

김치 냉장고용 팬 및 덕트 시스템 성능 개선

김준형* · 최영석**† · 윤준용*** · 박성관**** · 현석호****

Performance Improvement of Fan and Duct System for Kimchi Refrigerator

Joon-Hyung Kim*, Young-Seok Choi**†, Joon-Yong Yoon***, Sung-Kwan Park****, Seok-Ho Hyun****

Key Words : Kimchi Refrigerator(김치냉장고), fan(팬), duct system(더블 벌류트), DOE(실험계획법)

ABSTRACT

The kimchi refrigerator is the electronic home appliance which is used for the maturing and a custody of the kimchi. In this paper, performance improvement of fan and duct system for kimchi refrigerator has been studied by using a commercial CFD code. In order to achieve a improved fan performance, three-dimensional computational fluid dynamics and the Design of Experiments method have been applied. Additionally, to know the optimized duct inlet shape with the optimized fan, the overall performances were calculated with various duct inlet shapes. The final fan and duct system for kimchi refrigerator showed improved performance in efficiency and total head compared with the existing model.

1. 서론

일반 냉장고 개념에서 파생되어 만들어졌던 김치 냉장고는 1995년 첫 선을 보인 후 시장에서의 수요가 꾸준히 증가하여 현재는 생활 가전 시장을 주도하는 제품으로 부각되었다. 이러한 김치 냉장고는 냉장 보관의 기능만을 가진 일반 냉장고와는 달리 김치를 숙성시키고 그 맛을 장기간 유지시킬 수 있는 제품으로 특화된 새로운 가전기기로 100% 국내 독자기술을 보유하고 있다.⁽¹⁾

김치 냉장고는 그 역사에 비해 짧은 기간 안에 급성장하여 가전 시장을 주도하는 대표적인 상품으로 부각 되었으며 그 입지를 확고하게 하기 위하여 김치 냉장고를 판매하는 업체에서는 소비자들을 만족시키기 위한 체계적인 기술 개발을 시도하고 있다.

일반적으로 김치 냉장고의 성능에 있어서 가장 중요시 되어 왔던 요소는 숙성 및 장기 보관에 대한 기술들이었다. 하지만 최근 들어 소비자의 욕구가 점차 증가함에 따라 숙성

및 장기 보관 기술뿐 아니라 보관 용량 증대에 대한 요구가 증가하고 있다. 보관용량, 즉 보관고의 체적이 증가하면 보관고 내의 온도편차가 커져 내용물의 보관기간이 감소될 수밖에 없는데, 소비자가 요구하는 보관 용량의 증대 및 보관기간의 추가연장을 위해서는 기존 제품의 성능 개선이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 김치 냉장고의 핵심 요소 중 하나인 팬 및 덕트 시스템의 성능 개선에 대한 연구를 수행하였다. 실험 계획법 및 수치해석 기법을 이용한 팬 설계를 수행 하였으며 추가적으로 덕트의 손실 요소들을 고려하여 손실을 최소화시킬 수 있는 덕트 설계 작업을 수행하였다. 최종적으로 설계되어진 팬 및 덕트 시스템에 대한 성능을 수치해석을 이용하여 기존 모델 성능과 비교 분석하였다.

2. 팬 설계

2.1 기존 팬 성능 분석

기존 팬에 대한 성능 분석 작업을 수행하기 위해 유체 기계 날개 생성 프로그램인 BladeGen을 이용하여 기존 팬 날개 형상을 생성하였다. 생성된 날개 형상에 대하여 상용 3차원 점성유체 해석 프로그램인 CFX-11을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 팬 날개의 유동장 특성을 알아보기 위한 비압축

