

알루미나 나노유체의 유동 특성에 관한 연구

이지환, 장석필*

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원, * 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Fluid Flow Characteristics of Al₂O₃ Nanoparticles Suspended in Water

Ji-Hwan Lee, Seok Pil Jang*

ABSTRACT: In this paper we report fluid flow characteristics of Al₂O₃ nanoparticles suspended in water. Especially, the effects of volume fraction with the range of 0.01% to 0.3% and inner diameter of tubes on the pressure drop and the effective viscosity of Al₂O₃ nanoparticles suspended in water are experimentally investigated. Experimental results are compared with analytic solution which can be derived with Einstein model. We confirm whether Einstein model which have been used to determine the effective viscosity of nanofluids is valid or not.

Key words: Nanofluids(나노유체), Pressure Drop(압력 강하), Viscosity(점성계수), Al₂O₃(알루미나)

기 호 설 명

- D : 내부직경 [m]
- f : 부피비
- h_{fr} : 부차적 수두 손실 [m²/sec²]
- K : 손실계수
- L : 파이프 길이 [m]
- P : 압력 [Pa]
- r : 반지름 [m]
- Re : Reynolds 수, $\frac{\rho u L}{\mu}$
- u : 유속 [m/sec]

ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

- 0 : 원형관
- c : 수축(Contraction)
- e : 확대(Expansion)
- eff : 나노유체
- f : 유체
- m : 평균

그리스 문자

μ : 점성계수 [Nsec/m²]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-300-0112; fax: +82-2-3158-2191

E-mail address: spjang@hau.ac.kr

1. 서론

최근 나노 기술이 발달함에 따라 수십 나노에서 수 나노 크기를 가지는 입자 제작이 가능해졌고, 그 결과 일반적인 유체에 나노입자를 균일하게 분산(Dispersion), 부유(Suspension) 시켜서 만든 나노유체가 개발되었다.⁽¹⁾

이러한 나노유체의 개발과 더불어 최근 10년간 많은 과학자들과 기술자들⁽²⁻⁶⁾은 나노유체의 열적

특성이 기존의 수 밀리미터에서 수 마이크로미터 크기를 가지는 입자를 첨가한 유체의 열적 특성과는 전혀 다른 결과를 나타내고 있다는 사실을 발견했으며, 그 특성이 일반유체에 비해 우수하다는 결과를 얻게 되었다. 이런 열적 특성의 우수성 때문에 최근 나노유체는 차세대 냉각장치 및 열교환기의 냉각 유체로 대두되고 있다. 하지만 나노유체의 열적 특성인 열전도도에 대한 연구는 활발히 진행되고 있는 반면, 유동 특성에 관한 연구는 현재까지 미흡한 상태이다.

본 연구는 알루미늄 나노유체를 사용하여 일반적인 관에서의 압력 강하뿐만 아니라 마이크로 관에서의 압력강하를 측정하였다. Wang et al.⁽⁷⁾은 Al_2O_3 +Water의 나노 유체에 대한 점성 계수를 실험적으로 측정한 바 있고, Lee et al.⁽⁸⁾은 부피비 0.3%의 Al_2O_3 +DI Water의 나노 유체에 대한 유효 점성계수를 실험적으로 측정한 바 있다. 이들의 결과에 의해 부피비 1% 이상에서는 Einstein 모델⁽⁸⁾과 일치하지 않는다는 것을 알 수 있었고, 일반적으로도 나노 입자에 대한 유체의 부피비는 1% 미만을 사용하고 있기 때문에, 본 실험에서는 Lee et al.⁽⁸⁾의 실험 결과를 바탕으로 Al_2O_3 +DI Water의 나노 유체의 부피비를 0.01%~0.3%로 변화시켜 가는 동시에, 원형관의 내부 직경을 변화해 가며 압력강하를 측정하였다. 이렇게 측정된 압력 강하를 바탕으로 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수를 실험적으로 측정해 보았고, 이 결과를 나노유체의 점성계수를 예측하기 위해 기존에 사용되고 있는 Einstein 모델⁽⁹⁾과 비교해 보았다.

