

나노 유체의 전달 물성치 예측 모델 기술 분석

이민서^a · 이형주^{a,*}

Technical Analysis of Prediction Models for Transport Properties of Nanofluids

Minseo Lee^a · Hyung Ju Lee^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: hj.lee@pknu.ac.kr

ABSTRACT

By mixing nano-size catalysts into hydrocarbon aviation fuels which are used as coolants in active regenerative cooling systems, the endothermic decomposition reaction is facilitated leading to increased cooling efficiency. In order to apply these nanofluids as fuel, it is essential to acquire their transport properties for understanding the internal flow and heat transfer characteristics. In this study, therefore, the viscosity and thermal conductivity prediction models are analyzed based on the shape of nanoparticles mixed in fluids. Regarding viscosity, we categorized the prediction models with spherical and nonspherical particles while for thermal conductivity, its prediction models are classified with spherical, nonspherical, ellipsoidal, and plate-like particles. Even though these models perform particularly well with low volume fractions near room temperature conditions, further validation is necessary through experimentation under high-temperature conditions in the future.

초 록

능동재생냉각시스템의 냉매로 사용되는 탄화수소 항공유에 나노입자 형태의 촉매를 혼합하면 흡열 분해 반응이 촉진되어 재생냉각 효율을 더욱 높일 수 있다. 이러한 나노 흡열 연료를 사용하기 위해서는 내부 유동 및 열전달 파악을 위해 나노입자의 포함에 따른 전달 물성치 획득이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 나노입자의 모양에 따른 점도와 열전도도 예측 모델을 분석하였다. 점도의 경우, 구형 입자와 비구형 입자의 점도 예측 모델로 구분하였으며, 열전도도의 경우, 구형 입자, 비구형 입자, 타원형 입자, 판형 입자의 열전도도 예측 모델로 구분하여 정리하였다. 이러한 모델들은 특히 낮은 부피분율에서 예측성능이 뛰어나지만, 고온 조건에서의 예측성능은 향후 실험을 통해 검증이 필요하다.

Key Words: Hypersonic Vehicle(극초음속 비행체), Regenerative Cooling System(재생냉각시스템), Nano-size Catalyst(나노촉매), Viscosity(점도), Thermal Conductivity(열전도도)

Received 16 November 2023 / Revised 10 February 2024 / Accepted 15 February 2024

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

ϕ	: Volume fraction of nanoparticles
μ_{nf}	: Viscosity of nanofluid
μ_{bf}	: Viscosity of base fluid
k_{nf}	: Thermal conductivity of nanofluid
k_{bf}	: Thermal conductivity of base fluid
k_p	: Thermal conductivity of nanoparticles
k_{eff}	: Effective thermal conductivity
ρ_p	: Density of nanoparticles
$c_{p,p}$: Specific heat of nanoparticles
k_B	: Boltzmann constant

1. 서 론

극초음속 비행체는 지구 대기권 내에서 마하 5 이상의 속도로 순항하는 비행체로서[1], 추진 기관으로는 스크램제트(Supersonic Combustion Ramjet) 엔진을 사용한다. 스크램제트 엔진은 로켓 추진기관 대비 높은 비추력 특성과 광범위한 속도영역에서 운용이 가능한 장점을 가지고 있어 민간용과 군사용으로 모두 활용이 가능하다 [1,2]. 하지만 실용적인 극초음속 비행체를 개발하기 위해서는 동체 표면의 공력 가열 및 엔진 연소실의 고온 가열 문제와 초음속 연소실에서의 공기와 연료의 효과적인 혼합 및 연소 문제를 극복해야만 한다[1]. 이를 해결하기 위하여 탄화수소 연료의 흡열반응을 이용하는 능동재생냉각시스템 관련 기술이 활발하게 연구되고 있는데[3-5], 극초음속 비행체에 탑재된 탄화수소 항공유가 동체와 엔진의 미세채널 내부를 냉매로서 순환하게 되면 흡열 분해되면서 많은 양의 열을 흡수할 수 있을 뿐만 아니라 고분자량의 탄화수소가 수소를 포함한 저분자량 탄화수소들로 분해되므로[6], 이와 같이 흡열분해된 연료를 스크램제트 엔진의 연소실로 공급하면 초음속 유동에서의 연소효율 또한 크게 향상시킬 수 있다.

최근 이러한 탄화수소 항공유를 이용한 극초음속 비행체용 능동재생냉각시스템의 냉각 효율

과 스크램제트 엔진의 초음속 연소성능을 극대화하기 위하여 나노입자를 탄화수소 액체연료에 혼합하는 연구들이 진행되고 있다[7]. 기존의 연료에 금속이나 CNT(Carbon Nano Tube), 그래핀(Graphene)과 같은 탄소 나노 물질을 혼합할 경우, 나노 물질의 높은 열전도도로 인해 연료의 유효 열전도도를 상승시켜 재생냉각 채널 내부에서의 열전달을 촉진할 수 있다. 또한, 흡열반응 촉매와 나노 물질을 결합하면, 동일한 반응 조건에서 더욱 높은 흡열량을 달성시킬 수 있을 뿐만 아니라 분해 생성물 중 수소의 비율을 높일 수 있고, 더 낮은 온도에서도 흡열 분해 반응이 가능하므로 탄화수소 연료가 고온에 노출되는 경우 불가피하게 발생하는 코킹 생성 또한 억제할 수 있다.

