

# R134a 터보냉동기용 원심압축기의 성능특성에 관한 수치해석적 연구

이경용\* · 최영석\*\* · 박운진\*\*\*

## Numerical Study on the Performance Characteristics of a Centrifugal Compressor for a R134a Turbo-Chiller

Kyoung-Yong Lee\*, Young-Seok Choi\*\*, Woon-Jean Park\*\*\*

*Key Words:* R134a refrigerant (R134a 냉매), Turbo-chiller (터보냉동기), Centrifugal compressor (원심 압축기), CFD (전산유체역학)

### ABSTRACT

In this study, the overall performance and the local flow field of the centrifugal compressor with the refrigerant HFC-134a were numerically studied using CFX-TASCflow. The thermodynamic and transport properties of the refrigerant gas were modeled by REFPROP which is NIST refrigerant properties database. The impacts of a grid quality, discretization scheme, turbulent model and interaction between a impeller and a cascade diffuser were analyzed comparatively. The results were compared with experimental data and 1-D design results using COMPAL and agreed well with others. The numerical method and data obtained in this study can be applied to the design and modification of centrifugal compressors with real gases

### 1. 서론

냉매 압축식 냉동기의 일종으로 대형 빌딩의 공조용 및 산업 설비의 온도 제어용으로 사용되는 터보냉동기에서 원심 압축기는 증발기에서 냉방대상의 냉방 부하를 흡수한 냉매의 에너지 준위를 높이는 역할을 한다. 이러한 원심 압축기의 작동유체로 사용되는 냉매는 환경오염 및 오존층 파괴문제로 인해 중전의 프레온계 냉매에서 HCFC계열의 R123과 오존층 파괴지수가 0인 HFC계 냉매 R134a로 대체되고 있다.<sup>(1)</sup>

일반적인 유체기계 설계에 있어서 경험식에 의존한 1-D와 2-D 설계방법은 유체기계의 일반적인 형상과 설계변수 등을 제공한다. 여기서 얻어진 형상정보를 바탕으로 CFD를 이용하여 유체기계의 3차원 점성유동 해석을 수행하며 해석 결과는 효율의 최대화를 위한 형상과 설계변수의 조정 및 여러 경험식의 합리적 조정 등에 사용된다. 현재까지 공기 원심 압축기에 대한 실험 및 수치해석적 연구는 꾸준히 수행되어 왔으나 HFC계열의 R134a를 냉매로 하는 원심 압축기의 연구는 고압의 냉동사이클과 냉매 물성치 고려의 문제점으로 인해 그 사례가 많지 않은 실정이다.

본 연구의 목적은 R134a 냉매 압축기 임펠러 및 디퓨저의 유동장을 수치해석적으로 연구하고 그 결과를 기존 설계 결과와 비교 분석하여 압축기 설계의 타당성을 검증하고 압축기 성능에 관해 실험 결과와 비교

\* 한국기술교육대학교 대학원, 한국생산기술연구원

\*\* 한국생산기술연구원 청정설계기술팀

\*\*\* 한국기술교육대학교 기계공학부

책임저자 E-mail : yschoi@kitech.re.kr

해 보기 위한 것이다. 특히 이상기체 상태 방정식을 적용할 수 없는 실제 냉매의 물성치를 고려하고, 회전하는 임펠러와 정지해 있는 디퓨저를 동시에 해석하기 위해 MFR (Multiple Frame of Reference) 시뮬레이션 기법을 도입하며, 난류모델과 이산화 기법의 변화에 따른 수치해석적인 타당성을 검증하는 것이다. 또한 앞으로 보다 고효율 터보 냉동기의 개발 및 설계 변경을 위해 CFD를 활용하는 방법의 가능성을 확인해 보고자 한다.

본 연구에 사용된 압축기는 상용 800RT급 냉동기의 원심 압축기와 동일한 유량계수, 양정계수를 갖는 실험용 축소 모델 (scaled model)이며 임펠러 직경은  $\phi 215$ 이다.

## 2. 유동해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 터보기계의 유동해석에 주로 사용되는 압축성 난류유동의 해석을 위한 3차원 평균 Navier-Stokes 방정식을 적용하고 지배방정식을 유한체적법에 의해 이산화하여 해석하는 상용 프로그램 CFX-TASCflow를 사용하였다.

