

서지성능 향상을 위한 원심압축기의 Bleed Slot Casing의 설계변수에 대한 해석 및 시험 평가

김홍원* · 정재훈** · 류승협** · 이근식***†

Numerical and Experimental Study on the Surge Performance Improvement by the Bleed Slot Casing of a Centrifugal Compressor

Hong-Won Kim*, Jae-Hoon Chung**, Seung-Hyup Ryu**, and Geun Sik Lee***†

Key Words : Surge margin(서지 마진), Bleed slot casing(블리드 슬롯 케이싱), Recirculation(재순환), Surge characteristics(서지특성)

ABSTRACT

The primary design goal of a compressor is focused on improving efficiency. Secondary objective is to widen the operating range of compressor. This paper presents a numerical and experimental investigation of the influence of the bleed slot on the operating range for the 1.2 MW class centrifugal compressor installed in a turbocharger. The main design parameters of the bleed slot casing are upstream slot position, inlet pipe slope, downstream slot position and width. The DOE(design of experiment) method was carried out to optimize the casing design. Numerical analyses were done by the commercial code ANSYS-CFX based on the three dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. Results showed that efficiency and pressure ratio increased as the downstream slot position and width were smaller and the upstream position was located away from the impeller inlet. Experimental works were also done with and without the bleed slot casing. The simulation results were in good agreement with the test data. Enhancement of both the surge margin up to 26.5% and the pressure ratio with the optimized bleed slot design were achieved, compared with the surge margin of only 6.6% without the bleed slot casing.

1. 서 론

최근 2011년부터 IMO(국제해사기구)의 강화된 NOx(기존 대비 20% 저감, Tier II) 환경규제에 따라 선박용 디젤엔진의 과급기 압축기의 설계사양은 기존 4.3의 압력비보다 높은 4.6이상의 높은 압력비를 요구하고 있다. 소요동력 및 임펠러 소재가 동일하다고 가정할 때, 높은 압력비를 달성하기 위해서는 기존보다 높은 효율이 만족되어야 하지만 비속도 값이 1.0을 가지는 형식에서는 효율향상 설계가 쉽지 않다. 또한 높은 압력비에서 운전된다는 것은 운전가능 범위(surge margin(서지 마진) 또는 turn down ratio, 이하 TR $TR =$

$(Q_{design} - Q_{surge}) / Q_{design}$ 이며 동일한 압력을 가지는 체적유량으로 계산된다.)가 좁은 영역에서 운전됨을 의미한다. 그러므로 효율의 저하없이 TR을 향상시키는 설계가 매우 중요하다. 특히 선박용 과급기와 같이 다품종, 대량 생산되는 압축기의 경우에 TR이 넓으면 엔진에 매칭되는 압축기의 다양한 종류를 줄이는 효과를 제공함으로써 제품 단가 감소와 타사 대비 기술 경쟁력의 우위를 점할 수 있는 장점이 있다.

압축기 시스템에서 스톨 현상은 저유량 운전조건에서 압력 및 유량의 맥동을 유발하여 압축기의 운전범위를 제한하는 불안정 특성을 의미한다. 스톨 발생은 케이싱에서 발생할 수도 있으나 일반적으로 임펠러 입구 유동의 불안정성에 기

* (주)현대중공업 엔진기계연구소 울산대학교 자동차선박대학원 기계자동차공학과(University of Ulsan, Institute of e-Vehicle Technology, Department of Mechanical and Automotive Engineering)

** (주)현대중공업 엔진기계연구소(Hyundai Heavy Industries, Engine & Machinery Research Institute)

*** 울산대학교 기계공학부(University of Ulsan, School of Mechanical Engineering)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : gslee@mail.ulsan.ac.kr

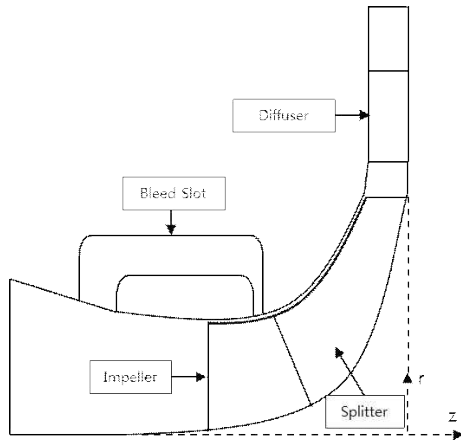


Fig. 1 Meridional plane with bleed slot

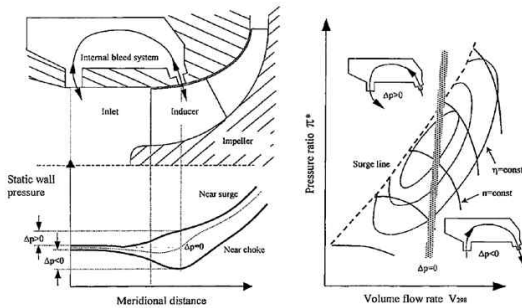


Fig. 2 Recirculating flow in the bleed slot casing⁽²⁾

인하는 임펠러 후단에 위치한 디퓨저 스톨에 의해 발생하므로 본 연구에서는 임펠러 상류, 즉 인두서 부분에서 발생하는 스톨을 억제하고자 임펠러 입구 슈라우드 케이싱의 bleed slot 설계변수에 대한 최적화 설계 및 해석을 수행하였고 최적화된 형상에 대해 시험을 통해 타당성을 검증하였다.

