

아음속 확산형 S-duct 내부 유동제어를 위한 Vortex Generator 최적 설계

Design Optimization of Vortex Generator for Controlling Flows inside Subsonic Diffusing S-duct

이준석^{1*}, 이병준², 김종암¹
서울대학교 기계항공공학부¹, NASA Glenn Research Center²

초 록

아음속 확산형 S-duct 의 유동 왜곡 및 전압력 손실을 최소화시키기 위하여, S-duct 내부에 설치된 vortex generator 의 형상에 대한 최적설계를 수행하였다. 특히, 유동 질 향상 효과를 극대화 하기 위하여 여러 개의 vortex generator 를 각각의 주변 유동 현상에 따라 독립적으로 고려하였다. 수학적인 vortex generator 소스 모델을 적용하여 수치해석 시간을 감소시켰으며, 설계 파라미터로는 각 vortex generator 의 길이, 높이, 유동흐름과의 각도를 사용하였다. 총 11 개 vortex generator 에 대하여 33 개 설계 변수를 적용하였으며, 상대적으로 많은 설계변수를 다루기 위해서 adjoint 기반의 민감도 해석 기법을 적용한 기울기 기반 설계 기법(Gradient Based Optimization Method)을 사용하였다. 본 연구를 통하여 설계된 vortex generator 는 설계전 S-duct 의 전압력 손실량을 유지한 채로 유동 왜곡을 70% 이상 감소시켰다.

ABSTRACT

To minimize the flow distortion and the total pressure loss of subsonic diffusing S-duct, vortex generators installed in an S-duct are optimized. Especially, the influence of each vortex generator is independently considered by reflecting the local flow pattern to maximize the flow quality enhancement. To overcome the shortcomings of heavy computational costs in CFD analysis and design, a mathematical vortex generator source term model was employed. A total of 33 design variables for 11 vortex generators are treated with design parameters of chord length, height, and angle of incidence of each vortex generator. For a large number of design variables, the present design used the gradient based optimization method based on adjoint-based sensitivity analysis. Through this design, the distortion coefficient was decreased over 72% while maintaining the total pressure recovery ratio from the baseline of design.

Key Words: CFD, Design Optimization, Gradient Based Optimization Method (GBOM), Discrete Adjoint Approach, S-duct, Vortex Generator (VG)

1. 서 론

엔진이 동체 내부에 존재하는 항공기의 경우, 엔진 입구는 직접적으로 외부의 유동과 맞닥뜨리지 않으며, 흡입관을 이용하여 외부의 유동을 엔진에 전달한다. 일반적으로, 이러한 항공기의 엔진 입구는 엔진의 위치적 제약에 의해 흡입관의 입구와 일직선상에 있지 않다. 이러한 이유로, 많은 흡입관의 형상은 S-형으로 구성되어 있으며, 이를 S-duct 라 부른다.

S-duct 를 사용하는 항공기의 경우, 엔진의 효율은 S-duct 의 성능에 의해 크게 좌우된다. 엔진 성능의 극대화를 위하여, S-duct 는 균일하고, 전압력

손실을 최소화 한 유동을 엔진입구에 전달할 수 있어야 한다. 이러한 성능은 수치적으로 엔진 입구 유동의 왜곡(distortion)과 전압력 회복률 등으로 판단되어진다. 대표적인 S-duct 인 RAE M2129 S-duct 의 경우, S-형상에서 유도된 유동 박리가 큰 유동 왜곡을 일으키며, 이러한 이유로, RAE M2129 S-duct 는 실제 항공기에 적용하기에 무리가 있다.^(1,2)

많은 선행 연구자들은, S-duct 을 사용하더라도 낮은 유동 왜곡 및 높은 전압력 회복률을 갖는 양질의 유동을 엔진으로 전달하기 위해, 추가적인 유동 제어 장치를 이용하는 연구를 수행해 왔다. 특히, 여러가지 유동 제어 장치 중에서 Vortex Generator (VG)가 가장 많이 사용되었으며, VG 를