### 2.2 이산화 기법

본 연구에 사용된 이산화 기법은 CFX-TASCflow에서 제공하는 대류항의 이산화 기법 중 upwind differencing scheme (UDS)과 보정치 (PAC; physical advection correction)를 도입하고 이것을 적용한 skew upstream differencing scheme (SUDS)중에서 상류값을 주위의 격자로부터 내삽하는 수정된 linear profile SUDS (Modified LPS)를 각각 사용하였다.

### 2.3 난류모델

CFX-TASCflow에서 제공하는 난류모델 중 유동박리와 재부착의 해석에 있어 유용하다고 알려진 RNG  $k-\epsilon$  난류모델과 층류저층의  $\omega$ 에 대한 수학적 표현이 가능하여 벽 근처에서 복잡한 감쇄함수가 필요 없는  $k-\omega$  난류모델을 사용하여 수치해석에서 난류모델의 영향을 알아보았다.

## 2.4 경계조건

본 연구에서는 유동이 정상적이고 주기적이라 가정하여 하나의 날개영역만을 해석하였고 임펠러와 디퓨저 사이의 경계면은 MFR 기법 중 stage averaging 방법과 frozen rotor 방법을 사용하여 해석결과를 비교하였다.

계산 영역의 입구에는 절대 좌표계의 전압이 주어지고, 출구에는 정압 조건을 주었으며, 실제로 존재하는 익단 간극은 무시하였다. 날개표면과 허브는 회전하는 상대좌표계에 대하여 고정된 벽으로, 베인이 없는 디퓨저 (vaneless diffuser, VLD)부분과 캐스캐이드 디퓨저 (cascade diffuser, CD) 및 케이스의 벽은 절대 좌표계에 대하여 고정된 벽으로 처리하였다.

## 2.5 냉매 물성치 고려

실제기체를 냉매로 사용할 경우 물성치 고려의 문제점을 해결하기 위해 R134a의 냉매 물성치는 NIST의 물성치 프로그램인 REFPROP v.6.01을 사용하여 구하고 CFX-TASCflow의 2-D 데이터 베이스로 활용하였다.<sup>(2)</sup>

## 2.6 형상

Fig. 1에서 압축기의 일반적인 기하학적 형상과 변수를 제시하고 각 구간을 정의하였다. ②는 임펠러 출구, ③은 CD 입구, ⑤는 CD 출구, 그리고 ⑥은 VLD 출구이며 각 영역에서의 해석결과를 1-D 성능예측 프로그램인 COMPAL<sup>(3)</sup> 결과와 비교해 보았고 ⑥위치에서

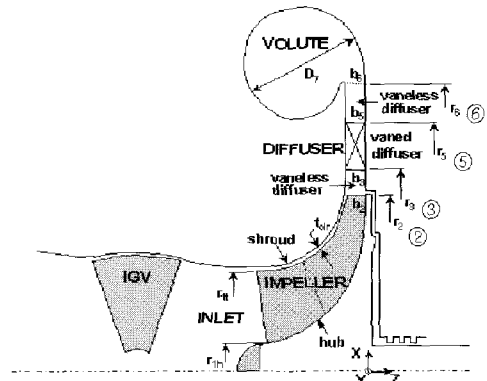


Fig. 1 Schematic of a centrifugal compressor

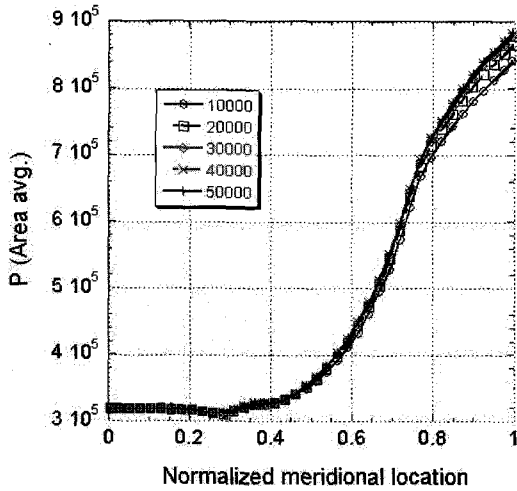


Fig. 2 Comparison of averaged pressure distributions with different grids

실험결과와 비교하였다.<sup>(4)</sup> 해석에서는 IGV와 벌류트를 제외하였고 해석의 편의를 위해 VLD 출구 이후에 반경방향으로 해석영역을 어느 정도 확장하였다. 임펠러는 주날개 (main blade)와 보조날개 (splitter)가 각각 11개이고 CD의 길은 10개이며 회전속도는 17408 rpm이다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

