

기능성 열유체의 열에너지 수송성

열적 성질을 가지는 각종 용질을 물을 주체로 한 열매체 등에 혼합 분산시킴으로써 그 열매체인 유체의 성질을 바꾸어 다원적 기능성을 가지도록 한 기능성 열유체의 열에너지 수송성에 대해 살펴보고자 한다.

출처 : 稻葉英男, 1998, 機能性熱流體の基礎とその應用, 高砂熱學工業總合研究所報, No.12, pp.5-24

박 기 원

서론

열에너지의 유효이용이라는 입장에서 보면 열에너지의 효율적인 저장기술이나 지역에 편재되어 있는 열에너지를 면적으로 이용한다는 차원에서의 고밀도 열에너지 수송기술의 확립 등을 들 수 있다. 이와 같은 각종 열에너지를 효율적으로 이용할 수 있도록 하기 위한 혁신적인 기술개발의 일익을 담당하는 것으로서 기능성 열유체에 대한 관심을 가질 필요가 있다.

예전부터 온수나 냉수, 증기의 상태로 열에너지를 효율적으로 저장하고 수송하여 왔다. 이와 같은 단상으로 열에너지를 이용하는 것은 물질의 성질에 따라 이용조건에 한계가 있었다. 따라서 개개의 열적, 유체적 성질이 다른 재료를 혼합하거나 복합화합으로써 각 재료가 지닌 성질의 장점을 이용한 복합적 열재료의 개발이 중요하게 되었다. 여기서 대상으로 하는 기능성 열유체는 다원적인 열 및 유동기능을 가진 첨단적인 열재료라 할 수 있다. 이와 같은 기능성 열유체에 요구되는 기능으로는, (a) 고밀도 축열 및 축냉, (b) 고밀도 열에너지의 고속 수송, (c) 열교환기에서의 전열 촉진, (d) 열에너지 수송시의 유동저항 경감, (e) 열적 이용온도폭의 확대, (f) 이용열량의 증대, (g) 열손실의 경감, (h) 열관련기기 및 설비의 소형화 등을 들 수 있다.

여기서는 열적 성질을 가지는 각종 용질을 물을 주체로 한 열매체 등에 혼합 분산시킴으로써 그 열매체인 유체의 성질을 바꾸어 다원적 기능성을 가지도록 한

것을 기능성 열유체(functionary thermal fluid)라 부르고, 몇 가지 기능성 열유체의 열에너지 수송성에 대해 살펴보고자 한다.

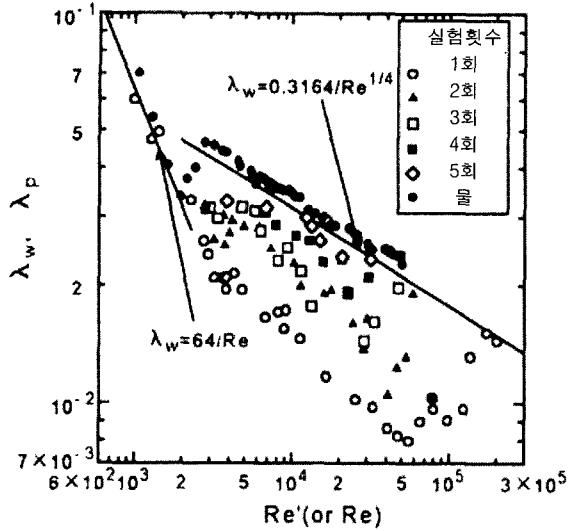
연열 이용 열유체

고분자 첨가수용액의 관내 유동저항 경감 효과

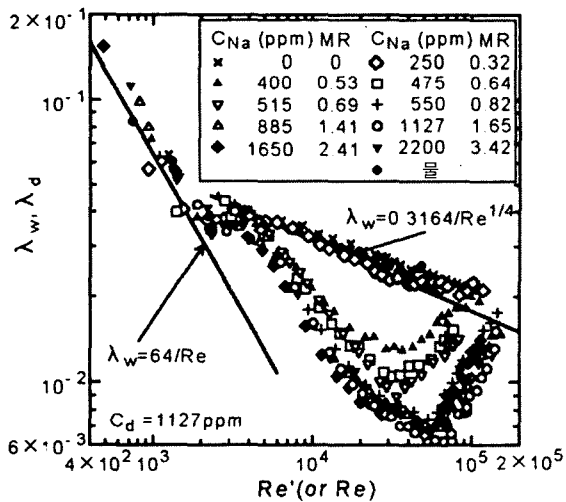
온수나 냉수를 관내수송할 때 펌프동력을 절감하는 것은 열에너지 수송의 에너지절약화와 관련하여 중요한 것이다. 이 때에는 당연히 수송동력이 수송 열에너지량 이상이 되지 않는 조건에서 수송시스템을 구축하게 된다.

그러나 고분자 화합물에 의한 유동저항 경감은 톰스 효과(Toms effect)라 불리는 난류의 층류화 현상에 의해 일어나는 것으로 설명되고 있다. 현재 톰스효과는 폴리아크릴라미드 등과 같은 사슬모양 고분자화합물이 불규칙적으로 연결되어 실모양이 되고, 점성저층에서 발생하는 난류덩어리를 이 실모양 물질이 변형하면서 잘 흡수하며, 난류영역 밖에서 그 변형을 복원함으로써 주위 유체로 일에서 열에너지로 방출되기 때문에 난류의 발생이나 발달을 억제한다고 하는 가설에 의해 설명되고 있다.

