

해저지반 굴삭용 워터젯 장비의 시공성능 추정에 관한 기초적 연구

나경원* · 백동일** · 황재혁*** · 한성훈*** · 장민석* · 김재희*** · † 조효제

* 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원, † 한국해양대학교 조선해양시스템공학과 교수,

** 한국해양대학교 건설공학과 교수, ***한국해양대학교 조선해양시스템공학과

A Fundamental Study to Estimate Construction Performance of Subsea Waterjet Trenching Machine

Kyoung-Won Na · Dong-Il Beak** · Jae-Hyuk Hwang****

*Sung-Hoon Han*** · Min-Suk Jang* · Jae-Heui Kim*** · † Hyo-Jae Jo*

**Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea*

***Professor, Department of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea*

**** Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea*

† Professor, Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 해양구조물의 가동해역이 대수심으로 이동함에 따라 해저파이프라인 및 해저케이블은 육지보다 열악한 시공 환경에 놓이게 된다. 이때 해저지반상태와 해상조건 등은 작업효율에 영향을 미치게 되며 단시간에 효율적인 시공이 필요하다. 본 논문은 해저지반 굴삭을 위해 ROV(Remotely Operated Vehicle) 트랜처에 장착되는 워터젯 굴삭기의 시공성능 추정에 관한 연구이다. 먼저 전산유체해석을 통해 노즐간의 거리와 노즐 분사각도를 고려하여 굴삭효율을 극대화할 수 있는 최적 노즐수량을 선정하였고, 모형실험을 수행하여 굴삭기의 시공성능을 유추할 수 있는 최대 굴삭심도와 최대 굴삭속도를 파악하였다. 이를 토대로 실제 운용중인 워터젯 굴삭장비와 비교분석하여 워터젯 장비의 효율성을 확인하였다.

핵심용어 : 시공성능, 작업효율, 워터젯 굴삭기, 해저케이블, 해저파이프라인

Abstract : *There is drift toward moving offshore structures operating sites to deep water that brings subsea systems and types of apparatus to meet more severe environment than onshore. At this moment, climatic condition and seabed state affect trenching efficiency so trenching process is need to make steady progress in a short time. This paper is research on estimation about construction performance of waterjet trenching machine mounted on ROV trencher. Optimal number of nozzles that can maximize trenching efficiency is selected by considering clearance and angle of nozzles through CFD. Then verified effectiveness of waterjet apparatus on the result of trenching depth and velocity by model test analogized performance for construction work of waterjet trenching machine.*

Key words : *Construction performance, Work efficiency, Waterjet trenching machine, Subsea cable, Subsea pipeline*

1. 서 론

최근 해양에너지의 수요 증가와 더불어 국가간 정보전달의 목적으로 매년 수천 km의 파이프라인 및 케이블이 해저면에 설치되고 있다. 육상과 달리 해저면에 설치된 파이프라인 및 케이블은 파랑, 조류와 같은 해양 외력과 선박의 닻, 저인망 어구와 같은 인위적 요소로 인해 손상을 받을 수 있다. 이러한 위험 요소로부터 파이프 및 케이블의 안전성을

유지하기 위해 적절한 보호시공 공법이 필요하다. 보호시공 공법으로는 피복형 공법과 매설공법이 있으며 피복형 공법은 배관의 위치를 유지할 수 있도록 콘크리트 매트리스, 자갈, 사석 등을 해저면에 접지시키는 방식이다. 그러나 이러한 공법은 해양외력으로부터 피복된 구조물이 유실될 위험이 있어 지속적인 보강공사가 필요하다. 반면 매설공법은 특수한 장비로 해저지반을 굴삭하여 파이프라인 및 케이블을 매설하는 방식으로 해양외력으로부터 안정성 유지가 보장되고 추가 보

* kwna@kmou.ac.kr, wizli0269@kmou.ac.kr 051)410-4938

** qt418@kmou.ac.k 051)410-5293

*** wizli0269@kmou.ac.kr, hansh@kmou.ac.kr, kjh6091@kmou.ac.kr 051)410-4938

† Corresponding author: 종신회원, hjo@kmou.ac.kr 051)410-4302

(주) 이 논문은 “해저지반 굴삭용 워터젯 장비의 시공성능 추정에 관한 기초적 연구”란 제목으로 “2015 한국항해항만학회 추계학술대회 (부산관광공사 아르피나, 2015.10.22.-23, pp.15-16)”에 발표되었음.

