



한국건설기술연구원 하천실험센터 소개



박 문 형 |
한국건설기술연구원 하천해안연구실
하천실험센터 수석연구원
moon@kict.re.kr



여 홍 구 |
한국건설기술연구원 하천해안연구실
하천실험센터장
yeo917@kict.re.kr



윤 광 석 |
한국건설기술연구원 하천해안연구실장
ksyoon@kict.re.kr

1. 머리말

환경에 대한 국민적 요구의 급증으로 국토부, 환경부, 행안부, 지자체 등에서는 친환경 하천사업으로 매년 1조원의 국가 예산을 투입하고 있으나 이를 아우를 수 있는 방법론 및 기술 부족으로 계획적인 하천(환경)사업이 진행되지 못하는 실정이다. 또한 현장 적용성 등을 확인하지 않고 친환경공법을 도입하여 홍수 시 피해 유발 및 환경을 오히려 악화시키는 결과를 초래하기도 하였다. 치수적으로 안전하고 생태적으로 건전한 하천을 조성하기 위해서는 홍수, 토사, 하천지형, 생태계의 상호 연관성을 규명하고 이를 바탕으로 하천형태 및 하천구조물 설계 기술이 개발되어야 한

다. 건강한 하천은 생물 다양성이 풍부한 공간으로 독일, 일본, 미국 등 환경 선진국에서는 하천복원을 21세기 핵심기술로 선정하여 국가적 지원 아래에 다양한 대규모 실험사업 및 기술개발이 이루어지고 있으며 이를 곧바로 하천현장에 적용하고 있다.

한국건설기술연구원(이하 건기연)에서는 이러한 국내외 요구와 추세를 반영하기 위해서 2004년에 “한국형 다기능 하천실험장 건설사업”을 기획하였다. 이후 설계기간을 거쳐 2008년 4월 17일에 기공식을 하였으며, 2009년 12월, 경상북도 안동시 남후면에 하천실험센터를 준공하였다.

하천실험센터는 면적 약 23.3만 m²로서 초당 8 m³의 유량공급이 가능한 펌프시설을 확보하고 있으며, 길이 약 500 ~ 600 m, 바닥과 수면 폭 각 3 m와 11 m, 높이 2 m의 수로 3개가 설치되어 있다(그림 1).

하천실험센터에서는 하천관리에 대한 방향 및 기초기술을 제시하는 기초연구분야와 하천복원 관련 방법론을 개발하는 응용분야 구분하여 연구를 수행하고자 한다. 다음의 그림 2는 센터의 연구수행 분야를 정리한 것이다.

2 해외 사례

하천실험센터를 기획하는 단계에서 국제적인 경쟁력을 갖는 센터를 조성하기 위하여 미국과 일본을 중심으로 해외사례를 조사하였다.

(1) 미국

미국은 주로 하천 내의 수생생물에 대한 연구를 목



그림 1. 하천실험센터 조감도

기초 연구분야	응용 연구분야
<ul style="list-style-type: none"> • 자연하천과 정비하천에 대한 실증 자료 구축 • 하도의 홍수조절을 고려한 하천형태 설계 기술개발 • 하천 서식처와 생물지표의 상관관계 연구 • 식생적응관리 연구 • 유량/수위 변동에 따른 생물서식처 설계기술 개발 • 수질을 고려한 하천설계 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 수재, 하도습지 등을 이용한 생태계 복원기술 개발 • 여도 기술개발 • 하천복원을 위한 하천형태 설계 기술 개발 • 호안 신소재, 신공법 개발 및 검증 • 자연공생 호안공법 개발 • 자연공생 보호공법 개발

그림 2. 하천실험센터의 주요 연구분야



그림 3. 미국 SNARL의 수로

적으로 10여개 이상의 대형인공하천 실험장을 운영하고 있다.

