

흡수식 열펌프 작동유체로서의 나노유체냉매 적용

현재 사용되어지는 냉매에 대한 규제와 에너지 수급불균형의 문제를 해결하기 위해 증기압축식 냉동기의 대체방안중 하나인 흡수식 시스템에 대해 알아보고 흡수식 시스템의 성능향상을 위해 차세대 냉매인 이성분 나노유체의 적용가능성을 제시하고자 한다.

이진기

경희대학교 대학원(jink@khu.ac.kr)

강용태 / 총무이사

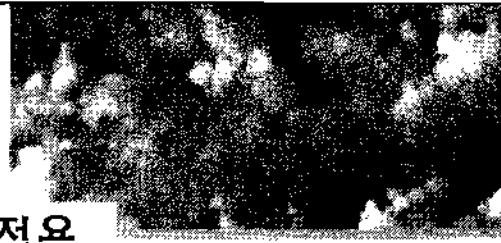
경희대학교 기계·산업시스템 공학부(ytkang@khu.ac.kr)

최근 고도 산업사회로의 발전으로 인한 환경 및 에너지 수급문제가 심각해짐에 따라 우리나라 뿐 아니라 전 세계적으로 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 제3차 석유파동이 우려되는 현시점에서 에너지에 대한 문제는 우리 모두가 주목해야하는 시급한 사안일 것이다. 이러한 에너지에 대해 관심을 가지고 본격적으로 그 해결책을 강구하게 된 것은 1973년에 일어난 석유파동을 겪으면서 부터라고 볼 수 있다. 그러나 1990년대 걸프전과 동구권의 정치, 경제의 변화가 일어나면서 에너지 문제에 대한 중요성과 복잡성이 더해지고 있으며 그 해결책의 전망도 불투명해지고 있다. 특히 에너지의 과도한 사용으로 인한 환경문제가 전 세계적인 관심사가 되고 있어 에너지 문제를 더욱 어렵게 만들고 있다. 이에 따라 국제사회는 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 방출을 제한하고자 기후변화협약을 체결하였고 도쿄의 정서 등을 통해 규제가 진행되고 있다.

이러한 규제에 의해 가장 큰 문제를 안고 있으며 에너지 소비의 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것 중 하나가 바로 냉난방에 필요한 에너지이다. 이 중 여름철 냉방의 대부분을 차지하는 증기·압축식 냉동기의 냉매는 여러 국제협약에 따른 규제대상이 되고 있으며 여름철 에너지 수급의 불균형을 초래하는 원

인이 되고 있다. 이러한 문제들에 대한 대안으로 떠오르고 있는 것 중 하나가 흡수식 냉동 시스템이다. 흡수식 시스템은 환경 친화적인 냉매를 사용함으로써 환경문제에 따른 규제가 없으며 천연가스 또는 폐열을 사용하기 때문에 에너지 수급 불균형 및 에너지 절감 효과를 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 흡수식 시스템에 대한 관심이 높아짐에 따라 흡수식 사이클 개선 및 열교환기의 효율 향상에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔으며 앞으로도 흡수식 시스템의 성능향상을 위한 연구가 꾸준히 진행될 전망이다.

흡수식 시스템은 열 및 물질전달이 동시에 발생하는 시스템으로써 대표적인 작동유체로는 물/리튬브로마이드($H_2O/LiBr$)와 암모니아/물(NH_3/H_2O)이 있다. 이러한 작동유체의 흡수성능 및 열전달 성능은 흡수식 시스템 전체의 성능을 좌우 한다고 해도 과언이 아닐 것이다. 이와 관련하여 흡수식 작동유체에 나노유체의 개념을 접목시킴으로써 시스템의 성능을 향상시키려는 연구가 진행되고 있으며, 본 소고에서는 신 냉매인 이성분 나노유체의 사용을 통한 흡수식시스템의 성능향상 방안을 모색하여 흡수식 시스템에 대한 이성분 나노유체의 적용가능성을 제시하고자 한다.