강공사가 거의 필요하지 않아 피복형 공법에 비해 경제적 측면에서 유리하다.

파이프라인 및 케이블의 매설작업 방식 중 주로 쟁기(Plough)와 같은 굴삭장비를 이용하여 포설과 매설을 동시에 수행 하는 공법(Simultaneous lay and burial)이 있다. 그러나 이 공법은 안정적인 매설은 가능하나 작업해역의 수심이 깊어질수록 견인력이 증가하므로 주로 강이나 천해에서만 사용된다. 최근 파이프라인 및 케이블의 매설 해역이 점차 심해로 이동하는 추세에 따라 작업이 용이하며 안정성을 보장할 수 있는 매설공법이 필요하다. 이러한 공법 중 특히 ROV(Remotely Operated underwater Vehicle) 트랜처(Trencher)에 워터젯식 굴삭기를 장착시켜 포설 후 매설 하는 PLIB(Post Lay Inspection and Burial)공법이 많이 활용되고 있다. ROV 트랜처에 장착된 워터젯 굴삭기의 노즐 분포와 구성은 굴삭심도와 굴삭속도에 직접적인 영향을 주는 요소이며 작업효율 및 시공성능과 밀접한 관계가 있다. 매설작업이 수행되는 해역의 해저지반 상태와 더불어 해상조건은 시공성능에 영향을 주는 요인이다. 파이프라인 및 케이블의 매설은 지반 상태에 따라 작업효율이 달라지기 때문에 표준 관입시험이나 콘관입시험 등을 통해 설치예정 구간의 해저지반 특성을 최적 시공성능 관점에서 면밀히 분석해야한다. 또한 다양한 환경에 노출된 해양에서의 작업가능 일수는 육상에서와 달리 대략 1/3 정도이기 때문에 시공 전 작업 예정해역의 환경조건을 충분히 검토함으로써 작업 효율을 증대시킬 수 있다.

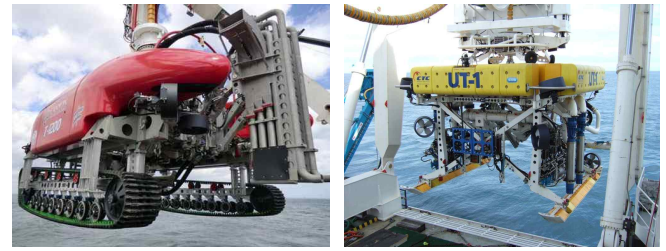
본 연구의 목적은 해양에서 파이프라인 및 케이블의 매설작업을 위하여 ROV 트랜처에 장착되는 워터젯 장비의 최적 작업효율 및 시공성능을 추정하는 것이다. 전산유체해석 기법을 적용한 시뮬레이션을 통해 최적 작업성능을 발휘할 수 있는 노즐의 수량을 선정하였다. 이를 바탕으로 모형실험을 수행하여 예측된 결과들을 실제 운용중인 장비들의 특성치와 비교·분석함으로써 매설공사의 경제성에 직결되는 작업효율과 시공성능을 추정하였다.

2. 운용중인 워터젯 장비들의 시공성능 분석

일반적으로 워터젯 굴삭장비는 ROV 트랜처에 두 개의 젯팅암(Jetting arm)이 좌우 대칭되어 장착된다. Fig. 1은 현재 파이프라인 및 케이블 매설작업에 운용되고 있는 ROV 트랜처들이다. (a)는 영국 Canyon Helix Offshore사의 T-1200, (b)는 노르웨이 Deep Ocean사의 UT-1, (c)는 영국 Global Marine Systems 사의 Q-1000 이다.