입구 슈라우드 케이싱의 설계변경을 통한 TR향상에 대해 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ Sagaguchi 등⁽¹⁾은 입구 슈라우드 케이싱에 다수의 bleed slot을 적용하여 임펠러 입구에서 유동 각(incidence angle)을 줄여줌으로써 TR을 증가시켰고 Hunziker 등⁽²⁾은 효율의 감소없이 TR을 증가시키는 방법으로 입구 케이싱에서 slot 위치를 변경함으로써 최적의 위치를 확인하였다. 국내에서는 박치용과 최영석 등^(3,4)이 입구 케이싱 상류의 slot 위치 변경과 케이싱 내부 가이드 베인 설치로써 TR향상을 해석적인 방법으로 고찰하였다.

본 논문에서는 다양한 bleed slot 설계변수에 대해 수치해석적으로 검토하였다. 주요 변수로는 입구 케이싱의 경사각 유무, 상류 및 하류의 bleed slot 위치, 하류 bleed slot 폭에 대해 TR향상에 대한 영향을 비교분석하였다. bleed slot이 없는 경우와 최적화된 bleed slot 형상을 도입한 경우에 대하여 임펠러 입구 유동각 변화 및 속도장을 분석하였으며 효율과 압력비의 성능곡선을 해석을 통해 비교하고 시험을

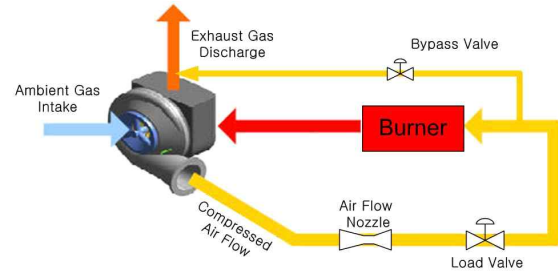


Fig. 3 Schematic view of compressor test facilities

통해 해석의 타당성을 확인하였다.

2. 원심압축기의 Bleed slot 케이싱 특성분석

원심압축기 설계 사양은 다음과 같다. 소요동력은 1,200 kW, 체적유량은 4.73 m³/s, 압력비는 4.65, 효율은 80%, 서지 마진(TR)은 15%이다.

원심 압축기의 자오면 형상과 bleed slot 케이싱의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2는 유량증감 변화에 따른 bleed slot 케이싱에서의 유동특성을 보여준다. 동일 회전수에서 운전유량이 커져서 운전점이 초킹영역에 가까워지면 bleed slot 상류의 압력이 인두서 목 위치의 압력보다 높아지므로 압력 차이가 발생하여 bleed slot 내에서는 상류에서 slot으로의 방향으로 재순환 유동이 발생하게 된다. 이와 반대로 서지점과 가까운 운전유량에서는 slot 위치의 압력이 상류의 압력보다 높기 때문에 bleed slot 내부에서는 slot에서 상류 방향으로의 재순환 유동이 발생하게 된다.

설계 및 유동해석의 결과를 실험값과 비교하기 위해서 Fig. 3과 같은 압축기 시운전 설비에서 성능을 계측하였다. 시험방법은 다음과 같다. 약 7 bar의 시동용 압축 탱크의 밸브의 열림으로 압축기는 구동되기 시작하며 압축된 공기는 바이패스라인을 통해 대기로 방출된다. 압축기가 정격 회전수의 약 30%정도까지 상승하게 되면 바이패스 밸브와 압축공기 탱크를 닫은 후 압축된 공기만으로 연소기에서 연소시켜 터빈으로 보내게 된다. 연소기는 Siemens-Westinghouse사의 W501D5를 개조하였다. 성능곡선 작성 시 초킹 라인으로 운전하고자 할 경우에는 바이패스 밸브를 열고 서지 라인으로 운전할 때에는 부하밸브와 미세조정 밸브를 사용한다. 압축기 출구와 부하밸브사이에서는 ISO 규격에 맞도록 충분한 직관을 확보한 뒤 유량을 계측하게 된다.

