

SOFC 산화전극 배기가스 순환 시스템을 위한 이젝터 최적 설계

조 성 종^{*†}

* STX 메탈 기술연구소

Ejector Optimization for SOFC Anode Off-Gas Recirculation System

Sung Jong Jo^{*†}

* Dept. of Research and Development, STX Metal.

(Received June 12, 2012 ; Revised October 13, 2012 ; Accepted October 16, 2012)

Key Words: Ejector(이젝터), Solid Oxide Fuel Cell(고체산화물 연료전지), Kriging(크리깅), Genetic Algorithm(유전알고리즘), Anode Off-Gas Recirculation(산화전극 배기가스 재순환), CFD(전산유체역학)

초록: 본 연구에서는 1kW 급 SOFC 시스템의 AOGR(anode off-gas recirculation)을 위한 이젝터를 설계하고 이젝터 적용시의 시스템 효율을 매개변수 연구를 통해 알아보았다. 화공해석 프로그램을 이용하여 이젝터의 작동 조건을 계산하였고, 전역 최적값을 보장하면서도 CFD 계산에 따른 부하를 최소화하기 위하여 유전 알고리즘과 크리깅 모델을 이용하여 최적화를 진행하였다. 최적화를 통해 음속 이젝터에서 가장 큰 영향을 미치는 설계 변수가 이젝터의 목지경과 1 차 노즐의 위치임을 식별하였다. 유동변수에 대한 매개변수 연구를 통해 설계된 이젝터는 1kW 급 SOFC 의 다양한 작동 조건에서 충분한 유연성을 가지며, SOFC 에 적용시 증기의 56% 와 연료의 8.4% 절감이 가능함을 보였다.

Abstract: In this study, an ejector was designed to recirculate the anodic off-gas of SOFC, and a parametric study of the system performance was conducted at various ejector entrainment ratios. Aspen Plus, a chemical engineering program, was used to calculate the operational conditions of the ejector. To minimize the calculation load of the CFD and to ensure the global optimum, a genetic algorithm and Kriging model were used for the optimization. The optimization results showed that the dominant design variables of the sonic ejector are the throat diameter and the first flow nozzle position. The designed ejector has enough flexibility for different operating conditions of a 1-kW SOFC system. When the ejector was applied to the SOFC, it reduced 56% of the steam and 8.4% of the fuel compared to the reference case.

1. 서 론

SOFC 는 효율적인 연료 전환 장치의 하나로 높은 작동 온도 범위를 가진다. 이로 인해 고가의 촉매를 필요치 않으며 수소 이외에 일산화탄소 역시 연료로서 사용이 가능하고, 촉매 피독에 대한 위험성이 낮으며, 다른 연료전지 시스템에 비해 개념이 매우 단순한 등 다양한 장점으로 인해 활발한 연구가 진행되고 있는 연료전지 중 하나이다.⁽¹⁾ 하지만 고온에 따른 단점으로 투입 유동에 대한 가열이 어렵고 재료 선정 및 열구조적인 문제와 스택 배기가스(stack off-gas)에 대한 세심한

활용이 이루어지지 않으면 시스템의 전체 효율을 향상시키기 어렵다.

실제로 연료전지에 사용되는 수소는 저장이 어렵고 낮은 에너지 밀도로 인하여 기존 탄화수소 연료에 비하여 경제성 및 활용성이 떨어지는 에너지원이다. 메탄의 경우 1 분자당 4 개의 수소 원자를 가지는데 비해 수소 분자는 2 개의 수소 원자를 가진다. 탄화수소의 경우 수소 자체보다 더 치밀한 분자 구조를 가지기 때문에 더 큰 에너지 밀도를 가지게 된다. 또한 수소는 액체 상태로 저장하여도 낮은 밀도를 가진다. 따라서 고온형 연료전지는 시스템의 연료에 대한 유연성을 확보하고 스택에서 나오는 다량의 열에너지를 활용하고자 일반적으로 개질(reforming) 시스템을 함께 갖추고 있다.

개질 과정은 탄화 수소 연료에서 수소를 추출하

† Corresponding Author, sungjong.jo@gmail.com

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

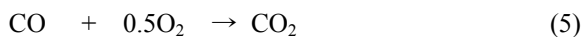
는 과정으로 흡열 반응이고 500°C 이상의 고온에서 이루어진다. (식 1-3)



개질 반응에서는 증기를 필요로 하는데 일반적으로 메탄 분자 하나당 2.5~3.0 의 증기를 투입, 실제 양론 계수상의 량보다 더 많은 양을 투입한다. 개질 과정에서 발생하는 탄소가 촉매에 퇴적될 경우 촉매 성능의 저하를 가져오게 되는데 다량의 증기가 이를 방지하기 때문이다. 따라서 개질 과정은 물의 증발 잠열로 인한 많은 에너지가 소모되고 펌프 및 열교환기 등의 파트를 필요로 하게된다.

하지만 스택의 배기가스에는 스택에서의 전기 화학 반응으로 인해 많은 량의 물과 고온의 열이 포함되어 있고 스택의 효율을 높이기 위하여 일부의 연료가 사용되지 않고 통과하게 된다. 따라서 이를 활용하면 개질기에 투입되는 증기와 연료의 일부를 대체할 수 있는데 이와 같은 개념을 AOGR (anode off-gas recirculation)이라 한다.

SOFC 스택에서는 전기화학 반응(식 4,5)으로 인하여 이산화탄소와 물이 생성되고 또한 농도 손실로 인한 효율 저하를 막기 위하여 일부의 연료는 반응하지 않고 스택을 통과하게 된다.



또한 배기가스의 온도는 800°C 이상으로 이를 재순환할 경우 전체 시스템의 연료 이용량 감소 및 증기 생성에 필요로 하는 부품의 제거 또는 축소가 가능하여 시스템의 크기 감소는 물론 효율 향상도 기대할 수 있다.

하지만 스택 및 핫박스(hot box) 내부의 높은 온도로 인하여 기존의 펌프, 컴프레서 등은 가스의 밀폐, 재질의 고온 산화 등의 문제로 대응이 불가능하며 이를 피하기 위해 배기가스의 온도를 낮추어 순환시킬 경우 시스템이 복잡해지고 효율이 떨어지는 문제가 발생한다. 이에 대한 해결책으로 최근 이젝터(ejector)를 이용한 SOFC 배기가스 재순환 시스템이 많은 관심을 끌고 있다.