이용한 수치 해석 연구 및 실험 연구를 수행하였다. 하지만, VG 를 실제 형상으로 고려하여 수치 해석을 수행하기에는 거대한 계산 환경과 많은 시간이 필요하다는 단점이 존재한다. 이를 극복하기 위하여 많은 선행 연구자들이 수치적으로 VG 를 구현할 수 있는 소스 모델을 개발하였다. 가장 대표적인 VG 소스 모델은 Bender 등⁽³⁾이 개발한 BAY model 로, 얇은 판 형상의 VG 에서 발생하는 힘을 묘사한 것이다. Anderson 등⁽⁴⁾은 BAY model 과 실험적 방법을 이용하여 S-duct 의 첫번째 격인 지점에 VG 를 설치하였으며, 또한 파라메트릭 연구를 통하여 VG130 ~ 175 라 불리는 VG 배열을 제공하였다. VG 를 설치한 S-duct 는 기존의 S-duct 에 비하여 높은 성능을 보여주었다. 또한, Jirásek⁽⁵⁾의 경우, BAY model 을 개선한 jBAY model 과 실험 계획법(DOE, Design of Experiment) 을 이용하여 VG 의 크기와 위치에 대한 설계를 수행하였다. 하지만, 실험계획법은 많은 설계 변수를 가지는 설계 문제를 다루기에 어려움이 존재하며, 이에 따라 Jirásek 은 동일한 조건을 모든 VG 에 적용할 수 밖에 없었다. 이상적인 VG 는 각 위치에서의 유동 패턴을 고려할 수 있어야 하므로, 각 위치에서 각각의 조건에 따라 독립적으로 설계되어야 한다.

본 연구에서는 각각의 VG 를 독립적으로 설계할 수 있는 설계 방법을 제시하였으며, 전압력 회복률을 유지한 채 유동 왜곡을 감소시키기 위한 설계를 수행하였다. 설계 대상으로는 RAE M2129 아음속 확산형 S-duct 과 Anderson 등⁽⁴⁾이 제시한 VG170 배열을 선정하였다. 설계 파라미터로는 각 VG 의 길이, 높이, 유동흐름과의 각도(이하, 각도)의 3 가지를 선정하였으며, Baseline 으로 선정된 VG170 배열이 11 개의 VG 를 설치하도록 되어 있으므로 총 33 개의 설계변수를 고려하였다. AV 기법의 경우, 설계변수의 개수와 수치적 계산량은 서로 독립적이므로 많은 설계변수를 고려하기에 적합한 측면이 있으므로, 본 연구에서는 GBOM 과 AV 기법을 적용하였다.

2. RAE M2129 S-duct 형상 및 특성

2.1 RAE M2129 S-duct 형상

본 연구에서 사용된 RAE M2129 S-duct 는 AGARD group⁽⁶⁾이 제공한 형상이며, Fig. 1 과 같다. 확산구역의 중심선과 반지름은 아래 수식을 따른다.

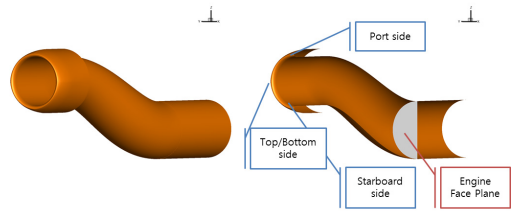


Fig. 1. Geometric schematic of RAE M2129.

$$Z_{cl} = \Delta Z_{cl} \left[1 - \cos \left(\pi \frac{x_{cl}}{L} \right) \right], \quad (1)$$

$$\left(\frac{R - R_i}{R_{ef} - R_i} \right) = 3 \left(1 - \frac{x_{cl}}{L} \right)^4 - 4 \left(1 - \frac{x_{cl}}{L} \right)^3 + 1. \quad (2)$$

2.2 아음속 흡입관 성능 계수

흡입관의 성능은 distortion 계수($DC\theta$)와 전압력 회복률(PR)로 나타낼 수 있다. Distortion 계수 수식(3)과 같이 엔진 입구에서의 유동의 왜곡 정도를 나타낸다. 또한 전압력 회복률은 흡입관의 에너지 전달 효율을 의미한다.

$$DC\theta = \max \left[\bar{p}_i - \bar{p}_i(\theta) \right] / \bar{q}, \quad (3)$$

$$PR = \bar{p}_{t,ef} / \bar{p}_{t,in}, \quad (4)$$

$$\bar{p}_i = \frac{\int_A P_t dA}{\int_A dA}, \bar{p}_i(\theta) = \frac{\int_\theta P_t dA}{\int_\theta dA}, \bar{q} = \frac{\int_A q dA}{\int_A dA}. \quad (5)$$

여기서 P_t 는 전압력을, q 는 동압을 나타낸다.

