Six Sigma 기법을 이용한 이중 스월 가스터빈 연소기의 튜닝시험

이민철*,** † · 안광익** · 윤영빈*

Tuning Test of a Double-Swirl Gas Turbine Combustor using Six Sigma Tools

Min Chul Lee*,**†, Kwang Ick Ahn**, Youngbin Yoon*

ABSTRACT

This paper describes combustion tuning methodology of double-swirl gas turbine combustor using six sigma tools. This methodology is consist of five steps-Define, Identify, Design, Optimize and Verify (DIDOV). First, the NOx reduction target was defined in the step design; second, the current status of the plant was diagnosed in the step of identify; third, the vital few control parameters to achieve the defined target were determined by analyzing the correlation between the control parameters and NOx emissions in the step of design; fourth, the optimum condition was derived from one of the six sigma tools in the step of optimize; finally, the optimum condition was verified by applying the condition to the gas turbine combustor in the step of verify. As a result of the suggested method, averaged NOx emissions were reduced by more than 70% and the standard deviation was improved by more than 60%. Thus, this methodology can be attributed to the efficient reduction of NOx emission with saving combustion tuning time.

Key Words : Combustion Tuning, Gas Turbine Combustion, Six Sigma, Double-swirl Gas Turbin Combustor

종래에는 가스터빈 연소튜닝시에 기존의 제어값들을 기준으로 아래위로 조금씩 바꾸었을 때, 발생하는 NOx 및 연소진동의 특성을 관찰하여 사람의 판단에 의해 최종입력값(setting value)을 결정하였다. 이와 반면에 본 연구에서는 연소튜닝시 Six Sigma 기법을 이용하여 보다 과학적인 방법으로 최적화된 제어값을 결정하는 방법론을 제시하고, 시험을 통해 이 방법의 효율성을 검증하였다. 본 연구에서는 두산중공업에서 개발 중인 5MW급 이중스월 가스터빈 연소기를 대상으로 고온(공기공급온도 400°C 내외), 상압연소시험을 수행하였고, 그 NOx 및 CO 배출특성, 연소온도, 화염구조, 연소진동 특성 및 종래의 방법을 이용한 튜닝시험결과는 이전 연구에 상세히 기술되어 있다.[1,2] 연소튜닝전 운전조건에서 NOx 배출특성은 그림 1과 같으며, 상압에서 이루어진 시험이기에 rig-engine correlation을 검증하기 위해 Park 등[3]이 수행한 결과와 비교하여 그 정성적 결과가 매우 유사함을 확인하여 본 연구의 유효성을 검증하였다.

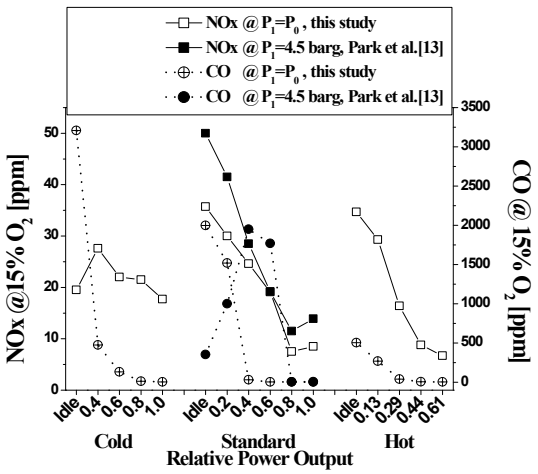

Fig. 4. NOx and CO emissions with respect to relative power output when combustion chamber pressure is ambient pressure and 4.5 barg(Park et al.[3]).

* 서울대학교 기계항공공학부
** 한국전력공사 전력연구원
† 연락저자, lmc@snu.ac.kr
TEL : (02)-880-7396 FAX : (02)-880-8032

연소시험결과 모든 조건에서 연소진동의 크기는 0.1 kPa 이하였고, 주파수는 250Hz 내외에서 1-L 모드(fundamental longitudinal)를 보였다. 이는 Park의 결과에서 500Hz의 연소진동 주파수가 나타난 것을 거의 절반인데 이는 본 상압연구가 경계조건이 closed-open system인 quarter wave의 특성을 보이는 반면에 Park 등의 연구에서는 closed-closed system인 half wave의 특성을 보이기 때문에 그 특성주파수가 반으로 나타난다고 할 수 있다.

