

원심압축기에서 물분사 압축과정에 대한 이론적 해석

강정식*, 차봉준**, 양수석***

Meanline Analysis of Wet Compression in a Centrifugal Compressor

Jeong-Seek Kang*, Bong-Jun Cha**, Soo-Seok Yang***

Abstract

Wet compression means the injection of water droplets into the compressor of gas turbines. This method decreases the compression work and increases the turbine output by decreasing the compressor exit temperature through the evaporation of water droplets inside the compressor. This paper provides thermodynamic and aerodynamic analysis on wet compression in a centrifugal compressor for a microturbine. The meanline performance analysis of centrifugal compressor is coupled with the thermodynamic equation of wet compression to get the meanline performance of wet compression. The most influencing parameter in the analysis is the evaporative rate of water droplets. It is found that the impeller exit flow temperature and compression work decreases as the evaporative rate increases. And the exit flow angle decreases as the evaporative rate increases.

초 록

가스터빈엔진에서 압축기가 사용하는 에너지는 터빈에서 생성하는 에너지의 30-50%까지도 이르기 때문에 압축기의 일을 줄이는 연구는 가스터빈의 효율을 증가시키는 문제와 연관된 중요한 연구주제이다. 압축기의 일을 줄이는 한 가지 방법으로 압축기의 입구에 물입자를 분사하는 방법이 제안되었는데, 이 방법은 물입자가 증발하면서 압축기 출구의 온도를 낮추어서 결과적으로 압축과정에 소요되는 에너지를 줄일 수 있는 방법이다. 이전까지의 연구는 열역학적 해석에 집중하여 온도 및 일의 감소를 해석하거나, 실험에 근거하여 가스터빈의 성능변화에 집중되었다. 본 논문에서는 물분사의 영향을 마이크로 터빈용 원심압축기에 적용하여 열역학적 해석 뿐 아니라 공력학적 해석을 수행하였다. 물을 분사할 경우 공기압축과정보다 임펠러 출구 유동각이 줄어들었으며, 증발율이 높을수록 유동각 감소가 증가하였고, 압력비가 낮을수록 유동각 감소가 증가하였다.

키워드 : 원심압축기(centrifugal compressor), 물분사 압축(wet compression)

* 항공추진그룹/jskang@kari.re.kr

** 항공추진그룹/cha@kari.re.kr

*** 항공추진그룹/ssyang@kari.re.kr

1. 서론

가스터빈엔진에서 압축기가 사용하는 에너지는 터빈에서 생성하는 에너지의 30~50%까지도 이르기 때문에 압축기의 일을 줄이는 연구는 가스터빈의 효율을 증가시키고 출력을 향상시키는 문제와 연관된 중요한 연구주제이다. 일반적으로 가스터빈의 출력은 대기온도가 1℃ 올라가면 출력이 0.54~0.90% 떨어진다[1,2]. 이것을 보상하기 위한 하나의 방법이 입구 온도를 낮추는 방법이다. 2004년을 기준으로 세계적으로 약 700개의 가스터빈이 가스터빈의 입구에 물입자를 분사하여 물입자가 증발하면서 입구 온도를 떨어뜨리는 (inlet cooling) 방식인 fogging system을 가지고 있다[1]. 이 방식의 개념은 고압의 펌프와 노즐로부터 생성되는 작은 물입자(fog)의 증발효과를 통하여 입구의 온도를 낮추는 것이다.

압축기 입구의 온도를 낮추는 방법보다 더욱 효과적인 방법으로 wet compression이 있다. Wet compression (Fog intercooling 또는 overspray라고도 불린다)은 대기온도에서 증발하는 양보다 더 많은 양의 물을 분사하여 물방울이 압축기에까지 들어가서 압축기내부에서 증발하여 intercooling하는 효과를 가져온다. 압축기 입구보다 출구에서 온도가 높으므로, 높은 온도에서 더욱 많은 수증기를 포함할 수 있는 특성을 이용해서 증발효과를 더욱 높이는 특성을 나타낼 수 있다. 이것은 압축기에서 압축일이 줄어드는 결과를 보이며 가스터빈에서는 추가적인 출력향상을 가져온다.