* 한양대학교 대학원 / 한국생산기술연구원

** 한국생산기술연구원 에너지설비센터

*** 한양대학교

**** (주)위니아만도

† 교신저자, E-mail : yschoi@kitech.re.kr

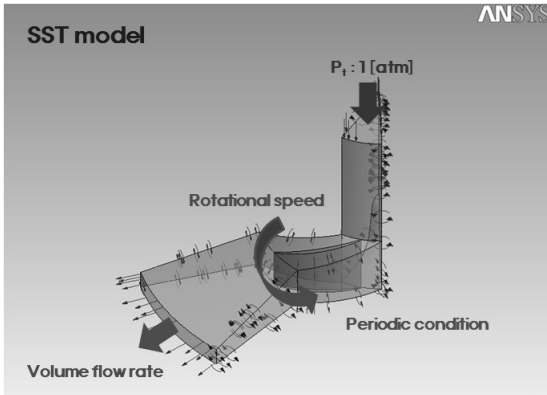


Fig. 1 Boundary condition of numerical analysis for fan

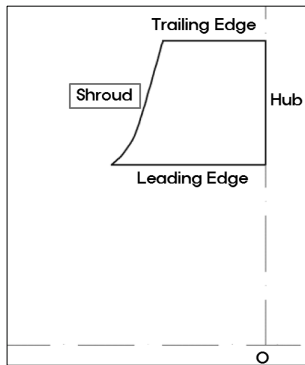


Fig. 2 Meridional view of impeller

성 난류 유동해석을 위하여 3차원 평균 Navier–Stokes 방정식을 사용하였다. 수치 해석 계산에 사용한 지배방정식은 유한 체적법으로 이산화 되었으며, 이산화 기법으로는 2차 이상의 정확도를 갖는 고해상도기법(high resolution scheme)을 사용하였다. 난류유동의 해석을 위한 난류모델은 유동박리형상 등에 적절한 전단이송(shear stress transport)모델⁽²⁾을 사용하였다.

경계조건은 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 입구부에 대기압 조건을 출구 측에 유량 조건을 설정하였다. 또한 periodic 경계 조건을 적용하여 날개의 1 passage 영역에 대하여 수치해석을 수행하였다.

수치해석을 통하여 산출된 기존 팬 성능 데이터들은 연구 수행 시 기준 데이터로 활용되었다.

2.2 임펠러 자오면 선정

팬 설계를 위해 팬 임펠러의 기본이 되는 자오면을 선정하였으며 선정된 자오면은 Fig. 2와 같다. 자오면 선정 시 임펠러 사이즈 및 설치에 대한 제한 조건 때문에 임펠러 자오면의 쉬라우드의 형상에 대한 조정만이 가능하였다. 그에 따라 기타 형상은 기존과 동일하게 고정시킨 상태에서 쉬라우드 형상만을 연구 대상 팬의 비속도(N_s 470)에 해당하는 자오면 데이터베이스를 활용하여 결정하였다.

2.3 실험계획법을 이용한 임펠러 최적 설계

실험계획법(design of experiments)은 근대적 통계해석법을 기반으로 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 적은 비용으로 선정하고 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다. 그리고 동시에 두 종류 이상의 인자를 대상으로 하여 그들의 효과를 개별적으로 측정할 수 있다. 설계인자의 수가 많은 경우 어떤 설계인자가 성능에 영향을 미치는 정도를 대략적으로 알아보는 것이 중요하게 되고, 이러한 과정에서 다음 설계단계에서 인자의 수를 줄이는 인자의 선별(screening) 과정도 가능하게 된다.

실험계획법은 실험의 효율성을 위하여 고안된 방법이었으나 최근 수치해석 기법의 발달로 인하여 그 정확도가 높아짐에 따라 수치해석과 실험계획법을 접목시킨 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽³⁾

본 연구의 임펠러 최적설계를 위한 수치 최적화 기법으로 실험계획법의 2^k 요인실험 기법을 사용하였다.

2.3.1 압펠로 설계 변수 선정

2^k 요인실험을 통한 임펠러 최적화 설계 작업을 수행하기 위해서 Fig. 3과 같이 날개각에 대한 설계 변수들을 설정하였다. 효율 및 설계점 유량에 영향을 미치는 입구각(β_{inlet})을 변수로 설정하였으며 압력 상승과 관계된 출구각(β_{outlet})을 제어할 수 있는 임펠러 원호 반경(R)을 설계 변수로 선정하였다.

Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 입구각과 임펠러 원호 반경이 결정되면 그에 따라 출구각이 결정되어지게 된다.