이와 같이 나노입자가 혼합된 탄화수소 항공유를 극초음속 비행체용 능동재생냉각시스템에 적용하기 위해서는 나노입자 포함에 따른 미세채널 내부에서의 유동과 열전달 특성을 파악해야 하므로 이에 따른 열물리적 물성치 획득이 필수적이다. 나노 유체에 대한 점도와 열전도도는 대부분 베이스 유체와 나노입자의 점도, 열전도도 그리고 첨가된 나노입자의 모양에 따라서 결정된다. 그러므로 탄화수소 연료의 종류와 나노입자의 혼합 비율, 특히 입자의 모양에 따른 전달 물성치 예측기법 개발이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 나노입자의 모양에 따른 점도와 열전도도를 예측할 수 있는 모델들에 대한 현재까지의 연구 동향과 주요 개발 결과를 정리하였다.

2. 점도 예측 모델

점도 예측 모델은 대부분 베이스 유체의 점도와 나노입자의 부피분율의 함수로 간단하게 나타내며 구형 입자에 대한 간단한 점도 예측 모델이 가장 많이 개발되어 있다. 이러한 구형 입자 모델은 식이 간단하고, 매개변수가 적어 적용하기 쉽다는 장점이 있지만, 입자가 가지는 모양에 따른 변화를 고려할 수 없다. 따라서 원기둥

모양을 가지는 CNT 입자나 2차원 평면구조를 가지는 그래핀 입자와 같이 구형이 아닌 입자를 포함한 나노유체에는 적용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 입자의 모양과 크기를 고려할 수 있는 점도 예측 모델을 사용해야 한다.

따라서, 2.1절에서는 구형 입자를 포함하는 나노유체의 점도 예측 모델을 정리하고, 2.2절에서는 특정한 모양을 가지는 나노입자를 포함한 나노유체의 점도 예측을 위한 비구형 입자의 점도 예측 모델을 기술하였다.

2.1 구형 입자의 점도 예측 모델

구형 입자가 포함된 나노유체의 점도를 예측하기 위해서 사용되는 대표적인 식은 Einstein model[8]이 있고, 아래 Eq. 1과 같다.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = [1 + 2.5\phi] \quad (1)$$

이는 부피분율 0.02 이하 ($\phi < 0.02$)의 아주 작은 부피분율을 가지는 나노유체의 점도 예측에 사용된다. 이후, Einstein model을 기반으로 구형 입자를 가지는 나노유체의 점도 예측을 위한 모델들이 개발되었는데, 대표적으로 Brinkman model[9]이 있고, 아래 Eq. 2와 같다.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left[\frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \right] \quad (2)$$

Brinkman model은 Einstein model을 변형하여 평균 부피분율을 0.04까지 확장한 식으로 더 높은 부피분율을 가지는 나노유체에도 적용할 수 있도록 개발되었다. 다음으로 Batchelor model[10]은 Einstein model에서 브라운 운동 효과를 고려하여 식을 확장하였으며 식은 아래 Eq. 3과 같다.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = [1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2] \quad (3)$$

다음으로 Lundgren model[11]은 입자의 부피

분율(ϕ)의 단위로 테일러 급수를 확장한 식이다. 다음 Eq. 4와 같으며, 여기에서 만약 세 번째 항 이상의 항들이 무시된다면, Einstein model과 동일한 형태로 나타난다.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1 - 2.5\phi} = (1 + 2.5\phi + 6.25\phi^2 + \dots) \quad (4)$$

2.2 비구형 입자의 점도 예측 모델

2.1절의 구형 입자 예측 모델은 낮은 부피분율에서 어느정도 나노유체의 점도를 예측할 수 있지만, 예측성능을 더욱 향상시키기 위해서는 나노입자의 모양에 대한 매개변수를 포함한 식을 사용하는 것이 적합하다.

Maron and Pierce model[12]과 Krieger and Dougherty (K-D) model[13]은 불규칙한 고체 입자의 현탁액 점도를 예측하는 상관식으로 입자의 모양과 크기에 따른 매개변수를 포함하고 있어 비구형 입자의 점도 예측에 적용할 수 있다.

Maron and Pierce model과 Krieger and Dougherty model은 각각 아래 Eq. 5, 6과 같다.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{-2} \quad (5)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \left(\frac{\phi}{\phi_m} \right) \right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (6)$$

위 식에 의하면 베이스 유체의 점도가 온도에 따라서 변화하기 때문에 온도에 따른 나노유체의 점도 변화 또한 고려할 수 있게 된다.

Eq. 5, 6에서 Maximum packing volume fraction(ϕ_m)[14]은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 입자가 충분히 많아져서 점도가 무한대가 되는 부피분율이다. 이는 입자의 모양 및 크기, 베이스 유체의 종류에 영향을 많이 받기 때문에 별도의 실험을 통한 측정이 필요하다.

다음으로 Eq. 6의 $[\eta]$ (Intrinsic viscosity)는 입자가 용액 속에서 이동하는데 걸리는 내부적인 저항을 표현하는 용액 내 선형 점도의 측정값으로서, 분자의 크기, 모양, 전하 등과 같은 분자

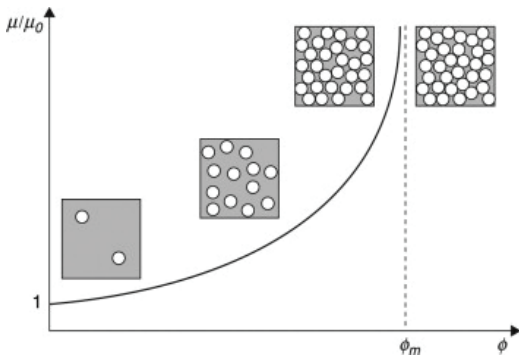


Fig. 1 Maximum packing volume fraction [14].

