depositional system)로 구분하였고, 이를 3개의 시스템 트랙(systems track)으로 구분하였다.

연구 지역의 중앙에 위치하고 있는 낙동강은 다량의 쇄설성 퇴적물을 유출시켜 대한해협 뿐만아니라 남동 해역의 퇴적작용에 영향을 미치고 있다. 낙동강은 유역 면적이 23,860km²에 달하며 연간 담수 유출량은 63 × 10⁹ ton에 이르고 그 중 약 60 ~ 70% 이상이 홍수기인 7, 8월에 집중되며 이 기간동안 약 10 × 10⁶ton에 달하는 퇴적물이 유입된다[15]. 이러한 쇄설성 퇴적물 중 조립한 사질퇴적물의 대부분은 강하구를 중심으로 퇴적되며 다양한 형태의 모래사구를 포함하는 넓은 삼각주를 형성하고 있다[16].

Kim et al.[16]은 낙동강입구에서 부유 퇴적물 농도를 이용 부유 퇴적물 양을 계산하였으며 매년 약 46 × 10⁹ ton의 부유 퇴적물이 낙동강에서 유출되는 것으로 보고하

였다. Park et al.[17]은 낙동강에서 유출되는 부유 퇴적물의 약 21%(1.0 × 10⁶ton)는 진해만에 퇴적되고, 약 14%(0.65 × 10⁶ ton)는 부산과 거제도 사이의 내만에 퇴적된다고 하였다.

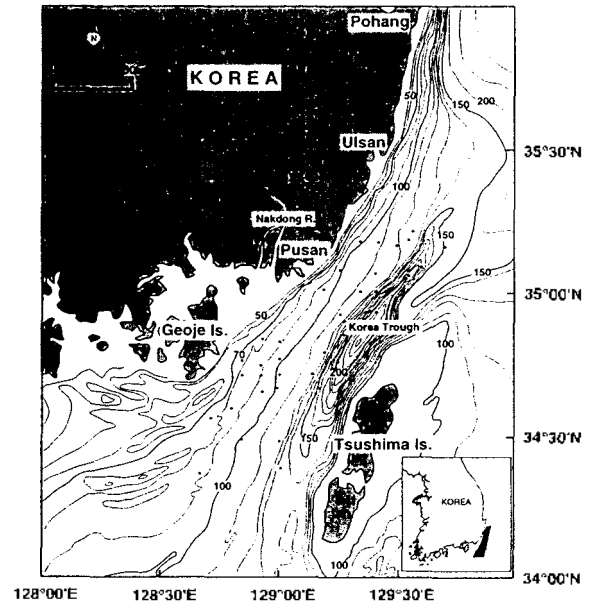


그림 1. 연구지역 코어시료채취 정점 및 수심(m)
Fig. 1. Bathymetry and coring sites of the study area. Contours in meters.

III. 재료 및 방법

본 연구에 사용된 주상시료는 부경대학교 해양탐사선 탐양호를 이용하여 총 46개 정점에서 중력시추기(gravity corer)와 피스톤 시추기(piston corer)를 이용하여 채취하였다(그림 1).

채취된 코어시료를 실험실에서 세로로 절개하여 깊이 별로 퇴적물 조식, 물리적 성질(공극률, 함수율, 전밀도, 입자밀도), 음파전달속도 등을 측정하였다. 각 코어 시료의 채취 간격은 조성성분 혹은 퇴적구조의 변화 양상에 따라 조절하였으며 보통 10 ~ 30cm 이내로 하였다.

퇴적물의 음파전달속도 측정을 위하여 니질퇴적물에 사용하는 방법[2][3]이 아닌 사질퇴적물 시료에 적합하도록 고안된 속도 측정기(Otronix Model 93-M : Sediment sound velocimeter)를 이용하였다(그림 2). 이 속도 측정기의 구성을 보면 직접 시료와 접촉되는 변환기(transducer)가 부착되어 있는 2개의 probe부분과 probe에 전기신호를 보내고 이를 수신한 후 증폭시켜 실제로 음속을 제어하여 컴퓨터에 보내는 SSV(sediment sound velocimeter) card가 있고 이를 종합적으로 연결 제어하는 소프트웨어 등으로 되어있다. 또한 실제로 측정된 음향신호를 볼 수 있도록 디지털스코프(digitizing scope)와 기판 카드(gagescope card)가 설치되어 있으며, 이 두개의 기판을 연결해주는 소프트웨어도 같이 포함 되어있다. 속도측정기를 이용한 측정

순서는 다음과 같다. ① 캘리퍼를 이용하여 변환기간의 정확한 거리를 측정하고, ② 증류수에서 속도 측정을 하여 온도에 따른 속도값을 표준값과 비교하여 보정하고, ③ 보정후 probe를 측정하고자 하는 시료에 삽입한다. 이때 변환기는 충분히 시료에 삽입되어야 하고 시료와 변환기간에 접촉을 좋게하기 위하여 접촉매질로 증류수를 사용한다. ④ 이 과정이 완료되면 모니터상의 명령에 따라 측정을 실시한다. 본 장치의 가장 큰 잇점은 직접 코어에 삽입하기 때문에 사질 퇴적물처럼 비교적 쉽게 교란될 수 있는 시료의 속도 측정이 용이하다는 점이다.

물리적 성질(습윤전밀도, 입자밀도, 함수율, 공극율)도 코어의 일정한 깊이 에 따라 습윤무게(wet sample weight), 건조무게(dry sample weight), 습윤부피(wet sample volume), 건조부피(dry sample volume)를 측정하여 계산하였다. 시료의 부피는 자동밀도측정기(Quantachrome : Ultracycrometer 1000)와 수동방식의 밀도측정기(Micromeritics : Multivolume Pycnometer 1305)를 이용하여 측정하였다. 자동 및 수동 밀도측정기에는 정확한 부피를 구하기 위해서 불활성이며 원자크기가 작아서(1A: $10^{-10}m$) 아주 작은 공극 및 틈에도 침투 가능한 헬륨가스를 사용하였다.

