

화력발전소 유인송풍기의 Dual Fan 개발에 관한 연구

김일겸¹, 박우철^{1*}, 손상석², 김용남³

¹강원대학교 기계시스템공학부, ²순천향대학교 기계공학과, ³한국송풍기 엔지니어링

A Study on the Development of Dual Fan of Induced Draft Fan of Thermal Power Plant

Il-Gyoum Kim¹, Woo-Cheul Park^{1*}, Sang-Suk Sohn², Young-Nam Kim³

¹School of Mechanical System Eng., Kwangwon National University

²Dept. of Mechanical Eng., Soon Chun Hyang University

³Korea Fan Engineering

요약 본 연구에서는 화력발전소 유인 송풍기의 운전 비용을 절감하기 위하여 최대보증출력(MGR) 운전 조건에서 효율이 84% 이상인 MGR 송풍기를 개발하고, MGR fan과 ADD fan을 갖는 유인 송풍기 시스템의 연합 운전에 대하여 수치해석을 수행하였다. 요구되는 MGR 송풍기의 성능은 풍량 3,822 m³/min, 전압 683 mmAq, 회전수 1170 rpm, 사용온도 134 °C에서 효율 84 % 이상이다. MGR 송풍기의 성능에 대하여 수치해석을 수행하고, 이를 바탕으로 모델 팬을 설계·제작하여 성능을 평가하였다. 요구되는 성능을 만족하는 풍량 3,824.7 m³/min, 전압 686.2 mmAq, 효율 84.8%인 MGR 송풍기를 개발하였다. 개발된 MGR 송풍기와 ADD 송풍기를 갖는 Dual fan 유인 송풍기 시스템의 연합 운전에 대한 적합한 운전 방식을 예측하기 위하여 직렬, 병렬, 직병렬 등 각각의 연합운전에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 수행한 결과, 요구되는 송풍기 최대 운전점인 회전수 1170 rpm에서 풍량 5,096 m³/min, 전압 933 mmAq의 성능을 만족하기 위해서는 MGR 송풍기와 ADD 송풍기를 직렬 연합운전이 적합한 것으로 나타났다.

Abstract In this study, to reduce the operating cost of the Induced Draft (ID) fan of a thermal power plant, a Maximum Guaranteed Rating (MGR) blower with an efficiency of 84% or more was developed under the MGR operation condition. A numerical analysis was performed on the MGR blower, and based on this, a model fan was designed and manufactured to evaluate its performance. As a result, an MGR blower with an air volume of 3,824.7 m³/min, a total pressure of 686.2 mmAq, and an efficiency of 84.8% was developed, satisfying the required performance. To predict the operational method suitable for the combined operation of the Dual fan ID blower system with the developed MGR blower and ADD blower, a numerical analysis was performed on the combination methods of series, parallel, and series-parallel. As a result, a series connection of an MGR blower and an ADD blower was found suitable for the combined operation.

Keywords : Dual Fan, Thermal Power Plant, Combined Operation, ID Fan, Maximum Guaranteed Rating

본 논문은 중소벤처기업부 2019년도 창업성장기술개발사업(S2797024) 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Woo-Cheul Park(Kwangwon National Univ.)

email: wchpark@kwangwon.ac.kr

Received August 10, 2021

Revised August 30, 2021

Accepted December 6, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

송풍기는 전동기로 임펠러를 구동하여 대량의 공기를 공급해주는 산업용 유체기계이며, 발전, 철강, 오페수 처리시설, 석유화학, 반도체, LCD, 섬유, 식품, 시멘트 등 산업 전반에 광범위하게 사용되고 있는 공정용 기기이다.

화력발전소는 화석연료를 연소하여 발생된 열에너지를 이용하여 전기, 스팀 등의 에너지를 발생시키는 시스템이다. 일반적으로, 화력발전소는 열 발생부인 보일러 이외에 열교환 설비 및 대기오염 방지설비 등이 설치되어 있고, 각 설비는 각각 고유의 운전 조건이 요구된다. 화력발전소의 통풍계통은 Fig. 1과 같으며, 보일러(Furnace), 공기예열기(Gas Air Heater), 압입송풍기(Forced Draft Fan), 전기집진기(Electric Precipitator), 유인송풍기(Induced Draft Fan) 및 연돌(Stack)로 구성되어 있다.