특성과 용액의 특성에 따라 결정되는 매개변수이다. 나노 유체의 $[\eta]$ 을 결정할 수 있는 방법은 두가지가 있는데, 첫 번째로는 Mark-Houwink 방정식[15]이며, 식은 아래 Eq. 7과 같다.

$$[\eta] = KM^a \tag{7}$$

위 식에서 K 는 Mark-Houwink constant, M 은 분자량으로서, K 와 a 는 특정 Polymer와 Solvent의 조합에 대하여 온도에 따른 값이 제시되어 있다. 두 번째로는 Barnes equation[16,17]이다. 이 식은 디스크 모양의 높은 종횡비(AR , 직경/두께)를 가지는 입자의 $[\eta]$ 를 예측할 수 있는 식이며, 다음 Eq. 8과 같다.

$$[\eta] = \frac{3 \times (AR)}{10} \tag{8}$$

이러한 비구형 나노유체 점도 모델의 예측성능은 Fig. 2~3과 같으며, 위 그림에서의 예측 대상은 2차원의 평면구조를 가지는 그래핀 입자를 포함한 나노유체이다. Fig. 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 K-D model 이 구형 입자에 대한 모델들에 비해서 실험값과 매우 유사한 결과를 보여 우수한 예측성능을 보유한 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 3은 입자의 부피분율에 대한 점도 비율을 나타낸 그래프로서, 암모니아(NH_3) 용액에 GNP(Graphene Nano Particle)를 혼합한 나

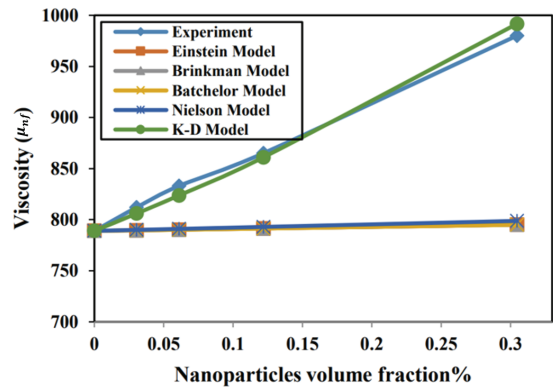


Fig. 2 Comparison of K-D model and prediction models for spherical particles [18].

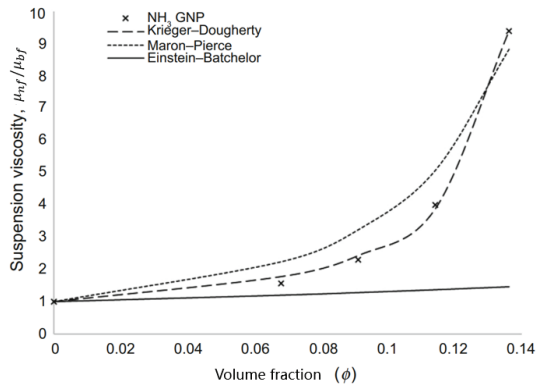


Fig. 3 Comparison the Maron - Pierce model and Krieger - Dougherty model [19].

노유체의 점도 실험값과 예측 모델인 Eq. 1, 2를 비교한 그래프이다. 여기에서 Intrinsic viscosity를 매개변수로 가지는 Krieger and Dougherty model이 가장 우수한 예측성능을 보유하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 Krieger and Dougherty model은 베이스유체의 점도와 부피분율뿐만 아니라 입자의 모양 및 크기를 고려하는 매개변수인 Maximum packing volume fraction(ϕ_m)과 Intrinsic viscosity $[\eta]$ 를 이용하여 나노유체의 점도를 예측하기 때문에 2차원 평면구조를 가지는 나노입자를 포함한 유체의 점도를 가장 우수하게 예측할 수 있는 모델이라고 판단된다.

3. 열전도도 예측 모델

나노유체의 열전도도 예측 모델은 일반적으로 베이스 유체의 열전도도, 혼합된 나노물질의 열전도도, 나노입자의 부피분율의 함수로 나타낼 수 있다. 열전도도 예측 모델 또한 점도 예측 모델과 마찬가지로 구형 입자에 대한 예측 모델이 가장 많이 개발되어 있지만 예측성을 향상시키기 위해서는 입자의 모양에 따른 적절한 모델을 사용해야 한다.

따라서 3.1절에서는 구형 입자의 열전도도 예측 모델을 정리하였고, 3.2절에서는 입자의 모양과 크기에 대한 매개변수를 포함한 비구형 입자에 대한 열전도도 예측 모델을 기술하였다.

나아가 더욱 정확한 열전도도 예측값을 얻기 위해서는 특정한 입자의 모양에 따라 다른 열전도도 모델을 사용하는 것이 효과적이다. 따라서 3.3절에서는 중형비가 큰 타원체의 입자를 가진 나노유체의 열전도도 예측 모델, 3.4절에서는 납작한 모양의 판형 입자를 가진 나노유체의 열전도도 예측 모델을 정리하였다.