이전까지의 연구는 열역학적 해석에 집중하여 온도 및 일의 감소를 해석하거나[3], 실험에 근거하여 가스터빈의 성능변화에 집중되었다[1,2,4,5,6,8]. 그런데 물 입자를 분사할 경우 물이 증발하면서 습공기상태가 압축기 내부를 흐르게 되므로, 습공기의 온도, 압력, 유량 및 유동각이 공기만의 압축과정과 다르게 된다. 그러므로 단 사이의 매칭(matching)이 아주 중요한 다단의 축류압축기에서는 wet compression을 실용화 하는 것이 쉬운 문제가 아니다. 반면에 원심압축기에

서는 임펠러-디퓨저의 매칭(matching)만 고려한다면 wet compression의 장점을 이용할 수 있는 가능성이 있다. 그러므로 원심압축기에서 wet compression을 이용할 경우에는 압축과정에 대한 열역학적 해석 뿐 아니라, 압축과정의 변화에 따른 유동각의 변화 등이 성능에 미칠 영향에 대한 해석이 필요하다.

본 연구에서는 마이크로터빈에 사용되는 원심압축기에 물입자를 분사하여 압축기의 성능을 열역학적 관점에서 뿐 아니라 공력학적 관점에서 해석을 수행하였다. 물입자가 증발하면서 압축기 출구에서의 유동각 등의 변화와 성능에 미치는 영향에 대한 영향에 대하여 토의하였으며, 압력비와 증발율의 영향도 토의하였다.

2. 해석방법

2.1 해석대상 원심압축기

본 논문에서 해석대상으로 사용한 압축기는 국내에서 개발 완성단계에 있는 마이크로터빈에 사용되는 원심압축기로서[7] 자세한 사항은 표 1에 나타내었다.

표 1. 해석 대상 원심압축기의 사양

Diameter of impeller (mm)	153.24
RPM	60740
Pressure ratio	4.2
Isentropic efficiency (%)	81.0
Number of impeller/splitter blades	13 / 13
Type of diffuser	channel diffuser
Number of diffuser vanes	24

위 압축기가 사용되는 마이크로터빈은 1단의 원심압축기와 1단의 구심터빈으로 구성되어있고, 스플라인으로 연결된 고속발전기에서 약 67kW의 전기를 생산한다.

2.2 해석방법

원심압축기에서 물분사 압축과정에 대한 공역학적 해석을 수행하는 과정은 그림 1에 나타내었다. 먼저 일반적인 건공기에 대한 성능해석을 수행하고, 이 결과를 이용하여 압축기 출구에서 물분사 압축에 대한 열역학적 해석을 수행한 후, 압축기의 성능해석 결과에 반영하는 방식이다. 물분사 압축에 대한 열역학적인 해석을 수행할 때는 임펠러 출구에서의 평균유동상태에 대하여 적용하므로, 이 방법은 건공기에 대한 원심압축기의 성능해석 방법에 상관없이 사용될 수 있는 방법이다.

물을 분사한 경우의 압축과정에 대한 열역학적 지배방정식은 Zheng 등[3]이 유도한 식(1)과 같이 나타내 진다.

$$\frac{dp}{p} = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} + \frac{L}{R} \frac{dw}{dT} - \frac{1}{\gamma-1} \frac{n-\gamma}{n-1} \right) \frac{dT}{T} \quad (1)$$

여기서 p 는 압력, T 는 온도, w 는 steam to air ratio, L 은 latent heat, γ 는 specific heat ratio, n 은 polytropic exponent of dry air compression process이다. 해석에서 중요한 변수는 물의 증발율(dw/dT)인데, 이 변수는 물의 분사량과 물입자의 크기, 압축과정에서의 주변온도 등에 의하여 결정된다. Zheng등[1]은 증발율을 상수로 가정하고 위의 식(1)을 해석하여 압축기 출구에서의 온도의 감소량과 압축일의 감소량을 계산하였다.

본 연구에서는 wet compression과정을 식(1)과 함께 압축기의 성능해석 프로그램을 병행하여 풀어서 wet compression에서의 압축기의 성능을 해석하였으며, 증발율에 따라 압축일의 감소 및 온도, 유동각의 변화와 압축기의 성능을 해석하였다. 공기압축기의 성능해석을 통하여 계산된 압축기 입구와 출구의 압력과 온도로부터 polytropic exponent of dry air compression process인 n 을 식(2)와 같이 계산한다.