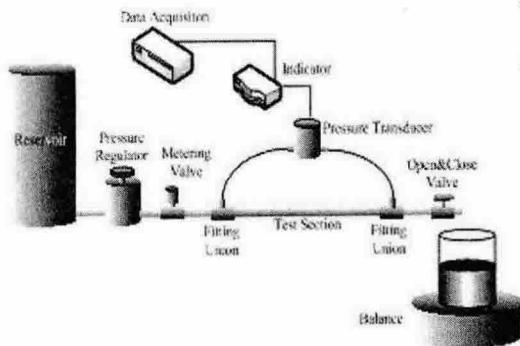


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험 장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 본 연구에서는 Pumping System을 사용하지 않고, Reservoir를 사용하여 나노 유체의 유동을 유발시켰다. 그 이유는 나노유체 속에 포함되어 있는 나노입자가 Pumping System에 어떤 영향을 미치는지 밝혀지지 않았기 때문에, 압력 특성에 대한 정확한 실험 결과를 얻기 위함이었다. 또한, Reservoir에서 공급되는 나노유체의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 Pressure Regulator를 설치하였고, 보다 정밀한 압력 측정을 하기 위해 Pressure Regulator 뒤에 Metering Valve를 설치하였다. 그리고 Test Section에서 앞 단과 뒤 단의 압력강하는 VALIDYNE사에서 생산된 Pressure Transducer인 DP15-20, DP15-24, DP15-26 세 종류의 센서와 CD23 Digital Transducer를 사용하여 측정하였으며 DP15 Series의 Accuracy는 $\pm 0.25\%$ 이고, DP15-20, DP15-24, DP15-26 센서들의 각각의 Full Scale Range는 0.86kPa, 2.2kPa, 3.5kPa이다. 관 내부에 흐르는 유량 측정에는 0.001g까지 측정되는 정밀한 Balance를 사용하였다.

실험에 사용된 원형 파이프는 내경(Inner Diameter)이 각각 1.735mm, 1.024mm, 581 μ m, 310 μ m의 네 종류이며 재질은 Stainless Steel이다.

실험에 사용된 나노유체는 나노입자의 부피비가 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.1%, 0.2%, 0.3%가 되도록 Deionized Water(DI Water)를 기본 유체로 사용하여 Al_2O_3 나노입자를 첨가하는 방식으로 제작하였고, 제작된 나노유체는 입자가 잘 분산 되도록 제작 직후 초음파 세척기에서 30시간 동안 에너지를 가하여 주었다. Al_2O_3 나노입자의 직경은 30nm이다.

2.2 검증 실험

우선, 실험장치의 정확성을 검증하기 위하여, 나노 유체로 실험하기 전에 물을 이용하여 압력 강하를 측정해 보았다. 실험 결과는 원형관의 종류 유동이며 완전 발달 유동으로 가정하여 해

석되었다. 그 이유는 최대 Reynolds 수가 80.87이며 Entry Length가 최대 관내 전체 길이의 2% 미만이기 때문이다.

