

해상 탄성파탐사 기법을 이용한 단층파쇄대 분석 적용사례

이준석^{*)}, 최세훈^{**)}, 김재관^{**)}, 최원석^{**)}

1. 서론

해상 반사법탐사는 해저 지반의 지층구조를 파악하는 기술로서 해저지층에 부존하는 가스나 골재 등 해저자원 탐사와 해저의 저장시설 건설, 파이프라인 설치 등 다양한 해양 토목공사를 위한 지반조사에 사용된다. 해상 반사법탐사의 기본적인 원리는 해수면 근처에서 인공적으로 음파를 발생시켜 해저면 하부의 지층으로 침투시키면 서로 다른 물성을 갖는 지층의 경계면에서 일부 음파는 반사되는데, 이 반사파를 수신하는 것이다. 탐사과정에서 얻어진 트래이스에는 반사파 이외에도 직접파, 다중반사파와 같은 잡음이 섞여있는데 자료처리를 통해 탄성파 단면도를 작성하고, 이를 해석하여 해저지반의 지질학적 구조를 파악하는 것이 해상 반사법탐사의 목적이다.

국내의 경우 해상 반사법탐사는 주로 대륙붕의 자원탐사분야에 적용되어 많은 성과를 이루었으나, 토목분야에서는 기술적인 문제와 경제성으로 인하여 해저면의 분포만을 개략적으로 파악하는 음향측심

이 주를 이루었다. 특히 토목분야에 적용되는 천해저에서는 경제적인 탐사선, 효율적인 송수신 장비, 정밀한 소형 위치정보시스템 등의 장비운용과 기술적인 측면이 새로이 요구되었는데, 최근에 천해저용 탐사장비의 개발과 효율적인 자료처리 기법의 등장으로 해상 반사법탐사뿐만 아니라 해상 굴절법탐사의 적용사례가 증가하고 있는 추세이며 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

본 고에서는 해양 지반조사 기법 중 해저의 지질학적 구조를 파악하는 해저 지구물리 탐사기술인 해상 탄성파탐사의 기본적인 특성을 고찰하고, T/K 설계시 적용한 실제 사례를 통하여 해상구간 단층파쇄대 분석에 관한 단계별 조사기법 및 해상 탄성파탐사 적용방안을 소개함으로써, 향후 해상구간 교량구조물 계획 및 설계시 참고자료로 활용할 수 있기를 바란다.

2. 해상 탄성파탐사 개요

2.1 해상 탄성파탐사의 필요성

해외에서는 해양 구조물에 대한 설계시 사전조사

^{*)} SK건설 토목기술팀(jslee-d@skec.co.kr)

^{**)} SK건설 토목기술팀(shchoi-c@skec.co.kr)

^{**)} SK건설 토목기술팀(jkkim-b@skec.co.kr)

^{**)} 지오제너 지반정보팀(wschoi69@geogeny.biz)



표 1. 해양 구조물에 적용되는 물리탐사 기법

대상	사업 추진 계획	주요 조사 목적	지표 및 공중에서의 방법					시추공을 이용한 방법					해상		해설					
			원격탐사	굴절법탄성파탐사	반사법탄성파탐사	중력탐사	자력탐사	레이다탐사	미진동	탄성파토모그래피	전기비저항토모그래피	VSP	음파검층	전기검층		밀도검층	시추공TV	공경검층	해상반사법탐사	사이드스캔소나
장대교 등의 해양 구조물	개략조사	노선의 비교 검토 조사	◎	○	○	△												◎	○	
	정밀조사	구조물 위치의 지반개요 파악	◎	○					○		○	○	○	○	○	○	◎	○	◎	○
		구조물 위치의 지반 모델작성	○						○	○	○	○	○	○	○	○	◎	○		
		구조물 위치의 설계기본정수파악	○					△	◎		◎	○	○	○	○	○	○	○		
	시공중 조사	굴착에 의한 지반 이완 파악	○					○			○									
	조 사	굴착(예정지역) 등의 물성확인	○								○									
유지관리	기초 성능저하, 상타변화 파악	○				○						○		○						

◎ 적용을 필히 검토해야 할 탐사법, ○ 현지조건에 따라서는 적용 가능한 탐사법, △ 과거에 적용 실적이 있는 탐사법

를 통해 구조물 하부의 해저지층과 지질구조선에 대한 연구가 선행되는데, 이 때 해양 탄성파탐사를 이용하면 대상지 전체에 대한 개략적인 지층구조와 상세한 지질구조를 파악할 수 있으므로 이를 적극 활용하고 있다.

표 1은 일본 통상산업성 공업기술원 지질조사소에서 매년 발간하고 있는 “물리탐사 조사연구 일람”의 일부로, 특히 토목건축분야를 대상으로 1992~1996년까지 5년간에 걸쳐 정리한 것을 요약하였다. 이 문헌은 1997년 이후에는 발간되지 않았기 때문에, 그 이후의 자료는 물리탐사학회를 비롯해 각 학회의 학회지 또는 학회 학술발표회 논문집 등에서 해당 논문을 추출하여 집계하였다.

이 표에 의하면 해양 구조물을 대상으로 하는 물리탐사에서 해양 탄성파탐사(특히 해상 반사법탐사)가 차지하는 역할이 매우 크며, 실제 설계나 시공시 탐사자료를 반영하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

3. 해양 탄성파탐사 원리 및 이론

3.1 해상 반사법탐사

해상 반사법탐사는 반사파를 연속적으로 발생시키고 1개 이상의 수신기로 관측하는 방법으로 해수(물)에서는 S파가 전달되지 않으므로 음파탐사라고도 하는데, 원리는 육상에서 수행하는 천부 반사법 탄성파탐사와 동일하다. 그러나 송·수신이 해수 중에서 이루어지기 때문에 일정한 파형의 음파 발생이 용이하고 반사파의 수신시 표면파 등의 잡음이 관측되지 않으며 천부 반사법 탄성파탐사에 비하여 S/N비가 높은 신호를 얻을 수 있다.