이젝터는 고압의 유체 유동을 이용하여 저압의 유체를 보다 높은 압력으로 활성화하여 수송하는 장치이다. 비교적 소형의 장치로 대용량의 유체를 압축 수송할 수 있고 구동부가 없어 유지 보수의

편의성이 높은 특징을 가지고 있다. 이젝터는 여러 분야에서 다양하게 적용되고 있는데 특히 수증기 냉각 시스템,⁽²⁾ 가스 혼합, 공압 수송, 석유 정류 분야, 항공기 추력 증강 장치,⁽³⁾ 연소, 소음저감 등에서 기기의 단순한 구조와 성능에 대한 높은 신뢰성으로 다양하게 사용되고 있다.

연료전지 분야에서는 PEMFC의 연료 재순환을 위해 많은 연구가 진행되었으나 SOFC 분야에서는 아직 활발한 연구가 이루어지고 있지는 않다. 기존 연구로는 F. Marsano 등⁽⁴⁾이 SOFC 이젝터에 대한 1 차원 모델링 기법을 이용하여 온디자인(on-design)과 오프디자인(off-design) 성능을 예측하였고 이후 Ferrari 등⁽⁵⁾이 이를 연속적인 계산 셀 단위로 발전시켜 수치적으로 풀었다. 그러나 이 모델들은 1 차원을 기본으로 하여 유동 특성이 균일하다고 가정하고 있어 이젝터의 형상적인 특성을 고려할 수 없다. 이를 발전시켜 Yinhai Zhu 등⁽⁶⁾이 2 차원 모델로 SOFC 용 이젝터를 설계하였으나 세 연구 모두 실제 실험 결과와 비교는 이루어지지 않았으며 타 이젝터 연구에서 볼 수 없는 5~6 의 높은 흡입율(entrainment ratio)을 가지고 있어 최종 결과의 신뢰성이 충분하지 않다. 이 계산을 기본으로 하여 기존의 냉동기에서의 성능 예측은 ±15%이내이나 SOFC 에 적용될 이젝터의 경우 1 차와 2 차 유동의 작동 유체가 다르고 온도 역시 많은 차이를 가지므로 기존의 이젝터 연구 조건과는 많은 차이를 보인다.⁽⁶⁾ 또한 이젝터 효율 향상을 위해 높은 압력비를 가질 경우 연료의 재순환 및 크기 축소, 펌프의 제거로 인한 효율 향상이 연료 등의 압력을 높이기 위한 동력으로 소비되어 버리므로 설계에 세심한 주의가 필요하다.

본 연구에서는 CFD(computational fluid dynamics)를 이용하여 1kW 급 SOFC 시스템의 작동 조건에 최적화된 형상의 이젝터를 설계하였다. 최적화를 진행하기 위한 기본 형상에 대해서 격자 민감도를 검증하였으며 화공해석 프로그램을 통해 이젝터의 작동 조건에 대해서 계산을 진행, 이를 통해 얻어진 유동의 유량 및 유동 특성에 대해서 1 차 노즐의 직경을 계산하였다. 또한 최적화 과정을 위해 이젝터 성능에 주요한 영향을 미치는 변수들을 선정하고 범위를 결정하였다. 최적화는 메타모델(Meta Model) 기법 중 하나인 크리깅(kriging) 모델을 사용하여 근사모델(surrogate model)을 구성하고 이를 전역 최적화 기법인 유전 알고리즘(genetic algorithm)에 적용하여 1kW SOFC 시스템의 작동 조건에서 최적의 성능을 발휘하는 이젝터를 설계

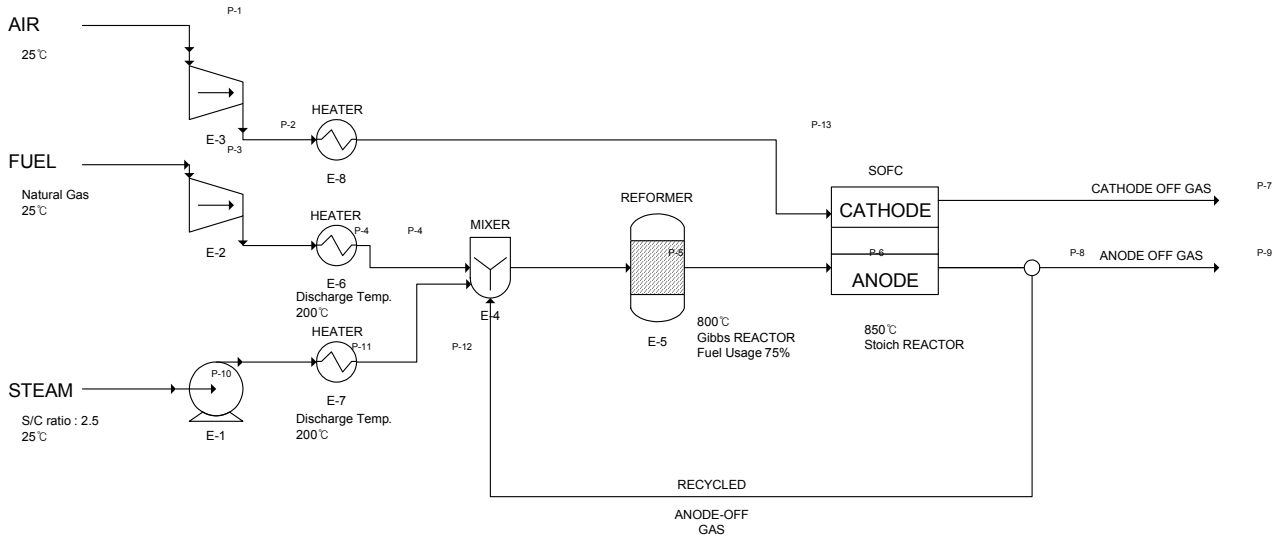


Fig. 1 PFD(Process Flow Diagram) of SOFC AOGR system

하였다. 설계를 통해 나온 형상을 기본으로 유동 조건에 따른 흡입률의 변화에 대한 매개변수 연구를 진행하여 일반적인 SOFC 용 이젝터의 작동 특성을 파악하고 흡입률 변화에 따른 시스템에서의 영향을 매개변수 연구를 통해 확인하였다.

