

준설토 장거리 이송기술 분석 및 평가

김은성^{1*}, 정순용², 김유승³
^{1,2}(주)나다건설, ³코리아살베지(주)

Analysis and Estimation of Long Distance Dredged Soil Transport Technology

Eunsung Kim^{1*}, Soon Yong Jeong², Yu Seung Kim³

^{1,2}Nada Construction Inc.,

³Korea Salvage Inc.

요약 전자기장 효과를 이용한 준설토 장거리 이송기술이 개발되었다. 개발 기술의 효과를 정량적으로 평가하기 위해 계측 시스템을 이용하여 측정된 유속분포와 압력강하를 중심으로 전자기장 도입으로 인한 효과를 판단하였다. 대체 물질에 의한 실내실험과 실제 준설현장에서 장거리 이송기술을 적용해본 결과, 펌프만 사용하여 이송하는 경우보다 평균유속은 물론, 특별히 마찰층에서 속도증가가 있는 것을 확인하였다. 준설토 이송시, 이송관에 전자기장을 인가시켜줌으로써, 마찰층에서의 이송 저항을 감소시켜 전체적으로 속도를 증가시킴으로 인해 파이프에 의한 장거리 이송시 관내 압력강하를 줄이고, 유속을 증가시켜서 15km이상의 장거리 이송이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract The new developed long distance transport technology uses the effect of electro-magnetic energy. But it's difficult to estimate the new technology. We monitored the velocity profile and pressure drops in pipes and estimated the technology quantitatively from data analysis. Laboratory test and field test gave us that the effects of electro-magnetic energy changed the flow properties and increased the velocity, especially at the slip layer. When transporting the dredged soil, electro-magnetic field generation reduces the frictional resistances at the slip layer, increases the velocity of flow. Furthermore, it would be possible to transport the dredged materials up to 15km long with one pump station.

Key Words : dredged soil transport, velocity profile, monitoring, expert system

1. 서론

콘크리트, 준설토 등 슬러리 물질을 파이프로 장거리 이송을 하려면 일반적으로 펌프압력을 높여주면 가능하다. 그러나, 파이프 내 폐색이 생기거나, 이송거리가 일반적인 경우에 비해 상당히 늘어나면 펌프 압송만으로는 한계가 있다. 일반적이지는 않지만 준설토를 10km이상 장거리 이송을 해야 하는 경우, 부스터펌프를 추가하는 등 보완책이 필요하다.

같은 펌프의 압력을 사용하더라도, 내부 슬러리의 운동에너지를 활성화시켜서 이송속도를 증가시킬 수 있다면 펌프용량을 줄일 수 있다. 이에 대해 장거리 콘크리트 압송실험을 통해 그 효과를 검증하였다[1]. 이 기술은 전기에 의해 유도된 자기장(EMF, Electro-Magnetic Field)에 의해 파이프 내부의 슬러리를 활성화시키는 원리인데, 새만금 준설매립현장에서 준설토 장거리이송을 위해 적용될 예정이다.

자기장에 의해 관내 유속을 제어한 사례로는, 상하수

이 논문은 "환경친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30km이상급 이송 기술 개발" 사업(국토해양부)의 일환으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Eunsung Kim(Nada construction Inc.)

Tel: +82-70-4334-5686 email: caelumiter@gmail.com

Received March 3, 2015

Revised (1st March 18, 2015, 2nd March 24, 2015)

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

도 처리시설에서 내부 스케일 제거에 활용한 예가 있다. 그러나, 이송하려는 재료가 불균질하고, 주위 환경과 장비 상태 등에 따라 영향을 받는 준설편장에서 이 기술의 효과를 정량적으로 판단하기는 어렵다. 개발된 기술의 효과를 객관적으로 판단하기 위해 계측한 결과를 분석하여 전자기장 도입 효과를 이용한 준설편 장거리 이송기술의 성능을 분석하였다.

2. 준설편 장거리 이송기술의 개발

2.1 이론적 배경

자기장을 통과한 물은 표면장력이 감소한다. 이러한 성질은 물과 같이 극성을 띤 유체에 있어서 점성을 저하시키고, 분자들의 구조를 변화시킨다[2][3]. 이 경우 관내 마찰력이 줄고, 자기에너지에 의한 효과에 의해 물분자의 운동에너지가 활성화된다[Fig. 1].