2.3.2 수치해석을 이용한 2^k 요인 실험

설정된 설계변수를 적용해 Table 1과 같이 2^k 요인실험 set을 생성하였다. 표에서 확인할 수 있듯이 2개의 변수로

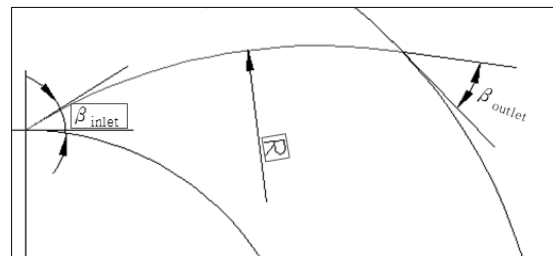


Fig. 3 Design variable of impeller (front view)

Table 1 2K factorial set (impeller)

	β_{inlet} (°)	R(mm)
set 1	20	62
set 2	35	62
set 3	20	76
set 4	35	76
center	27.5	69

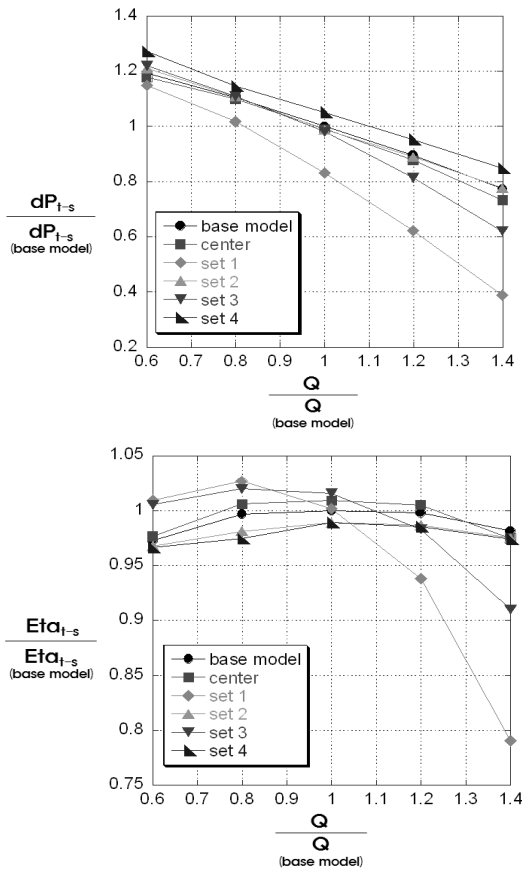


Fig. 4 Numerical analysis result of 2K factorial set (impeller)

생성된 실험 set은 center값을 포함하여 모두 5가지 set이다. 변수 변화 범위는 입구각의 경우 center값 27.5를 기준으로 ± 7.5 , 임펠러 원호 반경은 center 값 69mm를 기준으로 ± 7 mm로 설정하였다.

각각의 2^k 요인 실험 set에 대한 성능 분석을 위하여 기존 헨 성능 분석과 동일한 방법으로 수치해석을 수행하였으며 수치해석 결과 값은 Fig. 4와 같다. 그래프에서 볼 수 있듯이 생성된 2^k 요인 실험 set에 대하여 유량에 따른 압력차와 효율 해석결과를 기존 헨(base model)의 설계점 성능에 대한 무차원량으로 산출하였다.

2.3.3 임펠러 최적화

수치해석을 통해 얻어진 결과들에 대하여 MiniTab을 이용해 Fig. 5와 같이 변수에 따른 영향성 분석 작업을 수행하였다. 그림의 주 영향도표(Main effect plot)를 통해서 볼 수 있듯이 압력차의 경우 입구각과 임펠러 원호 반경변수 모두 비슷한 수준의 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며 입구각이 클수록 또한 임펠러 원호 반경이 커질수록 압력차가 상승하였다.

