

R134a 터보냉동기용 원심압축기의 익단간극이 성능특성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

이경용* · 최영석** · 박운진***

Numerical Study on Tip Clearance Effect on 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), Tip leakage flow (간극누설유동), Tip clearance (익단간극), CFD (전산유체역학)

ABSTRACT

In this study, the overall performance and the effect of the tip leakage flow of the centrifugal compressor with a refrigerant HFC-134a were numerically studied using CFX-TASCflow. To study the effect of the tip leakage flow, the numerical study of the overall performance of HFC-134a centrifugal compressor with a cascade diffuser was preceded and compared with the experimental result. Six different tip clearances were used to consider the influence of the tip clearance on the performance. The tip leakage flow was illustrated for qualitative discussion. The results obtained in this study can be applied to the determination of the cold clearance.

1. 서론

고속으로 회전하는 원심압축기에서는 원심력에 의한 응력증가로 인해 덮개가 없는 임펠러 (unshrouded impeller)가 주로 사용된다. 이 경우 임펠러의 익단 (tip)과 케이싱 사이에는 약간의 틈이 존재하는데 이것을 익단간극 (Tip Clearance, TC)이라고 한다. 익단간극으로 인해 발생하는 간극누설유동 (tip leakage flow)은 압

축기의 성능저하 및 효율감소의 원인으로 알려져 있다.

이런 간극누설유동에 관한 연구는 임펠러 내부의 간극누설유동에 따른 유동특성 연구와 손실 및 효율 예측을 위한 모델링에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 이러한 모델은 많은 경험적인 상수를 필요로 하게 되어 임펠러의 형상이 변할 때마다 다른 상수를 결정해 주어야 하는 단점이 발생한다⁽¹⁾. 또한 익단간극의 실험 및 수치해석적 연구에 있어 임펠러의 익단간극은 고정된 날개형상에 대해 쉬라우드 커버의 냉간 조립공차 (cold clearance)에 의해 결정되므로 동일한 조건을 모사하기 위해 익단간극의 영향을 제대로 반영할 수 있는 모델링에 대한 고려가 필요하며, 회전하는 임펠러의 원심력에 의해 익단간극이 변화하는 현

* 한국기술교육대학교 대학원, 한국생산기술연구원

** 한국생산기술연구원 에너지시스템팀

*** 한국기술교육대학교 기계공학부

책임저자 E-mail : yschoi@kitech.re.kr

상에 따른 오차를 고려해야 한다. 현재까지 공기 원심 압축기의 간극누설유동에 관한 실험 및 수치해석적 연구는 꾸준히 수행되어 왔으나 HFC계열의 R134a를 냉매로하는 원심 압축기의 연구는 고압의 냉동사이클과 냉매 물성치 고려의 문제점으로 인해 그 사례가 많지 않은 실정이다.

본 연구는 익단간극이 없는 R134a 냉매 압축기의 임펠러 및 디퓨저의 유동장에 관한 수치해석적 연구⁽²⁾를 바탕으로, 익단간극을 고려한 임펠러를 적용하여 임펠러 및 디퓨저의 유동장 및 성능특성에 대한 수치해석을 수행하여 간극누설유동이 임펠러 및 디퓨저의 내부 유동과 성능특성에 미치는 영향에 대해 살펴보고, 임펠러 설계 및 냉간 조립공차에 CFD 결과를 활용하는 방법의 가능성을 타진하였다.

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

2. 임펠러 모델 및 유동해석 방법

2.1 임펠러 모델

본 연구에서 익단간극의 영향에 대해 살펴보기 위해 익단간극이 없는 압축기에 사용된 임펠러와 캐스케이드 디퓨저 (Cascade Diffuser, CD)⁽²⁾를 동일하게 사용하였다. 임펠러의 익단간극은 실제 냉간 조립공차와 동일한 조건으로 해석하기 위해 날개 형상을 그대로 유지하면서 슈라우드를 조절하여 간극을 변화시켰다. Fig. 1은 자오면에서 본 임펠러의 형상을 보여준다. 간극은 임펠러의 선단에서 후단까지 균일한 분포를 가지며, 크기가 0.0, 0.2, 0.4 및 0.6 mm이 되도록 모델링하

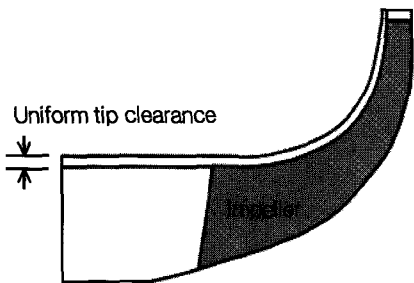


Fig. 1 Tip clearance uniformly distributed from the leading to trailing edge of the impeller

였다. 또한 간극이 0.3 및 0.5 mm의 경우를 설계점 근처 영역에 대해 추가로 해석하여, 냉간 조립공차 (0.3 mm)에 해당되는 범위의 경향을 분석하였다.