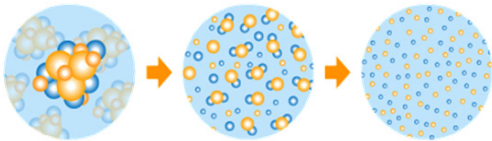


Fig. 1. Change after electro-magnetic treatment

2.2 고효율 파이프 이송기술의 개발

파이프에 의한 유체 이송효율을 극대화하기 위해서는 전자기 인가를 효과적으로 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위해 [Fig. 2]와 같이 파이프에 코일을 감아 전자기장을 인가하는 원리를 이용하여 고효율이송기술을 개발하였다.

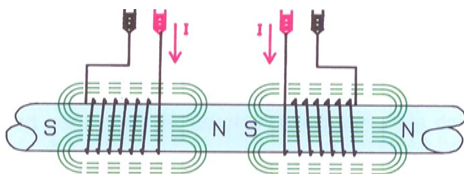


Fig. 2. Magnetic field induction by electricity

코일에 펄스형태의 전류가 흐르면 이송관 내부에 자기에너지필드가 형성되면서 이곳을 통과한 유체의 점성이 감소하고 유속이 증가하게 된다[Fig. 3]. 실제로는 이송관의 관경과 내부 유속 등이 현장마다 다르므로, 이송

효율을 증가시키기 위해서는 실측에 의해 최적의 코일 수량과 간격 등을 도출해야하며, 현재까지의 연구에서는 배관에 감긴 코일을 통해 유도된 전류가 10A가 되는 것을 최적화 기준으로 삼고 있다.

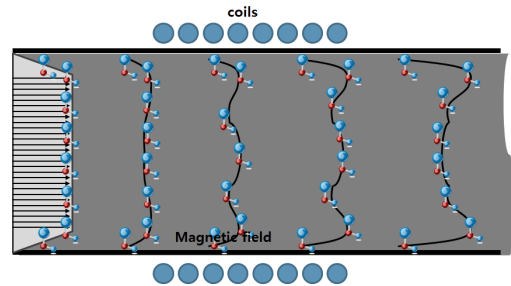


Fig. 3. Effect of electro-magnetic energy field

이 기술의 효과를 정량적으로 검증하고 보완하기 위해 주요 파라미터를 선정하고, 이를 기준으로 실내실험과 현장실험을 수행하였다.

3. 이송상태 파라미터 선정

3.1 이송상태 파라미터 선정

이송상태는 크게 homogeneous, heterogeneous, flow with a moving bed로 나눌 수 있다[Fig. 4]. 흐름이 원활할 때는 homogeneous 또는 heterogeneous 상태를 보이나, 관내 퇴적이 발생하는 등 폐색이 될 경우에는 이송에 심각한 문제가 발생할 수 있다.

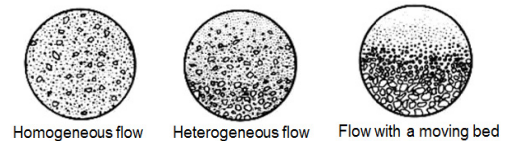


Fig. 4. classification of closed channel flow states

파이프 이송에서 입계속도는 퇴적가능성을 판단할 수 있는 지표이며, 특히 heterogeneous 흐름에서는 입계속도 이상을 유지하는 것이 중요하다[Fig. 5]. 따라서, 이 연구에서는 입계속도를 흐름상태 평가에 있어서 가장 중요한 요소로 보고 관내 유속분포를 이상상태의 중요 파라미터로 선정하였으며, 관내 압력 및 유량을 보조지표로서 분석하였다.

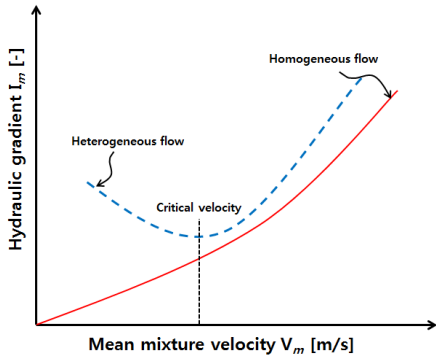


Fig. 5. Critical velocity concept in closed channel flow

3.2 이송상태 모니터링 방법

이송상태를 나타내는 주요인자로서 유속분포, 밀도분포, 유량, 관내 압력 강하를 선정하였으며, 이를 측정, 분석함으로써 이송상태를 추정하였다.