분석된 결과를 바탕으로 Fig. 6과 같이 Overlaid Contour Plot을 분석하여 목표 사양을 만족하는 변수범위를 예측하였

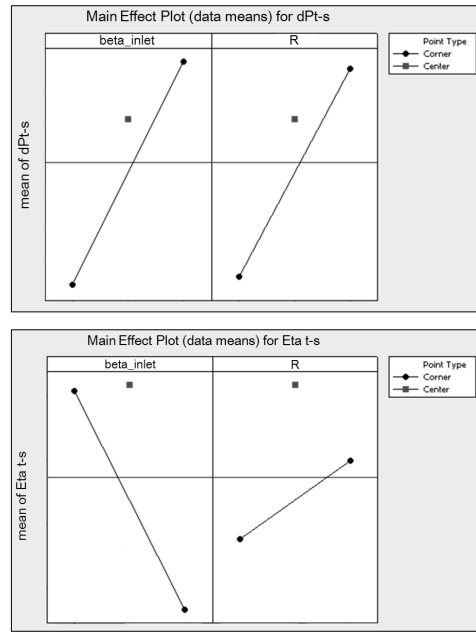


Fig. 5 Main effects plot of 2K factorial set

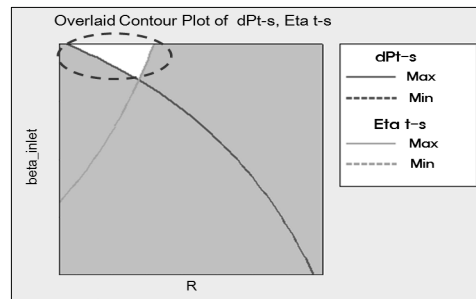


Fig. 6 Overlaid Contour Plot of 2K factorial set

Table 2 Optimized set (impeller)

	β_{inlet} (°)	R(mm)
optimized set 1	25	69
optimized set 2	25	76
optimized set 3	25	83
optimized set 4	25	90
optimized set 5	25	97
optimized set 6	30	85
optimized set 7	30	95

다. 압력차는 기존에 헨 성능의 약 +10% 수준, 효율은 기존 헨의 효율 이상으로 목표 범위로 설정하였을 때 목표 성능을 만족시키는 변수 범위로 입구각이 20~30°, 임펠러 원호의 반경을 69mm를 기준으로 +6% 이상의 값을 예측하였다.

Overlaid Contour Plot 분석 결과를 바탕으로 Table 2와 같이 목표 사양을 만족할 것으로 예상되는 7가지 optimized set을 생성하였다. 각각의 optimized set 역시 수치해석 작업을 수행하였으며 결과는 Fig. 7과 같다.

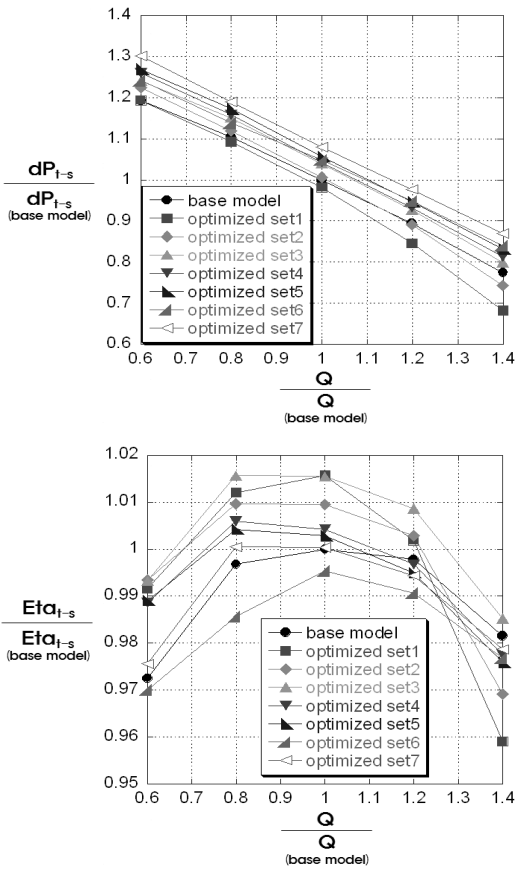


Fig. 7 Numerical analysis result of optimized set

Fig. 7의 성능 분석 결과를 바탕으로 기존 팬보다 압력차가 높으면서 설계점에서 최고 효율 성능을 보이는 최적 설계 set (optimized set3)을 최적 설계 팬 설계 안으로 결정하였다.