해석에서는 압축기의 IGV와 벌류트 (volute)를 제외하였고 해석의 편의를 위해 CD 이후 베인이 없는 디퓨저 (vaneless diffuser, VLD) 출구 이후에 반경방향으로 해석영역을 확장하였다. 임펠러의 주날개 (main blade)와 보조날개 (splitter)가 각각 11개이고 CD의 깃은 10개이며 회전속도는 17408 rpm이다.

2.2 유동해석 방법

본 연구에서는 터보기계의 유동해석에 주로 사용되는 상용 프로그램 CFX-TASCflow를 사용하였고 익단간극이 없는 임펠러의 수치해석을 통해 검증된 해석인자를 사용하였다. 해석에 사용된 이산화 기법은 upwind differencing scheme (UDS)이고 RNG $\kappa - \epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 유동에 관해 정상적이고 주기적이라는 가정을 통해 하나의 날개영역만을 해석하였고 임펠러와 디퓨저 사이의 경계는 stage averaging 방법을 사용하였다. 계산 영역의 입구에는 절대 좌표계의 전압과 전온도 조건을 부여하고 출구에는 정압 조건을 주었다. 날개표면과 허브는 회전하는 상대좌표계에 대하여 고정된 벽으로, VLD부분과 CD 및 케이싱의 벽은 절대좌표계에 대하여 고정된 벽으로 처리하였다. 작동유체로 사용되는 R134a의 냉매 물성치는 NIST의 물성치 프로그램인 REFPROP v.6.01을 사용하여 CFX-TASCflow의 2-D 데이터 베이스로 활용하였다⁽²⁾. 수치해석에 사용된 계산 격자는 CFX-TurboGrid를 사용하여 생성되었으며 Fig. 2에 나타내었다. 격자수는 격자제

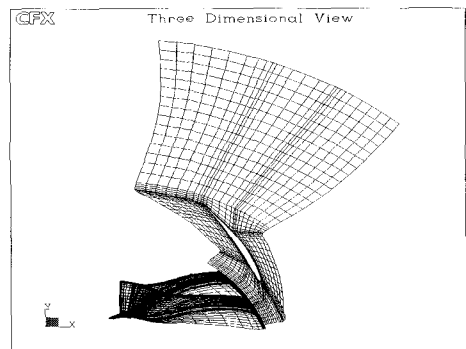


Fig. 2 Computational grid of the impeller

의존도 테스트를 통해 임펠러의 경우 5만개, 디퓨저의 경우 3만개로 선정하였다. 간극에서의 유동은 점성에 의한 효과가 적다고 알려져 있어⁽¹⁾ 상대적으로 적은 수의 격자로 해석이 가능하며, 본 연구에서는 4개의 격자를 사용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 헤드 및 효율정의

유동해석을 수행한 후 임펠러 출구와 VLD 출구⁽²⁾에서 성능 특성의 정량적인 비교를 위해 폴리트로픽 헤드 및 효율을 아래와 같이 정의 하였다⁽³⁾.

폴리트로픽 헤드 (total to total, tt):

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

폴리트로픽 효율 (total to total, tt):

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

여기서 폴리트로픽 헤드는 Mallen-Saville model을 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.

3.2. 임펠러 내부 유동특성

임펠러의 익단간극에 의한 간극누설유동을 정성적으로 살펴보기 위해 익단간극이 없는 경우 및 0.6 mm인 경우 주날개와 보조날개 선단의 흡입면을 통과하는 유선 분포를 Figs. 3과 4에 각각 나타내었다.