2. 연구방법

본 장에서는 1kW SOFC AOGR 시스템을 위한 이젝터의 작동 조건을 화학 공정 해석 프로그램인 Aspen Plus 를 통해 계산하고 CFD 격자에 대한 민감도 검증 및 솔버(solver) 설정, 최적화를 위한 변수의 선정, 최적화 방법에 대해서 알아보았다.

2.1 작동 조건의 결정

AOGR 을 적용할 경우 산화전극 배기가스의 재순환율에 따라 1 차 유동의 투입량이 변경되어야 한다. 1 차 유동의 투입량은 재순환율과 스택에서의 연료 이용률에 따라 달라지고 산화전극 배기가스 조성 역시 재순환율과 1 차 유동의 투입량에 따라 달라지게 되므로 우선 정상 상태에서의 이젝터의 작동 조건에 대한 계산을 진행하였다.

연구에서 사용된 1kW SOFC 시스템은 S/C 비 (steam to carbon ratio) 2.5, 스택에서의 연료 이용률 75%를 가지는 것으로 가정하였다. 이를 기본으로 하여 계산할 경우 산화전극 배기가스의 양은 약 1.24kg/hr 이고 그 중 포함된 증기의 양은 물분율로 0.633 이다. 이는 이상적인 상태에서 연료로 사용되는 메탄의 투입량인 10.2124mol/hr (0.1634kg/hr)의 약 7 배이고 S/C 비를 맞추기 위해서는 이젝터의 1 차

유동 질량의 약 5~7 배를 흡입해야 한다는 계산이 나온다.

이전 SOFC 이젝터 관련 연구를 보면 5 이상의 흡입률을 가지는 이젝터에 대한 연구 결과⁽²⁾⁽⁴⁾가 있으나 모두 1 차원 또는 2 차원 해석 모델로 실제 실험 결과가 뒷받침된 결과는 아니다. 또한 SOFC 이외의 분야에서의 실험 및 CFD 해석 결과 모두 이젝터가 설계 운전 조건 범위에서 작동될 경우 최대 흡입률은 1 차 유동 질량의 약 1.0~1.3 정도로 보고되고 있다. 따라서 연료만으로 다량의 산화전극 배기가스를 재순환시키기 어렵다고 판단하여 증기와 연료의 혼합 가스를 1 차 유동으로 가정하고 흡입률은 1.0로 가정, SOFC AOGR 시스템의 작동 조건을 계산하였다. 스택의 연료 이용률은 75%로 설정하였다. 상세 시스템의 구성은 Fig 1 과 같다.

이젝터에서의 분사량에 따라 흡입률이 달라지고 이는 스택의 산화전극 배기가스 조성의 변화로 연결되므로 1 차 유동(주연료 및 증기)과 2 차 유동(재순환되는 가스)의 총합이 1kW 스택에서 필요로 하는 양의 연료와 동일한 양이 되도록 하고 S/C 비는 2.5 를 맞추도록 1 차 유동의 양을 지속적으로 변경하면서 반복 계산을 진행하였다. 이를 통해 정상 상태에서의 1 차 유동의 분사량과 화학 조성, 2 차 유동의 화학 조성을 결정하였다.

추가적으로 AOGR 의 적용에 따라 해결되어야 할 문제의 하나로 CO₂ 의 농도 증가가 있다. 스택에서 생성되는 CO₂ 가 적절하게 처리되지 않으면 CO₂ 의 농도 증가로 연료의 농도가 떨어지고 이는 스택에서의 물질수송손실(mass transport losses)로

이어져 시스템의 효율이 저하되게 된다. 따라서 개질기의 작동 온도를 높게 잡아 부다드 (Boudouard) 반응(식 6)이 일어나도록 하여 계산을 진행하였다.



부다드 반응⁽⁷⁾은 주어진 온도에서 CO 와 CO₂ 의 혼합물의 화학평형에 따른 환원반응이다. CO₂ 의 생성 엔탈피(enthalpy of formation)가 CO 의 생성 엔탈피에 비해 높은 동안 생성 엔트로피(entropy of formation) 는 훨씬 낮다. 결론적으로 탄소의 산화에 의한 CO₂ 의 전체 생성 자유에너지의 변화는 온도에 따라 거의 일정한데 반해, CO 의 생성 자유에너지의 변화는 감소하게 된다. CO 와 CO₂ 의 생성자유에너지가 700℃에서 만나게 되고, 700℃ 이하에서는 CO₂ 의 발열 반응쪽으로 평형이 기울고 높은 온도에서는 CO 의 흡열 반응쪽으로 반응이 기울게 된다. 본 논문에서는 개질기의 작동 온도를 800℃로 설정하여 전체 시스템에서 산화전극 배기가스의 재순환으로 인한 CO₂ 의 증가가 없도록 하여 계산을 진행하였다. 이상의 계산에 따른 이젝터의 작동 조건은 Table 1 에 정리하여 나타내었다.

2.2 CFD 설정 및 검증

재순환 이젝터는 음속 유동을 포함하고 있고 고속의 1 차 유동과 정지 상태의 2 차 유동이 혼합실에서 만나 강한 전단력을 발생시키므로 이를 고려하여 격자를 배치하였다. 작동 조건은 1 차 유체에

Table 1 Ejector operating conditions

Primary Flow		
CH4	9.439	mol/hr
H2O	12.425	mol/hr
Temp.	200	℃
Secondary Flow		
CH4	4.78e-3	mol/hr
H2	7.889	mol/hr
H2O	36.971	mol/hr
CO	2.3189	mol/hr
CO2	11.206	mol/hr
Temp.	850	℃
Pressure	+1.0	kPa
Outlet		
Pressure	+4.0	kPa

서는 메탄과 증기의 혼합물이 200℃, +200kPa 의 압력으로 투입되고 2 차 유체는 메탄, 일산화탄소, 이산화탄소, 수소, 증기의 혼합물로 850℃, +2.0kPa 의 유동 특성을 가진다. 배압은 +4.0kPa 로 설정하였다.

CFD 는 Fluent 를 사용하였고 격자는 Gambit 을 통해 작성, 형상은 2 차원 축대칭 모델로 하였다. 이젝터 해석에서 축에 따른 압력 분포 및 유동 특성에서 3 차원 모델과 큰 차이가 없음을 K. Pianthong 등⁽⁸⁾이 검증하였다. 최적화의 경우 많은 계산 부하를 요구하므로 본 논문에서는 계산 시간의 단축을 위해 축대칭 모델을 사용하였다.

