

동해-1 가스전 해저배관 설치공사에 적용된 최신 해양 측량기술 박요섭†

State of The Art of Offshore Survey Technology for Monitoring Underwater Gas Export Pipeline Installation at DongHae-1 Gas Field Joseph Park

†(주)UST21 부설 해양공간정보시스템연구소(joseph@ust21.co.kr)

요약 - 본 논문은 최근의 석유탐사 및 개발사업 현장에서 사용되고 있는 최신의 측량기술 및 해양공사의 측량 기술 표준화 동향을 소개하고, 이에 기반하여 동해1 가스전 해저배관 공사에 적용한 사례를 기술하였다.

해저배관 시설공사를 수행하기 위한 사전측량 및 시공지원 측량은 다양한 탐사장비가 동원되며, 각 장비들의 운영, 자료처리, 해석, 도면화를 위하여 실시간지원이 가능한 시스템을 운영하는 기술이 요구된다. 이를 위하여 해저 배관 시공단계별(Pre-Installation Survey, Touch-down Monitoring, As-laid As-Built Survey, Post-installation Survey) 요구되는 측량성과 및 이를 획득하기 위한 소해측량 시스템의 성능평가 및 정확도 분석을 수행하였다.

또한, 해저지형 탐사를 위해 동원된 소해측량시스템(Swath Sonar System)에서 취득되는 수심(Bathymetry) 및 후방산란 음압(Backscattered Amplitude) 자료를 맵핑하여 해저배관의 설치 경로를 측량하는 기법에 대하여 소개 하고, 추후 해저배관 보호 및 관리시의 효율적인 모니터링 기법을 제시한다.

1. 서론

대양(Offshore)에서의 석유 및 가스전 개발공사에 활용되는 모니터링 기술은 음향(Acoustic)을 매개로 한 기술들이 중심으로 전개되었다. 육상 원격탐사에서 주요한 매개체로 사용되는 전자기파(Magneto-electric signal)나 광학신호는 해수로 덮여있는 해저면까지 도달되지 못하거나 매우 협소한 정보만을 제공하기 때문에 육상 탐사 기술을 해저배관시설공사의 실시간 모니터링 기술로 적용할 수 없다[1].

음파를 이용한 해저면 및 해저지질 조사를 위한 주요 탐사장비로는 단빔 음향측심기, 소해측량시스템, 사이드스캔 소나, 천부지층탐사기 등이 있으며, 취득하고자 하는 정보의 종류에 따라 각기 다른 주파수와 변조 방식을 이용하고 있다. 그중에서도 소해측량시스템은 모든 해양조사의 기본이 되는 해저지형조사를 위한 기본 탐사 장비로 그 활용영역을 확대해가고 있다. 1960년대에 SeaBeam으로 시작된 소해측량 시스템은 광역 및 대수심 해역의 해저지형을 조사하고, 해저면 퇴적상황을 분석하기 위하여 사용되어 왔으나, 최신의 컴퓨팅 기술 및 디지털 신호처리의 진보와 더불어 소형화되고, RTK-DGPS, Motion Sensor 등의 부가적인 센서의 획기적인 정확도 증가로 인하여 연안의 해상공사 및 정밀한 수중 위치 탐사를 위한 주요한 기술로 대두되고 있다. 소해 측량 시스템을 이용한 해저지형 정보 획득 뿐 아니라, 수신 음파에 추가되어 있는 후방산란 음압 정보를 영상화하는 기술 또한 연구되고 있으며, 소해측량 시스템에서 나온 후방산란 음압 영상을 이용하여 사이드스캔 소나 조사 작업을 대체하고자 하는 노력이 전개되었다[2][3].

국내에서 최초로 시설되는 천연가스 생산설비인 동해1 가스생산시설은 해상의 가스정으로부터 천연가스를 생산하는 해상 플랫폼과 육상 저장기지시설 그리고 두 기지를 연결하는 해저배관으로 구성되었다. 해상 가스전으로부터 육상기지까지 해저배관이 설치될 해역의 최대 수심은 182m이며, 한국해저통신의 RJK(Russia-Japan-Korea) 통신용 해저케이블을 가로질러 부설되도록 계획되어져 있으며, 쿠루시오 난류가 남에서 북으로 향류로 빠르게 흐르고 있다.

동해 1 가스전 해저배관은 울산광역시 울주군 당월리 해안에서 시작하여 플랫폼까지 총 61Lkm, 14"강관 파이프를 최대 수심 182m까지 분포하는 해저면 위에 위치오차(±3m) 로 부설하도록 설계되었다. 연안 부분은 울산신항 건

설에 따른 묘박지 남단을 지나는 경로로 설계되어, 정박선의 앵커 투묘나 어구에 의한 훼손을 방지하고자, KP9부터 KP0+700까지는 2m 준설을 하고 해저배관을 부설하도록 설계되었다.

그림2와 같이 해저 배관은 12m 길이의 단위 파이프를 반잠수식 해상 부설선(HD423)에서 연속적으로 용접 연장하여 해저면 바닥에 부설하는 방식을 이용하였다. 해상 부설선은 8개의 앵커에 의해 위치를 유지하며, 단위 파이프가 용접될 때마다 일정 간격으로 전진하면서 해저배관을 해저면으로 유도하게 된다. 이때, 해저배관이 설계된 노선상에 정확하게 놓여져 가시도를 파악하기 위한 모니터링 공정이 요구되며, 모니터링 정보에 의하여 부설선의 실시간 위치보정이 이루어지도록 설계되었다.

공사를 지원하기 위한 측량은 단계별로 공사전 측량 및 해상 부설시 해저면에 닿는 위치(Touch Down Point)를 확인하고 조정하기 위한 확인 측량과 최종적으로 부설 위치를 측량하는 공사 후 측량 등으로 구성되어 있다.

동해 1 가스전 송출 해저배관 부설을 위한 측량은 4단계의 공정으로 이루어져 있다. 제 1 단계에서는 해저 배관이 계획 노선 상에 공사 장애물이나 위험물이 존재하는 지 여부와 부지지경간(FreeSpan)이 발생할 수 있는 해저지형의 존재유무와 존재할 경우 대체 경로 선정을 위한 조사가 수행된다. 제 2단계에서는 부설선이 해저배관을 부설할 때, 해저배관이 해저면에 닿는 지점을 모니터링하고, 계획노선과의 차이 및 부설 상태를 실시간 고지하여 계획 공차 안에 해저배관이 부설되도록 실시간 모니터링이 수행되어야 한다. 제 3단계에서는 61Km 전체 구간에 부설된 해저배관의 위치와 수심을 전체적으로 측량하여 시공후의 상태를 보고하기 위한 측량이 실시되며, 마지막 4 단계에서 울산 신항 공사와 관련되어 추후 묘박지로 계획된 지역의 하단 및 연안에 놓여진 해저배관의 보호를 위해 준설 후 매립공사가 9Km 구간에서 이루어지는데, 매립공사까지 종료된 시점에서의 준설 깊이와 매립 성토 높이를 보고하기 위한 측량으로 구성된다.

본 논문에서는 해양 가스 생산 시추 시설로부터 육상 저장기까지 천연가스의 송출을 위한 해저배관 부설 공사에 적용된 소해측량시스템을 중심으로 해저배관 계획노선 상의 해저지형 탐사 및 해저배관 실시간 모니터링의 기법을 소개하고, 기존 탐사기법과의 비교를 통해 그 효율성을 논의할 것이다.

2-가 절에서는 동해1 가스전 해저배관 부설공사에 대한 개요를 통해 요구되는 탐사정보를 정리하고, 2-나 절에서는 기존에 적용되던 해저배관 부설 상태 실시간 모니터 시스템을 소개할 것이다. 2-다 절에서는 이번 공사에서 주요하게 사용한 해저배관 부설 모니터링 시스템의 주요 측량기체인 멀티빔 음향측심기를 소개하고, 기존 탐사 방법과의 성과비교 및 정확도 분석을 통해 가시적이고, 정량적 분석이 가능한 탐사기법을 제안하여 추후 해저배관 관리 및 보호의 주요 기술로 멀티빔 음향측심 시스템을 활용하도록 제안한다.

2. 본론

가. 해저배관 부설공사 지원을 위한 해양조사기술

해저 배관 부설을 실시간적으로 원격검측하고 정량적 정보를 제공하기 위한 여러 가지 해저 원격탐사 방법이 도입되었다. 대표적으로, ROV를 이용한 비디오 녹화방식과 음향 탐사 기법을 이용한 소나 시스템들이 주 축을 이루며, 최근에 레이저를 이용한 해저면 탐사 기법도 도입되고 있다.

본 절에서는 현장의 작업 조건과 제공해야 할 정보 요구에 근간하여 최적의 탐사기법을 선정하는 요소들을 정리하고, 동해 1 가스전 공사 현장 조건과 작업안전 및 성능을 고려하여 선정한 위상간섭(Interferometry) 방식의 소해탐사시스템의 기본 원리와 정확도를 분석한다.

(1) 부설 설계 노선 사전조사 및 부설 상태 정보 제공

본 절에서는 대양에서 이루어지는 해저배관 부설공사에서 요구되는 정보의 종류와 양 및 정보제공 형태 등을 분석하고, 각 탐사 시스템의 정보 취득 방식과 장단점을 비교 판단하여 동해 가스전 공사에 적합한 탐사시스템 선정 시 고려되었던 요인들을 분석한다. 이러한 분석을 통하여, 해저배관 설치 후 해저 시설물의 관리 및 유지보수 시에도 적합한 탐사 시스템을 선정하는데 기준을 마련하고자 한다.

