

냉각탑용 축류형 F.R.P. 팬의 개발

오 건 제[†], 김 선 숙^{*}
 경남대학교 기계자동화공학부, ^{*}(주)성도

Development of an Axial F.R.P. Fan for Cooling Tower

Keon-Je Oh[†], Sun-Sook Kim^{*}

School of Mechanical Engineering and Automation, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea
^{*}Naesam-Ri 177-1, Kimhae 621-841, Korea

(Received July 20, 2007; revision received October 2, 2007)

ABSTRACT: An axial F.R.P. fan model for cooling tower is developed. The fan is designed using the equations for one dimensional inviscid flow through the fan blade. Fan shape is swept forward with a parabolic function. Calculations of the three dimensional turbulent flow around the fan are carried out to investigate performance of the fan. Data of the total pressure rise and hydraulic efficiency can be obtained for the various setting angles. Calculated values of the total pressure rise and hydraulic efficiency at the design point are less than those of the design specification. The prototype of the F.R.P. fan is made by laminating of the fiberglass and epoxy resins on the mold of fan shape.

Key words: Cooling tower(냉각탑), Axial F.R.P. fan(축류형 F.R.P. 팬), Design(설계), Performance analysis(성능해석), Setting angle(설치각), Prototype(시제품)

기 호 설 명

C_L : 양력계수
 C_D : 항력계수
 D_2 : 팬 외주 직경 [m]
 D_S : 비직경(specific diameter), 식 (1)
 l : 코드길이 [m]
 N : 각속도 [rad/s]
 N_S : 비회전수(specific revolutions), 식 (2)
 n : 회전수 [rpm]
 ΔP_T : 전압상승 [Pa]
 Q : 유량 [m³/s]
 r : 반경방향 좌표 [m]

S_1, S_2, S_3 : 스윙 형상에 사용되는 변수, Fig. 1
 U : 날개의 회전속도 [m/s]
 W_a : 공기의 축방향 속도 [m/s]
 x : 축방향 좌표 [m]
 Z : 날개수

그리스 문자

α : 영각
 β_m : 평균 윗동각
 ϵ : 스윙계수, 식 (5)
 η_h : 수력효율
 ξ : 스테거각(코드가 축방향과 이루는 각)
 ξ_T : 트윅스트각, 식 (11)
 ξ_{tip} : 팁에서 스테거각
 ξ_S : 설치각, 식 (12)

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-249-2616; fax: +82-55-249-2617

E-mail address: ohkj@kyungnam.ac.kr

ρ : 밀도 [kg/m³]
 σ : 슬리디티, 식 (10)

1. 서 론

냉각탑은 고온의 물을 공기를 이용하여 냉각시키는 역할을 한다. 냉각탑에서의 냉각 작용은 물과 공기의 온도차를 이용하는 열전달에 의한 감열과 물 자신의 증발을 이용하는 물질 전달에 의한 잠열 두 가지 작용으로 행해진다. 그 중 특히 효과가 큰 것은 물의 증발이며 이 효과를 최대한 발휘시키기 위해서 물과 공기의 상대속도, 접촉면적, 접촉 시간 등을 증대시키는 것이 필요하고 이를 위하여 공기를 강제 순환시키는 팬이 사용된다.

냉각탑에 사용되고 있는 팬은 일반적으로 축류형 팬이 많이 사용되고 있다. 현재 사용되는 냉각탑용 축류팬의 규격을 보면 외경 1.8m~6m, 정압상승 10 mmAq~20 mmAq, 풍량 2000 m³/min~20000 m³/min, 회전수 200 rpm~500 rpm 정도이다. 팬의 재질은 가볍고 튼튼한 F.R.P.를 사용하는 것이 보통이고 외기온도, 냉각수의 변동에 따라서 공기량을 조절하기 위해서 동익의 각도 변화를 갖추고 있는 것이 특색이다.