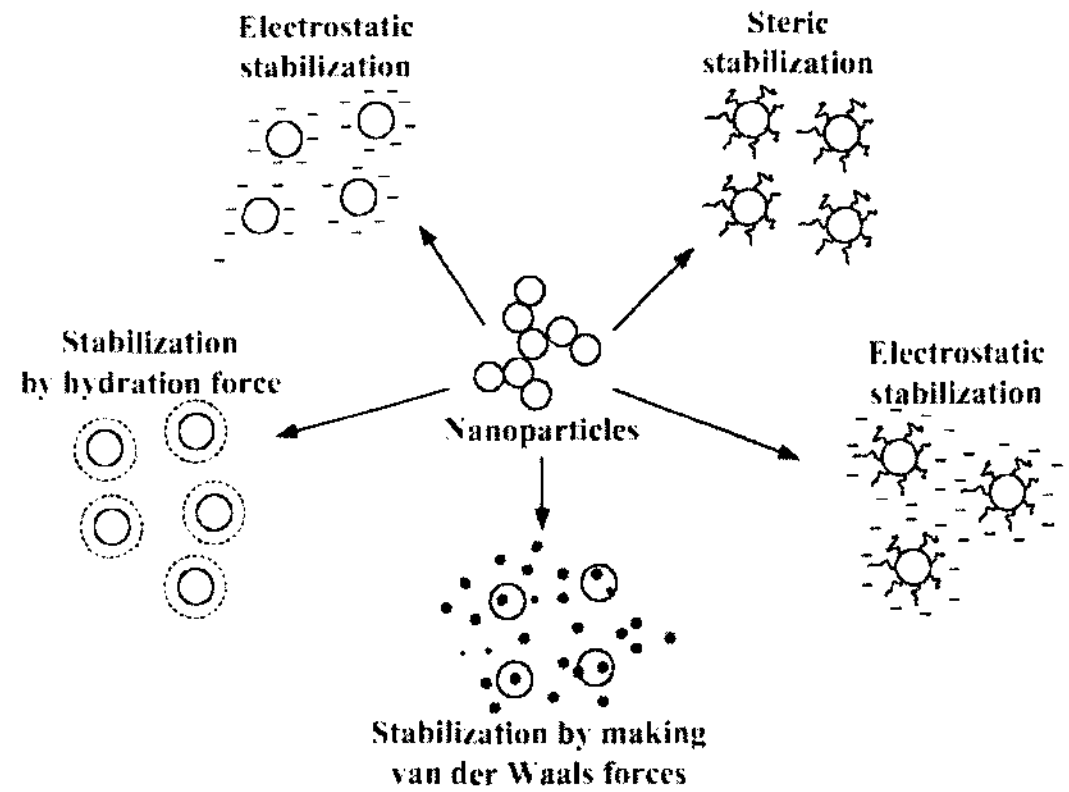
이성분 나노유체란?

21세기에 접어들면서 전 세계적으로 6T에 대한 관심이 증폭되기 시작하였다. 이에 따라 6T 중 하나인 나노기술(NT : Nano Technology)에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 열공학 분야에서도 나노기술의 접목을 통해 나노유체의 개념을 도입하기에 이르렀다.

여기서 나노유체란 100 nm 이하의 크기를 가진 금속 및 비금속 고체입자가 모유체에 안정적으로 분산되어 있는 유체를 말한다. 나노유체가 제안되면서부터 이에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔으며 이러한 연구들을 통해 나노유체가 모유체의 열적 성능을 현저하게 향상시킬 수 있음이 확인되었다. 이처럼 열적특성이 뛰어난 나노유체를 흡수식 시스템에 적용하기 위해 흡수식 작동유체와 같이 이성분 혼합물을 모유체로 하는 나노유체를 이성분 나노유체라 정의하였다. 이성분 나노유체는 단성분 나노유체에 비해 고려되어야 할 물리, 화학적인 요인들이 많이 가지고 있다. 이러한 특성들로 인해 이성분 나노유체를 실제 시스템에 적용하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있는데 이성분 나노유체의 사용을 위해서는 여러 가지 해결해야 할 문제들이 있다. 그 중 가장 우선적으로 이성분 나노유체의 분산안정성에 대한 해결책이 제시되어야 한다. 분산안정성에 대한 문제는 시스템의 성능 및 안전에 대한 신뢰성과 직결되는 문제이기 때문에 이성분 나노유체의 적용을 위한 선행 과정이라고 할 수 있을 것이다.

이성분 나노유체의 분산안정도

입자의 응집 및 침전의 문제를 해결하기 위한 입자의 안정적인 분산방법으로는 모유체에 초음파 진동을 줌으로써 나노입자를 분산시키는 방법이 주로 사용된다. 진동자·혼에 의해 발생된 초음파를 모유체 내에 조사하였을 때 발생하는 초음파 공동화(ultrasonic cavitation)의 메커니즘은 핵의 생성, 기포(bubble)의 성장, 그리고 충분히 성장한 기포의 폭발적 파열 등의 3단계로 이루어진다. 이러한 고온·고압의 기포가 깨어질 때 발생하는 충격파로 인해 입자간의 연결고리가 끊어지게 되어 입자가 안정적



[그림 1] 나노입자의 안정화 메커니즘

으로 분산되어 지게 되는 것이다.