Fig. 3은 익단간극이 0인 경우로 유선의 분포는 누설유동 없이 유로를 따라 시계방향으로 회전하며 하류로 흐르는 양상을 보인다. 익단간극이 0.6 mm인 경우 주날개와 보조날개 선단의 흡입면을 통과하는 유선 분포를 Fig. 4(a)에 나타내었고, 주날개의 간극을 통과한 유선의 분포를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 앞의 익단간극이 없는 경우와 달리 날개선단의 익단 부근에서 와류가 형성되고, 한번 누설된 유동은 다음 날개에

서 다시 누설되어 내부유동에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 향후 임펠러 내부 유동 특성에 관한 정확한 분석을 위해 이차유동에 관한 연구가 필요하다고 판단 된다.

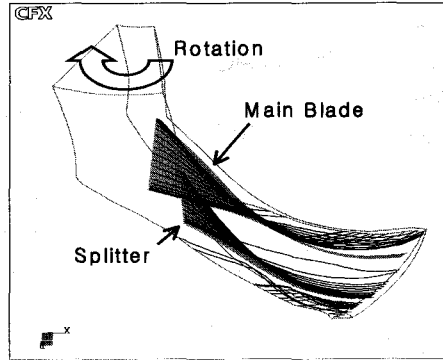
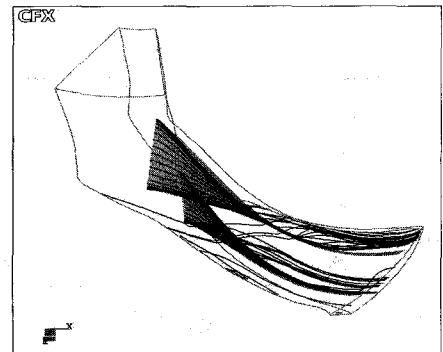
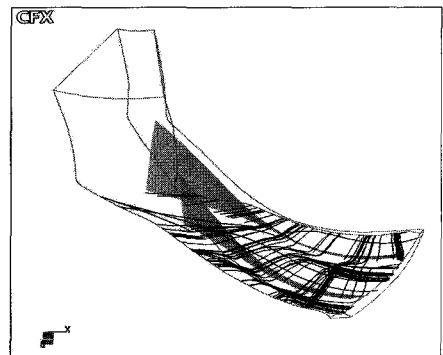


Fig. 3 Streamlines passing by the leading edge of blade with zero tip clearance



(a)



(b)

Fig. 4 Streamlines passing by the leading edge of blade (a) and through tip clearance (b) with 0.6mm tip clearance

3.3 임펠러 출구 해석 결과

임펠러 출구에서의 유동특성에 대한 해석은 임펠러만의 성능 확인을 위해서는 물론, 간극누설유동에 의해 발생하는 임펠러 출구 손실을 고려하여 이후 VLD 나 CD의 효과적인 설계를 위해서도 매우 중요하다. Fig. 5에 임펠러 출구에서 체적유량의 변화에 따른 평균정압 ($P_{2,02}$) 및 전압 (P_{02}) 분포를 나타내었다. 익단간극의 변화에 따라 영향을 거의 받지 않는 정압분포와 달리 전압의 경우 고유량에서 익단간극이 클수록 전압이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 임펠러 출구에서 속도 성분을 다르게 예측하기 때문이며 그 차이를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 c_m 과 c_t 는 설계점 유량 근처에서 각각 질량 평균된 자오면 속도성

분과 회전방향속도 성분이며 쉬라우드 부근에서 불규칙한 속도분포를 나타내고 있다. 이러한 속도성분의 변화는 임펠러 이후 CD의 성능에 영향을 미치므로 CD의 설계를 하는데 있어 고려되어야 할 인자이다.

3.4 디퓨저 출구 해석 결과

임펠러 출구 이후 간극누설유동으로 인한 디퓨저의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 VLD 출구에서의 성능을 알아보았다. Figs. 7과 8은 total to static (TS) 폴리트ropic 헤드 및 효율을 나타내었다. 설계점 유량에서 익단간극이 없는 경우의 헤드가 가장 높게 예측되었고, 익단간극이 증가함에 따라 헤드가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향은 효율 곡선에서도