압축성 유동을 고려하고 1,2 차 유체의 화학조성, 난류를 고려하기 위하여 밀도 기반 솔버 (density based solver), 화학종 수송 방정식 (species transport equation), 리얼라이저블 k-ε 모델 (realizable k-ε model)을 사용하였다. 리얼라이저블 k-ε 모델은 스탠다드 k-ε 모델 (standard k-ε Model)의 향상된 형태로 확산 원형 제트(spreading round jet)을 보다 정확하게 예측하는 것으로 알려져 있다.⁽⁹⁾

경계 조건은 1 차 유동 입구는 질량 유량 입구 (mass flow inlet), 2 차 유동 입구는 원거리 압력장 (pressure far field), 출구 조건은 압력 출구 (pressure outlet)으로 설정하였다. 반응 물질의 량에 따라 SOFC 스택에서의 반응 및 전기량이 달라지므로 1 차 노즐 조건은 질량 유량 입구로 설정하였다. 질량 유량 입구의 경우 입구에서의 질량값을 맞추기 위해 속도 및 압력값을 조정하게 되므로 하류의 조건에 영향을 받게 된다. 이젝터의 경우에는 1 차 노즐의 크기에 따라 영향을 받게되므로 1 차 유동의 투입 압력이 약 +200kPa 가 되도록 1 차 노즐

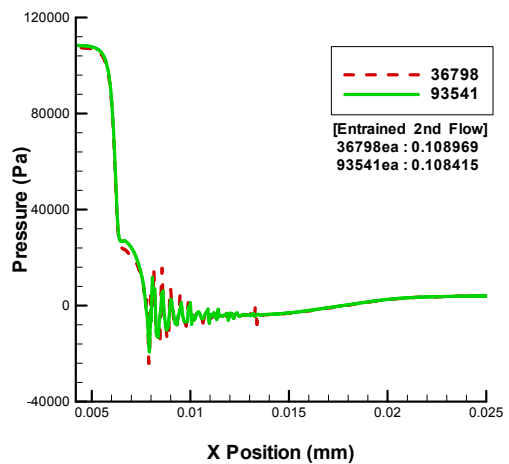


Fig. 2 CFD mesh sensitivity analysis

의 크기를 정하였다. 1차 노즐의 크기에 대해서는 형상 조건에서 상세히 설명하도록 하겠다.

CFD 민감도는 최적화의 대표적인 형상에 대해서 계산에 사용된 격자와 격자수를 증가시킨 경우에 대해서 흡입률과 압력을 비교하였다. Fig 2에서 볼 수 있듯이 두 경우에 대해서 계산 결과값에 큰 차이가 없으므로 최적화 과정에서의 많은 계산량과 계산 자원의 한계를 고려하여 격자의 개수는 약 3만개 수준으로 하여 최적화를 진행하였다.

2.3 설계 변수의 설정 및 1차 노즐 직경 결정

2.3.1 1차 노즐 직경의 결정

1차 유동의 질량 유량이 일정해야 함으로 1차 노즐의 크기는 유동 특성에 영향을 미치게 된다. 1차 노즐에서의 출구 속도가 아음속이 되지 않는 이상 1차 노즐 목에서의 속도가 마하(Mach) 1로 고정되므로 노즐의 면적에 따라 입구에서의 압력이 변화하게 된다. 따라서 유동 조건을 일정하게 유지하기 위해서 1차 노즐의 목 면적을 고정하고 계산을 진행하였다.

1차 노즐의 목 면적의 계산은 입구에서의 압력이 약 +200kPa 정도가 되도록 설정하였다. 이젝터는 여러 장점을 가지고 있으나 효율적인 장치는 아니다. 적절한 설계가 이루어지지 않으면 1차 유체의 압축에 들어가는 에너지가 SOFC AAGR 적용으로 인한 에너지 절감량을 넘어설 수 있으며 고압의 초음속 이젝터의 경우 일반적인 압력비에서는 그다지 효율적이지 못하다는 연구 결과⁽¹⁰⁾도 있어 1차 노즐의 작동 압력은 최대한 작게 잡았다.

1차 노즐 크기의 계산은 Yin Hai Zhu 등⁽⁶⁾의 논문을 참고로 하였으며 질량 유량 (mass flow rate)을 고정시킨 상태에서 유동의 입구에서의 압력이 +200kPa가 되도록 면적을 조정하였다.

2.3.2 설계 변수의 선정

이젝터 성능에 영향을 미치는 요소로는 유동 변수, 형상 변수가 있다. 유동 변수로는 1, 2차 유동의 압력비와 유동의 물리적 특성에 대한 부분이 있고 형상 변수에는 노즐목 직경, 혼합부 직경비, 혼합부와 디퓨저 출구 직경비, 혼합부 길이, 흡입부 직경, 노즐의 위치 등이다. 본 논문에서는 유동 변수에 대해서는 고정하고 특정 유동 조건에 최적의 성능을 내는 형상 조건에 대한 최적화를 실시하였다.

일반적으로 이젝터는 5개의 파트로 구분된다. 1차 노즐, 혼합실, 목, 확대관, 축소관으로 이루어지

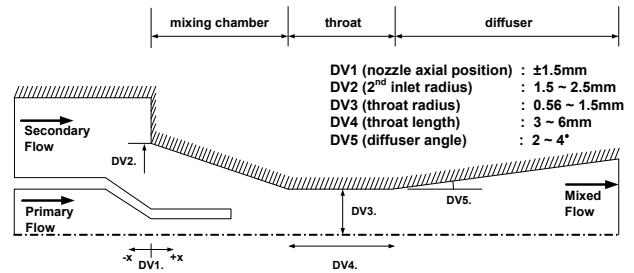


Fig. 3 Ejector geometry and design variables

는데 1차 노즐에서 유동이 가속되고 혼합실에서 1, 2차 유동이 혼합되게 된다. 확대관에서는 압력 손실을 줄이기 위해 압력을 회복한다.