- Sierra Nevada Aquatic Research Lab. (SNARL)
미국 UC Santa Barbara가 관리하는 SNARL 동부 경사지 Mono County에 1973년 건립된 22 ha 규모의 대형 실의 실험수로를 갖춘 연구시설로 첨단 연구장비를 갖추고 동부 Sierra Nevada

와 Owens 협곡 지역 연구의 중심적인 역할을 담당하고 있다. SNARL에 있는 실험수로단지는 하천에서의 수리·수문학, 생태학을 연구하기 위한 9개의 인공사행수로를 가지고 있으며 SNARL을 가로지르며 연중 유량을 확보할 수 있는 Convict Creek에서 실험시설을 운영할 수 있는 용수 및 하천 환경을 확보하고 있으며, 연장 400 m 규모의 수로 9개를 포함하고 있다(그림 3). SNARL에서는 수변 입산지, 수변 목초지 등이 포함된 원시

생태보호시설(Reserve's Pristine Habitats)에서 비수생(Non-Aquatic) 연구도 수행하고 있다.

- Savannah River Ecology Lab.
Carolina 남부에 위치한, PVC를 이용한 실외 실험시설로 U.S. Environmental Protection Agency가 관리하며, 연장 98.2 m, 폭 0.6 m의 수로에 2개의 소를 포함하고 있다. 지하수를 이용하여 용수를 공급하며, 모래하상으로 구성되어 있다.
- Tennessee Valley Authority
Alabama 주에 위치한, 콘크리트를 이용한 실외 실험시설로 U.S. Environmental Protection Agency가 관리하고 있다. 연장 112 m, 폭 4.3 m의 수로로 0.3 m 깊이의 여울 6개와 1.2 m 깊이의 소 6개를 포함하며, 저수지에서 용수를 공급하고 있다. 여울은 5~15 cm 직경의 석회암, 소는 저수지 유사로 하상을 구성하였다.
- Monticello Ecological Research Station
Minnesota 주의 Monticello에 위치한 실외 인공수로를 이용한 대형실험시설로 520 m에 길이 30.5 m, 폭 2.4 m, 깊이 0.1~0.2 m의 여울 6개와 길이 30.5 m, 폭 3.6 m, 깊이 0.8~0.9 m의 소를 9개를 포함하며, Mississippi 강에서 용수를 공급하고 있다. 여울은 2~5 cm 직경의 자갈, 소는 진흙으로 하상을 구성하였다.

(2) 일본

일본의 경우 현재 환경적 요인 분석에 치중하는 자연공생센터, 치수에 중점을 둔 이와타케가와 실험장이 운영중이며 100 m³/s 유량을 흘릴 수 있는 초대형 하천실험장을 후쿠오카에 계획 중이다.

- 일본 토목연구소 자연공생센터(Aquatic Restoration Research Center)

자연과 공생하는 하천기술 개발을 목표로 1999년에 나고야 기초천 하천부지에 개소하였으며, 일본 국토교통성 산하 토목연구소에서 운영하고 있다. 그림 4와 같은 800m 길이의 3개 실험하천에서 홍수, 하도, 생태의 상호관계 실험 수행할 수 있다. 하천환경 관련 기초 기술 및 기업/대학과 연계된 다양한 응용기술 개발을 수행 중이며, 일본 하천환경기술을 선도하면서 하천환경기술의 메카로 자리잡고 있다.



그림 4. 일본 자연공생센터 전경

- 일본 이와타케가와 실험하천
하천에서 홍수를 재현하여 돌쌓기호안의 내력실험 등을 실시하는 시설로서, 자연소재를 이용한 하천만들기의 가능성과 자연과의 조화를 실증하기 위한 실험을 수행하고 있다. 실험하천의 운영은 부젠시, 서일본공업대학, (재)후쿠오카현 건설기술 정보센터로 구성된 이와타케 하천연구소에서 하고 있으며 2003년 9월에 완공되어 현재 치수와 관련된 실험이 진행 중이다.

(3) 독일

하천환경기술의 발원지인 독일에서는 별도의 실규모 하천실험연구실을 운영하는 대신에 1980년부터 전국적인 대형 프로젝트인 E+E(Erprobungs und

Entwicklungsvorhaben)를 통해서 실제 하천을 이용한 다양한 실험프로젝트를 수행하고 이를 통해서 하천보전복원, 하천설계, 하천유지관리 기술을 개발, 보급하고 있다. E+E 프로젝트에서는 실제 하천에 다양한 모니터링 시설을 설치하고 자연상태의 하천을 모니터링하거나 다양한 하천기술을 적용하여 그 변화를 10년 이상 관찰하여 실제로 적용될 수 있는 실질적인 하천관련기술을 개발하고 있다.