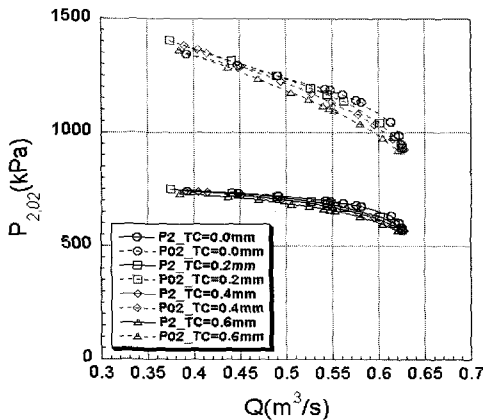


Fig. 5 Comparison of pressure at impeller outlet

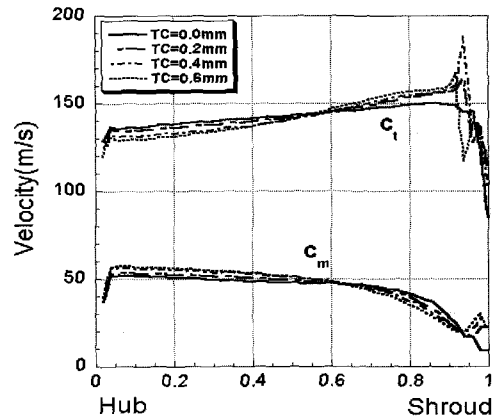


Fig. 6 Velocity profile at impeller outlet along hub to shroud

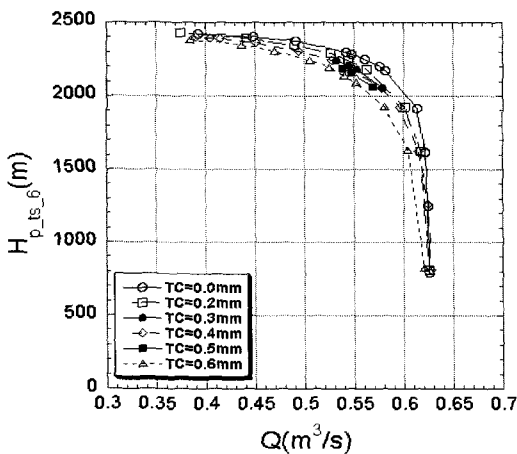


Fig. 7 Comparison of polytropic head at VLD outlet

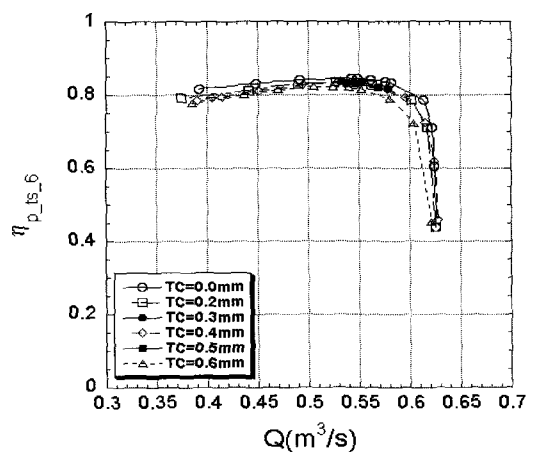


Fig. 8 Comparison of polytropic efficiency at VLD outlet

동일하게 예측되었다. 그러나 익단간극이 0.2 및 0.4 mm인 경우, 헤드 및 효율의 차이를 구별하기 어려워 설계점 유량 근처에서 익단간극이 0.3 및 0.5mm인 임펠러에 대한 해석 결과를 추가하였다. 그 결과 익단간극이 0.3 및 0.4mm인 경우, 헤드가 익단간극과 관련 없이 거의 일치하였고, 효율 비교에서는 0.3mm인 경우의 효율이 더 높게 예측되었다. 이러한 경향에 대한 분석을 위해 임펠러 이후 디퓨저의 내부유동장을 살펴 보았다. Fig. 9는 익단간극에 따른 임펠러 입구부터 출구까지 평균된 전압분포이고, Fig. 10은 엔트로피 분포이다. Fig. 9의 전압분포에서 임펠러 출구 부분에서의 전압 차이가 디퓨저 출구까지 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 10의 엔트로피 분포에서 익단간극이 0.2mm인 경우와 0.4 mm인 경우 임펠러 출

구이후에 엔트로피가 일치하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 간극누설유동이 항상 손실을 유발하는 것이 아니고 이차유동을 억제시키는 순기능을 하는 임계간극(critical clearance)이 존재한다는 연구결과(1)와 유사하며 설계점 유량에서의 무차원화 된 헤드와 효율의 비교에서 확인이 가능하다.