퇴적물의 조직은 코어의 깊이에 따라 시료중 일정량을 취하여 10% 염산으로 탄산염을 제거한 후에 6%의 과산화수소수(H_2O_2)로 유기물을 제거하고 증류수를 이용하여 용해성 염분을 제거한 후 4 ϕ (0.062mm) 체로 습식체질을 하여 측정하였다. 4 ϕ 이상의 조립질부(모래크기 이상)는 건조시킨 후 로탭요동기(Ro - tap Sieve Shaker)를 사용하여 1 ϕ 간격으로 입도별 중량백분율을 구하였다. 세립질 부분에 대해서는 피펫법과 자동입도측정기(Micromeritics: Sedigraph 5100)를 병행하여 분석하였다. 분석결과는 Folk and Ward[18] 및 Folk[19]의 모멘트 방법으로 통계 처리하여 각종 조직표준치를 구하였다.

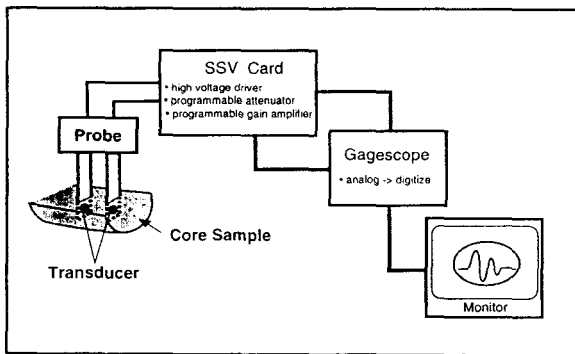


그림 2. 퇴적물 속도 측정기의 구성도
Fig. 2. A schematic diagram of sediment sound velocimeter system.

IV. 결과 및 고찰

코어 채취시 발생하는 교란현상을 고려하여 코어 10cm 깊이에서 측정된 조직 및 물성 값으로 표층퇴적물의 각

종 분포도를 작성하였다. 본 연구에서는 Yoo[14]의 단성과 단면을 통한 시스템 트랙(systems track)과 퇴적계(depositional system)를 바탕으로 하여 해침퇴적체계(transgressive depositional system)에 의해 형성된 수심 70 ~ 120m 지역은 mid-shelf, 해변-해안전면 복합퇴적체계(beach-shoreface complex depositional system)에 의해 형성된 수심 120 ~ 150m 지역은 shelf margin, 그리고 저해수면 삼각주퇴적체계(lowstand deltaic wedge depositional system)에 의해 형성된 수심 150m 이상 지역은 trough로 나타내었다(그림 3, 표 1).

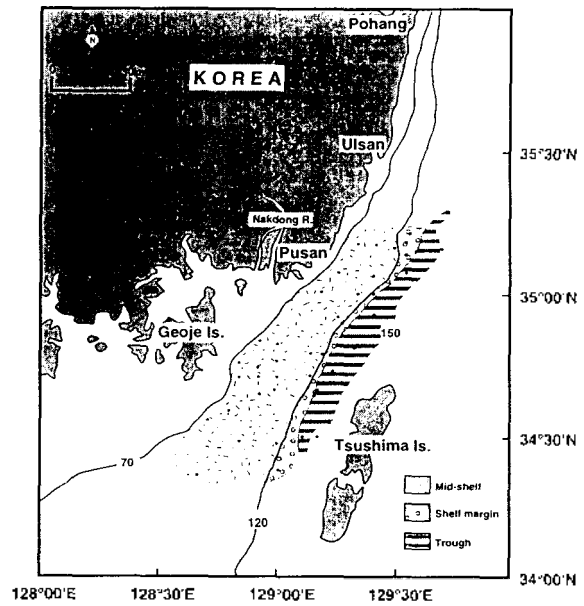


그림 3. 시스템 트랙과 퇴적계에 따른 연구지역의 분류
Fig. 3. Grouping of the study area by systems tracks and depositional systems.

표 1. 연구지역 표층퇴적물 지음향모델과 다른 연구결과에 의한 지음향모델의 예
Table 1. Geoacoustic model of the study area. Models of other studies are also listed.

Province	Sediment Type	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	Kp	Ks	Density (g/cm ³)
Texas	Mid shelf	1707	67	0.256	13.7	1.91
Swiss	Shelf Margin	1733	67	0.255	13.7	1.96
	Trough	1261	29	0.151	12.5	1.55
Other:	Pusan (Sung, 1994)	1545	28	0.075	12.5	1.42
	7 (Brooks and Fischer, 1991)	1780	133	0.630	18.9	2.03
	8 (Brooks and Fischer, 1991)	1838	82	0.600	13.2	1.55

4.1. 평균입도 분포

연구지역의 평균입도 범위는 2 ~ 7 ϕ 인데 현생니질대와 접해있는 mid-shelf 지역의 기제도 남동쪽지점과 부산앞지점을 제외하고는 사질이 우세하여 4 ϕ 이상의 조립한 값을 가진다(그림 4). Mid-shelf 지역에서 shelf margin 지역으로 갈수록 조립해진다. Trough 지역에서 다시 6 ϕ 이상이므로 세립화되는 양상을 잘 볼 수 있다. 이들 조립질 퇴적물들은 후기 빙하기 해수면이 낮았을때 형성된 잔류퇴적물(relict sediment)이며, trough 지역의 세립질퇴적물

(2 ~ 70)은 해수면이 낮았을 시기에 형성된 퇴적환경 (lowstand deltaic wedge)에서 퇴적된 것으로 알려져 있다[14].

