

압축기용 S형 덕트 유동에 대한 수치해석적 연구

최창호* · 노준구* · 김진한*

Numerical Studies on the S-Shaped Duct Flow for Compressors

Chang-Ho Choi*, Jun-Gu Noh*, Jinhan Kim*

Key Words: Numerical analysis (수치해석), S-shaped duct (S형 덕트), Compressor (압축기), OGV (출구 유도익)

ABSTRACT

This paper is concerned with the numerical analyses of an S-shaped duct for the inter-channel between compressor spools. For the compactness and lightweight of an engine, the length of the S-shaped duct is desired to be minimized. Shortening the S-shaped duct, however, flow separation is likely to occur. Numerical investigation using a three-dimensional Navier-Stokes flow solver was performed to determine the availability of the minimization of an S-shaped duct. Computations were performed introducing the experimental data as the inlet flow condition of the OGV in determining the minimum length of the S-shaped duct. Also, the leaning effect of the OGV which assists the flow to turn radially inward was studied adopting mixing-plane method to consider the rotor/OGV interaction.

1. 서론

S형 덕트는 가스터빈엔진의 저압 압축기와 고압 압축기를 연결하는 통로로 일반적으로 사용되는데, Fig. 1에서 보는 바와 같이 저압 압축기와 고압 압축기가 공기의 밀도변화에 따라 다른 반경을 가지게 되므로 S형의 형상을 가지게 된다. 엔진 압축부의 경량화와 소형화를 위해서 S형 덕트는 최소한의 크기를 가지게 설계되어야 한다. 그러나 크기가 줄어들수록 급격한 형상변화로 인하여 덕트 내부에 유동의 박리가 발생할 수 있으므로 적절한 설계가 필요하다.

S형 덕트 내의 유동현상에 대한 활발한 연구는 유동해석과 실험적 연구를 병행하여 수행한 Britchford 등^(1,2)에 의하여 시작되었는데, S형 덕트의 곡률반경에

의해서 유선방향으로의 강한 압력구배가 발생하며, 유동에 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 또한 유선방향으로의 압력구배에 따른 난류의 거동을 적절하게 모사할 수 있는 RS (Reynolds Stress) 형태의 난류

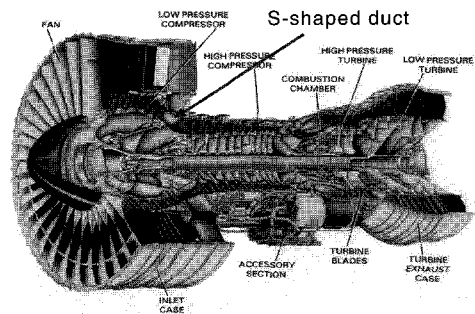


Fig. 1 Configuration of a gas turbine engine with S-shaped duct (PW4000)

* 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹
책임저자 E-mail : cch@kari.re.kr

모델이 비교적 정확하게 벽근처의 유동을 묘사함을 보였다. Bailey와 Carrotte⁽³⁾는 입구 예선회가 S형 덕트 내 유동에 미치는 현상을 연구하였으며, 실제 압축기의 구조와 가까운 입구에 지지부를 설치하여, 지지부가 유동에 미치는 영향에 대한 연구가 Bailey 등⁽⁴⁾에 의하여 수행되었다. 최근에는 S형 덕트 앞에 설치되는 OGV (Outlet Guide Vane)의 형상변화에 따른 S형 덕트의 소형화 가능성에 대한 연구가 Britchford 등⁽⁵⁾에 의하여 수행되었는데, OGV에 변형을 줌으로써 (leant OGV) 덕트 허브에서 유동박리가 지연될 수 있음을 보고하였다.

앞에서 소개한 기존의 연구들은 다양한 조건에서 S형 덕트 내의 유동현상의 규명에 중점을 두고 수행되었으나, S형 덕트의 형상 최소화에 대한 연구는 시도되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 유동해석 기법을 이용하여 Britchford 등이 연구한 S형 덕트에 대하여 길이 및 반경의 형상을 변화하면서, S형 덕트의 최소 축소 한계를 찾기 위한 시도가 수행되었다.