3.1 구형 입자의 열전도도 예측 모델

구형 입자를 가지는 나노유체의 열전도도 예측에 주로 사용하는 모델에는 Maxwell model[20]이 있다. Maxwell model은 나노입자의 부피분율(ϕ)과 나노입자의 열전도도(k_p), 베이스 유체의 열전도도(k_{bf})만을 이용하여 나노유체의 열전도도(k_{nf})를 예측할 수 있으며 식은 아래 Eq. 9와 같다.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} \quad (9)$$

그러나 Maxwell model은 낮은 부피분율에서만 정확하게 예측할 수 있다는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 개발된 Bruggeman model[21]은 낮은 부피분율을 가지는 나노유체에 대해서는 Maxwell model과 비슷한 결과를 보이지만, 높은 부피분율을 가지는 나노유체에도 적용할 수 있는 특징을 가지는데, 식은 아래 Eq.

10, 11과 같다.

$$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = \frac{(3\phi - 1)\frac{k_p}{k_{bf}} + \{3(1 - \phi) - 1\} + \sqrt{\Delta}}{4} \quad (10)$$

$$\Delta = \left[(3\phi - 1)\frac{k_p}{k_{bf}} + \{3(1 - \phi) - 1\} \right]^2 + 8\frac{k_p}{k_{bf}} \quad (11)$$

이러한 Maxwell model과 Bruggeman model은 입자의 모양을 고려하는 매개변수는 포함하고 있지 않기 때문에 구형 입자가 아닌 입자를 포함한 나노유체의 열전도도 예측에는 적합하지 않다.

3.2 비구형 입자의 열전도도 예측 모델

비구형 입자를 가지는 나노유체의 열전도도를 예측하기 위해서는 입자의 모양에 따른 변화를 고려할 수 있는 매개변수를 포함해야 한다. 비구형 입자의 열전도도를 예측할 수 있는 모델로는 Hamilton-Crosser(H-C) model[22]이 있으며, 이는 Maxwell model의 식에서 입자의 모양 변화를 고려할 수 있는 항을 추가하였다. 식은 다음 Eq. 12와 같다.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + (n-1)k_{bf} + (n-1)\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + (n-1)k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} \quad (12)$$

여기에서 n 은 경험적 형상 계수(the empirical shape factor)로 다음 Eq. 13과 같이 나타낸다.

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (13)$$

여기에서 ψ 는 표면적에 대해 입자와 부피가 같은 구의 표면적 비율로 정의되는 입자 구형도이므로 경험적 형상계수 n 은 구형 입자의 경우 $n=3$, 원통형 모양의 경우 $n=6$ 으로 나타난다. 이러한 Hamilton-Crosser model은 모양에 상관없이 형상 계수를 안다면 나노유체의 열전도도를 계산할 수 있다는 장점이 있다.

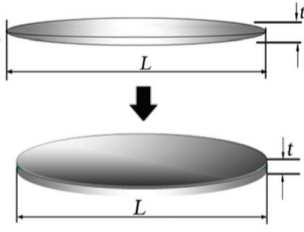


Fig. 4 Schematic diagram of nanoparticle as an equivalent oblate spheroid [23].

3.3 타원형 입자의 열전도도 예측 모델

비구형 입자를 가진 나노유체의 열전도도는 3.2절의 경험적 형상계수를 가지는 모델을 사용하여 예측할 수 있지만, 더욱 정확한 예측값을 얻기 위해서는 입자의 특정한 모양을 고려하여 개발된 모델을 적용하는 것이 적합하다.

나노입자의 모양이 길이가 길고 두께가 얇은 큰 종횡비를 가지는 타원체라면, 타원체의 두께, 길이, 종횡비를 고려한 열전도도 예측기법을 사용할 수 있다. Chu model[23]은 입자를 Fig. 4와 같이 타원체로 가정한 열전도도 예측 모델로서 Eq. 14와 같다.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{3 + 2\eta^2\phi / \left[k_{bf} \left(\frac{2R_k}{L} + 13.4\sqrt{t} \right) \right]}{3 - \eta\phi} \quad (14)$$

여기에서 R_k 는 계면 열저항, L 은 입자의 길이, t 는 입자의 두께를 의미한다. η 는 나노입자의 평균 평탄도 비율로서, 이에 대한 상세한 설명은 참고문헌[23]에서 확인할 수 있다.

Fig. 5에는 Chu model의 예측성능을 나타내었는데, 여기에서 나노유체는 입자를 종횡비가 큰 타원체로 가정할 수 있는 그래핀 입자를 포함한 나노유체이며, 보이는 바와 같이 263~323 K 사이의 다양한 온도 범위에서 그래핀 나노유체에 대한 열전도도 예측성능이 우수한 것을 확인할 수 있다.

Gao model[24]은 Chu model과 같이 입자를 타원체로 가정한 예측 모델로서, Chu model의 식에서 액체 내 나노입자들의 브라운 운동을 고려한 항을 추가하여 Eq. 15와 같이 나타낸다.

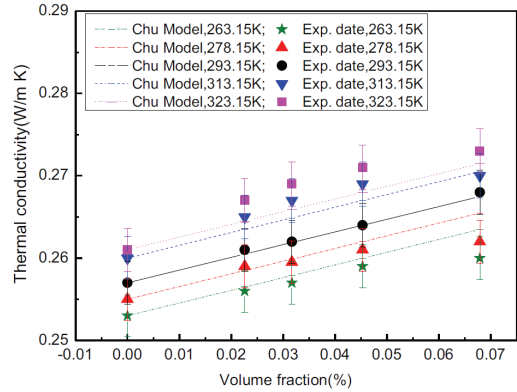


Fig. 5 Experimental and Chu prediction results for graphene nanofluids with different volume fraction [24].