(가) 해저지형 프로파일 정보

우선, 해저배관이 부설된 예정 경로 선상의 해저지형에 요철 정보가 정밀하게 제공되어야 한다. 해저지형의 단주기적 요철은 지면에 해저배관이 안착되지 못함으로 해저배관의 불안정을 초래한다. 이러한 원인으로 인하여, 허용 가능한 부지지경간의 연장길이를 고려하여 노선을 선정하게 되는데 해저지형의 프로파일 정보는 대단히 중요한

역할을 수행한다.

(나) 예정 경로 상 장애물 정보

해저 배관 부설 작업 전에 예정 경로 상 해저면에 놓여진 어구나 침선, 혹은 시설물에 대한 정보를 입수하기 위하여 지자기 탐사, 사이드 스캔 소나 조사 등을 수행한다. 이러한 작업 장애 혹은 위험 요소를 사전에 제거하는 필요여부를 결정하는데 요구되는 정보를 제공하여야 한다. 그림2는 사이드 스캔 소나 조사에 의해 드러난 동해1 가스 해저배관 부설 예정 경로(그림 1의 A) 주변에 존재하는 해저배관영상이다. 사이드 스캔 소나 영상에 드러난 바와 같이 보호사석에 의해 보호되지 않고 있는 석유공사 소유의 노출 해저배관은 해저배관 부설선을 유지하기 위한 앵커링 작업에 의해 파손될 여지가 있으므로, 정확한 위치를 부설선 운영팀에 사전 고지해 주어야 할 중요 정보이다.

(다) 해저배관 착지상태 및 3차원 위치 측량

길이 12m 강관에 콘크리트로 코팅하여 자중을 가중시킨 해저배관은 해저 배관 부설선에서 용접, 연결되어 그림3과 같이 해저면에 자유낙하 하여 놓이게 된다. 해저배관이 해저면에 착지되는 지점은 수심에 따라 달라지는데, 부설선 중심위치로부터 약 200m~400m후방에 놓이게 된다. 이때 착지된 해저배관의 3차원 위치를 측정하여 예정 경로와의 오프셋, 부지지 경간의 발생유무를 부설선에 실시간으로 고지하여 상태에 따라 부설선의 위치 및 작업환경을 조절할 수 있도록 정보를 제공해야 한다. 이를 위하여 비디오 녹화, 사이드 스캔 소나, 소해 측량 시스템등을 현장 조건에 맞추어 적용한 후, 무선네트워크나 라디오 데이터 통신 시스템을 이용하여 부설 모선에 실시간 제공하는 시스템을 갖추어야 한다.

(2) 해저배관 착지상태 모니터링 시스템 분석

(가) 비디오 모니터링 시스템(Video Monitoring System)

비디오 모니터링 시스템은 표1a처럼 ROV(Remote Operating System)에 탑재하거나, 모선에서 수중카메라를 자유낙하(Free-Drop) 하여 찍는 방식으로 나뉘는데, 두 방식 모두 카메라의 정확한 수중위치 유지 및 측정(Underwater Positioning System)이 필수적이다. 또한, 화면상 물체의 크기를 측정하기 위하여 레이저 측정 장치나 소나 시스템이 별도로 요구된다.

비디오 녹화 시스템은 일반 비디오 화질로 해저배관 상태를 모니터링 할 수 있으므로 정보의 양 및 질적 측면에서 가장 좋은 모니터링 시스템이지만, 한 화면이 제공하는 조사면적이 5m내외로 좁고, 수질이 혼탁하거나 조류에 의한 유동상태에서 캡처된 모니터링 영상은 상태분석을 위한 정보를 제공해 주지 못한다. 또한 수중에서의 정확한 위치 추정 및 조정을 위해서는 모선에 다이내믹 포지셔닝 시스템(Dynamic Positioning System) 과 중량급 비디오 핸들링 시스템이 갖추어져야만 수행될 수 있다. 본 공사 해역의 상태는 빠른 저탁류에 의해 해수 탁도가 심하여 해저면에서 해저배관을 찾기 위한 시야 확보가 어렵고, 조류에 의한 자세유지가 어려워 ROV에 탑재된 비디오 모니터링 시스템은 부적합하여 적용되지 않았다.

(나) 사이드스캔 소나 시스템(Sidescan Sonar System)

사이드스캔 소나는 그림1b처럼 수중예인체 양 측면에 부착된 소나 어레이에서 좁은 빔 각도의 음파를 해저면으로 방사하여 해저면에서 후방산란되는 음압을 기록하는 시스템이다. 수중예인체가 진행하면서 음파를 방사하고 수신하는 음압기록을 시계열 순으로 누적(Stacking)하면서 얻어지는 영상을 소노그램이라 하며, 한 번의 송수신으로 1km 범위의 해저면에 대한 후방산란 영상을 취득할 수 있는 시스템이다.

음파의 후방산란을 기록하는 시스템이기 때문에, 비균질 퇴적경계면이나, 인공구조물, 노출암반 등의 상태를 파악할 수 있다. 또한 한 번에 송수신으로 넓은 영역에 대한 정보를 제공하므로 해저배관 설계 경로 주변에 대한 조사도 경제적으로 수행되어질 수 있으나, 이 또한 모선에 연결된 지지선(Theter)에 의해 수중에 유도되므로 수중에서의 예인체 위치 측정의 정확도가 다소 떨어진다.

공사 전 측량이나, 공사 후 부지지경간의 발생구간 예측 및 발생여부를 판단하기 위하여 사이드스캔 소나를 탐사에 적용하고 있다.

(다) 섹터소나 시스템(Sector Sonar System)

사이드스캔 소나가 수중예인체에 소나 어레이를 부착하여 빔을 송수신하면서 조사하는 시스템인 반면, 섹터소나

는 표1c처럼 해저에 착지될 수 있는 구조물위에 소나 어레이를 장착한 후, 소나 어레이를 360도 회전하면서 주위의 해저면 상황을 영상으로 구성하는 시스템을 일컫는다. 소나 어레이의 수중 위치를 측정하는 시스템이 함께 부착되어 있으며, 고도센서를 이용하여 소나어레이가 놓여진 수심을 제공해 준다. 소나 어레이가 장착된 지지구조물이 해저면에 착지되어 있기 때문에 탐사시스템이 유동하지 않고 고정 구조물에 대한 안정적인 영상을 획득할 수 있다. 그러나 해저배관에 대한 실시간 모니터링을 위한 연속측량작업에서는 지속적인 지지구조물의 위치를 변화시켜야 하기 때문에 실제 해역에서의 운영 및 모선의 위치 보전이 어렵기 때문에 적용의 사례가 많지 않다.

(라) 소해 탐사 시스템(Swath Sonar System)

소해 탐사 시스템의 대표적인 시스템은 멀티빔 음향측심 시스템(MultiBeam Echo Sonder)이다. 멀티빔 음향측심 시스템은 기존 싱글빔 음향측심 시스템과 달리 표1d처럼 현방향으로 수심의 3배 이상 영역에 대한 해저지형 프로파일 정보를 40에서 240개까지 독립된 빔정보로 제공하여 대상해역에 대한 100% 전역조사가 가능한 시스템이다. 소해 탐사 시스템은 크게 전자적으로 복수 개의 빔을 생성하여 탐사하는 멀티빔 음향측심 시스템과 복수개의 송수신기 조합에 의하여 음파의 위상간섭현상을 관측하고, 위상차로부터 수심정보를 획득하는 위상간섭 소해탐사 시스템(Interferometry Swath Sonar System)으로 나눌 수 있다. 위상간섭 측심시스템은 사이드스캔 소나에서 사용하는 소나 어레이를 여러개 사용하여 동일지점에서 산란되어 수신기로 되돌아오는 음파의 위상차를 수신각으로 환산하는 원리를 이용하여 한 번의 송수신으로 2000개 이상의 해저지형 및 해저영상 정보를 제공한다. 음향간섭 시스템은 수심의 약 3배 내지 7배 정도의 영역을 조사하고, 수심 및 후방산란 영상을 동시에 제공하기 때문에 대양공사의 모니터링 시스템으로 최적의 성능을 구현하고 있다. 또한 수중에서 작동하는 탐사시스템과 달리 조사 모선에 장착 되어, 해수 운동에 의한 모션영향을 보정하고, 정확한 방위계측으로 보다 정밀한 수심 및 수평 위치 정보를 제공한다.

그러나, 소해탐사 시스템에서 사용하는 빔의 폭과 주파수에 따라 수심대별 탐지 가능한 물체의 크기가 한정되어 있으므로, 조사 해역의 조건에 따라 적용시스템을 선정해야 한다.

(마) 소해 탐사 시스템의 성능 기준

소나 시스템을 이용하여 해저면에 놓여진 해저배관의 위치 및 주변 수심을 파악하기 위한 시스템 선정의 중요한 파라메타는 전체 소나 시스템의 근간이 되는 소나 계측 시스템 자체의 거리 분해능(Range Resolution) 및 정확도(Range Accuracy)이며, 이는 각 소나시스템에서 채용한 단일 빔의 퍼짐 각(Beam Angle) 및 Bottom Detection Algorithm의 성능에 따라 달라진다. 또한 탐지 범위(Swath Coverage) 및 계측 밀도(Sounding Density), 위치 정밀도(Position Accuracy) 등 시스템 선정의 중요 파라메타는 표2와 같이 정리할 수 있다.

일반적인 항해용 해도를 제작하는 기관에서 제시하는 소해측량의 기준은 IHO S44를 시작으로 제안되고 있으나, 대양의 해양공사에 적용될 측량기준은 IMCA(International Marine Contractors Association)에서 2002년도에 되어야 초안수준으로 제출되었다[4][5][6][7]. IMCA의 기준안에는 표3에서와 같이 대양에서의 작업종류에 따라 측량 장비의 성능 기준을 제시하고, 표4와 표5에서 제시하는 기준 이상의 성능이 구현되는 장비의 선택을 권장하고 있다[8].