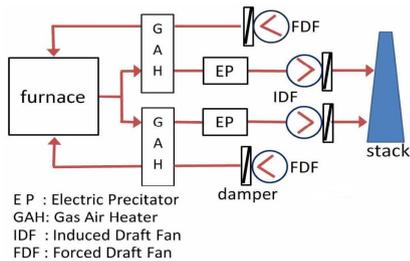


Fig. 1. Schematic of a power plan draft system[1]

통풍계통에서 유체의 흐름은 압입 송풍기에서 연소용 공기를 흡입하여 공기예열기를 통과 시킨 후 보일러로 공급되고, 보일러에 공급된 공기는 연료개통으로 공급된 연료와 보일러에서 연소된 후 다시 배기계통을 거치게 되며 공기예열기를 통과하게 된다. 공기예열기를 통과한 배기가스는 전기집진기에서 먼지를 여과시킨 뒤, 유인송풍기 및 연돌 배압으로 연돌을 통하여 대기로 방출된다 [1].

화력발전소의 송풍기는 보일러에서 발생하는 열에너지를 사용하거나, 이를 이용하여 발전을 위한 필수 설비이며, 발전기간 동안 계속 가동되기 때문에 전기에너지를 지속적으로 소비하며, 특히 대용량일수록 전기에너지의 소비는 커져 사용 상태에서의 효율 향상이 필요하다. 또한, 배기가스 규제 강화 등으로 인하여 배기시스템이 변경될 수도 있으며, 이러한 상황에 대처하려면 설치된 송풍기보다는 용량이 큰 제품으로 교체하거나 복수의 송풍기로 시스템을 구성하여 송풍기를 직렬로 연결하여 압력

을 높이거나, 병렬로 연결하여 풍량을 증가시키면 된다.

Table 1에서 보는 바와 같이 국내 N 화력발전소에 사용되는 유인송풍기의 구매사양, 즉 송풍기 최대 운전점(TB)은 최대보증출력(MGR)을 기준으로 풍량은 약 25%의 여유가 있고, 압력은 약 27%의 여유가 있다. 이로 인하여 구매 사양의 효율은 84% 정도로 고효율이나, 통상 운전 조건인 MGR 운전 조건에서는 효율이 63.7%로 저하하는 단점이 있어 유지비용이 과다하게 발생한다. 이러한 단점의 원인은 TB 운전조건에 성능에 만족하는 한대의 송풍기를 사용하여 MGR 운전조건으로 운전하기 위하여 베인 컨트롤 댐퍼(vane control damper)를 이용하여 시스템 저항을 조절하기 때문이다.

Table 1. Fan performance according to operation condition

Spec.	TB	BMCR	NR	MGR
Air flowrate [m ³ /h]	5,096	4,062	3,908	3,882
Total pressure [mmAq]	933	747	691	683
Efficiency [%]	84	71.2	64.8	63.7
Shaft power [kW]	925	696	681	670

- * TB : Test Block
- * BMCR : Boiler Maximum Continuous Rating
- * NR : Nominal Rating
- * MGR : Maximum Guaranteed Rating

위의 단점을 보완하기 위하여 MGR 송풍기(MGR Fan)와 추가 송풍기(ADD Fan)의 2대의 송풍기를 적용하여 통상 운전 조건인 MGR 운전 조건에서는 MGR 송풍기를 가동하고, TB 운전 조건에서는 MGR 송풍기와 ADD 송풍기를 동시에 운전하는 연합운전을 통하여 요구되는 유량과 압력 조건으로 운전한다면, 화력발전소 유인 송풍기의 운전비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 2는 기존 시스템인 단일 유인 송풍기(Single Induced Draft fan)를 나타낸 것이고, Fig. 3은 개발하고자 하는 이중 유인 송풍기(Dual ID fan system)을 나타낸 것이다. 송풍기에 관한 연구는 피치각 가변형 축류팬의 성능과 소음특성에 대하여 실험을 수행하였고[2], 임펠러 형상에 따른 양흡입 원심송풍기 성능 특성에 대하여 수치해석을 수행하였고[3], 시로코 팬의 유동 및 소음에 대하여 수치해석을 수행하여[4] 주로 단일 송풍기에 관한 연구가 주를 이루며, 송풍기 연합운전에 대한 연구는 생활폐기물 자동 집하시설용 다단 직렬 연결 원심송

풍기의 현장 실험[5]은 있으나, 화력발전소 송풍기의 연합운전에 대한 수치해석은 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 MGR 운전 조건에서 사용되는 효율이 84% 이상인 송풍기를 설계·제작하여 성능을 검증한 후, 제안된 MGR 송풍기와 ADD 송풍기를 갖는 Dual fan 유인 송풍기 시스템에 적합한 연합 운전 방식을 선정하기 위한 수치해석을 수행하였다.