$$\Delta P_{tube} = 32 \frac{L\mu \bar{V}}{D^2} \quad (1)$$

$$\Delta P_c = \rho h_{l_r} = \rho K_c \frac{V_2^2}{2} \quad (2)$$

$$\Delta P_e = \rho h_{l_r} = \rho K_e \frac{V_3^2}{2} \quad (3)$$

$$\Delta P = \Delta P_{tube} + \Delta P_c + \Delta P_e \quad (4)$$

여기서 ΔP_{tube} , ΔP_c , ΔP_e , L , μ , ρ , D 는 각각 원형관 내에서의 압력강하, 수축부위에서의 압력강하, 확대부위에서의 압력강하, 원형관의 길이, 유체의 점성계수, 유체의 밀도 그리고 원형 파이프의 내부 직경을 나타내며, \bar{V} , \bar{V}_2 , \bar{V}_3 는 원형관 내부에서의 속도를 나타낸다. 또한, h_{l_r} , K_c , K_e 는 부차적 수두손실, 수축 손실 계수(Contraction loss coefficient), 확대 손실 계수(Expansion loss coefficient)를 의미하며, ΔP 는 원형관 내에서의 압력강하와 수축과 확대 부위에서의 압력강하를 더한 총 압력강하를 의미한다. 식(1)은 층류 유동 이면서 완전발달 유동일 때 원형관내에서의 압력강하를 나타내는 식이며 식(2)와 식(3)은 Fig. 2와 같이 Fitting Union의 형상을 고려하기 위해 사용된 입, 출구 영역에서의 압력 강하 특성을 나타낸 식이다.⁽¹⁰⁾

식(4)는 식(1), (2), (3)에 의해 구해지는 총 압력강하를 의미한다. Fig. 3은 식(4)를 이용한 해석적 결과와 실험을 통해 얻어진 결과를 비교한 그림이다. 1.735mm, 1.024mm, 581 μ m, 310 μ m 네 종류의 원형관 모두 실험적 결과와 해석적 결과와의 차이는 1.56% 이내로, 실험적 결과는 해석적 결과에 잘 일치함을 알 수 있다.

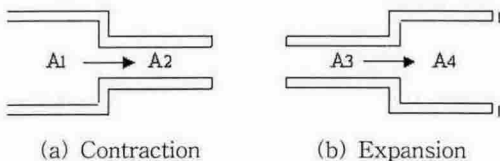


Fig. 2 Pressure drop causes contraction and expansion.

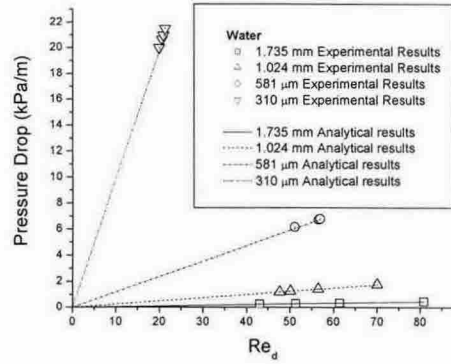


Fig. 3 Comparison between an analytical solution of Poiseuille flow and experimental data.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 알루미늄 나노유체의 압력강하 특성

본 연구에서는 부피비 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.1%, 0.2%, 0.3%로 제작된 Al_2O_3 +DI Water 나노유체를 사용하여 내부직경이 1.735mm, 1.024mm, 581 μ m, 310 μ m 인 원형관에서의 압력강하 특성을 실험적으로 연구하였다.

Einstein Model⁽⁹⁾

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 2.5f \quad (5)$$

식(5)에서 μ_{eff} , μ_f , f 는 각각 나노유체의 유효 점성계수, 기본 유체(DI Water)의 점성계수, 그리고 부피비를 나타낸다. Einstein Model은 부피비 1% 미만에서의 점성계수를 예측할 수 있는 관계식으로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 나노유체의 부피비도 1% 미만이므로, Einstein Model을 이용하여 나노유체의 점성계수를 예측해 보았다. Einstein Model을 적용시켜 얻은 점성계수를 물 검증실험에 사용되었던 식(4)에 적용시킨 수치를 압력강하에 대한 이론적인 결과로 사용하였으며, 이론적 결과와 실험적 결과를 비교해 보았다.

$$\frac{(\Delta P_{eff}/L)}{(\Delta P_E/L)} = \frac{\Delta P_{eff}}{\Delta P_E} \quad (6)$$

식(6)은 실험적 결과와 해석적 결과의 압력강하비를 표현해 주는 수식이다. 여기서, ΔP_{eff} , ΔP_E , L 은 각각 나노유체를 사용하여 얻은 실험적인 압력강하, Einstein Model을 사용하여 얻은 해석적인 압력강하, 실험에 사용된 원형관의 전체 길이를 의미한다. Fig. 4는 식(6)을 적용시켜 구한 부피비와 원형관의 내부직경 변화에 따른 Al_2O_3+DI Water 나노유체의 압력강하 변화를 나타낸 것이다.