본 공사에서 모니터링 되어야 할 해저배관은 최대 수심 182m에 놓여진 직경 35.56cm(14") 콘크리트로 코팅된 배관이므로, 이 조건을 탐사 시스템의 적용 가능성 기준으로 제시하였다. 또한, 해저배관의 부설위치 허용공차가 3m로 제시되었기 때문에, 182m 해저면상의 해저배관의 위치를 탐측하는데 있어, 적용 탐사체의 위치 정확도에 대한 분석이 필요하다.

표6은 상용화된 소해탐사시스템의 성능기준을 보여주고 있다. 표5에 나타난 계측의 정확도는 직하방 측심 자료를 대상으로 표현하고 있으며, 주파수에 따라 측심 가능 수심과 조사폭이 다르므로 조사 대상 해역 및 탐지해야 할 물체의 크기에 따라 장비의 운영 플랫폼을 선정해야 할 필요가 있다.

나. 위상 간섭계 음향측심 시스템 오차 추정(Interferometry Swath Sonar Error Budget)

모든 음향탐사 시스템의 이론적인 수직 및 수평성분의 정확도는 탐사 시스템이 탑재된 모션(Platform)의 해수면 혹은 해수 속에서의 운동량 계측 성과 및 해수의 물리적 특성에 종속적이다. 모선의 운동 상태를 계측하기 위하여, 3축 가속도 센서를 이용하여 모선의 Heave, Pitch, Roll, Yaw 등의 운동 각특성(Instant Motion Angle Measurement)을 계측한다. 그리고 모선에 탑재된 GPS 안테나와 진북 기준의 선수방향을 계측하는 자이로 컴퍼스 계측 성과를 이용하여, 소나의 계측 중심의 지구좌표계 상의 위치변환을 요구한다. 또한 소나 프로세서에서 계측

하는 해저면 탐지체까지의 소나의 전달시간과 수신각을 이용하여 직하방 수심과 수평방향 이격거리를 환산하게 되는데 필수적으로 요구되는 수층별 음속도 계측이 필수적이다.

각각의 부센서가 소나시스템과 결합하여 나타내는 최종 지형 측량 성과내에 유포된 총오차에 대한 추정을 Total Propagate Error(TPE) Budget이라 부르며 멀티빔 음향측심 시스템의 TPE는 Rob. Hare[11]의 논문에서 체계화되었다.

위상간섭(Interferometry Process)원리를 이용한 측심 시스템은 사용 주파수의 실수배 간격으로 이격된 네 대의 수신 소나 어레이와 하나의 송신 어레이로 이루어진 트랜스듀서를 이용한다. 트랜스듀서는 트랜스듀서 면의 직각 방향으로 매우 빔 폭이 좁고 펄스의 길이가 작은 빔을 지면을 향해 발사하기 때문에, 소나 빔이 도달하는 해저면의 면적은 대단히 작아 하나의 점으로 가정할 수 있다. 해저면과 트랜스듀서가 이루는 기하학적인 관계는 그림4와같이 표현될 수 있다. 이때, 해저면은 평탄하다고 가정되며, 해저면에서 반사되어 되돌아오는 음파의 왕복 주사 시간을 수중 음속 프로파일을 이용하여 경사거리(r)로 환산하여 취득한다. 수신각(θ)은 동일 지점에서 반사된 음파가 일정하게 이격된 수신 어레이에 도착했을때의 위상을 관측한 후, 네 대의 수신 어레이에서 얻어진 신호들의 위상차(ϕ)를 이용하여 식(1)의 관계로 구할 수 있다. 이러한 원리를 이용한 위상간섭 Swath Sonar의 정확도는 위상차 계측의 정확도(탐지각 정확도)와 음파의 왕복 주사 시간 계측 시스템의 정확도(탐지거리 정확도)에 종속된 변수이므로, 알려진 종속 계측 시스템의 정확도를 이용하여 전체 계측 시스템의 정확도를 추정할 수 있다.

$$\phi = 2\pi dsin(\theta)/\lambda \quad (1)$$

λ , d는 시스템 설계 시에 정해진 변수이고, 위상차(ϕ)가 계측가능하다면, 탄착지점과 트랜스듀서가 이루는 수신각(θ)을 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\theta = arcsin(\phi\lambda/2\pi d) \quad (2)$$

일반적으로 수중에서의 음파전달 거리는 음파의 왕복주사시간(t)와 수중음속(S)의 곱으로 표현된다. 그러나 멀티빔 음향측심에서는 보다 정밀한 거리 관측을 위하여 단일 대표 수중 음속을 사용하지 않고, 대상 해역내에서 음속이 변화하는 수층별 음속 및 변화율을 적용하므로, 수층별 음속관측기로 관측된 음속 프로파일 이용하여 비선형 경사거리를 추정하여 거리를 계측한다.

(1) 거리 계측의 정확도(Range Accuracy)

거리의 계측은 음파가 특정 해저면까지 왕복 주사 시간과 해수에서의 음속의 곱으로 계산된다. Submetrix에서 이용하는 시간 계측 시스템의 정확도(T_{acc})는

$$T_{acc} = 9 \times 10^{-6} s \quad (3)$$

이고, 이로부터 발생되는 시각오차비율(T_{err})는

$$T_{err} = \frac{T_{acc}}{(R/S)} \quad (4)$$

이 된다. 여기서, R 은 주사거리(m)이고, S는 수중 음속(m/s)이다

수중음속은 특별히 고안된 수층별 음속관측기(Sound Velocity Profiler)로 관측하는데, 일반적 음속관측기의 정확도(S_{acc})가 $\pm 0.75m/s$ 이고, 이를 오차 비율로 표현하면,

$$S_{err} = \frac{S_{acc}}{S} \quad (5)$$

이 된다. 이러한 주사거리를 탐측지점의 수심과 트랜스듀서에서부터의 수평거리로 환산하면, 수심 오차 범위 (D_{eor})와 수평 거리 오차 범위(H_{eor})를 식(6)과 (7)에 의해 구할 수 있다.

$$D_{eor} = |(T_{err} + S_{err}) \cdot R \cdot \sin(\theta)| \quad (6)$$

$$H_{eor} = |(T_{err} + S_{err}) \cdot R \cdot \cos(\theta)| \quad (7)$$

(2) 각 계측의 정확도

해저면에서 후방산란되어 트랜스듀서내에 일정한 간격(w)으로 장착된 4개의 수신 소나 어레이에 되돌아오는 음파의 지연시각과 그에 따른 음파 신호의 위상차를 계측하여 수신각을 결정하는 시스템에서 각(Angle) 계측의 정확도는 트랜스듀서의 수신 소나 어레이의 설치 간격 정확도에 기인할 수 있다. 수신 소나 어레이의 설치 간격은 사용 파장의 실수배에 해당하는 거리이며, 최종 입사각은 최대 이격 간격에 기반하여 계산된다. 또한 위상차는 $0^\circ \sim 90^\circ$ 로 표현되므로, 트랜스듀서 내 수신 소나 어레이의 설치 간격의 정확도(T_{acc})와 단위 간격이 나타내는 각 (Sector Angle)과 곱해져서 식(8)과 같이 수신각 오차범위(T_{err})로 표현할 수 있다.

$$T_{err} = \frac{T_{acc}}{w} \left(\frac{90}{w} \right) (deg.) \quad (8)$$

수신각 정확도는 또한 위상 계측의 정확도(P_{acc})와도 연결되어 있다. 위상 계측의 정확도는 신호 내 잡음과 연관되어 있으며, 신호 대 잡음비(S/N Ratio)가 클수록 정확도는 높아진다. 일반적으로 단파장 위상간섭계 센서의 경우 위상 정확도는 전체 대역의 $\pm 1\%$ 이고, 이를 식(9)와 같이 수신각(P_{err})오차범위로 나타낸 후, 식(10)에 의해 수신각도에 따른 위상차 오차율($P(\theta)$)을 계산할 수 있다.

$$P_{err} = \frac{P_{acc} \cdot 90}{w} (deg.) \quad (9)$$

$$P(\theta) = \frac{P_{err}}{\theta} \quad (10)$$

식(8), 식(9), 식(10)으로 산정된 수신각 오차가 수심 오차에 끼치는 영향은 식(11)으로 표현되며, 수평거리 오차에 끼치는 영향은 식(12)으로 나타낼 수 있다.

$$D_{eoa} = |R \cdot (\sin(\theta + T_{err} + P_{err}) - \sin(\theta))| \quad (11)$$

$$H_{eoa} = |R \cdot (\cos(\theta + T_{err} + P_{err}) - \cos(\theta))| \quad (12)$$

$$D_{eos} = D_{eor} + D_{eoa} \quad (13)$$

$$H_{eos} = H_{eor} + H_{eoa} \quad (14)$$

트랜스듀서가 가지는 수평 및 수직 오차범위는 식(6)과 식(7)에서 얻어진 주사거리 계측 오차에 의한 수심 오차 범위, 수평 거리 오차 범위 및 식(11)과 식(12)에서 정의된 수신각 계측 오차에 의한 수심 오차 범위 및 수평 거리 오차를 합하여 식(13)과 식(14)로 정의된다.

(3) 모션 센서의 정확도

수심 및 해저영상을 관측하는 트랜스듀서는 해수에 의하여 계속적으로 요동하고 있으므로, 트랜스듀서가 장착된 플랫폼(모선이나 ROV)의 움직임은 탐측지점의 수직 및 수평위치에 직접적이고 큰 영향을 끼친다. 모션센서의 기본 관측 값은 3축(X,Y,Z) 각가속도값이며, 이는 플랫폼의 좌표계 상 Roll, Pitch, Heave, Yaw 값으로 출력된다. 최종 관측 수심값은 소나 벡터로 표현된 얻어진 2차원 관측값(R, θ)을 모션에서 얻어진 관측값 행렬에 곱하여 3차원 회전변환을 수행하여 얻게 된다. 모션센서와는 별도로 트랜스듀서의 진행방향을 관측하는 자이로 컴퍼스에서 출력되는 관측치는 최종 관측치의 수평 위치 정확도에 영향을 끼친다.