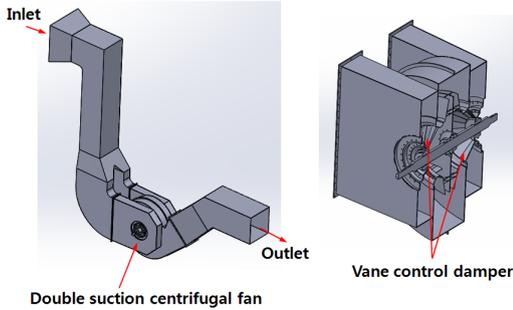


Fig. 2. Existing system single ID fan system

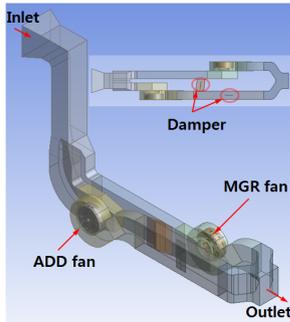


Fig. 3. Development system dual ID fan system

2. 본론

2.1 MGR 송풍기 개발

2.1.1 수치해석

요구되는 MGR 송풍기의 성능은 풍량 3,822 m³/min, 전압 683 mmAq, 회전수 1170 rpm, 사용 온도 134 °C에서 효율 84 % 이상이다. 요구되는 성능을 만족하는 송풍기를 설계하여 모델링하고 이를 수치해석을 통하여 성능을 예측하였다. 수치계산은 상용코드인 ANSYS CFX 13.0을 사용하였다. 난류모델은 유동의 박리현상 해석에 유용한 전단응력 이송모델(Shear stress transport model)을 사용하였으며[3], 회전과 정지 도

메인의 경계는 Frozen rotor interface를 적용하였다.

Fig. 4는 수치해석을 수행하기 위한 모델링 및 경계조건을 나타낸 것으로 일반 유동이 발생하는 induct, outduct, stator 도메인과 회전유동이 발생하는 rotor의 4개의 domain으로 구성하였다. 입구경계조건은 개방조건으로 압력은 0 Pa 이고, 출구경계조건은 유출조건으로 유량은 3,822m³/min 이다. 격자의 민감도 분석을 통하여 induct는 102,127 nodes와 322,216 elements, outduct는 60,980 nodes와 193,824 elements, stator는 2,873,904 nodes와 11,973,178 elements, rotor는 4,230,027 nodes와 18,690,419 elements로 구성되어 해석에 사용된 격자(mesh)는 총 7,270,038 nodes와 31,179,637 elements 이다.

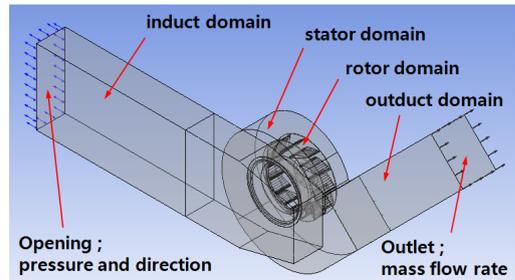


Fig. 4. Modeling and boundary condition for numerical analysis

최적의 임펠러 수를 얻기 위하여 Fig. 5와 같은 구조의 임펠러 형상(∅2,100 mm)을 갖도록 모델링 하였으며, 임펠러 수를 11개부터 15개까지 각각의 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다.

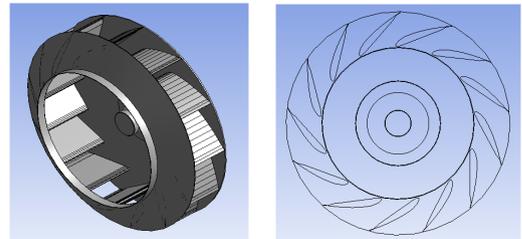


Fig. 5. Impeller shape 13 Impellers

Fig. 6은 임펠러 중앙 단면에서 절대속도의 등고선을 나타낸 것이고, Fig. 7은 임펠러 중앙 단면에서 상대속도의 등고선을 나타낸 것이다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 절대속도는 임펠러 끝단의 후단에서 최대 절대속도를 발생하고 있으며, Fig. 7에 나타난 바와 같이 상대속도의

경우에는 임펠러 끝단 후면에서 와류가 발생한다. 이러한 현상은 원심 송풍기에서 발생하는 일반적인 특성이다[6]. 그리고 끝단 후면의 와류 영역은 임펠러 수가 13개인 경우에 가장 작게 나타났다.