Fig. 11에는 익단간극의 변화에 따른 무차원 헤드 차이를 실험결과와 함께 나타내었고, Fig. 12에는 무차원 효율을 나타내었다. 무차원 헤드와 효율을 비교하기 위해 각 익단간극의 설계점 유량에서의 물리량은 보간법을 통해 구하였고 무차원에 사용된 헤드와 효율은 익단간극이 없는 임펠러 해석 결과의 헤드와 효율을 각각 사용하였다. Fig. 11에서 익단간극이 0.3 mm인 경우와 0.4 mm인 경우를 익단간극이 없는 경

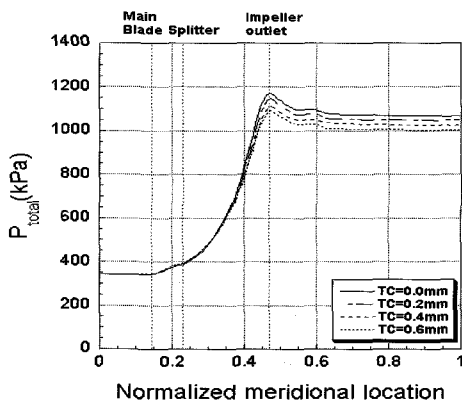


Fig. 9 Variation of total-to-total pressure along the flow passage

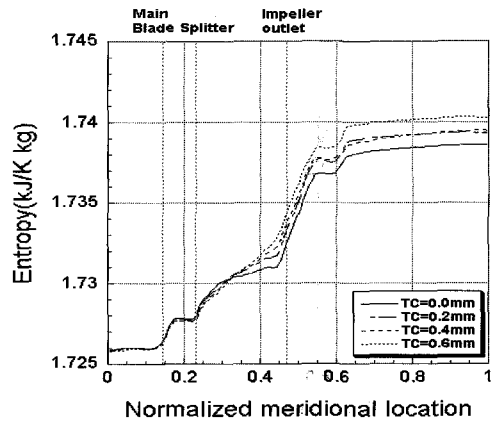


Fig. 10 Variation of entropy along the flow passage

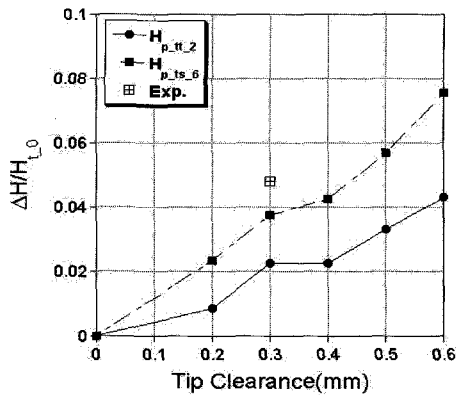


Fig. 11 Variation of normalized polytropic head due to tip clearance compared with zero tip clearance

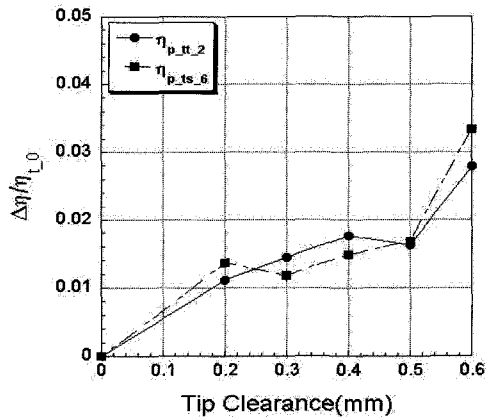


Fig. 12 Variation of normalized polytropic efficiency due to tip clearance compared with zero tip clearance