Roll관측치 오차(θ_r)는 빔의 수신각(θ)과 같은 축상에서 발생하기 때문에 식(15), 식(16)으로 표현되며,

$$D_{emr} = |R \cdot (\sin(\theta + \theta_r) - \sin(\theta))| \quad (15)$$

$$H_{emr} = |R \cdot (\cos(\theta + \theta_r) - \cos(\theta))| \quad (16)$$

Pitch관측치 오차에 의한 최종 관측치 오차와 Pitch의 관측 한계치(ψ_{max})를 기준으로 하여 식(17), 식(18)으로 표현된다.

$$D_{emp} = |D \cdot (\cos(\psi_{max} + \psi) - \sin(\psi_{max}))| \quad (17)$$

$$H_{emp} = |D \cdot (\sin(\psi_{max} + \psi) - \sin(\psi_{max}))| \quad (18)$$

또한 선수각 관측치(Φ)의 오차는 식(19)으로 표현된다.

$$H_{emy} = R \cdot \tan(\Phi) \quad (19)$$

위에서 나열한 플랫폼 운동의 개별 관측치로부터 전체 관측치 오차의 범위는 식(20)과 식(21)에서와 같이 RMS합의 형식으로 나타내어질 수 있다.

$$D_{em} = \sqrt{(D_{emr})^2 + (D_{emp})^2} \quad (20)$$

$$H_{em} = \sqrt{(H_{emr})^2 + (H_{emp})^2 + (H_{emy})^2} \quad (21)$$

본 절을 통해 분석된 각 계측센서의 정확도를 통합하여 표현하면, 식(22)과 식(23)으로 정리할 수 있으며, 수심 및 수신각에 따른 위치 정확도는 그림5와 6에서 같이 트랜스듀서에서 멀어질수록 그리고 수심에 비례하여 감소됨을 알 수 있고, 수심 200m에서의 수평 위치 정확도가 1.314m이므로, 본 공사의 설계 기준을 만족하는 시스템으로 판단 할 수 있다.

$$D_{err} = \sqrt{(D_{se})^2 + (D_{me})^2 + M_{eh}} \quad (22)$$

$$H_{err} = \sqrt{(H_{se})^2 + (H_{me})^2 + P_e^2} \quad (23)$$

여기서, P_e 는 플랫폼 위치 정보 취득용 측위 시스템의 정확도, M_{eh} 는 모션센서에서 계측된 Heave의 정확도이다.

다. 해저배관 모니터링을 위한 계측 시스템 구성

본 절에서는 동해-1 가스정과 육상 기지를 연결하는 해저배관 부설 공사 중 부설선에서 부설중인 배관이 해저

면 착지위치와 착지 상태를 실시간으로 모니터링하는 과정 및 성과를 부설선에 전송하기 위해 제안된 모니터링 시스템(그림7)과 모델의 현장적합성을 논할것이다.

(1) 측심 시스템 구성과 운영

수심 약 180m에 존재하는 해저배관의 위치를 실시간 파악하기 위하여, 2000마력 엔진이 탑재된 조사선 좌현에 Submetrix 2000(117KHz) 트랜스듀서와 TSS-DMS05 모션센서를 수심 약 2미터 하에 지지구조물을 이용하여 장착하였다. 트랜스듀서에서 송신되는 음파의 최대 경사 거리를 300m로 설정하고, 하나의 트랜스듀서 당 4096개의 빔 샘플을 취득하여, 실제 조사 해역의 수평거리는 약 240m, 하나의 신호 샘플링 당 0.0098m를 대표하여 해저배관 직경(35.56cm)에 약 36개의 샘플이 도달하도록 운영하였다.

정확한 수층별 수중 음속을 수심 계산에 이용하기 위하여, 조사 시작 전/후 그리고 매 2시간 마다 해역의 최대 수심까지 SVP를 내려 수심 1m 단위별 음속의 변화를 관측하고 이를 자료처리 시스템에 예측 조위 성과와 함께 적용하여 기준면 하(약최저저조면) 수심성적을 산출하였다. 그림 8은 Touch Down Monitoring시에 얻은 수심대별 음속의 변화 프로파일을 나타내고 있다. 음속 프로파일은 관측 시간과 위치에 따라 현저한 차이를 나타내고 있고, 빔의 궤적이 비연속적으로 변화하는 수온약층 위치가 조석으로 변화됨을 파악할 수 있다.

(2) 측위 시스템 구성과 운영

조사선의 지구 좌표계 상 절대 위치와 Submetrix 2000에서 취득한 수심자료의 위치를 보정하기 위하여, 연안에서 약 20Km 떨어진 해역가치에서는 RTK-DGPS를 적용하였으며, 20Km외해지역에서는 해양수산부에서 운영중인 비이콘 DGPS 보정신호를 수신하여 1m내외의 수평 위치 정확도를 확보하였다.

Submetrix 2000과 같은 소해 탐사 시스템은 현방향으로 빔을 넓게 송수신으로 함으로, 송수신 순간의 선수각(Instant Heading)은 측심 정보의 수평 위치 정확도에 영향을 끼친다. 또한 일반적인 자이로 컴퍼스는 대부분 자북을 0°로 지시하나, 본 공사에서는 진북 좌표계 시스템을 사용함으로, 울산 해역의 진북과 자북의 편차(7.1°W)를 적용하여 실시간으로 모션센서에 입력한 후, 모션센서에는 실시간 Yaw 관측치를 입력된 Heading 관측과 더불어 전체 측심 위치 보정에 활용하도록 운영하였다.

(3) 수심 및 후방산란 음압 자료처리

취득된 수심 원자료에는 다양한 환경적 요인에 의한 오측자료가 혼재되어 있으므로, 이에 대한 적절한 후처리가 요구된다. 또한, 관측 수심 자료는 관측 당시의 조고 및 파고에 의한 영향으로 수심성과의 기준면보다 높은 바다 상황에서 취득한 것이므로, 이에 대한 적절한 보정이 요구된다. 그리고, 조사선에서 취득한 GPS자료와 Gyro자료 및 선박내 센서들의 구성도에 따른 동적 위치 오프셋을 고려하여 지구 좌표계 상의 수심 및 후방산란 성과로 변환하는 맵핑 과정이 요구된다. 이때 최종 성과 도면의 축척 및 제공해야 할 정보의 속성에 따라 그림8과 같은 디지털 해저지형 모델을 생성한다. 그림 8에서 보여주는 바와 같이, 취득된 수심 원자료를 디지털 해저지형으로 변환하여, 필요한 방향 및 축척에 따라 프로파일을 작성하거나 3차원 지형모델에서 관심영역의 위치와 수심을 확인할 수 있다. 이러한 지형모델링 작업을 통해 부설 작업이나 준설작업의 위치나 물량을 산정할 수 있는 기본 자료를 구축하게 된다.

또한 도면 제작을 위해선 격자망 자료(Grid data)를 구축하게 되는데, 격자망의 크기는 멀티빔의 경우, 수심의 5%에 해당하는 크기를 대표격자로 크기로 선정하는데[12], 본 공정에서는 실시간 해저배관 위치 확인이 주 목적이었기 때문에, 후방산란 음압 자료를 중심으로 1m 격자를 생성하여 해저배관의 위치 확인 기본 맵으로 사용하였다.

사이드스캔 소나의 후방산란 음압 자료와 달리 위상간섭 소해 탐사 시스템에서 제공하는 후방산란 음압자료는 각 음압자료의 정확한 위치가 수심과 함께 기록되어 정확한 맵핑의 자료로 활용할 수 있다. 그림 9에서 보여주는 바와 같이, 그림9a는 그림1의 B지역에 대한 3차원 해저지형에 수심의 기복을 의사칼라(Pseudo Color)로 표현한 것이고, 그림9b는 수심과 함께 동시에 취득된 음압을 3차원 해저지형 모델의 표면색으로 표현한 것이다. 그림 9에서 보여주는 바와 같이 준설구역 안에 부설된 해저배관의 위치를 수심의 기복만으로 해저배관을 판단하는 것과 3차원 준설지형 모델위에 동시에 취득한 음압자료를 표면색으로 입혀서 분석할 경우, 후자가 더욱 명확한 정보를 제공해 준다. 이러한 경우는 해저면에 존재하는 목표물이 배경이 해저 퇴적 상황과 확연하게 상이한 매질로 구성되어 있을 경우 더욱 효과적이다. 서로 다른 재질의 소나 탐사체는 상호 큰 후방산란 음압 차이를 발생시키므로, 해저배관과 같이 콘크리트 재질의 목표물은 강한 후방산란을 일으키고 명확하게 맵핑될 수 있다[13].

3. 결론

해저배관 부설 공사는 최신의 다양한 해양기술들이 종합되어 구현되는 공정이다. 특히 일상적으로 이루어지는 작업환경 모니터링 기술은 빠른 대응시간과 직관적이며 정성적인 정보를 요구하고 있다. 빠른 컴퓨팅 기술과 하드웨어의 발달은 기존의 대형 조사선에서만 탑재되었던 소해측량시스템을 소형화시켰고, 모션센서나 RTK-DGPS시스템등의 정확도 개선으로 인하여 최종 성과의 정확도는 1m 안에 존재한다. 이러한 탐사장비 및 기술의 발달은 대수심에 존재하는 유전 개발을 촉진하고 있으며, 관련 공사도 증가하고 있다.