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{3 + 2\eta^2\phi / \left[k_{bf} \left(\frac{2R_k}{L} + 13.4\sqrt{t} \right) \right]}{3 - \eta\phi} + \frac{\rho_p \phi c_{p,p}}{2k_{bf}} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu_{bf} r_c}} \quad (15)$$

여기에서 ρ_p 는 입자의 밀도, $c_{p,p}$ 는 입자의 정압 비열, k_B 는 볼츠만 상수, r_c 는 입자의 반지름인데, 타원체 입자의 r_c 는 입자와 부피가 동일한 구형 입자의 지름인 $d_{p,eq}$ 의 절반으로 정의하며, $d_{p,eq}$ 의 식은 아래 Eq. 16과 같다. 여기에서 $\nu_{non-sph}$ 은 나노입자의 부피이다.

$$d_{p,eq} = \left(\frac{6\nu_{non-sph}}{\pi} \right) \quad (16)$$

3.4 판형 입자의 열전도도 예측 모델

얇은 2차원 평면 구조를 가지는 나노입자를 포함한 나노 유체의 열전도도를 예측하기 위해서는 판형 입자를 가정할 수 있다. 다음 3.4.1절에는 원형판 모양을 가정한 예측 모델, 3.4.2절에는 사각형 판 모양을 가정한 예측 모델을 정리하였다.

3.4.1 원형판 모양 입자의 열전도도 예측 모델

Fig. 6에 보이는 바와 같이 유체 안에 원형 디

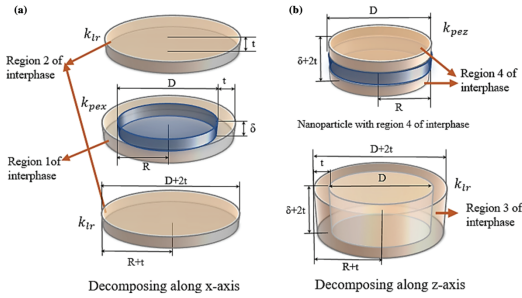


Fig. 6 Sketch of the decomposing region of a nanoparticle with interphase layer along (a) x-axis and (b) z-axis [25].

스크 모양의 나노입자가 포함된 나노유체의 열전도도를 예측하는 식에는 Zhai model[25]이 있다. Zhai model은 x축과 z축의 interphase 효과와 입자의 무작위 분포와 중형비, 이방성을 고려하기 위해서 Nan's model[26]을 활용하였다. 식은 아래 Eq. 17과 같다.

$$k_{eff} = k_{bf} \frac{3 + \phi_{eff} \left[2 \frac{k_{px}^{eff} - k_{bf}}{k_{bf} + L_x (k_{px}^{eff} - k_{bf})} (1 - L_x) \right]}{3 - \phi_{eff} \left[2 \frac{k_{px}^{eff} - k_{bf}}{k_{bf} + L_x (k_{px}^{eff} - k_{bf})} L_x \right]} + \frac{\frac{k_{pz}^{eff} - k_{bf}}{k_{bf} + L_z (k_{pz}^{eff} - k_{bf})} (1 - L_z)}{\frac{k_{pz}^{eff} - k_{bf}}{k_{bf} + L_z (k_{pz}^{eff} - k_{bf})} L_z} \quad (17)$$

여기에서 ϕ_{eff} 은 interphase layer를 포함한 입자의 부피분율이다. L_x 와 L_z 는 시트 모양을 가진 나노입자의 탈분극 계수로서, 이들은 아래 Eq. 18, 19와 같으며, 여기에서 p 는 interphase layer를 포함한 입자의 중형비를 의미한다.

$$L_x = \frac{\pi D}{4} \quad (18)$$

$$L_z = 1 - 2L_x \quad (19)$$

또한 Eq. 17에서 k_{px}^{eff} , k_{pz}^{eff} 은 각각 x축, z축 방향의 유효 열전도도이며 Eq. 20, 21과 같다.

$$k_{px}^{eff} = \frac{\delta}{\delta + 2t} \cdot \frac{Ak_p + BCk_{tr}}{A + BC} + \frac{2t}{\delta + 2t} \cdot k_{tr} \quad (20)$$

$$k_{pz}^{eff} = \frac{(\delta + 2t)k_{tr}k_{p1} + Ck_{tr}(2tk_{p1} + \delta k_{tr})}{(1 + C)(2tk_{p1} + \delta k_{tr})} \quad (21)$$

여기에서 δ 는 나노입자의 두께, t 는 interphase layer의 두께이며, k_{p1} 는 나노입자 z축 방향의 열전도도, k_{tr} 는 interphase layer의 열전도도이다. 또한 A, B, C 는 입자의 반지름(R), 입자의 열전도도(k_p), interphase layer의 열전도도(k_{tr})를 고려하여 단순화한 매개변수로서 각각 Eq. 22~24와 같다.

$$A = -\frac{2k_{tr}}{k_{tr} + k_p} \quad (22)$$

$$B = \frac{R}{R+t} \cdot \frac{k_p - k_{tr}}{k_{tr} + k_p} - 1 \quad (23)$$

$$C = \frac{(R+t)^2 - R^2}{R^2} \quad (24)$$

Zhai model은 Fig. 7에 보이는 바와 같이 interphase 효과를 고려하지 않은 다른 예측 모델들보다 더 나은 예측성능을 보유하고 있다. 또한, 포함된 입자의 부피분율이 작을수록 더욱 정확한 예측이 가능한 것을 확인할 수 있다.