특히 목 부분의 단면적이 이젝터 설계에서 매우 중요한 설계 변수로 면적이 작으면 중심 부분에서 1차 유동에 의한 초킹(choking)이 발생하여 2차 유동의 흡입을 방해하고 면적이 너무 크면 중심부에서의 혼합효율이 떨어져 이젝터 효율이 떨어지게 된다.⁽¹²⁾ 노즐목 직경과 혼합실 직경비에 따른 실험 결과 등을 보면 이젝터 형상에 따라 흡입 성능에 최적의 비율이 있음을 알 수 있다.

이와 같은 조건에 따라 설계 변수를 결정하였으며 설정된 설계변수는 1차 노즐의 위치(DV1), 2차 노즐의 직경(DV2), 혼합실 직경(DV3), 혼합실의 길이(DV4), 확대관의 각도(DV5)이며 설계 목적 함수는 2차 유동의 흡입률이다. 설계 변수의 범위와 형상 조건은 Fig 3을 통해 나타내었다.

2.4 최적화 기법

이젝터에 대한 최적화는 메타모델과 전역 최적화 기법인 유전 알고리즘을 사용하였다. 라틴 하이퍼큐브 샘플링(latin hypercube sampling) 방법을 통해 총 40개의 초기 샘플을 선정하고 이를 CFD 계산하였고 크리깅을 통해 메타모델을 구성하였다. 크리깅 기법은 관찰된 실험점을 통해 관심 지점의 값을 예측하는 방법으로 보간을 위해 주위값들을 선형으로 조합하며 통계학적 방법을 이용하여 값을 추정한다.

최적화 방법으로는 유전 알고리즘을 사용하였다. 기존의 기울기 중심의 최적화 알고리즘은 지역 최적값(local optimum)에 빠지기 쉬운 반면 유전 알고리즘의 경우 충분한 세대수와 개체수를 보장할 경우 전역 최적값에 대한 보장이 가능하다. 단점으로는 기울기 기반의 최적화 기법에 비해 매우 많은 실험점을 필요로 하게 된다. 이런 단점을 보완하고자 CFD의 경우 주로 크리깅과 같은 메타모델과 함께 사용하여 전체 계산 부하를 줄이게 된다.

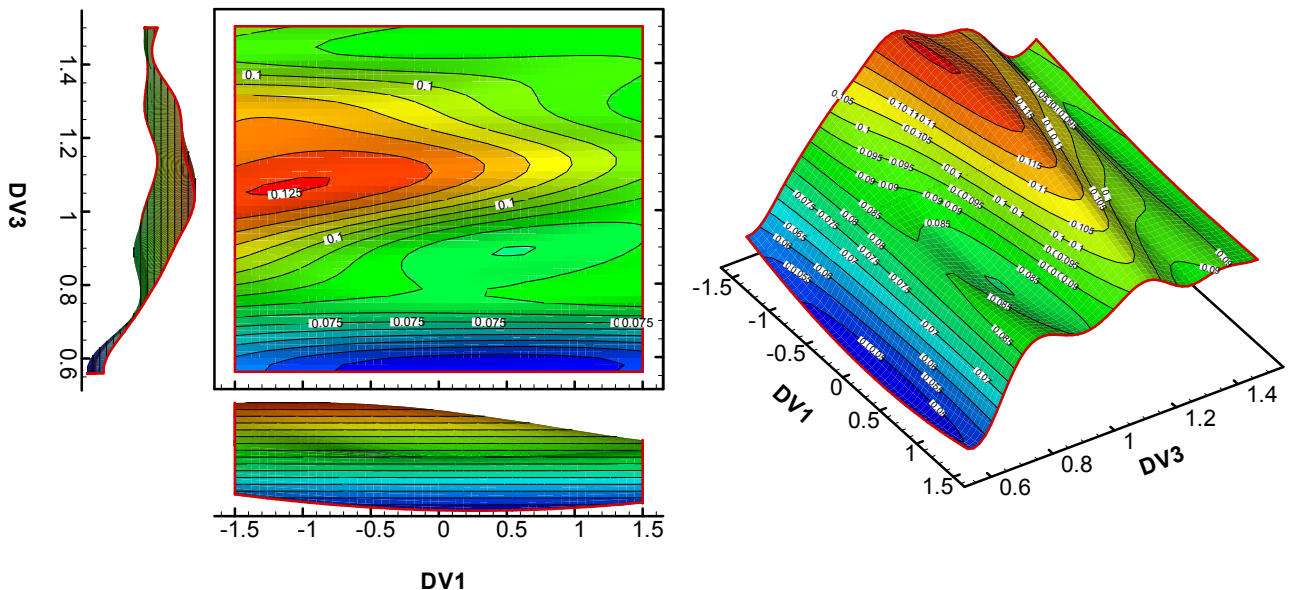


Fig. 4 Kriging model of optimized ejector

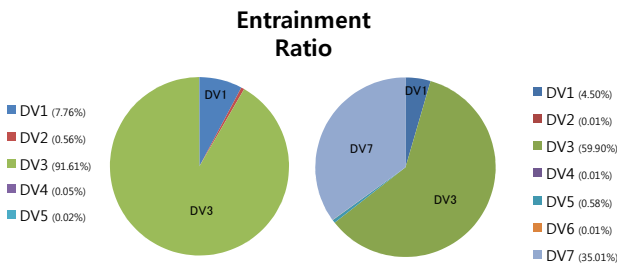


Fig. 5 Regression analysis of ejector design variables

최적화는 5 개의 형상 변수와 목적함수인 흡입률을 대상으로 실시되었으며 절차는 1) 초기 샘플링 및 CFD 계산, 2) 메타모델 작성, 3) 최적화, 4) 최적값에 대한 CFD 계산, 5) 예측값과 계산값의 비교, 6) 예측값과 계산값이 수렴 범위에 들어올 경우 계산 종료, 수렴하지 않을 경우 계산된 값을 추가하여 메타모델 재작성하였다. 각 단계에서 유전 알고리즘을 이용한 최적값에 대해서 CFD 계산을 하여 메타모델에서 예측한 값과 맞지 않을 경우 메타 모델에 추가 실험점으로 추가 하였다. 과정은 최적값에 대한 예측값과 실제 CFD 계산값이 일정 범위 이내로 수렴할 때까지 계속 진행하였다.