3. 덕트 설계

윗 절에서 언급하였듯이 팬 설계 시 임펠러 사이즈 및 설치에 대한 제한 조건 때문에 팬 설계에 의한 성능 향상에는 한계가 있었다. 그에 따라 김치냉장고 팬 및 덕트 시스템 성능 개선을 위하여 추가적으로 큰 영향을 미칠 것으로 사료되어지는 덕트, 그중에서도 덕트의 흡입구에 대한 재설계 작업을 수행하였다.

3.1 기존 덕트 성능 분석

기존 벨 마우스 형상에 대한 성능분석을 위하여 Fig. 8과 같은 경계 조건으로 수치해석 작업을 수행하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 기존 덕트 흡입구 형상(duct set1)에 기존 팬(base model)과 최적 설계 팬(optimized set3)을 각각 적용하여 수치해석을 수행하였으며 수치해석 결과는 덕트 설계에 관한 연구 진행 시 기준 데이터로 활용되었다.

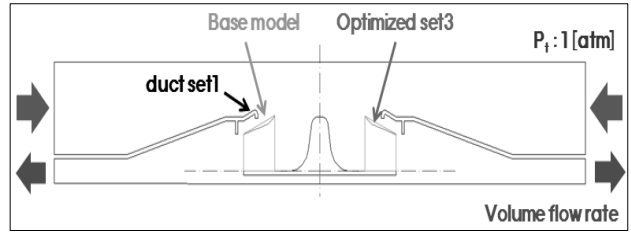


Fig. 8 Boundary condition of numerical analysis for full system

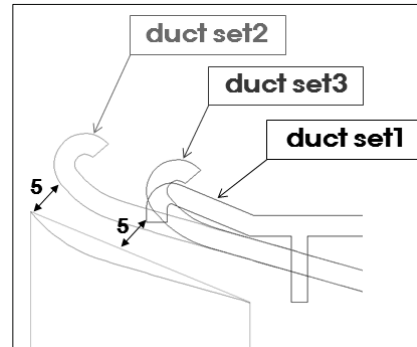


Fig. 9 Geometry of duct set1~3

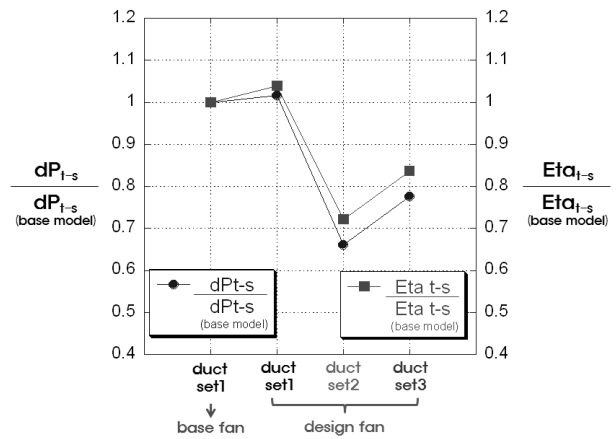


Fig. 10 Numerical analysis result of duct set1~3

3.2 일반적 덕트 형상에 대한 성능 평가

Fig. 9 그림을 통하여 확인할 수 있듯이 기존 김치냉장고 팬 및 덕트 시스템에 사용되어지던 덕트 형상(duct set1)은 일반적으로 많이 사용되고 있는 덕트 형상과는 큰 차이를 보이고 있다. 일반적으로 사용되어지는 덕트의 경우 뿔개부가 개방형 혹은 폐쇄형으로 되어 있지만 기존 모델의 덕트 시스템에 경우 그림에서 확인할 수 있듯이 반개방형의 형태를 띠고 있었다. 또한 입구부 출구부 모두 유동의 출입을 막아주는 격벽의 형태를 가지고 있고 끝 틈새 간격(tip clearance)이 일반적인 팬에 비하여 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. 이러한 형상을 갖는 원인을 분석해 보기 위하여 Fig. 9와 같이 일반적으로 사용되어지는 덕트 형상을 설계하여 수치해석을 통한 성능 및 유동장 분석 작업을 수행하였다. 이때 설계 되