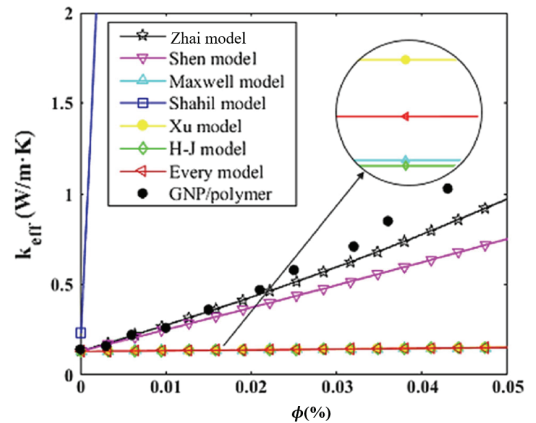


Fig. 7 Comparisons of different models at lower volume concentrations for Zhai model [25].

3.4.2 사각판 모양 입자의 열전도도 예측 모델

다음으로 Huang model[27]은 Fig. 8과 같이 나노시트를 사각형의 바닥 면을 갖는 입자로 가정한다. 하지만 Zhai model과는 달리 나노입자를 둘러싼 interphase layer는 무시하고, 상부 및 하부를 둘러싼 interphase layer만 고려한다.

Fig. 9와 같이 나노시트가 임의의 각 θ 을 가지면서 균일한 온도장에 놓여있는 것으로 가정하고 x축 방향의 유효 열전도도($k_{eff,x}$), z축 방향의 유효 열전도도($k_{eff,z}$)를 각각 구한 후, 평균 유효 열전도도($\overline{k_{eff}}$)를 유도한 식은 Eq. 25~27과 같다. 여기에서 δ 는 나노입자의 두께, t 는 interphase layer의 두께이다.

$$k_{eff,x} = \phi k_p + \frac{2t}{\delta} \phi k_{ir} + \left(1 - \frac{\delta+2t}{\delta} \phi\right) k_{bf} \quad (25)$$

$$k_{eff,z} = \frac{\delta+2t}{\delta} \phi \frac{(\delta+2t)k_p k_{ir}}{2tk_p + \delta k_{ir}} + \left(1 - \frac{\delta+2t}{\delta} \phi\right) k_{bf} \quad (26)$$

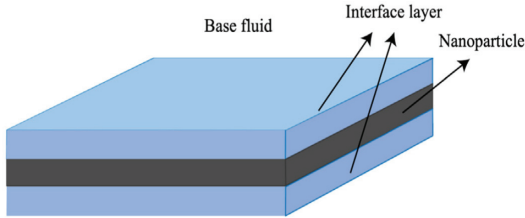


Fig. 8 Sketch of nanoparticle with interface layers [27].

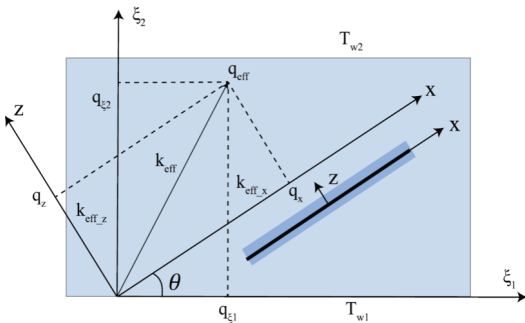


Fig. 9 Thermal conductivity analysis diagram of equivalent anisotropic material in field [27].

$$\overline{k_{eff}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{k_{eff,x}^2 \sin^2 \theta + k_{eff,z}^2 \cos^2 \theta} d\theta \quad (27)$$

이와 같이 Huang model에 의하여 도출된 평균 유효 열전도도 관계식 Eq. 27을 기반으로 하여, 나노유체의 예측 정확도를 더욱 향상시키기 위한 두 번의 개선(renovation)이 수행되었다. 이는 나노입자의 분포와 온도 변화가 열전도도에 미치는 영향을 추가적으로 고려함으로써 가능하였는데, 이러한 두 번의 renovation은 각각 다음에 설명하는 바와 같이 Particle-free renovation과 temperature renovation으로 구현되었다.

첫번째로는 나노입자가 베이스 유체 안에서 균일하게 분포되어 있다고 가정하는 Particle-free renovation이다. 액체에 고체 입자를 섞은 나노유체의 경우 나노입자가 베이스 유체에 무작위로 분포되어 있기 때문에 실제 열전도 경로에 영향을 미친다. 이를 고려하기 위해서 Fig. 10과 같이 나노입자가 모든 영역에 대해서 일정한 길이 L_0 를 가지면서 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. renovation 후의 유효 열전도도(k_{eff}^p)는 다음 Eq. 28과 같다.

$$k_{eff}^p = \bar{p} \cdot \overline{k_{eff}} + (1 - \bar{p}) k_{bf} \quad (28)$$

여기에서 \bar{p} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{p} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{2L_0(\cot\theta + 1)}{(2L_0 + \delta)\cot\theta + 2L_0 + L} d\theta \quad (29)$$

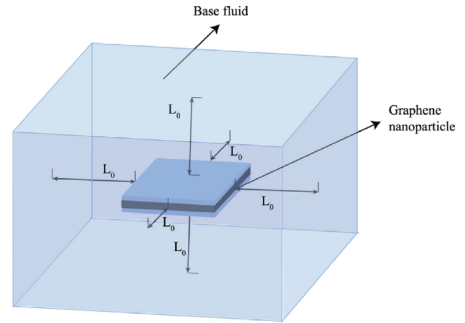


Fig. 10 3D schematic of nanofluids containing single graphene nanoparticle [27].