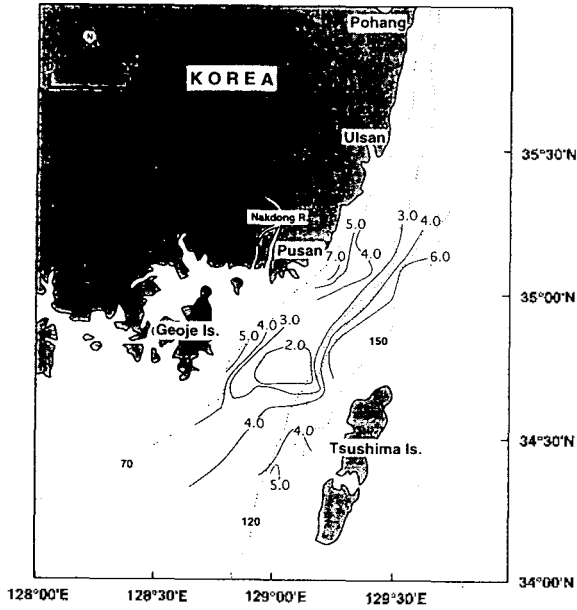


그림 4. 퇴적층 깊이 10cm에서 평균입도(ϕ) 분포
Fig. 4. Mean grain size(ϕ) distribution at 10cm subbottom depth.

shelf margin 지역에서 약 1.90g/cm^3 정도로 증가하다가 trough 지역에서는 $1.40 \sim 1.70\text{g/cm}^3$ 로 다시 감소한다(그림 5). 전밀도는 광물조성이 유사한 경우 퇴적물의 조직에도 좌우되는데 일반적으로 조립질이 세립질보다 크다[20]. 실제로 본 연구지역의 경우도 전밀도 분포와 평균입도 분포가 매우 유사하게 나타났다(그림 4 와 5). 남해도 남부지역 내 대륙붕 퇴적물의 전밀도는 $1.41 \sim 1.57\text{g/cm}^3$ [21]이고, 남해 - 부산 - 울산 지역의 전반적인 전밀도는 $1.40 \sim 1.50\text{g/cm}^3$ 로 그 값이 본 연구지역이 전반적으로 높음에 이는 사실퇴적물의 일반적인 특성과 일치한다[6].

연구지역의 공극율은 40 ~ 70%의 범위를 보인다(그림 6). 공극율 분포는 평균입도 분포양상과 유사하게 mid-shelf 지역에서 외해로 갈수록 감소하다 니질퇴적물 함량이 증가하는 trough 지역에서 70%까지 증가하는 양상을 보여준다. 이러한 양상은 공극율이 퇴적물의 조직과 관련 있음을 잘 보여주고있다. 남해 - 부산 - 울산을 거치는 현생 니질퇴적물의 공극율은 하천에 비교적 인접한 지역에서 외해로 갈수록 75%까지 증가하다가 중간 대륙붕을 경계로 감소한다[6]. 조[22]의 여수 - 남해간 표층 퇴적물의 공극율 자료에 의하면 본 연구지역과 같이 모래 함량이 많은 지역에서는 35 ~ 65%로 니질퇴적물에 비해 현저하게 감소하는 것으로 보고 되어있다.

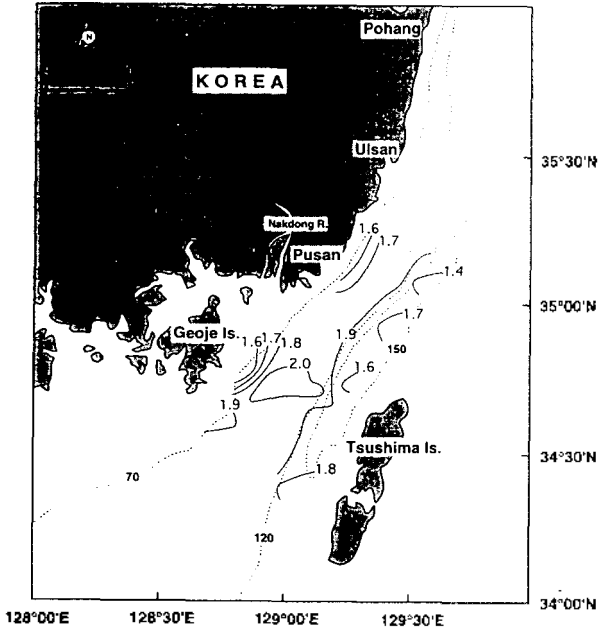


그림 5. 퇴적층 깊이 10cm에서 습윤전밀도(g/cm^3) 분포
Fig. 5. Wet bulk density(g/cm^3) distribution at 10cm subbottom depth.

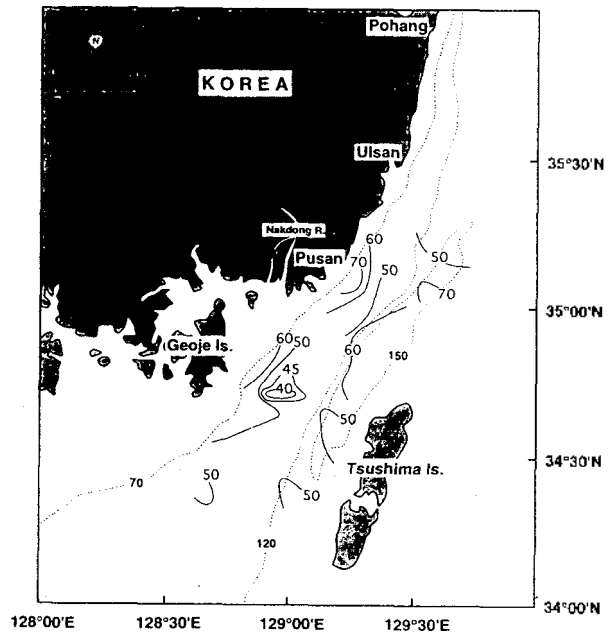


그림 6. 퇴적층 깊이 10cm에서 공극율(%) 분포
Fig. 6. Porosity(%) distribution at 10cm subbottom depth.

4.2. 물리적 성질 및 음파전달속도 분포

퇴적물의 전밀도는 조성이 같을 경우 다짐작용(compaction)이나 고화작용(consolidation)과 관계가 있으며, 함수율과 입자밀도, 포화도에 의해서도 좌우된다. 본 연구지역의 전밀도 분포는 mid-shelf 지역에서 $1.60 \sim 2.00\text{g/cm}^3$,

입자밀도는 입자를 구성하는 물질의 조성에 따라 그 값을 달리하는데 본 연구지역은 대부분이 육성기원 쇄설성퇴적물이 유입된 지역으로 $2.50 \sim 3.00\text{g/cm}^3$ 범위의 값을 가진다(그림 7). 전밀도, 공극율 분포가 평균입도 분포와 상관성이 높게 나타나는데 비해 입자밀도 분포는 거제도 남동지역의 조립질 퇴적물이 우세한 지역에서 높게 나타나는 것을 제외하고는 다른 물성에 비해 평균입

도분포와의 유사성은 낮은 것으로 나타났다. 일반적으로 육성기원 퇴적물의 평균입자 밀도는 2.67g/cm^3 이며, 북태평양과 북대서양의 석회질 퇴적물의 경우는 2.70g/cm^3 값을 보인다[23]. 본 연구지역에서 2.70g/cm^3 이상의 입자 밀도 값을 나타내는 정점들은 연구지역에 풍부하게 산출되는 패각이나 패각편의 영향과 중광물의 함량이 높은 변성암이나 화성암 등의 근원암들이 연구지역 주변에 산재함으로 가인하는 것으로 사료된다[24].