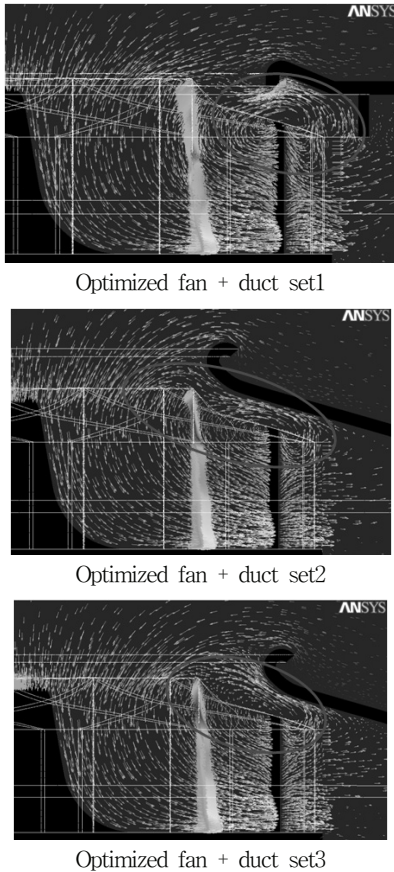


Fig. 11 velocity vector of duct set1~3

어진 덕트 형상은 폐쇄형(duct set2)과 반개방형(duct set3) 2가지 set으로 격벽은 제거하였으며 끝 틈새 간격은 기존 모델과 동일하게 설계하였다. 수치해석에 따른 성능을 기존 모델의 결과를 기준으로 무차원화 하여 Fig. 10과 같이 나타내었다. 결과를 통하여 일반적으로 사용되어지는 덕트 형태로 설계되어진 덕트 형상(duct set2, duct set3)을 적용하였을 경우 기존 덕트 형상(duct set1)을 적용하였을 때보다 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반개방형 덕트 형상(duct set3)보다 폐쇄형 덕트형상(duct set2)의 경우 성능 감소가 더 크다는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 성능 저하의 원인을 분석하기 위해 각각의 수치해석 결과에 대하여 중심부 단면에서의 속도 벡터 성분을 Fig. 11과 같이 산출하였다. 그림을 통하여 기존 덕트 형상을 적용하였을 때에 비하여 새롭게 설계한 덕트 형상을 적용하였을 경우 back flow 영역이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 폐쇄형 덕트 형상의 경우 반개방형 덕트 형상에 비하여 back flow 영역이 더욱 큰 것을 확인할 수 있었다. 이러한 back flow 영역이 환 및 덕트 시스템 성능에 악영향을 미치는 것으로 판단된다.

일반적으로 환 시스템의 흡입부는 파이프 등으로 연결되거나 완전 개방 형태를 띠고 있지만 본 연구에서 연구되어지

는 김치 냉장고용 환 시스템의 경우 흡입 유로가 매우 복잡한 형태를 띠고 있다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 덕트의 흡입부가 개방적인 형태를 띠고 있지만 뒤쪽 벽면과 흡입부 사이의 간격이 좁아 완전 개방형 덕트 흡입부를 적용하였을 때와는 다른 형태의 흡입 유동 특성을 보이고 있다. 또한 김치 냉장고용 환 시스템의 특성상 결빙 등에 의한 문제로 인하여 일반적인 환 시스템에서보다 큰 끝 틈새 간격을 적용하고 있다. 이러한 유동 특성들의 상호 작용에 의해서 일반적인 덕트 형상을 적용하였을 경우 재순환(back flow) 영역이 증가하는 것으로 사료된다. 추가적으로 유동의 반대방향으로 유입, 유출되는 유동 성분들의 일부를 격벽이 차단해 주는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 덕트 수정 설계