본 논문에서는 국내 최초로 이루어진 동해-1 가스 송출을 위한 해저배관 부설 공사에서, 해저배관이 부설되는 상태를 모니터링 하고 위치를 파악하기 위한 모니터링 시스템의 선정기준 및 그 과정을 정리하였다.

작업 수심 및 작업자의 요구 정보를 충족시키기 위하여 기본 탐사 시스템의 정확도를 기존 탐사시스템과 비교하고 종합적으로 검토하였고, 이를 현장에서 구현하여 성공적으로 해저배관 공사를 지원하였다. 또한 수심과 후방산란 음압을 이용한 해저배관의 위치에 대한 직관적인 정보를 제공하는 정보 융합(Data Fusion)사례도 제시하였다.

초기 서론에서 언급하였듯이, 기존의 해저배관 공사는 기술의 한계로 인하여 사석에 의하여 완전히 보호되어야 할 해저배관이 노출되어 있거나 부지지경간이 상당부분 방치되어 있는 것으로 사료된다. 현재 국내에서도 천연가스관 이외에도 상당량의 해저배관이 부설되어 있는데, 본 논문에서 제안하는 소해측량시스템을 이용하여 해수 탁도나 조류에 영향을 덜 받으며, 한 번의 조사로 광역의 해저면 퇴적상황 및 해저지형 정보를 획득하여 시설 후 해저배관 현황에 대한 기초 정보를 확보하고 이를 토대로 시설들을 보완하는 것이 대형 해양 사고를 미연에 방지하는 지름길이라 사려된다.

4. 참고문헌

- [1] Christian de Moustier, Haruyoshi Matsumoto, "Seafloor Acoustic Remote Sensing with Multibeam Echo-Sounders and Bathymetric Sidescan Sonar Systems," Marine Geophysical Researches, Vol. 15, pp. 27 - 42, 1993.
- [2] Payson R. Whitney, III; Charles J. Natale Jr.; and James P. Nash, P.E. "Use of Marine Remote Sensing Data for submarine Cable Route Planning and Siting," IEEE Ocean 2000 Proceeding, PP.45-54.
- [3] Larry A. Mayer, Brian Calder, James S. Schmidt, Chris Malzone, "Providing the Third Dimensions : High-resolution Multibeam Sonar as a Tool for Archaeological Investigations - An Example from the D-Day Beaches of Normandy," Proceedings of U.S Hydro 2003, Electronic Journal, 2003.
- [4] IHO, *Standards for Hydrographic Surveys, 4th ed. IHO Special Publication No 44.*, International Hydrographic Bureau, Monaco, 1998.
- [5] LINZ, *Hydrographic Multibeam Echosounder Survey Standards, TH Standard 23 Ver. 2.2*, National Topographic Hydrographic Authority, Land Information, New Zealand, 2001.
- [6] NOAA, *Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables*, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000.
- [7] USACE, *Hydrographic Surveying, Engineering Circular 1130-20210*, US Army Corps of Engineers, Department of The Army, 2001.
- [8] Edwin Danson, *Guidelines on the Use of Multibeam Echosounders For Offshore Surveys*, The International Marine Contractors Association, IMCA, 2002.
- [9] SEA(Advanced Products) Ltd, *2000 Series Information*, Ver1.31, May 2001.
- [10] Editor, "Multibeam Echo Sounders Shallow Water," HYDRO International, GIRC publication. July/August 2003, pp.38-41.
- [11] Rob Hare, "Depth and Position Error Budgets For Multibeam Echosounding," International Hydrographic Review, Monaco, LXXII(2), September, 1995, pp.37-69.
- [12] James V. Gardner, John E. Hughes Clarke, and Larry A. Mayer, "Multibeam Mapping of the Long Beach, California, Continental Shelf," Open File Report 99-360, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 1999.
- [13] Mike B. Brissette, John E. Hughes Clarke, "Side Scan Versus Multibeam Echo Sounder Object Detection: A Comparative Analysis," Proceedings of U.S. Hydrographic Conference 2001, Electronic Journal, 2001.

Table 1. Methods of Touch Down Monitoring.

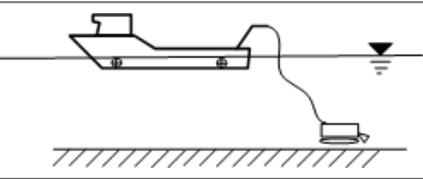
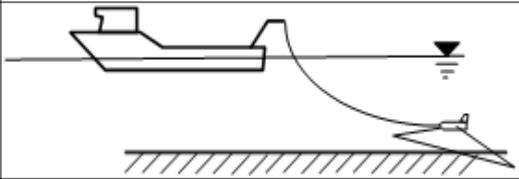
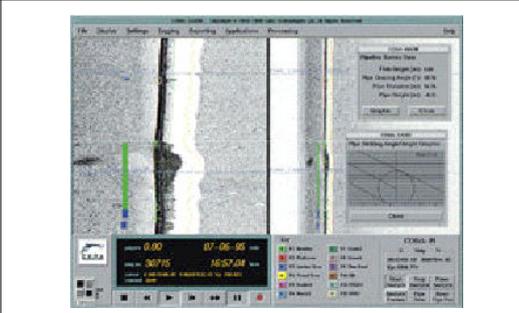
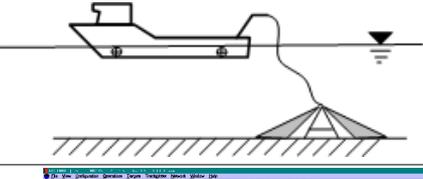
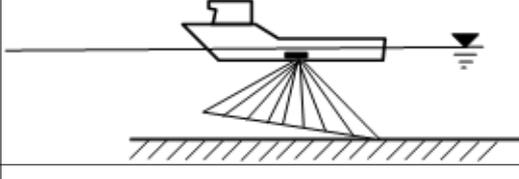
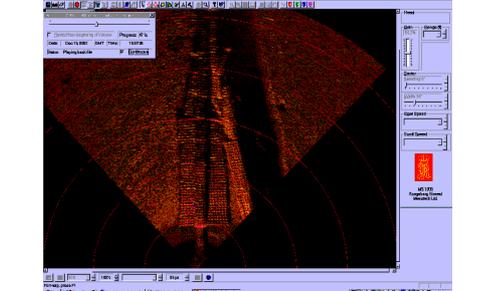
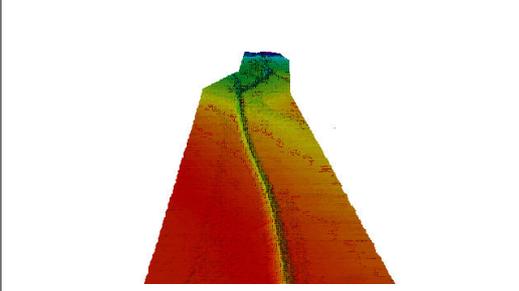
	(a) Video Monitoring	(b) Side Scan Sonar
Method		
Type		
Ad/Dis	<ul style="list-style-type: none"> - Visual Photometric Information - With Large and DP Vessel - Small Field Of View - Fast Decision 	<ul style="list-style-type: none"> - Visual Sonogram - With Small and Non-DP Vessel - Large Field Of View - Difficultly tow-fish positioning
	(c) Sector Sonar	(d) Swath Sonar
Method		
Type		
Ad/Dis	<ul style="list-style-type: none"> - Visual Sonogram - With Small and DP Vessel - Medium Field Of View - Difficultly Handling System 	<ul style="list-style-type: none"> - 3D Bathymetric & Sonogram - With Small and Non-DP Vessel - Large Field Of View - Sophisticated Post Processing

Table 2. Specifications of Swath Sonar System for Seabed Monitoring.

Information	Parameter	Definition
Bathymetry	Sounding Density	Average distance between adjacent depth soundings
	Sounding Regularity	Std. deviation of distance between soundings
	Sounding footprint	Size of the area which influence each sounding
	Position Accuracy	Accuracy of positioning of each sounding
	Vertical Accuracy	Std. deviation of vertical sounding errors
Bottom Features /Objects	Minimum Size	Minimum size of detectable object/feature
	Position Accuracy	Position accuracy of each feature/object

Table 3. Recommended Survey Order by IMCA[8].

	Survey Type	Working Type
1st Order	Site Survey	-Template or Jacket Installation -Detailed route engineering surveys -Route Surveys in confined areas -Surveys inports and harbours -Dredging and inshore engineering surveys
2nd Order	Site Survey	-Route reconnaissance Surveys -Geo-hazards and clearance surveys -Coastal engineering surveys -Deepwater geophysical and engineering surveys(Conducted by temote vehicle)
3rd Order	Bathymetric Survey	-Continental shelf cable route surveys -Continental shelf charting surveys -Export pipeline route surveys
4th Order	Reconnaiss-ance Survey	-Deepwater cable route surveys -Deepwater charting surveys -Surveys for Exclusive Economic Zone assessments and delineation

Table 4. Recommended Depth Accuracy by Survey Order[8].

Depth	1st		2nd		3rd		4th	
	Depth Accuracy(m)	Min Bin Size(m ²)	Depth Accuracy(m)	Min Bin Size(m ²)	Depth Accuracy(m)	Min Bin Size(m ²)	Dpeth Accuracy(m)	Min Bin Size(m ²)
25m	0.3	0.6	0.5	1.4	0.6	1.8	0.8	2
50m	0.5	1.1	0.7	2.8	0.9	3.7	1.1	4
75m	0.6	1.7	0.9	4.2	1.2	5.5	1.5	6
100m	0.8	2.3	1.2	5.6	1.6	7.4	2.0	8
150m	1.2	5.1	1.7	8.4	2.3	11.1	2.9	12
200m	1.5	5.9	2.3	11.1	3.0	14.7	3.8	16
300m			3.4	16.6	4.5	22.3	5.7	24
400m			4.5	22.1	6.0	27.0	7.5	32
500m			5.6	27.6	7.5	34.0	9.4	40
750m					11.3	52.0	14.1	60
1000m							18.8	81
2000m							37.5	162

Table 5. Recommended Horizontal Positioning Accuracy by Survey Order[8].