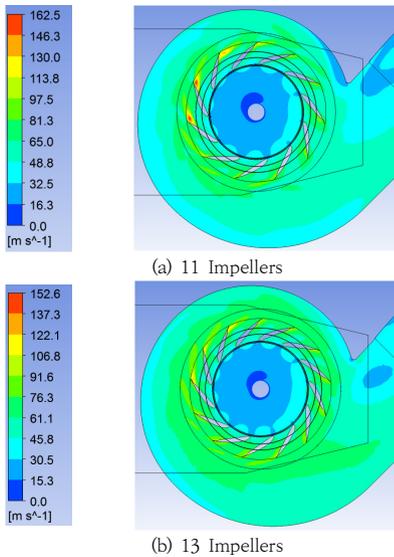


Fig. 6. Contour of absolute velocity in stationary frame at impeller center

Fig. 8에 도시된 바와 같이 절대속도의 경우, 임펠러 수가 증가함에 따라 절대속도의 최대값은 줄어들지만, 13개 이상에서는 다시 증가하는 경향을 나타내고 있고, 상대속도의 경우 최대값은 임펠러 수 13개까지 감소하지만, 그 이상에서는 그 변화가 거의 없다고 할 수 있다. 이를 통하여 최대 절대속도가 가장 작은 경우가 최적의 임펠러 수임을 알 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 임펠러 수에 따른 전압, 축동력과 효율을 나타낸 것이다. 축동력은 임펠러의 토크를 계산한 후 각속도를 곱하여 구하였다. 임펠러 수가 증가할수록 전압과 축동력은 증가하고, 효율은 임펠러 수가 13개까지 증가하다 그 이후에는 정체하는 경향을 보인다. 이를 통하여 제안된 송풍 시스템에서의 최적 임펠러 수는 13개임을 알 수 있다.