나노유체의 분산성을 유지시키는 안정화 메커니즘은 그림 1에서 보는 바와 같이 크게 1) 정전기적 반발력(electrostatic stabilization), 2) 흡착 고분자에 의한 기하학적 반발력(steric stabilization), 3) 표면수화작용(stabilization by hydration) 그리고 4) 반데르발스 힘의 차폐에 의한 안정화 메커니즘 등으로 구별할 수 있다.

입자들은 이 중 몇 가지의 작용에 의해 응집이 방해되어 안정화되며 특히 입자의 계면성질이나 흡착된 타 분자들에 의해 분산안정도가 결정된다고 할 수 있다. 일반적으로 정전기적 반발력과 흡착 고분자에 의한 기하학적 반발력에 의한 입자의 안정성이 지배적이다.

분산안정도 평가 방법

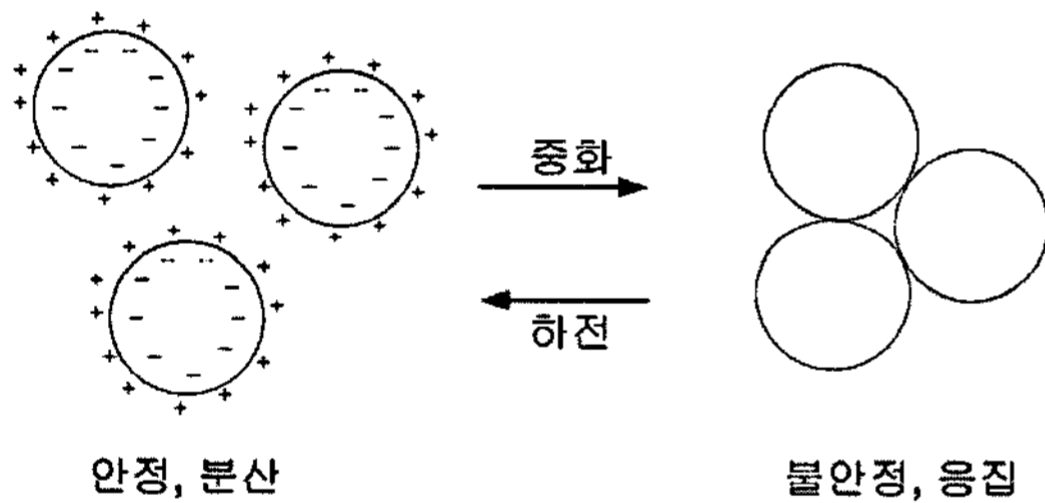
나노유체와 같은 고/액 혼합물의 경우 분산안정성은 제타전위의 측정을 통해 평가되어질 수 있다. 제타전위는 유체 내에 분산되어 있는 입자의 표면전위차를 의미하며 중금속 침전, 콜로이드계의 물성치 해석, 나노입자의 생성에 많이 사용되어 진다.

나노유체의 외부에서 전장을 가하면 나노입자는 그 표면전위의 부호와 반대방향으로 이동하게 되는데, 이때의 전장의 세기와 유체역학적인 효과를 고려하여 나노입자 이동속도를 계산하여 구해진 값이 제타전위이다. 여기서 입자의 이동속도는 Doppler