일반적으로 분자량이 5000 정도 이상인 사슬모양 고분자화합물에서 톰스효과가 관찰되는 것 같다. 그림 1은 사슬모양 고분자로서 폴리에틸렌글리콜(분자량 약 200만) 100ppm을 첨가한 수용액을 직경 16mm인

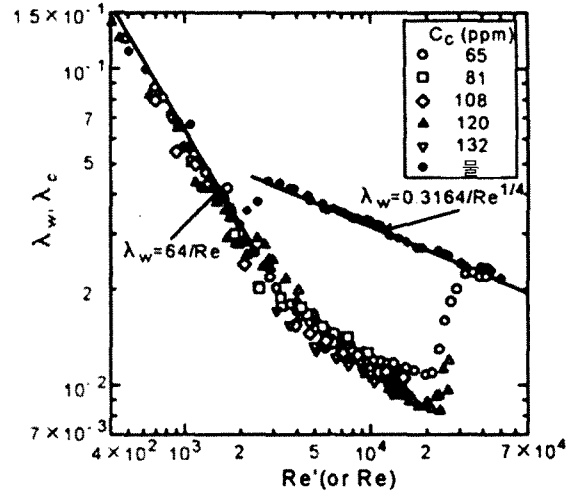


[그림 1] 고분자 폴리머 수용액의 관마찰계수와 레이놀즈수의 관계



[그림 2] 대이온 농도를 변화시켰을 때 관마찰계수와 레이놀즈수의 관계 (DTAC)

직관내로 반복유동시켰을 때의 관마찰계수 λ_p 와 레이놀즈수 Re' 의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 실험횟수가 증가하면서 유동저항 경감효과가 감소되는데, 이런 현상은 흐름의 전단력에 의해 사슬모양 고분자 구조가 전단 분열됨에 따른 열화나 그 응집작용에 의한 고분



[그림 3] 관마찰계수와 레이놀즈수의 관계 (CTAB)

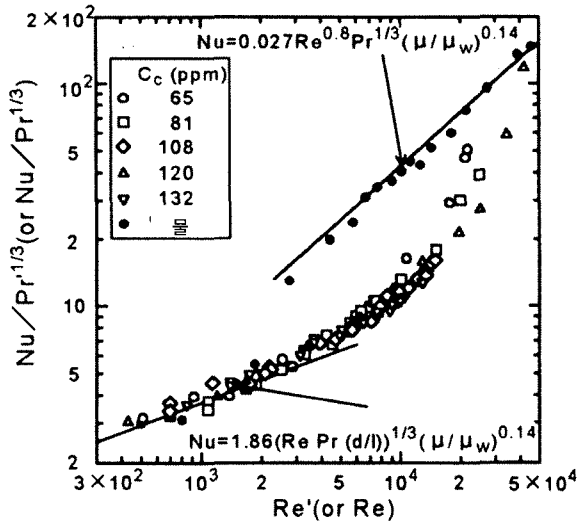
자의 합체 등에 따라 본래의 사슬모양 구조가 변하여 톱스효과를 상실하였기 때문으로 생각된다. 따라서 이런 종류의 고분자화합물은 반복 사용하지 않는 조건에서 사용하는 것이 바람직하다.

계면활성제 첨가수용액의 관내유동저항과 열전달특성

계면활성제 등과 같은 양친매성 물질을 물에 녹이면 일정 농도(임계 미셀농도) 이상에서 친유기를 안쪽, 친수기를 바깥쪽으로 하여 모인다. 이것을 미셀(micelle)이라 부른다.

이러한 계면활성제가 봉상미셀구조를 형성하면 전술한 고분자화합물에서 볼 수 있는 톱스효과에 의한 유동저항 경감효과가 기대된다. 봉상미셀구조를 형성하려면 (a) 계면활성제 농도를 증가시킨다. (b) 이온성 계면활성제로 되는 이온물질의 첨가, (c) 염분의 첨가, (d) 다른 계면활성제의 첨가 등의 방법이 있다.

그림 2는 DTAC(dodecyl trimethyl ammonium chloride) 수용액의 DTAC 농도를 $C_d=1127\text{ppm}$ 으로 일정하게 하고 대이온인 살리실산 나트륨의 농도를 증가시켰을 때 관마찰계수 λ_d 와 레이놀즈수 Re' 의 관계를 나타낸 것이다. 대이온 농도 $C_{Na}=400\text{ppm}$ 에서 유동저항의 경감효과가 나타나고, 1127ppm 이상의 농



[그림 4] 넛셀수/(플란트수)^{1/3}과 레이놀즈수의 관계 (CTAB)

도에서는 최대의 경감효과를 나타내지만, 그 이상의 농도에서는 그 효과에 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

그림 3은 CTAB(cetyl trimethyl ammonium bromide) 계면활성제 농도 C_c 를 여러 가지로 변화시켰을 때의 관마찰계수 λ_c 와 수정레이놀즈수 Re' 의 관계를 직경 16mm인 직관에서 측정된 것이다. 물이라면 난류의 관마찰계수를 나타내는 영역인데도 계면활성제 첨가수용액의 관마찰계수 λ_c 는 층류의 관계식 연장 선상에 존재하지만, 수정레이놀즈수 Re' 가 증가함에 따라 마찰계수의 감소비율이 작아져 최종적으로 일정한 레이놀즈수에서 급격하게 관마찰계수가 증가하면서 물의 값에 접근한다. 이 급격한 증가는 봉상미셀이나 그 조합구조가 흐름의 높은 전단력에 의해 분단, 분산되어 톱스효과를 상실하였기 때문이다. 이 분단, 분산된 봉상미셀이나 그 조합구조는 저유속인 상태에서 다시 모이거나 결합하여 원래대로 복원재생된다. 따라서 계면활성제를 첨가한 온수나 냉수는 열에너지의 순환수송에 적합한 기능성 열유체라고 할 수 있다.

