

초고성능컴퓨팅 R&D 혁신지원 프로그램 연구과제 신청서

I. 연구 계획서

1. 연구 제목

라이만 알파 방출 천체와 원시 은하단의 생성 수치모의실험과 협역 필터 관측에의 응용

(Simulation of formation of Lyman-alpha emitters and proto-clusters and applications to narrow band imaging surveys)

2. 연구 목적 및 필요성

▶ 라이만 알파 방출 천체 모델링을 통한 은하형성 이론의 연구

본 연구진은 라이만 알파 방출 천체(Lyman-alpha emitter, Ly-a emitter, LAE)를 수치모형화하여 라이만 알파 방출 천체의 물리적 특성뿐만 아니라, 암흑물질 분포와 라이만 알파 방출 천체 사이의 연관성과 그 진화과정을 예측하고, 이를 최신 관측 자료와 비교함으로써 은하 형성에 관련된 물리법칙들을 규명하고자 한다. 라이만 알파 방출 천체는 라이만 알파선을 방출하는 은하들로 짧고 별 생성이 활발하게 일어나는 특성을 가진다고 알려져 있다. 방출선은 은하들의 연속 복사보다 관측이 용이하고, 고 적색이동 된 라이만 알파 방출선은 가시광 영역이므로 고 적색이동 시기의 우주거대구조 연구에 매우 중요한 수단이 된다. 또한, 이를 짧은 별에서 발생한 라이만 알파선은 은하 외부로 빠져나오기까지 성간물질 속에서 반복적으로 산란이 일어나고, 은하 외부로 탈출한 후에도 은하 간 물질에 분포하는 중성 수소에 의해 흡수 · 재방출된다. 이를 통해 은하 내외부의 물질 분포와 특성을 이해할 수 있는 중요한 단서를 제공하고, 은하 형성 이론을 설명하는 중요한 역할을 한다. 그러나 지금까지의 라이만 알파 방출 천체 관측은 제한된 관측 영역에서만 가능하기에 우주거대구조의 연관성을 파악하기에는 크나큰 통계적 한계점을 지니고 있었다. 최근 시작된 One-hundred-square-degree DECam (Dark Energy Camera) Imaging in Narrow band (이하 ODIN) 관측은 두 개의 20 평방도 크기의 관측영역을 포함해 여러 영역으로 나뉘어 있는데, 총 91 평방도의 독보적인 관측 영역을 가지고 있다. 이는 이전까지 일본 스바루 망원경에서 수행된 Hyper Supreme-Cam 관측의 21 평방도 관측영역의 4배 이상에 해당하는 크기이다. ODIN 관측은 고 적색이동 2.4, 3.1, 4.5에서 수행되어 (각각 전체 우주나이의 초기 20, 15, 10%에 해당함) 라이만 알파 방출 천체의 진화를 추적할 수 있다. 특히, ODIN의 한 관측 영역은 한 면이 10도에 이르러 그 크기가 적색이동 4.5에서 1.2Gpc에 해당할 정도로 큰 영역이다. 이러한 관측 자료들을 분석하고 해석하기 위해서는 관측 영역에 필적하는 큰 규모의 수치모의 실험이 필수적이다. 본 연구진이 과거 수행했던 Horizon Run 5(이하 HR5) 수치모의실험에서 라이만 알파 방출 천체의 존재를 일부 확인하였다 (그림1). 그러나 HR5는 고분해로 계산된 영역의 크기가 1049Mpc x 127Mpc x 119Mpc 이기에 변의 길이가 수백 Mpc에서 1Gpc에 이르는 ODIN 탐사의 관측 영역들을 모형화하기에는 시뮬레이션 크기가 충분치 않아 현재의 ODIN 관측 영역내의 천체를 설명하는 데에 한계가 있다. 현재 진행 중인 ODIN 관측과 직접 비교 가능함은 물론, 향후 진행될 보다 향상된 관측에 이론적 예측을 제공할 수 있는 초거대, 고 분해능 우주론 수치모의실험이 그 어느 때보다 필요하다.