2.3 RAE M2129 S-duct 유동 특성

RAE M2129 S-duct 의 유동 특성은 아주 복잡하다. 많은 현상들이 바깥 벽과 내부 벽 사이에 압력차를 발생시키는 원인이 되며, 발생한 압력차에 의해 유동은 중심선을 따라 흐르지 못하고 아래로 치우치는 현상을 나타낸다(Fig. 2-②). 이러한 유동은 때때로 내부 벽 유동(Fig. 2-①) 아래로 파고들

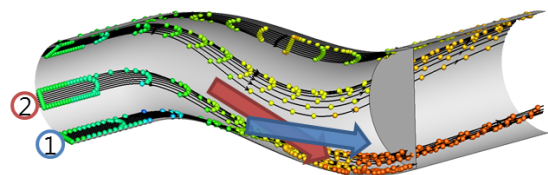


Fig. 2. Flow characteristics of RAE M2129 on the starboard side.

게 되며, 유동 박리를 야기시킨다. 발생한 유동 박리 현상은 RAE M2129 S-duct 유동 불균일의 가장 큰 원인이 된다.

3. Vortex Generator 및 유동 해석

VG 는 간단하고 효율적인 유동 제어 장치이다. 특히, 얇은 판 형태의 VG 를 S-duct 에 적용하여 유동 박리를 쉽게 제거 할 수 있다. 또한, VG 는 간단한 소스 모델을 이용하여 쉽게 유동 해석에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 Bender 등이 제작한 BAY model⁽³⁾을 도입하였으며, 설계 및 유동 해석에 사용된 코드를 Anderson 이 제공한 유동 해석 결과 및 실험 결과⁽⁴⁾ 에 비교, 검증하였다.

3.1 BAY model

BAY model 은 VG 주변의 유동을 VG 와 나란하게 만들어준다. 이 모델은 간단히 Navier-Stokes 방정식에 추가될 수 있으며, 다음과 같다.

$$\Delta V_i \frac{\Delta \rho u_i}{\Delta t} = \sum_j F_M \Delta S + L_i, \quad (6)$$

$$\Delta V_i \frac{\Delta \rho E}{\Delta t} = \sum_j F_E \Delta S + u_i \cdot L_i. \quad (7)$$

여기서 L_i 는 VG 에 의해 발생하는 힘을 나타내는 소스항이며, 유동을 VG 에 평행하게 흐르도록 한다. L_i 의 식은 다음과 같다.

$$L_i = C_{VG} S_{VG} \left(\frac{\Delta V_i}{\sum V_i} \right) \rho |u|^2 (\hat{u} \times \hat{b})(\hat{u} \cdot \hat{n})(\hat{u} \cdot \hat{t}). \quad (8)$$

3.2 Baseline VG 배열

Anderson 등은 BAY model 을 이용한 수치적 해석과 실험적 연구를 통해 각 조건에 따라 최적화된 VG 배열을 제시하였다. 이 중에서 VG170 은 VG 의 높이에 따라 최적화된 VG 배열로, 목 마하수 0.794 조건에서 최소의 $DC\theta$ 값을 가진다. 본 연구에서는 VG170 을 설계의 Baseline 으로 선정하여 설계를 수행하였으며, 조건은 Table 1 과 같다.

3.3 유동 해석 기법 및 조건

본 연구의 유동해석 및 설계는 AGARD⁽⁶⁾에서 제공한 high mass flow rate (HMFR) 조건을 따르며, 조건은 Table 2 와 같다.

본 연구에 사용된 유동 해석 코드의 지배 방정식

Table 1. VG170 Configuration.

Designation	VG170
Number of pairs, n_{VG}	11
Sector location, X_{VG}/R_i	2.0
Blade height, h/R_i	0.070
Chord length, c/R_i	0.280
Spacing angle, β_{VG} (deg)	15.0
Angle of incidence, α_{VG} (deg)	16.0

Table 2. Flow condition of high mass flow rate.