2. 본 론

2.1 S형 덕트 형상 및 실험 측정면

Figure 2는 실험 및 계산^(1,2)에 사용된 S형 덕트의 형상 및 측정면을 보여준다. S형 덕트는 동익과 OGV의 하류에 위치하고 있으며, Fig. 2와 같이 실험에서 동익의 입구 (W2)와 OGV 출구 (A1) 및 S형 덕트 내부 (A2- A6)에서 유동이 측정되었다.

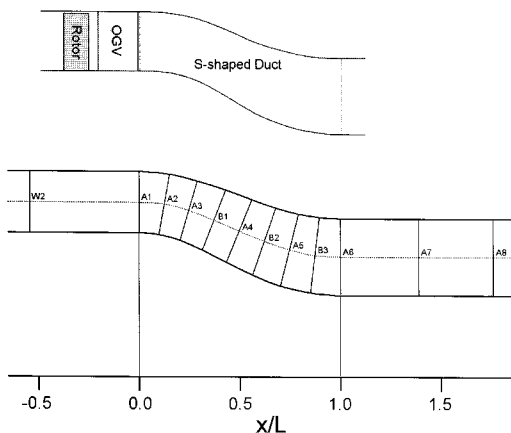


Fig. 2 Configuration of the S-shaped duct and locations of the traverse plane

2.2 수치해석 기법

본 연구에서는 터보펌프 수치해석에 Numeca사에서 개발된 3차원 유동해석 코드인 Fine/Turbo를 사용하였다⁽⁶⁾. Fine/Turbo는 공간차분법으로 가점성을 첨가한 중심차분법과 시간차분법으로는 Runge-Kutta 시간전진법을 사용한다. 또한 비압축성 유동을 해석하기 위하여 예조건화 기법을 채택하였다. 수렴을 가속시키기 위하여 다중격자법, 국부시간간격, 잔류항 평균법 (residual smoothing) 등을 사용하였다. S형 덕트에서는 강한 압력구배가 존재하며, 허브에서 박리가 발생할 가능성이 높으므로 적절한 난류모델의 선택은 매우 중요하다. 본 연구에서는 4가지 난류모델, 즉, Baldwin -Lomax, Launder-Sharma, nonlinear 및 Yang-Shih $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 실험값이 알려진 2차원 S형 덕트에 대하여 검증을 수행하였으며, 해석 결과로부터 Yang-Shih $k-\epsilon$ 모델이 가장 적절한 결과를 나타내었으므로, 난류모델로 선정하여 사용하였다.

경계조건으로, 입구경계에서는 S형 덕트의 단독계산의 경우에는 A1 측정면의 실험값을 사용하였으며, OGV를 포함한 계산의 경우에는 W2 측정면의 실험값을 사용하였다. 출구경계조건으로는 모든 계산에서 정압을 주었다. 동익과 OGV의 경계면에서는 혼합면 (mixing-plane) 기법을 사용하였다.

2.3 계산 결과 및 토의

2.3.1 기본형 S 덕트 계산

본 연구에 사용된 계산기법의 정확성을 검증하기 위해서 Britchford 등이 실험한 Fig. 2에 나타난 원래의 S형 덕트에 대하여 우선 계산이 수행되었다. Fig. 3은 계산격자를 보여주는데, 계산은 실험값이 S형 덕트 입구 (A1 측정면)에서 주어졌기 때문에 S형