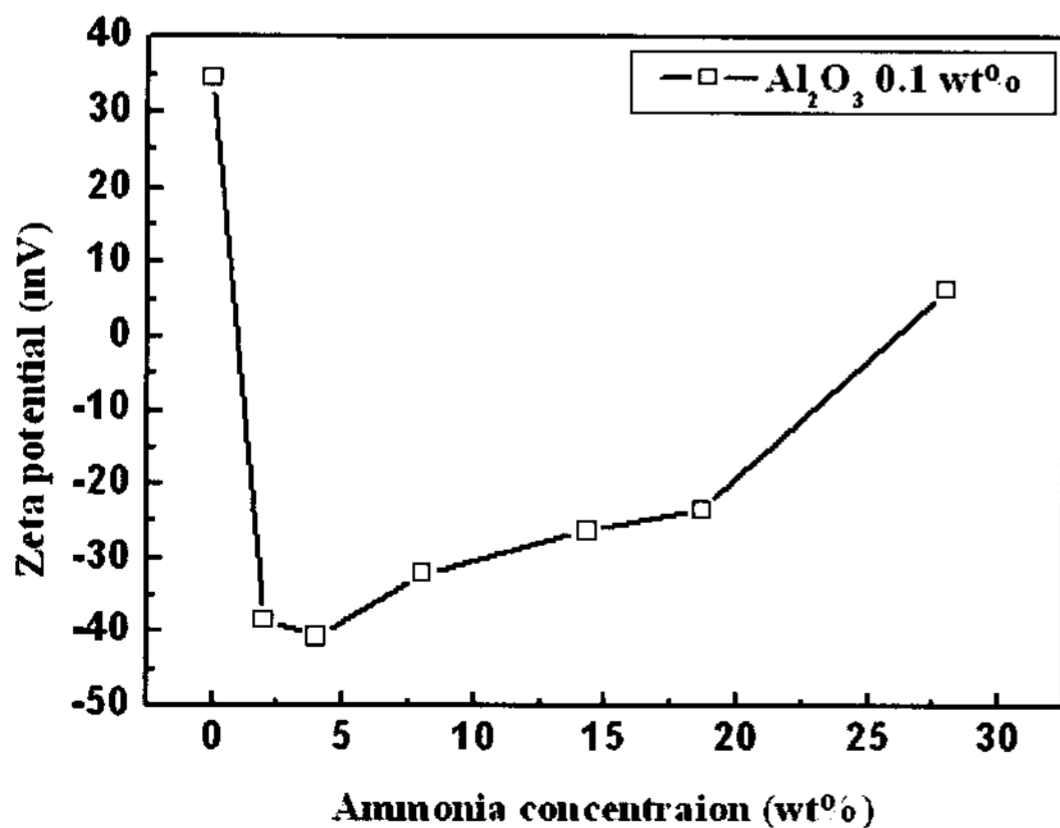
효과를 이용한 광산란법을 통해 구할 수 있다.

미립자나 콜로이드의 경우 실험적으로 구해진 제타전위의 절대치가 증가하면 입자간의 반발력이 강해져 입자의 안정성은 높아지는 반면 제타전위가 0에 가까워지면 입자는 응집하기 쉬워진다. 따라서 제타전위는 나노유체의 분산안정성을 나타내는 척도로서 사용될 수 있다.

그림 2는 입자의 전하에 따른 응집과 침전을 나타낸 개략도이다. 그림에서 보여 지듯 표면 전위가 높으면 입자들 간의 반발력으로 인해 나노입자는 안정하게 된다. 반대로 표면 전위가 낮으면 입자의 자유 브라운 운동으로 인하여 입자들의 충돌에 의한 응집 현상이 발생하여 불안정한 상태가 된다. 일반적으로 제타전위의 절대치가 30 mV 이상이면 입자는 안정되어 있다고 볼 수 있으며, 안정된 입자는 그 반발력으로 입자간의 거리가 반데르발스 인력이 생기지 않을 만큼의 충분한 거리를 유지하게 된다. 이러한 제