Test Case 3.1 (DP 3532)	
Total pressure	$H_0 = 29.889$ in Hg
Total temperature	$T_{t0} = 293$ °K
Flight Mach number	$M_0 = 0.210$
Throat Mach number	$M_{th} = 0.794$

은 2 방정식 난류 모델(k- ω SST)과 연계한 3 차원 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식이다. 대류항 (convection terms)은 Kim 등⁽⁷⁾이 개발한 RoeM 기법을 적용하였다. 고차의 공간 차분화를 위해 MUSCL(Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws)을 이용하여 유동 변수의 외삽을 수행하였다. 시간적분법은 Yoon 등⁽⁸⁾의 LU-SGS 기법을 채택했다.

경계 조건(boundary condition)은 이병준⁽⁹⁾, Menzies⁽²⁾ 등의 연구 결과를 참고하였다. S-duct 의 입구는 전압력 및 전온도를 주어진 조건에 맞추어 설정하였으며, S-duct 의 출구는 유량과 목 Mach 수를 주어진 조건에 맞추어 후방 압력을 선정하였다.

기본 격자(coarse)는 총 576,000 개 cell (반지름 방향 51 개 node x 원주 방향 37 개 node x 축 방향 321 개 node)로 구성되어 있다. BAY model 을 적용

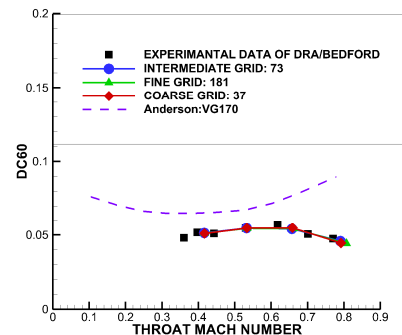


Fig. 3. Results of grid refinement test.

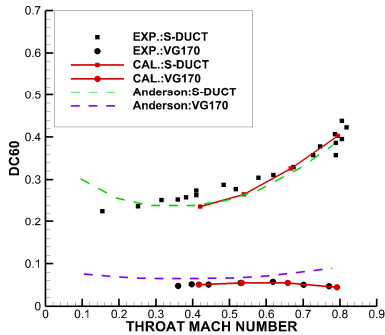


Fig. 5. Validation of flow solver and VG source model (Distortion coefficient).

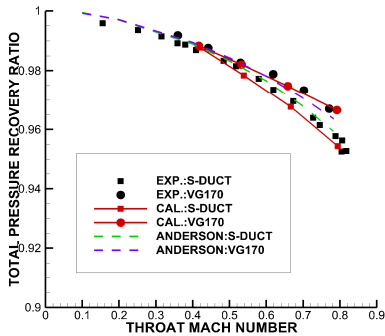


Fig. 6. Validation of flow solver and VG source model (Total pressure recovery ratio).

할 경우 원주 방향의 격자 밀도에 따라 해의 정확도가 민감한 것으로 알려져 있기 때문에, 추가 격자 1 (medium, 51 x 73 x 321) 과 추가 격자 2 (fine, 51 x 73 x 321) 를 구성 및 해석하여 격자의 타당성을 검증하였다. Figure 3 은 격자 타당성 검사 결과이다. 세 종류의 격자는 모두 실험치와 대체로 일치하는 결과를 나타내었으며, 이를 통해 기본 격자가 해석 및 설계에 적합함을 확인 할 수 있다. 다음은 유동 해석 코드의 타당성 검증 결과이다. Figures 4 과 5 은 DC_{60} 과 전압력 회복률을 실험치와 비교한것이다. VG 를 설치하기 이전과 설치한 이후의 결과 모두 실험치와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 6 은 유동 박리가 발생되

Table 3. Design range.

Design parameter	Lower	Initial	Upper
Chord length (c/R_i)	0.140	0.280	0.420
Blade height (h/R_i)	0.020	0.070	0.120
Angle of incidence (α [deg.])	0.0	16.0	32.0

는 현상을 잘 포착함을 보여준다.