▶ 고 적색이동 시기의 우주 팽창 역사 재구성

라이만 알파 방출 천체의 공간 분포를 알아내고자 하는 여러 관측의 목표는 우주 거대구조의 위상 변화를 살펴봄으로써 현재 우주 모형을 구성하는 물리 변수를 보다 정확히 예측하여 우주 팽창 역사를 이해하고자 하는 것이다. 라이만 알파 방출 천체는 끊임없이 여러 환경적인 변화를 겪으면서 진화해 왔겠지만, 적색이동에 따라서 고밀도와 저밀도를 구분 짓는 거대구조의 근원적인 모습은 큰 변화가 없을 것이다. 만약 이러한 거대구조가 소규모 환경적 요인의 영향을 받아 변화한다면 현재 기본이 되는 우주 팽창 이론의 수정이 불가피하다. 지금까지 우주 팽창 역사의 연구는 관측 한계로 인해 대부분 2보다 작은 저 적색이동 영역에서만 이루어져 왔고, 고 적색이동 영역의 관측 결과는 전무하였다. 이는 곧 ODIN 관측과 같이 고 적색이동 영역으로 우주 팽창 역사의 범위를 확장시키는 것이 현대 우주론에서 무엇보다 중요하며, 이를 뒷받침하는 이론적 토대를 제공할 수 있는 거대 규모의 우주론 수치모의 실험은 필수적이다.

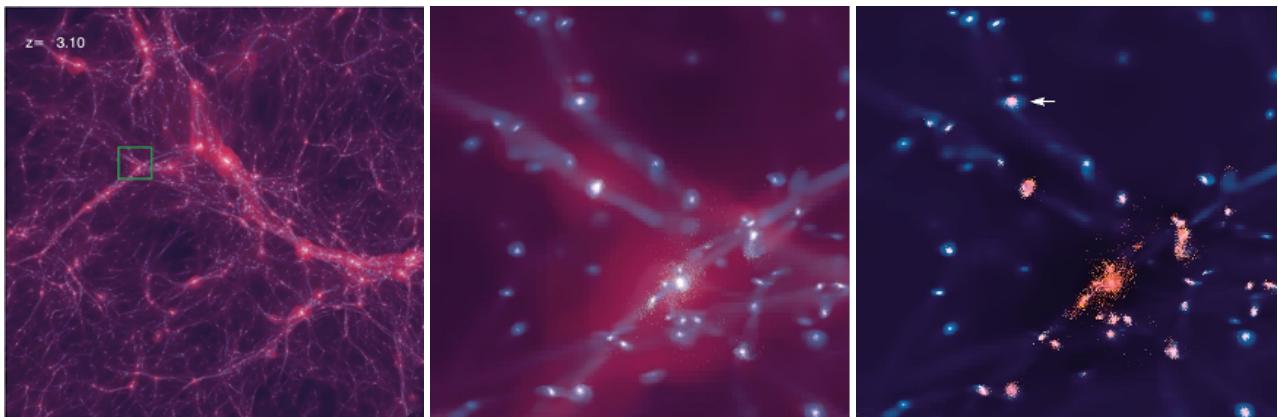


그림 1 : (좌) 적색이동 3.1에서의 HR5 수치모의실험 중 36Mpc^3 에 해당하는 일부 영역으로 푸른색은 기체의 밀도, 붉은색은 온도, 하얀색은 별을 의미한다. (중) 좌측의 녹색 사각형 영역을 확대한 모습이다. (우) 중간 그림과 같은 영역으로, 푸른색으로 표현된 기체밀도 위에 별의 나이가 0에서 20억년으로 변화하는 모습을 붉은색에서 하얀색으로 표시하였다. 화살표로 표시된 은하는 고밀도의 차가운 기체를 가지고 있으면서 갓 생겨난 별들이 강한 라이만 알파선을 내보내고 있다. 이 은하는 라이만 알파 방출 천체로 예상된다.