Table 1은 Fig. 1 굴삭기들의 주요 제원과 작업성능을 분류하였다. 위에서 언급한 세가지 워터젯 굴삭기들이 평균작업 수행 시간은 장비점검과 진수 및 회수 시간을 제외하고 하루 20시간이 일반적이다(Dansette and Robertson, 1994; Kim, 2006). ROV 트랜처를 보유한 국내 기업으로는 KT

submarine이 유일하며, 국내 해역 뿐만 아니라 지반조건이 유사한 아시아 해역들에서도 해저케이블 매설작업을 수행하고 있다. 세가지 종류의 굴삭기들이 굴삭할 수 있는 최대심도는 약 3m이며, 굴삭속도는 장비의 사양과 해저지반의 조건에 따라 차이를 보인다. 현재 운용중인 워터젯 굴삭기의 젯팅암들은 일반적으로 1단형과 2단 이상의 다단형으로 구분되며, 시공해역의 수심이 깊어지고 수중 건설 규모의 대형화에 따라 향후 2단 이상의 다단형이 주를 이룰 것으로 예측된다.



(a) T-1200
(Canyon Helix Offshore, 2013)

(b) UT-1
(Deep Ocean, 2015)



(c) Q-1000 (Global Marine Systems, 2015)

Fig. 1 Waterjet type ROV trenchers

Table 1 The specification of ROV trenchers

Specification		T-1200	UT-1	Q-1000
Water jetting system	Pump	375kW *3	375kW *4	300kW *2
	Flow rate (m ³ /h)	1050 ~1800	4800	1000
	Pressure (bar)	8~16	7	8
Burial capabilities	Burial depth (m)	3	0.75~3	3
	Burial speed (m/h)	25~780	350~1000	400
	Soil condition	sand to soft clays		

3. 최적 시공성능을 고려한 굴삭심도

오랜 기간에 걸쳐 형성된 심해 퇴적지반은 연약한 점토, 실트 또는 조립토 층으로 구성되어 있으며 점착성이 높은 특징이 있다. 일반적으로 해저지반은 하부로 내려갈수록 상부 해저면 하중에 의해 굳은 지층이 존재하며 동일한 지층이나 동일한 깊이에 위치한 지층이라도 서로 다른 지반강도를 갖는다(Seo et al., 2012). 이러한 해저지반의 특성으로 파이프라인 및 케이블의 매설 구간에 대한 사전 지반조사를 통하여 시공성능에 영향을 줄 수 있는 요인을 분석해야한다.

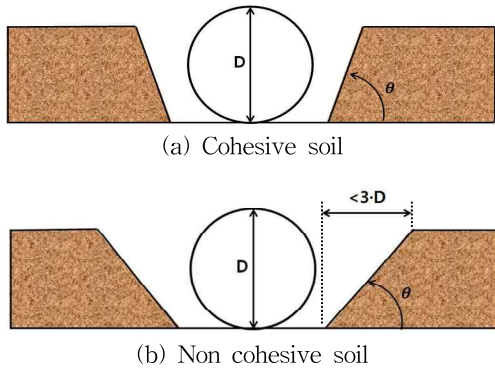


Fig. 2 Cross section of seabed soil trenching (Det Norske Veritas, 2007)

위터젯 굴삭장비는 암반으로 이루어진 지반을 제외한 점착성 지반과 비점착성 지반의 시공에 사용된다. 토사의 점착성은 굴삭속도와 굴삭폭에 영향을 주며 Fig. 2는 Det Norske Veritas(2007)에서 제시한 굴삭폭으로 케이블이나 파이프라인 매설시 구조물 직경(D)의 3*D보다 작은 폭을 굴삭하여야 한다. (a)와 (b)는 점착성 지반과 비점착성 지반에서 위터젯 굴삭 장비가 사용될 때의 단면을 간략하게 나타내었다. 실트와 점토가 많은 점착성 지반에서는 고압의 위터젯 분사압력을 적용하더라도 굴삭경사면이 쉽게 무너지지 않으며 굴삭속도가 느린 경향이 있다. 그러나 상대적으로 사질토가 많이 포함된 비점착성 지반에서는 낮은 분사 압력으로도 굴삭면이 쉽게 붕괴되며 동시에 굴삭속도가 증가하여 작업효율 및 시공성능이 높아지는 경향을 보인다. 파이프라인 및 케이블 매설 작업시 해양외력의 영향을 최소화하고 최적 시공성능을 목표로 하는 굴삭심도를 결정해야 하지만 해저지반의 상태와 지형의 특성에 따라 시공할 수 있는 심도는 상이하기 때문에 일반적으로 1.5m ~ 3m의 깊이를 굴삭하여 매설한다.