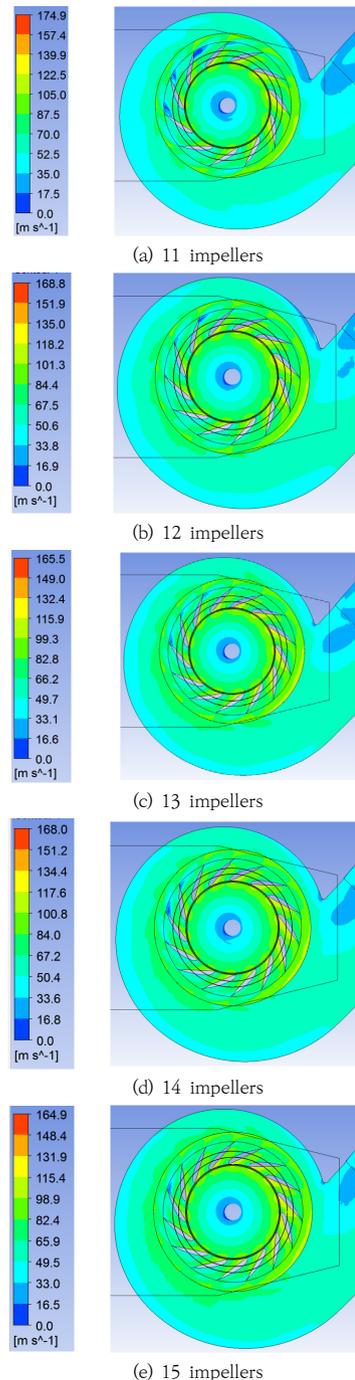


Fig. 7. Contour of relative velocity at impeller center

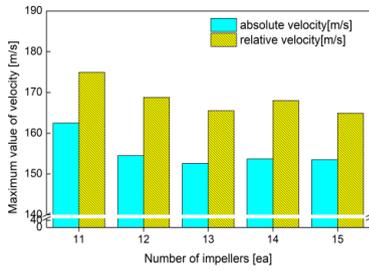


Fig. 8. Maximum velocity according to the number of impeller

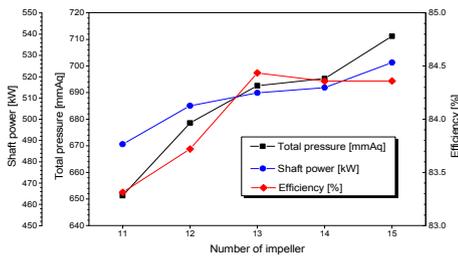


Fig. 9. Performance according to the number of impeller

2.1.2 제작 및 성능시험

수치해석 결과를 바탕으로 MGR 송풍기의 성능평가를 위하여 임펠러 수가 13개인 모형 MGR 송풍기를 설계·제작하여 성능시험을 수행하였으며[7], 성능 검증을 위하여 한국산업기술시험원의 시험성적서(20-064439-01-1)를 발급 받았다.

Fig. 10(a)는 성능시험을 위하여 제작된 임펠러의 사진이고, Fig. 10(b)는 송풍기 성능시험을 위하여 테스트 베드에 임펠러가 장착된 시험장치 사진이다.

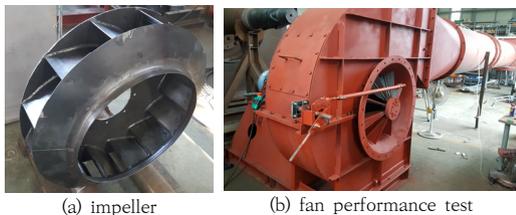


Fig. 10. Photo of impeller and performance tester

Fig. 11은 모델 송풍기 측정값을 기준으로 개발 송풍기로의 환산 결과에 대한 MGR 송풍기의 성능곡선으로, 풍량 3,824.7 m³/min에서 전압 686.2 mmAq, 효율 84.8 %로 나타났다. 수치해석 결과는 풍량 3,822

m³/min에서 전압 691.2 mmAq, 효율 84.1 %로 나타나, 수치해석 결과가 성능 시험값을 기준으로 전압은 0.73% 높게 나타났고, 효율은 0.83% 낮게 나타났다.

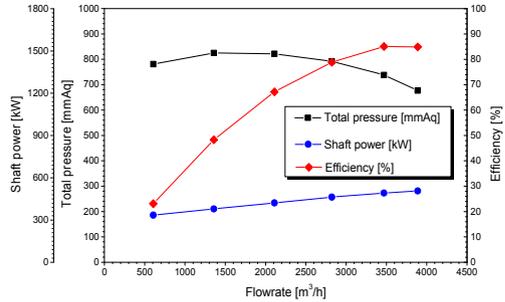


Fig. 11. Performance curve of MGR fan

2.2 직병렬 연합운전 수치해석

송풍기 최대 운전점인 회전수 1170 rpm에서 풍량 5,096 m³/min, 전압 933 mmAq의 요구 성능을 만족하는 MGR 송풍기와 ADD 송풍기를 갖는 Dual fan 송풍시스템에서의 적합한 직병렬 연합운전 조건을 파악하기 위하여 수치해석을 수행하였다.

Fig. 12은 연합운전 유인송풍기 시스템의 수치해석에 적용된 MGR 송풍기와 ADD 송풍기의 임펠러 모델이다. 연합운전에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 해석 domain을 총 11개로 구성하였으며, 해석 방법은 앞서 설명한 MGR 송풍기와 같은 방법으로 수행하였다.

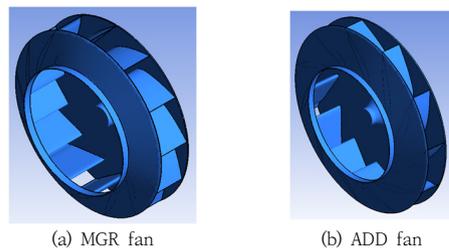


Fig. 12. Modeling of MGR and ADD fan

요구되는 송풍기 최대 운전점인 회전수 1170 rpm, 풍량 5,096 m³/min에서 MGR 송풍기와 ADD 송풍기의 연합운전 방식에 따른 수치해석 결과는 다음과 같다. Fig. 13은 직렬 운전의 경우, Fig. 14는 병렬 운전의 경우, 그리고 Fig. 15는 직병렬 운전의 수치해석 결과를 나타낸 것이다.

