

## 수치해석에 의한 소형 원심팬 개발

지선구\* · 박성관

### Development of a Small Centrifugal Fan with CFD

Seon-Koo Chee\*, Sung-Kwan Park

*Key words:* Centrifugal fan(원심팬), Conceptual design program(개념설계프로그램), Flow analysis(유동해석), Design system(디자인 시스템), FVM(유한체적법)

#### ABSTRACT

It is not easy to apply a small-sized centrifugal fan to the duct used for the thermal management of home electronic appliances due to complex design parameters of its blades and scroll. The main objective of this study was to develop the systematic process to design an optimal centrifugal fan based on the 3-dimensional configuration of blades obtained from the conceptual design program self-developed with the given design constraints such as the flow rate, the total pressure loss, the size of fan, and the number of rotation. The design process to find an optimal centrifugal fan for refrigerator was technologically linked in many ways. The complex grid generation system of the fan model included scroll was adopted for the numerical simulation. The FVM CFD code, FLUENT, was used to investigate the three dimensional flow pattern at the coordinate system of rotating frame and to check the optimal performance of the fan. By using this design process, a selected centrifugal fan was designed, numerically simulated, manufactured and experimentally tested in the wind tunnel. The performance curve of fan manufactured by NC process was compared with numerically obtained characteristic curve. The developed design method was proved into being excellent because these two curves were well matched.

#### 1. 서론

일반적으로 가전제품 및 정보기기등에서 효과적인 열관리를 위하여 축류팬이 널리 사용되어 왔다. 그에 따라 고성능/고효율의 축류팬을 설계하고자 하는 노력이 지속적으로 이루어졌으며(2) 축류팬 설계에 대한 기본 개념을 언급한 저서(3)들도 다수 출간되어 있는 상황이다. 그러나, 최근 들어 제품이 고성능화, 집적화의 경향을 띄면서 팬 설치구조가 복잡하게 변하였고, 열악한 덕트 환경을 갖는 제품이 적지 않게 생산되고 있는 실정이다. 열악한 덕트 환경이란 동일한 유량이

요구될 때 상대적으로 압력손실이 큼을 의미하며 高 압력손실에 적합한 원심팬의 채용이 필요하게 되었다. 그러나 원심팬의 경우, 높은 압력손실에도 기본적인 유량을 확보할 수 있다는 장점은 있으나 스크롤, 덕트 등 주변 구조물에 의한 성능변화가 커, 한번의 개발로 다양한 제품에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 결국, 원심팬의 개발단계에서 팬 이외의 설계변수가 추가되므로 인하여 냉장고와 같은 가전제품에의 적용이 쉽지 않았다.

본 연구에서는 시스템이 필요로 하는 최적의 원심팬을 설계하기 위한 개발 프로세스를 구현하였다. 또한, 구현된 개발 시스템에 따라 팬의 설계조건 즉, 유량, 압력손실 및 회전수, 팬지름등을 기초로 개념설계를 진행하여 3차원 원심팬 형상을 얻었으며 원심팬의 성능을 검증하기 위하여 3차원 난류 유동장 해석을 수행하였다. 수치해석에서는 국부적인 유동장에서 회전

\* Corresponding author

Tel.: +82-31-200-6227; fax: +82-31-200-6252

E-mail address: imjis@samsung.co.kr

좌표계를 적용하여 실제 원심팬 형상 및 스크롤까지 포함하도록 하므로써 데이터의 실용성을 높이고자 하였다. 3차원 수치해석은 유한체적법(FVM)<sup>(1)</sup>에 기반을 둔 상용패키지, FLUENT를 이용하였고 격자구성은 토포패키지 전처리 프로그램인 GAMBIT을 사용하였다. 최종적인 설계물에 대하여 시작품을 제작하고 풍동실험을 통하여 성능을 검증하였으며 수치해석 결과와 비교하였다. 본 연구에서 도출된 분석 내용 및 설계물은 최종적으로 양문여단이형 냉장고 냉기 순환용 원심팬으로 활용하였다.