3.4 VG170 이 설치된 RAE M2129 유동 특성

VG170 이 설치된 RAE M2129 S-duct 은 설치되기 전과 전혀 다른 유동 특성을 보여준다. VG 설치로 인해 내부 벽에 존재하는 유동 박리가 사라짐을 확인할 수 있으나, 두 번째 격임 지역의 외부 벽에서 새로운 유동 박리가 나타난다. Figure 7 을 살펴보면, Figure 에서 나타내는 모든 유동이 외부 벽 방향으로 진행하고 있으며, 이 유동들이 서로 섞여 새로운 유동 박리를 만들어 내고 있다. 새롭게 나타나는 유동 박리는 유동 왜곡의 새로운 원인이 된다.

2.3 장에서 나타난 유동 특성과 본 장에서 나타난 유동 특성을 살펴본 결과, VG 는 S-duct 내부의 유동을 전체적으로 변화시켜 주는 역할을 가짐을 확인할 수 있다. 특히 VG 설치 전/후는 서로 상반된 곳에서 가장 큰 유동 왜곡을 보여주고 있으므로, VG 를 설계함으로써, 유동 왜곡의 원인이 최소화 되는 지점을 찾을 수 있을 것을 예상할 수 있다.

4. 최적 설계 방법

4.1 설계 문제의 정의

본 연구의 설계목표는 전압력 회복률을 유지한 채로 유동 왜곡을 감소시키는데 있다. 2.3 장과 3.4 장에서 언급한대로, S-duct 는 외부 벽 근방과 내부 벽 근방의 유동은 전혀 다른 특성을 보인다. 즉, VG 설계 시에 각 VG 근방의 유동특성을 설계에 직접적으로 반영할 수 있으면 더 좋은 성능의 VG 를 설계해 낼 수 있다. 이러한 이론을 기반으로, 본 연구에서는 세가지의 설계 파라미터를 각 VG 에 적용하여 설계를 수행하였다. 설계의 Baseline 으로 선정된 VG170 의 경우, 11 개의 VG 를 설치하게 되므로, 총 33 개의 설계변수가 적용되었다. 이러한 많은 숫자의 설계변수를 적용하기 위해서 설계 변수의 숫자와 수치적 계산량이 서로 독립적인 AV 기법을 적용하였으며, 기울기 기반의 설계 방법을 적용하였다. 차분 기반의 AV 기법(discrete

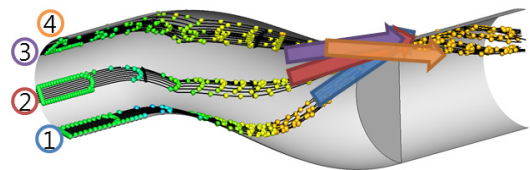


Fig. 7. Flow characteristics of RAE M2129 with VG 170 configuration.

adjoint approach) 을 통해 소스항의 미분을 쉽게 적용하였으며, 이를 통해 민감도를 계산하였다. 또한, 최적화 기법으로는 비구속 구배법의 일종인 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 기법을 이용하여 최적값을 도출하였다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 하나의 주 설계와 두개의 추가 설계를 수행하였다. 주 설계에서는 위에 언급한 세가지의 설계 파라미터를 모두 고려하여 최적의 VG 를 설계하였다. 두개의 추가 설계는 각각 세가지의 설계 파라미터를 두 부분으로 나누어, 형상 변화와 관련된 설계(형상 설계)와 VG 의 각도와 관련된 설계(각도 설계)를 따로 수행하였다. 이를 통하여 세가지의 설계 파라미터의 역할 및 상관관계를 판별하였다.

4.2 목적 함수

본 연구에서는 유동 왜곡을 감소시키기 위한 목적함수 내에 전압력 손실량을 벌칙함수(penalty function) 형태의 구속 조건으로 내재하여 사용하였다.

Minimize: $DC60$

Subject to: $PR(P_{t,ef}/P_{t,in}) \geq PR(P_{t,ef}/P_{t,in})_{Baseline}$

목적함수 F 는 다음과 같다.

$$F = DC60 + Wt \times \text{Max}(PR_{Baseline} - PR, 0). \quad (9)$$

여기서 가중치 Wt 는 목적함수와 벌칙함수 두 항에 대해 변량을 맞추기 위해 PR 과 $DC60$ 의 민감도 비율에 따라 선정하였다.

