

국산화 디지털 스트리머 시스템의 벤치마크 테스트 연구

신정균¹·하지호¹·서갑석¹·김영준^{2*}·강년건²·최종규²·조동우²·이한희²·김성필²

¹한국지질자원연구원 포항지질자원실증연구센터

²한국지질자원연구원 해저지질에너지연구본부

Benchmark Test Study of Localized Digital Streamer System

Jungkyun Shin¹, Jiho Ha¹, Gabseok Seo¹, Young-Jun Kim^{2*}, Nyeonkeon Kang², Jounggyu Choi², Dongwoo Cho², Hanhui Lee², and Seong-Pil Kim²

¹Pohang Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Marine Geology & Energy Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약

The use of ultra-high-resolution (UHR) seismic surveys to precisely characterize coastal and shallow structures have increased recently. UHR surveys derive a spatial resolution of 3.125 m using a high-frequency source (80 Hz to 1 kHz). A digital streamer system is an essential module for acquiring high-quality UHR seismic data. Localization studies have focused on reducing purchase costs and decreasing maintenance periods. Basic performance verification and application tests of the developed streamer have been successfully carried out; however, a comparative analysis with the existing benchmark model was not conducted. In this study, we characterized data obtained by using a developed streamer and a benchmark model simultaneously. Tamhae 2 and auxiliary equipment of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources were used to acquire 2D seismic data, which were analyzed from different perspectives. The data obtained using the developed streamer differed in sensitivity from that obtained using benchmark model by frequency band. However, both type of data had a very high level of similarity in the range corresponding to the central frequency band of the seismic source. However, in the low frequency band below 60 Hz, data obtained using the developed streamer showed a lower signal-to-noise ratio than that obtained using the benchmark model. This lower ratio can hinder the quality in data acquisition using low-frequency sound sources such as cluster air guns. Three causes for this difference were, and streamers developed in future will attempt to reflect on these improvements.

주요어

ultra-high-resolution seismic survey, seismic streamer, digital streamer, survey equipment

ABSTRACT

육지와 인접한 연안, 그리고 천부 구조의 특성을 정밀하게 규명하기 위하여 높은 주파수 대역(80 Hz~1 kHz)의 음원을 활용하여 3.125 m 수준의 공간 해상도를 도출하는 초고해상 탄성과 탐사의 활용범위가 증가하고 있다. 디지털 스트리머 시스템은 고품질의 초고해상 탄성과 자료를 획득하기 위한 필수 모듈이며 도입 비용의 절감, 유지보수 기간의 단축 등을 위하여 국산화 연구가 이루어졌다. 개발된 국산화 스트리머에 대한 기본적인 성능 검증, 현장 운용성 검토 등은 해당 연구개발 과정에서 이루어졌으나 기존에 활용되는 벤치마크 모델과의 비교분석 연구는 수행되지 않았다. 본 연구에서는 국산화 스트리머와 벤치마크 모델을 활용해 동시에 자료를 취득하여 자료의 특성을 분석하였다. 이를 위하여 한국지질자원연구원 탐해2호와 부대장비 등을 활용한 2차원 탄성과 탐사자료를 취득하고 다양한 측면에서의 분석이 이루어졌다. 국산화 스트리머에서 취득된 자료는 벤치마크 모델에서 취득된 자료와 주파수 대역별 민감도 차이가 있었으나, 음원의 중심 주파수 대역을 고려한 범위에서는 매우 높은 수준의 유사성을 가지고 있다. 하지만, 60 Hz 이하의 낮은 주파수 대역에서는 벤치마크 모델 대비 낮은 신호대잡음비를 나타내었으며 이는 클러스터 에어건 등 낮은 주파수 대역의 음원을 활용한 자료취득에서는 품질을 저

Received: 6 April 2023; Revised: 12 May 2023; Accepted: 15 May 2023

*Corresponding author

E-mail: kimyj@kigam.re.kr

Address: Principal Researcher, Marine Geology & Energy Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

©2023, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해하는 요소로 작용할 것이다. 이러한 차이를 발생시키는 원인은 세 가지(1. 스트리머 내부 발생 잡음, 2. 스트리머 예인 진동, 3. 아날로그 필터 컷 오프 주파수 대역)가 발굴되었으며 향후 제작되는 국산화 스트리머에서는 이에 대한 개선을 반영하고자 한다.

KEYWORDS

초고해상 탄성과 탐사, 탄성과 스트리머, 디지털 스트리머, 탐사장비

서 론

최근 연안 지역을 대상으로 해상 풍력단지, 해저터널, 연륙교 등 지속적인 해양 개발이 이루어지고 있으며 활성단층, 천부가스 등 잠재적인 해저 지질재해를 규명하기 위해 주파수 대역이 80 Hz ~ 1 kHz인 음원을 활용하여 주 측선 방향으로 3.125 m 수준의 공간 해상도를 도출할 수 있는 초고해상 탄성과 탐사가 세계적으로 많이 이루어지고 있다(Brookshire *et al.*, 2015, 2016). 연안에서의 초고해상 탄성과 탐사에는 주로 16채널 이하의 다중채널 스트리머가 활용되며 송수신 오프셋이 충분하지 않아 속도 분석에는 한계가 있다. 하지만, 중합 전 자료처리 과정을 통하여 탄성과 신호의 품질을 향상시킬 수 있으며, 중합 전 심도 구조보정을 수행할 수 있어 전통적인 단일채널 탐사자료에 비하여 해상도가 향상된 탄성과 자료를 제작할 수 있다(Kim *et al.*, 2010).

국내에서도 탄성과 자료취득에 필요한 스트리머를 독자적으로 개발하고 실증하는 연구가 1990년대 후반과 2000년대 초반에 다수 이루어졌다(Kim and Kim, 2005; Lee *et al.*, 1996, 2003; Shin *et al.*, 2005). 이들 연구는 하이드로폰 그룹에서 생성된 아날로그 신호에 대하여 선상에서 디지털 변환을 수행하는 아날로그 스트리머에 국한되었으며 한 조의 음원과 스트리머를 활용하는 2차원 자료취득에 제한되었다. 한국지질자원연구원은 자체적으로 제작된 소형 아날로그 스트리머를 활용, 수심이 낮은 연근해에서 3차원 탄성과 탐사를 수행하는 연구를 수행하였다(KIGAM, 2017, 2019). 기존의 3차원 탐사시스템을 축소하여 소형선박에서 운용하는 경우 얕은 수심에 대한 접근이 가능하며 어망, 어구 등 장애물에 대한 회피가 유리하여 연안에 존재하는 단층면의 3차원 영상화 등 실증연구에 활용되었다(Shin *et al.*, 2021). 또한, 한국지질자원연구원은 2,000톤급 탐사선인 탐해2호를 활용한 스트리머 실증연구도 수행하였다. 2006년에는 1.2 km 길이를 가진 Nessie 3 스트리머(그룹간격 6.25 m) 2조로 초고해상 3차원 탄성과 탐사를 시도하였으며(KIGAM, 2006), 2019년에는 고체 타입의 8채널 디지털 스트리머(그룹 간격 6.25 m) 2조로 해저 단층 특성 분석을 위한 초고해상 3차원 탄성과 탐사를 수행하였다(Kim *et al.*, 2019).