## 2. 본론

본 장에서는 시스템이 요구하는 최적의 원심팬을 설계하기 위한 개발 프로세스에 대하여 설명하기로 한다.

### 2.1 원심팬 개발공정 개요

Fig. 1에 본 연구에서 구현한 원심팬의 개발공정을 표시하였다. 먼저, 원심팬이 설치될 덕트 시스템이 요구하는 기본 성능을 파악하여야 한다. 즉, 전체적인 냉기 순환량과 압력손실 예측이 선정되어야 하고 설치 가능한 팬의 외경이 선정되어야 하며 소음자려나 경험 등에 기초한 팬 회전수등이 설정된다. 최소 유량이나 압력손실은 수치해석이나 풍동 실험을 통하여 예측되기도 하고 자체적으로 제작된 덕트 손실예측 프로그램에 의하여 진행되기도 한다. 설정된 몇 개의 설계변수들을 이용하여 개념설계를 진행한다. 개념설계 프로그램은 실험식이나 팬 설계 가이드에서 제시하고 있는 이론들이 적용되어 있어 입구 날개각의 변화에 따른 최적의 원심팬이 도출되도록 되어 있다. 결과적으로 개념설계 프로그램에서 최적의 날개수, 팬 출구각, 날개 안쪽지름, 유동 입출구의 날개높이등이 제시되므로 원심팬의 3차원 형상을 구현할 수 있게 된다.

개념설계 프로그램에서 제시된 팬 형상을 이용하여 3차원 모델링을 진행한다. 모델링은 먼저 팬 단품을 대상으로 하며 스크롤이 배제된 팬 날개 및 입구조건, Tip 간극등만을 고려하고 결과물은 수치해석 툴(tool)로 전달되어 유동장의 격자구성에 사용된다. 팬 단품에 대한 해석은 비직교 윤곽 격자계(Non-orthogonal body fitted grid)를 이용하고 있으며, 설계변수를 지속적으로 바꾸어 가며 빠른 해석을 진행하여 주어진 목

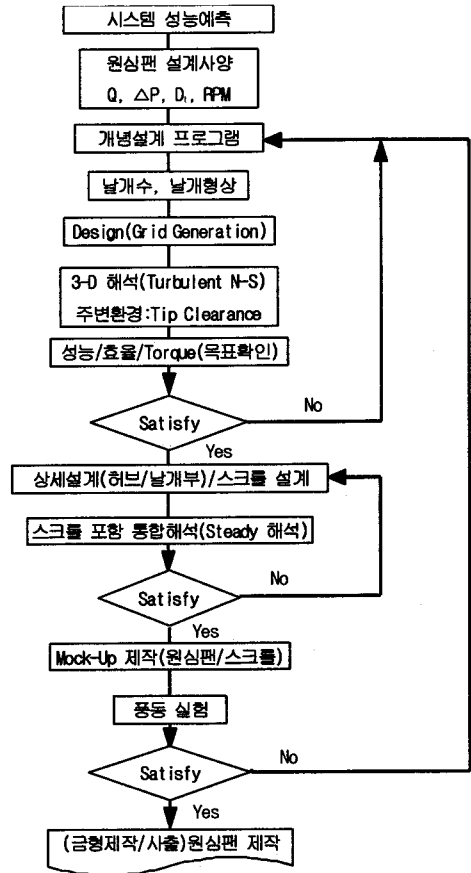


Fig. 1 Design process for a centrifugal fan

표에 성능이 접근하는지 파악하게 된다. 팬 단품 성능에 대하여 결과가 만족되면 스크롤, 허브(hub)구조등에 대한 상세설계를 3차원 모델링 프로그램인 I-Deas를 이용하여 진행한다. 설계결과는 다시 수치해석프로그램에 전달되어 적절한 형태의 격자가 구성되고 정상(steady)해석을 수행한다. 스크롤을 포함한 해석은 그 구조상 격자점의 과다로 해석시간이 상당히 요구되므로 팬 단품 해석이 주를 이루게 되며 통합해석은 성능 검증차원에서 진행된다. 통합해석에서 성능이 검증된 팬 및 스크롤은 Mock-up 제작과 풍동실험을 통하여 확인 과정을 다시 거쳐 최종 팬 사양으로 결정된다.