Fig. 4에서는 bleed slot이 없을 경우의 해석결과와 시험결과를 비교하였다. CFD결과와 시험값의 차이가 압력비 측면에서 최대 11%의 차이를 보이고 있다. 일반적인 공기 압축기의 해석 오차는 2~5%인데 비해서 차이가 큰 이유는 선박용 과급기의 스크롤 케이싱의 설계 특성에 기인한다. 과급기의 스크롤 케이싱은 제작비용을 줄이기 위하여 다양한 임펠

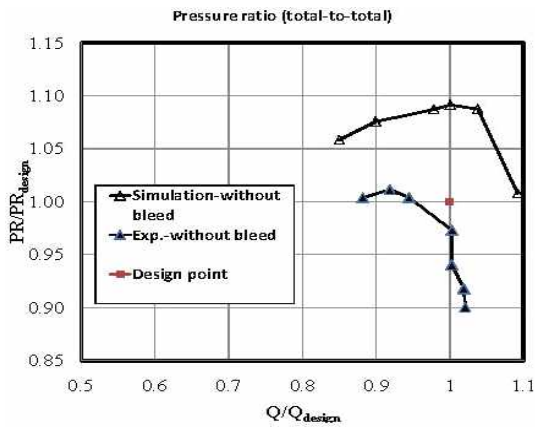


Fig. 4 Performance curve without bleed slot casing

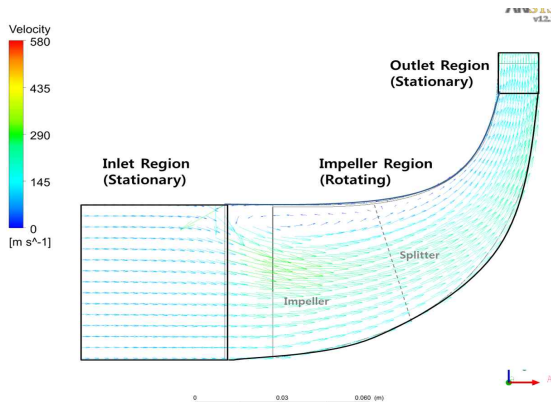


Fig. 5 Velocity vector at the mid-section without bleed slot casing ($Q/Q_{design}=0.85$)

러+디퓨저 제품 모델 군에서 최대유량을 기준으로 단일화 설계되므로 스크롤 케이싱에서 압력손실계수가 크게 나타난다. 따라서 과급기에서 실제 성능과 가깝게 해석하려면 스크롤 케이싱 및 PTC10⁽⁷⁾에서 규정하는 출구의 성능 계측위치까지의 배관을 반드시 포함하여 해석해야 한다. 시험결과에서 TR은 약 9%에 불과하였으며 설계사양을 만족하지 못하였다. Fig. 5에서는 bleed slot이 없을 경우의 저유량조건 ($Q/Q_{design}=0.85$)에서 해석결과이며 입구 재순환 유동이 발생하고 있다. 이는 임펠러 입구에서 유동박리가 발생하여 충돌손실이 커지고 압력면과 흡입면의 압력차가 발생하여 날개부하(blade loading)를 증가시키기 때문이다. 또한 팁 누설유동에 영향을 주어 날개 사이에서 발생하는 실속 셀(stall cell)을 증가시키게 되어 유동정체로 인한 역압력구배에 의해 서지가 발생하게 된다.

본 연구에서는 입구 케이싱의 bleed slot 설계변수를 4가지(Upstream slot position, Inlet pipe slope, Downstream slot position and width)로 설정하여 부분적 실험계획법을 통하여 민감도분석과 함께 최적화된 설계변수를 도출하였고 시험결과를 통해 해석의 신뢰성을 확보하였다. 설계변수와 각 경우에 대한 관련 그림과 정의는 Fig. 6과 Table 1에, 실

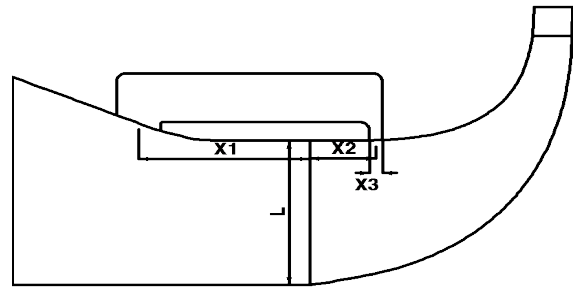


Fig. 6 Layout of non-dimensional design concepts

Table 1 Non-dimensional design parameters

Parameter	A	B	C	D
Def.	Slope existence	Upstream position (X1/L)	Downstream position (X2/L)	Downstream width (X3/L)
1	yes	0.67	0.48	0.07
-1	no	0.90	0.36	0.12

험계획법의 각 케이스 1-9(case 1-9)는 Table 2에 제시되어 있다. 본 연구에서 최적해를 찾기 위해 적용된 방법은 계산된 결과로부터 다항식의 반응면을 구성하여 설계변수와 목적함수와의 관계를 구하는 반응면 기법(Response surface method)이다. 설계변수 4개인 반응면 모델을 2차 다항식으로 표현한 목적함수의 근사함수는 식(1)과 같이 정의된다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^4 \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

이러한 반응면을 구하는데 다양한 실험계획법이 사용되지만 본 연구에서는 비교적 간단한 2k-1 부분적 요인 실험을 적용하였다.