우선, 부피비 변화에 따른 Al_2O_3+DI Water 나노유체의 압력강하 결과를 살펴보자. 내부직경이 $310\mu m$ 인 원형관에서, 부피비 0.01%일 경우, 실험결과와 Einstein Model을 이용하여 얻은 해석적 결과와의 차이가 0.76%로 해석적 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 부피비가 증가 할수록 Einstein Model을 이용하여 얻은 해석적 결과와 실험결과와의 차이가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 특히, 부피비 0.3%에서는 실험적 결과가 해석적 결과보다 약 13.6% 증가한 것을 알 수 있다. $1.735mm$, $1.024mm$, $581\mu m$ 의 내부직경을 지니는 원형관들에서도 부피비 0.01%일 경우는 Einstein model을 이용한 해석적 결과와 실험적 결과가 잘 일치하는 현상을 나타내지만, 부피비가 0.1% 이상

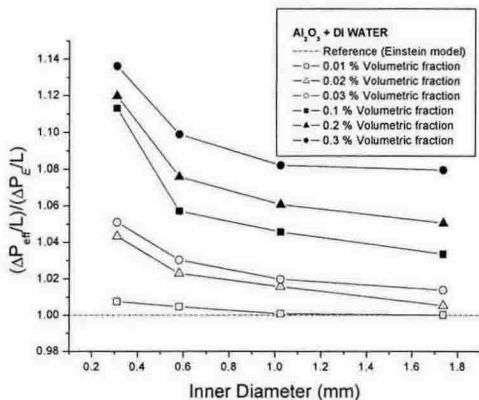


Fig. 4 Effects of the volume fraction and inner diameter on the ratio of the experimental pressure drop to the theoretical pressure drop.

인 경우에는 해석적 결과와 실험결과는 4~10% 정도의 차이를 보임을 알 수 있다.

다음으로, 원형관의 내부직경 변화에 따른 Al_2O_3+DI Water 나노유체의 압력강하 결과를 살펴보자. 부피비 0.1%의 경우, $1.735mm$ 의 내부직경을 지니는 원형관의 실험적 압력강하 결과는 해석적 압력강하 결과보다 약 3.35% 높게 나타난다. $1.024mm$ 의 경우는 4.56%, $581\mu m$, $310\mu m$ 의 경우는 각각 5.7%, 11.3% 정도로 원형관 내부직경이 작아지면서 실험적 결과와 해석적 결과의 차이가 상대적으로 커지는 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과를 살펴본 결과, Einstein Model을 적용시켜 얻은 점성계수를 사용하여 계산된 압력강하의 해석적 결과는, 부피비 0.01%의 경우를 제외하고는 실험적 결과와는 일치하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 부피비 뿐만 아니라 원형관의 내부직경도 나노유체의 압력강하 특성에 영향을 미치는 인자로 작용한다는 점을 알 수 있었다.

3.2 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수

실험을 통해서 Einstein Model을 적용시킨 점성계수를 사용한 Al_2O_3+DI Water 나노유체의 압력강하 특성은 실험에서 얻은 압력강하 특성과는 일치하지 않음을 알 수 있었다.

특히, 앞에서 언급한 압력강하 특성에 영향을 미치는 두 가지 인자는, 궁극적으로 유효 점성계수에 영향을 주는 인자임으로, 두 가지 인자인 부피비와 원형관의 내부직경 변화가 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수에 주는 영향을 파악해 보았다.