3.2.1 유속분포의 측정

초음파를 투사하고, 반사된 반사파를 분석하여 깊이별로 유속분포를 추정할 수 있다. 초음파의 특성상 금속관을 투과하지 못하므로 파이프를 폴리에틸렌 계열로 제작하였다. UVP (ultrasonic velocity profiler, [Fig. 6])는 초음파의 반사파를 분석하여 파이프 깊이별로 속도분포를 측정할 수 있는 장비이다. 반사파에는 상당부분 잡음 성분이 포함되어 있고, 시간에 따른 채널별 데이터량이 많으므로 데이터 분석이 까다롭다.

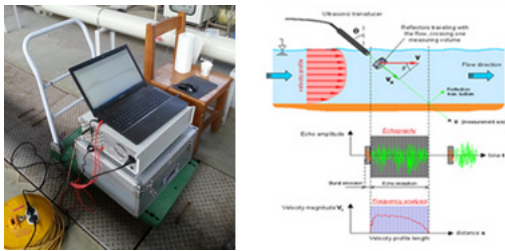


Fig. 6. Ultrasonic Velocity Profiler

3.2.2 밀도분포 및 유량 측정

실내실험에서는 [Fig. 7](a)와 같이 수조에서의 물높이를 측정하여 유량의 변화를 확인하였다. 현장에서는 [Fig. 7](b)와 같이 밀도-유량계를 이용하여 유량을 측정하였으며, 추후 밀도계를 2개 이상 설치하여 밀도분포를 측정할 예정이다.

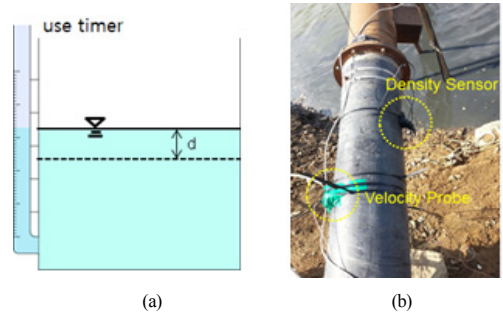


Fig. 7. Flow rate measuring method

3.2.3 관내 압력

배관내 구멍을 내고 압력센서를 고정시켰다. 배관 유입부, 유출부, 곡부 등에 센서를 부착하고, 이송 길이별 압력을 모니터링하여 배관내 압력강하를 측정하였다.



Fig. 8. Pressure sensor and installation on the pipe

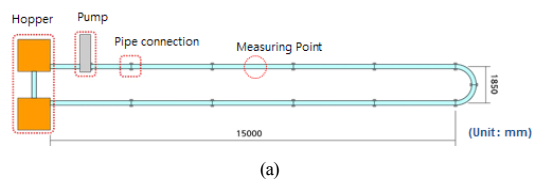
4. 실내실험을 통한 이송기술 효과 검토

준설토 현장의 경우, 변수가 너무나 많이 존재하므로, 변수를 제어할 수 있는 환경, 즉 실험실 테스트를 통해 이송상태 파라미터의 변화를 살펴보고, 개발 기술의 성능을 객관적으로 판단할 필요가 있다.

4.1 실험 종류 및 모니터링 항목

준설토 이송상태를 구현하기 위해 [Fig. 9]와 같은 실험장치를 구축하고(L=30m), 물, 카올리나이트, 모래 혼합물에 대해 함수율별로 실험을 수행하였다.

펌프출력은 30Hz, 40Hz, 50Hz로 구분하였고, 각 혼합물에 대해서 함수율 300%, 400%, 500%, 600%, 800%, 1000%일 때의 흐름에 대한 유속분포를 측정하였다.





(b)

Fig. 9. Indoor experiment by circulation flow system

4.2 데이터 분석 방법

초음파유속분포 측정장비(이하 UVP)는 초음파의 한 계로 인하여 관내 투과에 한계깊이가 존재하므로 특정 깊이가 이상 측정할 수 없다. 전체 유속분포를 추정하기 위해 상부에서 계측한 데이터(신뢰성이 높은 구간)와 파이프 하부에서 계측한 데이터(신뢰성이 높은 구간)를 모은 후, least square method에 기반한 알고리즘으로 curve fitting하여 UVP장비로 투과가 되지 않는 곳까지의 유속 분포를 추정하였다.