3. 최적화 결과

이 장에서는 흡입률을 설계 목적 함수로 하여 이를 최대화할 수 있는 형상조건에 대해 최적화를 실시하였다. 최적화 결과에 대한 회귀분석(regression analysis)을 통해 흡입률에 대한 설계 독립 변수의 영향을 살펴보고 최적 형상을 바탕으로

유동 조건에 따른 흡입률의 변화를 살펴보았다. 마지막으로 흡입률의 증가에 따른 SOFC 시스템의 효율 변화를 일반 시스템과의 비교를 통해 알아보았다.

3.1 형상 최적화 및 변수 영향도 평가

산화전극 배기가스는 다량의 미반응 연료와 800℃의 고온의 증기를 포함하고 있다. 이를 재순환할 경우 시스템에 투입되는 연료와 물, 열량을 대체할 수 있게 된다. 최적화는 다량의 에너지를 포함하고 있는 산화전극 배기가스의 재순환율(즉, 이젝터의 흡입률)을 최대화하는 이젝터의 형상 조건에 대해 실시되었다.

최적화에 사용된 초기 실험점은 총 40 개로 통계적 방법을 통해 균일한 분포의 실험점을 선택하는 기법인 라틴 하이퍼큐브 샘플링 기법을 이용하였으며, 추가 실험점은 5 개로 총 45 번의 CFD 계산이 이루어졌다. 메타모델의 갱신은 메타모델인 크리깅의 예측값과 CFD 를 통한 해석값이 일정 범위로 수렴할 때까지 진행되었으며 목적함수는 흡입률로 하여 진행하였다.

최종 조건으로 계산된 이젝터의 효율은 86.7%로 기존의 유동의 엔탈피만을 계산하던 전통적인 계산식에 운동에너지를 포함하여 보다 정확하게 이젝터의 성능을 평가하였다.⁽¹¹⁾

형상 조건은 Table 2 에 나타내었다. 노즐 위치의 경우 혼합실 입구에서 조금 들어간 형태이고 목의 경우 1 차 노즐 크기의 약 2 배 정도로 되어있다. 회귀 분석을 통해 나온 변수들의 영향은 Fig 5 의

Table 2 Optimization results

Design Variables	Optimized Results
DV1	-1.088 mm
DV2	1.932 mm
DV3	1.064 mm
DV4	6.000 mm
DV5	3.070 mm
Objective	
Entrained 2 nd flow	0.12544 g/sec

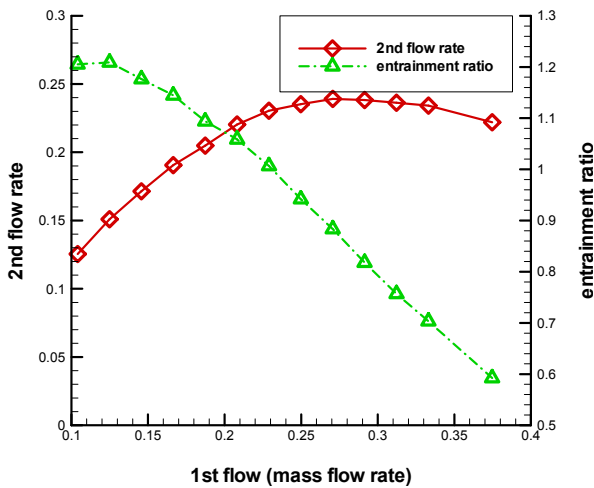


Fig. 6 1st flow rate effects on the entrainment ratio

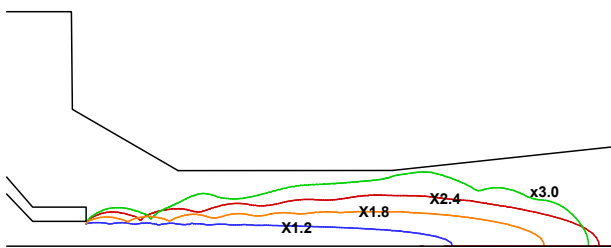


Fig. 7 Sonic line of 1st flow

좌측 차트에서 확인할 수 있는데 설계 변수 1,3 을 제외한 나머지 변수들에 대해서는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. Fig 5 의 우측 차트는 2 차 유동의 입구 면적을 DV6 으로, 2 차 유동의 입구 면적과 목면적의 비를 DV7 로 하여 면적비에 따른 영향을 살펴보았다. 결과는 DV6 은 영향이 없는 것으로 나타났고 DV7 은 영향이 있는 것으로 나타났으나 이는 DV3, 즉 목직경에 의한 효과와 중첩된다. 따라서 목면적과 2 차 유동 입구의 면적

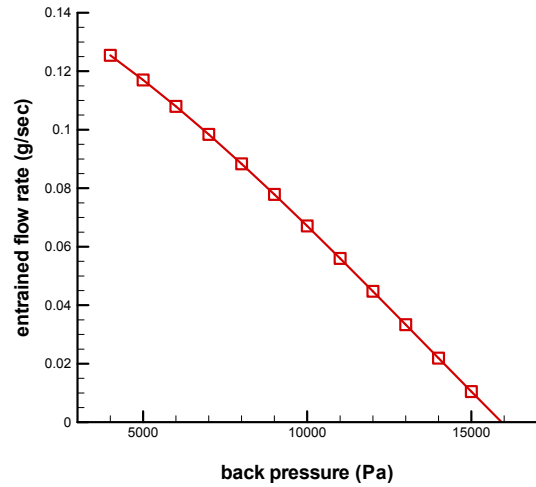


Fig. 8 Ejector back pressure effects on the 2nd flow rate

에 따른 영향은 없는 것으로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Fig 4 는 회귀분석에서 주요 변수로 지적된 DV1,3 에 대해서 타 변수는 고정시킨 상태로 크리깅 반응면을 도식한 것이다. DV1 인 노즐 위치의 경우 최대 0.6 에서 1.2 사이로 노즐 입구가 전체 이젝터의 목 입구 부분에서 혼합실 입구 부분으로 후퇴할수록 완만한 상승 곡선을 그리다가 최종적으로 혼합실 입구에서 약간 들어간 위치에서 가장 높은 값을 나타내었다.