Base load에서 NOx배출량은 그림 2에서 보는 바와 같이 약 21.5 ppm이었는데, Six Sigma를 이용하여 연소튜닝시 30%가 감축된 15.1 ppm를 목표치로 설정하였다. Cause and effect 선도를 통해 CTQ(critical to quality)를 Pilot to Main fuel ratio와 Air mass flow excess ratio로 결정하였고, 이 두 CTQ에 대해 실험계획법의 내접설계와 회귀분석을 통해 식 (1)을 결과적으로 구해내었다. 그림 3과 같이 식 (1)은 NOx에 대한 등고선도로 나타낼 수 있고, 그 등고선도를 기준으로 최적 조건을 P/M ratio가 15, Air mass flow excess ratio가 100으로 설정하였다. 그 조건에서 NOx 배출특성을 검증한 결과 그림 4와 같이 NOx 평균 배출량은 21.5에서6.18로 감소하였고, 표준편차는 2.45에서 0.98로 감소하였다.

$$NOx = 42.87 + 34.36 \times (\text{P/M ratio}) - 15.53 \times (\text{Air mass flow excess ratio}) - 10.36 \times (\text{Air mass flow excess ratio}) \times (\text{P/M ratio}) \quad (1)$$

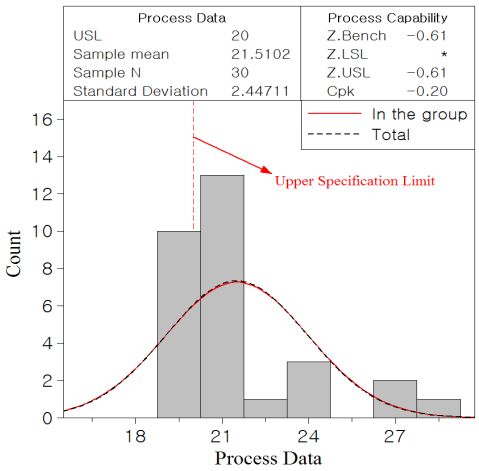

Fig. 2. Process capability of NOx emissions before tuning.

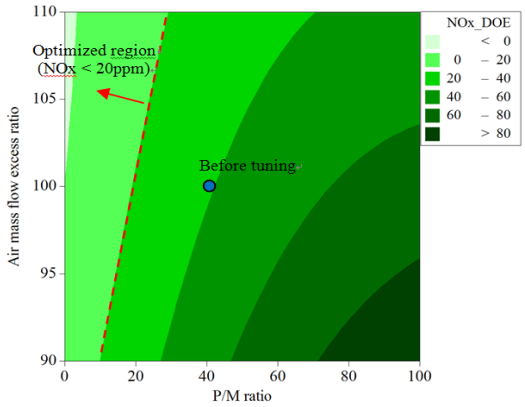

Fig. 3. The contour diagram of NOx emissions with respect to the air mass flow excess ratio and P/M ratio.

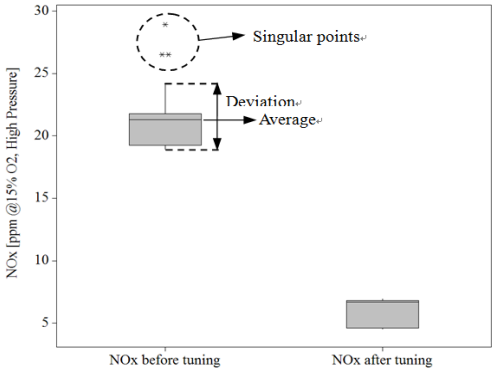

Fig. 4. Box plot of NOx emissions for verification.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제 성과입니다. (R-2005-1-390-004)
또한 본 연구는 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(0498-20110009)과 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] 이민철, 윤영빈, "이중 스월 수직형 가스터빈 연소기의 튜닝시험", 한국연소학회 추계학술대회 논문집, 2011, pp. 171-176.
[2] M. C. Lee, K.I. Ahn, Y. Yoon, " Development of Gas Turbine Combustion Tuning Technology using Six Sigma Tools", ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68019.
[3] P.M. Park, H.M. Kim, Y.H. Choi, S.S. Yang, M.H. Chon, "Performance Test of 5MW Gas Turbine Engine Combustor". Journal of The Korean Society of Combustion, Vol 13(4), 2008, pp. 26-36.