▶ 원시 은하단의 형성과 진화 연구

원시 은하단은 현재 우주에서 발견되는 은하단의 초기 형태로, 고 적색이동 우주에서 가장 고밀도 지역이었을 것이다. 우주 망원경과 지상 대형 망원경을 이용한 심우주 탐사 관측이 수행되면서 원시 은하단 탐색 보고가 이어지고 있지만 좁은 영역을 장시간 노출하는 해당 관측에서는 우주 밀도분포에서 표준편차 4 이상의 원시 은하단은 발견하기 매우 어렵다. 따라서 원시 은하단의 분포와 높은 상관관계가 있다 생각되는 라디오 은하와 퀘이사와 같은 매우 밝은 활동성 은하핵을 찾거나, 여러 과장대의 측광 필터 이미지에서 고 적색이동 라이만 붕괴 혹은 발머 붕괴 은하를 골라내는 세점제거법을 이용하거나, 측광 - 적색이동 추정을 이용해 적색이동 3-4 영역에 존재하는 다수의 은하를 찾아 이들의 분포로부터 원시 은하단을 찾고자 하는 노력들이 있어왔다. 그러나 활동성 은하핵의 분포가 고 적색이동에서 원시 은하단과 같은 고밀도 지역의 분포와 반드시 일치한다는 보장이 없으며, 과장대 측광 필터 이미지를 이용하면 한 번에 많은 고 적색이동 은하 후보들을 찾을 수 있으나, 이 천체들의 적색이동 오차가 굉장히 크다는 (0.5Gpc 에 이르는 오차) 한계점이 있다. 이에 협역 측광 필터를 이용한 라이만 알파 방출 천체 탐색이 하나의 대안으로 제시되었다. 라이만 알파 방출 천체를 이용한 은하 탐색은 활동성 은하핵과 마찬가지로 이 은하들의 분포가 반드시 원시 은하단의 분포를 대표한다는 보장이 없지만, 넓은 영역에서 과장대 측광 필터 이미지 탐색보다 더 정확하고, 상대적으로 적은 관측 자원을 필요로 한다. 현재 관측의

한계점을 보완하기 위해서는 활동성 은하핵이나 라이만 알파 방출 천체의 공간 분포와 은하단과의 상관 관계를 파악하는 것이 필요하며, 이를 위한 가장 효과적인 방법은 거대 규모의 우주론적 수치모의 실험이다. 특히, 이러한 수치모의 실험은 원시 은하단이 성장하면서 은하에 주는 환경효과가 어떻게 달라지는지를 이해하고, 이러한 변화가 거대구조에 어떠한 영향을 미치는지 파악함으로써 현재 우주론 모형을 보다 정확하게 다듬는 중요한 단서를 제공해 줄 것이다.

3. 연구 목표 및 내용

▶ 수치모의실험을 통한 라이만 알파 방출 천체의 군집특성 연구

본 연구팀의 목표는 수치모의실험을 기반으로 라이만 알파 방출 천체를 모델링하여 이들의 군집 특성을 예측하고, 최신 관측 자료와 비교 분석하여 라이만 알파 방출 천체의 형성과 진화 및 암흑물질 분포와의 관계를 이해하는 데 있다. 계층적인 은하 형성 모형에서는 암흑물질의 밀도가 높은 곳에서 암흑 헤일로가 형성되고 이를 헤일로 안에서 은하들이 형성된다. 따라서, 관측된 은하들의 군집 특성은 암흑물질의 분포 특성과 은하들의 특성 사이의 관계를 연구할 수 있는 좋은 수단이 된다. 특히, 라이만 알파 방출 천체는 암흑물질의 분포를 정확히 따르지 않고 편향되어 분포되어 있는 것으로 알려져 있다. 이들의 이러한 특성은 우주 거대구조와 은하형성 기작을 밝히는 데 매우 중요한 단서이다. 라이만 알파 방출 천체는 별 생성이 활발한 젊은 은하들로 아직 그 형성 원리가 명확히 규명되지 않았고 라이만 알파 방출선은 은하 간 공간을 지나며 중성 수소에 의해 쉽게 흡수된다. 이러한 이들의 복잡한 물리법칙을 구현하기 위해서는 수치모의실험이 필수적이다. 본 연구팀은 라이만 알파 방출 천체의 다양한 특성, 즉 별의 질량, 광도, 암흑물질의 질량 등에 따른 군집특성을 예측하고 관측된 라이만 알파 방출 천체의 군집 특성과 비교 분석하여 라이만 알파 방출 천체의 물리적인 특성과 진화과정을 연구할 예정이다. ODIN 관측은 총 8개의 관측 영역에서 총 91평방도 넓이의 관측이 수행될 예정으로 최대 약 130Mpc (100Mpc/h) 이상의 규모에서 군집특성을 측정할 예정이다 (그림 2). 이는 이전까지 관측 연구에서 측정한 최대 약 50Mpc의 규모를 훨씬 상회하는 것으로, 우주 거대구조의 특성을 이해하는 중요한 단서를 제공해줄 것으로 기대한다. 특히, 총 8개의 독립된 영역에서 관측이 이루어져 향상된 우주 분산을 가지게 되어, 현재까지의 관측 한계를 넘어설 수 있는 좋은 기회가 될 것이다.