4.3 실내 실험 결과

4.3.1 물의 유속변화

펌프 출력을 30Hz와 40Hz로 했을 때 유속분포를 3회씩 측정, 비교하였다.

Table 1. velocity increment by EMF effect (unit: mm/s)

Pump out	Pump only		Pump+EMF		Increment	
	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}
30Hz	424	86	317	217	-4.3%	39.7%
	540	179	594	207		
	502	129	492	124		
40Hz	700	222	627	149	-6.8%	6.2%
	602	159	647	299		
	733	202	623	170		

[Table 1]에서 확인할 수 있는 바와 같이, 펌프 출력이 저속일 때(30Hz) 전자기장 인가 후, 최고유속(V_{max})이 소폭 감소(-4.3%)에도 불구하고, 마찰층(slip layer) 유속은 40% 정도 증가함을 알 수 있다. 펌프 출력이 높은 경우(40Hz)에는 전자기장에 의한 마찰층 유속증가가 두드러지지 않는데, 이는 펌프에 의한 유동성 증가가 더 지배적이기 때문이라 판단된다. 당연한 귀결이지만, 함

수량이 클수록, 펌프세기가 클수록 이송 유속이 크다. 실제 현장에서는 함수율을 제어할 수 없으므로, 이 논문에서는 실제 준설조건과 가장 유사한 함수율 1000%에 대한 분석결과를 중심으로 기재하였으며, 비교값으로서 현장에서 악조건으로 가정할 수 있는 함수율 600%에 대한 결과를 함께 비교하였다.

4.3.2 카올리나이트 혼합물

카올리나이트 혼합물에 대해 함수율 600%, 1000%에 대해 유속을 측정, 분석한 결과는 [Table 2]와 같다.

함수율 600%에서 전자기장 인가 후, 최대속도는 2 ~ 7% 정도 증가하며, 마찰층에서의 유속증가는 3 ~ 21% 정도 향상됨을 알 수 있다. 평균유속의 증가치로 추정된 전체 유량증가는 약 7.2%이다.

Table 2. Velocity data of Kaolinite 600% (unit: mm/s)

Pump out	Pump only		Pump+EMF		Increment	
	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}
30Hz	1302	631	1401	654	7.0%	8.2%
	1273	604	1364	660		
	1292	584	1371	654		
40Hz	1582	823	1632	883	2.3%	5.0%
	1565	834	1613	858		
	1605	833	1615	873		
50Hz	1845	1055	1904	1088	3.3%	3.0%
	1874	1081	1933	1115		
	1855	1072	1920	1100		

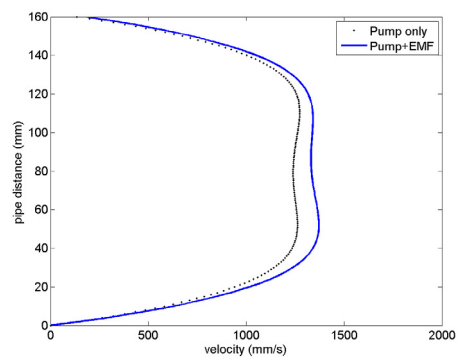


Fig. 10. Velocity increment by EMF effect in Kaolinite 600%

함수율 1000%에서 전자기장 인가에 따른 최대속도 증가는 2 ~ 6% 정도이며, 마찰층 유속증가는 15 ~ 21% 에 이른다. 평균유속의 증가치로 추정된 유량증가율은 약 4.8%이다.

Table 3. Velocity data of Kaolinite 1000% (unit: mm/s)

Pump out	Pump only		Pump+EMF		Increment	
	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}
30Hz	1175	437	1247	517	5.8%	14.9%
	1171	447	1253	538		
	1187	460	1238	489		
40Hz	1496	587	1556	721	4.1%	21.1%
	1495	593	1551	711		
	1494	598	1560	721		
50Hz	1776	668	1839	834	2.0%	19.4%
	1802	707	1833	829		
	1800	701	1816	816		