윗 절의 연구를 통해서 흡입구의 개방 정도, 격벽의 유무 그리고 끝 틈새 간격 등이 덕트 시스템 손실에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

그에 따라 덕트 시스템 손실을 최소화 할 수 있는 덕트 형상을 찾기 위해 위의 영향 요소들을 고려하여 Fig. 12와 같이 덕트를 추가 설계하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 추가적으로 설계된 덕트 종류는 덕트 흡입구의 개방 정도에 따라 완전 폐쇄형(duct set4)에서 완전 개방형(duct set9)까지 총 6개로 분류된다. 이때 입구부의 격벽은 제작 편의 및 제

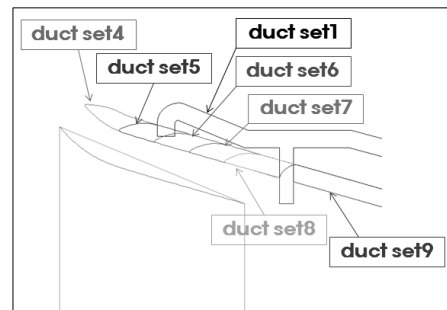


Fig. 12 Geometry of duct set4~9

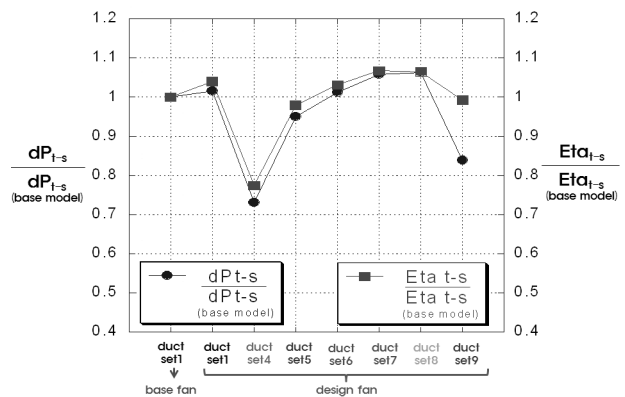


Fig. 13 Numerical analysis result of duct set4~9

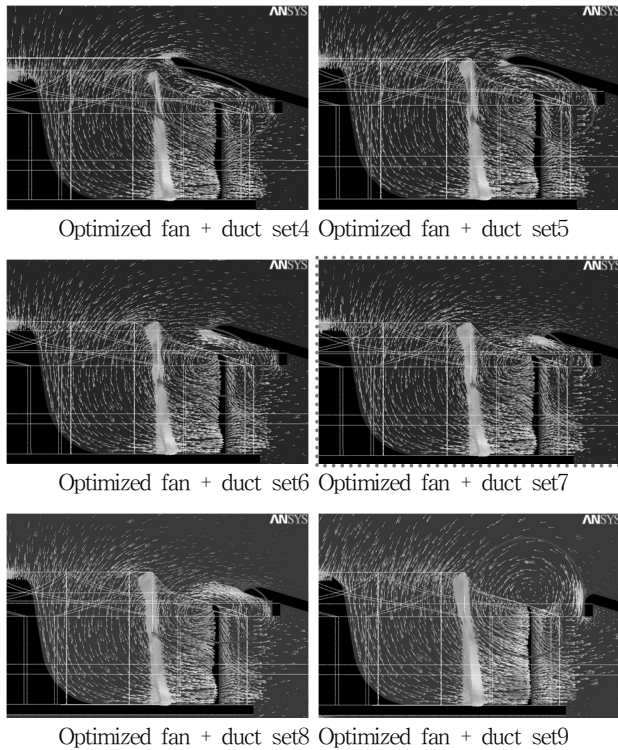


Fig. 14 velocity vector of duct set4~9

작 단가 절감을 위해 제거하였으며 출구부 격벽은 입구부에 비해 제작 상의 차이가 크지 않아 기존 모델과 동일하게 반영하였다. 마지막으로 끝 틈새 간격은 앞에서도 언급 했듯이 설치 제한조건 때문에 변경이 불가하여 기존 모델과 동일하게 설계하였다.