수신기의 개수(채널)에 따라 해상 반사법탐사는 단일채널(single-channel)법과 다중채널(multi-channel)법으로 구분하는데, 채널은 단순한 수신기의 수가 아니라 자료처리에 이용되는 반사신호 트레이스의 수를 의미한다. 따라서 여러 개의 수신기가

사용되지만 1개의 중합신호를 추출하는 그룹 수신기(일반적으로 하이드로폰)를 이용하는 경우는 단일채널법에 해당한다.

단일채널법은 주로 천부(수심 10m 이하)의 해저 지질조사에 이용되고 있다. 탐사선이 항해하면서 반사파 기록을 실시간으로 얻기 때문에 효율적인 측정이 가능하고 개략 탐사로부터 정밀탐사에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 이 방법은 해수면 부근에서 P파를 발생시키고 해저면 하부로부터 반사된 미약한 신호를 한 그룹의 수신기로 수신하여 왕복시간과 그 강약을 기록 장치로 연속적으로 표시하는 방법이다. 그러나 단일채널법에서는 탄성파속도를 간접적으로 계산하며, 음파가 투과하지 않는 단단한 지층 내의 정보는 얻어지지 않는다. 한편 해저지형 관측에 이용되는 음향측심기(Echo Sounder)는 고주파(수백 kHz)의 음파를 일정한 간격으로 해저로 향하여 보내고 해저면으로부터 반사된 파의 왕복시간을 측정하여 수심만을 측정하는 방법으로 단일채널법의 일종이다.

외국의 경우 간사이 공항이나 포트 아일랜드에서와 같은 대형 인공도로 건설시 매립 전에 이 방법에 의해 지반개량을 위한 계획 자료로 이용하였으며 도쿄만 횡단도로 건설의 사전 조사에서는 노선 선정을 위한 광범위한 탐사로, 또한 노선 결정 후에는 시추 지점 사이의 연속성 파악을 위한 탐사로 정확한 지질단면을 작성하였다.

한편, 다중채널법은 해저면 하부 수심 m를 대상으로 하는 토목적인 조사나 수천 m까지의 지질구조 조사에 유용한 조사 방법으로, 하나의 음원에서 발생시킨 음파를 여러 개의 수신기로 디지털 형태로 수록한 후 자료처리에 의하여 심부까지의 반사기록을 얻는다. 여러 개의 수신기를 이용하면 공통중간점(Common Mid-Point: CMP) 중합이 가능해지

고 심부의 미약한 신호를 강하게 할 수 있으며 해저의 다중반사나 측정기의 무지향성에 기인한 회절과 같은 불필요한 신호를 약하게 하거나 원래로 되돌리는 것이 가능한 특징을 가진다. 토목분야에서는 구조물의 기초조사나 비교적 얇은 곳의 정밀 지질구조 조사에서 수신 채널수는 24~48 정도가 일반적이고 음원은 워터건, 소형의 에어건 및 GI건 등을 이용하고 있다.

이 다중채널법은 단일채널법으로 해석할 수 없는 심부까지의 지질구조를 파악할 수 있으므로 원자력 발전소의 주변해역에 대한 지질구조 조사나 해저터널, 교량의 노선 계획을 위한 기초조사에 적용되는데 간사이 공항이나 포트 아일랜드 등의 대형 인공도로 계획 시점에서 매립에 의한 침하가 예상되는 홍적층 점토층의 층 두께나 연속성을 파악할 목적으로 사용되었다. 최근에는 심부의 단층 형태나 활동성 파악 목적으로도 사용하고 있다. 스트리머 케이블을 예인하기 어려운 수심 3~5m의 연안부에서는 해저에 하이드로폰이 부착된 케이블을 설치하고 다중채널법과 유사하게 반사파를 관측하는 베이케이블(bay cable) 방식의 탐사가 실시된다. 이 방법은 다중채널법에 비해 케이블을 해저에 부설하기 때문에 작업효율은 나쁘며, 직접파가 해저에 전파되므로 사용 음원에 의하여 해저면 하부의 얇은 부분의 반사파와 직접파가 겹쳐지므로 그 부분에서의 반사파를 추출하기 어려운 경우가 있는 반면, 예인 잡음의 영향을 받지 않는 이점도 있다. 그러나, 다중채널법은 조사선이 스트리머 케이블을 예인하고 항해할 수 있는 수역(수심과 조류의 영향을 고려)에만 적용되며, 단일채널법과 마찬가지로 고결도가 높은 백악기보다 오래된 지층은 음향 기반층이 되어 내부 구조를 파악하기 곤란하다.

그림 1은 다중채널법의 모식도로 송신기에서 발

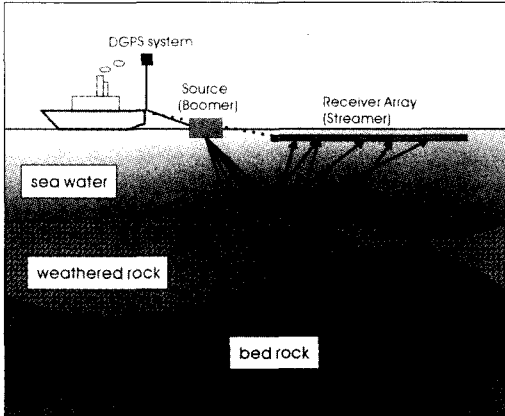


그림 1. 해상 반사법탐사 모식도

생된 음파가 해저면이나 해저지층에서 반사되어 다중채널의 수신기에 감지되는 원리를 나타낸 것이며, 단일채널법의 경우에는 수신기가 하나 혹은 그룹의 하이드로폰으로 대체 사용된다.