아날로그-디지털 변환 모듈을 수중의 스트리머 앞단에 설치하는 디지털 스트리머는 스트리머 상호 간의 연결이 가능하여 규격을 확장시킬 수 있기에 롱-오프셋 탐사가 가능하다. 또한, 예인 케이블을 통한 후속 잡음 유입을 차단할 수 있어 보

급이 더욱 일반화되고 있다(Geometrics, 2023). 국내 연구기관 및 탐사기업에서는 주로 미국 지오메트릭스(Geometrics)사의 지오일(GeoEel) 스트리머를 수입하여 활용하고 있다. 이는 내부가 고체로 충전된 스트리머로 신호대잡음비가 높으며 장기간에 걸쳐 넓은 고객층을 확보하여 성능이 검증된 제품이다. 하지만, 국내 중소기업에서는 쉽게 도입하기 어려운 수준의 가격이 책정되어 있어 탄성과 탐사 기술의 민간 확산이 쉽지 않으며 신속한 유지보수가 어렵다는 단점이 있다. 이에, 2020년 이후, 해양수산부가 지원하는 연구과제를 통하여 전 세계적으로 활용도가 높아지고 있는 디지털 스트리머를 국산화하는 연구가 이루어졌다(Shin *et al.*, 2022). 연안에서의 초고해상 탄성과 탐사에 활용할 수 있는 디지털 스트리머는 높은 공간 해상도 도출을 위해 하이드로폰 그룹 간격이 축소되어야 하며 소형선박 내 좁은 공간에서의 활용을 위하여 직경 및 굽힘반경도 최소화되어야 한다. 또한, 음원의 높은 주파수 대역을 활용하기 위하여 아날로그-디지털 변환 모듈의 디지털 샘플링 속도도 높게 설정되어야 한다. 해당 연구에서는 지오일 스트리머를 벤치마크 모델로 선정하여 다양한 규격을 설정하였다. 하지만, 내부 충전재를 유체로 변경하고 전체 시스템의 구성을 단순화하여 개발 비용 및 기간을 절감하였다.

디지털 스트리머 국산화 연구를 통해서 확장 가능 채널 수, 수밀 조건, 디지털 샘플링 속도 및 샘플 정밀도 등 당초에 계획했던 전기적, 기계적 조건은 충족함을 확인하였다. 또한 자체적인 실증연구를 통하여 실험역 적용성, 운용상 안정성 등을 성공적으로 검토하였다. 하지만, 실제 현장에서 취득된 자료가 벤치마크 모델과 대비하여 어떠한 특성을 가지는지에 대해서는 정성적, 정량적 비교연구가 부족하였다. 이번 연구에서는 두 시스템의 운용환경을 유사하게 설정하기 위하여 한국지질자원연구원 탐해2호에서 벤치마크 모델과 국산화 스트리머를 동시에 예인하였으며 60 in³ 용량의 미니 GI진 음원을 활용하여 탄성과 자료를 취득하였다. 포항 구룡포 동쪽 해역에서 취득된 특정 라인 자료에 대한 분석을 통하여 각각의 시스템의 특성 및 국산화 스트리머의 개선방안에 대한 결론을 도출하였다.

실험역 자료 취득

벤치마크 모델인 지오일 시스템은 스트레치 섹션(stretch section), 활성섹션(active section), 아날로그-디지털 변환 모듈(analog-to-digital converter module), 그리고 예인 케이블(tow cable) 등으로 구성된다. 활성섹션은 8개의 하이드로폰 그룹으

로 구성되며, 그룹 간격은 3.125 m이다. 이에 따라, 개별 활성 섹션의 길이는 총 25 m이다. 스트레치 섹션은 이더넷 패킷을 수신하고 재전송하는 리피터(repeater)와 연결된다. 그리고 데크 케이블(deck cable)과 스트리머 전원 공급 장치(streamer power supply unit)순으로 다시 연결된다. 이더넷으로 연결된 노트북에 탑재된 자료기록 소프트웨어(Geometrics CNT-2)는 획득되는 다중채널 탄성과 자료에 대한 실시간 품질관리 및 SEG-D 혹은 SEG-Y 형태의 자료기록을 수행한다. 국산화 스트리머 시스템도 전체적으로는 이와 유사하게 구성된다. 하지만, 아직까지 스트레치 섹션은 개발되지 않았으며 리피터의 역할은 선상의 데이터 통합섹션(data integration section)이 수행한다. 또한 개별 활성섹션의 하이드로폰 그룹 수가 4개이며 길이도 벤치마크 모델의 절반이다. 이러한 차이는 국산화 스트리머는 탐해2호 등 대형 탐사선이 아닌 소형선박에서의 활용성을 고려하였기에 발생하였으며, 기타 자세한 구성은 국산화 스트리머 시스템 개발과 관련한 선행 논문에 소개되어 있다 (Shin *et al.*, 2022).

한국지질자원연구원의 탐해2호 및 탑재된 기타 부대장비 등을 활용하고 두 스트리머 시스템을 동시에 예인하여 유사한

환경에서의 자료를 취득하는 시험을 수행하였다. Fig. 1과 같이 벤치마크 모델은 탐사선 좌현, 국산화 스트리머는 우현에 진수하였으며, 탄성과 음원은 선박의 중앙에서 예인하였다. 벤치마크 모델은 거친 날씨에 히브(heave)에 의한 잡음 발생 효과를 감소시키는 25 m의 스트레치 섹션을 포함하여 1번 채널은 선박의 후미에서 70.4025 m의 거리에 위치한다. 한편, 국산화 스트리머는 바다에 진수가 가능한 스트레치 섹션 및 리피터 모듈이 없는 관계로 예인 거리를 벤치마크 모델과 동일하게 세팅하기 어렵다. 따라서, 예인 케이블 길이 조정을 통해 3번과 4번 활성섹션을 벤치마크 모델의 1번 활성섹션과 동일한 위치로 설정하였으며 예인 거리가 동일한 8개 채널의 데이터를 확보하였다. 탄성과 음원은 Sercel사 60 in³ 용량의 미니 GI건을 사용하였으며, 발파 간격은 12.5 m로 설정하였다. 기타 자료취득 변수는 Table 1과 같다.

연구지역은 구룡포 인근 해역(Fig. 2의 좌측)이며, 수심은 80 ~ 210 m로 분포한다. Fig. 2는 연구지역에 분포한 측선을 나타내며 측선 22SGR-01과 22SGR-02의 길이는 각각 약 6.5 km와 7.6 km이다.