축류팬의 설계는 날개 주위의 유동해석으로부터 이루어지며 설계식의 적용 방법, 익형의 형태, 스윙의 종류에 따라서 여러 가지 모양을 얻을 수 있다. 현재 국내 업체들의 경우를 보면 기술력이 열악하여 날개의 설계식 들을 사용하지 못하고 외국 도면을 모방하여 제작하는 수준이다. 따라서 유동해석을 이용하여 설계한 팬에 비하여 효율이 많이 낮을 것으로 생각된다. 최근 Lee et al. 등은^(1~3) 유량 30 m³/s, 전압상승 180 Pa에 대해서 일정한 현실비와 Clark-Y 익형을 가진 냉각탑용 축류팬을 개발하였다. 결과를 보면 기존 팬의 효율은 약 40%이며 날개의 설계식을 사용하여 정확하게 설계할 경우 약 70%까지 높일 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 비추어 볼 때 현재 국내 업체에서 보유하고 있는 기존 팬들의 효율은 매우 낮을 것으로 예측되며 팬의 성능을 향상시키기 위해서는 유동해석에 기초한 독자적인 설계 능력을 보유하는 것이 시급하다고 생각한다.

본 연구에서는 현재 냉각탑에서 많이 쓰이는

유량 46.67 m³/s, 전압상승 269 Pa의 규격을 가진 축류형 F.R.P. 팬을 개발하였다. 팬의 형상 설계는 1차원 비점성 유동해석에 기초한 설계 이론을 사용하였다. 그리고 팬 날개 주위의 3차원 난류 점성유동을 해석하여 설치각 변화에 따른 성능을 평가하였다. 또한, CAD/CAM 기법을 사용하여 상·하면의 물드를 만든 후에 F.R.P. 시트를 표면에 접착시켜 시제품을 제작하였다.

2. 팬의 형상설계

2.1 설계방법

축류팬의 설계는 유량, 전압상승, 회전수를 사용해서 외주 직경, 허브 직경, 날개수, 각 반경에서의 스테저각(stagger angle), 코드길이 등의 형상 특성을 구한 후에, 날개의 익형을 선택하여 팬 형상의 3차원 좌표 값을 결정하면 된다.

우선 외주 직경은 식(1)~식(4)로 주어지는 Corrier 선도⁽⁴⁾를 이용하여 결정하였다.

$$D_s = \frac{D_2 \left(\frac{\Delta P_T}{\rho} \right)^{\frac{1}{4}}}{Q^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$N_s = \frac{NQ^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{\Delta P_T}{\rho} \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (2)$$

$$D_s = 2.84 N_s^{-0.476}, \quad N_s \geq 1.0 \quad (3)$$

$$D_s = 2.84 N_s^{-0.888}, \quad N_s \leq 1.0 \quad (4)$$

회전차의 크기가 결정된 후에는 각 반경에서 코드길이와 스테저각을 결정해야 하며 각 반경에서 양력계수와 항력계수의 분포를 결정한 후에 식(5)~식(9)를 사용하였다.⁽⁵⁾

$$\epsilon = \frac{\Delta P_T}{\rho W_a U \eta_h} \quad (5)$$

$$\tan \beta_m = \frac{U}{W_a} - \frac{\epsilon}{2} \quad (6)$$

$$C_L \sigma = 2 \epsilon \cos \beta_m - \sigma C_D \tan \beta_m \quad (7)$$

$$C_L = f(\alpha) \quad (8)$$

$$\xi = \beta_m - \alpha \quad (9)$$

$$l = \frac{\sigma \cdot 2\pi r}{Z} \quad (10)$$

식(8)에서 $f(\alpha)$ 는 날개의 형상이 주어지면 구할 수 있으며 NACA 4409 익형을 사용하였다. 수력효율은 비속도에 의한 관계식⁽⁴⁾을 사용하였다. 한편 냉각탑용 냉각팬은 날개의 각도 변화가 가능하기 때문에 실제 제작 시에는 날개 끝, 즉 팁에서의 스테저각과 각 반경에서의 스테저각 차이를 나타내는 트위스트각(twist angle) ξ_T 와 팬을 설치할 때 기준이 되는 설치각(setting angle) ξ_S 이 중요하며 식(11)과 식(12)로 정의된다.

$$\xi_T = \xi_{tip} - \xi \quad (11)$$

$$\xi_S = \pi/2 - \xi_{tip} \quad (12)$$

위의 과정을 각 반경에 대해서 적용하면 팬의 3차원 형상을 얻을 수 있다. 마지막으로 본 연구에서는 스윙 형상을 주어서 날개를 회전방향으로 휘어지게 하였다. 스윙의 형태는 비선형 형상을 택하였으며 Fig. 1에 나타나 있듯이 회전방향으로 휘는 2차 함수를 사용하였다. Fig. 1에서 S_1 은 꼭지점의 위치를 나타내고 S_2 는 꼭지점에서 스윙 각, S_3 는 팁에서의 스윙각을 나타낸다.