3.2 해상 굴절법탐사

해상 굴절법탐사는 해양이나 해저에서 음파를 발생시켜 속도가 다른 지층 경계에서 굴절되어 돌아오는 굴절파를 해양에 설치한 측정 장치로 기록하여 해저의 속도구조를 알아내는 탐사법이다. 기본적으로 굴절법은 송신기와 수신기의 거리가 지층의 굴절파를 감지할 수 있을 만큼 충분히 멀게 설치해야 하므로, 반사법과 같이 하나의 선박을 이용하는 방법으로는 탐사가 불가능하다. 따라서 송신용 선박 이외에 수신용 선박이나 소노부이(Sonobuoy)와 같이 별도의 수신위치를 필요로 하는데, 해양에서는 여러 채널의 수신기를 용이하게 설치할 수 없기 때문에 비교적 간단한 장비로 구성한다. 이때 격리된 시스템간의 트리거(송신되는 시점) 장치와 같은 기술적인 문제를 해결해야 한다.

그림 2는 해상 굴절법탐사의 모식도로 송신과 수

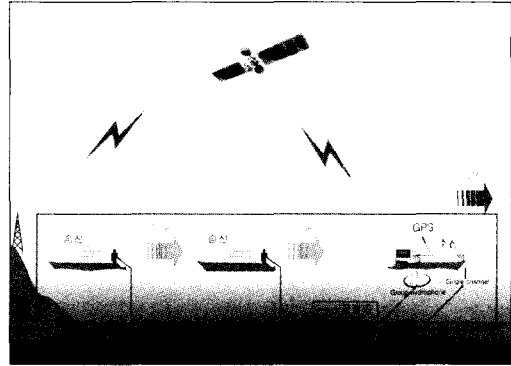


그림 2. 해상 굴절법탐사 모식도

신이 분리된 형태의 탐사방법이다. 이 형태는 음파를 발생하는 송신점이 해저면에 위치하므로 신호강화 특성을 가지며 수신점이 유동적이므로 탐사시간을 현격히 단축시킬 수 있는 장점이 있다.

4. 해상 탄성파탐사의 적용사례

4.1 지질개요

이러한 해상 탄성파탐사를 전라남도 여수시 돌산도와 화태도를 연결하는 해상연도교 구간 중 해상구간에 적용하였으며 교량연장은 1,432m이며 서남해안 일주도로상의 도서간 연결을 통해 다도해 해상국립공원의 관광개발을 촉진하기 위한 기능을 가지고 있다.

본 구간의 지형특성은 한반도 지체구조상 경상분지 최남단 서측부에 위치하며 인근 지역이 모두 10여개 이상의 섬들로 이루어져 있는데, 다도해의 특성상 섬들의 분포는 매우 불규칙적으로 크기도 다양하고 대부분의 섬들은 급사면의 산지를 형성하고 있다(그림 3). 본 역의 지질특성은 경상분지 동측의 양산 단층대와 서측 옥천대와의 중앙부 남단에 위치

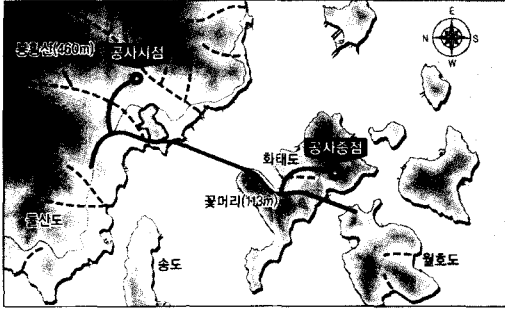


그림 3. 과업구간 지형특성

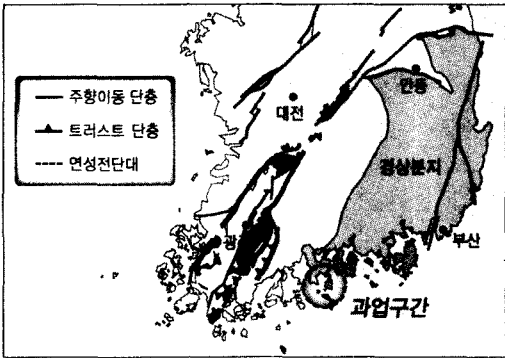


그림 4. 과업구간 지질특성

하고 이들 양 쪽의 대규모 지질구조대의 영향범위 밖에 위치하고 있어 지질 구조적으로는 비교적 안정적이라 할 수 있다(그림 4).

4.2 해상구간 지반조사 계획

해상구간에서 사장교 형식의 장대교량을 설계하기 위해서는 노선 주변에 대한 선구조 및 단층파쇄대의 특성규명 등의 조사가 가장 중요하므로 표 2와 같이 단계별 조사를 계획하여 노선 주변 단층파쇄대의 규모, 방향 및 범위를 확인하였다. 조사는 크게 3 단계로 구분되는데, 예비조사 단계는 해상의 지질구조선 파악을 통한 노선 선정을 목적으로 위성영상분석과 지표지질조사에 의해 육상에서 확인되는 선구

표 2. 해상구간 단층파쇄대 파악을 위한 주요 단계별 Procedure

step 1 : 선구조 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 광역 및 상세 위성영상 분석 • 해상 DEM 분석
step 2 : 지표지질조사	<ul style="list-style-type: none"> • 선구조 분석결과 현지 확인 • 노두상 단층파쇄대 파악
step 3 : 해상 반사법탐사	<ul style="list-style-type: none"> • 노선주변의 기반암선 확인 • 지질구조대 구조선 파악
step 4 : 해상 굴절법탐사	<ul style="list-style-type: none"> • 기반암선 재확인 • 교각 기초부 탄성파 속도 파악
step 5 : 확인 시추조사	<ul style="list-style-type: none"> • 연암 심도 및 돌출부 확인
step 6 : 토모그래피 탐사	<ul style="list-style-type: none"> • 주탑 기초부 정밀 분석

조와 단층의 해상으로의 연장상태를 파악한다. 개략조사 단계는 선정된 노선주변의 지질상태를 상세히 파악하여 주탑의 위치를 선정하고자 해상 반사법탐사, 해상 굴절법탐사, 확인시추 과정에 의해 안정된 지반구조를 파악한다. 정밀조사 단계는 확정된 주탑부 위치에서의 구조물 형태와 공법결정을 목적으로 시추조사, 탄성파 토모그래피탐사 및 각종 시추공시험에 의해 지반의 제반 물성을 획득하고자 하였다.