그림 4는 그림 3과 같은 조건에서 관내의 열전달율을 나타내는 넛셀수 $Nu/Pr^{1/3}$ 과 수정레이놀즈수 Re' 의 관계를 나타낸 것이다. Re' 가 증가하여 물의 난류상태 영역이 되어도 층류상태의 열전달율에 가깝다가 Re'

가 더욱 증가하면 물의 난류상태 열전달율에 접근한다. 이처럼 열전달율 측정결과에서도 계면활성제 첨가 수용액의 흐름상태는 그림 3에 나타난 관내유동저항의 변화와 대응된다. 따라서 계면활성제를 이용하면 관내 현열에너지 수송동력의 감소에 기여하게 되고, 열전달율의 감소는 열손실의 감소에도 기여한다.

그 외의 유동저항경감 첨가제

- 미세섬유질을 열유체에 혼합

전술한 톱스효과를 얻기 위하여 직경 수백 μm 정도인 펄프섬유질 등을 열유체에 혼합 분산시켜 섬유질의 변형에 의한 난류에너지 흡수작용으로 관내 유동저항을 감소시킬 수 있다.

- 기체 등 저점성유체의 혼합

경계층 속에 미세한 기포(직경 1mm 정도)를 다공판을 통해 분사하여 난류가 가진 운동에너지를 흡수하고 유동저항을 감소시킨다. 기포분사에 필요한 동력의 경감법이 필요하게 된다.

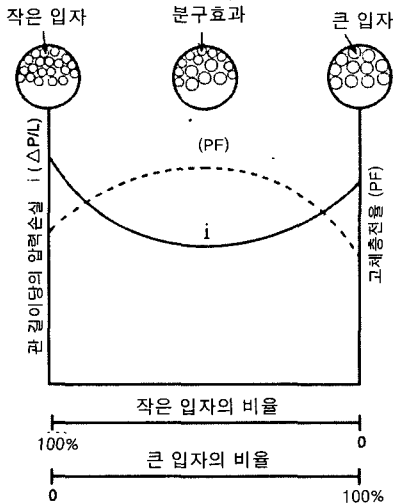
- 강자성유체에 의한 유동저항경감

페라이트 등의 강자성체를 난류경계층에 주입하여 유동하는 강자성체에 외부에서 자장을 줌으로써 난류경계층 구조의 변경, 특히 점성저층의 두께를 두껍게 하여 유동저항을 감소시키는 것이 가능하다. 유동저항의 경감에 투입되는 자장에너지량이 문제가 된다.

또 산화철 등과 같은 감온성 자성유체는 저온이 될수록 일정 자장에서 자화강도를 증가시키는 성질이 있다. 따라서 열원과 자장이 있으면 감온성 자장유체 자신을 유동시킬 수 있어 냉·온열매의 수송에 새로운 전기를 마련할 가능성이 있다.

- 전기점성유체(electrorheological fluid, ER 유체)

이온교환수지 등은 전장이 없는 상태에서는 무질서하게 유체 속에 분산되어 있지만, 전장을 걸어주면 분극에 의한 응집작용으로 인해 긴 입자사슬모양 구조를 형성함으로써 난류구조의 층류화가 가능해진다. 일반적으로 ER 유체는 강전장상태에서 입자사슬구조

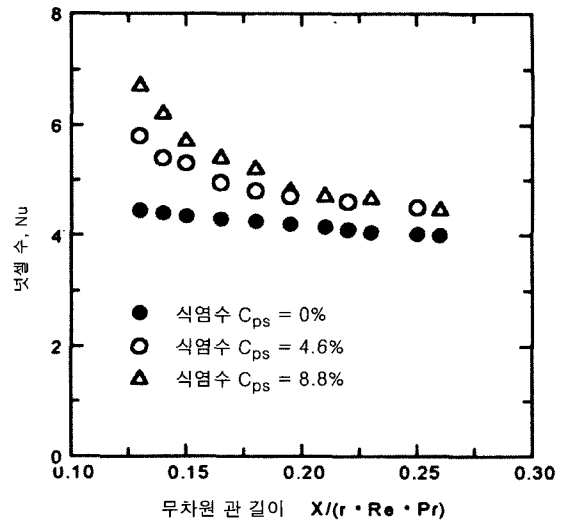


[그림 5] 이경입자의 혼합에 의한 압력손실과 충전율의 관계

에 따른 강한 가교작용에 의한 점성의 증대를 동반하는 체동효과를 이용하려는 시도가 이루어지고 있다.

고체입자와 기능성 열유체의 혼합효과

- 유동저항경감
 - 혼합한 고체입자의 체적농도가 같을 때는 입자직경이 클수록 혼합액의 점성이 작아지고, 특히 고속일수록 유동저항이 상대적으로 감소한다.
 - 구형일수록 항력계수가 작아져 유동저항이 감소하게 된다.
 - 다른 직경을 가진 입자의 혼합효과 : 큰 구형입자와 작은 구형입자를 분산한 혼합액에서는 그림 5에 나타난 것처럼 큰 입자는 관 중앙에 모이고, 작은 입자는 관 벽 근처로 분급(구)된다. 소위 소-팅(sorting) 효과가 나타난다. 관 유동저항은 관벽의 작은 입자 유동에 지배되기 때문에, 같은 유동저항일 때에는 크고 작은 입자를 혼합한 쪽이 고체의 충전비율(packaging factor, PF)이 커져 많은 고체를 수송할 수 있다. 그림 5는 액층보다 가벼운 크고 작은 구형입자를 혼합한 경우로 소-팅 현상에 의해 큰 입자의 비율을 증가시킬수록 압력손실이 감소하게 되어 극소값을 나타낸 뒤 큰 입자가 더욱 증가하면 다시 압력손실이 증대하게 된다. 이런 현상으로부터 관 유동저항을 같게 하면 역으로 압



[그림 6] 넷셀수의 무차원 관축길이에 따른 변화

력손실의 최소값을 나타내는 혼합비율에서 구상고체의 최대수송량을 얻을 수 있다.