### 2.2 개발 모델 사양

2.1절에서 언급된 대로 설계조건은 제품에 따라 다르다. 본 연구에서 설계한 냉기 순환용 팬은 대형 냉장고에 적용되고 있는 것으로 최소 0.84CMM의 유량

이 확보되어야 하는 것으로 검토되었으며, 전압상승은 약 20Pa가 요구되었고 이 때의 회전수는 2400 RPM, 팬 직경은 95mm가 타당한 것으로 파악되었다.

### 2.3 개념설계 프로그램

개념설계 프로그램은 기본적인 유동 이론식과 실험식을 참고<sup>(4)</sup>로 하여 자체적으로 제작한 것으로 주어진 성능 및 효율을 만족하기 위한 최적의 설계변수를 도출하도록 되어 있다. 압력상승, 유량, 팬 외경, 회전수를 요구하며 날개 입구각의 변화에 따라 날개 안쪽지름, 출구각, 날개수, 날개 전/후의 높이가 제공된다. 설계변수들에 의하여 1-arc 혹은 2-arc의 형태로 날개형상이 자동 생성되어 격자형성 프로그램에 넘겨지며 격자형성 프로그램의 매크로(macro)기능과 연계되어 사용이 편리하게 구성되어 있다.

### 2.4 격자생성 및 원심팬 수치해석

팬 구조상 단품 해석은 하나의 날개를 포함하는 유동장(flow passage)에 대하여 수행한다. 개념 설계 프로그램에 의하여 자동적으로 생성된 격자계는 케이싱(casing)과의 간극등을 고려하여 후처리되며 필요한 부분에는 적절하게 격자밀집(grid stretching)을 행하여 수치해석의 정밀도를 높인다. 수치해석은 회전좌표계가 적용된 3차원 난류 N-S식을 FLUENT를 이용하여 진행된다. SIMPLE 알고리즘<sup>(1)</sup>에 의하여 유동장이 처리되고 난류모델링<sup>(6)</sup>은 k-e 2-equation 모델 및 표준 벽함수<sup>(7)</sup>를 사용한다. 단품 해석에 적용된 회전좌표계(rotating frame of reference)는 좌표변환<sup>(5)</sup>에 의하여 운동량 방정식에 원심력 및 Coriolis 힘이 유동장에 주어지고 날개 및 케이싱은 회전과 반대방향으로 움직이는 벽조건(wall condition)이 부가되는 방법을 말한다. 날개 끝단(tip)과 케이싱과의 간극은 팬 성능에 지대한 영향을 미치므로 해석에서 반드시 고려되어야 하는 요소로 알려져 있다<sup>(8)</sup>. 본 연구에서도 실제로 양산설계시 적용되는 최소 간극, 4mm를 적용하여 해석을 수행하였다.

스크롤 및 덕트를 포함하는 통합해석도 단품해석과 유사한 과정을 거쳐 이루어진다. 통합해석에서는 스크롤 형상을 입력받아 원심팬과 함께 모델링 및 격자형성을 하게 되며, 단품 해석에서와는 달리 원심팬 형상 전체가 포함되므로 계산량은 상당히 증가하게 된다.

스크롤 형상은 케이싱 곡선으로 널리 알려진 아르키메데스 나선<sup>(4)</sup>(Archimedean spiral)이나 대수 나선을 선택하도록 되어 있다. 통합해석에서 케이싱은 고정되어 있고 팬은 회전하는 요소이므로 전체 유동장에 대하여 회전좌표계를 적용할 수는 없다. 본 연구에서는 원심팬은 포함하는 원통형 유동영역을 따로 구분하여 회전좌표계를 적용하고 그 이외에서는 고정좌표계를 지정하여 두 영역간에서 정상(steady)해석이 이루어지도록 하였다.