#### 3.1 계산 격자의 선정

본 유동해석을 수행할 때 적절한 계산 격자수의 선정을 위해 우선 격자계에 대한 의존성을 검사하였다. Fig. 2는 계산 영역의 입구에서부터 출구까지의 면적 평균된 정압 변화를 나타내었는데 여기서 격자수가 약 3만개 이상이 되면 격자수에 따라 변화가 없다는 것을 확인하였다. 이 결과를 통해 임펠러 만의 해석일 경우 약 3만개, CD를 포함한 유동 해석의 경우 약 6만개의 격자계를 사용하였으며 해석에 사용된 격자계를 Fig. 3에 나타내었다.

#### 3.2 헤드 및 효율정의

유동해석을 수행한 후 압축기의 성능을 나타낼 때 필요한 폴리트로픽 헤드 및 효율 아래와 같이 정의하였다.<sup>(5)</sup>

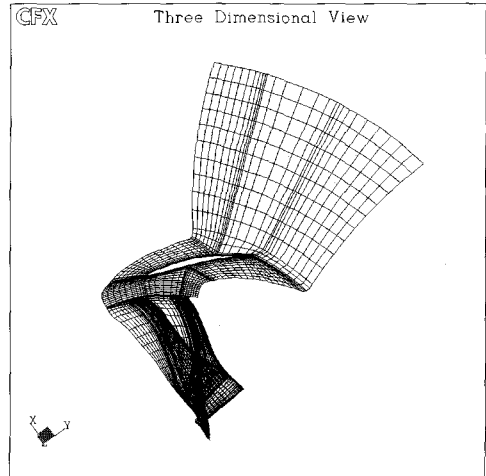


Fig. 3 3-dimensional grid system of computational domain

폴리트로픽 헤드 (total to total):

$$gH_p = h_{td} - h_{ti} - \frac{(s_d - s_i)(T_{td} - T_{ti})}{\ln(T_{td}/T_{ti})} \quad (1)$$

폴리트로픽 효율 (total to total):

$$\eta_p = \frac{gH_p}{h_{td} - h_{ti}} \quad (2)$$

여기서 폴리트로픽 헤드는 Mallen-Saville 모델을 적용하였다. 식 (1)과 식 (2)에서 H는 양정, h는 엔탈피, s는 엔트로피, T는 온도를 각각 나타내며 하첨자 t는 total, i는 입구조건, d는 출구조건을 나타낸다.

#### 3.3 해석 인자 검증

Fig. 4에는 이산화 기법, 난류모델 및 MFR 기법의 변화에 따른 임펠러 출구 정압의 해석결과 차이를 나타내었다. 비교적 수렴성이 우수한 RNG  $\kappa-\epsilon$  난류모델, UDS 및 stage averaging 방법을 기본으로 탈설계점 해석을 수행하였으며, 설계점 근처 ( $\dot{m}=9.39$  kg/s)에서 해석변수에 따른 결과의 차이를 살펴보았다.  $\kappa-\omega$  난류모델의 경우  $\kappa-\epsilon$  난류모델에 비해 동일 유량 기준으로 약 1.3% 정도 크게 예측하였고 frozen rotor의 경우 stage averaging 방법과 임펠러 출구 정압은 큰 차이