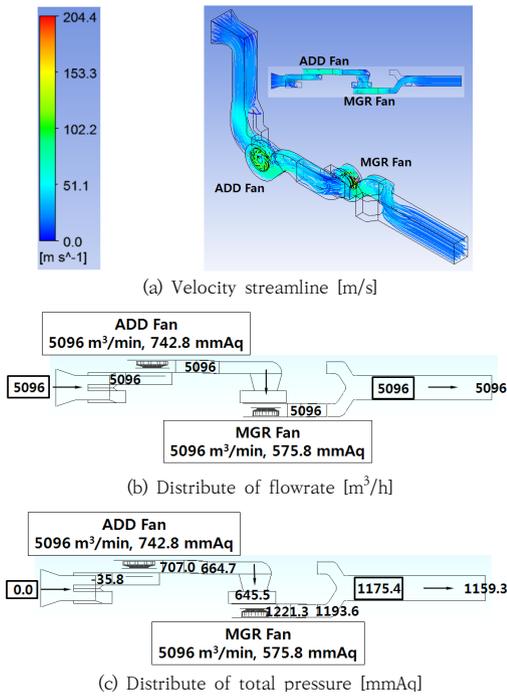


Fig. 13. Result of serial combined operating condition

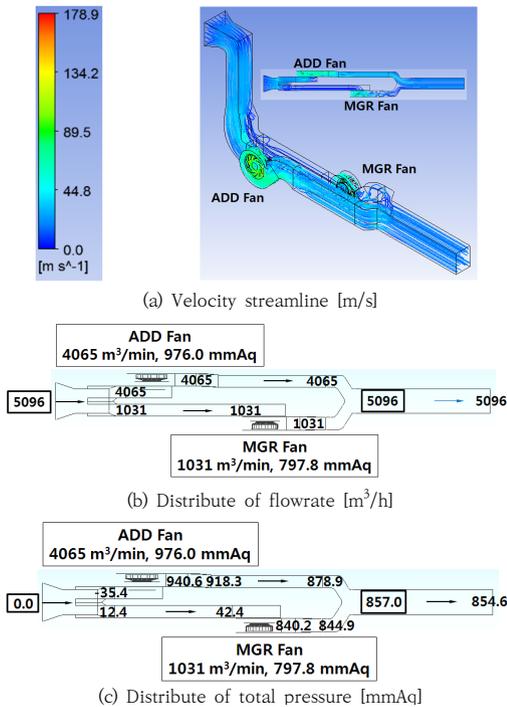


Fig. 14. Result of parallel combined operating condition

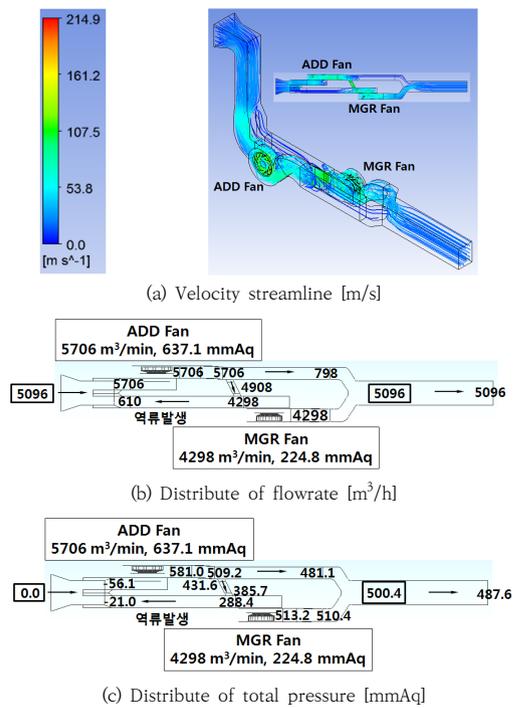


Fig. 15. Result of serial-parallel combined operating condition

전압의 경우, 직렬 운전은 1175.4 mmAq, 병렬 운전은 857 mmAq, 직병렬 운전은 500.3 mmAq로 나타났다. 직병렬 운전에서 가장 낮은 전압이 나타난 것은 역류에 기인한 것으로 판단된다. 연합운전에서 요구되는 전압이 933 mmAq 보다 작은 경우에는 요구되는 풍량보다 작은 풍량으로 송풍기가 운전하기 때문에 전압이 933 mmAq 이상의 성능을 만족하는 직렬운전의 연합운전으로 설치하여 송풍기를 운전하여야 한다.