노즐 입구 위치의 경우 많은 논문에서 지적되었듯이 중요한 설계 변수중의 하나로 이젝터의 작동 조건에 따라서 최적의 위치가 달라진다. 하지만 일반적으로 ESDU⁽¹³⁾의 권고 설계안에 따르면 혼합실 입구에서 약간 뒤쪽에 위치하는 것이 가장 뛰어난 성능을 보이는 것으로 알려져 있는데 Aphornratana 등⁽¹⁴⁾의 논문의 경우 ESDU 안과 반대의 결과를 나타내고 있다. 본 논문에서의 최적화 결과도 ESDU 와는 반대의 결과를 나타내었는데 이에서 볼 수 있듯이 일반적으로 모든 경우에 적용할 수 있는 노즐 위치는 없으며 각 조건마다 최적의 위치를 찾아야 하는 것으로 보인다.

DV3 인 목직경의 경우 1.064 에서 최적값을 보이고 여기서 값이 증가할 경우 완만하게 상승, 값이 감소할 때 상대적으로 급격하게 값이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 초음속 증기 이젝터의 연구에 따르면 길고 큰 혼합실, 또는 길고 작은 목직경을 가지는 이젝터의 경우에는 임계 배출 압력(critical back pressure), 즉 역유동(reverse flow)이 발생하게 되는 배압을 높여주는 효과가 있다.⁽¹²⁾ 이는 두 유

동의 혼합으로 인한 운동량 전달이 잘될수록 이젝터의 성능이 향상되는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 목직경의 증가로 이젝터의 혼합 성능이 감소, 재순환율의 감소로 이어지는 것으로 보인다. 하지만 회귀분석을 통해 나온 노즐목 길이에 대한 영향도는 없는 것으로 나타났는데 이에 대해서는 변수 범위를 증가시켜 추후 검토해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

다음 장에서 1 차 유동의 유량 증가에 따른 흡입량 변화를 통해 보이겠지만 목직경이 줄어드는 것은 초킹과 동일한 효과를 나타내는 것으로 판단된다. 1 차 유동이 동일한 상태에서 유로가 점차 줄어들므로 2 차 유동의 통로가 점차 제한되면서 유량이 줄어드는 것이다.

3.2 유동 조건에 따른 영향

1 차 유동의 유량이 증가하면 앞서 언급했듯이 1 차 유동이 이젝터의 목에서 초킹 현상을 일으키고 이 현상 이후로 2 차 유동의 유량이 일정해진다. Fig 6 에서도 이런 현상을 볼 수 있는데 최적값으로 도출된 형상의 경우 0.28g/sec 이후로 비교적 2 차 유량이 일정해짐을 볼 수 있다. 이젝터 내에서의 음속선을 확인해보면 Fig 7 과 같이 1 차 유동이 이젝터 목을 점차 막아가고 있는 것을 볼 수

있다. 일반적으로 1 차 유동의 음속선이 유량에 따라 지속적으로 발달, 최종적으로 이젝터의 목 부위를 막는 순간부터 2 차 유동의 유량이 일정해지게 된다.

배압 변화에 따른 재순환율 변화는 Fig 8 와 같다. 배압 변화에 따라 선형적으로 떨어지기 시작하는데 +16kPa 지점이 임계 배출 압력으로 이젝터의 기능을 상실하였다.

3.3 SOFC 시스템 효율

이젝터 적용시의 시스템 투입 에너지 변화량을 확인해 보았다. 비교 대상인 참고사례(ref. case)의 투입량은 스택의 연료이용률 75%, 개질기 메탄 전환 효율 95%, S/C 비 2.5 등을 가정하여 나온 결과이다. AOGR 을 적용한 경우에 대해서는 개질기의 온도를 800℃으로 설정하여 시스템의 CO₂ 수준이 증가되지 않도록 하였다. 800℃, 1 기압에서 부다드 반응에 의한 물분율은 CO₂ : CO = 0.07 : 0.93 이다. 또한 이젝터에서의 토출 압력을 위해 펌프 및 컴프레서의 압력을 +200kPa 로 높여 잡았다. 따라서 비교는 AOGR 을 하게 되면서 액추에이터(actuator) 및 가열기(heater), 개질기에서의 소모 열량이 어떻게 바뀌는지에 대해 초점을 맞추었다.

Table 3 System performance by entrainment ratio

		Ref. Case	AOGR (entrainment ratio)				
			1.2	1.0	0.8	0.6	0.4
Flow (mol/hr)	Fuel In	10.2124	9.3618	9.4407	9.5343	9.6477	9.7885
	Water In	25.5310	11.1061	12.4246	13.9948	15.9039	18.2867
Actuator Duty	Pres. In	100 kPa					
	Water Pump	0.0032 W	0.0228 W	0.0255 W	0.0288 W	0.0327 W	0.0376 W
	Fuel Comp.	2.345 W	16.357 W	16.495 W	16.659 W	16.857 W	17.103 W
	Discharge Pres.	112 kPa	300 kPa				
Heater Duty	Inlet Temp.	25 °C					
	Fuel	39.76	26.04	26.26	26.52	26.84	27.23
	Water	405.88	176.36	197.29	222.23	252.54	290.38
	Outlet Temp.	350 °C					
Reformer	Inlet Temp.	350 °C					
	Heat Duty	731 W	810 W				
	Outlet Temp.	700 °C	800 °C				
Net Saved (Watt)		0	+150.21	+128.91	+103.55	+72.71	+34.24

전체 시스템 효율의 경우 AOGR 을 도입하면 배열의 량이 달라지고 시스템 구성도 많은 부분 바뀌어야 하기 때문에 동일한 시스템에서 정확한 비교가 어려워 단위 프로세스에서 추가 열 소모량과 소모 열량 감소를 비교하는 것이 적절하다고 판단하였다.

결과는 Table 3 과 같다. 스택 배기가스는 물분율 기준으로 60% 이상이 증기로 이루어져 있다. Table 을 통해 볼 수 있듯이 AOGR 을 적용함으로써 물 소모량이 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 흡입률 1.2 를 기준으로 참고사례 대비 약 56%의 물 소모량을 감소시킬 수 있었다. 또한 물은 증발 잠열로 인해 증기로 전환하기 위해서는 많은 열량을 필요로 하게 되는데 대부분의 소비 에너지의 감소가 물을 증기로 만들기 위한 부분에서 일어남을 볼 수 있다.