• 열전달율 향상

관내의 열전달율 증대는 일반적으로 유속 증대에 따른 온도경계층 두께의 감소나 난류촉진에 의해 이루어지지만, 유체의 열물성 변경이나 미세입자의 경계층내에서의 교반효과에 따라서도 가능하다. 즉, 관내 열전달율 h 는 열전도율 λ 와 비열 C_p 에 비례하여 증대한다.

따라서 유체층에 열전도율이나 비열이 큰 미립자를 혼합분산함으로써 겉보기 열전도율이나 비열을 증대시켜 열전달율을 증대시킬 수 있게 된다.

그림 6은 입자직경 $100\mu\text{m}$ 인 폴리스틸렌 입자를 5.2%의 식염수에 혼합한 혼합수용액의 국소 그레이즈 수 $Gz \{x/(rRePr)\}$ 와 넷셀수 Nu 의 관계를 폴리스틸렌입자의 농도 C_{ps} 를 변수로 하여 나타낸 것이다. 식염수뿐만 아니라 고체입자의 농도가 증가할수록 Nu 가 크게 증가함을 볼 수 있다. 이와 같은 열전달율의 증가는 주로 폴리스티렌입자의 열전도율이나 비열이 식염수에 비해 그다지 크지 않다는 것과 충전입자에 의한 온도경계층내의 혼합작용에 의한 것으로 생각된다. 또 관 입구에서의 거리 X 의 증대, 즉 하류로 향할수록 열전달율이 감소하는 것은 분산입자가 하류로 향함

에 따라 관 내벽에서 관 중앙으로 이동함으로써 온도 경계층의 교반효과가 감소함에 따른 것이다.

잠열 이용 열유체

빙수 슬러리(역상 얼음)의 관내 수송특성

- 빙수 슬러리의 배관축소효과

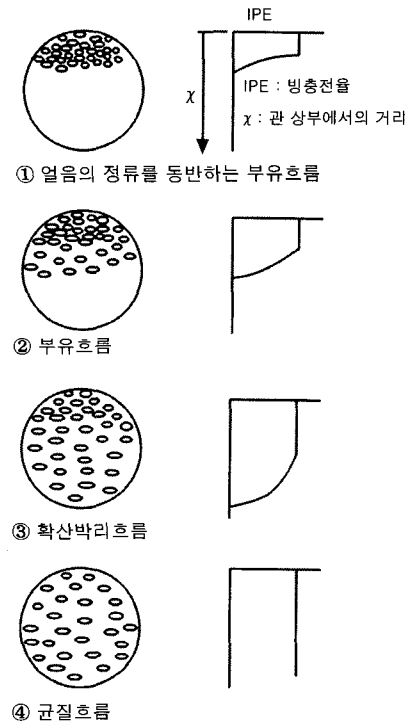
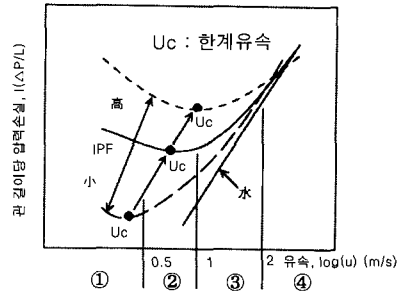
얼음은 큰 용해잠열량을 가지고 있기 때문에 같은 열량을 수송하는 경우 냉수의 관내수송에 비해 관 직경을 크게 줄일 수 있어 배관설비 시공비용을 경감할 수 있다. 예를 들면 IPF=24%인 빙충전율에서 빙수 슬러리 쪽이 냉수만인 경우보다 관직경이 1/2 정도가 된다.

- 빙수 슬러리의 관내유동거동

빙수 슬러리는 밀도가 작은 얼음입자와 물의 혼합체이고, 관내 수송시에는 그 유속에 따라 얼음조각과 물이 분리되어 흐르는 경우도 있어 그 유동상태는 다양한 변화를 가지게 된다.

그림 7은 빙충전율(IPF)이 10% 이하일 때 빙수 슬러리의 관내평균유속 U 와 압력구배 i 의 관계 및 그 유동상태를 나타낸 것이다. 평균유속 U 가 약 0.5m/s 이하인 저속영역에서는 밀도가 작은 얼음입자가 부력에 의해 관 상부로 모이는 퇴적층과 그 아래를 흐르는 물층이 명확하게 분리되는 상태로, 일부의 얼음층군은 정류를 동반하면서 유동한다. 이와 같은 얼음의 퇴적흐름에서는 얼음입자군이 관벽부분을 습동하면서 흐르기 때문에 압력구배도 커진다.