4.3 주요 지반조사 결과분석

4.3.1 선구조분석

광역 위성사진과 DEM 음영기복도 분석결과를 기초로 항공사진과 상세 위성영상(Ikonos)을 통해 계획노선과 직접적으로 교호하며 구조물에 영향을 줄 수 있는 선구조에 대한 특성을 분석한 결과 총 7 개의 선구조가 과업노선과 교차하며 이중 3개(선구조 ③~⑤)가 해상구간에 위치하며 연장성 및 규모 정도도 가장 클 것으로 파악되었다(그림 5의 실선).



그림 5. 해상 선구조 및 지표지질조사 분석결과

4.3.2 지표지질조사

과업구간을 포함하는 광역적인 지역에 대해 총 65개소에서 상세 지표지질조사를 실시하여 지질구조를 분석한 결과 총 4개소의 단층흔적이 조사되었으며, 이 중 F1(N50W/70NE)과 F4(N54E/80SE) 단층이 해상구간에서 노선과 교차하며 이들 단층은 위성영상 선구조분석에서 확인된 N50W(선구조 ④)와 N45E(선구조 ③) 계열의 구조선으로 대별되어 위성영상에 의한 선구조 분석과 유사한 결과를 보이고 있다. 그림 5는 상기 조사 결과들을 종합한 것으로 해상구간의 주요 선구조를 나타내고 있다.

4.3.3 해상 반사법탐사

사전조사 결과를 바탕으로 해상교량의 교각 위치를 선정하기 위해 해상 반사법탐사를 실시하였다. 본 탐사는 해양 구조물내의 지질구조선 위치와 연암선의 심도를 확인하는 개략탐사의 성격과 노선 주변의 해저면과 해저지층을 3차원 영상화하는 정밀탐사의 성격을 동시에 가지고 있다.

그림 6은 해상 반사법탐사의 항적으로 노선 주변을 항적하는 8개의 종측선과 11개의 횡측선으로 구성된 격자망은 총 14.2km에 해당한다.

그림 7은 총 19개의 측선 중 해양 구조물의 위치와 가장 일치하는 종측선(RV-4)에 대한 결과단면으로 그림에서 가로축은 반사파 신호를 얻기 위해

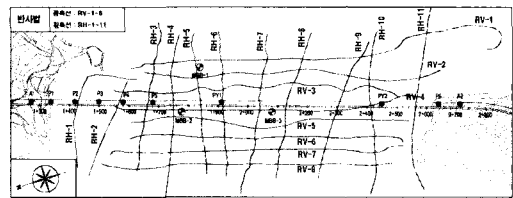


그림 6. 해상 반사법탐사 항적도 및 탐사측선

일정시간 간격으로 음파를 송신하고 수신하는 과정에서 매 송신점을 의미하며 세로축은 음파의 송·수신에 의한 왕복주시(해상-해저-해상)로 자료처리 과정에서는 지층의 속도를 추정하여 심도로 변환시킨다. 여기서 지층의 속도를 추정한다는 것은 단일 채널법에서 탄성파속도를 직접 추출할 수 없음(지표탐사 중 GPR의 예와 같은 단일채널 탐사의 자료의 트레이스는 측정시간에 해당하므로 보조적으로 속도값을 이용하여야만 심도에 대한 결과를 얻을 수 있음)을 의미한다. 결과 그림에서 20~40ms에 해당하는 상부의 신호는 해저면에 의한 반사파이며, 그 하부의 굵은 실선이 탐사의 주 대상인 기반암(연암)에 의한 반사파이다. 분석결과 총 7개의 단층파쇄대가 해상구간에서 교차하는 것으로 나타나는데, 이 단층파쇄대는 주탐의 위치로 부적합한 곳이다. 그림에 표시된 7개의 구조선은 19개(종방향 8단면, 횡방향 11단면)의 모든 단면에 대한 결과로 구성된 지질구조선을 본 대표 단면에 표시한 것이다.

그림 7과 같은 개별 측선(총 19개)을 종합하여 기

반암의 심도와 측정점의 좌표에 의해 구성된 기반암선의 평면도는 4.4 해상구간 단층파쇄대 종합분석편의 그림 16 (a)에 삽입되어 있다. 이 평면도에서 연암선의 심도가 가장 깊은 지점은 STA.2+180이며 가장 얇은 지점은 STA.1+920인데, 지질구조선의 주향은 NW계열과 NE계열로 분류되며, 전반적으로 40° 이상의 중~고경사로 형성되어 있다. 한편 교량구조물 기초설치 위치로 부적합한 것으로 판단되는 연암선 심도 40m 이상인 구간은 STA.1+760~1+840, STA.2+020~2+500이므로 이 영향이 최소인 구간을 선택하여 주탑의 기초위치로 선정하였다.