일반적인 원형관 내에서 층류유동이고, Entry Length 효과가 없을 경우의 압력 강하 특성은 식(1)과 같으며, 식(1)에 의해 다음과 같이 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수를 표현할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\mu_{eff} = \frac{D^2}{32V} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \quad (7)$$

여기서 P , D , \bar{V} 그리고 μ_{eff} 는 각각 압력, 원형관의 지름, 평균 유속, 그리고 나노유체의 유효 점성계수(effective viscosity)를 의미한다.

실험을 통해 얻은 압력 강하 결과와 평균유속,

그리고 관의 내부직경을 식(7)에 적용하여 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수를 얻을 수 있었으며, 그 결과를 Einstein Model로 예측한 알루미늄 나노유체의 점성계수와 비교 및 분석해 보았다.

Fig. 5는 부피비의 증가에 따른 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수와 물의 점성계수 비(ratio)의 변화를 나타낸 그림이다. 또한, 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수를 예측하기 위해 기존에 사용되었던 Einstein Model의 결과도 보여주고 있다.

본 실험에 사용된 부피비 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.1%, 0.2%, 0.3% 범위에서, Einstein Model에 의해 예측된 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수는 부피비 0.01% 에서는 물의 점성계수와 차이가 0.025%, 부피비 0.3%에서는 물의 점성계수와 차이가 0.75%로, 1% 미만의 증가를 예측하고 있다.

하지만, 실험결과에 의하면 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수는 물의 점성계수보다 부피비 0.01% 에서 내부직경에 따라 0.58%~0.89%, 부피비 0.3%에서는 9.4%~14.6% 증가되었음을 알 수 있다.

Fig. 6은 실험에 사용된 원형관의 내부직경 변화에 따른 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수와 물의 점성계수 비(ratio)의 관계를 나타낸 그림이다. 실험결과에 의하면, 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수는 유체가 지나가는 관의 내부직경에도 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 내부직경 변화에 따른 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수와 물의 점성계수 비(ratio)의 관계를 살펴보면, 동일 부피비 0.2%에서, 내부직경이 1.735mm인 원형관의 경우 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수가 물의 점성계수 보다 6.4% 높게 측정되었지만, 내부직경이 310 μ m인 원형관에서는 12.65% 증가된 것을 알 수 있다. 다른 부피비의 경우도 이와 같은 현상을 보이고 있다.

그 이유는 다음과 같이 생각할 수 있다. 나노유체 속에 있는 알루미늄 나노입자와 기본유체의 유속 사이에 Slip 현상이 발생하여 유효 점성계수가 증가하는 것이며, 이러한 Slip현상이 일어나는 영역은 나노입자 주변이므로 알루미늄 나노입자의 크기와 기본유체가 지나가는 관의 크기의 비가 유효 점성계수에 영향을 미치는 원인으로 작용한다는 생각이다.

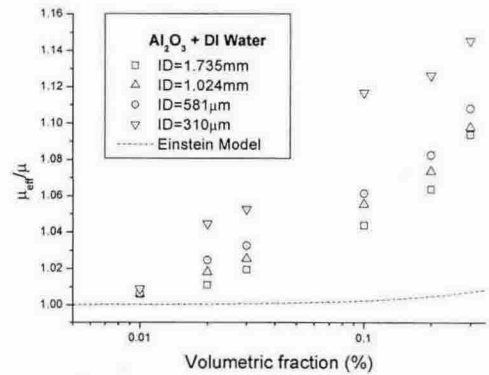


Fig. 5 Effect of volume fraction on the ratio of the effective viscosity of Al_2O_3+DI Water nanofluids to that of base fluid.