3. 시설 및 장비 현황

3.1 실험수로

하천실험센터에는 그림 1에 도시한 것과 같이 3개의 실규모 실험수로가 있는데, 각 수로의 형상, 연장 및 경사 등을 다르게 설계하여 고유한 실험을 수행할 수 있도록 구성되어 있다. 3개의 수로는 급경사수로, 직선수로, 사행수로로 구성되어 있으며, 각 수로의 세부적인 사양은 다음과 같다.

(1) 급경사수로

급경사수로는 총연장 594.0 m, 상류단과 하류단의 표고차는 4.50 m로, 단단면 하도로 구성되어 있다. 실험 구간은 흐름안정구간, 호안공 시험구간, 조도계수 시험구간 등으로 구성되어 있다. 유입수로로부터 실험수로에 유입되는 최상류측에 흐름을 안정시키기 위해 유입부 40 m와 흐름안정구간 30 m를 설

치하였으며, 하류 방향으로 호안공 시험구간이 204 m, 호안공 시험구간과 조도계수 시험구간 사이에 흐름안정구간 50 m가 있으며, 조도계수 시험구간은 150 m이다.

유입부 및 흐름안정구간은 유입수로에서 실험수로로 처음 용수가 유입되는 지점이나 각각의 실험항목이 서로 다른 구간 사이에 존재하여 와류 등 제어하기 힘든 흐름요소가 등류상태로 변화할 수 있도록 설계하였다. 호안공 시험구간은 하안 및 바닥면에 시험하고자 하는 호안공을 설치한 후, 3 m/s 이상의 유속이 확보되는 유량을 적용하여 호안공의 파괴실험을 하기 위해 설계하였다. 호안공 시험구간에는 유수가 하안에 부딪히는 충격을 최대화하기 위해 수충부를 조성하였으며, 각 수충부는 반지름 15 m 사분원 두 개를 연결한 형태로 중심선의 연장이 약 47.18 m로 호안공 시험구간 내에는 네 개 지점에서 수충부가 발생하도록 구성하였다. 이 구간의 하상경사는 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 라는 한정된 유량 내에서 3 m/s 이상의 유속과 충분한 수심의 확보를 고려하여 1/70로 결정되었으며, 하상재료는 입경 30 cm 정도의 사석으로 구성하였다(그림 5).

조도계수 시험구간은 하안 및 하상에 식생(초본 및 목본) 및 콘크리트 블록 등 다양한 재료를 설치한 후 다양한 흐름 조건에서 조도계수 및 흐름저항을 시험하기 위한 구간이다. 총 연장은 150 m이며 횡단면은 호안공 시험구간과 동일하며, 이 구간의 하상경사는 1/1,000이다. 하상재료는 입경 15 cm ~ 30 cm 사이의 사석으로 구성되어 있다(그림 6).



그림 5. 고속수로의 호안공 시험구간



그림 6. 고속수로의 조도계수 시험구간

(2) 직선수로

직선수로는 총연장 560.0 m, 상류단과 하류단의 표고차는 2.00 m이며, 유입부 및 유출부를 제외한 실험수로의 연장은 490.0 m이며, 상류단과 하류단의 표고차는 0.61 m이다. 평면형은 전체가 직선형 하도로 구성되어 있으며 실험구간은 수제/호안공 구간 및 하도 습지 구간으로 구성되어 있다.

직선수로의 하상은 0.25~0.5 mm 사이의 중간 모래(medium sand)로 구성된 이동상 하상으로서 하도습지구간 100 m는 그림 7과 같이 복단면 하도로 구성되어 있으며, 나머지 구간은 그림 8과 같이 단단면 하도로 구성되어 있다. 수로는 이동상 실험 및 공법의 테스트 베드로 주로 사용하도록 계획되었다.

유입수조로부터 유입되는 물의 흐름을 안정시키기 위해 수로의 가장 상류측에 유입부 40 m, 흐름안정구간 20 m 두었고, 이후 하류방향으로 수제구간 150 m, 흐름안정구간 20 m, 호안공구간 180 m, 흐름안정구간 20 m, 습지구간 100 m, 유출부 36.8 m를 설계하였다. 수제구간은 각종 형태의 수제 및 횡단구조물을 실험조건에 따라 설치하여 식생의 영향, 침식 및 퇴적 등의 흐름특성을 살피는 것이 목적으로 하상경사는 1/800이며, 하상폭이 구간 전체에서 3 m, 제방고가 2 m, 제방폭이 11 m, 하안경사가 1:2인 단단면하도이다. 하안 및 호안은 자연 상태의 토사로 처리하여 식생의 도입 및 정착, 침식과 퇴적 등이 활발히 진행될 수 있게 하였다.