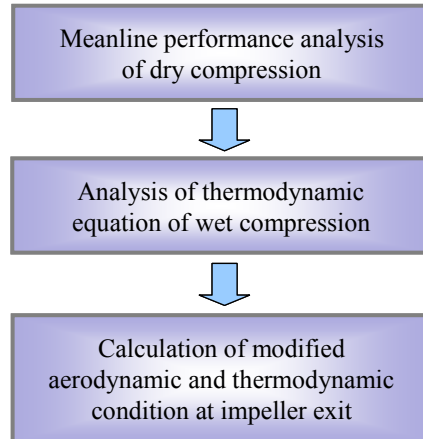


그림 1. 해석방법에 대한 흐름도

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (2)$$

식(1)에서 증발율이 상수라고 가정하면, L , γ , n 은 상수라고 볼 수 있으므로,

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} + \frac{L}{R} \frac{dw}{dT} - \frac{1}{\gamma-1} \frac{n-\gamma}{n-1} = \sigma(\text{constant}) \quad (3)$$

에서 상수 σ 를 계산할 수 있다. 그러면, 식(1)에서,

$$\frac{p_{2,wet}}{p_1} = \left(\frac{T_{2,wet}}{T_1} \right)^{\sigma} \quad (4)$$

이다. wet compression과정에 의하여 압력비는 거의 변하지 않으므로 압력비가 동일하다고 가정하면,

$$p_{2,wet} = p_{2,dry} \quad (5)$$

이므로, 식(4)에서 $T_{2,wet}$ 을 계산할 수 있게 된다. 그러면 압축일 $W_{wet}(kW)$ 는

$$W_{wet} = (\dot{m}_a h_{2a} + \dot{m}_{vap} h_{vap} + \dot{m}_{2w} h_{2w})$$

$$-(\dot{m}_a h_{1a} + \dot{m}_{1w} h_{1w}) \quad (6)$$

$$\dot{m}_{1w} = \dot{m}_{2w} + \dot{m}_{vap} \quad (7)$$

가 된다. 여기서 첨자 1은 압축기 입구, 2는 압축기 출구를 각각 의미하며, 첨자 a 는 공기, w 는 물, vap 는 수증기를 각각 의미한다. 그러면,

$$\Delta h_{wet} = \frac{W_{wet}}{\dot{m}_a + \dot{m}_{1w}} = U_2 C_{\theta 2, wet} \quad (8)$$

에서 wet compression 조건에서의 임펠러 출구에서의 회전방향 속도성분($C_{\theta 2, wet}$)을 알 수 있고, 이로부터 반복계산을 통하여 임펠러 출구에서 wet compression에 의한 수정된 속도삼각형과 정온도, 정압력 등을 결정할 수 있다.

3. 해석결과

3.1 설계점에서의 해석

표 1에 나타난 마이크로터빈용 압축기의 설계 조건에 대하여 물분사 압축(wet compression)과정을 해석하였다. 그림에 나타난 water/air mass flow rate는 압축기 입구로 분사되는 모든 물입자들이 100%증발한다는 가정하에 계산을 수행하였다. Bhargava 등[4]에 의하면 wet compression에 사용되는 물의 양은 공기유량의 0.5~2%정도 이므로 본 연구에서는 0~2.5%의 물입자 분사에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 2는 분사량에 따른 압축기 출구에서의 온도를 나타낸다. 증발율이 증가할수록 물의 증발양이 증가함에 따라 압축 공기의 온도가 감소함을 알 수 있다. 그림 3에는 증발율에 따른 압축기 출구에서의 상대습도를 나타낸다. 물이 분사되기 전의 공기는 상대습도가 0%라고 가정하고 계산을 수행하였다. 유입되는 공기의 상대습도가 0%가 아닌 경우에는 상온에서의 수증기량이 적어서 해석결과에 적은 영향을 미친다. 상대습도가 100%가 넘을 경우에는 물입자는 더 이상 증발하지 않는다. 본 압축기에 대해서는 분사량 2.43%에서 상대습도가

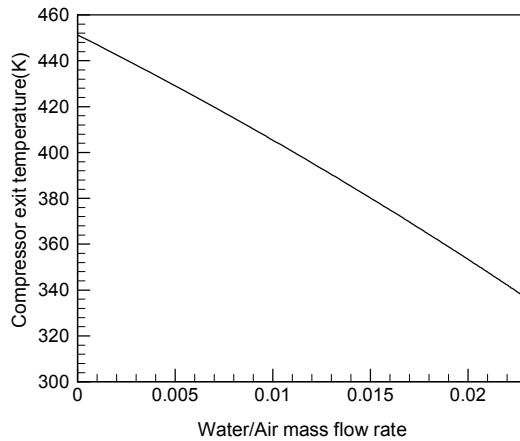


그림 2. 물분사 압축에 의한 압축기 출구에서의 온도(설계유량)