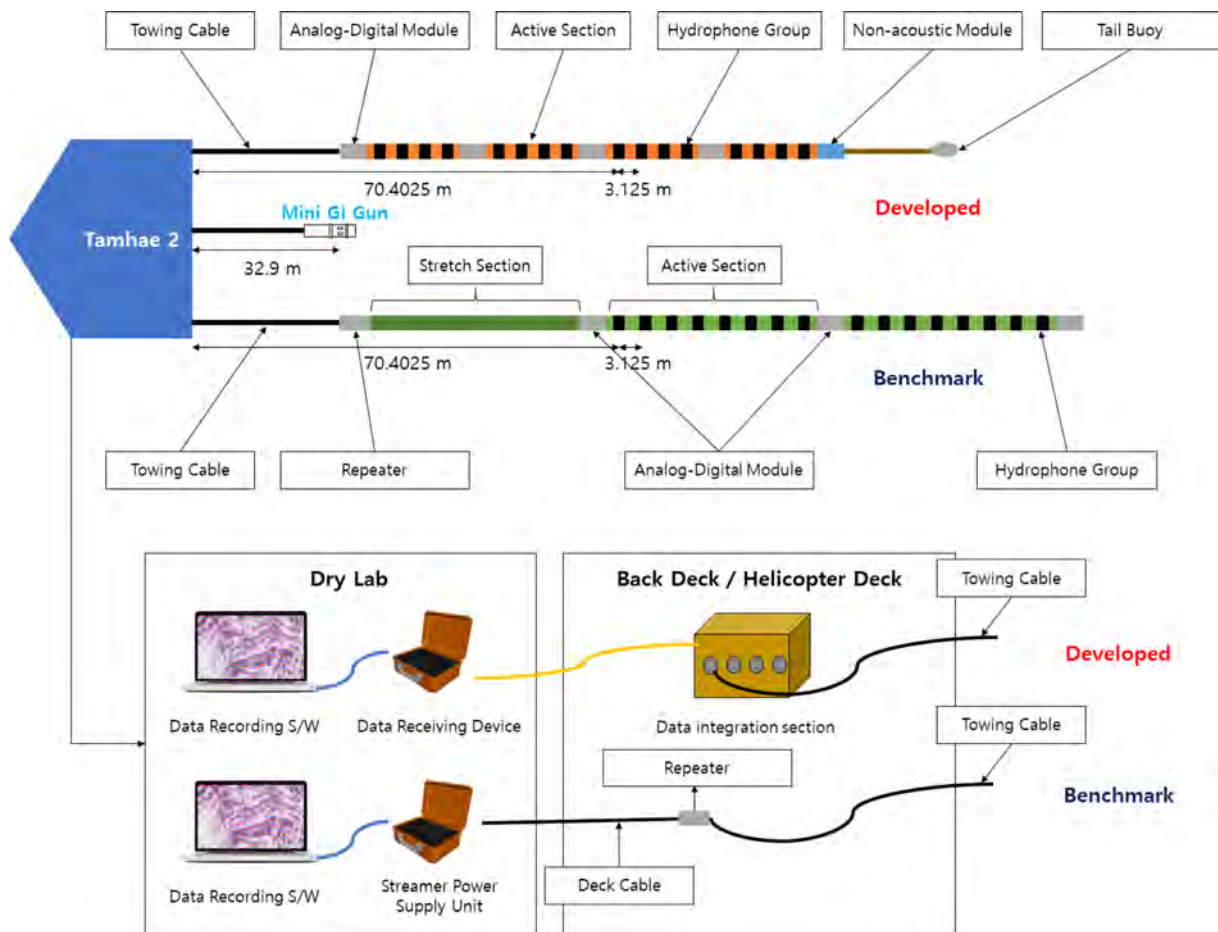


Fig. 1. Schematic of developed streamer and benchmark model (GeoEel steamer) for the benchmark test.

Table 1. Survey equipment and acquisition parameters.

Vessel	R/V Tamhae2	
DGPS system	C-NAV	
Navigation system	SPECTRA	
Vessel speed	4.5 knots	
Streamer	Benchmark	Developed
- Model	GeoEel Solid	-
- The number of channel	8	4
- Group Interval	3.125 m	3.125 m
- The number of section	2	4
Recording system		
- Software	CNT-2	EOS-Survey
- Sample interval	0.5 ms	0.2 ms
- Sample rate	3,000	7,500
- Recording length	1,500 ms	1,500 ms
- Depth	0 – 1.0 m	0 – 1.0 m
Source	mini GI gun	
- Capacity	60 in ³ (30/30)	
- Shot interval	12.5 m (~ 5 sec)	
- Offset to 1 st channel	37.5 m	
- Depth	3 m	

자료 특성 분석

본 절에서는 22SGR-02번 라인에서 취득된 자료를 활용하여 두 스트리머 시스템의 특성을 비교하였다. Fig. 3은 두 스트리머 시스템에서 취득된 자료에 추가적인 처리를 적용하지 않고 600 ms까지만 도시한 것이다. Fig. 3a, Fig. 3b는 벤치마크 모델에서 취득된 공통 송신원 모습 및 1번 채널 모습을 나타내며, Fig. 3c, Fig. 3d는 국산화 스트리머에서 취득된 공통 송신원 모습 및 1번 채널 모습을 나타낸다. 벤치마크 모델에서 취득된 직접파의 초동 시간이 국산화 스트리머의 초동 시간에 비하여 약 70 ms 정도 작은 값을 가진다. 자료취득 시 항측 장

비는 일정한 시간 혹은 거리 간격마다 트리거 신호를 생성한다. 이는 음원과 자료기록 장치에 동시에 전달되며, 이 시점을 기준으로 음원이 발파되고 자료기록 시스템은 일정 기간 자료 기록을 수행한다. 자료기록 장치의 전자부는 트리거 입력과 거의 동시에 기록이 시작되는 반면 탄성과 음원은 기계적인 특성상 실제 발파까지 일정한 지연시간이 발생한다. 국산화 스트리머에서 기록된 자료에는 이러한 특성이 온전히 반영되어 있어 후속 자료처리 과정에서 보정이 필요하다(Fig. 3c-d). 하지만, 벤치마크 모델의 경우 이러한 지연 값을 사용자에게 입력하게 함으로써 음원 발파 지연시간이 보상된 자료기록을 시작한다(Fig. 3a-b).

또한, 두 스트리머 시스템 모두 음원에서 방출된 주파수 대역 대비 저주파 잡음이 지배적으로 나타나고 있으나 그 대역에 있어서 차이를 보인다. 벤치마크 모델에서 취득된 저주파 잡음이 국산화 스트리머에서 취득된 저주파 잡음에 비하여 파장이 훨씬 길게 나타나며, 이는 외부 환경에서 발생한 잡음으로 해석된다(Fig. 3b, Fig. 3d). 이러한 잡음이 나타난 정도가 다른 것은 각각의 시스템에 적용된 저주파 차단 필터의 컷오프 주파수 및 차수가 다르기 때문이다. 저주파 차단 필터는 해상환경에서 지배적으로 발생하는 너울 잡음, 예인 잡음 등을 감쇄시키기 위해서 필수적으로 적용되지만 컷오프 주파수를 너무 높게 설정 시 취득되는 탄성과 자료의 주파수 대역을 제약할 수 있다. 이에 따라 원하는 주파수 대역을 높은 품질로 획득하기 위해서는 적절한 컷오프 주파수가 선정되어야 한다. 국산화 스트리머는 단일 유닛 에어건, 스파커 등 수백 Hz 이상의 고주파 음원을 활용한 엔지니어링 탐사를 주목적으로 개발이 되었다. 이에 따라, 소형선박을 이용한 여러 차례의 실험 시험 등을 통하여 36 Hz를 기준으로 -3 dB 만큼 감쇄가 이루어지는 1차 로우 컷 필터가 최종적으로 적용되었다. 한편, 벤치마크 모델의 경우 정확한 제원을 알 수 없으나 취득된 자료에 기반한 분석에 따르면 국산화 스트리머에 비하여 컷오프 주파수는 낮고 차수는 높은 저주파 차단 필터 필터가 적용된

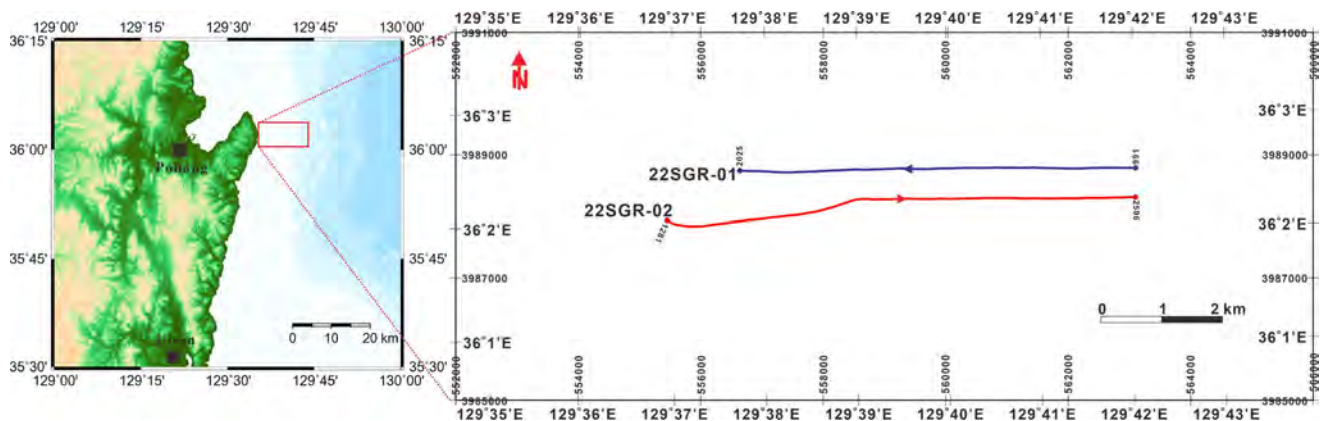


Fig. 2. Map of the study area and survey tracks. The red and blue lines represent the tested tracks acquired using the benchmark model and those acquired using developed streamer system, simultaneously.