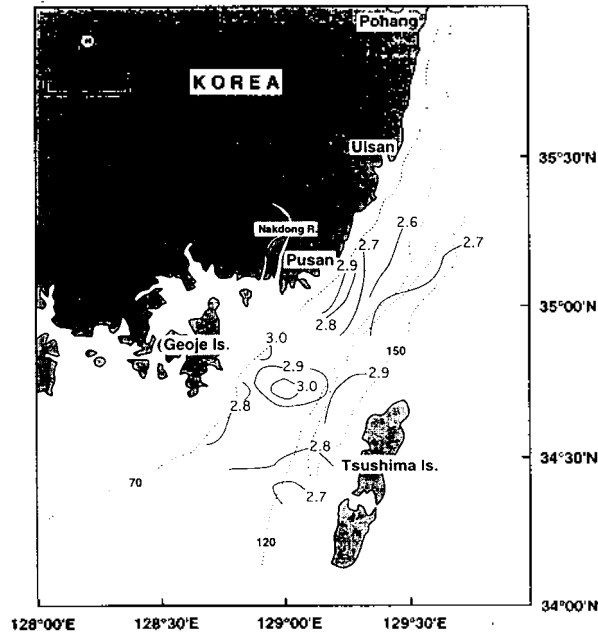


그림 7. 퇴적층 깊이 10cm에서 입자밀도(g/cm^3) 분포
Fig. 7. Grain density(g/cm^3) distribution at 10cm subbottom depth.

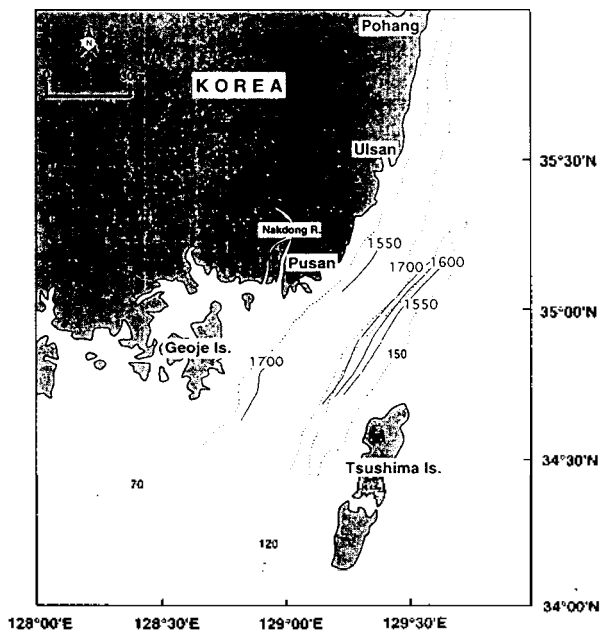


그림 8. 퇴적층 깊이 10cm에서 음파전달속도(m/s) 분포
Fig. 8. Velocity(m/s) distribution at 10cm subbottom depth.

표층퇴적물의 음파전달속도는 mid-shelf에서는 $1550 \sim 1700\text{m/s}$ 값의 범위를 가지며, shelf margin 지역의 경우는 1700m/s 내외의 값으로 증가하고 trough 지역에서는 다시 감소하여 $1550 \sim 1660\text{m/s}$ 범위의 값을 보인다(그림 8). 이러한 속도분포는 평균입도 및 물성 분포와 유사하다. 측정방법의 차이는 있지만 Hamilton[25]이 북태평양 대륙붕 퇴적물에서 측정한 중립내지 조립질 모래의 속도는 $1630 \sim 1752\text{m/s}$ 값으로 본 연구지역과 유사하다. 그러나 남해 대륙붕에 분포하는 니질퇴적물의 속도는 $1545 \sim 1550\text{m/s}$ [6]로 상당히 낮아 본 연구지역의 음파전달속도를 결정하는 변수 중에 퇴적물 조직의 영향이 큼을 알 수 있다.

4.3. 물성간의 상관관계

해양 퇴적물은 조직, 조성 등에 따라 각 물성간 특징적인 상관관계를 갖는다. 본 연구결과와 자료비교를 위해서 전밀도와 평균입도의 상관관계는 Hamilton[1]의 북태평양 대륙붕자료와 성[6]의 부산지역 자료를 비교 도시하였다. 성[6]의 자료에서 인용한 부분은 대부분이 현생니질퇴적물이 우세하게 분포하는 지역으로 해수면이 거의 현수준으로 상승한 지난 7,000년 이후에 퇴적된 퇴적환경(recent prodelta/shelf depositional system)으로 구분되는 지역이다[14].

4.3.1. 음파전달속도 - 공극율

퇴적물내의 공극율은 여러 가지 복잡하고 상호 관련된 인자(구성 광물 입자의 형태, 크기, 조성, 퇴적구조, 다짐 작용에 의한 배열상태의 차이)에 의해 영향을 받으며 일반적으로 입도가 감소할수록 공극율이 증가하는 경향이 있다[1]. 기존의 연구결과에 의하면 공극율이 증가할수록 속도가 감소하지만 세립질 퇴적물의 경우 공극율 75 ~ 80%를 최저점으로 속도가 다시 증가하는 경향을 보인다[26]. 본 연구지역중 trough 지역에서 일부 공극율이 80%에 도달할 정도로 높기는 하지만 앞의 연구자들이 언급한 75 ~ 80%를 최저점으로 속도가 다시 증가하는 경향은 나타나지 않는데 이는 아마도 본 연구지역에 전체적으로 우세한 사질 퇴적물의 영향 때문인 것으로 사료된다(그림 9).