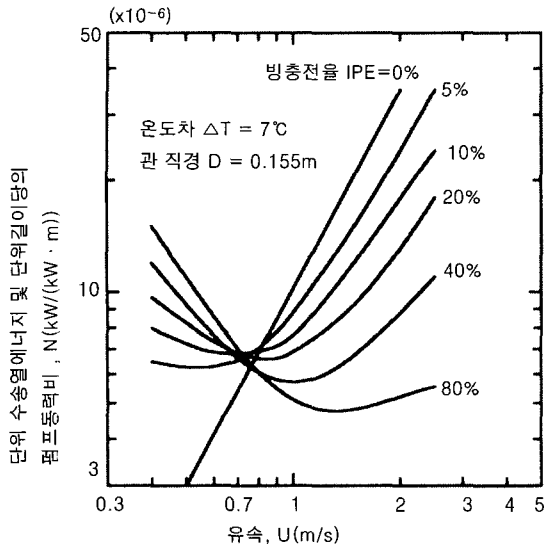
그림 7에 나타난 것처럼 유속이 빨라짐에 따라 퇴적층 하부의 얼음입자 일부가 그 아래의 물과 함께 유동하면서 최소압력구배를 나타내는 부유흐름영역이 된다. 그러나 유속이 1m/s 이상인 영역에서는 유속이 빨라지면서 물층과 얼음퇴적층에 강한 전단력이 작용하여 얼음입자가 물층으로 박리확산하고 관내에 얼음입자의 농도분포가 형성되면서 압력구배가 커지는 확산박리흐름영역이 되고, 이 때는 물만의 압력구배에 가까워진다. 평균유속 $U > 2m/s$ 인 고속영역에서는 얼음입자가 고속이면서 관 전체에 균일하게 분포되는 균질



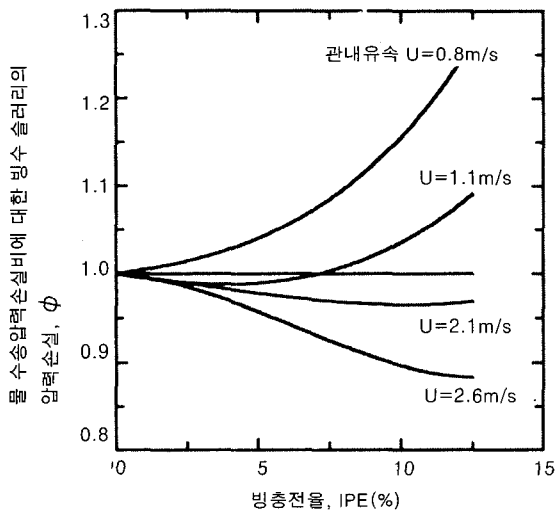
[그림 7] 빙수 슬러리의 관내유동 압력손실과 흐름상태

흐름영역이 된다.

한편 큰 빙충전율(IPF>10%)일 때에는 얼음입자의 충전비율이 커져 물과 얼음입자의 상대속도차가 감소하고 얼음입자끼리의 충돌빈도가 증대함에 따라 얼음입자의 소결(sintering)에 의한 얼음기둥(얼음 플러그)이 생성되면서 일정한 속도영역의 형성과 관벽 근처에서 수막층에 의한 속도분포의 형성이 이루어지는 2층 흐름이 된다. 이와 같은 흐름은 빙감유체(Bingham fluid)로 취급할 수



[그림 8] 빙수 슬러리 수송동력비와 관내 빙 슬러리 유속의 관계



[그림 9] 빙수 슬러리의 압력손실비와 빙충전율의 관계

있어 빙감유체모델에서의 해석이 가능하다.

그림 8은 관 직경 $D=0.155\text{m}$ 인 관에 빙 슬러리를 흘렸을 때(물만인 경우는 공급·회환온도차를 7°C 로 한다) 단위배관길이(m) 및 수송 열에너지(kW)에 대한 빙수

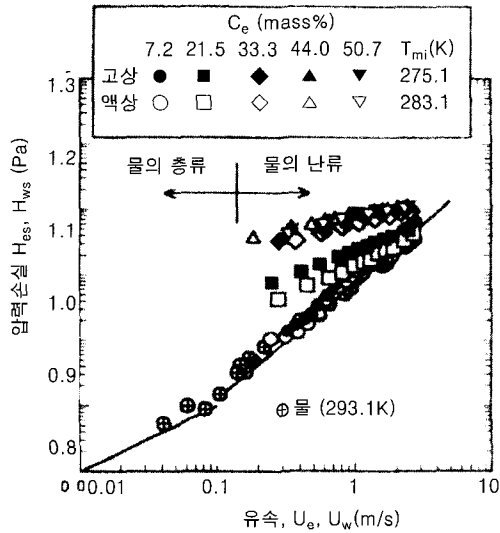
슬러리 수송동력(kW)의 비 N 과 평균유속 $U(\text{m/s})$ 의 관계를 빙충전율 IPF를 변수로 하여 나타낸 것이다. N 의 값은 유속이 빨라짐에 따라 감소하다가 극소값을 나타낸 뒤 증가하게 된다. 이 때 관내평균유속이 0.7m/s 이상에서 N 의 값은 물보다 작아지는데, 그 값은 IPF가 증가하고 특히 고속영역에서 보다 크게 감소하게 된다.

그림 9는 무차원 압력손실 $\phi \{ \Delta P_s / \Delta P_w ; \Delta P_s, \Delta P_w \}$ 는 빙 슬러리와 물의 압력구배}와 IPF의 관계를 평균유속 U 를 변수로 하여 나타낸 것이다. 저유속영역에서는 ϕ 값이 1 이상이 되어 빙수 슬러리의 압력손실은 물보다 크게 된다. 그러나 고속으로 됨에 따라 ϕ 값이 1 이하로 되는 영역이 나타나고, 빙수 슬러리의 압력손실이 감소되는 흥미로운 현상이 나타난다. 이 현상은 전술한 유동저항 경감제에 의한 톰스효과와 동등한 효과가 빙수 슬러리에서 생긴 것이라고 생각된다. 또 혈관내의 혈액류에서 보였던 점성이 작은 액막이 관벽에 존재하여 유동저항을 경감하는 시그마효과나 윤활액막효과 등에 의해 빙수 슬러리의 압력손실이 감소하였다고 생각할 수 있어 앞으로의 연구과제이다.