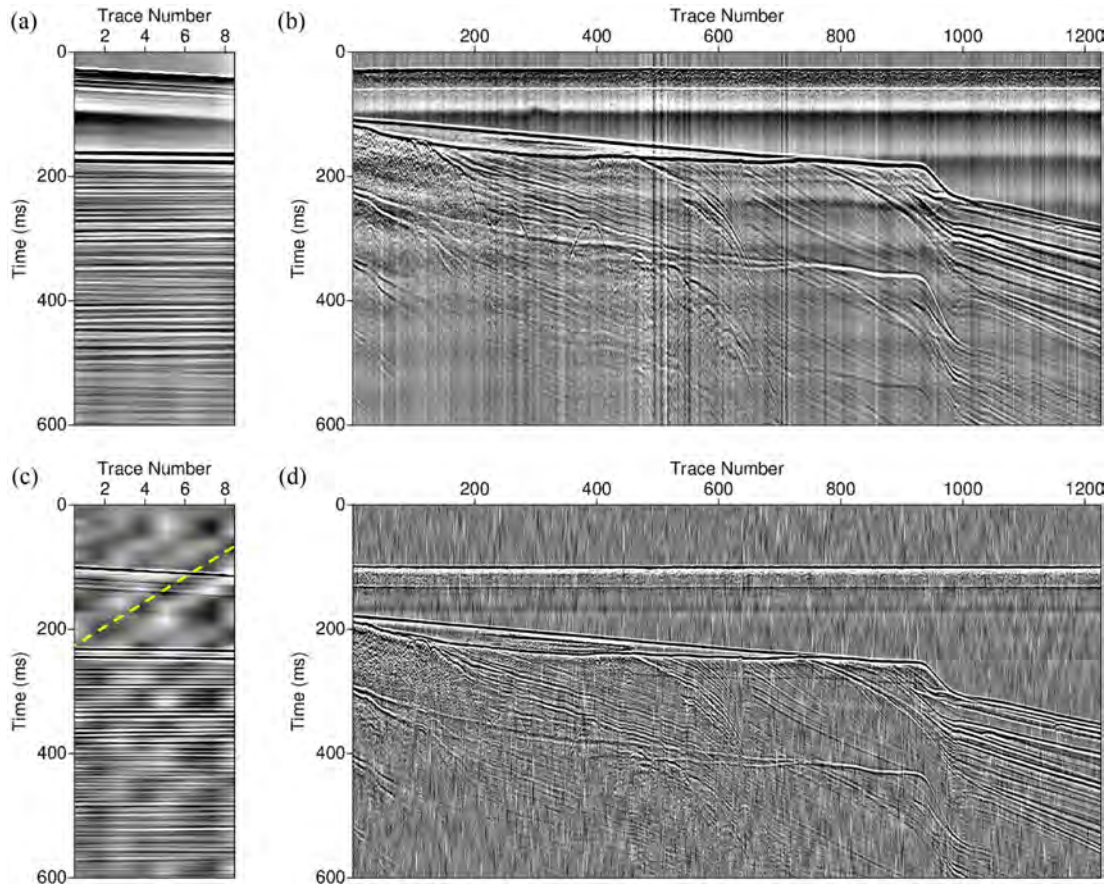


Fig. 3. Raw data without additional processing were applied. (a) and (b) show the common shot gather and common receiver gather (channel 1), respectively, that were obtained from the benchmark model. (c) and (d) show the same gathers obtained using the localized streamer.

것으로 사료된다.

한편, 국산화 스트리머에서 취득된 자료에는 앞서 언급된 저주파 잡음에 비해서는 높은 주파수 대역의 잡음이 지배적으로 관찰되고 있다. 해당 잡음은 무작위적이 아닌 선형적인 형태로 나타나고 있으며 채널 번호가 증가함에 따라 도달 시간이 작아진다(Fig. 3c). 해당 잡음의 기울기를 통하여 잡음의 전파 속도를 계산하면 이는 약 130 m/s로 매우 느리다(Fig. 3c의 노란 점선). 따라서, 본 잡음은 약 1,300 m/s의 전파 속도를 가지는 스트리머 내 유체(kerosene)를 통한 전파는 아니라고 볼 수 있다. Dowle (2006)은 너울 등으로 인하여 발생한 잡음이 스트리머 케이블을 매체로 하여 횡파(transverse wave) 형태로 매우 느리게 전파할 수 있다고 하였으며 본 실험에서 발견된 잡음도 여기에 해당한다고 볼 수 있다. 이러한 잡음은 벤치마크 모델에서는 관찰되지 않으므로 외부 환경에서 발생한 잡음이 아닌 스트리머 내부적으로 발생한 잡음으로 해석되며 잡음 발생원은 스트리머의 뒤쪽 부분에 존재한다고 추정할 수 있다.

Fig. 4는 1번, 4번, 그리고 8번 채널 모음에 대하여 트레이스별 푸리에 변환을 수행하고 이를 평균한 결과이다. 자료기록 장치에서 디지털 샘플을 저장하는 과정에서 개별 샘플의 스케일 차이가 발생함에 따라서 푸리에 변환된 값도 차이를 보인

다. 따라서 왼쪽 축에는 벤치마크 모델의 진폭 값을 표기하였고 오른쪽 축에는 국산화 스트리머의 진폭 값을 표기하였다. 따라서 본 그래프를 활용하여 두 스트리머 시스템에서 취득된 진폭 값의 정량적인 높고 낮음은 판단할 수 없음을 주의해야 한다. Fig. 4a-c는 1번, 4번, 그리고 8번 채널의 주파수 영역 진폭 값을 0 Hz부터 800 Hz까지 도시한 그림이다. 중심 주파수 대역은 공통적으로 100 ~ 200 Hz 사이에서 나타나고 있다. 하지만 주파수 대역이 높아지면서 진폭이 감소되는 경향이 다르다. 특히 400 Hz 이상의 영역에서는 벤치마크 모델의 민감도가 급격히 떨어지고 있다. 이는 벤치마크 모델이 저장되는 SEG-Y 자료의 샘플 인터벌에 맞추어 아날로그-디지털 변환을 수행하며, 이 과정에서 알리아싱을 방지하기 위한 고주파 차단 필터가 적용되기 때문으로 추정한다. 국산화 스트리머의 경우에는 고정된 최대 샘플링 속도로 아날로그-디지털 변환이 수행되고 자료기록 과정에서 리샘플링(resampling)을 수행하기에 고주파 대역이 보존되고 있다. 또한, 100 Hz 이상 영역에 국한하여 국산화 스트리머의 주파수 스펙트럼이 채널 번호에 따라 높은 일관성을 보이는 장점이 있으나 높은 민감도를 보이는 주파수 대역이 더 좁게 나타난다는 단점이 있다. 이는 하나의 채널을 구성하는 하이드로폰 수의 차이 의한 영향으로