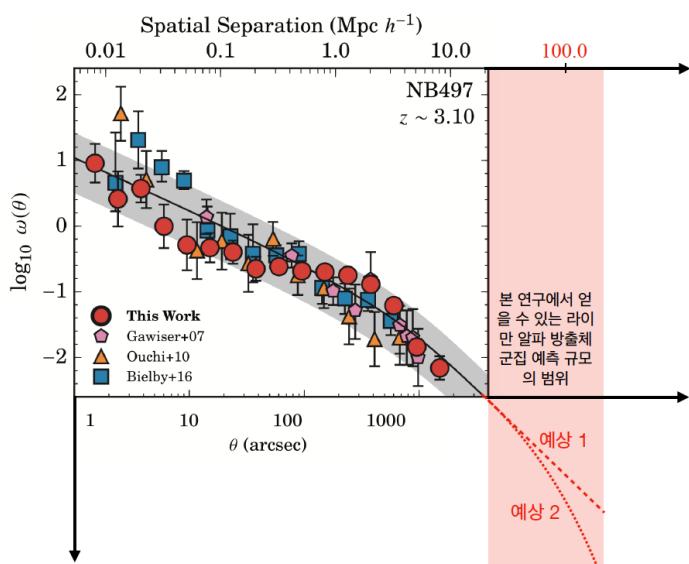


그림 2 : Khostovan 등이 2019년 연구에서 측정한 적색이동 3.1에서의 라이만 알파 방출체의 군집 특성과 본 연구에서 얻게 될 군집 특성의 예상도로 이전 관측에서는 총 3.2 평방도에서 1000 각초 규모(약 14Mpc 혹은 10Mpc/h 규모)까지 측정되었다. 예측 1은 면법칙을, 예측 2는 고 적색이동에서의 개수밀도 감소를 감안 할 경우의 예상으로, ODIN 관측과 본 수치모의 실험 연구는 최대 약 130Mpc 규모에서의 라이만 알파 방출 천체의 군집을 확인할 수 있어 그 동안 알기 어려웠던 고 적색이동에서 거대 군집의 분포를 확인할 수 있고, 나아가 우주 팽창 역사에 대한 이론적 토대를 마련할 수 있다.