3. 수치 해석 방법

최적설계 변수를 도출하기 위해 bleed slot이 없는 케이싱과 8종의 bleed slot케이싱에 대해 격자를 생성하였다. Fig. 7은 다양한 설계변수에 대해 효율적으로 모델링하기 위하여 ICEM-CFD 상용 프로그램을 이용하여 전체 해석 영역을 8개의 모듈화된 블록으로 나눈 것을 보여준다. 전체적으로 약 830,000 elements와 900,000 nodes로 구성되었다. 격자수는 임펠러는 약 435,000개, 디퓨저는 약 145,000개 그리고 bleed slot케이싱은 250,000개이다. 수치해석은 상용 유동 해석 프로그램인 CFX를 사용하였다. 압축기 형상은 주기적인 특성을 가지고 있으므로 임펠러와 디퓨저는 one-pitch의 도메인으로 격자를 생성하였다. Table 3에서는 적용된 지배 방정식과 경계조건을 보여준다. 임펠러와 디퓨저 사이의 인

Table 2 Design parametric analysis cases (9 cases)

Design Parameter Case with/without bleed slot		Slope (A)	Upstream slot position (B)	Downstream slot	
				Position (C)	Width (D)
Without Bleed		0	0	0	0
With Bleed	case1	-1	+1	-1	+1
	case2	-1	-1	-1	-1
	case3	-1	+1	+1	-1
	case4	+1	+1	-1	-1
	case5	+1	-1	+1	-1
	case6	+1	-1	-1	+1
	case7	-1	-1	+1	+1
	case8	+1	+1	+1	+1

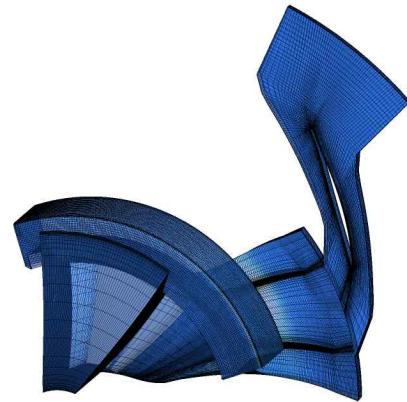


Fig. 8 Configuration for compressor modeling

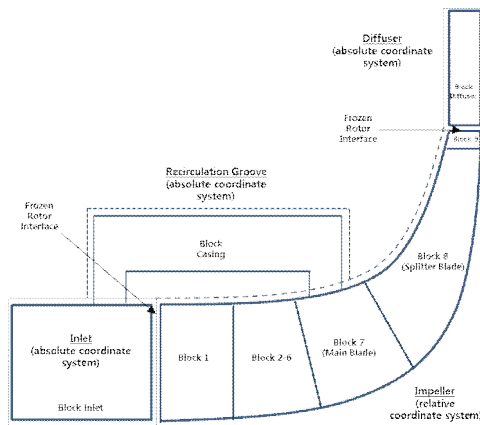


Fig. 7 Block structure of the CFD domains

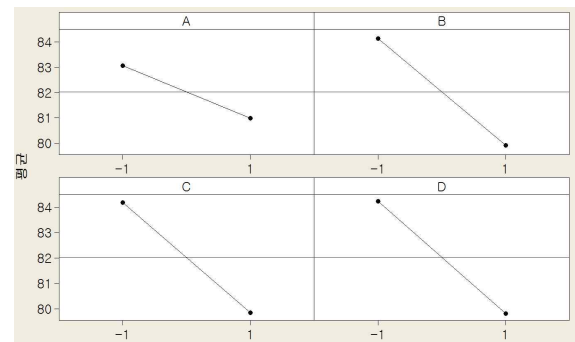


Fig. 9 Sensitivity analysis on A~D parameters (efficiency)

Table 3 Governing equations and boundary conditions

Governing equations		Continuity
		Momentum(x,y,z)
		Turbulent
Boundary condition.	Operating fluid	Air
	Inlet pressure(Pa)	100,000 (total)
	Flow rates(m ³ /s)	4.73
	Inlet temp.(°C)	25
	Interface	Frozen rotor method
	Turbulent	Standard k-ε model
	Wall condition	Adiabatic

터페이스 계산은 효율이 높게 평가되는 mixing plane 방법 대신 임펠러 출구의 웨이크(wake)가 디퓨저 입구로 그대로 전달되는 특성을 가진 frozen-rotor 방법을 적용하였다. 모든 해석 경우에서 임펠러와 디퓨저 위치를 동일하게 함으로써 수치해석 결과의 오류를 방지하였다. 본 해석에서 스크롤 케이싱은 포함되지 않았으므로 해석결과와 시험값과의 직접적인 비교는 어렵다. Fig. 8은 모델링된 압축기 격자를 나타

낸다. 모델링된 bleed slot 케이싱의 내부 형상은 실제와 조금 다르다. 즉, 실제의 임펠러 안쪽 슈라우드 케이싱은 환형으로 구성되는데 재순환 공간을 만들려면 120도 간격으로 3개의 작은 rib가 설치되어 지지를 하고 있다. 하지만 본 해석에서는 주요 유동흐름에 대한 영향이 작을 것으로 보고 생략하였다. 본 연구에서는 서지가 발생하는 유량을 다음과 같은 수렴조건에 의하여 마지막으로 수렴하는 유량지점으로 정의하였다. 수치오차(residual)는 10^{-4} 이하이며 입출구의 상대적인 유량오차가 0.2%이하일 경우로 수렴판단을 하였다.

