

# PIV/POD 기법을 이용한 냉장고 냉기류 성능평가

김경천<sup>†</sup> · 김석로\* · 김종욱\*\*

## Performance Tests of the Frozen Air Flows in a Refrigerator using PIV/POD Technique

Kyung Chun Kim, Seok Ro Kim and Jong Wook Kim

### Abstract

A new evaluation method for the performance tests of the frozen air in a refrigerator using PIV(Particle Imaging Velocimetry) and POD(Proper Orthogonal Decomposition) techniques is introduced. A two-door refrigerator model was tested for the experiments. Actual temperature measurements were carried out for the drawer No.4 in refrigerator. By evaluating the characteristics of the interior flow of the refrigerator, an optimal shape of the drawer could be suggested through the PIV evaluation test. In this research, in order to find influences the turbulent kinetic energy contribution associated with the dynamic structures, we executed a POD analysis using the method of snapshots and the instantaneous fluctuating velocity field.

**Key Words :** Flow Visualization(유동가시화), Proper Orthogonal Decomposition(적합직교분해)

### 1. 서론

지구 온난화와 같은 환경 문제와 에너지 소비 증가에 따른 에너지 부족문제가 예상되면서 산업 전 분야에 걸쳐 에너지 절약이 주요 연구과제로 대두되고 있다. 가정용 및 산업용 냉장고의 소비 전력 저감의 효율적 방안으로는 냉장고내의 냉기류를 개선하는 방안이 현실적으로 적절한 대안 중의 하나로 볼 수 있다.

Hwang 등(2005)은 정량적 유동가시화 기법중의 하나인 3차원PTV(particle tracking velocimetry)를 이용하여 냉장고내의 냉기류 특성을 개선함으로써 소비전력을 저감시켰다. PIV기법에 의한 냉장고 냉기류의 해석사례로서, Baek(1999)등은 PIV를 이용한 냉장고 내부 유동해석을 하였으며 냉장고에 대한 PIV적용가능성을 제시하였다.

<sup>†</sup> 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

\* LG 전자㈜

\*\* 부산대학교 기계공학과

본 연구에서는 양문형 냉장고 drawer의 냉기류 성능평가를 위해 PIV 기법을 적용하였으며, PIV 기법을 통해 얻어진 순간 속도장에 대해 POD해석을 수행함으로써 유동장의 동적 구조 및 모드에 따른 난류 운동 에너지의 기여를 분석함으로써 냉기 개선에 동적 구조 및 난류 운동 에너지가 미치는 영향을 분석하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1는 냉기유동에 따른 온도분포와 냉기유동과의 상관관계를 알기 위한 PIV를 이용한 유동가시화 실험장치를 나타낸다. 냉기유동 성능 평가법을 PIV측정결과를 이용하여 실제 온도측정결과와 비교를 통하여 검증하고자 한다. PIV구성은 광원으로 Nd-Yag 레이저(15Hz, 120mJ), 고해상도 카메라(ES1.0, 1k x 1k, 30Hz), 호스트컴퓨터로 구성된다. Drawer내의 가시화를 위하여 오른쪽에 있는 smoke발생기(particle seeder)로부터 공급하되, smoke에 의한 냉장고내의 온도상승을 방지하기 위하여 smoke가 냉장실을 통과하여, 냉동실의 증발기로

통과한 다음 관측대상의 drawer에 공급이 되도록 하였다. 냉기유동 성능평가법의 검증을 위하여 양문형 냉장고의 4번 drawer를(최상부가 1번 drawer) 관측대상으로 하였으며, 온도측정결과로부터의 검증을 위해 PIV실험시의 실시간의 온도를 측정하기 위하여 Fig. 4.16과 같은 다점온도계를 사용하였다. 상용화 되는 그대로의 drawer형상(초기상태)와 냉기유동의 개선을 위해 drawer의 뒷면하부개방과 앞면 전면판을 설치한 형상(앞뒤개선)인 경우의 4가지 실험을 수행하였다.