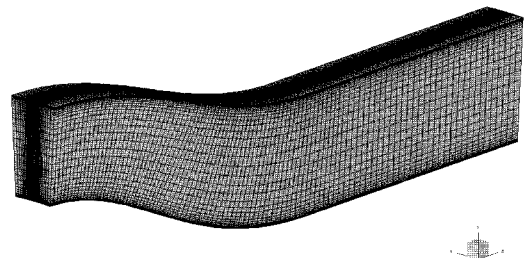


Fig. 3 Computational grid (65x37x145) for the original S-shaped duct

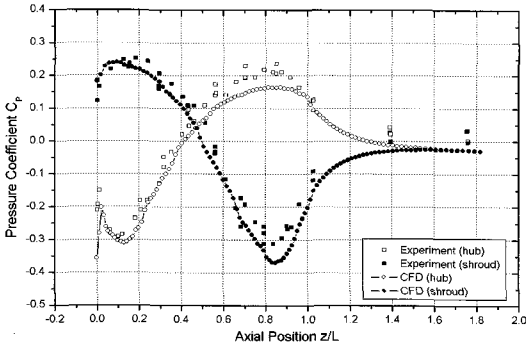


Fig. 4 Measured and predicted axial variation of the pressure coefficient

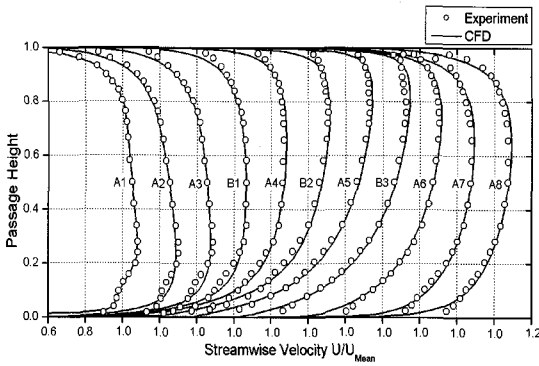


Fig. 5 Measured and predicted streamwise velocity profiles

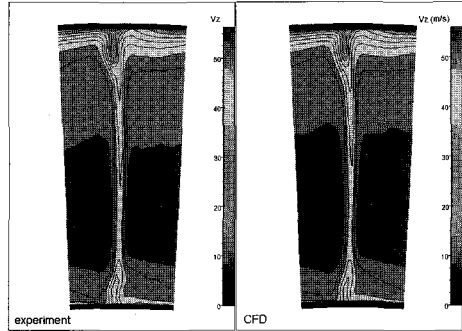
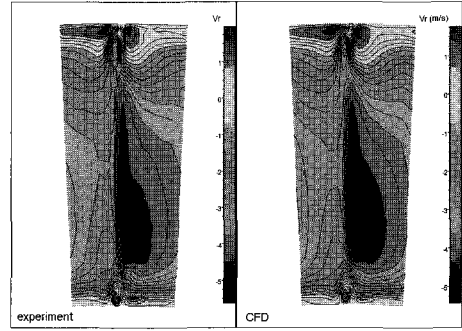
덕트에서만 수행되었다. Figs. 4와 5에 압력계수와 속도분포를 실험값과 비교하여 나타내었는데, 벽근처에서 강한 속도구배에 대한 난류모델의 부정확성 때문에 실험값과 차이를 보이지만 대체적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4에서 허브에서 전반적으로 역압력구배가 형성되지만, 쉬라우드에서는 입구와 출구부에서만 역압력구배가 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 벽근처에서 속도분포가 실험값과 차이가 나는 것은 본 연구에 사용된 난류모델이 강한 압력구배에 따른 난류의 비등방성을 적절히 모사하지 못하기 때문이라고 판단된다. Fig. 4에서 압력계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = (p - p_{in}) / (P_{in} - p_{in}) \quad (1)$$