그림 8은 기반암의 심도결과를 3차원 영상화한 것으로 연암선의 수직변화(심도)를 중점적으로 관찰하기 위하여 x, y축은 동일한 비율이며 z축을 3.2배 인장시켰다. 영상에 대한 투영법은 직각투영법(orthographic projection)을 이용하고, 빛의 투영점(light position angle)을 조절하여 연암선의 기복변화를 영상화하였다. 이 결과에서 P2(교각 2)~P5(교각5) 구간의 수심은 해안에서 멀어질수록 서서히 깊어지는 경향을 보이며, 이에 따라 연암선의 심도변화도 크지 않으나, 평면도에서도 확인된 P5(교각5)와 PY1(주탑1)구간의 사교하는 2개의 구조선을 3차원 영상에서 명확히 확인할 수 있다. PY1(주탑1)~PY2(주탑2) 사이는 평면도에 나타난 바와 같이 5개의 구조선이 복합적으로 위치하거나 사교하는 구간으로, 3차원 영상에서는 STA.2+160을 중심으로 직경 100m 이상의 원형 구조대가 존재하는 것으로 파악된다. 한편, PY2(주탑2)~P6(교각6) 구간은 수심이 가장 깊은 지역으로 연암선도 노선의 북동방향으로 깊게 형성되는 현상도 확인된다.

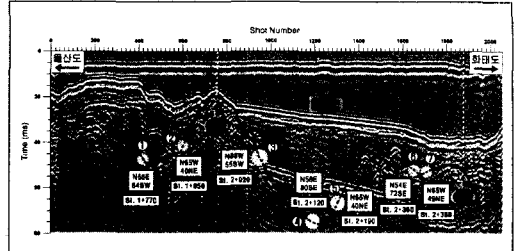


그림 7. 해상 반사법탐사 결과단면 (단일 축선)

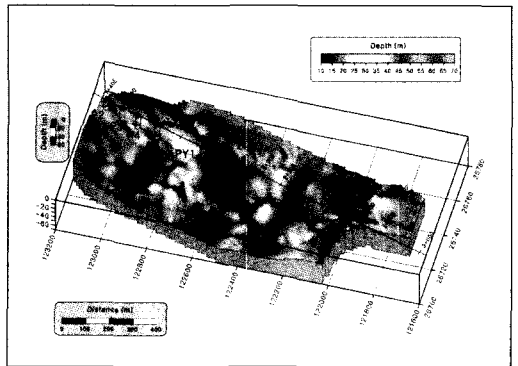


그림 8. 해상 반사법탐사 3차원 영상 결과

4.3.4 해상 굴절법탐사

해상 굴절법탐사의 주 목적은 단일채널 반사법탐사에서 획득할 수 없는 해저 지층에 대한 속도구조 파악으로, 현장 탐사는 각각 GPS가 설치된 송신용, 수신용의 선박 2척을 이용하였으며 자체개발한 무선트리거를 이용하여 측정시간을 공조시켰다.

자료처리방법은 종래의 주시곡선을 이용하는 간편적인 방법이 아니라 토모그래피의 해석시에 이용되는 역산방법을 이용하였으며 그 결과는 그림 9에 나타나 있다. 결과 단면에 걸쳐 표시된 2개의 실선은 풍화암선과 연암선을 의미하는데, 이 결과에서 파악된 각 지층의 위치별 속도값을 단일채널 반사법탐사의 자료처리시 이용하였다. 일반적으로 굴절법탐사의 결과는 지질구조대의 영향권을 표현하므로 해상 반사법탐사, 선구조분석, 위성영상분석에서 이



용하는 선구조(한 지점으로 표현됨)와 달리 지질구조선이 아닌 지질구조대라는 일정정도의 폭을 갖는 영역으로 나타난다.

그림 10은 P2(교각 2) 지점에 대한 수직적인 속도구조를 추출하여 시추결과와 비교한 것으로 해양에서도 지층이나 심도에 따른 속도구조를 파악할 수 있음을 보여준다.

그림에서 탄성파속도 2,500m/s 이상의 연암선이 해저면 기준으로 24m에 나타나며, 시추가 시행된 여러 곳에서의 결과를 종합하면 풍화암 이하(퇴적층, 풍화토, 풍화암)의 두께와 수심이 비례하는 일반적인 경향을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 해상구간 동일한 영역에서 수행된 해상 반사법탐사 및 해상 굴절법탐사는 분석결과 단층파쇄대의 위치가 일치한다. 본 조사에 이용된 해상 반사법탐사는 탐사지의 여건상 단일채널법을 이용하였으므로 자체적으로 탄성파속도를 추출할 수 없었다. 이를 보완하기 위해서는 다수의 검층자료로 속도를 추출하는 방법이 필요하나 해양 구조물의 특성과 시추공 수의 제약으로 해양 굴절법탐사가 수행되었는데, 오히려 이 방법이 해저의 연속적인 지층 변화와 속도값 추출에 유리하다는 결론을 얻었다.

4.3.5 확인 시추조사

위성영상분석, 지표지질조사 결과와 해상 반사법탐사 및 해상 굴절법탐사에 의해 추정된 단층파쇄대의 위치와 방향성을 확인하기 위하여 3공(MBB-1~3)의 시추조사를 실시하였다.