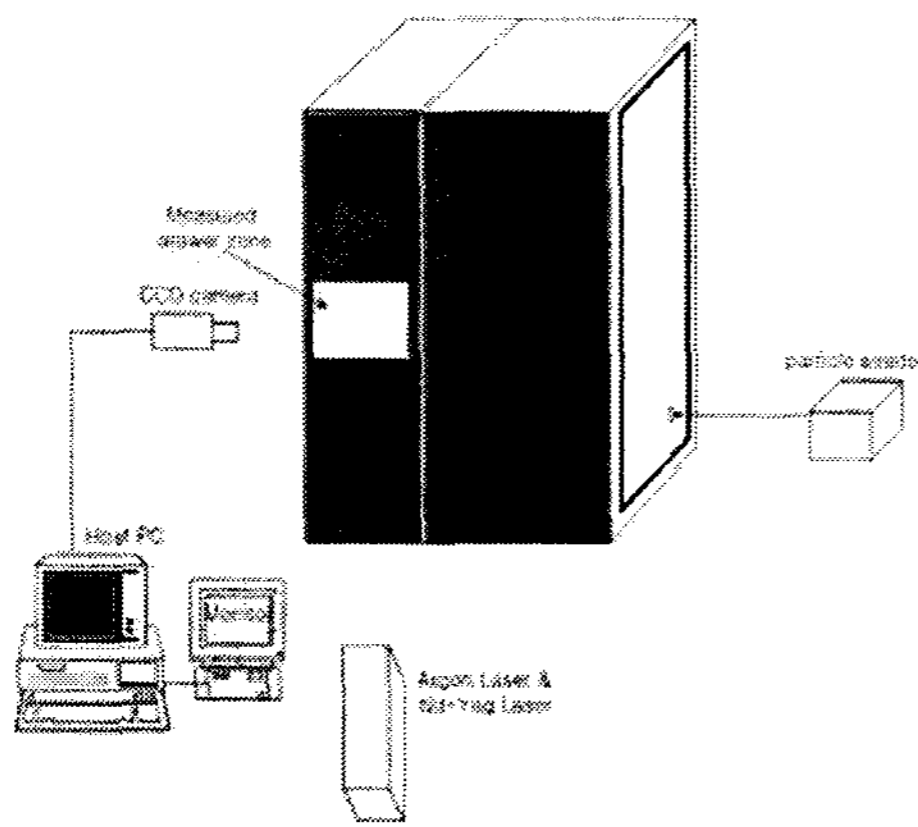


Fig. 1 Experimental apparatus for frozen air performance

### 3. Proper orthogonal Decomposition

POD (Proper orthogonal Decomposition) 해석에서는 유한한 물리적 공간  $\mathbf{x}$ 와 유한한 시간(혹은 앙상블)에서 정의되는 벡터함수  $\mathbf{u}$ 는 최적 직교 공간 모드 (optimal orthogonal spatial modes)와 최적 직교 시간 모드 (optimal orthogonal temporal modes)의 항들로 이루어진 선형급수로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_n a^{(n)}(t) \boldsymbol{\varphi}^{(n)}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

POD는 최적성(optimality)으로 특징지어질 수 있으며, 이는 POD는 급수의 부분합의 평균제곱오차를 최소화하며 POD를 통해 얻어진 급수는 다른 어떤 분해기법보다 예를 들면 푸리에 공간 분해 (Fourier decomposition) 등과 같은 다른 어떤 선형 분해기법보다 빨리 수렴한다는 것을 의미한다. 최적성을 다음과 같은 고유치 문제로 변환하여 해를 구함으로써 POD해석을 수행할 수 있다.

$$\int R(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \boldsymbol{\varphi}^{(n)}(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = \lambda^{(n)} \boldsymbol{\varphi}^{(n)}(\mathbf{x}) \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 고유치(eigenvalue)이며,  $R(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ 는

2점 상관 함수의 앙상블 평균을 의미한다. 공간기저와 시간기저의 직교성은 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이는 서로 다른 모드의 기저들은 독립적임을 의미한다.

$$\langle \boldsymbol{\varphi}^{(n)}(\mathbf{x}), \boldsymbol{\varphi}^{(m)}(\mathbf{x}') \rangle = \delta_{nm} \quad (3)$$

$$\langle a^{(n)}(t), a^{(m)}(t) \rangle = \lambda^{(n)} \delta_{nm} \quad (4)$$

벡터항의 개수가  $N_c$ 이고 공간위치의 개수가  $N$ 이며, 시간에 따른 샘플개수(혹은 앙상블 개수)가  $M$ 인 벡터함수  $\mathbf{u}$ 를 고려하면 공간기저, 즉 고유벡터는 고유벡터 공간기저와 시간기저의 직교성을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\boldsymbol{\varphi}^{(n)}(\mathbf{x}) = \frac{1}{M \lambda^{(n)}} \sum_{k=1}^M a^{(n)}(t_k) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t_k) \quad (5)$$