호안공구간은 여러 형태의 호안공을 하안에 설치

하여 식생의 영향을 연구하는 것이 목적으로 이 구간은 수제구간과 동일한 형태로 구성하였다. 습지구간은 수로 내 고수부지에 하도습지를 조성하여 습지의 특성에 따른 식생의 변화를 연구하는 것이 목적으로 습지는 하천의 좌안 고수부에 상류부터 습지1, 습지2, 습지3, 습지4, 총 4개가 설계되었고, 하상경사는 1/800이다. 각 습지의 고수부에서 표면적은 장경 8 m, 단경 5 m인 타원으로 동일하지만 수심 및 위치하는 고수부의 표고, 하천수 유입의 형태가 각각 달라 비교실험이 가능하다.

(3) 사행수로

사행수로는 총연장 682.2 m, 상류단과 하류단의 표고차는 2.18 m이며, 직선수로와 유사하게 단단면 구간과 복단면 구간으로 구성되어 있다. 실험 수로 연장은 624.9 m이고 상류단과 하류단의 표고차는 0.70 m이며, 사행구간 및 침수빈도구간으로 구성되어 있다.

유입수조로부터 유입되는 물의 흐름을 안정시키기 위해 수로의 최상류측에 유입부 40 m 및 흐름안정구간 20 m를 두었고, 하류방향으로 사행구간 473.9 m, 흐름안정구간 31.2 m, 침수빈도 실험구간 100 m, 유출부 16.8 m로 설계하였다. 사행구간은 총연장 360 m의 곡선수로로 사행에 따른 생태계의 변화, 홍수의 저류효과 등을 연구하기 위한 목적으로 설계하였으며, 수로의 사행도는 0, 1.2, 1.5, 1.7로, 상류측부터 사행도 1.2 구간 115.0 m, 1.5 구간 139.3 m,



그림 7. 직선수로의 복단면 구간



그림 8. 직선수로의 단단면 구간



1.7 구간 155.3 m를 두었고, 각 사행구간 사이에는 30 m 정도의 천이구간을 두었다.

사행도 구간의 하상경사는 국내의 중류하천에서 많이 나타나는 1/800으로 설계하였고, 횡단면은 직선수로의 단단면 구간과 동일하게 설계하였다. 하안은 자연 상태의 토사로 처리하여 식생의 도입 및 정착, 침식과 퇴적 등이 활발히 진행될 수 있게 하였으며, 하상재료는 중간 모래로 구성하였다. 하천이 사행되는 형태는 자연하천의 형상을 비교적 대표적으로 나타낸다는 코사인 생성 곡선(Cosine-Generated Curve)의 형태로 설계하였다(그림 9).

침수빈도 실험구간은 다양한 침수빈도에 따라 식생의 교란 및 활착 상태의 변화를 연구하는 것이 목적으로 복단면 하도이며 좌우안 3개씩, 총 6개의 서로 다른 침수빈도를 나타내는 고수부 표고로 설계하였다. 고수부의 폭은 구간 전체에서 1 m이며, 하안의

경사는 모두 1:2이며, 하상경사는 1/800으로 동일하다. 하상폭은 구간 전체에서 1 m이며 제방폭은 11 m이다(그림 10).

3.2 시설 및 기자재

양정유량 1 m³/s과 3 m³/s의 펌프 각 2대를 보유하여 총 8 m³/s의 유량을 공급할 수 있다(그림 11). 유속측정장치는 초당 50개의 순간속도 측정이 가능한 Micro-ADV(Sontek사)를 6대 보유하고 있으며, 수위측정장치는 초음파수위계와 Ladar수위계, 그리고 압력식 수위계를 확보하고 있다. 하상변화를 측정하기 위하여 3D 스캐너를 운영하고 있는데, 그림 12는 고속수로를 스캔한 결과이다. 이와 함께 하천 구조물과 식생 등에 작용하는 힘을 측정하기 위한 항력 측정장치(6분력 1대, 1분력 1대)도 보유하고 있다.