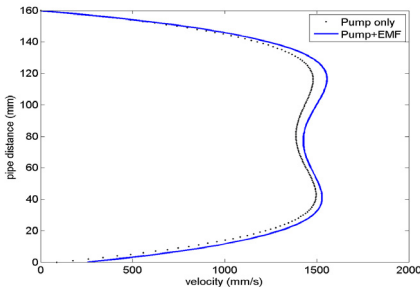


Fig. 11. Velocity increment by EMF effect in Kaolinite 1000%

4.3.3 모래 혼합물

[Table 4]는 모래혼합물에 대해 함수율 600%에 대한, [Table 5]는 함수율 1000%에 대한 측정 데이터이다. 모래혼합물의 경우 카올리나이트에 비해 재료의 점성이 낮아서, 파이프 하부 퇴적이 발생하므로, 마찰층 유속의 경우는 하부에서 측정된 값을 기준으로 비교하였다. 전자기장 효과에 따른 최고유속 증가는 1 ~ 15%, 하부 마찰층의 유속증가는 함수율 1000%의 경우 13 ~ 16%, 함수율 600%의 경우에는 100%를 상회한다. 함수율 600% 경우에는 펌프만으로 이송할 때에는 하부에 퇴적이 생기는데, 이때 전자기장을 도입하면 임계속도를 초과하게 되어 퇴적물질이 이동하면서 유속증가가 생긴다. 수치상으로도 매우 큰 유속증가를 나타내는데, 마찰층 속도의 증가로 인해 하부 퇴적물의 이동이 생기는 것은 이송상태에 있어서 중요한 의미를 갖는다고 볼 수 있다.

모래혼합물 600%의 경우, 유량증가율은 약 11%이다.

Table 4. Velocity data of Sand 600% (unit: mm/s)

Pump out	Pump only		Pump+EMF		Increment	
	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}
30Hz	2737	26	2913	24	10.0%	106%
	2183	50	2432	45		
	2632	34	3100	73		
40Hz	3403	36	2969	83	3.8%	138%
	2207	42	2867	62		
	3615	26	3737	103		
50Hz	2936	53	3817	141	14.8%	139%
	2463	44	2765	120		
	3638	63	3794	121		

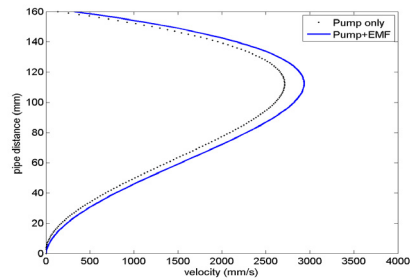


Fig. 12. Velocity increment by EMF effect in Sand 600%

모래혼합물 1000%의 경우, 유량증가율은 약 2.5%이다.

Table 5. Velocity data of Sand 1000% (unit: mm/s)

Pump out	Pump only		Pump+EMF		Increment	
	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}
30Hz	2653	43	2612	43	0.7%	14.3%
	2594	41	2620	48		
	2554	35	2620	45		
40Hz	2877	48	2877	59	0.9%	16.4%
	2906	51	2967	65		
	2936	53	2955	53		
50Hz	2788	50	3271	54	6.6%	13.1%
	3171	61	2938	78		
	3284	65	3648	67		

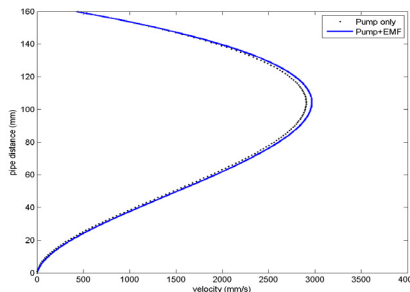


Fig. 13. Velocity increment by EMF effect in Sand 1000%

4.3.4 압력강하량

카올리나이트 혼합물의 함수율 300%에 대해서 관내 압력을 측정하여 압력강하량을 실측하였다. 관의 길이가 길지 않고, 순환구조로 되어있기 때문에 압력강하량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났으나, 전자기장 도입의 효과로 인하여 압력은 미소하게 작아지는 것을 확인할 수 있다. 비율로 계산할 때 펌프압 30Hz에서 약 7% 정도로 압력이 줄어든다.