여기서  $k$ 는 시간에 따른 샘플들(혹은 앙상블 샘플들)의 순서를 나타낸다. 이와 같은 공간기저와 시간기저의 직교성을 이용하면 식 (2)에 나타난  $N_c N \times N_c N$  크기의 공간모드에 대한 고유치 문제를  $M \times M$  크기의 시간모드에 대한 고유치 문제로 변환할 수 있다:

$$\sum_{k=1}^M C(t_i, t_k) a^{(n)}(t_k) = \lambda^{(n)} a^{(n)}(t_i); i=1, \dots, M \quad (6)$$

여기서 상관 텐서(correlation tensor),  $C$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C(t_i, t_k) = \frac{1}{M} (\mathbf{u}(\mathbf{x}, t_i), \mathbf{u}(\mathbf{x}, t_k)) \quad (7)$$

$M \times M$  크기의 시간모드에 대한 고유치 문제는 Sirovich<sup>9</sup>가 제안하였으며, 스냅샷 방법(method of snapshots)으로 명명하였으며, 이와 대조적으로 공간모드에 대한 고유치 문제는 직접법(direct method)라고 명명하였다. 실제 적용 시, PIV 또는 수치해석을 통해 관찰된 난류 속도장과 같은 대부분의 벡터장은 격자 수가 앙상블 개수에 비해 매우 크기 때문에, 스냅샷 방법의 계산비용이 직접법에 비해 작아질 수 있다.

본 연구는 유동의 동적 구조와 난류에너지의 분포 및 영향을 조사하기 위해 해석을 초기 모델과 앞뒤개선 모델의 순간 난류 속도장에 대해 스냅샷 방법을 이용하여 POD 해석을 수행하였다:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) &= \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) + \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t) \\ &= \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) + \sum_{m=1}^M a^{(m)}(t) \boldsymbol{\varphi}^{(m)}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (11)$$

이때 계산된 고유치는 각 모드의 난류에너지를 나타낸다.

#### 4. 실험결과

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 초기 조건 일 때와 뒷면하부개방과 앞면 전면판을 모두 설치한 앞뒤 개선일 때의 단면에서의 평균속도벡터분포를 보인다. drawer상부측에 토출구로부터 나온 냉기가 도어쪽으로 향하고 있음을 알 수 있으며, 이 냉기류는 도어에 부딪혀서 drawer쪽으로 유입되게 된다.