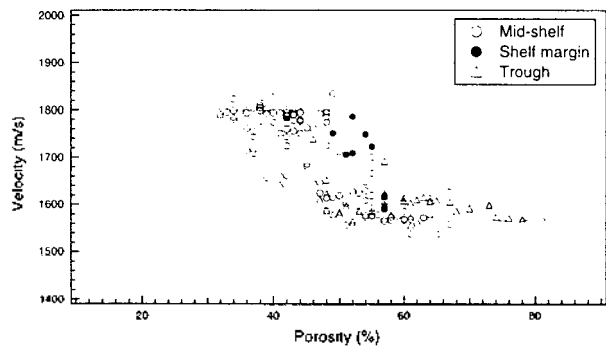


그림 9. 음파전달속도(m/s)와 공극율(%)과의 상관관계
Fig. 9. Velocity(m/s) versus porosity(%).

Mid-shelf와 shelf margin지역은 공극율이 증가할수록 속도가 감소하는 현상이 나타나는데 비해 trough 지역은 공극율 변화에 따른 속도 변화가 크지 않다. Shelf margin 지역 퇴적물의 경우는 같은 공극율에서 다른 지역보다 속도가 높게 나타나는데 이는 shelf margin 지역이 mid-shelf 지역과 달리 현재 해수면 초기에 해당하는 지역으로 강한 에너지에 의한 재동(reworking) 등으로 분급이 좋은 중립 모래, 많은 양의 패각편과 자갈, 부분적으로 다짐 니를 포함하는 퇴적상[14]이 나타나기 때문이고, 이러한 퇴적상의 변화에 따른 퇴적물 조직변화에 의해 속도값이 높게 나타나는 것으로 사료된다.

4.3.2. 음파전달속도 - 습윤전밀도

전밀도는 탄성 방정식에서 음파전달속도를 결정하는 변수중의 하나로 일반적으로 전밀도가 증가함에 따라 체적탄성율(bulk modulus)과 강성율(shear modulus)이 증가하므로 속도는 이에 비례하여 증가한다. 퇴적물의 전밀도는 광물성분, 속성작용, 퇴적물의 조직 등에 의해 좌우되며 미고생물의 종류 및 함량 등에 의해서도 영향을 받는다 [26]. 본 연구지역에서도 mid-shelf와 shelf margin지역은 해양퇴적물의 일반적인 현상인 전밀도 증가에 따른 속도 증가 양상을 볼 수 있다(그림 10). 이에 비해 trough지역은 전밀도 증가에 따른 속도값의 변화가 작게 나타난다. Mid-shelf나 shelf margin에서 속도와 전밀도간의 양의 상관관계는 이 지역들이 사질퇴적물이 우세하기 때문이고, trough 지역에서의 낮은 전밀도와 속도는 상대적으로 높은 세립질 퇴적물의 함량과 관련이 있는 것으로 사료된다.

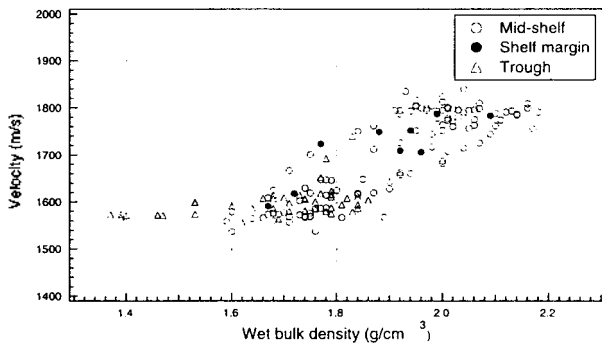


그림 10. 음파전달속도(m/s)와 습윤전밀도(g/cm³)와의 상관관계
Fig. 10. Velocity(m/s) versus wet bulk density(g/cm³).

4.3.3. 습윤전밀도 - 평균입도

습윤전밀도는 광물의 조성과 입도에 좌우된다. 일반적으로 입도가 증가할수록 전밀도가 증가하는 양의 상관관계가 나타난다. 본 연구지역에서는 사질퇴적물함량이 높은 mid-shelf - shelf margin - trough 순으로 기물기가 증가한다(그림 11). 본 연구지역 퇴적물의 전밀도는 전반적으로 Hamilton[1]의 북태평양 퇴적물과 성[6]의 부산지역 퇴적물에 비하여 높는데 이는 본 연구 지역에 우세하게 나타나는 사질퇴적물 때문인 것으로 사료된다.

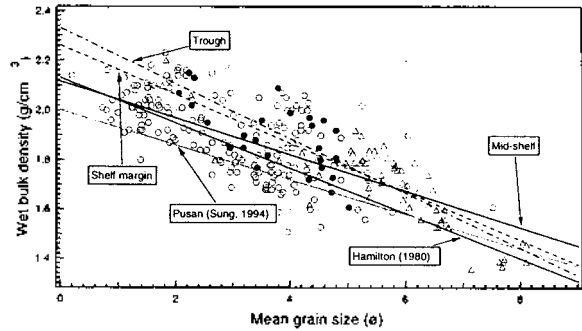


그림 11. 습윤전밀도(g/cm³)와 평균입도(φ)와의 상관관계
Fig. 11. Wet bulk density(g/cm³) versus mean grain size(φ).

4.4. 지음향모델

Hamilton[1]은 북태평양과 인접한 해역 해저 퇴적물에서 획득한 자료로 각 매질의 종류별 실험치와 현장 측정치에 의해 경험식을 이끌어 내어 지음향모델화 하였다. 그림 12와 부록 1은 본 연구지역의 밀도와 속도자료를 Gardner et al.[27]를 비롯한 다른 연구들과 자료를 비교한 것이다. 그래프에서 보듯이 Hamilton[1]의 해저면(seafloor surface)에 해당하는 상관곡선과 절대값의 차이는 있지만 유사한 양상을 볼 수 있다.