▶ 우주 초기 고밀도 영역에 대한 이해 및 심우주 전천탐사를 위한 이론적 기틀 마련

자연의 물리 법칙은 일견 단순해 보이지만, 이들이 물질에 작용하여 우주의 형태를 빚어내는 현상은 지극히 복잡하다. 우주의 거대구조 형성과 은하의 진화에는 중력과 유체역학을 기반으로, 물질의 군집, 냉각과 가열에 의한 물질의 상태변화, 별의 진화와 죽음의 순환 과정에서 일어나는 에너지 방출과 성간물질의 화학적 진화, 거대 블랙홀의 성장과 이 과정에서 막대한 에너지 방출에 의한 성간물질 가열과 방출 등 다양한 물리 현상이 서로 얹혀있다. 그리하여 많은 연구자들은 우주 거대구조와 은하의 형성 과정을 규명하기 위해 슈퍼컴퓨터를 활용한 수치모의실험을 적극 활용해왔다. 비록 극복해야 할 문제가 여전히 많지만, 이 수치실험들은 밀도요동에서 시작하여 은하의 형태학적 특성과 공간 분포 등을 성공적으로 모사하였다는데 큰 의의가 있다. 이러한 수치모의실험들은 표준 우주론에 기반하여 은하단의 배경인 거대 암흑 헤일로가 수십 Mpc에 이르는 거대한 공간에서 형성된 우주 구조물들이 계층적으로 병합하며 형성되었음을 보여주었다. 이는 은하단에서 발견되는 모든 은하들이 처음부터 은하단과 함께 형성되고 성장한 것은 아니라 과거 다양한 환경에서 성장해온 은하들이 모여 형성되고, 은하단 내 고밀도 환경에 의해 은하의 진화가 촉진되어 은하단 내 은하들만의 고유한 특성을 갖도록 하였다. 본 연구는 거대 규모, 고 분해능의 우주론적 수치모의실험을 통해 은하단과 같은 극한 환경의 형성 과정과 이 환경이 은하에 주는 영향, 거대구조와의 상관관계를 1kpc 이하의 규모부터 1Gpc 이상의 규모까지 계층적으로 살펴볼 예정이다. 또한 이 연구를 통해 3차원 우주 구조를 재구성함으로써 현재 진행 중인 협역·광역 관측에 대한 해석의 틀과 이론적 예측을 제공하고자 한다.

▶ 누리온 환경에서의 성능 최적화를 위한 RAMSES-OMP 수치모형의 개량

기존 RAMSES 수치모형에는 MPI 병렬화가 접목되어 있으며, 수 천 개 이상의 MPI 프로세서를 이용한 수치모의실험에서 잘 작동하는 것으로 알려져 있다. 그러나 누리온을 비롯한 현재 수퍼컴퓨터 성능 발전 방향은 전력 효율이 높고 적절한 성능을 가지는 코어의 수를 늘리는 쪽으로 가고 있으므로, 대규모 수치모의실험을 위해서는 수 만개 이상의 MPI프로세스를 필연적으로 사용할 수 밖에 없다. 그러나 이정도 규모에서는 RAMSES를 비롯한 많은 기존 우주론적 수치모형의 MPI 병렬화 효율이 급격히 떨어진다는 것이 널리 알려져 있다. 본 연구진은 앞서 RAMSES 수치모형의 성능을 누리온과 같은 최신 슈퍼컴퓨터 환경에 최적화시키기 위해 KISTI 연구진과 협업하여 RAMSES-OMP 수치모형을 개발하였다. RAMSES-OMP 수치모형은 기존 RAMSES 수치모형에 공유 메모리 다중 처리 병렬화(Open Multi-Processing; OpenMP)를 접목시킨 것으로, 특히 RAMSES의 연산 과정에서 계산 소요시간이 가장 긴 중력계산과 거대질량블랙홀 형성 과정 계산에서의 속도를 비약적으로 향상시켰다. 누리온의 2500개 노드를 사용하여 노드 당 프로세스 개수 증가로 인한 RAMSES-OMP 수치모형의 성능 향상성을 테스트 해본 결과, 기존 RAMSES 수치모형의 계산속도에 비해 RAMSES-OMP가 최대 9배 빠르다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구는 이전에 RAMSES-OMP 수치모형을 이용하여 진행했던 HR5와 HINT LCDM 실험들에서의 계산 영역보다 약 2.5배 큰 영역 설정하고, 분해능을 더 높여 진행해야 하지만 누리온 슈퍼컴퓨터의 가용 노드 한계로 인해 노드 당 계산 효율을 증대시킨 필요가 있다. 이에 공유 메모리 처리의 효율성을 높이고, 세부 물리량 계산 방법론 수정을 통해 유체 계산 효율을 증대시키는 개량을 진행하고 이를 활용할 계획이다.