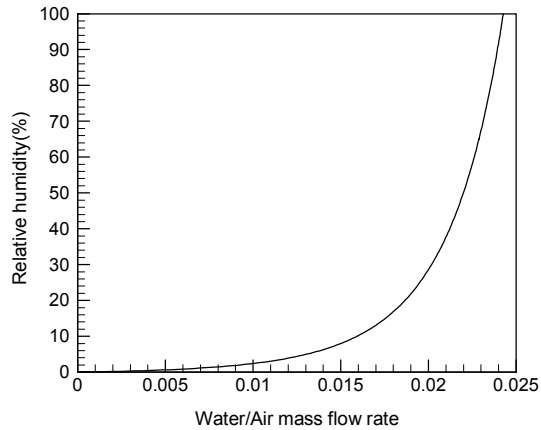


그림 3. 물분사 압축에 의한 압축기 출구에서의 상대습도 (설계유량)

100%가 되었다. 그림 4에는 분사량에 따른 압축일을 나타내었다. 분사량이 증가할수록 압축일은 감소하였으며 그 경향은 그림 2에 나타난 압축기 출구에서의 온도와 비슷하다.

물분사에 의하여 임펠러 출구에서의 유동각이 변하는 것은 압축기의 작동에 아주 중요한 정보이다. 유동각의 변화량은 식(9)와 같이 건공기 압축에서의 임펠러 출구 유동각의 차이로 나타내었다.

$$\Delta \alpha_2 = \alpha_{2, dry} - \alpha_{2, wet} \quad (9)$$

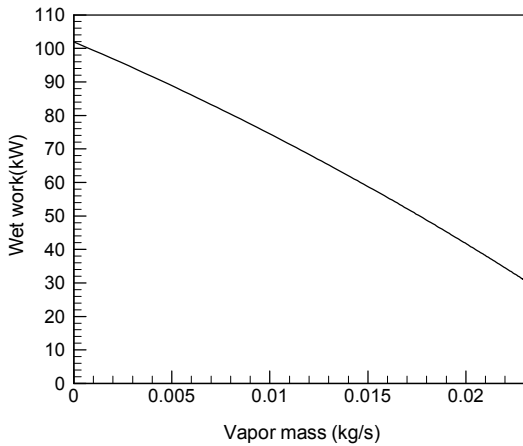


그림 4. 물분사 압축에 의한 압축기의 소요 동력(kW) (설계유량)

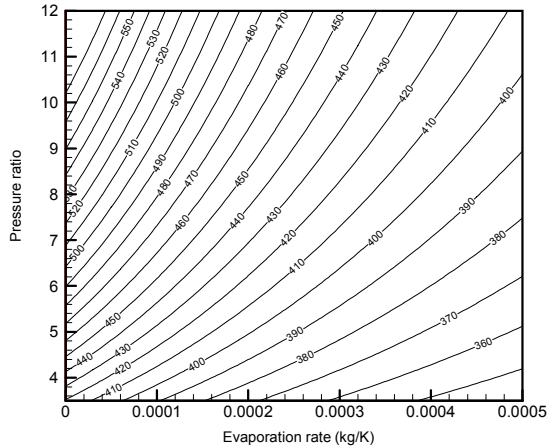


그림 6. 압력비와 증발율에 따른 물분사 압축에 의한 압축기 출구에서의 온도

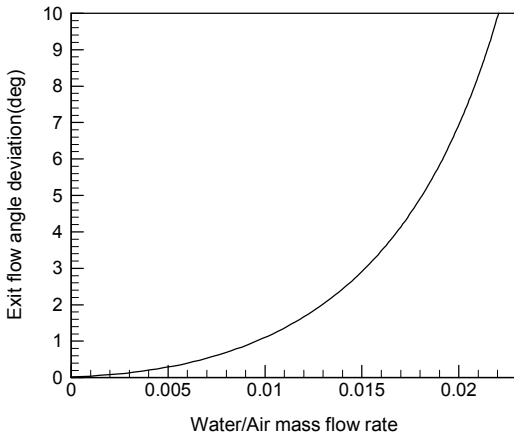


그림 5. 물분사 압축에 의한 압축기 출구에서의 유동각 감소량 (설계유량)