각 시추공별로 위치는 그림 11과 같은데 F1과 F4(혹은 선구조 ④와 ③)의 교차확인을 위한 시추공은 MBB-1, F1(혹은 선구조 ④)의 방향성을 확인하기 위한 시추공은 MBB-2, 노선과 교차하는 F4(혹은 선구조 ③)의 확인 시추공은 MBB-3으로

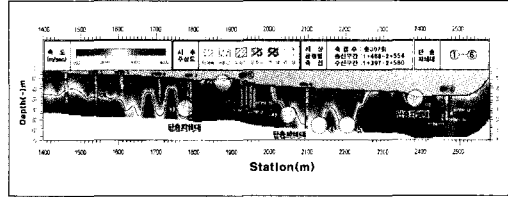


그림 9. 굴절법 탄성파탐사 결과(단면도)

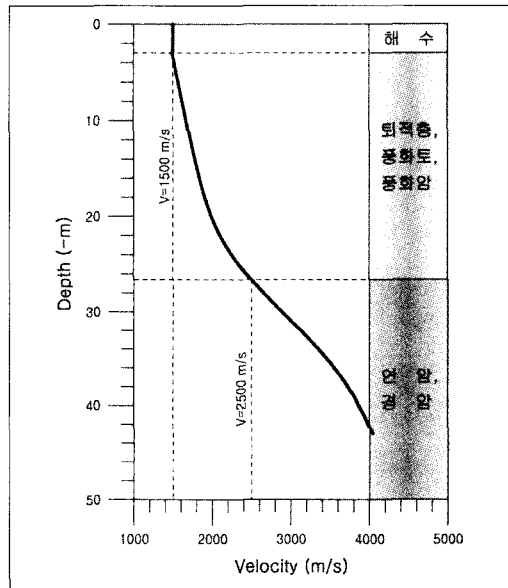


그림 10. 심도별 속도

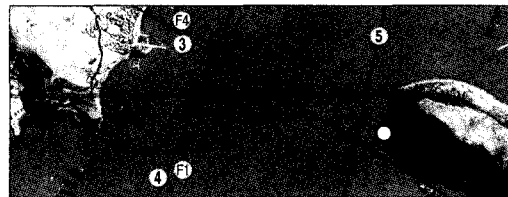
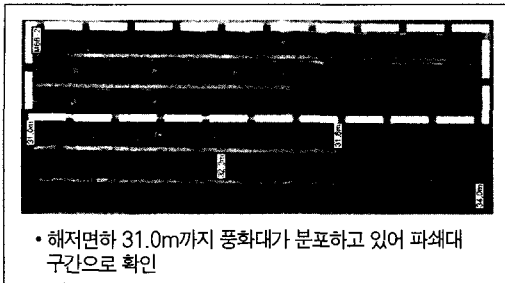


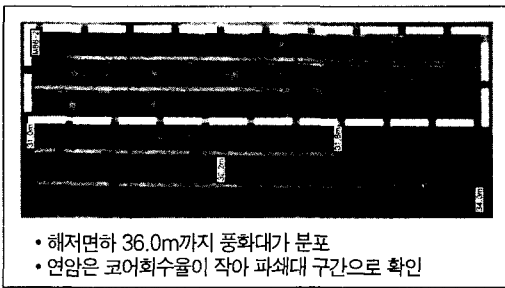
그림 11. 확인 시추조사 위치

계획하였다.

전술한 바와 같이 선구조분석은 예비조사단계에서 육상 DEM자료로 국한되었는데, 이는 개략조사 단계에서 해상 물리탐사 결과로 작성한 해저지형도와 육상 DEM자료의 해상도 차이로 통합자료의 작성성이 불가능하였기 때문이다. 따라서 육상 DEM자

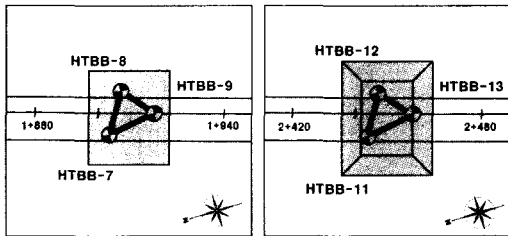


(a) MBB-2의 시추코아



(b) MBB-3의 시추코아

그림 12. 확인시추조사로 확인된 단층파쇄대 사진



(a) 주탑1

(b) 주탑2

그림 13. 탄성과 토모그래피탐사 위치도

로 분석에 의한 선구조는 해상구간에서 수십m 이상의 오차를 가질 수 있는데, 확인 시추조사에서 이를 검증하였다. 확인 시추조사 결과에서 단층 F1과 F4(혹은 선구조 ④와 ③)의 교차점으로 예상되었던 MBB-1의 기반암 심도가 11.6m로 선구조분석 결과보다는 해상 반사법탐사에 의한 결과를 잘 반영하고 있다. 한편 노선상에서 교차하는 단층(혹은 선구조)의 위치도 선구조분석의 결과와 유사하나 정확

한 위치는 해상 반사법탐사에 의해 결정되었다.

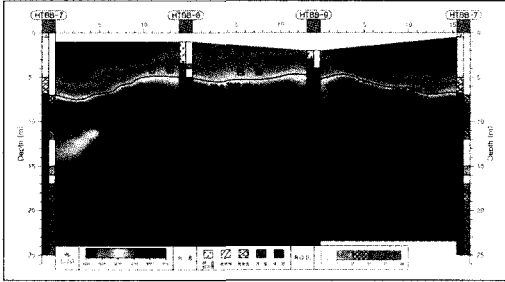
4.3.6 탄성과 토모그래피탐사

해상 반사법탐사나 해상 굴절법탐사는 해상구조물 인근에 대한 단층파쇄대와 같은 선구조 파악에 유리한 개략조사법에 해당하므로 이들 결과에 의해 해상교량의 주탑부의 위치를 선정하였다. 한편 해상교량구간의 지층분포 현황을 파악하기위해 상세 시추조사를 시행하였는데 일반 교대 및 교각부는 매 기초마다 1공 이상, 주탑부는 기초마다 3공 이상의 시추를 시행하였다. 주탑부 3공 이상의 시추공은 3차원 탄성과 토모그래피를 위한 배열이다. 탄성과 토모그래피탐사는 선정된 주탑부에 대한 정밀조사법으로 시추공을 이용하여 지반의 지층구조를 파악하고 단층파쇄대와 같은 연약대의 발달여부를 확인한다.