4. 시뮬레이션 및 모형실험

4.1 연구 프로세스

본 연구에서 수행하고자 하는 연구프로세스는 Fig. 3과 같다. 젯팅암에 설치되어 최적의 시공성능을 갖는 노즐 수량을 선정하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 통해 얻은

최적 노즐 수량을 적용한 모형을 제작하여 실제 작업해역의 환경을 구현한 수조에서 실험을 수행하였다. 제한된 환경에서 얻은 모형실험의 결과가 실제 해상에서 얻어진 결과와 다르게 되는 크기효과는 제외하였고, 굴삭과정의 정성적 현상을 파악에 초점을 두었다. 계측된 모형실험의 결과를 실제 운용중인 위터젯 굴삭장비들의 주요 시공성능과 비교·분석하였다.

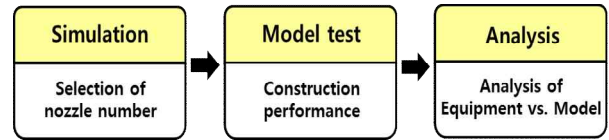


Fig. 3 Diagram of research process

4.2 시뮬레이션을 통한 최적노즐 수량 선정 조건

시뮬레이션은 ANSYS CFX ver. 14.0를 이용하여 Table 2와 같이 총 6가지 조건에 대해 난류모델의 타당성을 검증하기 위하여 기본적으로 k-epsilon 모델(ANSYS, Inc., 2011)을 적용하여 유동장 해석을 수행하였다. 2개의 젯팅헤드(Jetting head)를 입구영역으로 지정하여 유량이 유입되도록 하였고, 노즐이 장착되어 물이 분사되는 영역을 출구영역으로 지정하였다. 시뮬레이션 조건으로 수중에서 작용하는 정수압은 각 케이스마다 동일하며 외부에서 작용하는 압력이 없다는 가정하에 노즐의 출력조건은 대기압으로 설정하였다. 시뮬레이션에 적용된 유량은 모형실험에 사용하는 펌프의 성능을 고려하여 선정하였다.

시뮬레이션 분석을 통해 최적의 노즐 수량을 결정하기 위해 전진방향의 노즐만을 고려하였고, 굴삭한 뒤 남은 토사를 제거하는 백워시(Back-wash)노즐은 고려하지 않았다. 또한 최적 노즐 수량을 산출하기 위한 조건으로 노즐에서 분출되는 물의 유속분포는 균일해야 하며 각각의 노즐에서 분사되는 물들간의 간섭이 최소화 되도록 모델링 하였다. Fig. 4는 시뮬레이션에 사용된 젯팅암의 전면부 노즐 배치를 나타낸 그림이다. 각 노즐은 구조물이 손상되지 않는 범위 내에서 좌우 5° 씩 교차되게 배치하여 물을 분사하도록 하였다. 이러한 배치는 직각으로 물을 분사하는 노즐에 비해 보다 넓은 굴삭폭과 완만한 굴삭 경사면을 만들 수 있어 굴삭경사면의 붕괴위험을 줄이고 시공안정성을 향상시킬 수 있다.