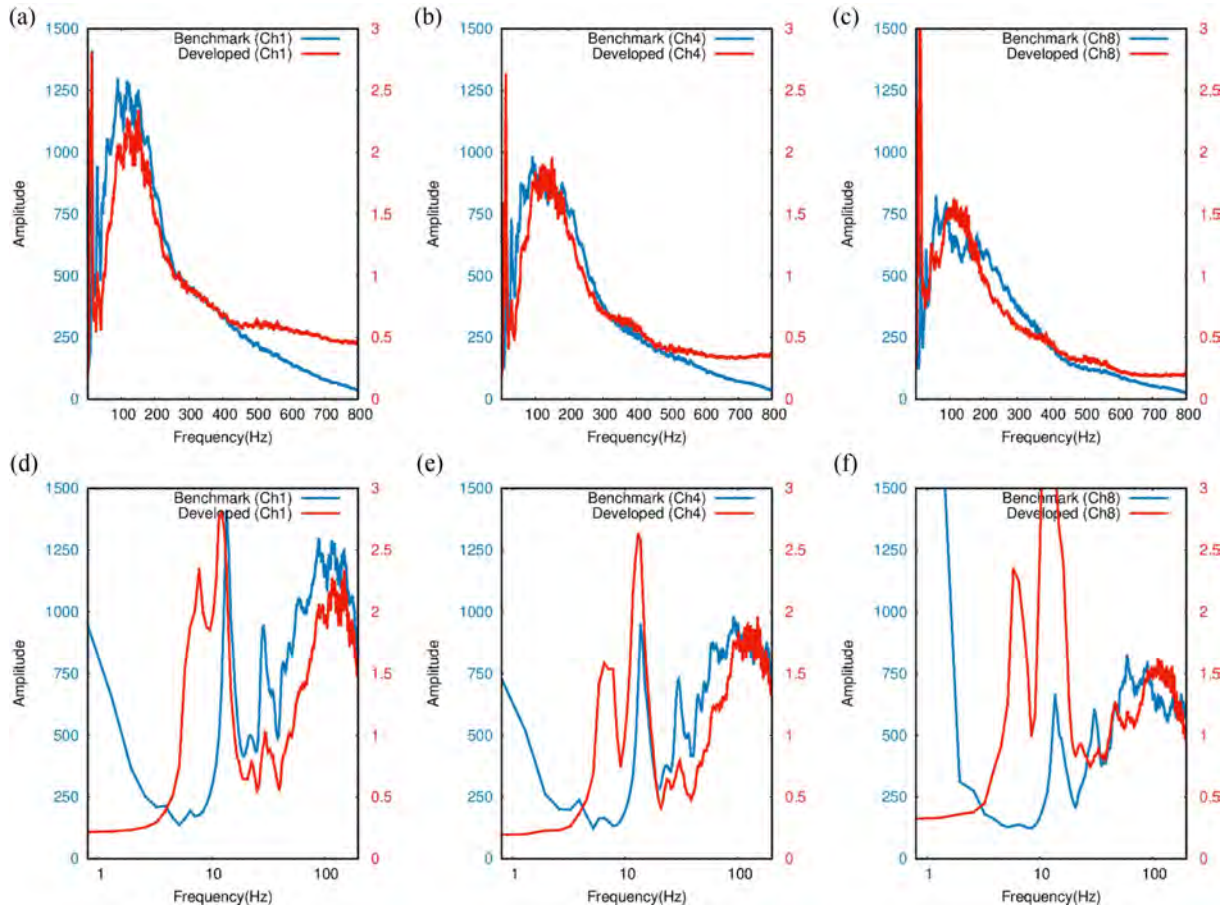


Fig. 4. Average frequency spectrum comparison over a collection of common receiver gathers. (a), (b), and (c) show the average frequency spectra of channels 1, 4, and 8. (d), (e), and (f) are enlarged from (a), (b), and (c), respectively, in the region below 100 Hz on a logarithmic scale (x-axis).

추정된다. 하이드로폰 그룹의 주파수에 따른 민감도(V_{out})는 아래의 수식과 같다(Geometrics, 2017).

$$V_{out} = \frac{VR}{\sqrt{R^2 + \left[\frac{1}{2\pi fC}\right]^2}} \quad (1)$$

여기에서 V 는 개별 하이드로폰의 민감도, R 은 저항, f 는 주파수, 그리고 C 는 전기 용량을 나타낸다. 식 (1)에 따라 하나의 그룹을 구성하는 하이드로폰 개수가 늘어나는 만큼 전기 용량도 비례하여 증가하며 최종적으로 하이드로폰 그룹의 주파수 민감도를 향상시킨다. Geometrics (2017)에 따르면 그룹당 중합 수가 8인 벤치마크 모델은 -3 dB 포인트가 7.6 Hz로 산출되며 동일한 방식을 그룹당 중합 수가 3인 국산화 모델에 적용하면 -3 dB 포인트가 약 20 Hz로 계산됨을 알 수 있다.

Fig. 4d-f는 Fig. 4a-c를 100 Hz 이하의 영역에 국한하여 x축을 로그(log) 스케일로 도시한 그림이다. 벤치마크 모델은 10 Hz 미만에서 0 Hz로 가면서 진폭이 커지고 있으며 이것이 시간 영역 자료(Fig. 4a-b)에서 나타난 저주파 잡음에 해당

다. 이는 자료취득 시 저주파 성분 보존을 위하여 하드웨어 상 저주파 차단 필터의 컷오프 주파수를 10 Hz 이하로 낮추었으나 필터 기울기가 충분히 가파르지 않아 잔존한 것이다. 한편, 국산화 스트리머의 경우 저주파 차단 필터에 상대적으로 높은 36 Hz의 컷오프 주파수를 적용하여 10 Hz 이하의 극 저주파 잡음은 상당 부분 제거되었다. 하지만 10 ~ 30 Hz 대역에서 잡음이 크게 발생하고 있으며 채널 번호가 증가함에 따라 잡음의 진폭이 강해진다. 주파수 영역 자료를 통한 해석을 통하여 국산화 스트리머 뒤쪽에서 내부적인 잡음이 발생한다는 것이 다시 한번 확인이 되었다. 자료취득 수행 후 이루어진 유지보수 과정에서 이는 스트리머 내부의 양단에서 케이블 등을 고정하는 금속 링 등이 스트리머 내벽에 부딪히며 발생한 소음으로 확인되었다. 한편 벤치마크 모델의 경우 내부가 고체 물질로 충전되어 내부 배선이 흔들리지 않아 이러한 소음은 발생하지 않는다.

Fig. 5는 Fig. 3에 50 Hz 이상 400 Hz 이하의 5차 버터워스(butterworth) 필터를 적용하고 서로 상이한 음원 발파 지연시간을 일정하게 통일한 결과이다. 두 시스템 모두에서 나타난