4. 수치 해석 및 시험 결과 분석

효율저하없이 설계요구사항인 고압력비와 TR을 달성하기 위하여 설계변수 4가지 설계변수(Upstream slot position, Inlet pipe slope, Downstream slot position and width)에 대해 해석을 부분적 실험계획법에 따라 수행하였다. 설계변수 A~D에 대한 효율 민감도는 Fig. 9에 나타내었으며 B, C, D의 효과가 A에 비해 큰 것으로 나타났다. 최적의 설계변수는 Fig. 10에서와 같이 A=1.0, B=-1.0, C=-1.0, D=0.76으로 나타났다. 설계변수에 따른 8가지 경우와 최적화된 설계변수에서의 해석결과를 압력비와 효율에 대하여 Fig. 11, Fig. 12에 비교하여 나타내었다. Bleed slot이 없는 경우가

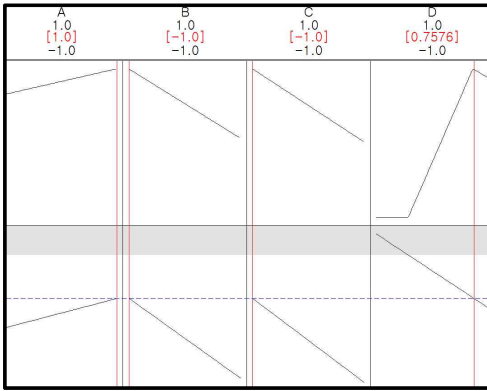


Fig. 10 Determination of optimum design condition

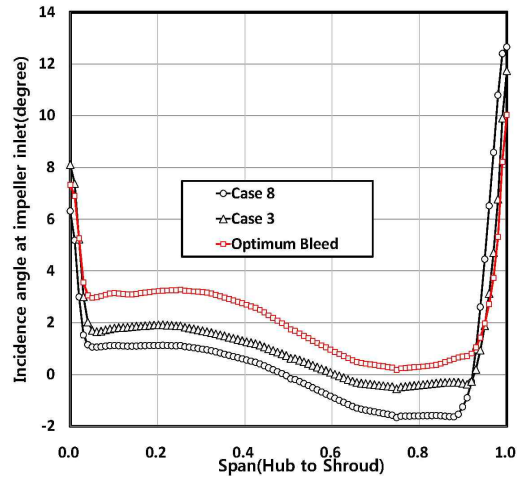


Fig. 13 Comparison of incidence angle for different choke flow cases

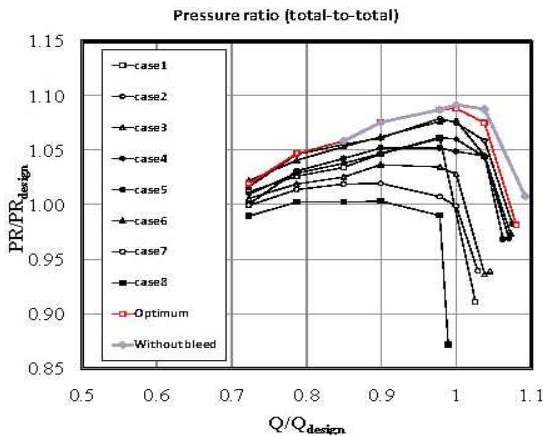


Fig. 11 Comparison of performance characteristics (total to total pressure ratio)

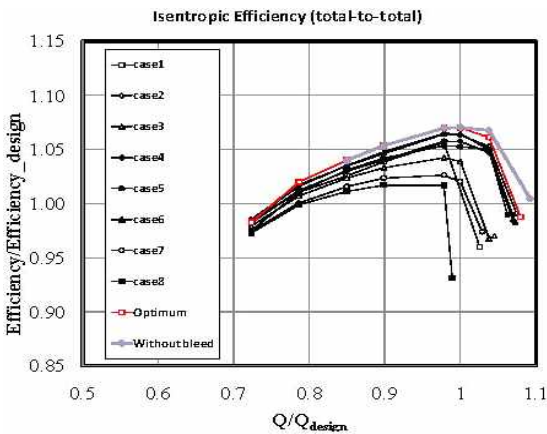


Fig. 12 Comparison of performance characteristics (total to total efficiency)

운전영역 전체범위에 걸쳐서 가장 높은 효율을 보이고 있는 것으로 나타났다. 하지만 0.85 Q_{design} 의 유량에서 스톨이 발생하여 TR은 15%에 불과하다. 하지만 최적 설계변수의 조건에서는 효율은 bleed slot없는 경우와 거의 동일하면서도 TR은 28%로 증가되었다. 설계변수에 관계없이 TR이 모두

동일한 이유는 0.72 Q_{design} 보다 조금 더 낮은 유량에서 모두 해석상 수렴기준인 입출구 유량오차 2%를 모두 초과했기 때문이며 차이가 나더라도 아주 미세한 유량차이를 나타낼 것으로 파악되었다. 흥미로운 사실은 설계변수에 따라 초킹 유량이 달라진다는 것이다. 이는 인두서 입구에서의 재순환 유동으로 인해 유로폐쇄(blockage)효과가 달라진다는 것을 의미하며 Fig. 13에서 영각분포를 세 가지 대표적인 경우에 대해 비교분석하였다. 최적의 설계 변수에서 유로폐쇄 효과가 가장 작게 나타나면서 인두서 입구의 영각이 (+)방향으로 커지고 있으며 최대 초킹 유량이 가장 크다는 것을 확인할 수 있다.