### 2.5 성능실험

해석을 통해 결정된 원심팬 및 스크롤의 시작품을 제작하여 성능실험을 진행하고 해석결과와 비교하여 설계를 확정한다. 실험에 사용된 풍동장비는 ANSI/AMCA 210-85로 성능곡선 및 팬 효율이 계속되며, 회전수를 가변하여 실험하므로써 원심팬 적용에 필요한 성능데이터를 도출하게 된다.

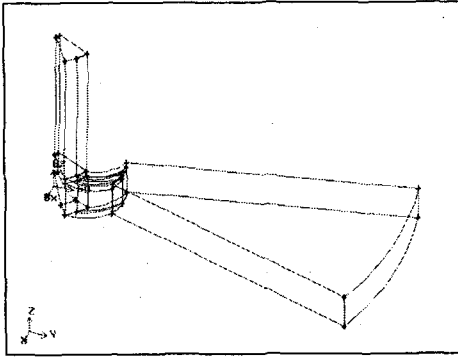
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 유동해석

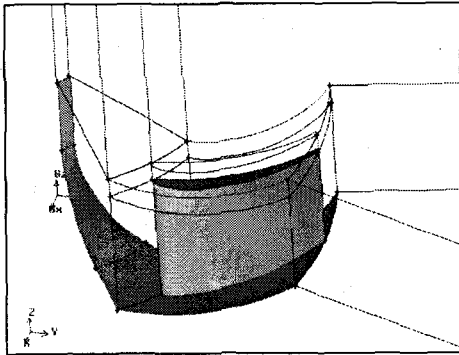
전술한 바와 같이 주어진 설계조건에 따라 날개 입구각을 변경하며 설계변수를 도출하고 단품 해석 및 스크롤 통합해석을 통하여 성능을 검증하였다.

Fig. 2에는 단품 해석과 관련된 유동장 및 격자구조가 도시되어 있다. 팬은 -Z축을 중심으로 회전하며 회전수는 2400RPM이다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 원심팬 날개 윗쪽으로 입구영역이 구성되며, 하나의 날개만으로 포함하는 유동장을 가정하여 날개와 날개 사이로 주기조건(periodic condition)을 적용한다. 날개 바깥쪽으로는 팬 직경의 5배에 해당하는 원방 출구영역을 형성하였으며 출구조건은 Neumann조건이 적용된다. 입구조건으로는 등전압 조건이나 속도 경계조건이 적용된다. Fig. 2(b)에서는 날개의 형상 및 케이싱과의 간극을 볼 수 있고, (c)에서는 적절히 밀집된 3차원 격자계를 볼 수 있다.

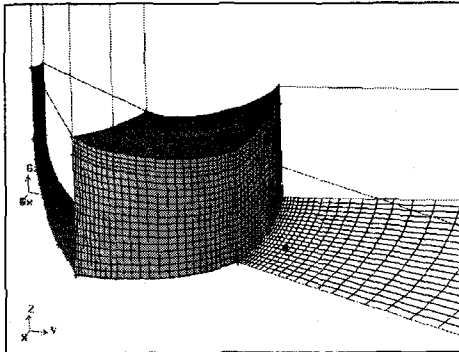
스크롤을 포함하는 통합해석은 스크롤에 의한 팬 성능의 변화 양상을 직접적으로 파악할 수 있고, 팬 단품 성능을 검증할 수 있다는 장점으로 해석의 어려움에도 불구하고 지속적으로 시도되어 왔다. 또한, 통합해석을 통하여 스크롤 자체의 성능향상도 꾀할 수