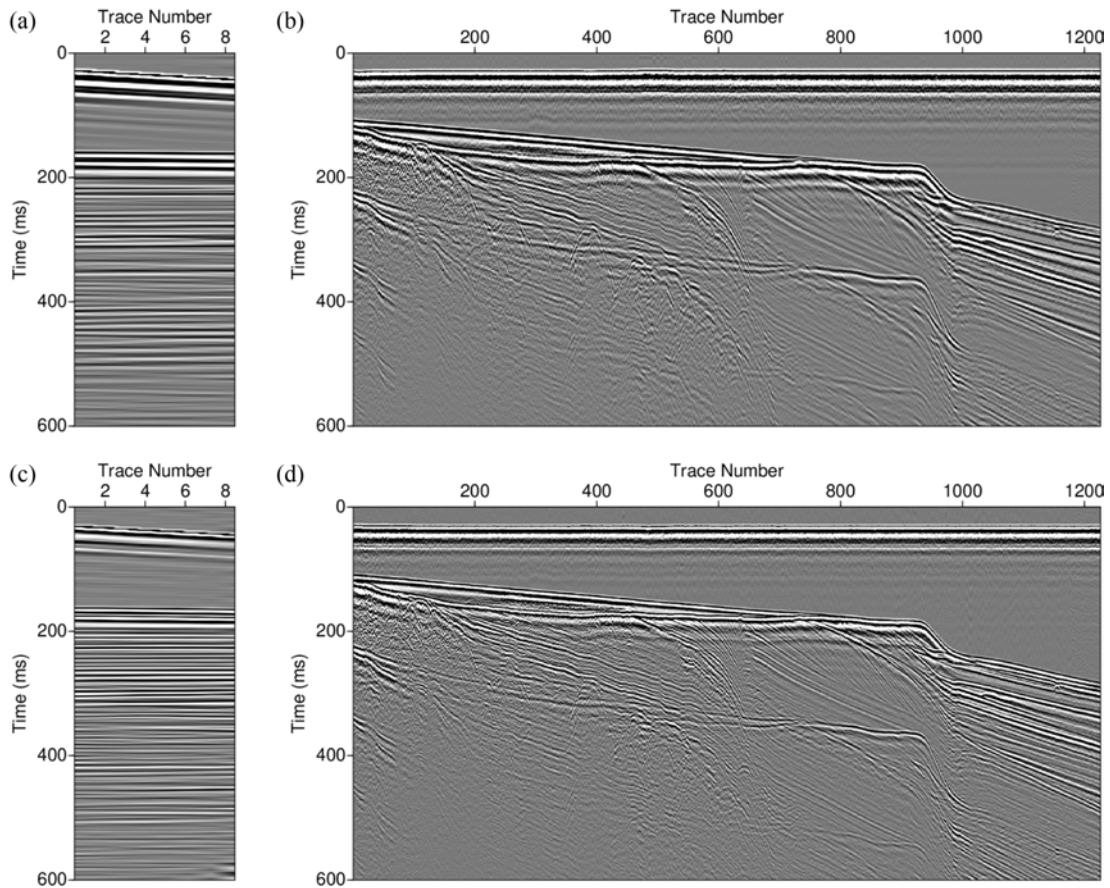


Fig. 5. The processed data with gun delay correction and Butterworth filtering were applied. (a) and (b) show the common shot and receiver gathers (channel 1) obtained from the benchmark model. (c) and (d) show the same data obtained using the developed streamer.

저주파 잡음이 성공적으로 제거됨으로서 자료의 품질이 비약적으로 향상되었으며 천부의 지질학적 구조가 세밀하게 표현되고 있다. 특히, 혼탁한 내부 탄성파 상을 보여주는 음향 기반암과 그 상부를 피복하는 평행한 반사면들이 특징적으로 확인된다. 또한, 트레이스 번호 약 640번 지점에서는 해저 단층으로 해석되는 수직에 가까운 불연속면이 공통적으로 나타난다.

동일한 대역의 버터워스 필터가 적용되었음에도 불구하고 전체적인 해상도는 차이가 있으며 국산화 스트리머 자료를 구성하는 파형이 벤치마크 모델 자료의 파형에 비하여 더욱 압축된 형태로 나타난다. 이는 벤치마크 모델이 주파수 대역에 따른 민감도의 편차가 작아 중심 주파수 대비 낮은 주파수 성분이 더 크게 반영됨에 따라 발생한 결과이다. 하지만 자료에 포함된 주파수 대역별 성분의 차이는 탄성파 디시그너처 등의 자료처리 알고리즘을 통해서 일정 부분 극복이 가능하다(Kim *et al.*, 2021). 또한, 1번 채널 모음을 기준으로 육안을 이용한 자료 해석의 차이는 발생하지 않을 것으로 보인다.

Fig. 6은 Fig. 5의 1번 채널 모음에서 601번째 트레이스를 추출하여 300 ms까지 도시한 것이다. 1번과 8번 채널 모두에서 직접파(약 30 ms)와 해저면 반사파(약 160 ms)의 도달 시간이 일치하며 매우 유사한 파형을 보여준다. 하지만, 스트리

머의 주파수 대역별 민감도 차이, 채널별 위치 차이, 예인 심도 차이 등으로 인하여 세밀한 신호에서는 차이가 발생하고 있다. 특히 해저면 반사파에 대비한 직접파의 진폭은 큰 차이가 있다. 두 시스템에서 획득된 해저면 반사파의 진폭을 유사하게 맞추어 도시하는 경우 국산화 스트리머에서 기록된 직접파의 진폭은 벤치마크 모델의 직접파에 비해 더 작은 값을 가진다. Table 2는 채널별로 직접파의 에너지를 구한 뒤 1번 채널 직접파의 에너지에 대비한 나머지 채널 직접파의 감쇄율을 나타낸 것이다. 여기에서도 벤치마크 모델에 비하여 국산화 스트리머에서 취득된 직접파가 더욱 크게 감쇄되고 있음을 알 수 있다. 해수면의 반사계수는 수층과 공기층의 속도와 밀도 차이에 의하여 -1에 가까운 값을 갖게 되며 수층의 음원에서 발생한 신호는 해수면에서 반사되어 고스트(ghost)가 생성된다. 이로 인하여 오프셋에 따른 직접파의 진폭 감쇄가 급격하게 이루어지며 이는 음원 혹은 스트리머의 예인 심도가 낮은 경우 감쇄의 정도가 더 크다. 우리는 Fig. 6과 Table. 2에서 나타나는 직접파의 진폭 감쇄 양상을 분석함으로써 국산화 스트리머의 예인 심도가 벤치마크 모델에 비하여 더 낮게 유지되고 있음을 추정할 수 있다. 두 시스템 모두 버드(bird)와 같은 별도의 예인 심도 유지 장치는 장착하지 않았으며 해수면에

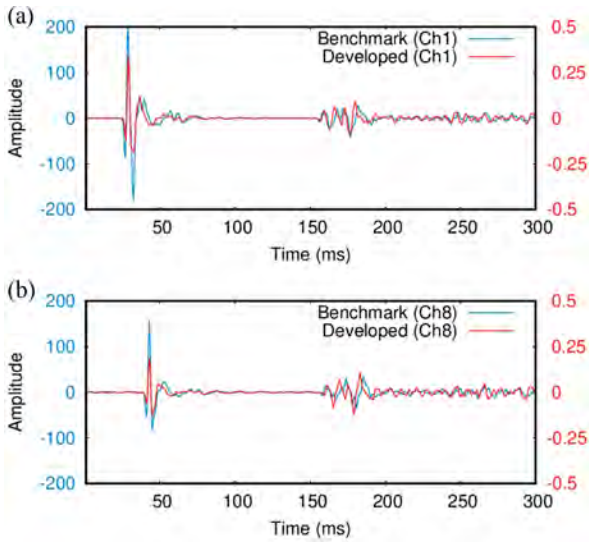


Fig. 6. Comparison of 601st traces from processed common receive gathers. (a) shows the results for channel 1, and (b) shows the results for channel 8.

Table 2. Attenuation rate of direct wave compared to channel 1.

Channel number	Attenuation (%)	
	Benchmark	Developed
2	26.53435	17.70116
3	36.18814	27.49528
4	39.56238	38.46249
5	41.99802	48.38475
6	57.41067	53.83862
7	69.03336	59.89531
8	72.22348	63.65952

부유하며 예인된다고 가정하였다. 하지만, 예인 심도에 있어서 분명한 차이가 발생하고 있으며 이는 수중에서 예인되는 시스템의 크기 및 무게, 그리고 테일 부이의 유무 등에 따라 차이가 발생하고 있다고 생각된다.