위 결과로부터 TR을 향상시키기 위해 다양한 slot의 설계 변수에 따른 민감도를 분석해 본 결과 아래 4가지의 결과를 도출하였다. 1) Fig. 9, 10에서와 같이 임펠러 입구의 유입되는 케이싱에서의 경사각 유무에 따른 해석비교를 해 본 결과, 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 임펠러 입구 상류에서 유동을 안내하는 케이싱의 경사각에 대한 변수는 무시할 수 있다. 2) 임펠러 앞전(leading edge)을 기준으로 하류에 있는 slot의 위치가 앞전에 가까울수록 효율과 압력비가 증가하는 경향을 보이고 있다(case2>case5, case 6>case7 참조). 이 위치는 유동속도가 가장 빠른 임펠러 목(throat)위치보다 약간 앞에 slot이 위치할 때이다. 3) 인두서에 위치한 slot폭이 클수록 효율과 압력비가 증가하고 있다.(case5>case7, case3>case8 참조) 하지만 재순환 되는 유량과 slot의 면적과는 적절한 속도 또는 비율이 있을 것으로 판단된다. 4) 임펠러 상류에 위치한 slot이 앞전으로부터 멀리 위치할수록 효율과 압력비가 높게 나타났다. 즉, 재순환 유동형태가 부드럽게 형성되기 위해서는 상류의 slot의 위치와 폭은 충분히 넓어야 임펠러 입구에서의 유동손실을 최소화함을 알 수 있다. 위의 결과를 정리하면, 임펠러 입구 케이싱의 경사각과 인두서 하류 slot의 폭은 다른 설계변수에 비해 중요하지 않지만 slot의 위치가 임펠러 목의 위치에

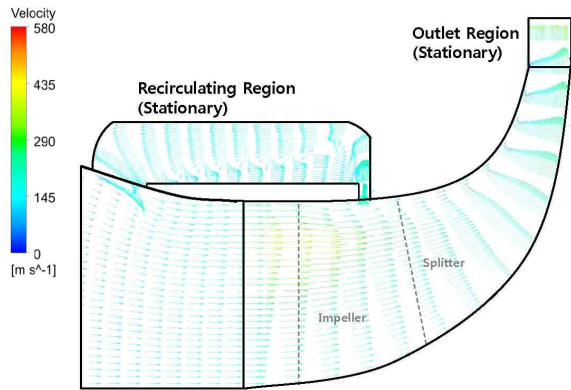
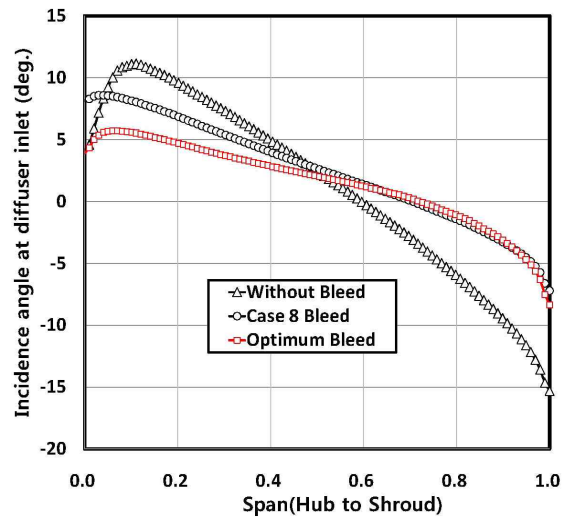


Fig. 14 Velocity vector at the mid-section with bleed slot casing (optimum case, at $Q/Q_{design}=0.85$)