Table 2 Simulation parameters

Nozzle diameter (mm)	Flow rate (m ³ /h)	Forward direction nozzle number (EA)	Total case
3	3.0/4.2	6/12/18	6

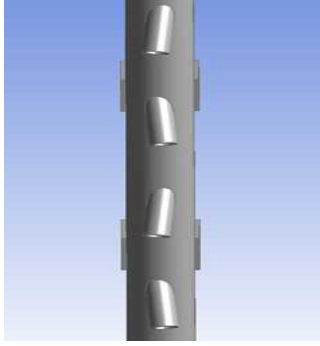


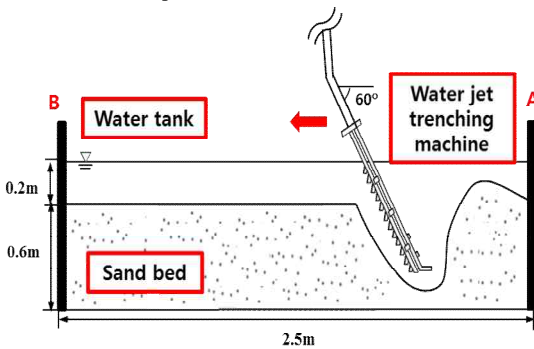
Fig. 4 Front view of jetting arm's nozzles arrangement

4.3 모형실험

모형실험은 매설작업이 수행되는 실패역과 유사한 해양환경을 구현하기 위해 길이 2.5m, 높이 1m, 폭 0.5m의 알루미늄 프레임으로 구성된 수조를 제작하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 모형실험의 개요와 실험에 사용된 모형을 나타내고 있다.



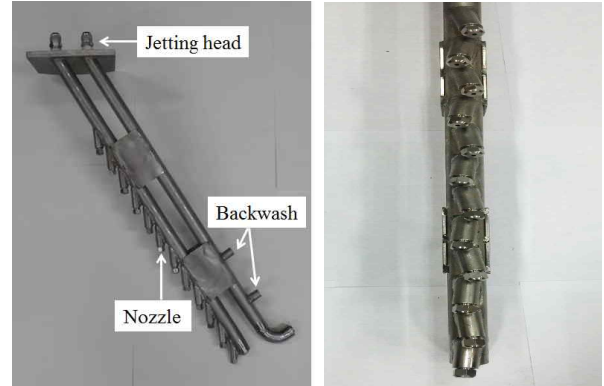
(a) Photo of experiment



(b) Schematic of the model test

Fig. 5 Experimental setup

모래는 수조 바닥으로부터 0.6m, 수조 내부의 물은 포설된 모래층으로부터 0.2m의 높이로 채웠다. 실험에 적용된 젯팅암과 노즐은 스테인레스 재질로 실제 해저지반 굴삭에 사용되는 워터젯 굴삭장비를 1/6으로 축소 제작하였고, 예인대차에 장착하여 A 지점에서 B 지점으로 이동 시켰다. 예인대차는 최소 0.11m/s 속도부터 최대 0.33m/s의 속도로 전기모터에 의해 구동되며, 모형실험에 사용된 펌프는 고압펌프로 7bar의 압력으로 최대 28m³/h의 유량 성능을 갖는다.



(a) Side view

(b) Front view

Fig. 6 Experimental model

5. 시뮬레이션 및 모형실험 결과 분석

5.1 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션은 모든 노즐의 직경을 3mm로 동일하게 설정하고 노즐수량이 6개, 12개, 18개인 3가지 조건에 대하여 3 m³/h 와 4.2m³/h의 두가지 유량 조건을 적용하여 수행하였다. 총 6가지 조건으로 수행된 시뮬레이션 결과를 분석해보면, 노즐을 통해 분출되는 물의 분사유량과 유속은 대체적으로 지면에 가까워질수록 급격히 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 7 (a)는 노즐 수량이 6개인 경우이며 최상부의 첫 번째 노즐에서 분사되는 물의 유량은 지면까지 분사되기에는 충분하지 않았으며, 나머지 5개 노즐만으로 굴삭이 이루어질 경우 굴삭범위가 좁아지고 목표 굴삭심도 또한 확보하기 어려워 시공성능이 떨어질 것으로 판단된다. (c)의 경우 노즐 수량은 상대적으로 많지만 노즐에서 분사되는 물의 유량과 유속은 지면에 가까워질수록 급격히 감소하여 충분한 굴삭심도를 확보하기 어려우므로 굴삭성능이 저조할 것으로 추정된다. 또한 (a), (b)의 경우 보다 상대적으로 많은 굴삭시간이 소요되므로 굴삭효율이 떨어지는 것을 예측할 수 있으며 각 노즐에서 분사되는 물의 유량은 주변 노즐에서 분사되는 유량간의 간섭효과로 유속감소 현상과 일부분의 노즐에서는 유량간의 간섭 없이 유속이 저조하게 나타나는 것을 확인하였다. 그러나 노즐이 12개인 (b)의 경우 최상부의 첫 번째 노즐을 제외한 노즐들에서 유량과 유속이 대체적으로 균일한 양상을 보이고, 노즐간의 간섭효과도 발생하지 않아 우수한 작업효율과 최적의 시공성능을 발휘할 것으로 판단된다.