그림 9. 생태수로의 사행수로 구간



그림 10. 생태수로의 침수빈도 실험구간



그림 11. 펌프장 전경



그림 12. 3D스캐너에 의한 측정결과

4. 연구 현황

2009년 12월 개소한 이후 현재까지 실험환경 조성 및 인프라 구축에 중점을 두고 운영하여 왔기 때문에 본격적인 실험은 실시하지 못하였으며 센터 계획 수립때 부터 고려하였던 연구원 자체 실험 위주로 운영하고 있으며, 하천환경과 관련한 대규모 국가 R&D인 국토해양부의 자연과 함께하는 하천복원 기술개발(가칭 이코리버 21)연구단 및 환경부의 수생태복원사업단의 실험을 일부 수행하고 있다. 다음 표 1은 현재까지 수행한 실험을 정리한 것으로서 이들 중 대표적인 실험을 소개하면 다음과 같다.

표 1. 수행 실험 목록

실험 명/기간/사업명		
수목 흐름 저항 실험	10~11	국가 R&D(이코리버21)
유량 및 유사량 측정 기술 개발	10~11	국가 R&D(이코리버21)
물리서식처 평가 기술개발	10~11	국가 R&D(이코리버21)
하천 식생 천이 예측 기법 개발	10~11	국가 R&D(이코리버21)
하상복원공법 - 낮은 바닥막이 공법	'10~'11	국가 R&D(수생태복원)
하상복원공법 - 웅덩이형 수제 공법	'10~'11	국가 R&D(수생태복원)
고수부지복원 - 물골 및 수제 공법	'10~'11	국가 R&D(수생태복원)
자연형 낙차공	'10	기관고유-자연공생
자연하천 하상변동	'10	기관고유-자연공생
호안 시험 기준 개발	'10	기관고유-자연공생
호안공법개발	'10	기관고유-자연공생
물고기 피난처 - 둠벙 공법 개발	'10	기관고유-자연공생



(a) 세굴 안정

4.1 하천 호안재로 수리특성 시험기법 개발

호안의 설계를 위해서는 블록 및 재료의 수리 특성, 즉, 조도계수, 한계 소류력, 항력계수 및 양력계수 등이 필요하며 수리특성은 실험을 통해 결정되어야 하지만, 국내에서 사용되는 제품들은 실험에 의해 제시된 경우가 거의 없는 실정이다. 이 실험은 수리특성을 결정하는 표준 방법을 개발하기 위하여 수행되고 있다.

이 실험은 고속수로 호안공 시험구간에서 수행되었다. 유공 호안 블록 시험을 위해서 2010년 11월에 시험시공을 완료하였으며 실험은 식생의 활착이 진행된 이후인 2011년 6월에 수행하였다. 실험유량은 1.3, 2.5, 3.8 m³/sec 등의 세가지 조건에서 수행하였으며 유하 시간은 각 케이스 별로 2시간으로 설정하였으며, 실험 수행 후의 블록의 변화 유무를 검토하였다. 실험결과 평가에 의한 실험수로의 수리실험 능력은 표 2과 같다.

실험유량 2.5 m³/sec까지는 블록 내의 특이한 변

표 2. 유량 규모별 수리특성

유량규모 (m ³ /sec)	호안실험구간		
	수심(m)	유속(m/sec)	소류력(N/m ²)
1.3	0.3	1.1~1.3	30~40
2.5	0.4	1.5~1.6	40~50
3.8	0.4~0.5	1.7~1.8	50~70
5.0	0.6~0.7	1.9~2.0	60~80
6.3	0.8~0.9	2.1~2.2	70~80
7.6	0.8~0.9	2.3~2.4	70~90
8.8	0.8~0.9	2.4~2.6	80~100
10.1	0.9~1.0	2.5~2.7	90~100



(b) 유공부 세굴 발생

그림 13. 유공부 세굴 양상

화는 관찰되지 않았으나 실험유량 3.8 m³/sec 유하 후에는 블록 시공 구간 20 m의 1/3 구간은 그림 13(a)와 같이 세굴 및 기타 변화가 관찰되지 않았으나 나머지 2/3 구간에서는 그림 13(b)와 같이 유공부에서 세굴이 발생하였다. 세굴은 유공부 표면에서만 발생한 것이 아니고 블록 하부까지 진행된 상태였다. 이 때의 평균 수리량은 유속은 1.7~1.8 m/sec, 소류력은 50~70 N/m² 이다.