(a) meridional velocity at impeller inlet

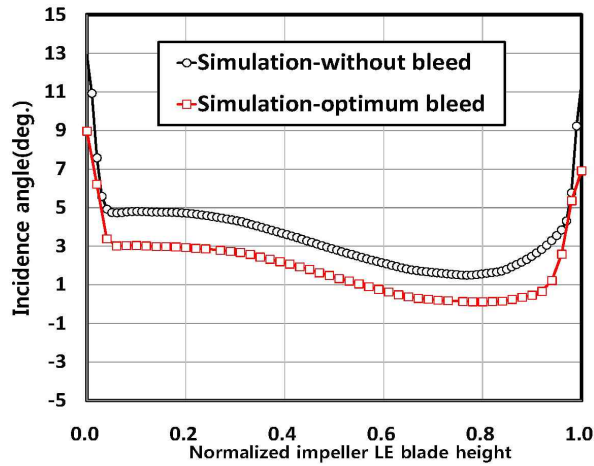
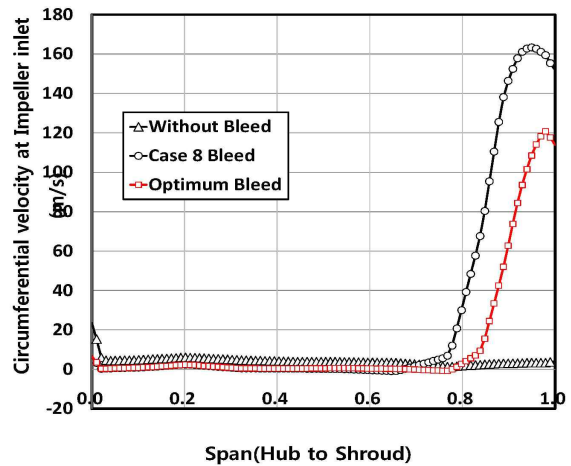


Fig. 15 Impeller inlet incidence angle at near surge flow



(b) circumferential velocity at impeller inlet

가까울수록 TR을 증가시킨다는 사실을 확인하였다.

Fig. 14는 최적화된 설계형상일 때, $0.85 Q_{design}$ 유량(스톨 근처)에서 해석결과이다. Fig. 5에서 나타났던 재순환 유동은 사라졌다. 이로 인하여 또한, Fig. 15에서와 같이 임펠러 입구에서의 영각은 3도 이내로 줄어들게 되었고 이는 효율과 압력비를 향상시키는 원인이 된다.

Fig. 16의 (a), (b), (c)는 slot이 없는 경우의 서지근처 유량($0.85 Q_{design}$)과 동일한 유량에서 압력비가 가장 낮게 평가된 case 8과 최적의 slot이 있을 경우에 대해서 임펠러 입구에서의 자오면 속도와 원주방향속도 성분 및 디퓨저 입구에서의 영각을 보여주고 있다. (a)에서 자오면 속도크기를 살펴보면 최적의 slot이 있는 경우에는, case 8과 달리, 임펠러 팁 근처에서 속도강하 후 회복현상이 나타나는 불안정한 유동형태는 없다. (b)는 원주방향 속도를 보여주고 있으며 slot이 없는 경우는 영이지만 최적화 된 형상일수록 슈라우드 면 부근에서 속도크기는 줄어드는 경향을 보여준다. 하지만 스펀의 약 70%이상에서 급격하게 커지는 재순환 영역에서의 속도크기는 $100 \sim 160$ m/s에 달하고 있으며 자오면 평균 속