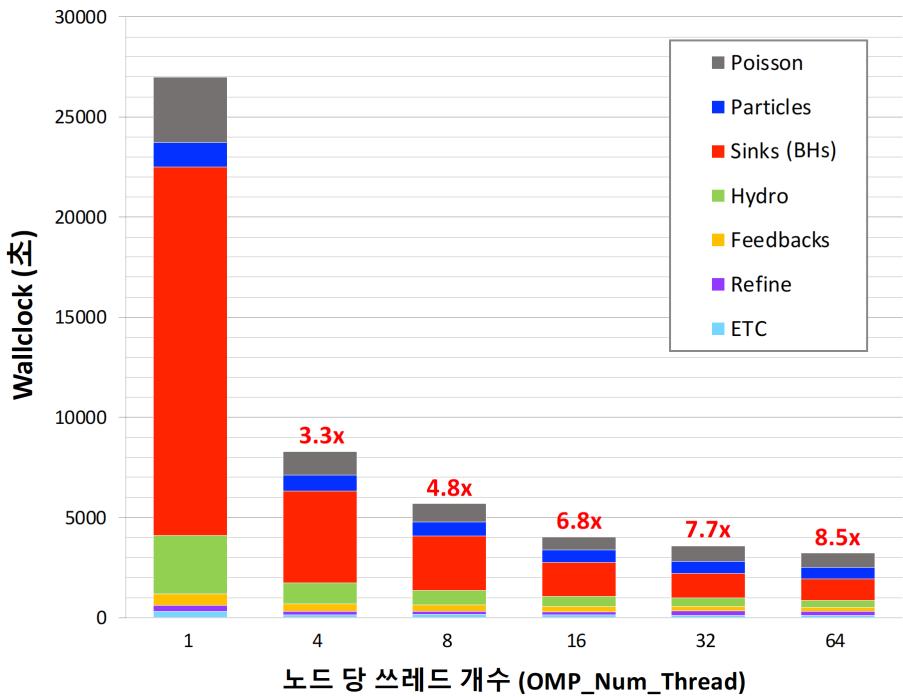


그림 3 : 누리온 환경에서 RAMSES-OMP 수치모형의 성능 테스트 결과

4. 계산 자원

(1) 요구자원 규모

자원 요구량	총 노드 시간	(3,240,000) 노드시간 - 단위 작업 당 사용 노드 수 : 노드 계산속도 89.6 GHz 가정 : 1500노드 사용 시 가용 일 수 90일 : 1500노드 x 90일 x 24시간/일 ~ 3,240,000 노드시간 - 총 필요한 작업 개수 : 1500 노드 작업 1 개
	메모리 요구량	(180,000) Gbyte
	하드디스크 요구량	(600,000) Gbyte

(2) 요구자원의 수준

(2-a) 코어 시간

모의실험 결과

: Fine step 평균 $dt=10^{-6}$, 1 main step 당 평균 128개의 fine step
: 1500노드 \times 64코어 이용 시 1 main step 당 약 5000 초 소요
: 목표 $z=2.4$ 에 도달하기 위해 필요한 최소 main step 수 = 약 1000–1500개
 $\Rightarrow 1000\text{--}1500 \text{ main step} \times 5000\text{초} \times (1\text{시간}/3600\text{초}) \times 1500\text{노드}$
 $\simeq 2.1\text{--}3.2 \times 10^6 \text{노드시간}$

(2-b) 메모리 요구량

- (a) 총 입자 수 : $\sim 10^{10}$ 개
- (b) 총 격자 수 : 초기 $\sim 3 \times 10^{10}$ 개, 최고 해상도 도달 시 $\sim 10^{11}$ 개
- (c) 단위 작업 당 메모리 요구량
 - : 총 입자 수 \times 11개 변수값 \times 8 byte $\simeq 9 \times 10^{11}$ byte $\simeq 820$ Gbyte
 - : 총 격자 수 \times 13개 변수값 \times 9 (x, y, z 3방향 중앙값과 가장자리값) \times 8 byte
 $\simeq 3 \times 10^{13}\text{--}10^{14}$ byte $\simeq 30,000\text{--}90,000$ Gbyte