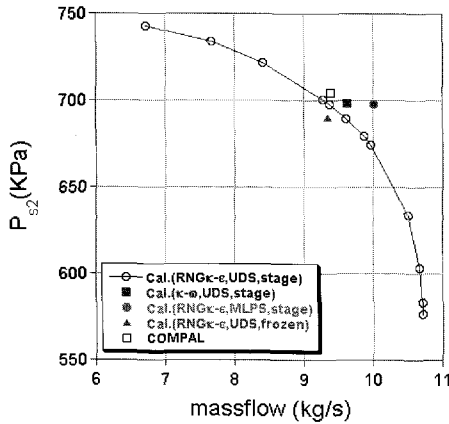


Fig. 4 Effect of simulation parameter

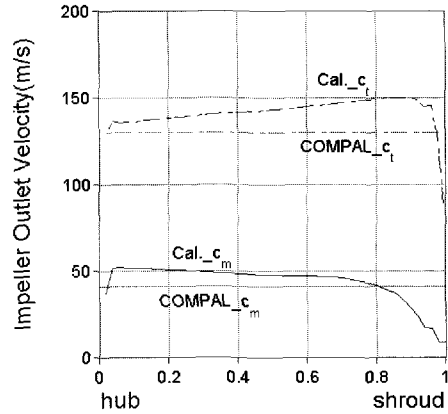


Fig. 6 Velocity profile at impeller outlet along hub to shroud

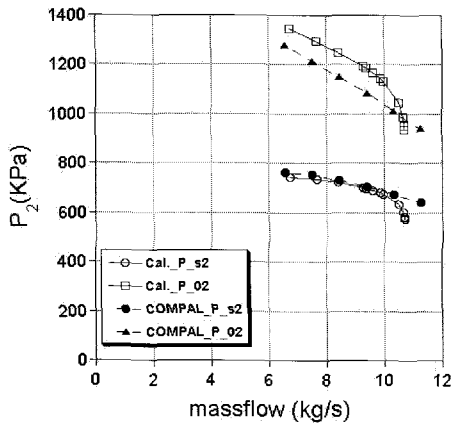


Fig. 5 Comparison of pressure at impeller outlet

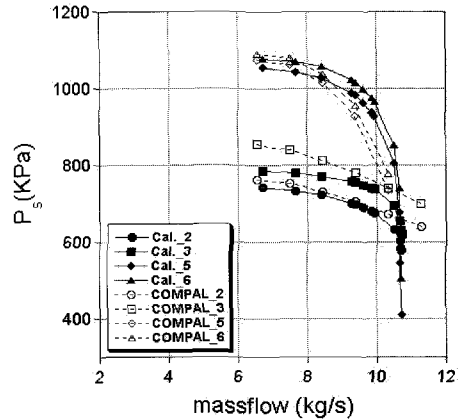


Fig. 7 Static pressure at simulation region

가 없었으며 동일 유량 기준으로 약 1% 정도 작게 예측하였다. MLPS 이산화기법을 사용한 경우 약 4% 정도 크게 예측하고 있어 다른 변수에 비해 비교적 큰 차이를 보였다.

### 3.4 임펠러 출구 해석 결과

임펠러 출구에서의 유동특성에 대한 분석은 임펠러만의 성능 확인을 위해서는 물론 이후 VLD나 CD의 효과적인 설계를 위해서도 매우 중요하다. 해석 결과의 타당성을 비교하기 위해 압축기 설계시 사용한 1-D 설계 및 성능예측 프로그램인 COMPAL의 결과와 비교 검토하였다. Fig. 5에 임펠러 출구에서 질량유량의 변화에 따른 평균 정압과 전압 분포를 나타내었

다. 설계점에서 정압은 COMPAL 결과와 비슷하나 전압은 차이를 보이고 있다. 이는 임펠러 출구에서 속도 성분을 다르게 예측하기 때문이며 그 차이를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서  $c_m$ 은 자오면 속도성분이고  $c_t$ 는 회전방향 속도성분이며 평균된 COMPAL 결과와 비교해보면 거의 일치하는  $c_m$ 과 달리  $c_t$ 는 해석 결과가 더 크게 예측하고 있다. 이러한 출구 속도성분의 차이는 설계시 중요한 변수인 미끄럼 계수의 적용과 관련이 있다. 임펠러 출구의 속도성분은 CD의 설계에도 영향을 미치는 중요한 변수 중의 하나이다.

임펠러 출구 해석의 결과를 통해 설계시 요구되었던 성능 특성을 비교적 잘 예측하고 있으며 고유량에서는 압력이 감소할 때 더 이상 유량이 증가하지 않는

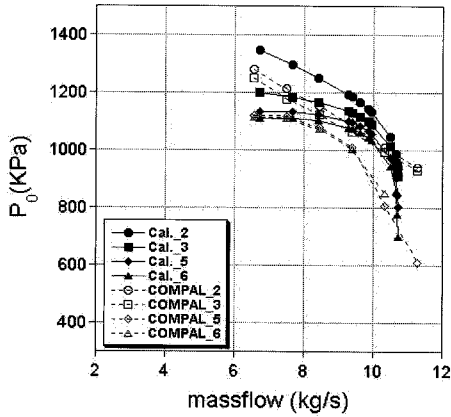


Fig. 8 Total pressure at simulation region

초크 현상도 잘 예측하고 있다. 해석결과와 COMPAL 결과가 임펠러 출구에서의 전압에서 차이를 보이고 있는데, 향후 효율 향상을 위한 설계에서는 속도성분의 차이에 관한 원인 분석 및 수정이 필요하다.