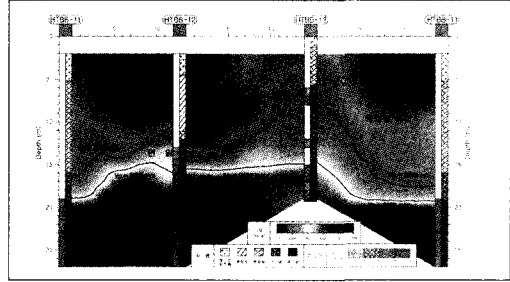
그림 13은 각 주탑부의 위치별로 이용된 3개의 탄성과 토모그래피탐사 위치도로 각 시추공간의 거리는 12.0~15.5m이다.

그림 14는 PY1(주탑1)에 대한 탄성과 토모그래피탐사 결과로 (a)는 탄성과 토모그램(2차원 속도영상)이며 (b)는 3차원 속도영상이다. 토모그램상의 암층 구분은 연암의 속도구간을 2,500~3,500 m/s로 선정(건교부 표준품셈의 안산암이 포함된 A암종의 탄성과속도에 의한 암반분류 참조)하였다. (a)의 토모그램에서 풍화층의 두께는 5.0m 이하이며 연암의 두께도 1.0~2.5m로 비교적 얇게 분포하며 하부는 파쇄대의 흔적이 없는 경암에 해당한다. (b)의 3차원 영상에서는 지층심도 7.0m 하부가 연암이상의 신선한 암반에 해당하며 풍화층과 암반층의 경계가 뚜렷한 수평 층서구조임을 확인할 수 있다.

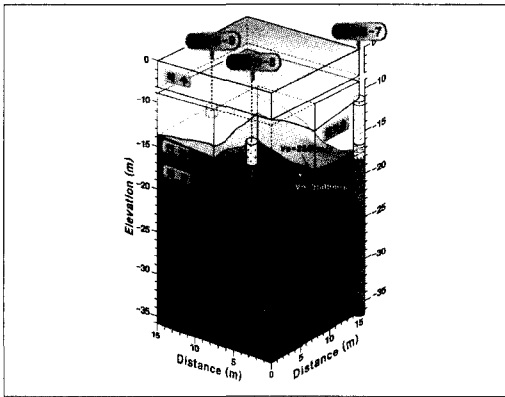
따라서 주탑1의 하부지반은 해저면 기준으로 최대심도 7.0m 하부가 파쇄대가 없는 매우 신선한 암반이며 하부로 갈수록 탄성과속도가 증가하는 경향



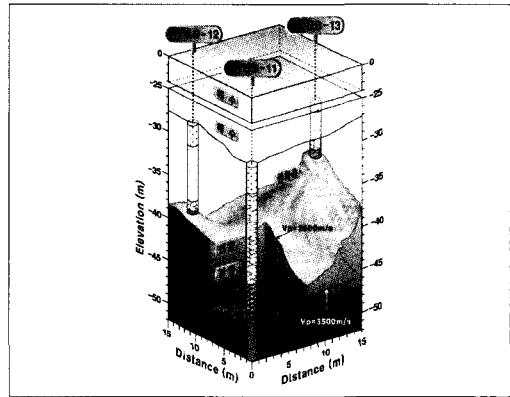
(a) 탄성과 토모그램



(a) 탄성과 토모그램



(b) 3차원 속도영상



(b) 3차원 속도영상

그림 14. 주탑 1의 탄성과 토모그래피탐사 결과

그림 15. 주탑 2의 탄성과 토모그래피탐사 결과

을 보이고 있다.

그림 15는 PY2(주탑2)에 대한 탄성과 토모그래피탐사 결과로, (a)의 토모그램에는 풍화층이 폭넓게 분포하며 연암의 두께도 1.5~9.0m로 변화폭이

크며, (b)의 3차원 영상에서는 암반내에 파쇄대가 없으며 하부로 갈수록 탄성파속도가 증가하나 기반암의 경계가 HTBB-11로 하향 경사하는 특징적인 현상을 확인할 수 있다.

따라서 기반암의 심도가 얇고 수평층서구조를 보이는 주탑1의 기초부는 수중굴착이 가능한 설치식 강재 우물통이 적합하며, 주탑2의 기초부는 풍화층이 두껍고 기반암선이 경사층이므로 기초부를 철근 콘크리트로 치환한 RCD 파일을 근입시킨 강재우물통 방식이 안정적이다.

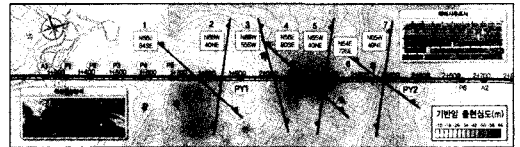
4.4 해상구간 단층파쇄대 종합분석

본 과업에서 해상구간에 계획된 장대교량의 주탑 및 교각기초 위치 선정 및 기초공법 결정의 기초자료인 해저지반의 지질학적 구조 및 지질구조선 파악을 위하여 단계별 조사를 수행하였다. 각 단계는 예비조사(위성영상 선구조 분석, 지표지질조사) → 개략조사(해상 반사법탐사, 해상 굴절법탐사, 확인 시추조사) → 정밀조사(상세 시추조사, 탄성파 토모그래피탐사, 각종 시추공시험)의 순서로 단층파쇄대에 대한 개략조사 및 정밀조사 결과를 종합하여 기반암 출현심도가 낮고 단층파쇄대 영향범위를 벗어나는 지역에 주탑기초를 계획하여 안정적인 구조물 설계를 할 수 있도록 하였다.