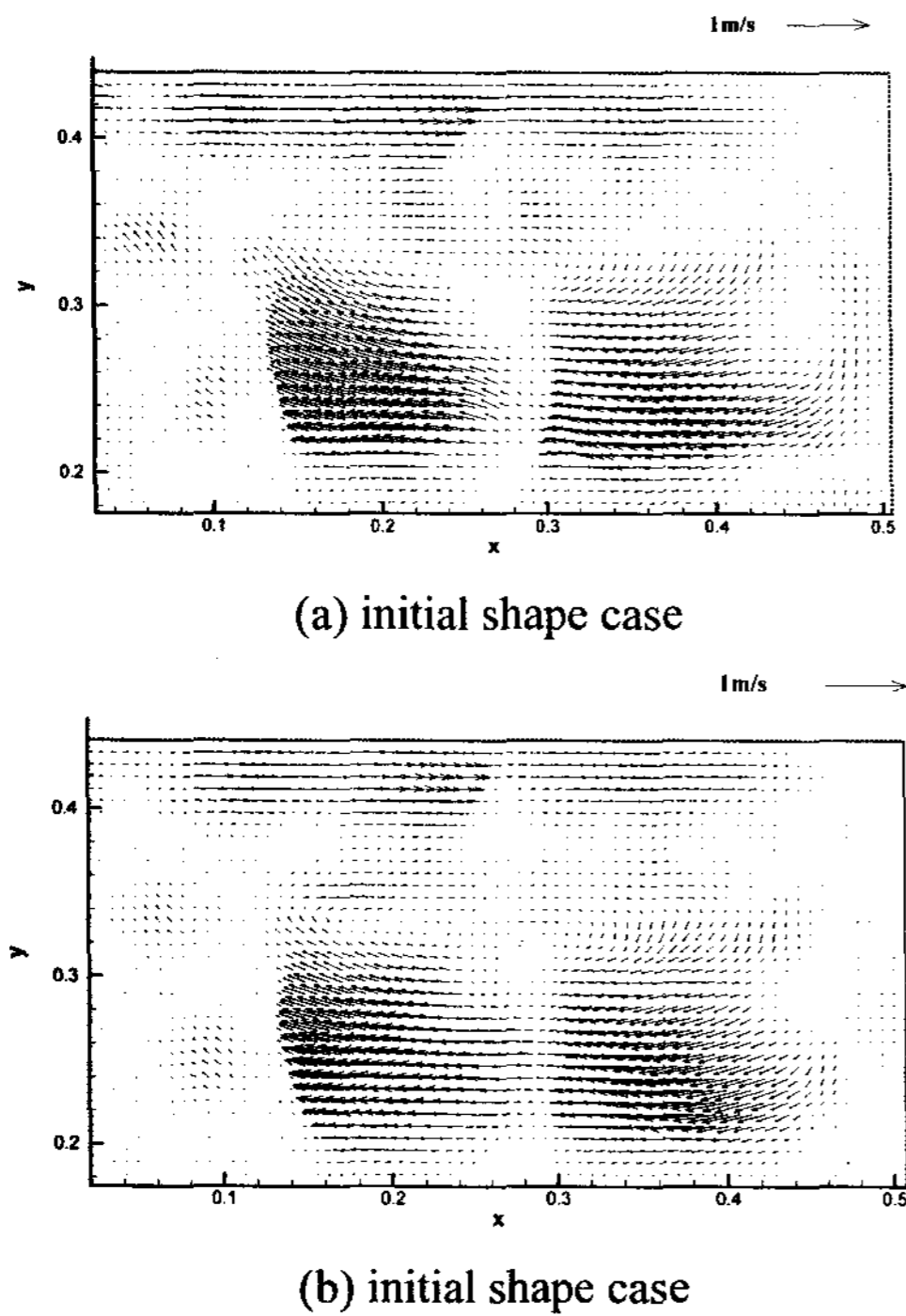


Fig. 2 Fig. 2 Mean velocity vector field.

Fig.3은 고유모드에 따른 누적 난류에너지의 백분율을 나타내며, 앞뒤개선 모델이 초기 모델이 초기 모델보다 빨리 수렴하여 앞뒤개선 모델의 고유모드가 보다 효과적으로 난류에너지를 추출해냄을 알 수 있다. 평균유동장을 0번째 모드로 설정하여 고유모드에 따른 유동의 누적 운동에너지의 백분율을 Fig.4에 나타내었다. 초기모델에서 평균 유동장의 운동에너지가 전체에너지의 77.3%이며, 난류운동에너지는 전체 운동에너지의 23.7%이며, 앞뒤 개선모델에서 평균 유동장의 운동에너지가 전체에너지의 69.8%이며, 난류운동에너지는 전체 운동에너지의 30.2%임을 알 수 있다. 앞뒤개선 모델이 전체 난류에너지의 백분율이 클 뿐만 아니라 스케일이 큰 난류의 동적 구조에 난류 운동에너지가 집중되어있음을 알 수 있다. 2가지 조건 모두 다 초기 11번째 모드까지의 운동에너지의 부분합은 전체

운동에너지의 90%를 차지하고 있다. 앞뒤 개선모델의 경우 초기 5번째 모드의 난류에너지의 부분합은 53.6%로 초기 모델의 36.9%에 비해 매우 큰 값을 알 수 있으며, 이는 앞에서 기술한 바와 같이 스케일이 큰 난류의 동적 구조에 난류 운동에너지가 집중되어있음을 확연히 보여주고 있다. Fig.5과 Fig.6은 각각 초기모델과 앞뒤개선 모델의 POD 해석을 통해 얻어진 난류유동장의 1~2번째까지의 고유벡터를 나타내었다. 1번째 고유벡터는 난류 유동장의 가장 지배적인 동적구조를 나타낸다. 그외 초기 모델들은 난류유동의 대표적인 동적 구조를 나타낸다. 초기 모델과 앞뒤개선 모델의 평균유동장은 전체적으로 시계방향으로 회전하는 유동형태로 대략적인 구조는 서로 유사함을 알 수 있다. 그러나 대응되는 모드에서의 고유벡터의 형상은 평균유동장과는 달리 상이함을 알 수 있다. 앞뒤개선 모델의 1번째 모드의 고유벡터는 1번째 고유벡터는 난류 에너지의 23.4%, 전체 운동에너지의 8%를 차지하고 있다.