[그림 2] 나노입자의 전하와 분산안정성과의 관계

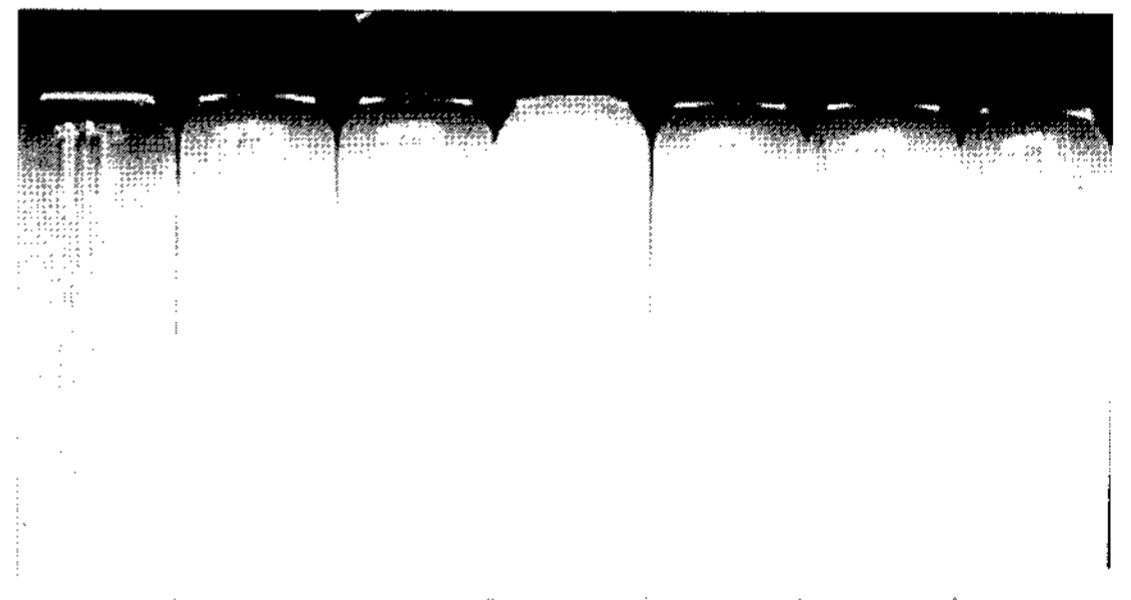


[그림 3] 이성분 나노유체의 제타포텐셜 측정 결과

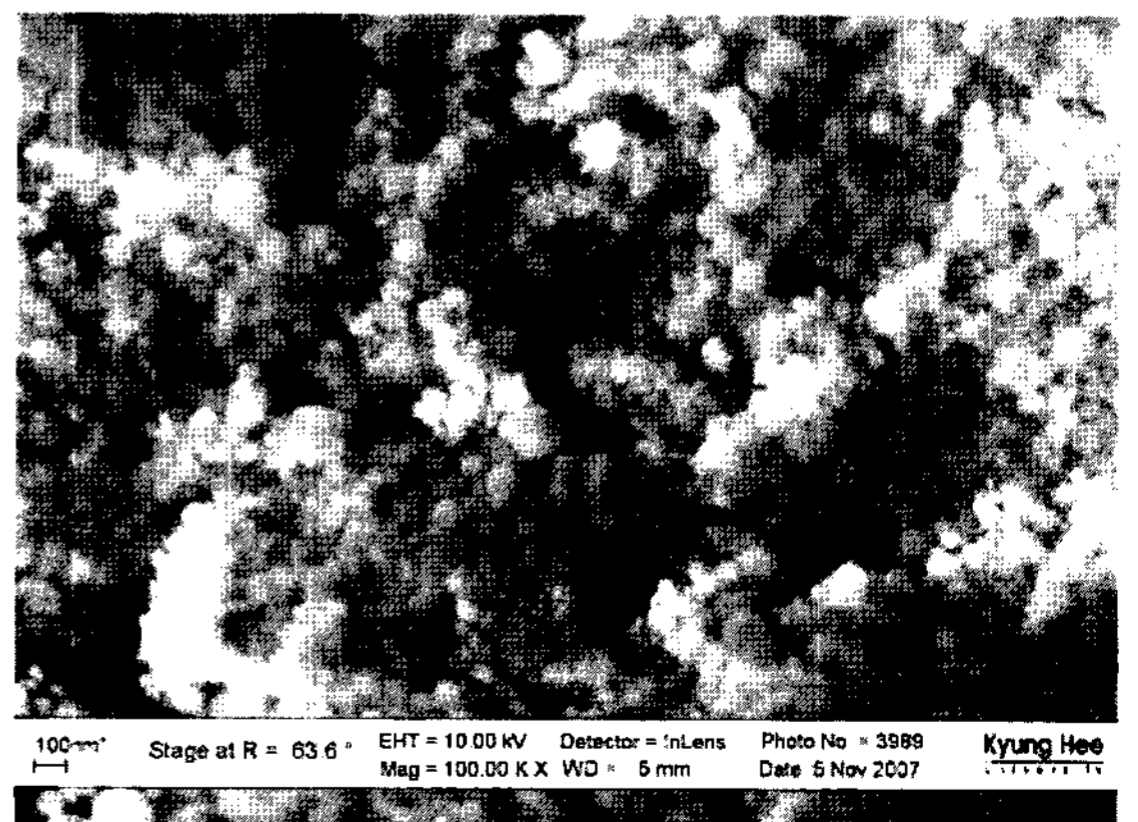
타전위 값은 일반적으로 입자의 전하량을 뜻하며 이는 입자의 안정성을 결정한다. 그림 3은 이성분 나노유체의 제타전위 측정 결과를 나타내고 있다.

초음파 진동을 받아 분산이 된 이성분 나노유체의 샘플을 채취하여 시간에 따른 침전현상을 가시화 하게 되면 모유체 및 입자의 농도에 대한 분산안정도의 비교가 가능하게 된다. 가시화결과와 제타전위측정결과를 비교, 분석하여 최적의 이성분 모유체 농도와 나노입자 농도 조건을 도출할 수 있다. 그림 4는 산화알루미늄 나노입자의 H₂O/LiBr 용액내 분산안정도 가시화 결과를 나타낸 사진이다.