Depth	1st	2nd	3rd	4th
	Horizontal Accuracy 2m + 2%×depth	Horizontal Accuracy 5m + 5%×depth	Horizontal Accuracy 10m + 5%×depth	Horizontal Accuracy 50m + 5%×depth (below 200m)
25m	2.5m	6m	11m	
50m	3.0m	8m	13m	
75m	3.5m	9m	14m	
100m	4.0m	10m	15m	
200m	6.0m	15m	20m	
300m		20m	25m	65m
400m		25m	30m	70m
500m		30m	35m	75m
750m			48m	88m
1,000m			60m	100m
2,000m			110m	150m

Table 6. Specifications of Commercial Swath Sonar System[9][10].

Model	Product	Frequency	Beam Width	Depth	Depth Res.	Acc.
Seabat 8125	Reson	455kHz	C:0.5 A:1.0	120m	0.6cm	Non
Seabat 8101	Reson	240kHz	C1.5 A:1.5	500m	1.25cm	Non
Submetrix 2000	SEA	117kHz	C: A:1.7	200m	0.75cm	4cm - 15cm
EM3000	Simrad	300kHz	C:1.5 A:1.5	150m	1cm	0.5%
EM2000	Simrad	200kHz	C:1.25 A:1.25	250m	1cm	0.5%
FanSweep 15	Atlas Hydrographic GmbH	200kHz	C:1.3 A: Variables	250m	1cm	0.2%

※ **C** is Crosstrack width, **A** is Alongtrack beam width

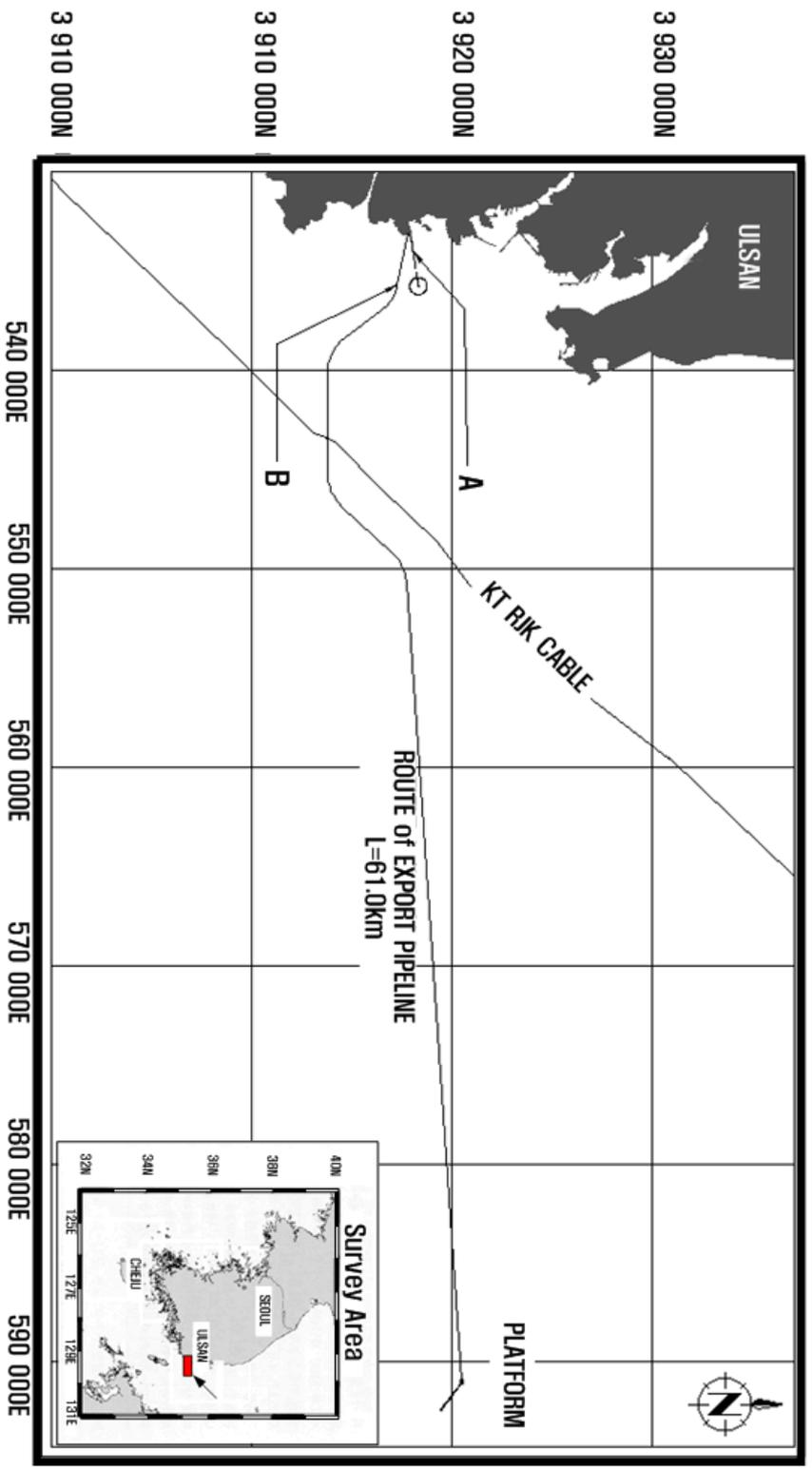


Figure 1° Export Pipeline Route on DongHae-1 Gas Field

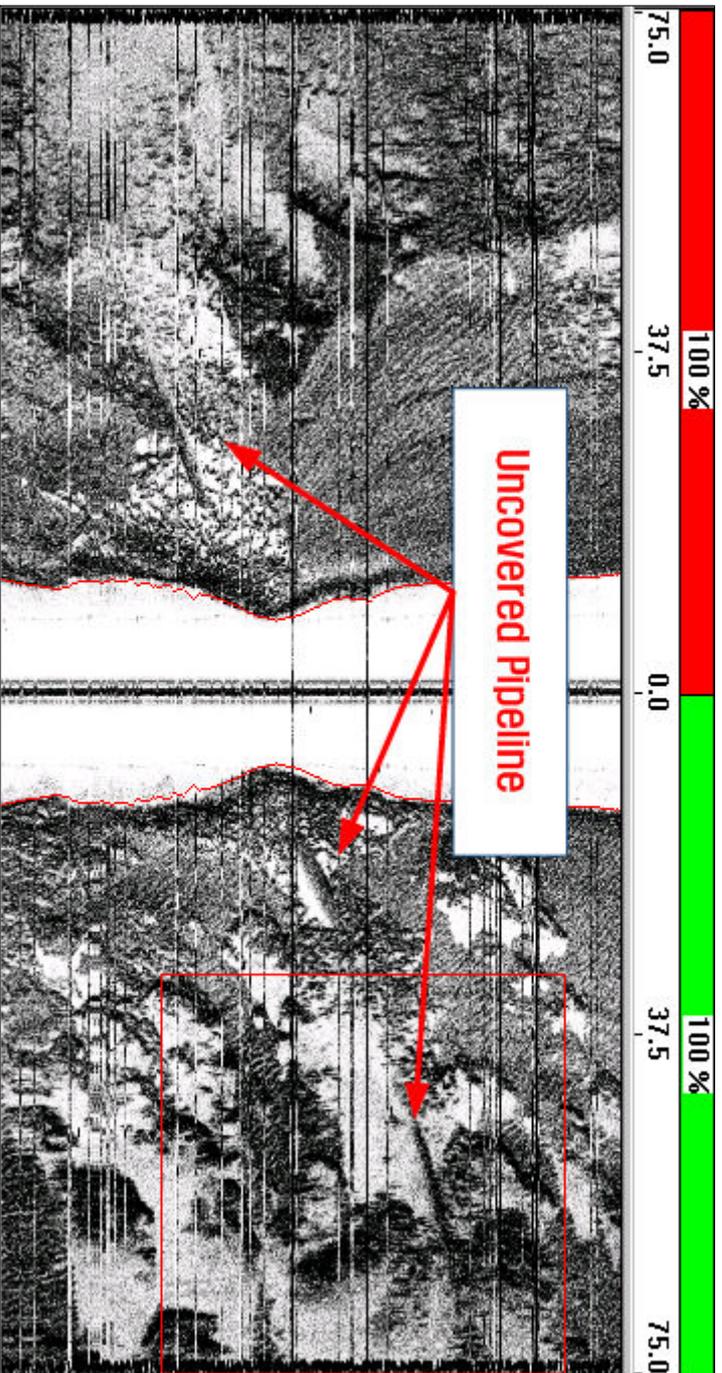


Figure 2° Uncovered KNOC's pipeline revealed by sidescan sonar at near planned route(Benthos SIS1500' Swath Coverage 75m' Below 13° 2m Depth)° There are missed dumping rocks around exposed pipeline°

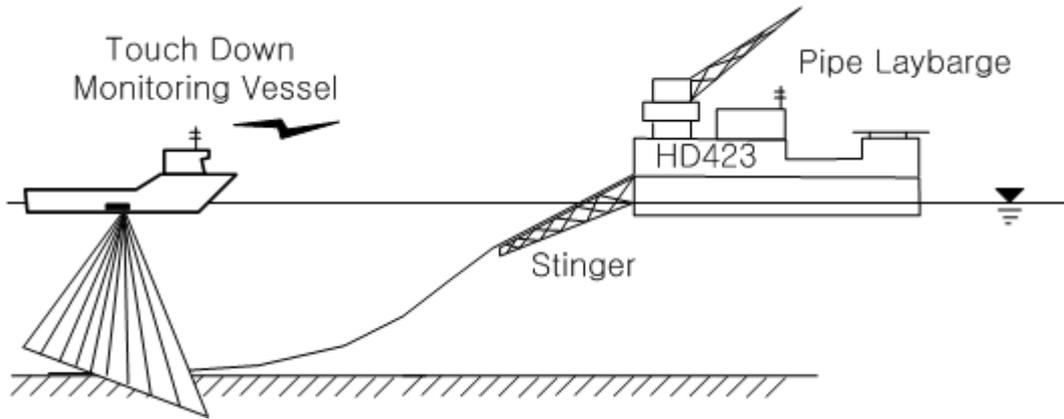


Figure 3. Pipe-laying from Lay-Barge with Stinger & Touch Down Monitoring Vessel with Swath Sonar System.