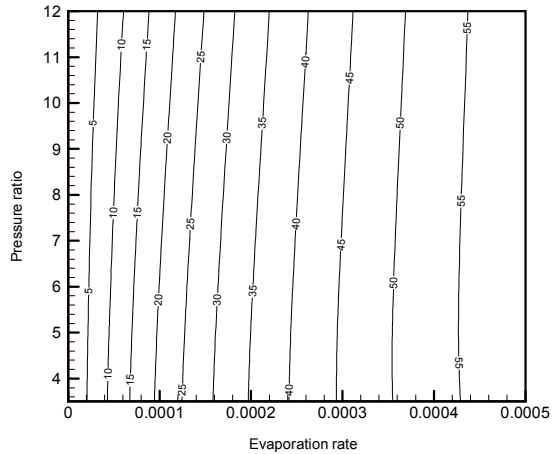


그림 7. 압력비와 증발율에 따른 물분사 압축에 의한 압축기 소요동력(%)의 감소량

그림 5에는 분사량에 따른 압축기 출구 유동각의 변화를 나타내었다. 물입자의 유량과 공기의 질량유량비(water/air mass flow rate)가 1% 인 경우 임펠러 출구의 유동각은 1.1° 감소하는 것이 예상되었고, 유량비가 2%인 경우 유동각은 7° 감소하는 것이 예상되었다. 유동각이 줄어드는 이유는 물분사 압축에 의하여 임펠러 출구에서 자오면 방향의 속도성분이 조금 줄어드는 반면 회전방향의 속도성분이 많이 줄어들기 때문에 유동각도가 감소한다. 항상 일정한 양의 물을 분사할 경우에는 베인디퓨저의 설정각을 물분사량

에 맞게 조정하여 설계할 경우 더 높은 성능의 압축기를 설계할 수 있음을 알 수 있게 되었다.

3.2 고압력비에서의 해석

표 1에 나타낸 원심압축기에 대하여 압력비와 증발율을 변화시키며 물분사 압축계 대한 성능해석을 계산을 수행하였다. 압력비의 변화는 설계 조건에서의 입구 유량계수를 맞추며 압축기의 회전수를 변화시킨 결과이다. 그림 6은 물의 증발

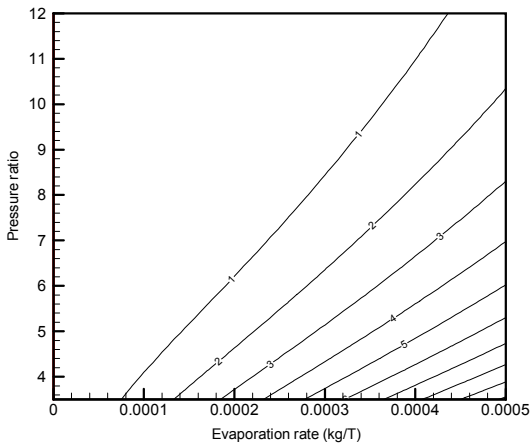


그림 8. 압력비와 증발율에 따른 물분사 압축에 의한 압축기 출구에서의 유동각 감소량

율(dw/dT)과 전압력비에 대한 압축기 출구에서의 온도를 나타낸다. 증발율이 커질수록 온도가 감소하며, 압력비가 클수록 증발율에 대한 온도의 감소량이 커짐을 알 수 있다. 그림 7는 물의 증발율과 압력비에 대한 압축일(compression work)의 감소량을 물분사가 없을 경우에 대한 %로 나타내었다. 증발율이 커지고 압력비가 증가할수록 일의 감소량이 커짐을 알 수 있다.

열역학적인 일의 감소량 외에 압축기 내부의 공력학적 해석에서 가장 큰 관심은 임펠러와 베인디퓨저의 매칭(matching)이다. 임펠러 출구의 유동각이 크게 변해서 베인디퓨저와 매칭이 심하게 변할 경우 압축기의 성능저하 뿐 아니라 스톨(stall)과 서지(surge)의 비정상 현상을 일으키고, 서지 한계선을 변화시키게 되어 가스터빈의 운영이 어려워질 수 있게 된다. 그러므로 물의 분사가 임펠러 출구에서의 유동을 얼마나 변화시키는지를 알 필요가 있다. 그림 8에는 공기압축과 물을 분사한 압축에 대하여 임펠러 출구에서의 유동각의 차이를 나타낸 그림이다. 유동각은 자오면을 기준으로 하였다. 물을 분사할 경우 공기압축과정보다 유동각이 줄어들었으며, 증발율이 높을수록 유동각 감소가 증가하였고, 압력비가 낮을수록 유동각 감소가 증가하였다. 그림 8의 결과로부터 마이크로 터빈에 물을 분사할 경우에는