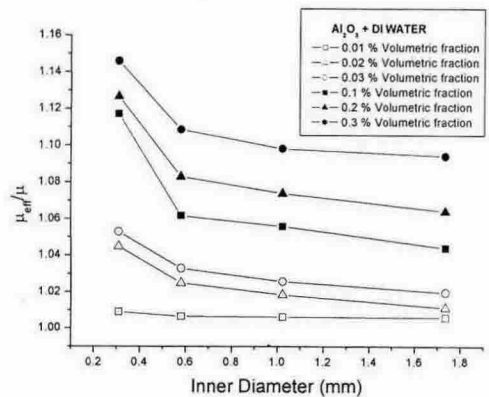


Fig. 6 Effect of inner diameter of a tube on the ratio of the effective viscosity of Al_2O_3+DI Water nanofluids to that of base fluid.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 나노입자와 기본유체와의 부피비가 0.01%~0.3%이 되도록 제작된 Al_2O_3+DI Water 나노유체를 사용하여 내경이 1.735mm, 1.024mm, 581 μ m, 310 μ m인 원형관에서 압력 강하 특성 및 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수를 실험적으로 얻었으며, Einstein Model

을 이용하여 해석적으로 얻은 압력강하 특성 및 유효 점성계수를 실험 결과와 비교해 보았다.

그 결과, 나노유체의 압력강하 특성에 지배적인 영향을 미치는 나노유체의 유효 점성계수는 부피비가 증가할수록, 관의 내부직경이 작아질수록 증가하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 이는 나노유체의 점성계수 변화에 영향을 미치는 요인은 부피비와 관의 내부직경이라는 사실을 알려주는 결과이다. 또한, 나노유체의 유효 점성계수를 예측하기 위해 사용되고 있는 기존의 방법인 Einstein Model은 실제적인 나노유체의 점성계수를 예측하기에는 부적절하다는 결론을 내릴 수 있었다.

따라서 나노유체의 유효 점성계수를 예측하기 위해서는 부피비의 변화와, 나노유체가 지나는 관의 내부직경을 모두 고려한 새로운 모델의 제정이 필요하다.

차후에 본 연구 결과를 바탕으로, 현재의 실험 결과에 잘 부합하는 해석적인 correlation을 제시해 볼 계획이다. 나노유체의 점성계수가 정확히 예측되는 모델의 제시는 나노유체의 유동 특성에 대한 방향을 제시해 줄 것으로 생각되며, 나노유체를 이용한 냉각장치 개발 및 연구에도 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2004년 한국학술진흥재단의 지원 과제인 신진 연구과제 (KRF-2004-003-D00047)의 지원에 의하여 연구되었음을 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, S., Choi, S.U.S. and Eastman, J.A., 1999, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, ASME J. Heat Transfer, Vol. 121, pp. 280-289.
2. Eastman, J.A., Choi, S.U.S, Yu, W. and Thompson, L.J., 2001, Anomalous increased effective thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, Appl. Phys. Lett., Vol. 78, pp. 718-720.
3. Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E., and Grulke, E.A., 2001, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, Appl. Phys. Lett., Vol. 79, pp. 2252-2254.
4. Das, S.K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle base nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects, Appl. Phys. Lett., Vol. 83, pp. 2931-2933.
5. Jang, S.P., and Choi, S.U.S., 2004, Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, Appl. Phys. Lett., Vol. 84, pp. 4316-4318.
6. You, S.M., Kim, J.H. and Kim, K.H., 2003, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, Appl. Phys. Lett., Vol. 83, pp. 3374-3376.
7. Wang, X., Xu, X. and Choi, S.U.S., 1999, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, J. Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 13, pp. 474-480.
8. Lee, J. H., Hwang, K. S. and Jang, S. P., 2005, Fluid Flow Characteristics for Nanofluids, Trans. KSME, 2005 Spring Annual Conference., pp. 2394-2398.
9. Einstein, A., 1956, Investigation on the theory of Brownian movement, Dover, New York.
10. Fox, R. W. and McDonald A. T., 1999, Introduction to Fluid Mechanics, 5th Ed., Wiley.
11. Schlichting, H., 1979, Boundary layer theory, 7th Ed., McGraw-Hill Part B.