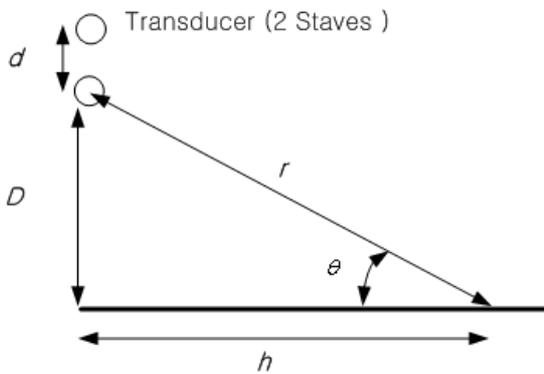


Figure 4. Simple Geometry between transducer and sea floor (Assuming that Seafloor is very flat), where D is depth of nadir point, d is space between staves, r is slant range, h is cross-track distance, and θ is depression angle (beam receiving angle).

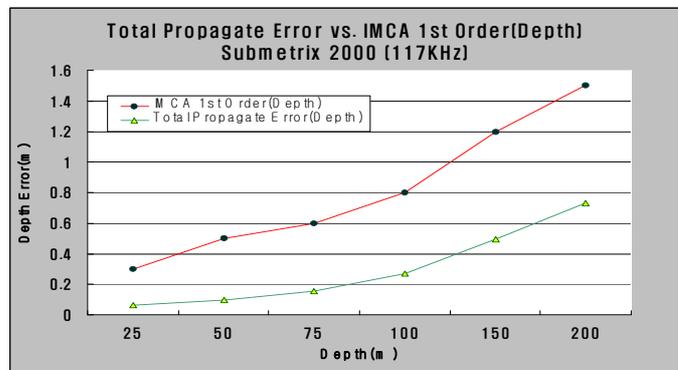


Figure 5. Comparison of Total Propagation Error of Submetrix 2000(117kHz) and depth specification of IMCA 1st Order.

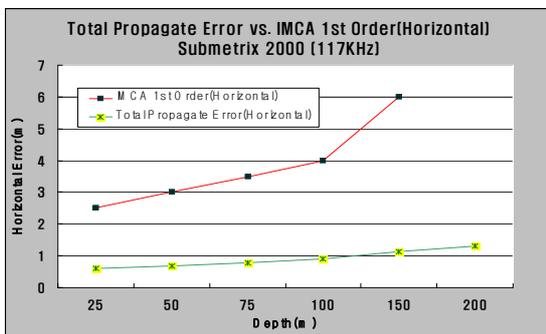


Figure 6. Comparison of Total Propagate Error of Submetrix 2000(117kHz) and horizontal positioning specification of IMCA 1st Order.

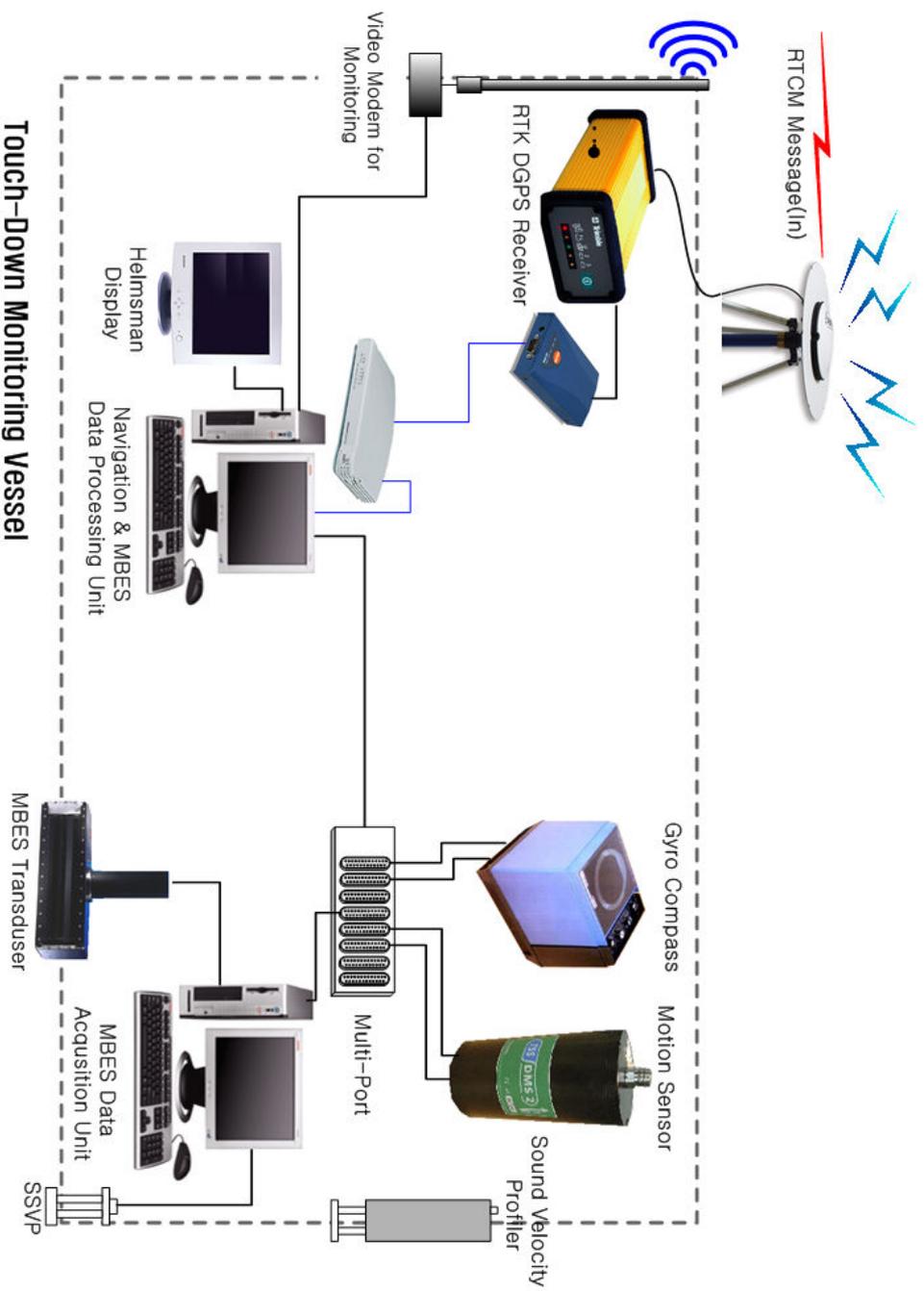


Figure 7°. Touch Down Monitoring System with Submetrix 2000 and wireless LAN

Sound Velocity Profile (DongHae-1 Gas Field Area)