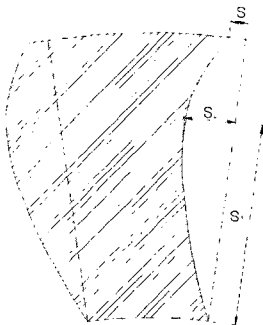


Fig. 1 Design parameters for the sweep.

2.2 팬의 설계와 기하학적 형상

본 연구에서 개발하려는 축류팬의 설계제원은 유량 46.67 m³/s, 전압상승 269 Pa이다. 회전수는 477 rpm으로 하였다. 먼저 주어진 설계제원과 Codier 선도를 이용하여 팬의 외주직경을 구하였다. Codier 선도는 팬의 크기를 나타내는 외주직경과 회전수의 관계를 표시하는 것으로 회전수를 정한 후에 이에 해당하는 외주 직경을 구하면 된다. 여기서는 Codier 선도로부터 계산된 값보다 약간 크게 하여 팬의 외주직경을 2.4m로 선택하였다. 또한 허브 직경을 나타내는 허브비는 0.3으로 하였고 날개수는 6개로 정하였다.

날개의 설계는 반경방향으로 모두 36개 부분으로 나눈 후에 각 반경에 대하여 식(5)~식(10)을 사용하여 날개 입·출구 부분의 현절비, 코드길이, 스테저각, 트위스트각, 설치각 등을 구하였다. 날개의 형상은 NACA 4409 형상을 선택하였고, 날개 모양을 표현하기 위해서 상하면에 각각 18개의 격자점을 사용하였다. 또한 스윙 형상을 사용하여 날개를 회전방향으로 휘어지게 하였다. 계산된 설계 변수의 값들을 Table 1에 정리하였다.

설계된 팬의 형상을 자세히 관찰하기 위해서 반경방향에 따른 주요 설계변수들의 분포를 살펴 보았다. 먼저 날개 코드길이와 현절비의 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 현절비는 반경이 증가하면서 감소하는 경향을 보여주고 있다. 현절비의 감

Table 1 Design parameters of the model

flow rate	46.67 m ³ /s
total pressure rise	269 Pa
number of revolutions	477 rpm
tip diameter	2.4 m
hub diameter	0.72 m
number of blades	6
setting angle	16.7°
hydraulic efficiency	77.6%
sweep	$S_1/D_2 = 0.2$ $S_2 = 8.9°$ $S_3 = 3.9°$
specific diameter	1.39
specific revolutions	5.53

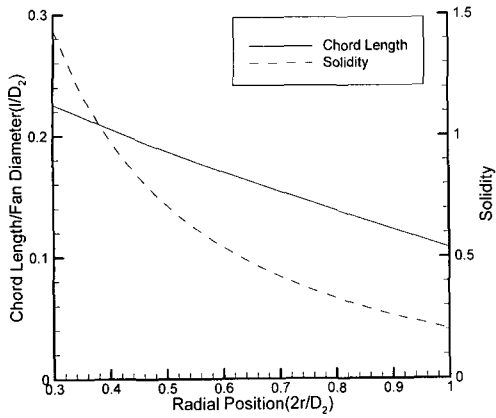


Fig. 2 Variations of the chord length and solidity in the radial direction.

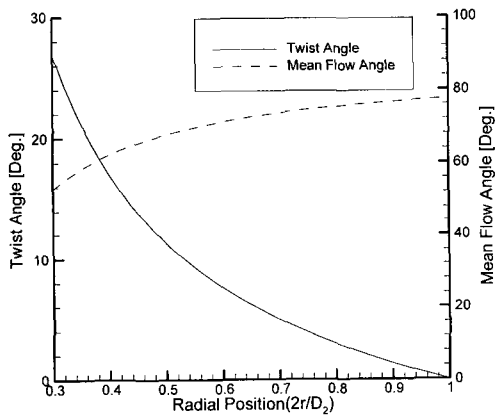


Fig. 3 Variations of the twist angle and mean flow angle in the radial direction.