(2-c) 하드디스크 요구량

- (a) Snapshot 당 저장되는 출력 정보
 - : 총 입자 수 \times 11개 변수값 \times 8 byte $\simeq 968$ Gbyte
 - : 총 격자 수 \times 13개 변수값 (중앙값만 저장) \times 8 byte $\simeq 0.3\text{--}1 \times 10^4$ Gbyte
 $\Rightarrow 0.4\text{--}1 \times 10^4$ Gbyte
- (b) 필요한 Snapshot 개수는 100개, 최고 해상도로 출력이 필요한 Snapshot 개수는 5개 내외
 - : 약 400,000 Gbyte \sim 500,000 Gbyte 하드 디스크 양 필요

5. 예상 성과 및 파급 효과

▶ 최대 규모의 관측 프로그램에 발맞춰 이론적 기틀을 제공할 세계 최대급 수치모의실험

본 연구진은 최대의 관측 영역을 가지는 새로운 라이만 알파 방출 천체 관측 프로그램(ODIN)에 발맞추어 가장 큰 규모에서의 라이만 알파 방출 천체 수치모의실험을 수행할 것이다. 지금까지는 멱법칙을 가정하여 라이만 알파 방출 천체의 거대구조는 살펴보았지만, 본 연구진의 수치모의실험은 최초로 물리법칙에 기반한 균집 특성을 알 수 있는 계기를 마련할 것이다. 이는 새로운 관측 결과를 해석하는데 필수적이며 우주 거대구조와 은하형성 이론 연구, 라이만 알파 방출 천체의 특성을 연구하는데 무엇보다 중요한 역할을 할 것이다. 또한 우주 팽창 역사를 이해하기 위해 필수적인 거대구조의 통계적 특성을 살펴볼 수 있는 규모의 실험이기에 고 적색이동에서 은하와 은하단의 계층적 진화 모습을 살펴볼 수 있는 중요한 의의를 가지는 실험이 될 것이다.

▶ 미래 심우주 전천탐사 자료와 비교할 수 있는 빅데이터 제공

본 연구진은 KISTI 누리온 슈퍼컴퓨터를 활용하여 세계 최대급의 수치모의실험들을 수행함으로써, 우주거대구조의 성장, 은하의 형성 및 진화 연구에 관한 우리나라 연구진의 우수성을 보여 왔다. 특히, 본 연구진이 누리온 컴퓨터(2018년과 2019년 초고성능컴퓨팅 R&D 혁신지원 프로그램)를 활용하여 수행

한 HR5과 HINT LCDM 수치모의실험은 활동성 은하핵과 초대 블랙홀, 은하와 은하단의 통계학적 분석에 최적화된 세계 최대 규모의 우주론적 유체역학 수치모의실험이었다. 본 라이만 알파 방출체 수치모의실험은 협역 필터 관측 자료와 직접 비교할 수 있는 고 적색이동 우주의 3차원 위상 분포를 재현해내는 것을 목표로 하고 있다. 본 실험은 과거 수행했던 HR5와 HINT LCDM의 선도성을 이어 받으면서도 2배 이상 계산 규모를 넓히고, 공간 분해능을 더욱 향상시켜 다시 한번 세계 최대 규모, 고 해상도 우주론 수치모의실험을 완수하는 것이 목적이다 (그림 4). 이를 통해 고 적색이동 천체들의 형성과 진화를 보다 정확히 분석하고, 거대구조와의 상관관계를 밝힘으로써, 현재 가장 진보된 관측 설명하는 이론적 토대를 마련할 것이다. 더 나아가 미래 심우주 천천탐사 자료와 통계적 비교 분석이 가능한 초기 우주의 모습을 담은 빅데이터를 생산, 제공하는 중요한 역할을 할 것이다.