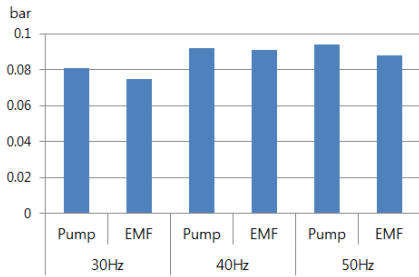


Fig. 14. Pressure drops in indoor transporting test

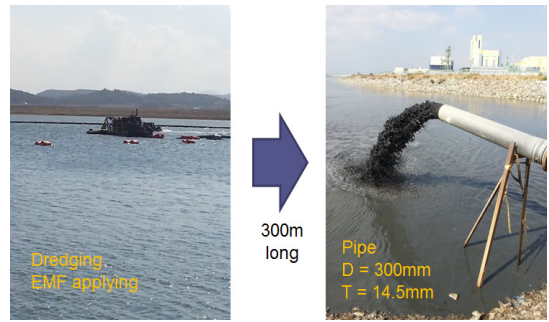


Fig. 16. Dredger and outlet in Sihwa site

5. 현장실험을 통한 이송기술 효과 검토

5.1 현장 실험 개요

5.1.1 준설 현장 위치 및 현황

시화 준설매립공사현장에서 실제 운영중 준설이송관을 대상으로 장거리 이송기술의 효과를 시험했다[Fig. 15]. 준설대상이 되는 토질은 실트계열 성분이 주를 이루며, 통일분류법(USCS)상 CH 또는 CL계열이다.

장비에서 1Hz의 주파수로 전류를 인가해주고, 코일에 의해 배관에 인가되는 전류가 10A가 되도록 배관에 60 회씩 감은 코일을 압송부 배관에 2m 설치하였다.



Fig. 15. Sihwa dredging and reclamation site in west seashore in Korea

5.1.2 준설선 및 모니터링 방법

준설선은 소형 오거준설선이며, 준설선으로부터 이송된 준설토는 약 300m의 이송관을 거쳐서 매립지에 배출된다[Fig.16].

준설선에 전자기장인가장치를 설치하였고, 펌프압송시 코일이 감긴 배관을 통해 자기에너지필드를 거친 후 배관 내에서 흐름을 형성한다. 토출부에 UVP와 밀도계, 유량계를 설치하여 계측을 수행하였다.

5.2 데이터 수집 및 분석방법

밀도유량계를 이용하여 유량을 계측하고, UVP를 이용하여 관내 유속분포를 측정하였다[Fig. 17].

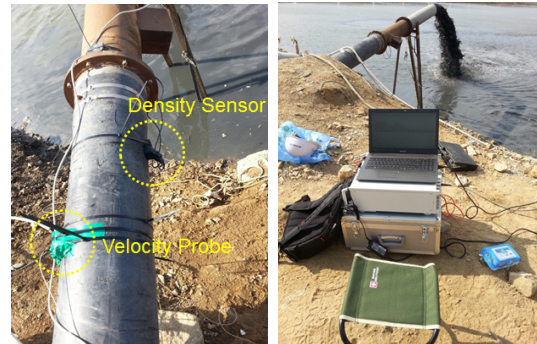


Fig. 17. Sensors and monitoring equipments

외부 변동요인을 최소화하기 위해 준설선에서 측정된 펌프압력과 이송압력이 각각 4500psi, 24psi인 상태가 유지될 때 데이터를 수집하였다.

5.3 분석결과

준설이송을 계속하는 중에 전자기장 도입 전후의 유속변화를 측정하였다. 전자기장 발생장치와 계측점 간의 거리가 약 300m이고, UVP는 여러 채널을 동시에 측정할 수 없는 한계가 있어서 측정시간 차이에 따른 오차가 있기는 하지만, 전체적인 경향은 전자기장 도입에 의해 최고유속 및 마찰층 유속이 증가하는 것을 확인할 수 있었다[Fig. 18].

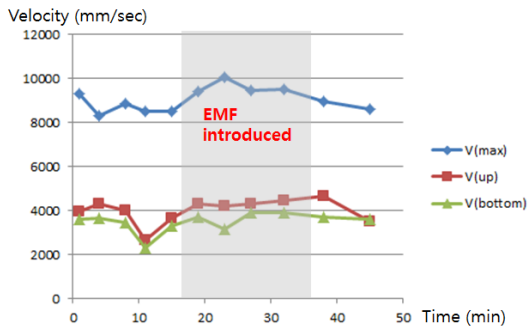


Fig. 18. Velocity changes in time

유속분포 데이터를 수치와 그래프로 살펴보면 [Table 6, Fig. 19]와 같다. 측정시간 동안의 평균속도로 추정할 때, 전자기장 도입 후 관내 최고속도는 약 10%, 마찰층 속도는 약 16%, 평균유속으로 추정한 유량은 약 11% 정도 증가하였다.