3. 결론

본문에서는 화력발전소에서 사용되는 유인 송풍기의 운전비용을 절감하기 위하여 MGR 운전 조건에서 사용되는 효율이 84% 이상인 송풍기를 설계하여 성능을 예측하고 검증한 후 이를 통하여 MGR 송풍기와 ADD 송풍기로 연합 운전하는 유인송풍기 시스템에 수치해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 요구되는 MGR 송풍기의 성능은 풍량 3,822 m³/min, 전압 683 mmAq, 회전수 1170 rpm, 사용온도 134 °C에서 효율 84 % 이상이며, 수치

해석을 통하여 MGR 송풍기의 성능을 예측하고 이를 통하여 모델 팬을 설계한 후 제작하여 요구되는 성능을 만족하는 풍량 3,824.7 m³/min, 전압 686.2 mmAq, 효율 84.8%인 MGR 송풍기를 개발하였다.

- (2) MGR 송풍기와 ADD 송풍기의 연합운전 유인송풍기 시스템의 타당성을 예측하기 위하여 수치해석을 수행한 결과, 요구되는 송풍기 최대 운전점인 회전수 1170 rpm에서 풍량 5,096 m³/min, 전압 933 mmAq의 성능을 만족하기 위해서는 MGR 송풍기와 ADD 송풍기의 직렬 연결이 적합한 것으로 나타났다.

References

- [1] Kim Sung Won, "Reconfiguration of a fan blade for pressure loss rise in a power plant draft system", *The Plant Journal*, Vol.9, No.1, pp.6-11, 2013.
- [2] Sung-Taek Jeon, Jin-Pyo Cho, "Effect of Pitch Angle and Blade Length on an Axial Flow Fan Performance", *Journal of the Korea Academia- Industrial cooperation Society*, Vol.14, No.7, pp.3170-3176, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.7.3170>
- [3] Jong-Sung Lee, Choon-Man Jang, "Performance Characteristics of the Double-Inlet Centrifugal Blower according to the Shape of an Impeller", *Journal of Fluid Machinery*, Vol.17, No.1, pp. 28-34, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2014.17.1.028>
- [4] Jeong-Seok Kang, Jin-Taek Kim, Cheol-Hyung Lee, Byung-Joon Baek, "A Study on Three-Dimensional Flow Analysis and Noise Source of Sirocco Fan", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.12, pp.896-902, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.896>
- [5] Choon-Man Jang, Jong-Sung Lee, "Operating Characteristics of Serially Connected Centrifugal Blowers Used for Automated Vacuum Waste Collection System", *Journal of Fluid Machinery*, Vol.4, No.17, pp.40-46, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2014.17.4.040>
- [6] Choon Man Jang, Ka Ram Choi and Sang Ho Yang, "Performance Analysis of a Centrifugal Fan with Splitters", *Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol.35, No.10, pp.1067-1073, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2011.35.10.1067>
- [7] KS B 6311, "Testing methods for industrial fans", Korean Standards, 2017.

김 일 겸(II-Gyoum Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 인하대학교 공과대학 기계과 (공학사)
- 1990년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 2010년 10월 : 강남필터(주) 연구소장
- 2012년 1월 ~ 2018년 2월 : 첨단기공(주) 연구소장
- 2016년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 기계시스템공학부 강사

<관심분야>

유체기계, 산업기계설비, 공기조화

박 우 철(Woo-Cheul Park)

[종신회원]



- 1987년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 기계시스템공학부 교수

<관심분야>

지능형 구조물 및 시스템, 진동 및 소음, 친환경기계설비

손 상 석(Sang-Suk Sohn)

[정회원]



- 1983년 2월 : 인하대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1986년 9월 ~ 2012년 1월 : 삼성 전자 종합기술원 상무
- 2012년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 교 교수

<관심분야>

유체기계, 공기조화

김 용 남(Young-Nam Kim)

[정회원]



- 2018년 8월 : 한국방송통신대학교
첨단공학부 메카트로닉스과 (공학사)
- 1984년 7월 ~ 2014년 9월 :
(주)동양 플랜트사업본부 공장장
- 2014년 10월 ~ 현재 : (주)한국송풍
기 엔지니어링 대표이사

〈관심분야〉

유체기계