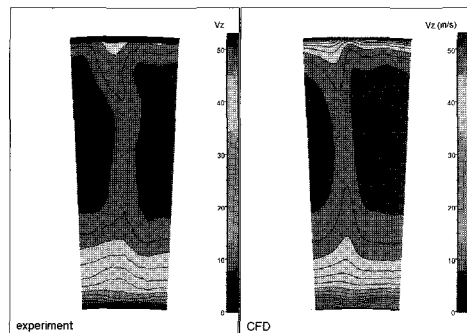
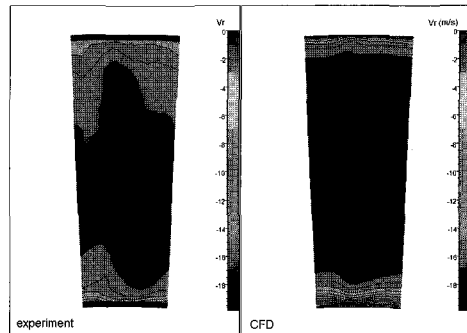
여기서 p 는 정압, p_{in} 은 입구 정압력, P_{in} 은 입구 전압력을 나타낸다.

Figure 6에는 여러 측정면에서의 속도분포를 실험값과 비교하여 나타내었다. 측정면 A1은 S형 덕트 입

구를 나타내고, 계산에서 실험값을 입구조건으로 하였



(a)



(b)

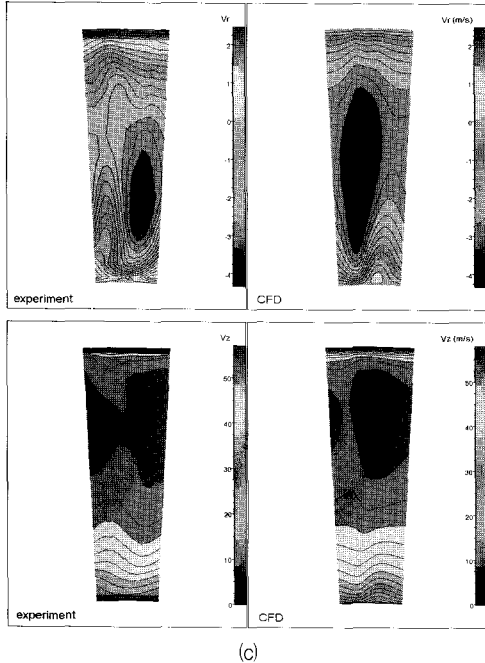


Fig. 6 Contours of the velocity component for (a) traverse plane A1, (b) traverse plane A4 and (c) traverse plane A6

기 때문에 실험값과 계산값이 동일하게 나타난다. 하류로 갈수록 계산이 경계층을 두껍게 예측하는 등 실험과 차이를 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 전반적으로 계산이 실험의 경향을 적절하게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

2.3.2 S형 덕트 최소화 계산

본 연구에 사용된 계산법이 S형 덕트의 유동해석에 적절하게 사용될 수 있음을 검증하였으므로, S형 덕트의 길이 및 반경 최소화에 대한 연구가 수행되었다. 이 때 계산 입/출구 조건은 기본형 S형 덕트 계산과 동일하게 주었다.

Figure 7은 유동해석의 결과로부터 본 연구에서 구해진 S형 덕트의 최소 길이 및 반경을 나타낸다. 최소 크기는 유동해석을 수행하였을 때, 허브에서 박리가 발생하지 않는 최소 크기를 나타내는데, 본 연구에서는 최소 길이 및 반경을 유동박리가 발생할 때까지 서서히 S형 덕트를 줄이면서 유동해석을 수행하여 결정하였다. S형 덕트의 길이는 76%까지, 반경을 83%까지 줄일 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 8에 최소 길이 및 반경에서의 속도 및 압력분포를 나타내었는데, 크기가 줄어들면서 허브에서 역압력구배가 증가하며, 속