잠열 마이크로 에멀전

기름과 물처럼 서로 섞이지 않는 2가지 액체의 한 쪽 액이 다른 쪽 액 속으로 분산한 것을 에멀전(emulsion, 유탁액)이라 하고 있다. 물 속에 기름을 적상으로 미세화하여 분산시킨 것을 O/W형 에멀전 또는 마이크로 에멀전(micro-emulsion)이라 한다. 사용하는 계면활성제로는 일반적으로 비이온계 및 음이온계 계면활성제가 쓰이고, 잠열축열제로 n-알칸계 유체는 균질기(homogenizer) 등으로 평균입자경 $1\sim 5\mu\text{m}$ 정도로 미세화하여 안정하고 유동성이 우수한 잠열 마이크로 에멀전을 생성시킨다. 저온 잠열축열제로는 테트라 데칸($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$, 융점 5.8°C , 잠열 229kJ/kg), 펜타 데칸($\text{C}_{15}\text{H}_{32}$, 융점 9.8°C , 잠열 158kJ/kg) 등이 있고, 고온 잠열축열제로서 n-알칸은 고탄소분자·고융점인 에이코산($\text{C}_{20}\text{H}_{42}$, 점 37°C)서 옥타코산($\text{C}_{28}\text{H}_{58}$, 융점 61.5°C) 정도인 것이 이용된다. 어느 것이나 잠열량은 250kJ/kg 정도이다.

이런 종류의 잠열 마이크로 에멀전에는 비이온 계면활성제인 폴리에틸렌글리콜이나 스테아릴 에테르 등이



[그림 10] 잠열 마이크로 에멀전의 압력손실과 유속의 관계

사용되고 있다. 또 미세한 잠열축열재의 분산성 향상을 위한 분산제로서 음이온 활성제인 ABS(alkylbenzene sulfonate) 등, 그리고 발포방지제가 잠열 마이크로 에멀전에 첨가된다. 잠열 마이크로 에멀전 속의 축열재가 응집함에 따른 비대화현상으로 인한 분산상태 악화는 균질기를 이용한 물리적 교반으로 에멀전을 재생할 수 있다.

그림 10은 관 직경 16mm, 길이 1m인 직관을 냉방용 저온 잠열 마이크로 에멀전이 유동할 때의 압력손실 H_{es} 와 관내유속 U_e 의 관계를 나타낸 것으로, 잠열 에멀전 농도 $C_e=7.2\%$ 에서는 물만인 경우의 H_{es} 와 거의 같지만, 고농도가 될수록 물만인 경우보다 잠열 에멀전의 압력손실이 꽤 커진다. 또 저온 잠열축열재가 응고될 때의 압력손실이 액상상태일 때보다 각 에멀전 농도에서 크게 되는 흥미로운 거동을 알 수 있다. 이것은 분산질이 액상인 경우에는 분산액적내 순환으로 인해 고상인 경우보다도 분산액적의 저항계수가 작아지는 것으로 설명되고 있다. 이와 같이 잠열축열재의 고상과 액상상태에서 압력손실이 다른 점은 열교환기내에서의 압력손실을 계측하여 액상의 응고율(또는 고상

의 용해율)을 예상하는데 이용할 수 있고, 잠열축냉재(또는 채냉열)의 종류를 판정할 수 있게 해 준다.

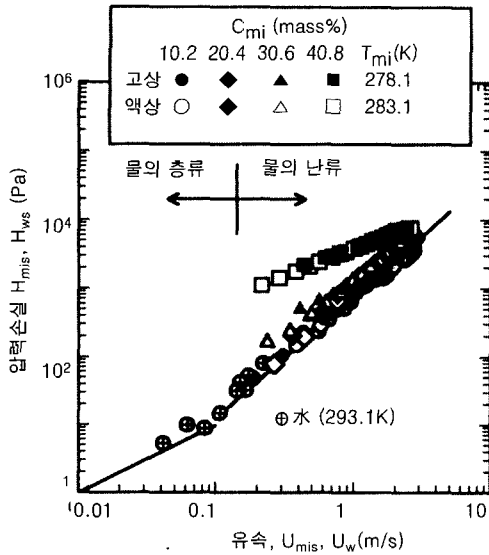
이런 종류의 잠열 마이크로 에멀전은 수송성이 풍부한 것으로, 미세축열재를 펌프로 반송할 수 있어 종래 축열재를 고정하고 열매체로 열에너지를 수송하던 방법보다 배관경의 축소나 설비의 경감을 얻을 수 있다. 그러나 이런 종류의 에멀전은 비뉴우튼 거동을 나타내고 큰 점성을 가지기 때문에 열교환기내에서의 열교환에 필요로 하는 유동을 위한 동력을 증대시킨다. 따라서 잠열 에멀전을 직접 유동시키지 않고 냉(또는 온)공기를 기포군으로 하여 잠열 에멀전층에 버블링(bubbling)시키는 직접접촉 열교환으로 축냉열(또는 채냉열)하는 방법 등이 고안되고 있다.

잠열 마이크로캡슐

잠열 마이크로캡슐은 연속상으로서의 물 등에 분산상으로서의 잠열축열재를 고분자막으로 피복하여 캡슐화한 것이다.