본 연구에서 성능발휘가 저조한 최상부의 첫 번째 노즐을 없애지 않은 이유는 첫 번째 노즐이 없다면 두 번째 노즐도 비슷한 양상을 보일 것이며, 두 번째 노즐부터 실질적으로 지반을 굴삭하는 역할을 하므로 유량이 적더라도 첫 번째 노즐은 필요하다고 사료된다. 위와 같은 시뮬레이션 결과를 토대로 최적 노즐 수량은 12개로 선정하였다. 각 노즐에서 분

사유량의 형태와 유속이 균일하지 않은 이유는 관로내의 난류유동과 유체의 점성으로 인한 영향 때문인 것으로 판단된다.

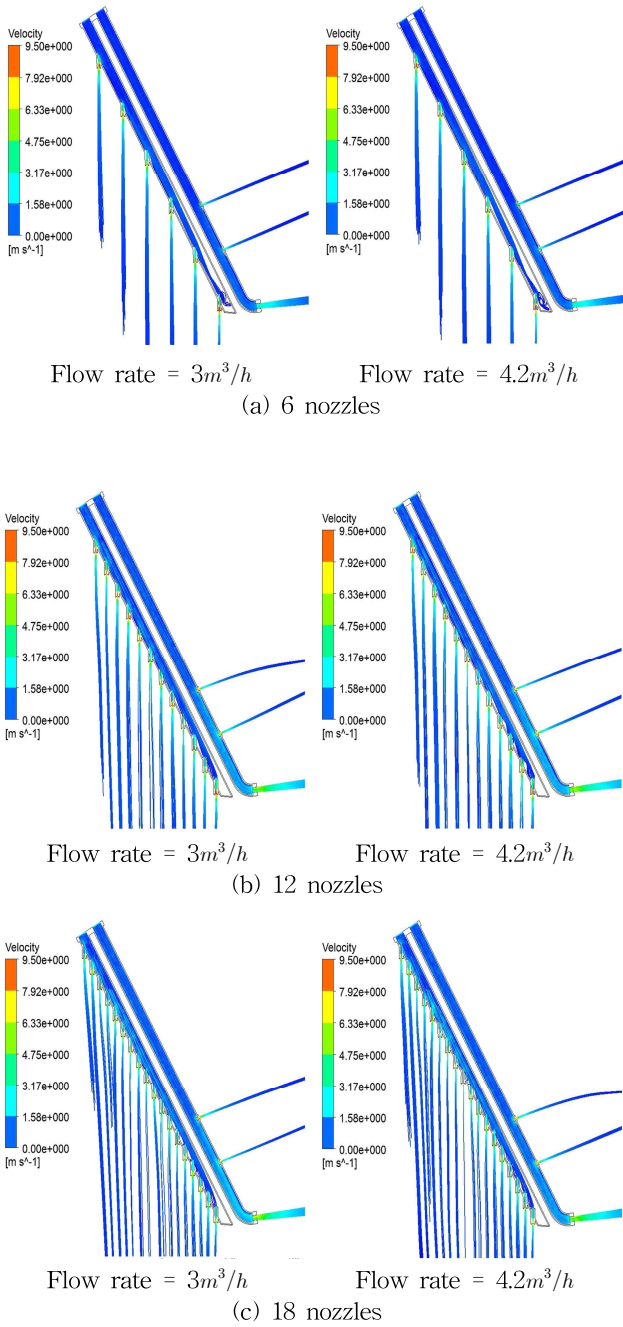


Fig. 7 Nozzles configuration test results

5.2 모형실험 결과 분석

모형실험을 바탕으로 실험에 사용된 굴삭속도와 유량, 예측된 굴삭심도는 프루드 상사법칙을 적용하여 실제 크기에서 적용되는 값들을 추정하였다. 프루드 상사법칙은 모형(Model)과 원형(Prototype) 사이의 프루드 수가 같을 경우, 다음과 같이 정의한다.