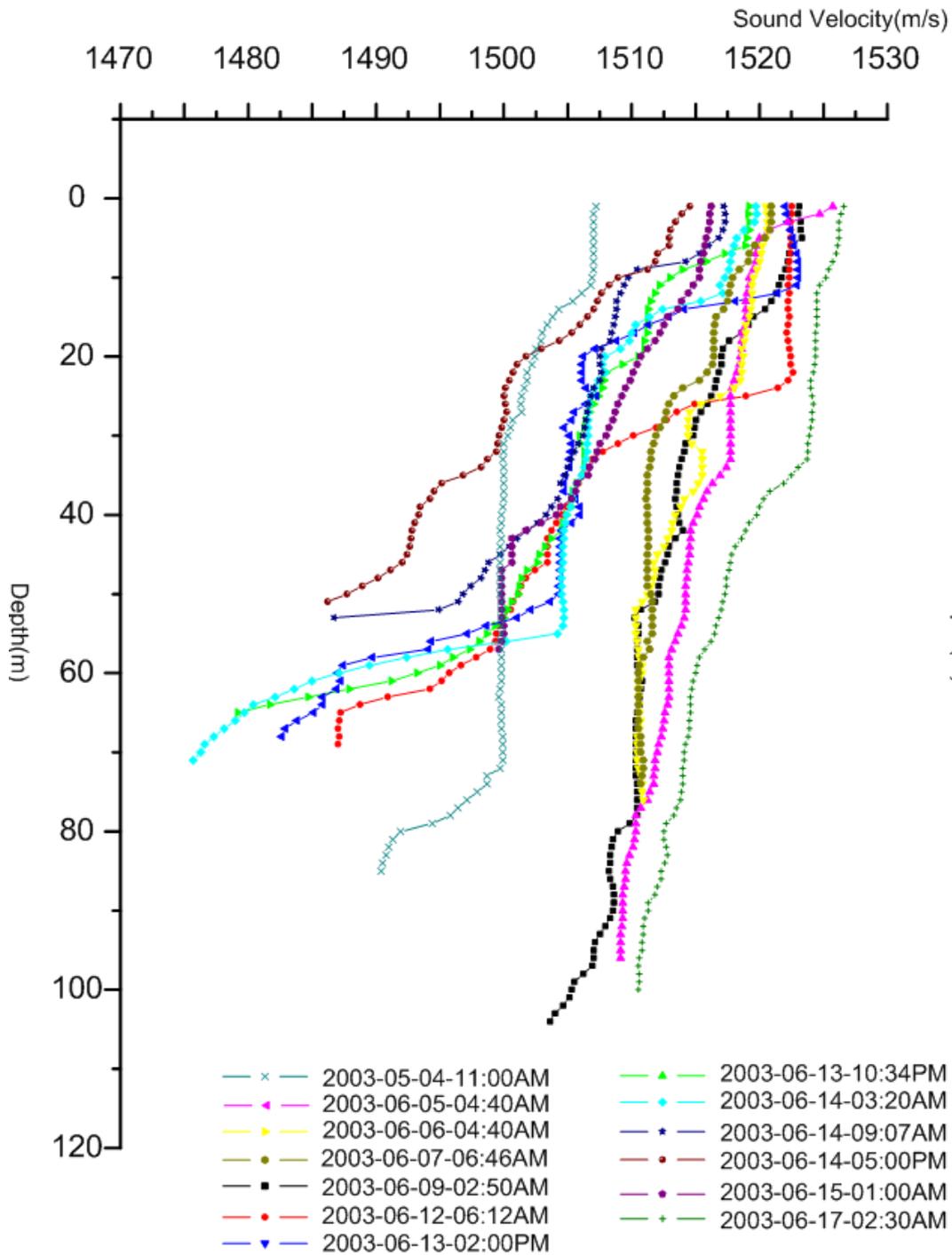


Figure 8. Daily Change Trend of Sound Velocity Profile.

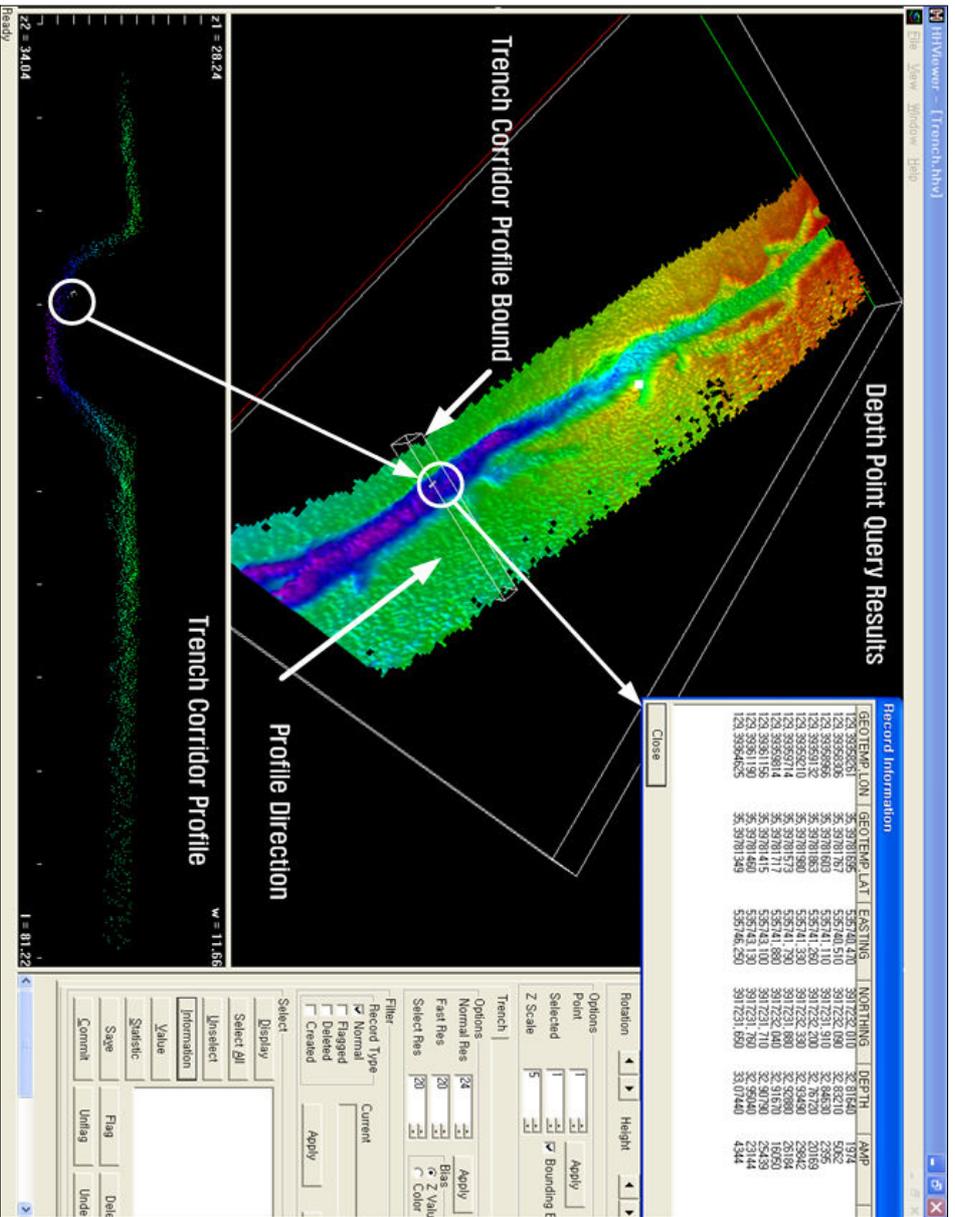


Figure 9° Bathymetric 3D model can show a profile with any direction and query the raw information for quality control°. For checking dredging operation° we use Helical System's HHViewer as the bathymetric 3D

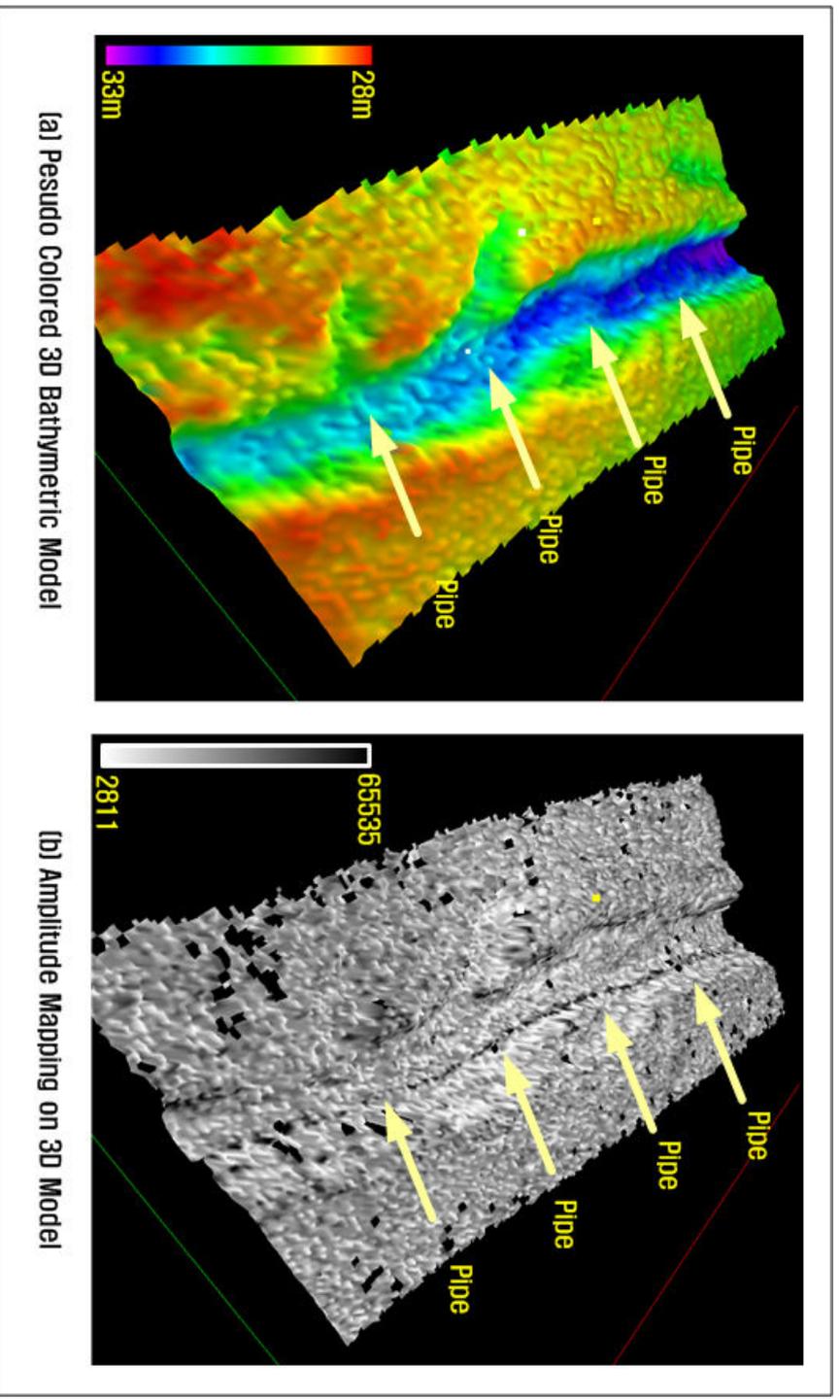


Figure 10° Backscattered amplitude imagery better than pseudo color model for monitoring pipeline on trench corridor° (a) 3D model with pseudo color as depth (b) Texture mapping with amplitude data on 3D bathymetric model°