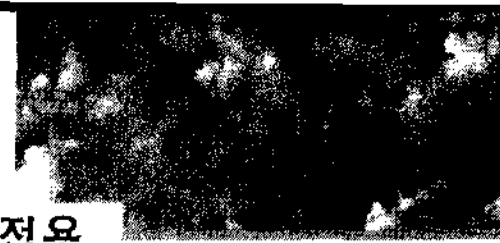
이와 같이 제타전위 및 가시화 결과를 통한 이성분 나노유체의 분산안정도 평가 외에도 나노유체에 분산된 입자의 입도를 분석함으로써 분산안정도를 확인할 수 있다. 이러한 입도분석을 통해 입자의 응집된 정도를 파악할 수 있으며 이는 각 농도조건에 대



[그림 4] 이성분 나노유체의 분산안정도 가시화 결과



[그림 5] Al₂O₃ 나노입자의 FE-SEM 분석사진



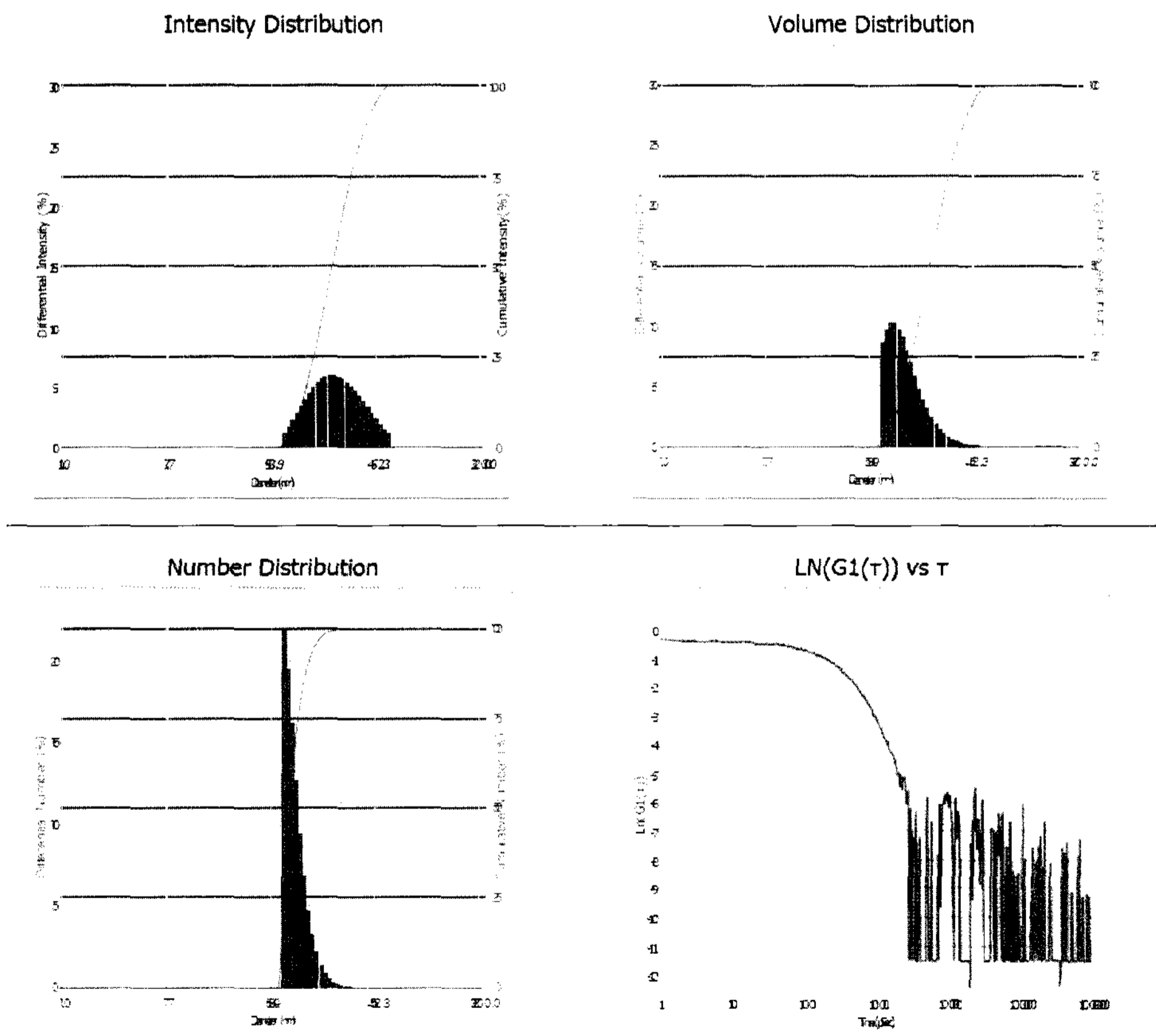
한 분산안정도의 상대적 평가를 가능하게 해준다.