(a) schematic diagram for simulation



(b) enlarged

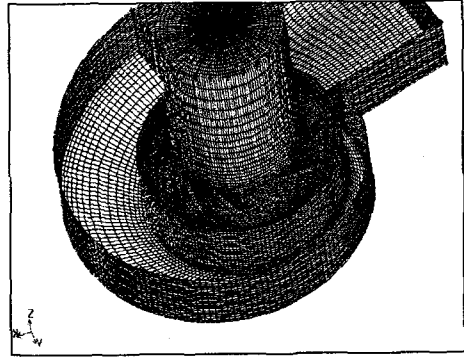


(c) grid system for blade

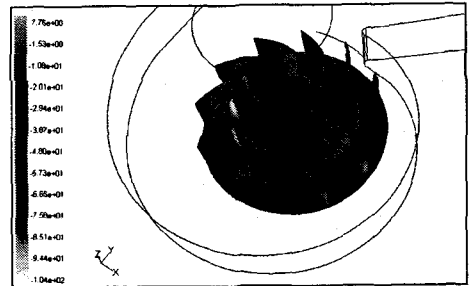
Fig. 2 Numerical simulation for a blade passage

있으므로 효율성은 크다고 할 수 있다.

본 연구에서 진행한 통합해석에 대한 한 예를 Fig. 3에 도시하였다. 격자 밀집 및 해석의 용이성을 위하여 다중 블록(multi-block) 형태로 원심팬 및 스크롤영역을 구분하여 수치해석을 실행하였는데 Fig. 3의 경우 전체 유동장이 89개의 블록격자계로 구성이 되어 있고 총 격자수는 90만개에 달한다. 스크롤은 정지해



(a) grids for calculations



(b) pressure distribution

Fig. 3 Fan simulation including scroll

있는 반면, 원심팬은 회전하게 되므로 원심팬 영역에 대하여는 회전좌표계를 적용하고 스크롤은 정지좌표계를 적용하는 정상해석을 수행하였다. 입구조건 및 스크롤 출구조건은 각각 전압조건 및 정압조건을 지정하여 팬의 회전에 의하여 자연스럽게 유동이 발생하는 흐름을 모사하였다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 팬 표면에 걸리는 정압력이 타당하게 분포하는 것을 확인할 수 있고 스크롤의 시작부는 타 부분과는 다른 압력 분포를 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 3차원 해석을 통하여 형상변경에 따른 성능변화를 확인하면서 원심팬의 최적 설계를 진행하였다.

### 3.2 성능해석 결과비교

먼저, 입구각 변화에 따른 단품 성능 수치해석을 수행하여 결과를 비교하였다. Table 1은 본 연구에서 고려한 해석 경우들에 대하여 개념설계 프로그램에 의하여 도출된 설계변수들을 정리한 것으로 입구각이 변화함에 따라 최적의 출구 날개각 및 안쪽지름이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 하나의 날개만을 고려한 단품 해석 결과도 같이 도시되어 있는데, 각 경우에 대

Table 1. Performance variations according to inlet and outlet angles

CASE	입구각 (deg)	출구각 (deg)	안쪽지름 (mm)	입구경계 조건 (Pa)	유량 (CMM)	전압 (Pa)	효율 (%)
1	15	16.3	81.3	0	0.48	9.05	52.3
				10	0.47	11.15	55.4
2	26.5	25.4	66.3	0	0.76	8.02	34.0
				10	0.70	13.31	41.7
3	30	28.1	63.2	0	0.77	10.33	41.9
				10	0.72	14.96	46.4
4	35	32.2	59.3	0	0.82	19.14	69.4
				10	0.76	21.65	67.4
5	40	36.6	55.9	0	0.87	21.5	63.3
				10	0.85	22.73	64.1
6	40	20	55.9	0	0.68	10.66	52.5
				10	0.59	28.76	91.5
7	40	30	55.9	0	0.79	11.8	47.9
				10	0.71	26.25	75.4