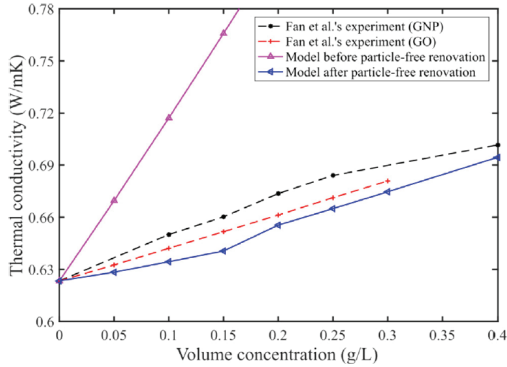


Fig. 11 The comparison of Huang models before and after particle-free renovation [27].

Fig. 11은 Particle-free renovation 전과 후의 예측성능을 비교한 결과로서, renovation 후의 예측성능이 더욱 향상된 것을 확인할 수 있다.

두 번째는 temperature renovation으로, 나노유체의 열전도도는 온도에 많은 영향을 받는데, 이에 따른 변화를 고려하기 위해 브라운 운동항을 추가하여 예측 정확도를 높였다. 두 단계의 renovation 과정을 거친 최종 Huang model은 다음 Eq. 30과 같다.

$$k_{eff} = k_{eff}^p + (1 - P_s) \frac{\rho_p \phi_c}{2k_{bf}} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_d \mu_{bf} \rho_{bf}}} + P_s \frac{\rho_p \phi_c}{2k_{bf}} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_d \mu_{bf} \rho_{bf}}} \quad (30)$$

여기에서 P_s 는 전체 나노입자에 대해서 크기가 5 nm 이하인 작은 입자의 비율이며, 두 번째와 세 번째 항에서의 브라운 운동 기호들은 Gao model과 동일하다.

Fig. 12에 판형 입자로 가정할 수 있는 2차원 평면구조인 그래핀 입자가 섞인 나노유체에 대하여 Huang model과 앞서 제시된 열전도도 예측 모델들의 예측성능을 함께 나타내었다. 그림에 보이는 바와 같이 2차원 평면구조를 가지는 그래핀 나노입자가 포함된 나노유체의 경우, 사각판 모양 입자를 가정한 Huang model이 가장 우수한 예측성능을 보유하고 있는 것을 확인할 수 있다.

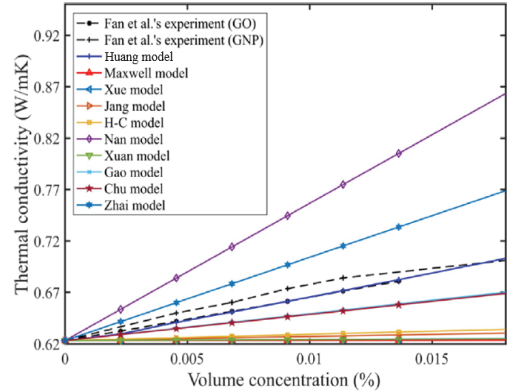


Fig. 12 Comparisons Huang model and different models at lower volume concentrations [27].

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 극초음속 비행체용 능동재생냉각시스템의 냉각성과 스크램제트 엔진의 연소성능을 향상시키기 위하여 탄화수소 항공유에 나노입자를 혼합하는 나노 흡열 연료 개발의 선행연구로서, 나노유체의 전달 물성치 예측 기술을 분석하였다.

우선 점도 예측의 경우, 구형 입자가 포함된 나노유체를 예측할 수 있는 대표적인 예측 모델로 Einstein model, Brinkman model, Batchelor model, Lundgren model 총 4가지를 제시하였다. 그리고 비구형 입자가 포함된 나노유체의 점도 예측을 위해서는 입자의 크기와 모양에 따른 변수인 Intrinsic viscosity($[\eta]$)와 Maximum packing volume fraction(ϕ_m)을 포함하는 Maron and Pierce model과 Krieger and Dougherty (K-D) model이 비구형 나노입자를 포함한 탄화수소 항공유의 점도 예측에 가장 적합하다.

열전도도 예측 모델의 경우에는 구형 입자의 열전도도를 예측할 수 있는 Maxwell model, Bruggeman model이 있으며, 경험적 형상 계수를 통해 비구형 입자의 열전도도를 예측할 수 있는 Hamilton-Crosser model이 있다. 또한 특정한 모양을 가진 입자의 열전도도 예측을 위해서 타원체 모양의 입자를 가진 나노유체의 열전도도 예측 모델인 Chu model과 Gao model, 판

형 입자의 interphase 효과를 고려한 Zhai model 과 Huang model을 사용할 수 있다.

이상에서 고찰한 바와 같이 본 연구를 통하여 확인된 나노유체의 점도 및 열전도도 예측 모델 들은 일반적으로 나노입자의 낮은 부피분율에서 더 나은 예측성능을 보유하는 것으로 알려져 있을 뿐만 아니라, 예측하고자 하는 나노유체에 포함된 나노입자의 형상에 따라 그에 적합한 특정 예측 모델을 사용해야만 정확한 예측이 가능하게 된다. 또한 본 연구의 모델들은 공통적으로 상온 조건에서만 그 성능이 검증되어 있다.