소는 반경이 증가하면서 평균 유동각 β_m 이 증가하고 또한 회전방향 성분이 감소하기 때문이다. 날개길이는 현절비로부터 구해지는데 팁 쪽으로 갈수록 현절비가 작아지기 때문에 감소하는 경향을 보여주고 있다. 다음으로 트위스트각과 평균 유동각의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 트위스트각은 날개 끝, 즉 팁에서의 스테저각과 각 반경에서의 스테저각 차이를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 허브로 갈수록 스테저각이 감소하면서 트위스트각이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 반경이 증가하면서 평균 유동각이 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 날개의 회전속도가 증가하면서 유동각이 커지기 때문이다.

3. 팬의 성능해석

3.1 성능해석 방법

본 연구에서는 설계된 팬의 성능을 해석하기 위하여 팬 주위의 정상 비압축성 난류 점성유동을 해석하였다. 연속방정식, Navier-Stokes 방정식, $k-\epsilon$ 난류모델 등을 지배방정식으로 사용하였다. 지배방정식을 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하여 대수방정식으로 변환한 후, 저자 등이 개발한 코드를 사용하여 계산하였다.⁽⁶⁾

대류항을 처리하기 위한 hybrid 수치기법과 연속방정식과 압력항을 처리하기 위한 SIMPLE 방법 등을 사용하였다.⁽⁷⁾ 유동계산 모델은 덕트 내에서 팬이 작동하는 경우이다. 덕트의 총길이는 팬 외주 직경의 0.2배이며, 덕트와 팬 사이의 틈간격은 팬 외주 직경의 0.0082배로 하였다. 유동계산은 팬의 외주직경을 기준길이, 팬의 팁속도를 기준속도로 하여 무차원화시킨 상태에서 하였다. 점성의 영향을 나타내는 레이놀즈수는 날개의 외주 직경과 팁속도를 기준으로 8.4×10^6 이 된다. 또한 팬을 통과하는 유량은 설계 유량에 맞추어서 $46.67 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 하였다. 계산영역은 6개의 날개가 대칭적으로 위치하기 때문에 주기 경계면을 경계로 하여 전체 영역의 1/6만 해석하게 된다. 격자계는 정렬 격자계를 사용하였다. 격자계는 대수적인 방법을 사용하였는데 각 방향에 대하여 독립적으로 일정한 공비를 가지도록 격자를 분포시켜서 팬 날개의 흡입면과 압력면 사이의 영역에 대하여 H형 형태의 격자계를 생성하였다.⁽⁶⁾ 격자수는 축방향, 반경방향, 원주방향으로

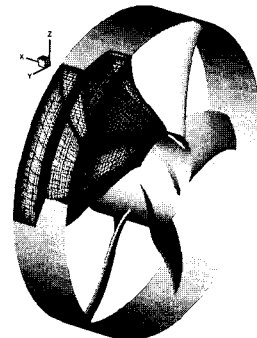


Fig. 4 Grid configuration around the fan and duct.

(53, 61, 35)개의 격자를 사용하였다. 계산에 사용된 격자계의 전체적인 모습을 Fig. 4에 나타내었다. 격자를 보면 벽면과 날개 부근에 조밀하게 배치되어 있음을 알 수 있다.

3.2 성능해석 결과

냉각탑용 축류팬은 유체기계의 일종으로 냉각탑을 통과하는 공기의 에너지를 증가시킨다. 즉 유체가 팬을 통과하면서 팬의 축동력을 통해서 에너지를 받고 후류에서 공기의 수두가 증가하게 된다. 또한, 냉각탑용 팬의 경우 덕트 내에서 작동하기 때문에 모든 에너지 상승은 압력 수두의

증가로 나타나고 따라서 팬을 통과하면서 공기의 압력은 급격히 증가한다. 이러한 압력 특성을 살펴보기 위해서 반경방향과 원주방향으로 평균한 무차원 압력의 변화를 유동방향에 대해서 Fig. 5에 나타내었다. 압력 변화를 보면 팬 상류에서 거의 변화가 없다가 팬을 통과하면서 급격히 상승한 후에 다시 일정하게 유지되는 팬 압력 분포의 특성을 잘 보여주고 있다. 또한 설치각이 증가하면서 압력 증가가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