마지막으로 외부 잡음에 대비한 유의미한 신호의 비율을 평가하기 위하여 주파수 대역별로 신호대잡음비를 계산하였다. 잡음 전력 대비 신호 전력을 나타내는 신호대잡음비는 신호처리 분야에서 매우 기본적인 개념이나 탄성과 자료에서 외부 잡음이 완벽하게 제거된 유의미한 신호를 생성하는 것은 불가능하며 신호대잡음비를 정량화하는 것은 매우 어렵다. 또한, 이는 외부 잡음을 어떻게 정의하느냐에 따라 접근방식에 큰 차이가 발생한다(Schlumberger, 2023). 본 연구에서는 특정한 채널 모음에서 인접한 트레이스 간 상관성이 없는 신호를 외부 잡음으로 정의하였으며 교차상관 기법을 적용하여 신호대잡음비를 계산하였다(WesternGeco, 2013). 탄성과 자료에서 특정 트레이스를 영 지연 자기상관하면 신호와 잡음이 모두 포함된 전체 에너지를 구할 수 있다. 한편, 특정 트레이스와 이웃 트레이스를 교차상관하게 되면 상관성이 없는 잡음을 제거

한 순수한 신호의 에너지를 구할 수 있다. 최종적으로 신호대잡음비는 아래의 수식으로 계산된다.

$$S/N = 1/\sqrt{(AC/XC)-1} \tag{2}$$

여기서 S/N 은 신호대잡음비, AC 는 영지연 자기상관 값, XC 는 진폭이 최대인 지연 값에서의 교차상관 값을 나타낸다. 합리적인 평균값을 도출하기 위하여 많은 트레이스에서 도출된 교차상관 값과 자기상관 값을 누적하여 활용하였다.

Fig. 7는 다양한 주파수 대역에서 1번 및 8번 채널 모음 자료에 30 Hz 밴드 폭을 가진 디지털 필터를 적용하여 입력 자료를 생성 후 위 식을 적용하여 도출된 신호대잡음비를 나타낸다. Fig. 7을 통하여 두 시스템 모두 주파수 대역에 따라 신호대잡음비의 변화가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 60 Hz 이하의 저주파수 대역에서는 0 Hz에 가까워질수록 벤치마크 모델의 신호대잡음비는 증가함에 반하여 국산화 스트리머의 신호대잡음비는 급격하게 감소한다. 나머지 구간에서는 1번 채널은 비교적 유사한 수준의 신호대잡음비를 나타내고 있음에 반하여 8번 채널은 벤치마크 모델이 더욱 우수한 특징을 보인다. Table 1은 보다 정량적인 분석을 위하여 500 Hz 이하의 주파수 대역을 100 Hz 단위로 5구간으로 구분하여 신호대잡음비의 적분값을 도출하고 벤치마크 모델 대비 국산화 스트리머의 신호대잡음비 비율을 산출한 것이다. 첫 번째 구간(section 1)에서는 벤치마크 모델이 확연히 높은 신호대잡음비를 나타내고 있으며 이러한 차이는 특히 8번 채널에서 가장 크게 나타난다. 탄성과 음원의 중심 주파수 대역(100 ~ 200 Hz)를 포함하는 두 번째 구간(section 2)에서는 비교적 두 시스템이 매우 유사한 수치를 나타내고 있으나 음원의 예인심도(3 m)에 따른 첫 번째 노치 주파수(250 Hz)이 포함된 세 번째 구간(section 3)에서는 벤치마크 모델의 신호대잡음비가 높

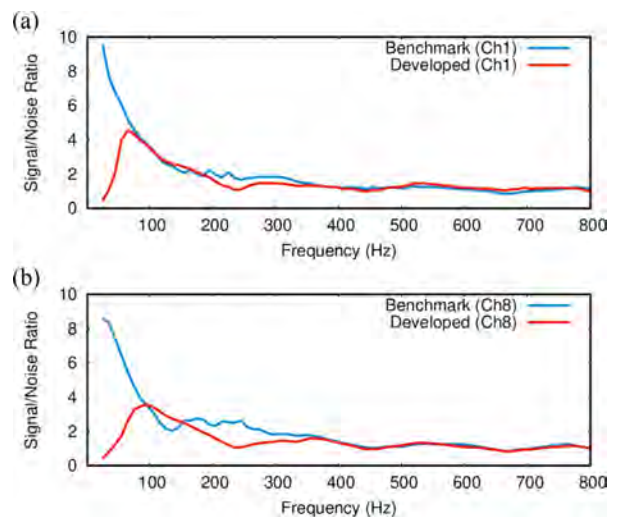


Fig. 7. Comparison of signal-to-noise ratio according to frequency band. (a) shows the results for channel 1, and (b) shows the results for channel 8.

Table 3. Integral value of signal-to-noise ratio according to 5 frequency bands and channel number. *B* is a benchmark model, and *D* is a developed streamer.

	Ch. 1			Ch. 4			Ch. 8		
	B	D	D/A (%)	B	D	D/A (%)	B	D	D/A (%)
Section 1 (25~95 Hz)	47.85	24.13	50.43	48.86	25.84	52.89	48.45	17.05	35.19
Section 2 (105~195 Hz)	24.17	24.80	102.61	23.10	24.97	108.10	25.27	25.61	101.35
Section 3 (205~295 Hz)	18.43	13.47	73.09	18.98	12.65	66.65	22.86	12.80	55.99
Section 4 (305~395 Hz)	15.01	13.33	88.81	15.04	14.51	96.48	17.10	14.78	86.43
Section 5 (405~495 Hz)	12.03	11.22	93.27	11.17	11.05	98.93	11.38	10.93	96.05

며 채널 번호가 커질수록 차이가 크다. 그 이후의 구간(section 4, section 5)에서는 두 시스템의 차이는 크지 않다.

앞서 언급된 다양한 특징 중 일관성을 보이는 주요한 사항으로는 60 Hz 이하의 저주파 대역에서 국산화 스트리머의 신호대잡음비가 낮게 나타난다는 것과 가장 뒤쪽에 있는 8번 채널에서의 차이는 더 크게 발생한다는 점이다. 본 연구에서는 이에 대한 이유를 아래와 같이 추정하였다. 첫 번째로는 앞서 나타난 스트리머의 활성 부문 내부 구조물에 의한 잡음이 10 ~ 30 Hz 대역에서 발생하고 있었으며 이들은 공통 수신 채널 내에서는 인접한 트레이스간 상관성이 없었다. 따라서 우리는 해당 잡음이 60 Hz 이하 영역에서 신호대잡음비를 하락시키는 요인 중 하나로 생각한다. 또한, 잡음의 발생원이 스트리머 후미에 위치하여 국산화 스트리머의 8번 채널이 가장 불량한 신호대잡음비를 나타낸다. 두 번째로는 국산화 스트리머에 적용된 저주파 차단 필터의 컷오프 주파수가 -3 dB 기준 36 Hz로 상대적으로 높게 세팅이 되었으며 차수가 높게 설정되지 않아 그보다 높은 주파수 대역에서도 어느 정도의 진폭 감쇄가 이루어졌기 때문이다. 이상적인 경우, 유입되는 잡음에 대해서도 동일한 저주파 차단 필터가 적용되어 신호대잡음비에 미치는 영향은 없어야 한다. 하지만, 아날로그-디지털 변환 및 디지털 필터링 적용 과정에서 양자화 잡음(quantization noise), 부동 소수점 정밀도 한계 등으로 인하여 추가적인 잡음이 발생할 수 있으며 이들이 신호대잡음비 연산에 영향을 미친다.

결론

본 연구에서는 한국지질자원연구원을 비롯해 국내에서 널리 활용되고 있는 지오일 스트리머와 이를 벤치마크 모델로 설정하여 개발이 이루어진 국산화 스트리머의 운용환경을 최대한 동일하게 설정하여 자료취득을 수행하였다. 이를 위해서 탐해 2호의 좌현과 우현에서 각각의 스트리머를 동시에 예인하였으며 선미의 중앙에서는 미니 GI건 시스템을 운용하였다. 포함

구룡포 동쪽 해역에서 자료취득이 이루어졌으며 이중 특정 라인 자료에 대한 분석을 통해 각각의 시스템의 특성 및 국산화 스트리머의 개선방안에 대한 연구가 이루어졌다. 자료 분석을 위하여 원시자료 및 이를 지배하고 있는 잡음의 특성을 확인하였고, 주파수 대역별, 채널별 민감도를 분석하였다. 밴드 패스 필터를 적용하여 두 자료의 유사성을 관찰하였고 특정 트레이스를 추출하여 오프셋에 따른 직접파의 감쇄 경향을 확인하였다. 마지막으로 주파수 대역별, 채널별 신호대잡음비를 계산하였다.