4.2 식생 천이 한계조건 실험

하천 식생 천이 예측 기법은 국내의 하천 흐름 환경에 반응하는 식생의 천이과정을 모의 하는 기법으로 국내에서 댐 건설이후 급속하게 증가된 식생의 분포 면적 증가의 원인을 파악하는데 유용한 도구이다. 현재 식생의 정착과정에 대한 여러 국외 연구사례가 있었으나 국내에서는 아직 전무한 상태로서, 특히 식생의 이입이후 식생이 퇴행되지 않고 지속되었다는 점에서 유식물의 정착 여부가 매우 중요하다. 발아 이후 첫째 유식물이 건조조건 및 전단응력을 견디기 위해 뿌리의 성장 속도가 중요한 정착 요인으로서 이 실험은 지하수위 저하에 따른 식생 생장의 임계조건을 구명하기 위하여 수행되었다.

이 실험을 위하여 그림 14과 같은 수위 저하 속도를 조절할 수 있는 장치를 고안하였다. 실험장치치의 모래는 내성천의 모래를 사용하였으며, 수위 하강속도 역시 내성천의 연평균 속도를 참조하여 0, 1, 3, 6cm/일로 설정하였다. 대상 식생은 모래하천에서 주로 출현하는 명아자여뀌(1년생 초본), 달뿌리풀(다년

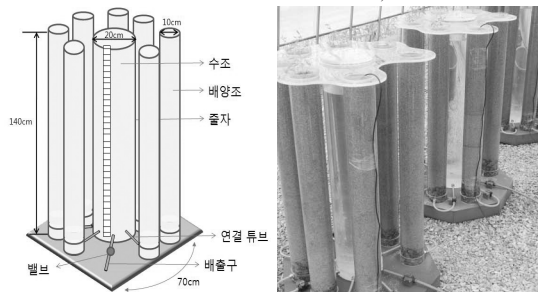


그림 14. 수위 하강 실험장치

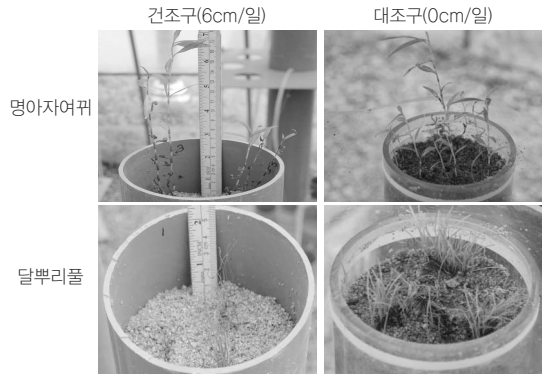


그림 15. 식생종별 성장 양상

생 초본), 왕버들의 1년생 유식물을 사용하였다. 실험 결과는 그림 15와 같이 명아자여뀌의 뿌리 성장속도가 빨라 그림 6cm/일의 수위저하에도 생장을 유지하였으며, 달뿌리풀은 동일한 조건에서 생장에 어려움이 있는 것으로 나타났다.

5. 맺음말

실규모 하천실험장의 운영을 통해서 1) 실제 하천에서의 구조물 파괴 및 환경/생태특성을 분석하고 2) 이를 통해서 실제 하천특성을 반영하는 자연공생 하천기술을 개발하고 국내 하천설계기술을 선진화시키며 3) 공신력 있는 시험, 검증을 통해서 하천 구조물에 대한 치수 및 환경 기능을 보장하고 지속적으로 보강하고자 한국건설기술연구원에서 하천실험센터를 설립하였다. 이러한 실규모 하천실험장은 하천의 물리량에 대한 축척을 사용하지 않는 실물 규모의 실험으로 먼저 수리모형실험의 단점인 모형의 축척 효과를 상당 부분 해소할 수 있으며, 구조물의 파괴 모의가 가능하며 생태과정에 대한 실험도 가능하다. 또한 외부 변수에 대한 정확한 통제가 가능하고, 관측 및 조사의 정밀도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 현재 초기 정착단계로서 활발한 실험이 진행되기 위해서는 학계 전문가의 많은 관심과 적극적인 협력이 필요한 시기이다. 전문가들의 조언과 발전적인 비판을 기대한다.