### 3.5 디퓨저 출구 해석 결과

Fig. 7에서는 임펠러 출구 이후의 각 위치에서 정압 평균을 나타내었다. 정압의 경우 3차원 유동해석은 임펠러 출구부터 CD 입구 구간 (②-③)까지의 정압상승이 COMPAL 설계 결과에 비해 작게 예측되고 있는데 그 이유는 앞서 언급한 임펠러 출구에서 속도성분의 차이로 판단되며 그 이후 CD 구간 (③-⑤)에서 압력회복이 크게 일어나고 VLD 구간 (⑤-⑥)에서는 이미 유동장의 속도 성분이 대부분 압력으로 회복이 된 상태이므로 회복되는 압력의 양이 적으며 이러한 경향은 COMPAL의 결과와 유사하다.

Fig. 8은 임펠러 출구 이후의 전압평균을 나타내었다. ②-③구간, 즉 임펠러와 디퓨저 사이의 구간에서 해석결과가 COMPAL 결과에 비해 특히 저유량 영역에서 비교적 큰 전압 손실을 보이고 있다. ③-⑤구간,

즉 CD구간에서는 고유량으로 갈수록 COMPAL 결과가 큰 전압 손실을 보이고 있다. 본 해석결과를 바탕으로 설계시 유용하게 사용되고 있는 1-D 설계 프로그램인 COMPAL의 여러 입력변수에 대한 다양한 검토가 가능하리라 판단된다.

Fig. 9는 VLD 출구 (⑥)에서의 무차원 total to static 폴리트로픽 헤드와 효율을 COMPAL 결과와 비교하였고 헤드 비교에서 실험결과를 포함하였다. Fig. 9의 비

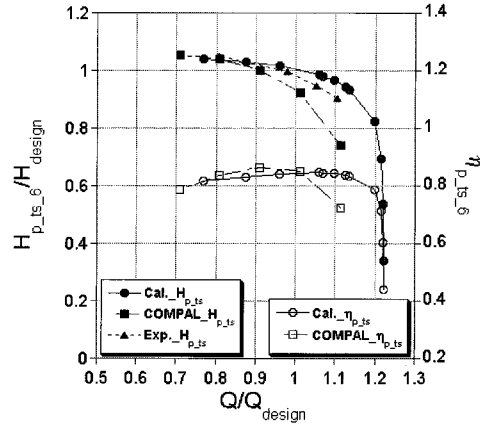


Fig. 9 Comparison of non-dimensional polytropic head and efficiency at VLD outlet (⑥)

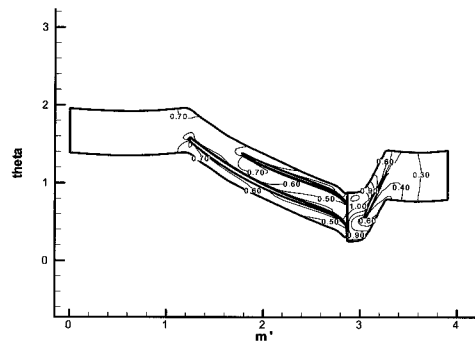


Fig. 10 Distribution of relative MACH No. in mid span of blade to blade plane at BEP

교에서 설계점 이후 고유량으로 갈수록 해석결과가 실험 결과보다 헤드를 크게 예측하고 있는데 실험 결과의 경우 벌류트 이후에서 측정된 결과이며 3차원 유동 해석을 수행하는데 있어 무시되었던 익단 간극의 영향도 포함하고 있어 차이를 보인다고 판단된다. 향후 익단간극의 영향을 살펴보는 것은 중요한 연구과제 중 하나이다.

### 3.6 유동장 해석 결과

압축기의 3차원 유동해석은 전체적인 성능특성 뿐만 아니라 압축기 내부 유동을 연구하는데도 효과적이다. Fig. 10과 Fig. 11은 설계점 (BEP)과 초크 유량에서 날개와 날개 사이 (blade to blade) 중간 스패면 (mid span)에서의 질량 평균된 상대 마하수 분포를 나타내