그림 5는 실제 이성분 나노유체의 제조에 쓰이는 나노입자의 SEM 분석 사진이며, 그림 6은 이성분 나노유체에 분산되어 있는 나노입자의 입도분석 결과를 나타낸 것이다.

FE-SEM을 통해 분석된 입자의 평균 크기와 나노유체에 분산되어 있는 입자의 크기를 비교함으로써 실제 이성분 나노유체의 분산안정도를 확인할 수 있다. 나노유체의 입도분석 결과가 FE-SEM 분석을 통한 입자의 크기보다 훨씬 크다고 한다면 이성분 나노유체의 분산안정도는 매우 낮다고 할 수 있는 것이다. 이러한 분산안정도 평가방법을 통해 최적의 농도조건을 찾고 분산안정도 기술을 향상시킴으로써 실제 시스템에 대한 적용 가능성을 높일 수 있을 것이다.

시스템적용 시 문제점 및 해결방안

나노유체를 실제 시스템에 적용할 때 가장먼저 제기되는 문제점 중에 하나가 바로 펌프 및 배관 등에 발생하는 나노입자의 침착현상이다. 앞서 설명한 바와 같이 분산안정성이 떨어지는 경우 나노입자의 응집 및 침전으로 인해 배관 및 각종 장치에 나노입자의 침착현상이 발생할 수 있다. 이러한 입자의 침착은 배관의 막힘이나 펌프의 고장 등과 같은 문제를 야기할 수 있기 때문에 신중히 고려되어야 할 사항이다. 그러나 입자의 침착문제는 분산안정도의 향상을 통해 해결할 수 있다. 실제로 나노유체에 계면활성제 및 분산안정제를 첨가함으로써 첨가제를 사용하지 않은 나노유체에 비해 분산안정성이 상당히 높게 나타남을 확인하였으며, 또한 나노입자 자체의



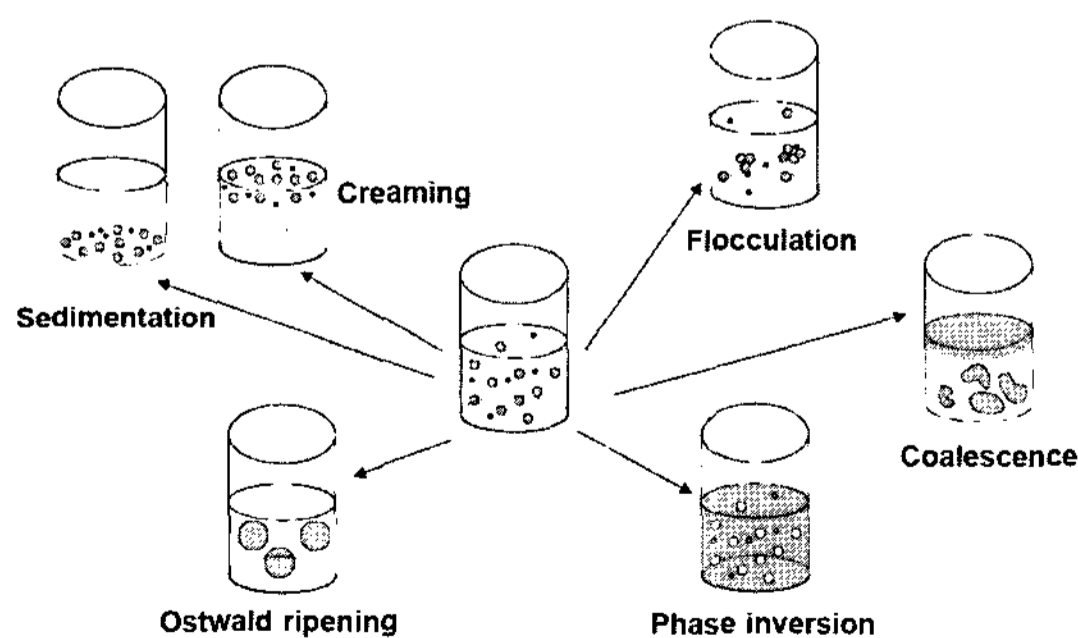
[그림 6] 이성분 나노유체의 입도분석 결과

산처리 과정을 통해 침착현상을 막을 수 있다는 가능성을 확인하였다.