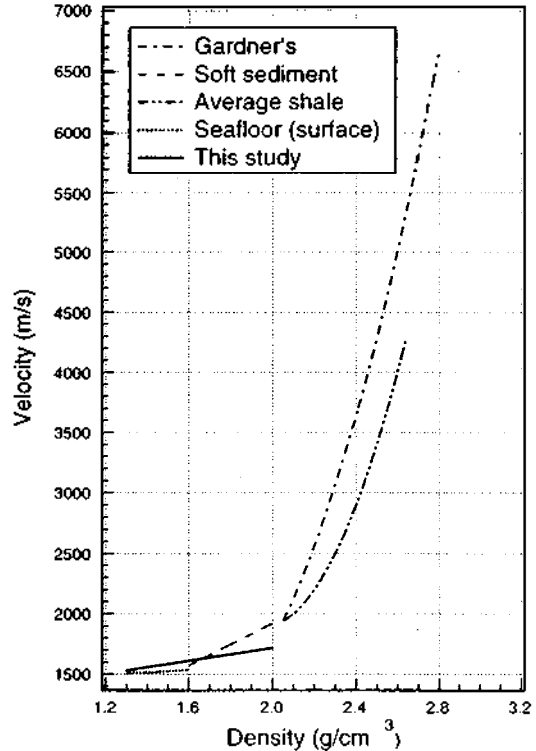


그림 12. 음파전달속도(m/s)와 전밀도(g/cm³)의 상관관계, 해양 퇴적물, 육상기원의 퇴적물, 그리고 본 연구결과. 각 선은 상관곡선

Fig. 12. Velocity(m/s) versus density(g/cm³) in marine sediments, sedimentary rocks from terrigenous sources and this study. Each line indicates regression curve.

이러한 값의 차이는 본 연구지역이 대륙붕내의 이토대(mud belt)의 외해쪽에 위치한 주로 사질퇴적물이 우세한 지역을 대상으로 했기 때문이다. 따라서 본 연구에서도 Hamilton[1]이 주장한 밀도와 속도값의 상호 계산이 가능함을 알 수 있다.

Hamilton[1]의 모델을 기준으로하여 연구지역의 음파전달속도와 물리적 성질의 값들로부터 대한해협 퇴적물을 mid-shelf, shelf margin, trough 지역으로 나누어 지음향모델화 하였다(표 1). 사질퇴적물이 우세한 mid-shelf, shelf margin 지역에서 음파전달속도의 평균값은 각각 1707m/s, 1733m/s 이고, 전밀도 평균값은 각각 1.94g/cm³, 1.96g/cm³ 이다. 반면 trough에서는 니질퇴적물의 함량이 높은 관계로 앞의 두 지역에 비해 음파전달속도가 1581m/s로 느리며, 전밀도 역시 1.55g/cm³로 낮게 나타난다. 여기서 음파전달속도(Vp)와 전밀도는 실측치이며, 횡파전달속도(Vs)는 사질퇴적물이 우세한 지역(mid-shelf와 shelf margin)이므로 Hamilton[28]의 식을 이용하였으며 trough는 퇴적물과 평균입도가 유사한 Richardson et al.[29]의 자료를 이용하였다. 음파감쇠(Kp)와 횡파감쇠(Ks)는 Hamilton[1]의 계산식을 이용하였다.

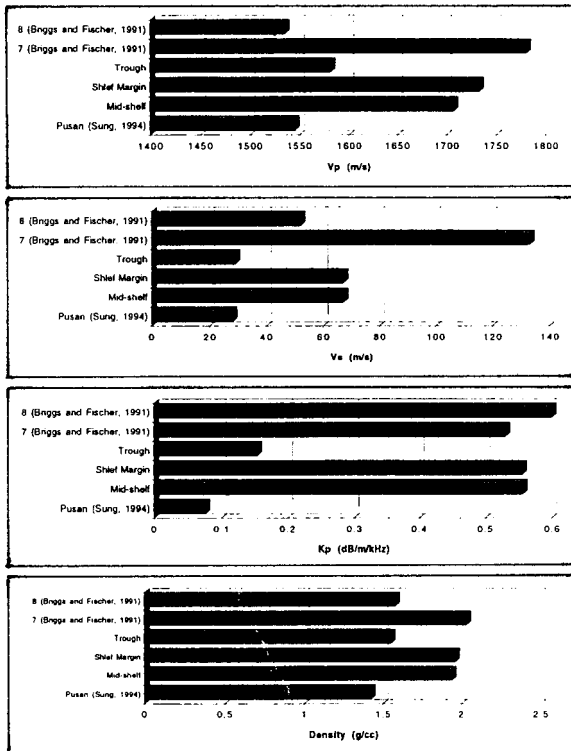


그림 13. Briggs and Fischer[5]의 지음향지역(7과 8), 성[6], 그리고 본 연구의 음파전달속도(Vp), 횡파속도(Vs), 음파전달속도감쇠(Kp), 전밀도의 결과비교. 지음향지역 위치는 그림 14임

Fig. 13. Geoaoustic data of compressional wave velocity(Vp), shear wave velocity(Vs), compressional wave attenuation(Kp) and density for the two geoaoustic provinces(7 and 8) of Briggs and Fischer[5], Sung[6], and this study are illustrated. Location of the provinces are indicated in Fig. 14.

연구지역 표층퇴적물의 음향 및 물리적 성질 자료를 바탕으로 Briggs and Fischer[5]가 제안한 지음향모델과 성[6]에 의해 제시된 지음향모델중 부산(Pusan)지역과의 자료를 비교하였다(표 1, 그림 13). Briggs and Fischer[5]는 본 연구지역을 포함하는 동남해역과 남해도를 퇴적물 조직과 관련하여 17개의 지음향학적 지역구분을 하였는데 본 연구지역을 포함하는 지역은 4, 5, 7, 8, 9번 지역들이다(그림 14). 본 연구지역의 mid-shelf와 shelf margin 지역에 해당하는 결과자료를 보면 Briggs and Fischer[5]의 7, 8번지역의 음파전달속도, 횡파전달속도, 종파감쇠, 전밀도 값의 차이가 뚜렷함을 알 수 있다(그림 13). 이러한 결과는 본 연구결과가 실측치인 반면에 Briggs and Fischer[5]의 모델은 퇴적물의 조직을 이용한 계산에 의한 값이기 때문인 것으로 생각된다. 아울러 성[6]에 의해 제시된 주로 수심 70m이하의 내해쪽에 위치한 부산지역 지음향모델 결과는 본 연구결과에 비해 종파전달속도, 횡파전달속도, 종파감쇠, 전밀도에 있어 모두 낮은 값이 나타남을 볼 수 있다(그림 13). 이는 성[6]이 제시한 부산지역은 낙동강으로부터 주로 유입된 부유퇴적물들이 연안류와 대마난류에 의해 형성된 강한 전선에 의해 내해쪽에 퇴적된 현생퇴적물이 분포하는 지역[31]으로 본 연구지역과 비교해 볼 때 퇴적환경의 차이에 따른 퇴적물분포 차이에 의한 결과로 사료된다. 성[6]이 제시한 대한해협 내해쪽의 부산지역 지음향모델 결과와 외해쪽의 본 연구결과를 종합하여 부산 - 대마도를 잇는 대한해협해역의 음향학적 자료로 제시하는 바이다.