난방·급탕용인 고온 잠열축열재에는 고용점의 n-알칸류가 채용되고 있다. 한편 저온 유기잠열축열재로는 n-알칸류인 테트라 데칸, 헵타 데칸이나 cyclohexane 등이 있고, 캡슐재로는 멜라민수지(melamine resin) 피복 등의 비수용성 1층막이 채용되고 있다. 그리고 저온 무기잠열축열재에는 유산1수화염($H_2SO_4 \cdot H_2O$, 용점 $8.5^\circ C$, 잠열 $162kJ/kg$), 염산리튬3수화염($LiClO_3 \cdot 3H_2O$, 용점 $8^\circ C$, 잠열 $252kJ/kg$) 등이 있다.

잠열 마이크로캡슐의 압력손실과 관 평균유속의 관계를 그림 11에 나타내었다. 잠열축열재의 농도 C_{mi} 20.4%까지는 물과 동등한 압력손실값을 나타내고, $C_{mi}=40.8\%$ 에서 급격하게 압력손실이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또 잠열축열재가 고상 및 액상상태에서도 거의 같은 압력손실이 되어 그림 10에서 관찰된 잠열 에멀전과는 다른 거동을 나타낸다. 이것은 축열재를 캡슐화함으로써 연속상인 물과 잠열축열재가 직접접촉하지 않기 때문으로 생각되며, 캡슐 피복과 물의 특성에 따라 압력손실이 변하게 된다. 그리고 잠열 마이크로캡슐인 경우가 잠열 에멀전에 비해 압력손실값도 작다는 것을 알 수 있다.



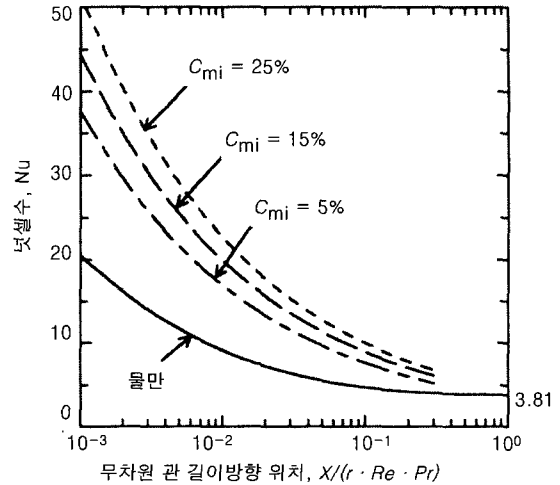
[그림 11] 잠열 마이크로캡슐의 압력손실과 유속의 관계

잠열 마이크로캡슐 혼합층의 겉보기 열전도율 λ^* 나 비열 C_p^* 는 당연히 분산체로서의 미세 잠열축열재와 물 등의 열매체가 가지는 열전도율이나 비열, 그리고 혼합비율에 따라 결정된다.

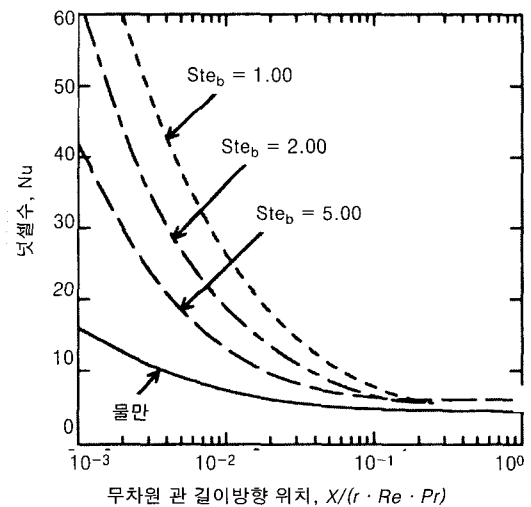
마이크로캡슐의 농도 C_{mi} 를 변화시켜 축열재를 상변화시키는 경우의 넛셀수 Nu 와 관 길이방향의 위치 $X/(rRePr)$ 의 관계를 그림 12에 나타내었다. 또 $\lambda_c/\lambda_f=4$, 페크레수 $Pe (D \cdot U_m/\alpha=10^4)$, 스테판수 $St_e \{ \rho_{mc} C_{pms} (T_w - T_m) / (\rho_f C_{mi} L) \} = 0.5$ 이다.

그림 12에서 마이크로캡슐의 농도 C_{mi} 가 증대됨에 따라 Nu 가 증가하는 것을 볼 수 있다. 농도 C_{mi} 의 증대는 λ^* 나 C_p^* 의 변화 외에 온도경계층 내에서의 축열재 상변화에 따른 온도의 균일화를 촉진하게 되어 전열면과 온도경계층내 마이크로캡슐 슬러리의 온도차를 크게 하고, 결과적으로는 온도구배의 증가를 가져와 열전달율이 증대하게 된다. 또 마이크로캡슐의 온도경계층내 슬러리의 교반효과도 온도가 증대함에 따라 촉진되어 열전달율이 증가하게 된다.