분사량과 증발율에 따라 임펠러 출구의 유동각이 얼마나 변하는지를 알 수 있게 되었고, 이를 압축기의 성능해석에 적용하여 압축기의 성능변화를 예측할 수 있게 되었다.

본 연구에서 물의 증발율(dw/dT)을 상수로 가정하여 다양한 증발율에 대하여 계산을 수행하였는데 증발율은 앞에서 언급한 바와 같이 물의 분사량과 물입자의 크기 등에 의하여 결정된다. 증발율을 크게 하려면 물의 분사량이 많을 뿐 아니라 물입자의 크기가 작아서 공기와의 열전달 면적이 넓어서 압축기 내에서 충분히 증발할 수 있어야 한다. 특히, 1단의 원심압축기에서는 물입자가 임펠러를 지나는 시간이 짧으므로 임펠러 내부에서 충분히 증발하기 위해서는 물입자의 크기가 작은 것이 필수적이다. 향후 시험을 통하여 물입자의 크기와 증발율의 관계에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

4. 결 론

마이크로터빈에 사용되는 원심압축기에 물입자를 분사하여 압축기 내부에서 물입자가 증발하는 물분사 압축(wet compression)과정에 대한 해석을 수행하였다. 원심압축기 성능해석 방법에 물분사 압축과정을 추가하는 방식을 사용하여 물분사 압축과정을 공기압축기 성능해석방법과 연계하여 해석하여서 물분사 압축 과정에 대한 열역학적 및 공력학적 해석을 수행하였다. 결과에 주도적인 영향을 미치는 변수는 물입자의 증발율이며, 물입자의 증발율이 증가할수록 임펠러 출구의 온도가 낮아지고 압축일이 감소함을 확인하였다. 물입자의 분사에 의하여 임펠러 출구에서의 유동현상이 변함에 따라 임펠러와 디퓨저의 매칭이 중요한데, 해석을 통하여 임펠러 출구에서의 유동각은 증발율이 증가할수록 감소하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Mustapha Chaker, Cyrus B. Meher-Homji & Thomas Mee III, "Inlet Fogging of Gas Turbine Engines-Part I : Fog Droplet Thermodynamics, Heat Transfer, and Practical Considerations," ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 126, 2004, pp.545-558.
2. Mustapha Chaker, Cyrus B. Meher-Homji & Thomas Mee III, "Inlet Fogging of Gas Turbine Engines-Part II : Fog Droplet Sizing Analysis, Nozzle Types, Measurement, and Testing," ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 126, 2004, pp.559-570.
3. Qun Zheng, Yufeng Sun, Shuying Li & Yunhui Wang, "Thermodynamic Analyses of Wet Compression Process in the Compressor of Gas Turbine," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 125, 2003, pp.489-496.
4. Cyrus B. Meher-Homji & Thomas Mee III, "Inlet Fogging of Gas Turbine Engines - Part A : Theory, Psychrometrics and Fog Generation," 2000, ASME Paper No. 2000-GT-307.
5. Cyrus B. Meher-Homji & Thomas Mee III, "Inlet Fogging of Gas Turbine Engines - Part B : Practical Considerations, Control, And O&M Aspects," 2000, ASME Paper No. 2000-GT-308.
6. Bhargava, R. & Meher-Homji, C. B., "Parametric Analysis of existing Gas Turbines with Inlet Evaporative and Overspray Fogging," 2002, ASME Paper No. GT-2002-30560.
7. 강정식, 임병준, 차봉준, 양수석, "운전 익단간 극을 고려한 마이크로터빈 코어용 원심압축기의 성능특성 연구," 유체기계저널, 제8권, 제1호, 2005, pp.7-15.
8. Utamura, M., Kuwahara, T., Murata, H., and Horii, N., "Effects of Intensive Evaporative Cooling on Performance Characteristics of Land-Based Gas Turbine," 1999, Proceedings of the ASME International Joint Power Generation Conference, New York.