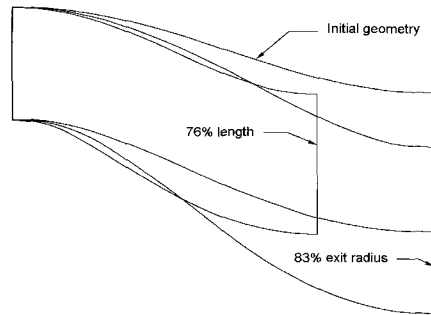
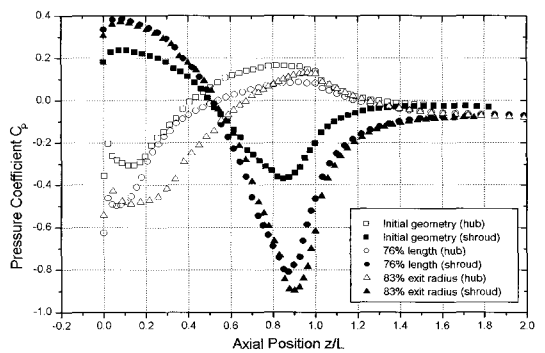
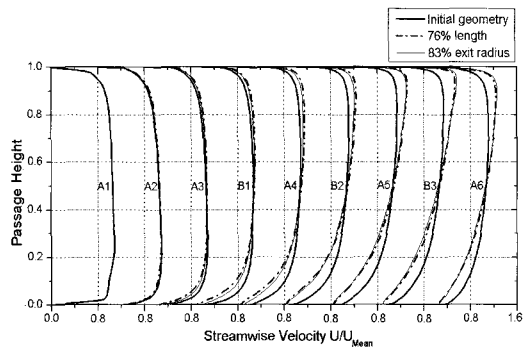


Fig. 7 Geometry modification



(a)



(b)

Fig. 8 (a) pressure and (b) streamwise velocity coefficient distribution

도분포에서 측정면 B2와 A5의 허브에서 유동박리가 시작되는 것을 알 수 있다.

2.3.3 기본형 OGV를 포함한 S형 덕트 계산

Britchford 등⁽⁵⁾은 leant OGV를 사용하여, 반경방향 안쪽에서의 유동을 유발하여 박리가 지연됨을 보였다. 본 연구에서는 leant OGV가 S형 덕트의 최소화

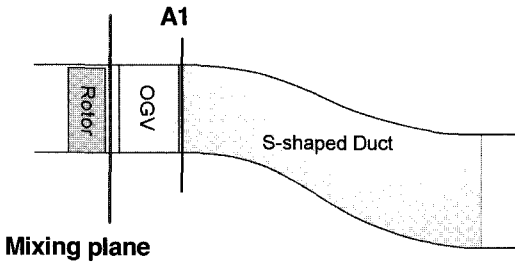


Fig. 9 Configuration of the original S-shaped duct with mixing plane

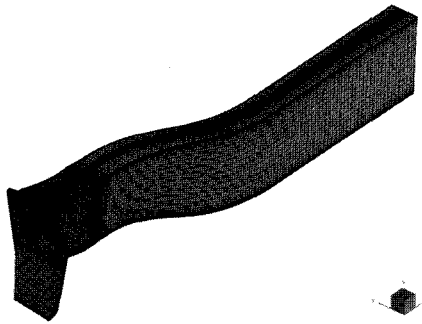
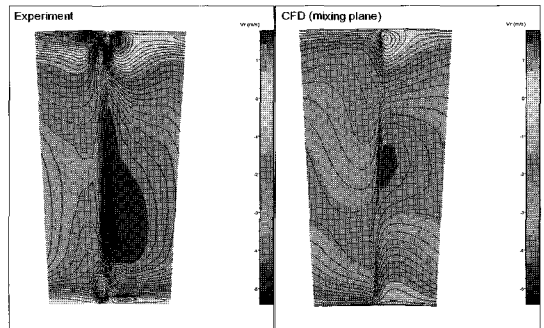


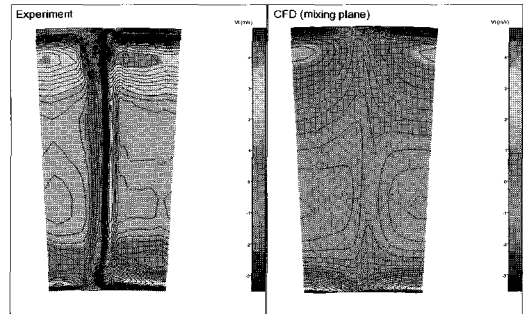
Fig. 10 Computational grid for the mixing-plane calculation with the original OGV