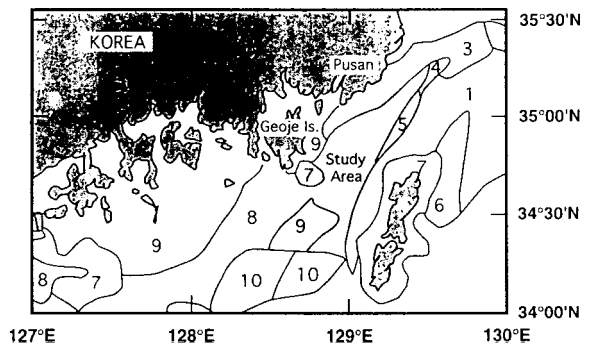


그림 14. Briggs and Fischer[5]에 의한 대한해협 주변해역의 지음향 지역구분
Fig. 14. Geoaoustic provinces map around the Korea Strait(modified after Briggs and Fischer[5]).

V. 결 론

퇴적물내 사질함량이 높은 대한해협 퇴적물에 대한 음파전달속도 및 물리적 성질에 관한 연구결과 퇴적물의 평균입도는 2 ~ 7φ 범위를 가지며, 공극율 35 ~ 70%, 습윤전밀도 1.4 ~ 2.0g/cm³, 입자밀도 2.5 ~ 3.0g/cm³의 값을 보이며, 음파전달속도는 1550 ~ 1780m/s의 값을 보인다. 이 지역 퇴적물의 물성 및 음파전달속도 변화는 조

직에 의해 크게 좌우되는 것으로 사료된다. 이들 연구지역의 음향특성 중 속도와 밀도는 Hamilton(1980)이 제시한 북태평양 대륙붕 지역의 표층 퇴적물과 비교해 절대값 차이를 보이며 이는 사질퇴적물이 우세한 연구지역의 특성을 나타낸다. 하지만 속도와 밀도에 대한 일반적인 변화양상과 유사하게 나타난다. 음향 및 물성 값을 바탕으로 연구지역을 mid-shelf(평균음파전달속도 1707m/s, 평균 습윤전밀도 1.94g/cm³), shelf margin(평균음파전달속도 1733m/s, 습윤전밀도 1.98cm³), 그리고 trough(평균음파전달속도 1581m/s, 습윤전밀도 1.55cm³)와 같이 3개 지역(provinces)으로 구분이 가능하며 이러한 결과는 탄성과 단면을 통한 시스템 트랙과 퇴적제로 지역구분[14]한 것과 잘 일치한다. 본 연구를 통해 구분된 3지역에 대해 새롭게 제시된 지음향모델은 기존 부산지역에 대한 성[6]의 지음향모델과 연계하여 부산-대마도를 잇는 대한해협해역의 음향학적인 중요한 자료로 사료된다. 아울러 본 연구 결과는 대한해협에 대한 기존의 Briggs and Fischer[5]의 지음향모델에 대해 수정모델을 제시하였다.

감사의 글

자료분석의 일부는 서울대학교 수중음향특화연구센터(UARL)의 지원에 의한 것임을 밝힙니다. 아울러 시료채취에 도움을 주신 탐양호 선장님과 직원들께 감사의 말씀을 표합니다. 논문 수정에 도움을 주신 익명의 심사위원들께 감사의 말씀을 표합니다.