주 연료의 경우 1.2 에서 8.4% 감소하였다. 하지만 실제 SOFC 시스템 구성상으로 개질 과정 및 기타 투입 유량의 가열에 많은 열량을 필요로 한다. AOGR 을 하게되면 스택 후단에서 이용 가능한 에너지량이 줄어들게 됨으로 추가적인 연료의 투입이 필요하게 될 수 있다. 따라서 최종적으로 시스템 구성시에 들어가는 연료의 감소량은 이보다 더 적을 것으로 예상된다. 하지만 연료 외에도 다량의 증기 및 이산화탄소를 포함한 스택 배기가스가 아닌 순수 메탄을 추가 연료로 이용함으로써 연료를 좀 더 효율적으로 사용할 수 있다는 측면에서는 이점이 있다고 할 수 있다.

액추에이터의 경우 모두 70% 효율을 가정하였다. 펌프는 추가 동력이 얼마되지 않으나 컴프레서의 경우 14~15W 정도의 추가 동력이 필요한 것으로 나타났으며 개질기에서도 추가적으로 약 80W 의 열량이 필요한 것으로 나타났다.

최종적으로 시스템 투입 에너지량의 감소는 흡입률 1.2 의 경우 약+150W, 흡입률 0.4 의 경우 약 +34W 가량이다. 참고사례에서의 투입되는 연료의 열량이 LHV 기준으로 2263W 이므로 시스템 구동을 위해 추가되는 연료량을 고려하지 않았을 때 약 6~7% 정도 전기 효율에 이점이 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 SOFC 의 AOGR 용 이젝터의 최적화 과정을 통해 주요 설계 변수를 파악하고 SOFC 시스템에서 재순환에 따른 시스템 변동의 확인, SOFC 에서 AOGR 의 적용이 타당한지를 검

토하였다.

독립 변수로 이젝터 목길이, 목직경, 1 차 노즐의 위치, 확대관 각도, 혼합실 입구 직경 등 5 개의 설계 변수를 설정하여 최적화를 실시하였다. 최적화 결과 약 1.2 의 흡입률을 가지는 이젝터를 설계할 수 있었으며 설계 변수에 대한 회귀분석을 통해 1 차 노즐의 위치와 목직경이 가장 중요한 설계 변수임을 정량적으로 보였다. 작동 조건에 따라 달라지겠지만 본 연구와 같은 낮은 압력비(1 차 유동 압력/배압)의 음속 노즐의 경우 다른 설계 변수의 영향은 미미한 것으로 보인다.

최적 형상에 대해 유동 조건에 따른 매개변수 연구를 실시한 결과 설계치의 2 배 이상의 유량 조건에서도 흡입률 1 이상을 유지하였으며 임계 배출 압력은 약 +16kPa 로 대표적인 SOFC 상용 스택의 작동 제한 압력이 +3kPa 임을 고려할 때 이젝터 작동 제한 영역에 대한 마진은 충분하였다.

시스템적으로는 연료 소모량 감소는 크지 않으나 증기 투입량을 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 흡입률 1.2 를 기준으로 참고사례 대비 약 56%의 증기를 절약할 수 있었다. 시스템 열 소비량의 대부분을 차지하는 것이 개질기와 증기 발생 부분임을 고려할 때 이점이 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문에서 사용된 최적화 프로그램 MEDOC⁽¹⁵⁾ (Multi-purpose Engineering Design Optimization Code) 을 제공해 주신 일본 동북대 정신규 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) James, L. and Andrew, D., 2003, "Fuel Cell Systems Explained," Wiley, pp. 209~286.
- (2) Sriveerakul, T., Aphornratana, S. and Chunnanord, K., 2007, "Performance Prediction of Steam Ejector Using Computational Fluid Dynamics:Part1.Validation of the CFD Results," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, pp. 812~822.
- (3) Alsayed, A. M., Elbanna, H. M. and Abdelrahmam, M. M., 2010, "Design Optimization of Thrust Augmentation Ejector Utilizing the CFD Tools," *Proceedings of ICFD10*.
- (4) Marsano, F., Magistri, L. and Massardo, A.F., 2004, "Ejector Performance Influence on a Solid Oxide Fuel Cell Anodic Recirculation System," *Journal of Power Sources*, 129, pp. 216~228.

- (5) Ferrari, M.L., Traverse, A., Magistri, L. and Massardo, A.F., 2005, "Influence of the Anodic Recirculation Transient Behavior on the SOFC Hybrid System Performance," *Journal of power sources*, Vol.149, pp. 22~32.
- (6) Yin Hai, Z., Wenjian, C., Chaugyun, W. and Yanzhong, L., 2007, "Fuel Ejector Design and Simulation Model for Anodic Recirculation SOFC System," *Journal of Power Sources*, Vol.173, pp. 437~449.
- (7) Dushyant, S., David, B., Todd, G., Daniel, H. and James, S., 2007, "Effects of Fuel Cell Anode Recycle on Catalytic Fuel Reforming," *Journal of Power sources*, Vol.168, pp. 477~483.
- (8) Pianthong, K., Sechanam, W., Behnia, M., Sriveerakul, T. and Aphornratana, S., 2007, "Investigation and Improvement of Ejector Refrigeration System Using Computational Fluid Dynamics Technique," *Energy Conversion and Management*, Vol.48, Issue 9, pp. 2556~2564.
- (9) Bartosiewicz, Y., Aidoun, Z., Desevaux, P. and Mercadier, Y., 2005, "Numerical and Experimental Investigations on Supersonic Ejectors," *Int journal of Heat fluid Flow*, Vol. 26, pp. 56~70.
- (10) Ashton, J., Green, J. and Reade, A., 1993, "Gas Production Improvements Using Ejectors," SPE paper 26684, Society of petroleum engineers.
- (11) Somsak, W., 2005, "Optimization of a High-Efficiency Jet Ejector by Computational Fluid Dynamics Software," Thesis Submitted for Master Degree of Texas A&M university, pp. 150~165.
- (12) Kanjanapon, C. and Satha, A., 2004, "Ejectors : Applications in Refrigeration Technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 8, pp. 129~155.
- (13) ESDU, 1985, "Ejector and Jet Pump," Data Item 86030, London:ESDU international Ltd.
- (14) Aphornratana, S. and Eames, I.W., 1997, "A Small Capacity Steam-Ejector Refrigerator : Experimental Investigation of a System Using Ejector with Movable Primary Nozzle," *Int J Refreg*, 20(5), pp. 352~358.
- (15) Jeong, S., Obayashi, S. and Yamamoto, K., 2005, "Aerodynamic Optimization Design with Kriging Model," *Transactions of the Japan society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 48, pp. 161~168.