우와 비교해보면 익단간극의 변화와 상관없이 디퓨저 출구에서 약 4%의 차이를 보이고 있다. 이러한 경향은 임펠러 출구에서도 동일하게 나타나고 있다. 또한 익단간극이 0.6 mm인 경우 약 8%의 헤드 손실에 예측된다. Fig.11에서 해석 결과와 비교한 실험 결과는 냉간 조립 공차가 0.3 mm인 실험 결과로, 압축기에서 벌류트 이후에 측정된 헤드이다⁽⁴⁾. 이 실험 결과는 실험 중에 발생하는 익단간극의 변화 및 실험 오차를 포함한 결과이나 익단간극이 0.3 mm인 해석 결과와의 비교에서 약 1%의 오차를 보이고 있어 임펠러 냉간 조립 공차 결정에 활용이 가능하다고 판단된다. Fig. 12의 무차원 효율 비교에서는 앞서 헤드 비교와 달리 불규칙한 경향을 보이고 있으나, 디퓨저의 내부 유동해석에서 언급한 임계간극으로 판단되는 0.2, 0.3, 0.4 mm인 경우에는 익단간극이 없는 경우에 비해 약 1.3%의 효율 감소가 예측되었다. 해석 결과를 통해 익단간극이 존재하는 경우 0.3 mm인 임펠러가 효율 감소가 적다고 판단되며 임계간극으로 인한 순기능 여부를 분석하기 위해 임펠러 내부 유동과 이차유동에 관한 연구가 필요하다.

3.5 익단간극의 정의

본 연구에서 정의한 익단간극의 경우 입구면적과 출구 폭이 변하여 유로면적이 변화하는 문제가 발생하게 되고, blade cut 방법을 사용하여 익단간극을 단순화 시킨 경우에는 날개의 높이가 변하여 유로 폭이 좁은 경우 익단간극의 영향이 커지는 문제점이 발생한

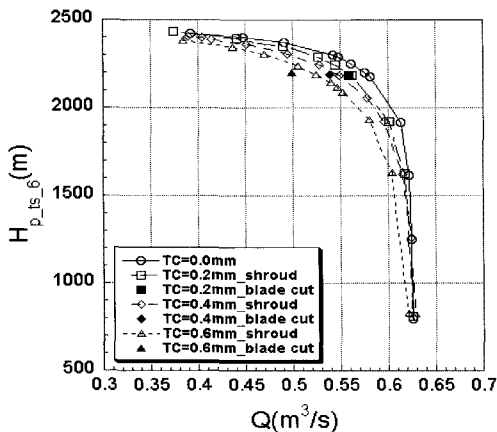


Fig. 13 Comparison of polytropic head at VLD outlet due to different definition of tip clearance

다. 따라서 각각의 다른 익단간극의 정의를 적용한 임펠러 디퓨저 출구의 폴리트로픽 헤드 결과를 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 익단간극이 0.6 mm인 경우를 제외하고 두 결과가 일치하였다. 그러나 임펠러 출구 폭을 변화시켰을 경우에도 동일한 경향을 예측하는지에 관한 연구와 설계점 근처에서 유량 변화에 따른 경향을 알아보는 연구를 추가해야 한다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 R134a 냉매 압축기의 익단간극에 의한 성능변화를 예측하기 위해 익단간극이 없는 임펠러를 바탕으로 쉬라우드를 조절하여 날개 선단에서 끝단까지 균일한 분포를 가진 익단간극을 가진 임펠러를 모델링하여 압축기의 유동해석을 수행하고 각각의 익단간극에 대해 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이상기체 상태 방정식을 적용할 수 없는 실제 기체의 물성치를 고려한 압축기의 익단간극에서 발생한 간극누설유동은 압축기의 임펠러 및 디퓨저의 성능 특성을 변화시킨다.
- 2) 실제 냉간 조립공차로 적용되는 익단간극이 0.3 mm인 경우에 VLD 출구에서 익단간극이 없는 경우를 기준으로 헤드는 약 4% 감소하며 (실험 결과는 익단간극이 없는 해석결과에 비해 5% 감소), 효율은 약 1% 감소하였다.
- 3) 본 연구에 사용된 임펠러의 경우 냉간 조립공차의 범위 안에서는 익단간극의 정의에 따라 해석 결과가 큰 영향을 받지 않는다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 음학진, 강신형, 2003, “익단간극이 원심압축기 성능에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구,” 대한기계학회 논문집 B권, pp. 389~397
- (2) 이경용, 최영석, 박운진, 2004, “R134a 터보냉동기용 원심 압축기의 성능특성에 관한 수치해석

- 적 연구,” 유체기계저널, 제7권, 2호, pp. 14~20
- (3) Aungier, Ronald H., 2000, Centrifugal compressors : A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis, ASME press. p. 18
- (4) 김길영, 이창중, 이현구, 2003, “터보냉동기용 압축기의 성능에 대한 실험적 연구 Part 1: 성능 측정시 고려할 인자들,” 2003 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 718~723