참고 문헌

1. E. L. Hamilton, "Geoacoustic modeling of the sea floor," *J. Acoust. Soc. Am.* 68(5), pp. 1313-1340, 1980.
2. F. Birch, "The velocity of compressional waves in rocks up to 10 kilobars," *J. Geophys. Res.* 65, pp. 1083-1102, 1960.
3. 김대철, "미고결 해저퇴적물의 음파전달속도측정에 관한 연구," *한국수산학회지* 22, pp. 147-153, 1989.
4. 김길영, 김대철, 박수철, 유동근, 최진혁, 김정창, "한국 남동해역 사질퇴적물의 물리적 성질," *한국수산학회지* 29(5), pp. 663-676, 1996.
5. K. Briggs and R. Fisher, "Geoacoustic model of the strait of Korea," *NOARL Technical Note*, pp. 1-44, 1991.
6. 성준영, "남해 대륙붕 퇴적물의 퇴적환경과 음향모델," 석사학위논문. 부산수산대학교, 114pp, 1994.
7. 김승우 외 5인, "부산-울산간 해양지질조사연구," *한국동력자원연구소 연구보고서*, KR-87-26, pp. 1-66, 1988.
8. D. B. Lim, "The movements of the waters off the south coast of Korea," *J. Oceanol. soc. Korea*, 11(2), pp. 77-88, 1976.
9. Korea Hydrographic Office, "Marine environmental Atlas of Korean water," *Korea Hydrog. Off.*, Inchon, Korea, 38pp, 1982.
10. S. C. Park and D. G. Yoo, "Depositional history of Quaternary sediments on the continental shelf off the southeastern coast of Korea (Korea Strait)," *Mar. Geol.* 79, pp. 65-75, 1988.
11. S. C. Park, K. M. Jang and S. D. Lee, "High-resolution seismic study of modern fine-grained deposits: Inner shelf off the southeastern coast of Korea," *Geo-Mar. Letter.* 10, pp. 145-149, 1990.
12. Y. A. Park, "Later Quaternary sedimentation on the continental shelf off the southeast coast of Korea, a further evidence of relict sedimentations," *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20(3), pp. 55-61, 1985.
13. Y. A. Park and J. Y. Choi, "Factor analysis of the continental shelf sediments off the southeast coast of Korea and its implication to the depositional environments," *J. Oceanol. Soc. Korea*, 21(1), pp. 34-45, 1986.
14. D. G. Yoo, "Sequence Stratigraphy, depositional History and Environment of the Plio-Quaternary Deposits on the Korea Strait Shelf," *Published Ph. D. thesis*, ChungNam Univ, 212pp, 1997.
15. Korea Ministry of Construction, "Report on the Nakdong Estuary: Industrial site investigation," *Tech. Rept.*, pp. 1-56, 1976.
16. M. S. Kim, K. S. Chu and O. S. Kim, "Investigation of some influence of the Nakdong River water on marine environment in the estuaries area using Landsat imagery," *Rpt. Korea Ministry Sci. Technology*, pp. 93-147, 1986.
17. S. C. Park, S. K. Hong and D. C. Kim, "Evolution of late Quaternary deposits on the inner shelf of the South Sea of Korea," *Marine Geology*, 131, pp. 219-232, 1996.
18. R. L. Folk, "Petrology of sedimentary rocks," *Hemphill's Austin, Texas*, 170pp, 1968.
19. R. L. Folk and W. C. Ward, "Brazos River. A study in significance of grain-size parameters," *J. Sed. Petrology*, 27, pp. 3-27, 1957.
20. L. E. Shepard, Bryant W. R and W. A. Dunlap, "Geotechnical properties and their relation to geologic processes in South Pass outer continental shelf lease area Blocks 28, 47 and 48, offshore Louisiana," *Dept. of Oceanography Texas A & M Univ. Technical Report* 79-5-T, 125pp, 1979.
21. D. C. Kim and Y. A. Park, C. B. Lee, H. J. Kang and J. H. Choi, "Sedimentation and physical properties of innershelf sediment, South Sea of Korea," *Jour. Geol. Soc. Korea*, 28(6), pp. 604-614, 1992.
22. 조운현, "여수 남해 해저 지층내의 탄성과 전달속도와 지층 구조에 관한 연구," 이학석사 학위논문, 부산대학교, 76 pp, 1985.
23. G. H. Keller and R. H. Bennett, "Variations in the mass physical properties of selected submarine sediments," *Mar. Geol.*, 9, pp. 215-223, 1970.
24. 김승우 외 6인, "거제-부산간 해양지질조사연구," *한국동력자원연구소 연구보고서*, KR-86-2-20, pp. 1-66, 1987.
25. E. L. Hamilton, "Compressional wave attenuation in marine sediments," *J. Geophysics*, 37, pp. 620-646, 1972.
26. E. L. Hamilton, "Sound velocity and related properties of marine sediments. North Pacific," *J. Geophys., Res.* 75(23), pp. 4423-4446, 1970.
27. G. H. F. Gardner, L. W. Gardner and A. R. Gregory, "Formation velocity and density-The diagnostic basics for

stratigraphic traps," Geophysics, 39, pp. 770-780, 1974.

28. E. L. Hamilton, "Shear wave velocity depth in marine sediments," A Review. J. Geophysics A. 41, pp. 985-9996, 1976.

29. M. D. Richardson, E. Muzi, B. Miasch and F. Turgutcan, "Shear wave velocity gradients in near-surface marine sediment," Shear Waves in Marine Sediments, pp. 295-304, 1991.

30. K. Magara, "Compaction and migration of fluids in Miocene mudstone, Nagaoka Plain, Japan," Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 52, pp. 2466-2501.

31. S. C. Park, D. G. Yoo, K. W. Lee and H. H. Lee, "Accumulation of recent muds associated with coastal circulations, southeastern Korea Sea (Korea Strait)," Continental Shelf Research, 19, pp. 589-608, 1999.

부록 1. 상관관계 식

Appendix 1. Equations for the regression lines and curves.

P: Pusan 성[6], H: Hamilton's North Pacific, Hamilton[1], M: Mid-shelf, SM: Shelf margin, T: Trough, HS: Hamilton's seafloor sediment, Hamilton[1], HO: Hamilton's soft sediment, Hamilton[1], CA: Average shale in Canadian Wells, Magara[30], G: Gardner's curve Gardner et al.[27].

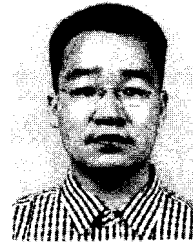
Fig. 11. Density(g/cm^3 , ρ) versus mean grain size(ϕ , Mz)

(P) $\rho = 2.00 - 0.070 \phi$
 (H) $\rho = 2.13 - 0.092 \phi$
 (M) $\rho = 2.12 - 0.74 \phi$
 (SM) $\rho = 2.26 - 0.098 \phi$
 (T) $\rho = 2.329 - 0.111 \phi$

Fig. 12. Velocity(km/s) versus density(g/cm^3 , ρ) in marine sediments, sedimentary rocks from terrigenous source and this study.

(HS) $\rho = -21.01 + 14.8Vp$
 (HO) $\rho = -0.19 + 1.14Vp$
 (CA) $\rho = 0.917 + 0.744Vp - 0.08Vp^2$
 (G) $\rho = 0.23Vp^{0.2}$

▲서 영 교(Seo Young Kyo)



1994년 2월 : 부경대학교
 응용지질학과(이학사)
 1997년 8월 : 부경대학교 응용지질학과 대학원(이학석사)
 1999년 8월 : 부경대학교 응용지질학과 대학원 박사과정
 수료

※ 주관심분야: 퇴적물 음향 및 물성, 해양지질학

▲김 대 철(Kim Dae Choul)



1987년 2월 : 서울대학교 해양학과 (이학사)
 1980년 2월 : 서울대학교 해양학과 (이학석사)
 1985년 2월 : 하와이대 지질 및 지구 물리학과(이학박사)
 1985년 ~ 현재 : 부경대학교 탐사공학과 교수

※ 주관심분야: 퇴적물 음향 및 물성, 해양지질학