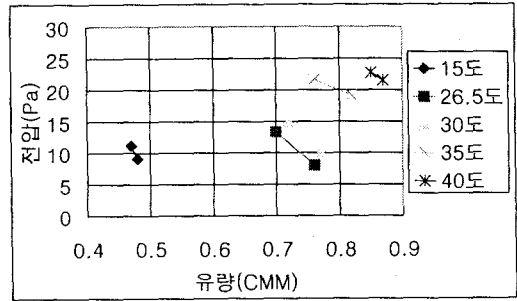
하여 성능곡선을 산출하기 위하여 입구조건을 두가지로 하여 해석하였고 효율도 같이 표시되었다. 전압 효율은

$$\eta = \frac{Q \Delta P_t}{\tau \omega}$$

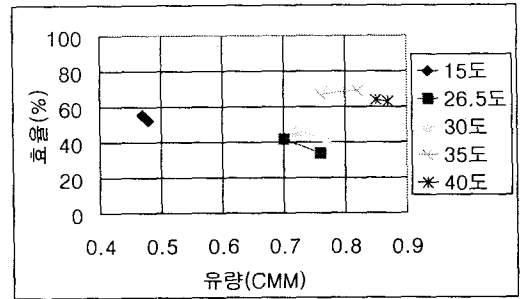
로 정의되었다.

Fig. 4에 입구 날개각 변화에 따른 성능곡선 및 효율 그래프를 도시하였다. 입구각이 15도에서 40도까지 변화에 따라 성능곡선은 지속적으로 상승하나 효율은 다르게 변화함을 확인할 수 있다. 성능 및 효율 경향에 따르면 목표 유량 0.84CMM 부근에서는 입구날개각 35도의 경우가 가장 효율이 좋다는 것을 알 수 있다. 효율이 높다는 것은 원심팬에 취부되는 모터가 동일할 때 회전수가 증가될 수 있다는 것을 의미하고 이것은 또한 성능의 상승으로 이어지므로 본 연구에서는 입구 날개각 35도가 요구되는 성능을 얻기 위한 최적의 원심팬이라고 판단하였다. 이런 판단은 덕트 손실 곡선을 고려하더라도 타당하게 받아들여 질 수 있다.

Fig. 5에는 동일한 입구 날개각에 대하여 출구 날개각을 변화시키며 단품 성능 해석한 결과를 도시하였다. 출구 날개각을 제외한 타 설계변수는 동일하게 유지하였다. 출구 날개각이 36.6도일 때가 개념설계로부터 나온 설계변수들로 이루어진 팬으로 가장 우수한 성능을 유지하고 있으며 목표유량 부근에서 가장 높은 효율이 될 수 있음을 확인할 수 있다.

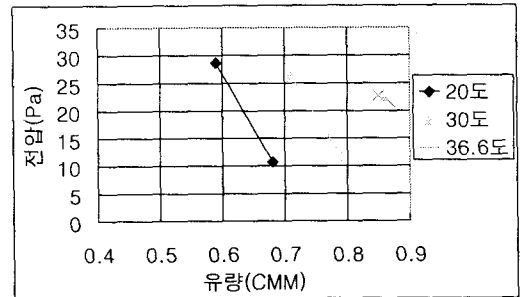


(a) performance curves

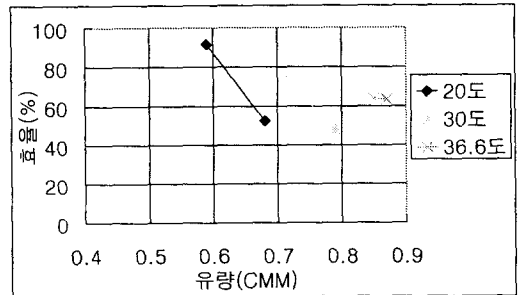


(b) efficiency curves

Fig. 4 Performance variations according to inlet angles



(a) performance curves



(b) efficiency curves

Fig. 5 Performance variations according to outlet angles

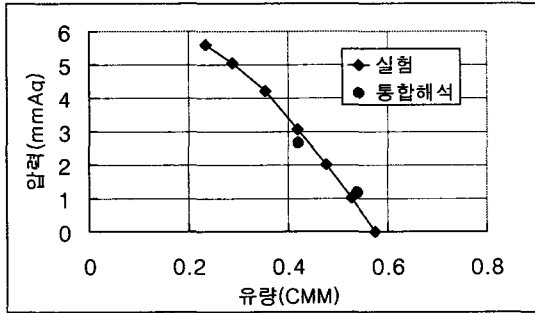


Fig. 6 Performance curves of numerical and experimental data

결과적으로 지금까지의 팬 단품 성능 수치해석 결과를 종합해 볼 때, 목표 유량 부근에서 가장 적합한 원심팬은 입구 날개각이 35도일 경우라는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 Table 1의 case 4를 최적 팬으로 선정하여 통합해석 및 시작품 실험을 수행하였다.