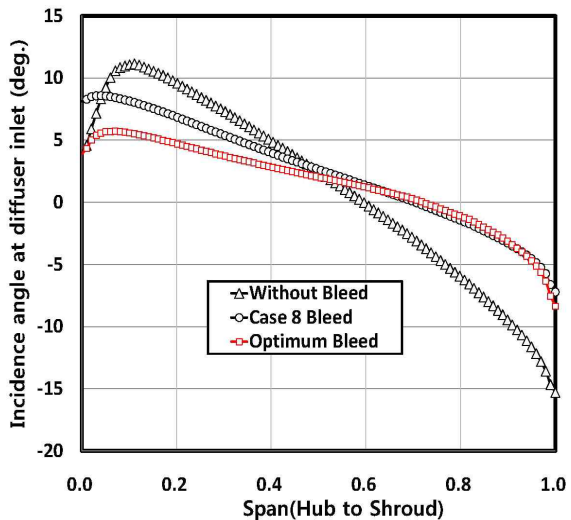


Fig. 16 Comparison of velocity and incidence angle at with/without bleed

도 성분과 비슷한 것을 볼 때 고속유동이 국부적으로 매우 불안정하게 형성되어 있으며 TR을 증가시키기 위해서는 원주

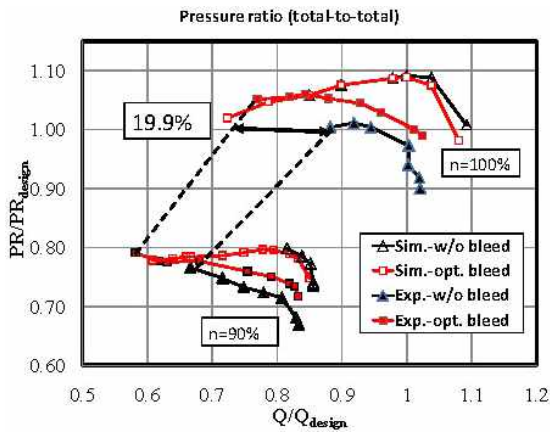


Fig. 17 Comparison of pressure ratio with/without bleed

방향 속도크기가 최소화되도록 설계가 수행되어야 함을 알 수 있다. (c)는 디퓨저 입구에서의 영각을 나타낸다. 디퓨저 입구의 영각이 약 -5° 이상이면 디퓨저 박리 및 손실이 급격하게 커져서 스톨이 발생하는 것으로 잘 알려져 있다. slot이 없는 경우에는 디퓨저 스펠방향으로 영각 분포가 최대 25° 이며 스펠 80%이상에서는 급격한 유동박리(손실)가 발생하는 것으로 예측된다. 하지만 slot이 있는 경우에는 상대적으로 양호한 영각상태를 나타내며 특히 최적화된 slot이 있는 경우에는 스펠방향으로 $\pm 5^\circ$ 도이내의 영각을 보이고 있으며 따라서 TR이 가장 넓은 것으로 평가 되었다. Fig. 17에서는 slot이 없는 경우와 최적화된 slot에서의 회전수 90%, 100%에 대하여 해석 및 시험결과를 비교하였다. slot이 없는 경우는 해석과 시험오차가 압력비를 기준으로 최대 12%로 크게 나타났으나 slot있는 경우는 상대적으로 작게 나타났다. 또한 해석에 비해 시험결과는 유량이 평균적으로 약 6% 적게 나오는 것으로 파악되었다. (100% 회전수 기준)

시험결과로부터 slot이 없는 경우에서는 설계 압력비를 기준으로 TR이 6.6%에 불과했는데 최적의 slot을 적용한 경우는 TR이 26.5%로써 19.9% 대폭 증가되었고 압력비는 설계 점에서 3.8%향상되었다. 일반적인 설계에서는 TR을 향상시키기 위해 디퓨저 설계 각도를 작게 하지만 압력비의 감소(효율 감소)가 불가피해진다. 하지만 본 연구에서와 같이 디퓨저 각도를 수정하지 않더라도 최적의 bleed slot 케이싱 설계를 도입함으로써 TR 및 압력비를 동시에 증가시킬 수 있다는 사실을 확인하였다. 하지만 유동해석 결과에서는 최적의 bleed slot 설계변수를 적용한 경우에서도 bleed slot이 없는 경우보다 높은 압력 및 효율을 달성하지는 못하였으므로 이에 대한 보완 연구는 더 필요하다.

5. 결 론

최근 강화된 선박용 디젤엔진의 NOx규제를 만족하기 위

하여 4.6이상의 고압력비 및 효율 저하없는 높은 TR를 가지도록 원심 압축기의 bleed slot케이싱에 대한 설계를 부분적 실험계획법을 이용한 유동해석을 수행하였으며 최적화된 형상에 대해 시험하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 인듀서 하류 slot의 위치가 임펠러 목의 위치에 가까울수록 압력비와 효율은 증가하는 경향을 나타내었으나 임펠러 입구 케이싱의 경사각 영향은 미미하였다.
- 2) 인듀서 하류 slot의 폭이 크고 상류 slot의 위치가 임펠러 leading edge로부터 멀리 위치해 있을수록 slot의 재순환 유동이 주 유동의 흐름을 방해하지 않음으로써 압력비와 효율이 증가되었다.
- 3) 시험결과로부터 slot이 없는 경우에는 설계 압력비를 기준으로 TR이 6.6%에 불과했지만 최적의 slot을 적용한 경우는 TR이 26.5%로써 19.9% 대폭 증가되었고 압력비는 설계점에서 3.8%향상되었다. 따라서 TR을 증가시키는 일반적인 설계방법인 디퓨저 각도의 수정설계없이 최적의 bleed slot 케이싱 설계를 적용함으로써 TR 및 압력비를 동시에 증가시킬 수 있다는 사실을 확인하였다.

References

- (1) Sakaguchi, Daisaku, and Nagoshi., 2010, "Effect of Guide Vane in Ring Groove Arrangement for a Small Turbocharger," AIP Conference Proceedings, 1225, pp. 47~54.
- (2) Hunziker, R., Dickmann, H-P, and Emmrich, R., 2001, "Numerical and experimental investigation of a Centrifugal Compressor with an Inducer Casing Bleed System," IMechE 2001, A02901.
- (3) Park, C. Y., Choi, Y. S., Lee, K. Y. and Yoon, J. Y., 2011, "Numerical Investigation of Ring Groove Effect in a Centrifugal Compressor," Vol. 14, No. 2, KFMA.
- (4) Park, C. Y., Choi, Y. S., Lee, K. Y. and Yoon, J. Y., 2012, "Numerical Study on the Range Enhancement of a Centrifugal Compressor with a Ring Groove Effect," Vol. 26, No. 5, JMST.
- (5) Tamaki, H., Nakao, H. and Aizawa, T., 2003, "Experimental Study on Surge Inception in a Centrifugal Compressor," The 7th AICFM, No. 50021.
- (6) Tamaki, H., Unno, M., Kawakubo, T. and Hirata, Y., 2010, "Aerodynamic Design of Centrifugal Compressor for AT14 Turbocharger", Vol. 43, No. 2, IHI Engineering Review.
- (7) ASME PTC 10-1997, "Performance Test Code on Compressors and Exhausters".