Table 6. Velocity data and analysis results from Sihwa site (unit: mm/s)

Index	Pump only		Pump+EMF		Increment		
	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}	V _{max}	V _{slip}	V _{mean}
1	9327	3963	9395	4323	9.7%	16.2%	11.2%
2	8312	4317	10064	4229			
3	8852	3986	9438	4318			
4	8513	2663	9490	4474			

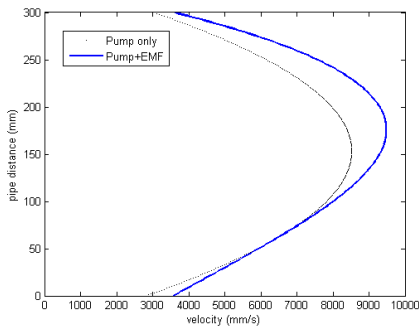


Fig. 19. Velocity increment by EMF effect in Sihwa

6. 결론

유속전자기장 발생장치를 기반으로 개발된 준설토 장거리 이송기술을 정량적으로 평가하기 위해 실내실험과 현장실험을 수행했다. 평가방법은 유속분포 계측데이터

를 이용하여 개발기술을 쓴 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어서 결과를 비교하였다.

실내실험에서, 카올리나이트 혼합물의 경우 600% 함수율에서는 약 7% 정도의 평균유속증가를, 함수율 1000%에 대해서는 약 5% 평균유속이 증가함을 확인했다. 모래혼합물에 있어서는, 함수율 600%에서는 평균유속증가율이 약 11%, 함수율 1000%에서는 평균유속증가율이 2.5%로 나타났다. 특히, 모래혼합물의 경우, 개발기술의 효과로 인해 바닥부에서 임계속도를 초과하게 되어 침전물의 유동성이 회복되었다.

현장실험에서 시간별로 유속변화 추이를 확인한 결과 전자기장 효과에 의해 유속증가가 일어남을 확인하였고, 이송유량이 약 10% 증가하였다.

준설토 장거리 이송기술은 펌프압력증가 없이 이송속도를 높이고, 공기를 단축시킬 수 있으므로, 10% 이상의 비용절감 효과가 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Myoung Sung Choi, Yu Seung Kim, Jae Hong Kim, Jeong-Su Kim, Seung Hee Kwon, "Effects of an externally imposed electromagnetic field on the formation of a lubrication layer in concrete pumping", Construction and Building Materials 61, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.071>
- [2] A.B.D. Brown, C.G. Smith, and A.R. Rennie, "Pumping of water with ac electric fields applied to asymmetric pairs of microelectrodes", Physical Review E, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.63.016305>
- [3] C. Gabrielli, R. Jaouhari, G. Maurin, M. Keddad, "Magnetic water treatment for scale prevention", Water Research vol.35, 2001
- [4] S. Kwon, S. Jeong, Y Kim, "Research of velocity estimation method in pipe pumping for slurry transportation", Korea Geo-Environmental Society, 15; 2014

김 은 성(Eunsung Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : KAIST 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2000년 : 삼성물산(주)
- 2001년 2월 ~ 2005년 : 코아텍(주)
- 2006년 2월 ~ 2013년 : 한국유지관리(주)

- 2014년 2월 ~ 현재 : (주)나다건설

<관심분야>

인공지능, 무선 계측

정 순 용(Soon Yong Jeong)

[정회원]



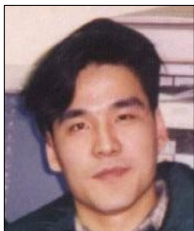
- 1995년 2월 : KAIST (공학사)
- 1997년 2월 : KAIST (공학석사)
- 2005년 2월 : KAIST 토목공학과 (공학박사)
- 2005년 2월 ~ 2012년 : 삼성중공업(주)
- 2013년 2월 ~ 현재 : (주)나다건설

<관심분야>

터널, 연약지반

김 유 승(Yu Seung Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 숭실대학교 기계공학과 (공학사)
- 2002년 2월 : 숭실대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 ~ 2005년 : 삼부시스템(주)
- 2007년 2월 ~ 2009년 : 한국유지관리(주)

- 2010년 2월 ~ 현재 : 코리아썬베지(주)

<관심분야>

슬러리아송, 구조물건전도평가