다음으로 설치각 변화에 따른 전압상승의 변화를 Fig. 6에 나타내었으며 설계점에서의 값과 비교하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 냉각탑용 축류팬은 주어진 전압상승에 맞도록 설치각을 조정해야 하므로 설치각과 전압상승의 관계는 팬 사용에 중요한 자료가 된다. 전압상승은 유동해석 결과로부터 얻을 수 있으며 전압상승이 압력 수두의 증가로 나타나기 때문에 Fig. 6에 나타낸 팬 입·출구에서의 압력차로부터 계산할 수 있다. 설치각 변화에 따른 전압상승의 변화를 보면 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 설치각 12°~22°의 범위에서 135 Pa~314 Pa 임을 알 수 있다. 설치각이 증가하면서 거의 선형적으로 전압상승이 증가함을 볼 수 있으며 설치각이 커질수록 증가폭이 둔화됨을 알 수 있다. 또한 설계점(설치각 16.7°)에서 비교하여 보면 전압상승이 약 13% 낮으며 설계점에서의 값을 얻으려면 설계점 보다 약 2° 증가시켜야 함을 알 수 있다.

다음으로 팬의 수력효율을 살펴보았다. 수력효율은 팬동력과 실제로 공기에 공급된 에너지의

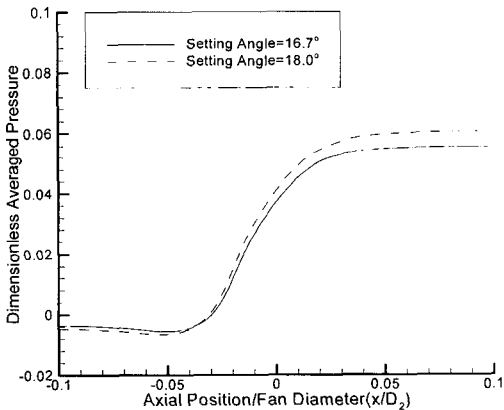


Fig. 5 Variations of the circumferentially and radially averaged pressure in the axial direction.

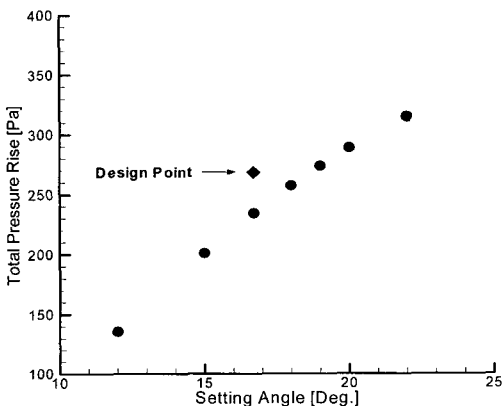


Fig. 6 Variation of the total pressure rise with setting angle.

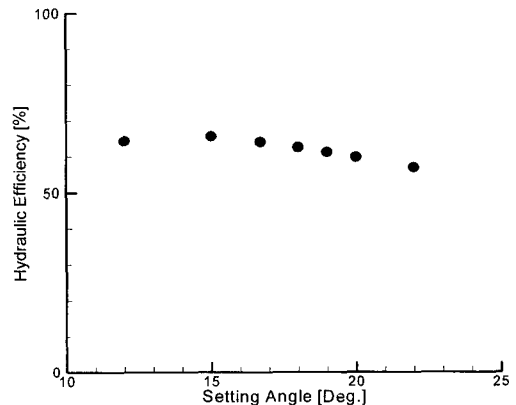


Fig. 7 Variation of the hydraulic efficiency with setting angle.

비를 표시하며, 수력효율이 주어지면 주어진 유량과 전압상승에 대해서 팬동력과 모터를 결정할 수 있다. 따라서 수력효율은 팬을 사용하는 데 매우 중요한 자료가 된다. Fig. 7에 설치각 변화에 따른 수력효율의 분포를 나타내었다. 수력효율은 유량, 전압상승, 축동력으로부터 결정되며 본 해석에서는 날개에 작용하는 압력과 점성응력을 적분하여 축동력을 계산하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 설계점 부근에서 수력효율이 약 65% 되며, 설계에서 사용된 값 77.6%와 비교하여 매우 낮음을 알 수 있다. 또한 설치각이 증가하여 20°정도가 되면 수력효율의 값이 감소함을 볼 수 있다.