4.3 설계 파라미터와 범위

본 설계의 파라미터로 VG 의 길이, 높이, 각도를 설계 파라미터로 선정하였다. 기본적인 설계 범위는 VG170 을 기준으로 0.5~1.5 배의 범위로 선정하였으나, 설계 수행 초기 결과를 반영하여 수정하였다. 또한, 각도는 0 도까지의 범위를 고려하여 VG 의 영향력이 닿지 않는 경우또한 포함하였다. 실제 사용한 설계 범위는 Table 3 과 같다.

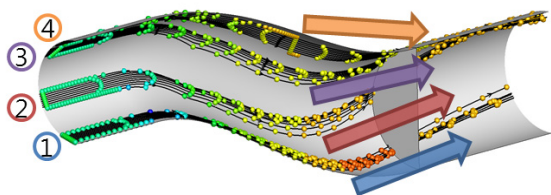


Fig. 8. Flow characteristics of RAE M2129 with designed VG configuration.

5. 설계 결과

본 연구에서는 세가지의 설계를 수행하였다. 설계된 VG 를 포함하는 S-duct 는 모두 baseline 보다 개선된 성능을 보여주었다. 특히, 2.3 장과 3.4 장에서 언급한 유동 왜곡의 원인이 모두 사라졌음을 확인하였다. 또한, 설계된 VG 는 S-duct 의 유동을 Fig. 8 과 같이 균일하게 만들어준다. 그림에서 나타난 유동①~④ 는 Figs. 2, 7 에서 보여준 것과 일치하는 것이다.

주 설계를 통해 $DC60$ 은 VG170 을 기준으로 72.65% 감소하였다. (0.40269 (VG 설치전), 0.044630 (VG170 설치 후) → 0.012207 (설계 후)) 반면, 형상 설계를 통하여 60%, 각도 설계를 통하여 23%의 $DC60$ 감소효과를 확인하였다. 세 경우 모두, 전압력 손실량은 설계전과 동일하거나 증가하였다. 설계 이후의 전압력 분포는 다음 Fig. 9 와 같다.

모든 설계 이후, 두가지의 특징적인 현상이 발견되었다. 첫번째로, Fig. 10 에서 보여주는 바와 같이 엔진입구에서의 swirl 패턴이 설계 전보다 균일해졌다. 특히, swirl 의 중심의 위치가 설계 전보다 top/bottom 벽 방향으로 이동하면서 유동의 혼합이 더 균일하게 일어남을 확인할 수 있다. 이는 평균적인 전압력을 엔진입구 전 영역에 분포시켜 주는 역할을 한다.

두번째로, 설계된 VG 는 top/bottom 을 중심으로 대칭적인 구조를 가지며, 설계된 VG 는 모두 이와 같은 특성을 지닌다. VG170 을 설치한 S-duct 의 유동 왜곡 발생이 top/bottom 을 중심으로 대칭적으로 이루어 지므로, 이를 수정하기 위해 필연적으로 일어나는 현상이다.

주 설계와 두종류의 추가 설계의 유동 왜곡 현상을 비교해 본 결과, 형상 설계 파라미터와 각도 설계 파라미터는 서로 보완적인 관계에 있음을 확인하였다. 형상 설계 이후에는 VG170 의 왜곡 현상과 전혀 다른 특징의 왜곡 현상이 발생하였으나, 각도 설계 이후에는 VG170 의 왜곡 현상이 줄어들 뿐 특징에는 변화가 없음을 확인하였다. 또한, 주 설계 이후에는 추가 설계의 특징들을 서로 용

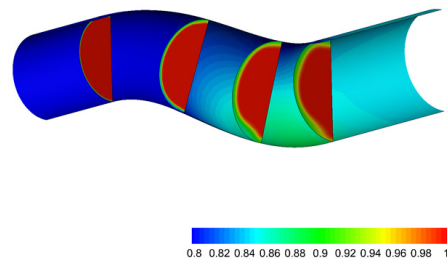


Fig. 9. Total pressure recovery contour

후 기

본 연구는 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0027486) 과 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스 교육허브개발사업(No. 2011-0020559)의 지원을 받아 수행되었습니다.