미치는 연구를 수행하였다. 실험에서 동익의 입구에서만 측정이 수행되고, 동익과 OGV사이에서는 측정이 수행되지 않았기 때문에, OGV의 입구조건을 도출하기 위해 동익과 OGV를 같이 계산을 수행하여야한다. 정확한 예측을 위해서는 비정상 유동해석을 수행해야 하지만, 계산시간이 많이 소요되므로, 본 연구에서는 정상해석법인 혼합면 기법을 사용하였다. 그러나 S형 덕트내의 유동은 입구 경계조건에 민감하게 반응하는 난류 경계층 및 천이 유동에 가까우므로 혼합면을 사용할 경우 동익 출구에서 회전방향으로 평균된 유동이 OGV의 입구에 유입되어 해의 정확성에 큰 영향을 미칠 가능성이 있다. 본 연구에서는 이러한 혼합면기법의 적용성을 알아보기 위해서 실험값이 존재하는 당초의 OGV를 사용하여 동익과 OGV를 포함하는 계산을 수행하였다. Figs. 9, 10은 계산영역과 격자를 나타낸다. 입구조건은 Fig. 2에서 W2 측정면의 실험값을 사용하였다. Fig. 11은 S형 덕트의 입구인 A1 측정면에서 계산결과를 실험값과 비교하여 나타내었는데, 실험값과 계산값이 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 혼합면은 S형 덕트의 입구에서 유동을 왜곡하여

계산의 정확성에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 12에 측정면에서의 속도분포를 실험과 비교하여 나타내었는데, 입구부에서는 실험값과 차이가 나지만, 유동박리가 시작되는 하류에서는 난류혼합에 의하여 입구의 영향이 감소하여 실험값에 근접하는 것을 볼 수 있다. 따라서 추가적인 연구가 필요하지만, 혼합면 기법은 S형 덕트의 최소화 연구에 적용될 수 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 11 Contour plots at the traverse plane A1 about (a) radial velocity contour and (b) tangential velocity contour

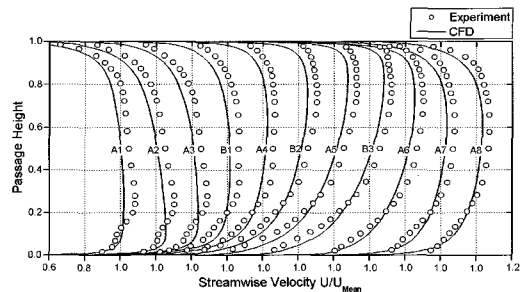


Fig. 12 Measured and predicted streamwise velocity profiles

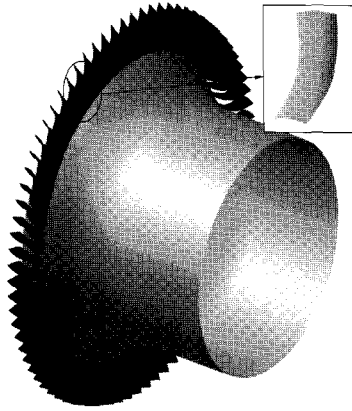


Fig. 13 S-shaped duct combined with the leant OGV

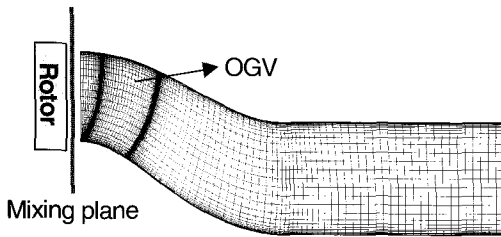


Fig. 14 Computational grid with the leant OGV

2.3.4 Leant OGV를 포함한 S형 덕트 계산

혼합면기법이 S형 덕트의 계산에 적용될 수 있음을 보였으므로, leant OGV에 대한 계산을 수행하였다. 계산에 쓰인 leant OGV의 형상과 격자를 Figs. 13과 14에 나타내었으며, 입구경계조건은 기본형 OGV와 같은 실험값을 사용하였다. 계산의 결과로 S형 덕트는 추가로 71%까지 길이 축소가 가능한 것으로 판단되었다.