설계된 각각의 duct set을 적용하여 수치해석 작업을 수행하였으며 수치해석에 따른 성능을 기존 모델의 결과를 기준으로 무차원화 하여 Fig. 13과 같이 나타내었다.

결과를 통해서 완전 폐쇄형 덕트(duct set4)의 경우 기존 모델의 덕트(duct set1)에 비해 압력차, 효율 성능이 모두 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다. 특히, 흡입구의 개방 정도가 증가함에 따라 덕트 성능이 향상되다가 일정 수준 이상의 개방 정도(duct set7~8 사이)가 되면 성능이 다시 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 성능 변화의 원인을 분석하기 위하여 각각의 수치 해석 결과에 대한 속도 벡터를 Fig. 14와 같이 산출하였다. 그림을 통하여 확인할 수 있듯이 완전 폐쇄형 덕트(duct set4)의 경우 팬 임펠러 쉬라우드와 덕트부 사이에서 재순환 영역이 매우 넓게 퍼져 있었다. 이러한 재순환 영역은 흡입구 면적이 커질수록 감소하다가 일정 흡입구 면적(duct set7) 이상이 되면 다시 커지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 완전 개방형 형태의 덕트(duct set9) 임펠러의 쉬라우드부에서 존재하던 재순환 영역이 임펠러 중간부까지 확산되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 재순환 영역이 임펠러에 악영향을 미쳐 팬 및 덕트 시스템의 성능이 저하되는 것으로 판

단된다.

본 연구 내용을 바탕으로 시스템의 압력 및 효율 성능이 가장 좋은 것으로 확인된 duct set7을 최종 덕트 설계안으로 제시하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 김치 냉장고의 핵심 부품 중 하나인 팬 및 덕트 시스템의 성능 개선에 대한 연구를 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

- (1) 수치해석을 이용하여 기존 모델의 팬 시스템에 대한 성능 분석을 수행하였다. 산출된 데이터들은 팬 설계 시 비교 기준 데이터로 사용하였다.
- (2) 실험 계획법에 수치해석 기법을 접목하여 팬 설계 작업을 수행하였다. 최종적으로 설계된 팬의 성능이 기존 모델의 팬 성능에 비해 압력차의 경우 약 4%, 효율의 경우 약 2% 상승하였다.
- (3) 수치해석을 이용하여 기존 모델의 덕트 시스템에 대한 성능을 산출하였다. 이를 일반적인 덕트 형상의 경우와 비교 분석하여 덕트 시스템의 손실 요소들을 결정하였다.
- (4) 덕트 시스템의 손실 요소들을 고려하여 덕트 수정 설계 작업을 수행하였다. 설계된 덕트 형상들에 대한 성능 분석을 통하여 손실 요소들에 따른 영향성 평가를 수행하였으며 최종 덕트 설계안을 제시하였다.
- (5) 최종적으로 제안된 김치 냉장고용 팬 및 덕트 시스템은 기존 모델을 기준으로 볼 때 압력차가 약 6%, 효율이 약 7% 상승하였다. 이러한 성능 상승과 더불어 김치 냉장고용 팬 및 덕트 시스템 최종 모델의 경우 덕트의 흡입구 형상을 단순화하여 생산 단가 절감 및 설치 용이성 등의 추가적인 효과도 기대된다.

후 기

본 연구는 “스탠드 김치냉장고 팬 및 덕트 시스템 개발” 사업의 연구 일환으로 진행되었으며 이에 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Yoon, J. W, 2003, “A Numerical Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics in a Kimchi Refrigerator,” SAREK, Vol. 15, No. 12, pp. 1078~1087.
- (2) Kim, S, Choi, Y. S., Yoon, J. Y., and Kim, D. S., 2008, “Optimized Design of centrifugal pumpEffect of impeller

- geometrical parameter on the performance of a centrifugal pump,” KFMA Vol. 11, No. 3, pp. 21~26.
- (3) Choi, Y. S., Lee, K. Y., Kim, J. H. and Kim, S., 2008, “Design Optimization of Mixed-flow Pump Impellers and Diffusers,” Proceedings of the KFMA Annual meeting, pp. 57~62.