나노입자의 침착현상과 더불어 또 하나의 문제로는 나노입자와 모유체간의 화학적 반응과 나노입자와 설비재료의 화학적 반응에 의한 문제가 있다. 예를 들어 암모니아/물을 작동유체로 하는 흡수식 시스템의 경우 구리(Cu) 나노입자를 사용하게 되면 구리 입자가 암모니아와의 반응하여 배위결합을 통한 착이온을 형성하게 된다. 착이온이란 어떠한 금속이온에 다른 분자 또는 이온이 결합하여 생긴 새로운 이온의 형태를 의미하며 구리의 경우 암모니아와 반응하여 사암민구리를 형성하게 되는 것이다. 이러한 사암민구리를 형성한 유체는 이미 이온화 상태로 더 이상 나노유체로 볼 수 없기 때문에 전혀 다른 해석 방법이 필요하게 된다. 이처럼 금속의 이온화나 금속간의 화학적 반응으로 인한 문제는 시스템에 사용되는 작동유체, 배관 및 설비장치의 재료에 따라 그에 맞는 나노입자를 선택하여 사용함으로써 해결될 수 있을 것이다.

나노유체와 나노에멀전유체

나노유체란 단성분 또는 다성분의 모유체에 금속/비금속의 고체나노입자를 안정적으로 분산시킨 것임을 언급하였다. 이러한 나노유체의 응집 및 침전 현상으로 인한 침착문제를 해결할 수 있는 방안 중 하나가 나노에멀전유체이다. 나노에멀전유체는 나노유체와는 달리 단성분 또는 다성분 모유체에 비혼합 나노액적입자를 안정적으로 분산시킨 유체를 말



[그림 7] 이성분 나노에멀전유체의 분산안정성 파괴현상

한다. 이러한 나노에멀전유체는 흡수식 시스템의 작동유체 뿐만 아니라 100°C 이상의 고온, 절연 및 고점도 분야, 수소정제, 이산화탄소 흡수 등에 적용되어 질 수 있고, 변압기 절연유 및 약물전달/흡수, 화장품 등 매우 다양한 분야로의 응용이 가능하다. 하지만 이 또한 응집 및 합일 등과 같은 현상이 발생하게 된다(그림 7).

이성분 나노에멀전유체의 적용을 위한 선행 과정으로는 앞서 설명한 분산안정도 평가 기술을 바탕으로 한 분산안정성 파괴현상이 규명되어야 하고 나노에멀전유체에 대한 한계영역(Limit region)을 제시할 필요성이 있다.

이성분 나노유체의 열 및 물질전달 성능 향상

나노유체의 열전도도가 모유체에 비해 상당히 증가된다는 것은 이미 많은 연구를 통해 확인되었으며 현재 이와 관련된 메커니즘과 모델개발에 대한 연구 또한 어느 정도 정립되어가는 단계라 할 수 있다. 하지만 이성분 나노유체의 열 및 물질전달 향상 메커니즘은 아직까지 명확하게 규명되어 있지 않다. 그동안 진행된 연구결과로 미루어 볼 때 이성분 나노유체가 열 및 물질전달에 긍정적인 영향을 준다는 사실만은 확인할 수 있었다. 이는 이론적인 검증이 뒷받침 되어야 하며 아울러 지속적인 연구를 통해 열 및 물질전달 특성을 정량적으로 파악하고 이와 관련된 명확한 메커니즘의 규명이 이루어져야 할 것이다. 또한 실제 시스템과 같은 조건에서의 실험을 통해 신뢰성에 대한 충분한 검토가 뒷받침 되어야 한다.

맺음말

에너지에 대한 의존율이 점차 증가함에 따라 오늘날의 에너지 문제를 더 이상 지켜볼 수만은 없게 되었다. 이것은 새로운 차세대 냉매의 개발이 필연적이라는 것을 의미한다. 우리는 앞으로 이러한 차세대 냉매의 개발을 통해 보다 효율적이고 친환경적인 시스템에 대한 연구를 꾸준히 진행해 나가야 할 것이며 국내뿐만 아니라 전 세계적인 관심과 지원이 요구된다. ❁