그러나 앞으로 개발될 나노입자를 포함한 탄화수소 항공유는 다양한 성분과 형태를 가지는 나노촉매가 여러 가지 혼합비율로 적용될 뿐만 아니라 극초음속 비행체용 재생냉각 미세채널 내부의 고온 조건에서 사용될 것이다. 따라서, 본 연구 그룹에서는 향후 나노입자가 포함된 탄화수소 항공유를 개발하고, 실제로 혼합되는 나노입자의 형상을 정확하게 파악하여 그에 가장 적합한 점도 예측 모델과 열전도도 예측 모델을 선정 한 후, 고온 조건에서의 실험을 통해 다양한 부피분율에 대하여 예측 성능에 대한 검증을 수행할 계획이다.

후 기

이 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업의 결과임 (No. 915066201)

References

1. Van Wie, D.M., D'Alessio, S.M. and White M.E., "Hypersonic Air-breathing Propulsion," *Johns Hopkins APL Technology Digest*, Vol. 26, No. 4, pp. 430-437, 2005.
2. Tang, M. and Chase, R.L., "The quest for hypersonic flight with air-breathing propulsion," *15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference(AIAA)*, pp. 2008-2546, 2008.
3. Sobel, D.R. and Spadaccini, L.J., "Hydrocarbon fuel cooling technologies for advanced propulsion," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 119, No. 2, pp. 344-351, 1997.
4. Edwards, T., "Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: 1903-2003," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 6, pp. 1089-1107, 2003.
5. Choi, H., Lee, H.J., and Hwnag, K., "Research activities about characteristics of fuel injection and combustion using endothermic fuel," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp. 73-80, 2013.
6. Zhong, Z., Wang, Z., and Sun, M., "Effects of fuel cracking on combustion characteristics of a supersonic model combustor," *Acta Astronautica*, Vol. 110, pp. 1-8, 2015.
7. Liu, G., Jia, X., Tian, Y., Gong, S., Wang, L., and Zhang, X., "Prediction and remarkable catalytic cracking performances of Pt@FGS/JP-10 nanofluids," *Fuel*, Vol. 252, pp. 228-237, 2019.
8. A. Einstein, "Eine neue bestimmung der molekuldimensionen," *Annals of Physics., Leipzig* 19, pp. 289 - 306, 1906.
9. H.C. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, pp. 571, 1952.
10. G. Batchelor, "The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 83, pp. 97-117, 1977.
11. T. Lundgren, "Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 51, pp. 273-299, 1972.
12. Maron, S.H. and Pierce, P.E., "Application of ree-eyring generalized flow theory to

- suspensions of spherical particles," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol 11, pp. 80-95, 1956.
13. I.M. Krieger, T.J. Dougherty, "A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres," *Transactions of the Society of Rheology*, 3, pp. 137-152, 1959.
 14. P. Coussot, "Introduction to the rheology of complex fluids.", *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, pp. 3-22, 1956.
 15. Flory, P.J., "Principles of polymer chemistry," *Ithaca, NY: Cornell University Press*, pp. 266-316, 1953.
 16. Barnes, HA "A Handbook of Elementary Rheology," *University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Aberystwyth*, 2000.
 17. Barnes, HA, "A Review of the Rheology of Filled Viscoelastic Systems." *British Society of Rheology Review*, pp. 1-36, 2003.
 18. Samira A., Hossein M., Mohammad R., Ali H. J., "Investigation of Thermophysical Properties of Io Nanofluids Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes and Graphene.", *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 41, pp. 380-391, 2022.
 19. Andrew C., James C., Alex H., Tim C. Claypole, Liam K., "Rheology of high-aspect-ratio nanocarbons dispersed in a low-viscosity fluid", *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol. 17, pp. 1003-1012, 2020.
 20. J.C. Maxwell, "A treatise on electricity Magnetism", *Clarendon Press, Oxford, UK*, Vol.2, 1881.
 21. D.A.G. Bruggeman, "Berechnung verschiedener physikalischer konstanten vonheterogenen substanzen, I. Dielektrizitatskonstanten und leitfahigkeiten dermischkorper aus isotropen substanzen," *Annals of Physics*, Vol. 416, pp. 636-664, 1935.
 22. R.L. Hamilton, O.K. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two component systems," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, pp. 187-191, 1962.
 23. Ke Chu, Wen-sheng Li, Fu-ling Tang, "Flatness-dependent thermal conductivity of graphene-based composites", *Physics Letters A*, Vol. 377, pp. 910-914, 2013.
 24. Yuguo Gao, Haochang W., Agus P. S., Arun S.M., "Measurement and modeling of thermal conductivity of graphene nanoplatelet water and ethylene glycol base nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 123, pp.97-109, 2018.
 25. S. Zhai, P. Zhang, Y. Xian, P. Yuan, D. Yang, "Modelling and analysis of effective thermal conductivity for polymer composites with sheet-like nanoparticles," *Journal of Materials Science*, Vol. 54, pp. 356-369, 2018.
 26. C.W. Nan, R. Birringer, D.R. Clarke, H. Gleiter, "Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance," *Journal of Applied Physics*, Vol. 81, pp. 6692-6699, 1997.
 27. Jia-nan Huang, Liu Yang, Yilin Xie, "Why the thermal conductivity of graphene nanofluids is extremely high? A new model based on anisotropy and particle-free renovation," *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 341, 117346, 2021.