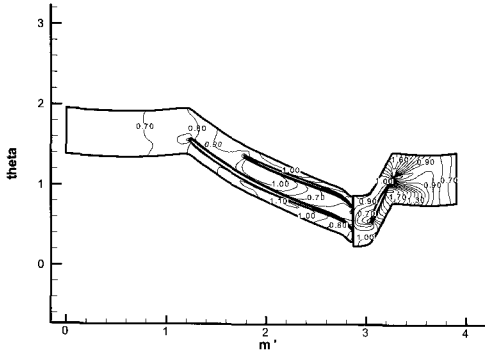


Fig. 11 Distribution of relative MACH No. in mid span of blade to blade plane at choked

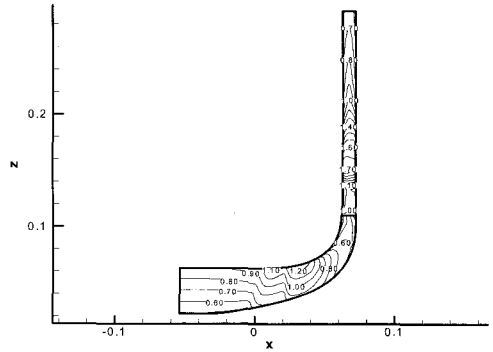


Fig. 13 Distribution of relative MACH No. in average flow plane of meridional plane at choked

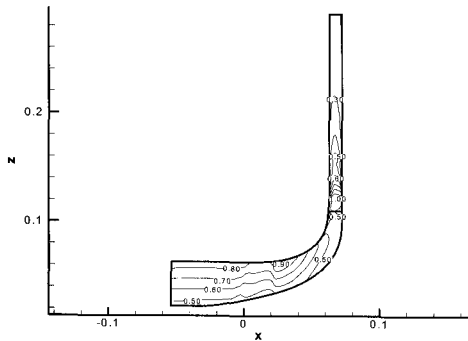


Fig. 12 Distribution of relative MACH No. in average flow plane of meridional plane at BEP

있고 Fig. 12와 Fig. 13은 자오면의 평균 유동면에서 질량 평균된 상대 마하수 분포를 나타내었다. 결과를 비교해 보면 임펠러 출구부에서 상대마하수가 증가한 Fig. 10과 달리 초크 유량으로 판단되는 Fig. 11의 경우 보조날개와 CD 이후에 상대마하수가 증가하는 경향을 보이고 Fig. 12와 Fig. 13의 비교에서는 초크 유량으로 판단되는 Fig. 13에서 임펠러의 보조날개 위치의 쉬라우드면과 CD 이후에 상대마하수가 증가하고 있어 초크 특성을 잘 나타내고 있다.

#### 4. 결론

지금까지 터보냉동기 냉매 압축기의 성능 특성을 알아보기 위해 임펠러 및 디퓨저의 유동장을 해석하고 그 결과를 실험 결과 및 기존 설계 결과와 비교 분석하여 기존의 설계 타당성을 유동해석으로 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이상기체 상태 방정식을 적용할 수 없는 실제 기체의 물성치를 고려한 압축기 유동해석을 수행하여 유동 및 성능 특성을 분석하였으며 그 결과를 실험 결과 및 1-D 설계 결과와 비교하여 유동해석의 가능성을 확인하였고 향후 고효율의 터보냉동기의 개발 및 설계 변경을 위해 CFD를 활용하는 방법의 가능성을 확인하였다.
- 2) 압축기의 3차원 유동해석을 수행하는데 있어 해석 결과에 영향을 미칠 수 있는 해석인자를 임펠러와 디퓨저 사이의 경계조건 (MFR)과 난류모델, 그리고 이산화 기법 등으로 정의하고 각 인자의 변화에 따른 영향을 고려하여 효과적인 해석 방법을 제시하였다.

#### 후 기

본 논문은 LG전선 기계연구소와 한국생산기술연구원의 공동연구 결과의 일부를 수록한 내용입니다. 연구에 도움을 주신 분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 이용덕, 정진희, 이현구, 윤필현, 김길영, 2000, "R134a용 터보냉동기의 원심압축기 개발 Part1: 원심압축기 설계," 유체기계저널, 제3권 제4호, pp.44~51
- (2) AEA Technology, 2001, CFX-TASCflow User Documentation

- (3) ConceptsNREC, COMPAL Manual v. 7.3. 발표대회 논문집, pp.718~723
- (4) 김길영, 이창중, 이현구, 2003, “터보냉동기용 압축기의 성능에 대한 실험적 연구 Part 1: 성능 측정 시 고려할 인자들”, 2003 대한설비공학회 하계학술 (5) Aungier, Ronald H., 2000, Centrifugal compressors : A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis, ASME press. pp.18