두 시스템에서 취득된 자료는 기본적인 자료처리가 적용된 후에는 육안으로는 쉽게 구별하기 어려운 수준의 유사성을 가지고 있어 후속 자료 해석 과정에서의 차이는 없을 것으로 예상된다. 하지만, 개발 성과를 검토하고 향후 개선점을 도출하고자 각각의 특성을 보다 구체적으로 파악하였다. 벤치마크 모델에서 취득된 자료는 상대적으로 낮은 주파수 대역으로 지질 구조를 표현한다. 또한, 10 Hz 이하의 극저주파 잡음이 지배적으로 나타나고 있으나 이는 음원에서 생성되는 주파수 대역과는 구분이 되어 자료의 품질에는 영향을 미치지 않는다. 마지막으로, 60 Hz 이하의 주파수 대역에서도 상대적으로 높은 신호대잡음비를 보여주고 있으나 100 Hz 이상의 영역에서 하이드로폰 그룹별 민감도의 일관성은 다소 떨어진다. 국산화 모델에서 취득된 자료는 상대적으로 높은 주파수 대역으로 지질 구조를 표현한다. 또한, 10 Hz 이하의 극저주파 잡음은 아날로그 필터를 통하여 제거되고 있으나 10 ~ 30 Hz 대역에서 추가적인 잡음이 발생하고 있다. 마지막으로, 하이드로폰 그룹별 민감도 및 신호대잡음비가 상대적으로 일관되게 나타나나 60 Hz 이하의 주파수 대역에서 신호대잡음비가 급격하게 떨어지고 있다.

위와 같은 분석 결과에 기반하여 국산화 스트리머의 개선방안에 대하여 우선순위에 따라 아래와 같이 정리하였다. 첫 번째로 스트리머 내부에서 발생하는 잡음을 제거하기 위하여 활성섹션 내부 구조물이 내벽에 강하게 부딪히지 않도록 구조를

변경함과 동시에 우려되는 부위에는 완충재 등을 적용해야 한다. 두 번째로 스트리머의 예인 중 장력에 의한 흔들림이 적게 발생하도록 선두 및 후미 활성 섹션의 앞과 뒤에 진동격리 섹션 등이 추가적으로 개발되어 적용되어야 한다. 마지막으로 100 Hz 이하의 신호도 손실 없이 취득하기 위하여 아날로그-디지털 변환 전 적용되는 아날로그 필터의 컷 오프 주파수를 낮추고 차수를 높일 수 있어야 한다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 ‘해양산업 수요기반 기술개발사업’의 ‘초고해상도 해저지층탐사를 위한 소형 디지털 스트리머 시스템 개발’ 종료 과제에 후속 연구로 수행되었습니다. 또한, 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘3D 해저 정밀영상화를 위한 복합 탄성파 탐사 및 실규모 고분해능 처리기술 개발(23-3312)’과 ‘해저탐사선 운항 안정화 및 연근해 탐사기술 개발(23-3313)’과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Brookshire, B.N., Landers, F.P., and Stein, J.A., 2015, Applicability of ultra-high-resolution 3D seismic data for geohazard identification at mid-slope depths in the Gulf of Mexico: Initial results, *Underwater Technology*, 32(4), 271-278, <https://doi.org/10.3723/ut.32.271>
- Brookshire, B.N., Lippus, C., Parish, A., Mattox, B., and Burks, A., 2016, Dense arrays of short streamers for ultrahigh-resolution 3D seismic imaging, *The Leading Edge*, 35(7), 594-599, [doi: 10.1190/tle35070594.1](https://doi.org/10.1190/tle35070594.1)
- Dowle, Robert, 2006, Solid streamer noise reduction principles, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006, 85-89. [doi: 10.1190/1.2370392](https://doi.org/10.1190/1.2370392)
- Geometrics, 2017, GeoEel/P-Cable Operator's Manual and Reference. https://www.geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/GeoEel_and_P-Cable_Manual.pdf
- Geometrics, 2023, <https://www.geometrics.com/product/geoeel-solid-digital-streamer/> (February 22, 2023 Accessed)
- KIGAM, 2006, Research on stratigraphy and tectonics of southeastern Korean offshore using seismic exploration technology.
- KIGAM, 2017, Development of Engineering-scale 3D system for Marine Seismic Exploration. <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201800014589>
- KIGAM, 2019, Development of real-time monitoring mobile system for Shallow 3D seismic survey. <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202000005456>
- Kim, H., and Kim, J., 2005, High-resolution Shallow Marine Seismic Survey using a PC based 8-channel Seismic System, *Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, 187-194. <http://www.koreascience.or.kr/article/CFKO200509409758172.page>
- Kim, S., Chung, W., Shin, S., Ha, J., and Shin, J., 2021, Application of Deghosting and Designature for High-Resolution Seismic Data, *The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 58(5), 433-443. <https://doi.org/10.32390/ksmer.2021.58.5.433>
- Kim, W., Park, K., Kim, H., Cheong, S., Koo, N., Lee, H., and Park, E., 2010, Detailed processing and analysis on the single-channel seismic data for site survey of Daecheon-Wonsando subsea tunnel, *Geophys. and Geophys. Explor.*, 13(4), 336-348 (In Korean with English abstract). <https://koreascience.kr/article/JAKO201013354299478.page>
- Kim, Y.-J., Cheong, S., Yi, B., and Yoo, D.-G., 2019, Application of high-resolution pseudo-3D chirp sub-bottom profile survey for fault investigation in the East Sea, Korea, *American Geophysical Union Fall Meeting*, OS51C-1498. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFMOS51C1498K/abstract>
- Lee, H.-Y., Hyun, B.-K., and Kong, Y.-S., 1996, PC-based acquisition and processing of high-resolution marine seismic data, *Geophysics*, 61(6), 1804-1812. <https://doi.org/10.1190/1.1444096>
- Lee, H.-Y., Koo, N.-H., Park, K.-P., Yoo, D.-G., Kang, D.-H., Kim, Y.-G., Seo, G.-S., Hwang, K.-D., Kim, J.-C., and Kim, J.-S., 2003, Resolution of Shallow Marine Subsurface Structure Image Associated with Acquisition Parameters of High-resolution Multi-channel Seismic Data. *Geophysical Exploration*, 6(3), 126-133 (In Korean with English abstract) http://kpubs.org/article/articleMain.kpubs?articleANo=MRTSBC_2003_v6n3_126
- Schlumberger, 2023, https://glossary.slb.com/en/terms/s/signal-to-noise_ratio (February 22, 2023 Accessed)
- Shin, J., Ha, J., Kang, N.-K., Kim, H.-D., and Kim, C.-S., 2021, Development of a portable 3D seismic survey system for nearshore surveys and the first case study offshore Pohang, South Korea. *Marine Geophysical Research*, 42(34), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11001-021-09453-x>
- Shin, J., Ha, J., Yoon, S., Im, T., and Im, G., 2022, Development of Digital Streamer System for Ultra-high-resolution Seismic Survey, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 25(3), 129-139. <https://doi.org/10.7582/GGE.2022.25.3.129>
- Shin, S., Kim, C., Yeo, E., and Kim, Y., 2005, Development of Multichannel Marine Seismic Data Acquisition System and its Application, *Proceedings of the Korean Society of Marine Engineers Conference*, 144-145. <https://koreascience.kr/article/CFKO200533239344773.page>
- WesternGeco, 2013, VISTA Processing Manual. Houston, Schlumberger, p. 1977-1978. <https://www.slb.com/companies/westerngeco/#related-information>