4. 시제품 제작

시제품은 현재 냉각탑용 팬에서 가장 많이 사용되는 F.R.P.를 사용하여 제작하였다. 팬의 성형은 팬의 상·하판 금형을 가공하여 금형 표면에 F.R.P. 시트를 적층한 후 결합하는 방법을 사용하였다.

금형은 앞에서 설계한 팬의 3차원 좌표계를 이용해서 3차원 형상을 모델링한 후 CAD/CAM 기법으로 머시닝 센터를 이용해서 가공하였다. 금형의 재료는 MDF 보드를 사용하였다. 제작된 상·하판 금형을 이용하여 성형된 시제품의 형상을



Fig. 8 Prototype of the axial F.R.P. fan.

Fig. 8에 나타내었다.

본 시제품의 정확한 성능평가를 위해서는 성능시험을 실시하여야 하지만 적절한 성능시험 장치를 갖추는데 과도한 비용이 소모되고, 또한 점성유동 해석을 통해서 성능 예측이 가능하므로 성능시험을 생략하였다. 본 연구에서 개발된 모델의 효율이 약 65%로 예측되었고, 국내 업체가 보유하고 있는 일반적인 냉각탑용 축류팬의 효율이 약 40% 임을^(1,2,3) 감안할 때 본 모델이 회사가 보유하고 있는 기존 팬에 비하여 성능이 상당히 우수할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 냉각탑에 쓰이는 축류형 F.R.P. 팬을 설계, 성능해석, 제작하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Codier 선도, 1차원 비점성 유동식을 이용해서 유량 46.67 m³/s, 전압상승 269 Pa을 가진 축류형 팬을 설계할 수 있었다.

(2) 유동해석을 이용한 성능해석 결과 설치각 12°~22°의 범위에서 전압상승 135 Pa~314 Pa 임을 알 수 있었으며 설치각이 증가할수록 전압상승 값의 증가폭이 둔화됨을 알 수 있었다. 또한 설계점(설치각 16.7°)에서 보면 전압상승이 설계값보다 약 13% 낮으며 설계값을 얻으려면 설치각을 설계점 보다 약 2° 증가시켜야 함을 알 수 있었다.

(3) 유동해석으로부터 계산한 수력효율을 보면 설계점 부근에서 수력효율이 약 65% 되고, 설계값 77.6%와 비교하여 매우 낮음을 알 수 있다. 또한 설치각이 증가하여 20°정도가 되면 수력효율의 값이 감소함을 볼 수 있었다.

(4) 설계된 3차원 형상을 이용해서 상·하판 금형을 가공하였으며 이로부터 시제품을 제작할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 축류팬의 설계방법과 성능해석 방법은 앞으로 냉각탑용 축류팬 개발에 유용하게 쓰일 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국산업기술재단 단기에로기술지원사업 및 경남대학교 산학협력 연구과제의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, C., Chung, D. and So, H., 2003, Development of the energy-efficient cooling tower fan, Proceedings of the KOSEE Autumn Annual Meeting, Korea Society for Energy Engineering, pp.305-309.
2. Noh, J., Chung, D., Lee, C. and So, H., 2002, Development of low noise level axial flow fan for cooling tower, Proceedings of the SAREK Summer Annual Meeting, Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp.712-716.
3. Noh, J., Chung, D., Lee, C. and So, H., 2002, Development of low noise level axial flow fan for cooling tower using computer program, Journal of Fluid Machinery, Vol.5, No.3, Korean Fluid Machinery Association, pp.67-71.
4. Wright, T., 1999, Fluid machinery, CRC Press LLC, Florida, pp.56-65.
5. Wallis R.L., 1983, Axial flow fans and ducts, John Wiley & Sons Inc., pp.184-196.
6. Oh, K. and Kang, S., 1997, Numerical analysis of turbulent flow around a small propeller fan operating at the inlet of open chamber, Journal of the KSME, Vol.21, No.21, pp.1586-1594.
7. Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, New York.