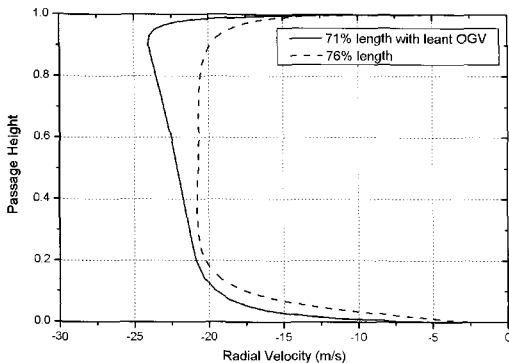


Fig. 15 Radial velocity distributions at the traverse plane B1

Figure 15에 B1 측정면에서 반경방향 속도분포를 나타내었는데, leant OGV를 사용한 경우에 반경방향의 속도성분이 강해지는 것을 알 수 있다. 따라서 S형 덕트의 길이를 추가로 축소하여도 박리가 발생하지 않게 된다.

3. 결론

본 연구에서는 가스터빈 엔진의 압축기에 사용되는 S형 덕트에 대한 수치해석적 연구가 수행되었다. 연구의 결과로 계산기법이 S형 덕트의 설계 및 유동해석에 적용될 수 있음을 검증하였고, 기존의 S형 덕트의 최소 형상을 구해보았다. 본 연구의 결과로 다음을 알 수 있었다.

- 1) 기존의 S형 덕트에 대한 유동해석에서 계산결과가 실험치와 잘 일치하는 결과를 보였으므로, 본 연구에 사용된 수치기법은 S형 덕트의 설계과정 및 성능해석에 적용될 수 있음을 검증하였다. 또한 동익과 OGV를 포함한 계산을 혼합면기법을 사용하여 수행하였다. 혼합면 기법의 사용으로 인한 유동해석의 부정확성이 S형 덕트 입구부에서 나타났지만, 전반적으로 적절한 결과를 예측하는 것으로 판단되었다.
- 2) 본 연구에 사용된 S형 덕트의 최소화에 대한 연구 결과로서 길이는 당초의 76%까지, 반경은 83%까지 축소될 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) Leant OGV를 사용할 경우 반경방향으로의 유동을 유발하여 추가로 S형 덕트의 길이를 71%까지 축소할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Britchford, K. M., Manners, A. P., McGuirk, J. J. and Stevens, S. J., 1993, "Measurements and Prediction of Flow in Annular S-shaped Ducts," Proceedings of the Second International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Florence, Italy, pp. 785~794.
- (2) Britchford, K. M., Carrotte, J. F., Stevens, S. J. and McGuirk, J. J., 1994, "The Development of the Mean Flow and Turbulent

- Structure in an Annular S-shaped Duct," 94-GT-457.
- (3) Bailey, D. W. and Carrotte, J. F., 1996, "The Influence of Inlet Swirl on the Flow within an Annular S-Shaped Duct," 96-GT-60.
- (4) Bailey, D. W., Britchford, K. M., Carrotte, J. F., and Stevens, S. J., 1997, "Performance Assessment of an Annular S-shaped Duct," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 149~156.
- (5) Britchford, K. M., Carrotte, J. F., Kim, J. H., Hield, P. M., 2001, "The Effect of Operating Conditions on the Aerodynamic Performance of an Integrated OGV and S-shaped Duct," 2001-GT-0347
- (6) Numeca Inc., 2002, *Fine/Turbo Manual for Version 5.13.*