### 3.3 성능실험 결과비교

95mm 최적 팬으로 선정된 case 4의 설계변수를 이용하여 스크롤을 포함하는 해석을 수행하였고 시작품을 제작, 풍동실험을 통하여 얻은 성능데이터와 비교하였다. Fig. 6은 동일 회전수에서 비교된 통합해석 결과 및 성능실험 결과이다.

실험결과와 해석결과가 유사하게 일치하고 있음을 확인할 수 있으며 수치해석이 원심팬 설계 프로세스에서 상당히 유용하게 쓰일 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 지금까지의 개념설계, 수치해석, 실험을 통하여 설계되고 검증된 최종의 소형 원심팬을 보여 주고 있다. 본 연구에서 도출된 소형 원심팬은 현재 양산중에 있는 570Lt급 양분여단이형 냉장고에 적용되어 냉기 순환용 팬으로 사용되고 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 소형 원심팬 개발을 목적으로 이론 및 실험식을 이용한 개념설계 프로그램과 여러 수치해석 방법을 조합하므로써 일련의 원심팬 개발 프로세스를 구현하였다. 또한, 냉장고용 95mm 원심팬을 설계 진행함으로써 프로세스를 검증하여 보았고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개념설계로부터 출발하여 수치해석/실험을

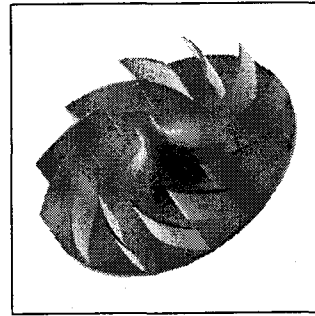


Fig. 7 Configuration of designed 95mm centrifugal fan

이용하여 설계변수를 확정하고 검증하는 본 설계 프로세스는 소형 원심팬 개발에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

2) 설계변수의 선별 및 확정에 사용되는 수치해석은 시작품의 제작 및 실험 수를 줄일 수 있어 개발기간이 단축되고 비용절감이 가능함을 확인하였다.

3) 스크롤을 포함하는 통합해석은 원심팬의 설계단계에서 중요하며, 실험과도 잘 일치하는 결과를 주어 신뢰성이 확보되었다고 판단된다.

## 5. 참고문헌

- (1) Patankar, S.V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, D.C.
- (2) 최동규 등, 1997, 팬 설계 시스템에 의한 냉장고 축류팬 개발, 한국 CAD/CAM 학회논문집, 제2권 제2호, pp. 85~92.
- (3) Wallis, R.A., 1983, Axial Flow Fans and Ducts, John Wiley&Sons Inc.
- (4) Eck, B., 1973, Fans, Pergamon Press.
- (5) 최동규 등, 1994, 축류팬 최적 설계 시스템 개발, 삼성그룹 CAD/슈퍼컴 사용자 대회 논문집.
- (6) Rhie, C.M. and Chow, W.L., 1983, Numerical Study of the Turbulent Flow Past Airfoil with Trailingedge Separation, AIAA J.Vol.21 pp.1525~1532
- (7) Chen, H.C. and Patel V.C., 1988, Near-Wall Turbulence Models for Complex Flows Including Separation, AIAA J. Vol.26 No.6 pp. 641~648
- (8) 강신형, 김영재, 1999, 임펠러 흡입구 간극이 원심형 에어포일 송풍기의 성능에 미치는 영향, 대한기계학회논문집 B, 23, 8 pp. 957~968.