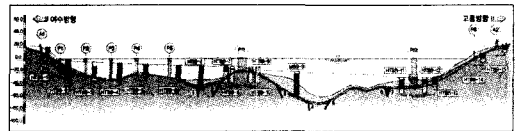
상기 단계별 조사결과를 종합분석한 결과 표 3에서 볼 수 있듯이 위성영상분석 및 지표지질조사 결과를 바탕으로 해상 탄성파탐사 결과에 의해 상세한

해상의 지질구조를 파악할 수 있었다. 또한, 그림 15와 같이 해상구간에 7개의 단층파쇄대를 동반한 구조대가 계획된 교량노선과 교차함을 확인하였는데 주요 선구조는 N54~56E/72~84SE, N65W/40~49NE, N88W/55SW의 방향성을 나타내었다. 이러한 지반정보를 바탕으로 단층파쇄대가 분포한 위치에서 이격시켜 주탑의 위치를 선정하고, 기반암 심도가 얇고 지반이 양호한 곳(주탑1)과 수심이 깊고 지반조건이 상대적으로 불리한 곳(주탑2)에 각각 하중분담율이 65:35인 사장교의 주탑을 계획하여 해저 지층 조건을 최대한 활용하였다.

한편 기초형식도 각 주탑부의 기반암의 심도를 고려하여 설계하였는데 주경간교 주탑1의 주탑기초는 설치식 강재우물통기초로 상부반력을 직접 기반암



(a) 평면현황



(b) 종단현황

그림 16. 단층파쇄대 종합분석 결과

표 3. 각 단계별 조사결과 비교

구분	방향 및 각도	선구조	지표지질	해상탐사	시추조사	교량노선 및 기초와의 관계
①	N56E/84SE			○		P5~PY1, 고각이므로 직접 영향 없음
②	N65W/40NE	○	○	○	○	P5~PY1, NE중각으로 주탑에 영향 없음
③	N88W/55SW			○		PY1~PY2, 거리차로 직접 영향 없음
④	N56E/80SE	○		○	○	PY1~PY2, 고각이므로 직접 영향 없음
⑤	N65W/40NE			○		PY1~PY2, 거리차로 직접 영향 없음
⑥	N54E/72NE	○		○		PY1~PY2, 고각이므로 직접 영향 없음
⑦	N65W/49NE		○	○		PY1~PY2, NE중각으로 직접 영향 없음



에 전달하는 직접기초 형식을 채택하였고 주탑2의 주탑기초는 RCD 파일과 강제우물통을 결합한 형태로서 상부 반력은 강제 우물통을 통하여 RCD 파일로 전달되어 그 지지력이 확보되는 기초형식을 채택하였다.

5. 결론

본 고에서는 해상 반사법탐사와 굴절법탐사의 필요성 및 기본적인 특성에 대하여 고찰하고 설계시 적용된 사례를 중심으로 해상구간 단층파쇄대 분석시 단계별 조사기법 및 해상 탄성파탐사의 적용방안을 소개하였다.

해상 탄성파탐사는 해양 구조물 설계시 사전조사를 목적으로 수행되며, 해저면 심도에 국한된 것이 아니라 해저면 하부의 지층구조, 속도구조와 해저의 지질구조선을 파악할 수 있는 효율적이고 강력한 탐사방법이다. 그러나 석유자원 탐사와 같이 수백~수천 m 이상의 심도에서 수행하는 전통적인 반사법과 달리 토목분야에서는 100m 이하의 천부에서 탄성파탐사를 적용하므로 탐사방법이나 여건에 따른 제약을 사전에 파악하여야 한다. 특히 천부환경은 조수간만이나 유속, 파도, 풍속의 영향을 많이 받으므로 선박의 후미에 스트리머를 설치하고 일정한 속도로 이를 유지해야하는 다중채널법의 적용은 어려움이 많다.

그러므로 우리나라 근해에서 수행되어지는 토목분야의 해상 탄성파탐사는 선박의 이동만 용이하면 간편하면서도 빠른 시간에 탐사결과를 제공할 수 있는 단일채널법이 유리하다고 판단된다. 그러나 이 방법의 단점은 자체적으로 지층의 속도구조 파악이 어려우므로 이를 보완하기 위해서는 다수의 시추공 검층을 이용하거나 탐사가 가능한 여건에서는 연속

적으로 탄성파속도를 획득할 수 있는 해상 굴절법탐사가 추천된다.

결론적으로 해양 토목분야에서 필요로 하는 지질구조의 파악은 지표에서의 경우와 다른 환경이므로 사전에 이를 감안하여 조사·탐사 계획을 세워야 하는데, 탐사의 효율성과 경제성을 고려할 때 해상 탄성파탐사가 필수적이며 이를 이용하여 개략조사나 정밀조사 단계에 적용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

또한, 본 고에서 소개한 단계별 조사기법 즉, 예비조사(위성영상 선구조 분석, 지표지질조사) → 개략조사(해상 반사법탐사, 해상 굴절법탐사, 확인 시추조사) → 정밀조사(상세 시추조사, 탄성과 토모그래피탐사, 각종 시추공시험)로 수행된 결과를 바탕으로 주탑기초 위치 및 기초공법 선정에 활용된 사례를 통해 향후 해상구간 교량 구조물 계획 및 설계시 참고자료로 활용할 수 있기를 바란다.

참고문헌

1. 한국지구물리탐사학회, 2002, 토목·환경 분야 적용을 위한 물리탐사 실무지침, pp262~287
2. 한국지질자원연구원, 2001, 철도교량 설계 기반조사를 위한 고분해능 수면 탄성파반사법의 응용 사례, pp1~22
3. Kim, J.S., Han, S. H., Choi, W.S., and Jung, C.H., 2001, High-resolution seismic reflection profiling on land with hydrophone employed in the stream-water driven trench, Multi-Tamsa, KSEG, 4, 133-144.
4. Yuzuru Ashida, 2002, The geophysical survey in shallow water and transitional region, 한국지구물리탐사학회 특별심포지움 논문집, pp1-15