그림 13은 잠열 마이크로캡슐의 농도 $C_{mi}=0.15$ 일 때 스테판수 St_e 의 효과를 검토한 것으로, St_e 수의 감

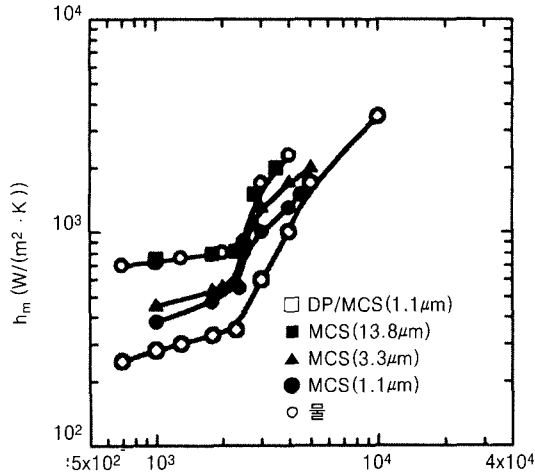


[그림 12] 넛셀수와 무차원 관 길이위치의 관계 (변수: 잠열 마이크로캡슐의 농도)



[그림 13] 넛셀수와 무차원 관 길이위치의 관계 (변수: 스테판수)

소, 즉, 잠열량 L 의 증가에 따라 평균 넛셀수 Nu_m 이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림 12에서 나타난 것처럼 잠열량의 증대는 온도경계층내의 온도균일화를 촉진하고, 결과적으로 온도구배가 증가하게 됨으로써 열전달율의 증가를 가져오게 된다.



[그림 14] 잠열 마이크로캡슐에 의한 평균 열전달율과 레이놀즈수의 관계

그림 14는 관 내경 $D=10\text{mm}$, 길이 30m 인 관 내에서 평균열전달율 h_m 과 레이놀즈수 Re 의 관계를 잠열 마이크로캡슐(축열재로 펜타 데칸을 충전)의 직경을 $d=1.1\sim 13.8\mu\text{m}$ 로 변화시켰을 때의 효과를 조사한 것으로, 그 직경이 증가함에 따라 h_m 값이 증가함을 볼 수 있다. 그러나 이 마이크로캡슐의 증가는 캡슐의 전단력에 의한 파괴나 열매체와의 밀도차 증가에 의한 상분리 등을 가져온다. 이 문제를 조금이라도 경감하기 위한 시도로서, 직경 $1.1\mu\text{m}$ 인 미세 캡슐에 약 20%의 직경 $20\mu\text{m}$ 인 강도가 강한 모조 마이크로캡슐(dummy microcapsule)을 충전(그림 14에서는 DP/MSC($1.1\mu\text{m}$)로 나타난다)하면 $13.8\mu\text{m}$ 의 결과와 같은 열전달율 h_m 을 나타내는 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

또 마이크로캡슐은 충전축열재와 열매체가 완전히 분리하여 상호간의 순도를 유지하므로, 축열재와 축냉열재를 별개의 마이크로캡슐에 충전하여 축열기능과 축냉열기능을 가지는 마이크로캡슐 슬러리를 이용할 수도 있고, 전열축진이라는 입장에서 축열량이 작은 쪽 마이크로캡슐의 입자경을 크게 하는 것도 흥미로운 것이다. 그리고 큰 입자일수록 유동저항의 경감효과도 기대된다.

크래스레이트

크래스레이트(clathrate)는 일정 종류의 기체(guest 분

자)를 물(host 분자)에 혼합하고 일정 압력에서 냉각(방열)함으로써 생성시키는 수화물이다. 또 이 포접수화물을 가열(흡열)하면 다시 기체와 물로 분해된다. 따라서 기체의 종류와 그 압력상태에 따라 빙점 이상(0°C)에서의 포접형 수화물의 생성 및 분해온도를 제어할 수 있어 그 생성·분해열도 비교적 크고 유망한 저온축냉열매체이다. 저온 크래스레이트재로는 대기압 레벨에서 작동하는 프레온계인 HCFC-141b(CCl_2FCH_3 , 생성온도 8.5°C , 생성열 285kJ/kg), HCC-30(CH_2Cl_2 , 생성온도 1.8°C , 생성열 229kJ/kg), HCFC-21(CHCl_2F , 생성온도 4.1°C , 생성열 270kJ/kg) 등이 있다. 현재는 대상이 되는 기체로 비교적 저압력조건에서 크래스레이트를 생성하는 대체 프레온계 냉매가 고려되고 있지만, 환경문제를 고려하여 프레온계 이외의 프로판, 부탄 등의 기체를 게스트 분자로 하는 크래스레이트에 관한 검토도 이루어지고 있다. 그 외 액-액형 크래스레이트도 유망한 축냉열매체라고 할 수 있는데, 앞으로의 연구가 기대된다.

결론

여기서는 유체에 열적 기능을 부여한 여러 가지 기능성 열유체의 여러 현상의 이용방법 등을 소개하면서도 지면관계상 유동성을 가진 기능성 열유체로 한정하였다. 그 중 현열 이용 기능성 열유체로는 각종 유동저항 경감제에 대해 해설하고, 그 특징과 환경조화형 유동저항경감제를 제안하였다. 그리고 액층에 고체입자를 충전한 혼합체는 열전달율 촉진과 유동저항경감에 기여한다는 사실을 서술하고, 고-액 혼상류에 의한 열에너지의 유효이용에 대해서도 서술하였다. 또한 고-액 상변화 이용 잠열축열재와 열매체를 혼합한 것으로서 빙수 슬러리를 비롯한 각종 잠열 슬러리의 열전달 및 유동특성에 대해 해설하고, 이러한 종류의 잠열 슬러리가 축열 시스템의 고효율화 및 풍부한 기동성을 제공한다는 것을 밝혔다. 끝으로 환경조화형 열에너지 유효이용기술로서 기능성 열유체라는 것은 새로운 개념이고, 예전부터 시행되어 왔던 열에너지 이용기술 등을 직시하여 앞으로 이런 분야에서의 사용 가능성에 대해 이해하였으면 한다. (㉔)