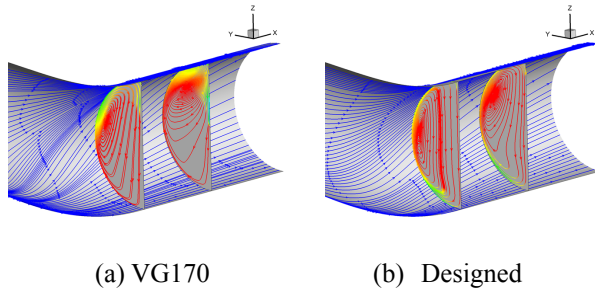


Fig. 10. Comparison of mixing flow patterns.

참고문헌

- (1) Goldsmith E. L. and Seddon J., 1993, *Practical Intake Aerodynamic Design*, AIAA Education Series.
- (2) Menzies R. D. D., 2002, "Investigation of S-shaped Intake Aerodynamics using Computational Fluid Dynamics," *Ph. D. thesis, Department of Aerospace Engineering*, University of Glasgow.
- (3) Bender E. E., Anderson B. H., and Yagle P. J., 1999, "Vortex Generator Modeling for Navier-Stokes Codes," *3rd Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference*, San Francisco, CA.
- (4) Anderson B. H. and Gibb J., 1998, "Vortex-generator Installation Studies on Steady-state and Dynamic Distortion," *J. Aircraft*, Vol. 35, pp. 513-520.
- (5) Jirásek A., 2006, "Design of Vortex Generator Flow Control in Inlets," *J. Aircraft*, Vol. 43, pp. 1886-1892.
- (6) Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1991, "Air Intakes for High Speed Vehicles," AGARD Advisory Report, AR-270.
- (7) Kim S. S., Kim C., Rho O.-H., and Hong S. K., 2003, "Cures for the Shock Instability: Development of Shock-stable Roe Scheme," *J. Comput. Phys.*, Vol. 182, pp. 342-374.
- (8) Yoon S. and Jameson A., 1988, "Lower-upper Symmetric-gauss-seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equation," *AIAA J.*, Vol. 26, pp. 1025-1026.
- (9) Lee B. J. and Kim C., 2007, "Automated Design Methodology of Turbulent Internal Flow using Discrete Adjoint Formulation," *Aerosp. Sci. Technol.* Vol. 11, pp. 163-173.
- (10) Yi, J., Lee B. J., and Kim C., 2011, "Efficient Design Optimization of Vortex Generator in Subsonic Offset Inlet by Discrete Adjoint Approach," *20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, Honolulu, Hawaii.

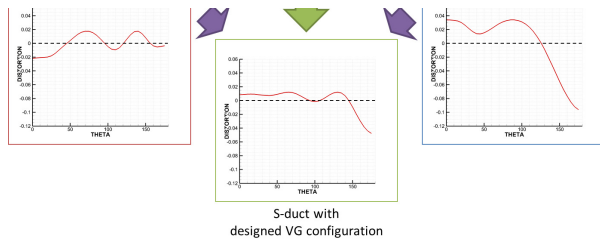


Fig. 11. Comparison of distortion patterns.

합한 왜곡 현상이 발생하였다. 이는 Fig. 11 의 비교를 통해 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 RAE M2129 S-duct 내부의 VG 형상 및 각도에 대한 설계를 각각의 VG 를 독립적으로 고려하여 수행하였으며, 최종적으로 72%의 성능 향상을 도출해 내었다.

설계 이후의 급격한 성능 향상은 본 연구에서 제시한 각각의 VG 를 독립적으로 고려하는 설계 방법이 이전의 방법보다 개선된 방법임을 확인시켜준다. 또한, 제시한 설계 파라미터가 적합함을 확인하였으며, 설계 파라미터가 서로 보완적임을 확인하였다.

제시된 설계 방법은 S-duct 외에도 BLI 흡입관이 나 비행기 날개 윗면에도 활용될 수 있을것으로 기대된다. 또한, 추가적인 설계 파라미터, 각 VG 의 위치등을 통한 설계를 고려한다면 더욱 개선된 S-duct 을 이끌어 낼 수 있을것이다.