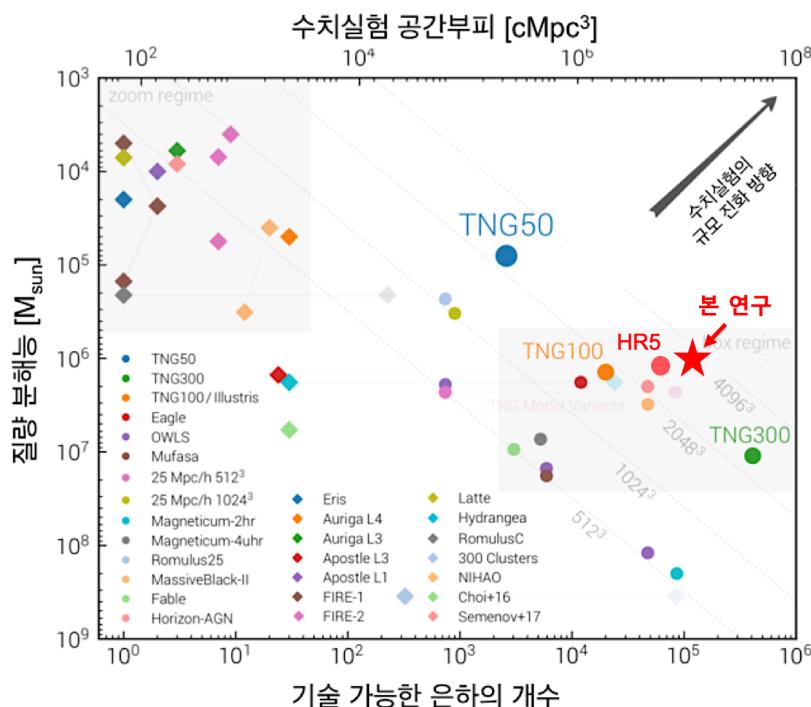


그림 4 : 우주론적 수치모의실험 규모의 동향을 나타내는 그림으로, 본 연구진이 이전에 누리온으로 수행한 HR5는 붉은 점에 해당한다. 본 연구에서 수행할 수치모의실험은 HR5의 2배에 해당하는 공간부피를 가지고 있으며 세계 최대급 수치모의실험들을 다시 한 번 넘어서는 공간 부피와 은하 개수, 질량 분해능을 지니고 있다.

II. 연구 성과물

1. 목표 연구 성과물

평가항목	수준	목표치	비고
학술지 제재	SCI(E)	2 편	Astrophysical Journal (SCI 저널, IF 5.745)
	기타	편	
특허	국제/국내	건	
기타			

2. 연구 성과 홍보 기사 (거대연구 필수, 기타분야 선택사항)

라이만 알파 방출 천체와 원시은하단의 생성을 가장 사실적으로 구현한 초기대 수치모의실험 수행 성공

고등과학원, 천문연구원과 과학기술정보연구원에서는 다시 한번 세계 최대급 3차원 우주론적 유체역학 모의실험을 성공적으로 수행하였다고 밝혔다. 특히 이번 연구에서는 협역 암흑에너지 관측 연구그룹에서 수행중인 우주 초기 형성, 진화해 온 라이만 알파 방출체 (Lyman-alpha emitter, LAE)의 관측 결과를 가장 사실적으로 설명할 수 있는 3차원 우주 모형을 만들어 냈으므로써, 그동안 의문점으로 남아있던 우주 팽창 역사와 원시 은하단의 형성 과정, 그리고 우주 거대구조와의 상관관계를 파악할 수 있는 중요한 단서를 제공하였다. 또한 고적색이동 우주 천체에 대한 관측 결과를 설명할 수 있는 거대 규모의 실험으로는 세계 최초이기에 관련 연구 분야에 우리나라가 앞서나갈 수 있는 중요한 발판을 마련하였다. 이번 수치모의실험은 2021년 기준 세계 21위의 계산 속도를 자랑하는 과학기술정보원의 누리온 슈퍼컴퓨터를 2억 CPU 시간 동안 사용하여 수행한 것이다.

고등과학원, 천문연구원 & 과학기술정보연구원