$$\frac{L_p}{L_m} = SF = 6 \tag{1}$$

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{gL_p}{gL_m}} = SF^{0.5} = 6^{0.5} \tag{2}$$

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{L_p^2 V_p}{L_m^2 V_m} = SF^{2.5} = 6^{2.5} \tag{3}$$

Fig. 8와 Fig. 9는 모형실험을 통해 예측된 결과를 프루드 상사법칙을 적용하여 Table 1의 실제 운용 중인 장비들의 주요 시공성과 비교한 그래프이다. Fig. 8은 시뮬레이션 결과 분석을 통해 선정된 12개의 노즐로 구성된 모형을 제작하여 수조 실험한 예측 값과 Table 1의 현재 운용 중인 장비들의 유량에 따른 굴삭속도를 표현한 그래프이다. 실험에 사용된 워터젯 굴삭기의 굴삭속도는 식 (2)를 적용하여 실제속도로 환산하였을 때, 약 970m/h로 UT-1의 굴삭속도와 유사하게 나타났으며 T-1200, Q-1000과 비교하였을 때는 현저하게 높은 굴삭속도를 나타낸다. 또한 실험에 사용된 유량은 식 (3)을 적용하여 실제유량으로 환산하면 약 370m³/h로 현재 운용되고 있는 UT-1의 유량 1200m³/h와 비교하면 약 30% 수준이지만 Table 1에서 제시한 굴삭장비들과 동일한 유량 대비 우수한 굴삭 속도를 가진다.

Fig. 9는 현재 운용 중인 굴삭장비와 실험을 통해 얻은 굴삭심도를 유량 기준으로 분석한 그래프이다. 실험을 통해 얻은 최대 굴삭심도는 식 (1)을 적용하여 2.78m로 예측되었으며 현재 운용 중인 굴삭장비들의 최대 굴삭심도 3m와 거의 유사하다. 워터젯 굴삭장비의 주요 시공성 분석을 위한 모형실험 결과를 실제 운용 중인 장비들의 성능과 비교하였을 때 실험에 적용된 모형이 유량 대비 우수한 굴삭심도를 가진 것으로 판단되며 실패역에서 운용할 경우 탁월한 시공성을 가질 것으로 추정된다. 또한 실험에 사용된 젯팅암 첫 번째 노즐의 성능발휘는 시뮬레이션과 유사하게 관측되었으며, 추후 첫 번째 노즐의 위치 변화에 따른 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

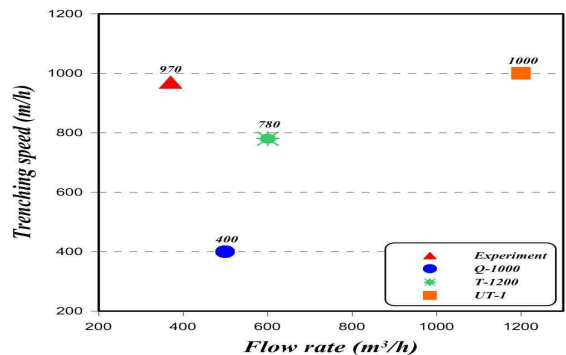


Fig. 8 Trenching speed comparison in accordance with flow rate

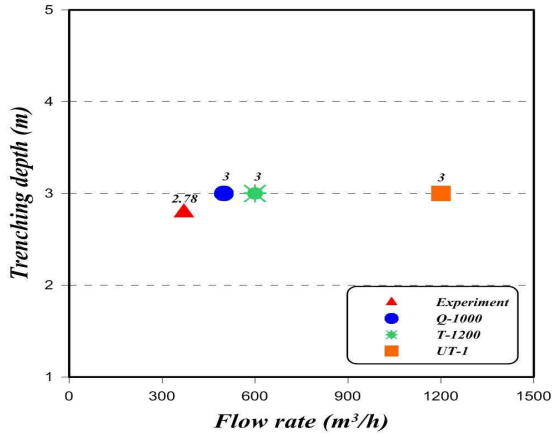


Fig. 9 Trenching depth comparison in accordance with flow rate

6. 결론

본 연구는 해저지반에 놓인 케이블 및 파이프라인을 매설하기 위해 사용되는 장비 중 ROV 트랜처에 장착되는 워터젯 굴삭기의 시공성능을 추정하기 위해 수행되었다. 최적의 시공성능과 작업효율을 발휘할 수 있는 노즐 수량을 선정하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 토대로 워터젯 굴삭장비를 실제 크기의 1/6으로 축소 제작하여 모형실험을 수행하였다. 실험을 통해 최대 굴삭심도와 최대 굴삭속도를 계측하여 실제 운용중인 장비들과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 워터젯 굴삭기의 최적 노즐 수량을 선정하기 위한 시뮬레이션 결과 노즐 수량이 12개인 경우 주변 노즐간의 상호간섭이 적었고, 노즐에서 분사된 물의 유량과 유속이 균일한 양상을 보임으로써 가장 효율적인 시공성능을 나타냄을 확인하였다.

(2) 모형실험에서 계측된 최대 굴삭심도는 2.78m로 현재 운용중인 굴삭장비들의 최대 굴삭심도 3m와 유사하였다. 또한 실제 운용중인 장비들의 유량과 비교하였을 때 실험에 사용된 유량은 약 30% 수준으로 실험역에서 100% 유량으로 운용할 경우 유량 대비 탁월한 굴삭심도 및 속도를 확보하면서 작업효율이 증가됨을 알 수 있다.

(3) 모형실험에 사용된 유량은 약 $370\text{m}^3/\text{h}$ 로 현재 운용되고 있는 UT-1의 유량 $1200\text{m}^3/\text{h}$ 와 비교하였을 때 약 30%수준의 유량이지만 속도측면에서는 UT-1의 최대 굴삭속도 $1000\text{m}/\text{h}$ 에 근접한 속도를 가짐으로써, 유량 대비 작업 및 시공에 있어 유리함을 보여준다.

(4) 워터젯 굴삭장비의 시공성능에 영향을 주는 요소는 노즐 수량과 노즐 각도이며, 향후 두 가지 요소와 서로다른 시공지반을 갖는 경우에 대해 추가적인 연구를 통해 워터젯 굴삭장비의 작업효율을 추정하는데 있어 중요한 지표가 될 것

으로 사료된다.

후 기

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] ANSYS, Inc.,(2011), ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 14.0
- [2] Canyon Helix Offshore(2013), T-1200 <http://helixesg.com/case-studies/t1200-windfarm-trenching-case-study/>
- [3] Dansette, N. and Robertson, N. C.(1994), "Subsea Flexible Pipeline Burial Using a Lightweight Pipeline Trencher", In Offshore Technology Conference. ISBN 978-1-61399-096-4
- [4] Deep Ocean(2015), UT-1, <http://www.deeпоceangroup.com/>
- [5] Global Marine Systems(2015), Q-1000, <http://www.globalmarinesystems.com/subsea-equipment.html>
- [6] Kim, H. A.(2006), "A Study on the Basic Design of Sub-sea Trenching Machine Using Water Jetting", MSc thesis, Graduated Institute of Ocean System Engineering, Korea Maritime and Ocean University.
- [7] Seo, Y. K., Lee, K. Y., Ha, K. S., Kim, T. H.(2012), "Technical Articles: Geotechnical Aspects of Submarine Cable". Korea Geotechnical Society. Vol. 28, No. 3, pp. 12-22.
- [8] Det Norske Veritas(2007), "On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines". Det Norske Veritas (DNV), Oslo, Norway. DNV-RPF109.

Received 8 September 2015

Revised 28 December 2015

Accepted 28 December 2015