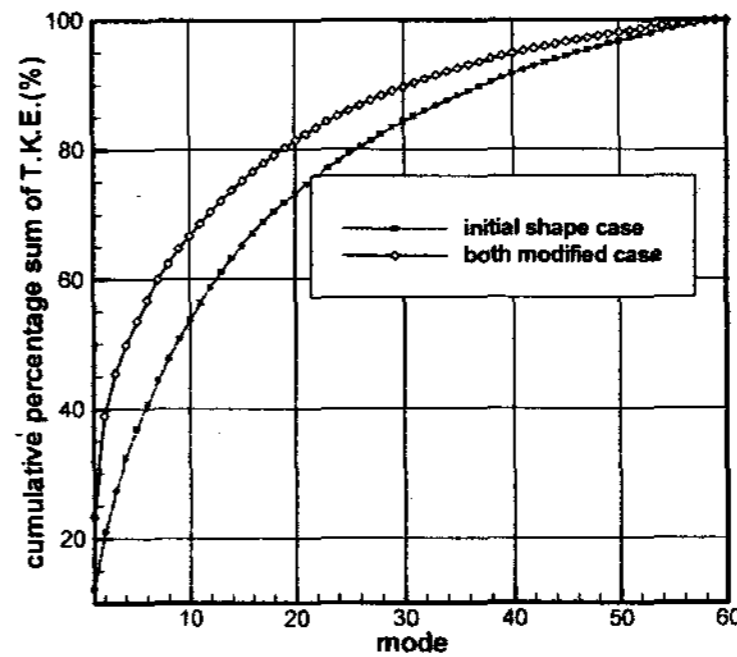


Fig. 3 Cumulative percentage sum of turbulent kinetic energy in case of initial shape case and both modified case

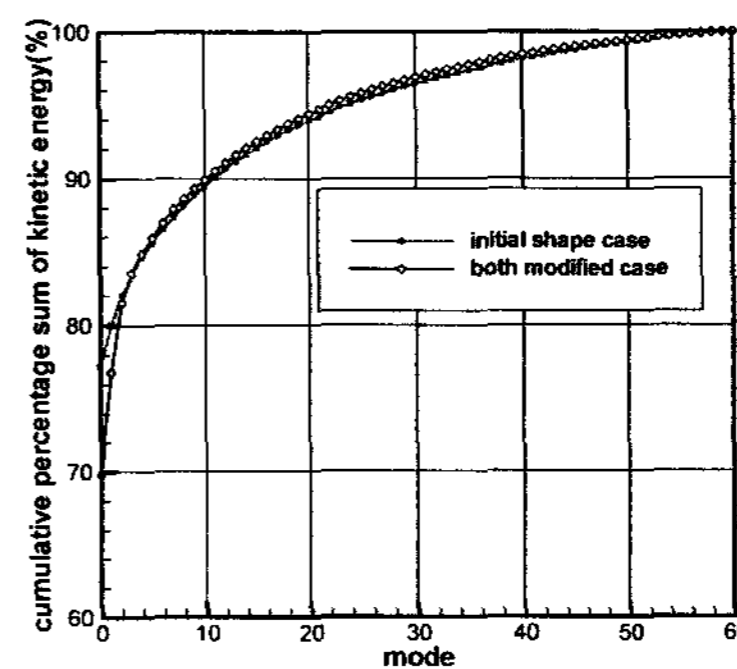
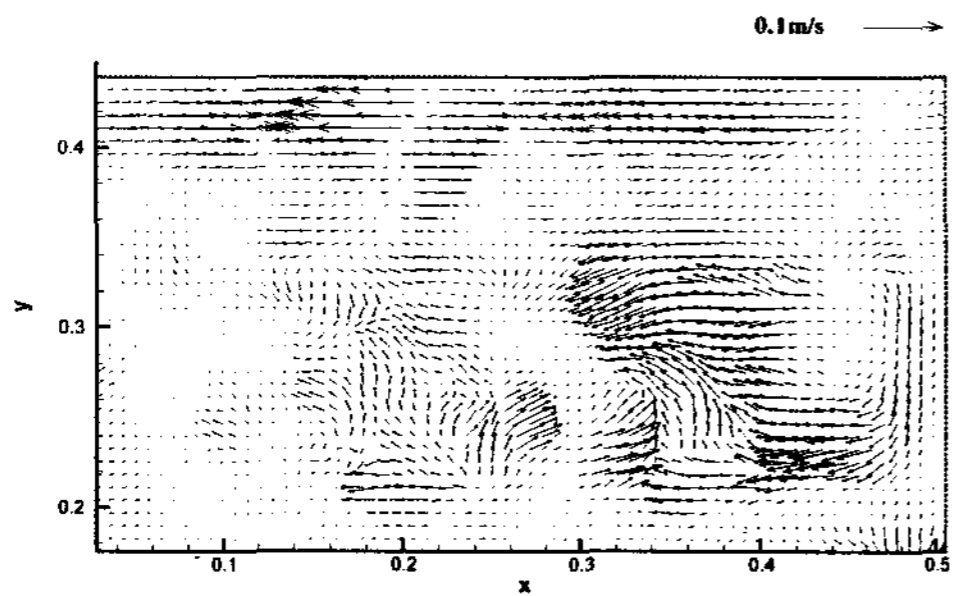
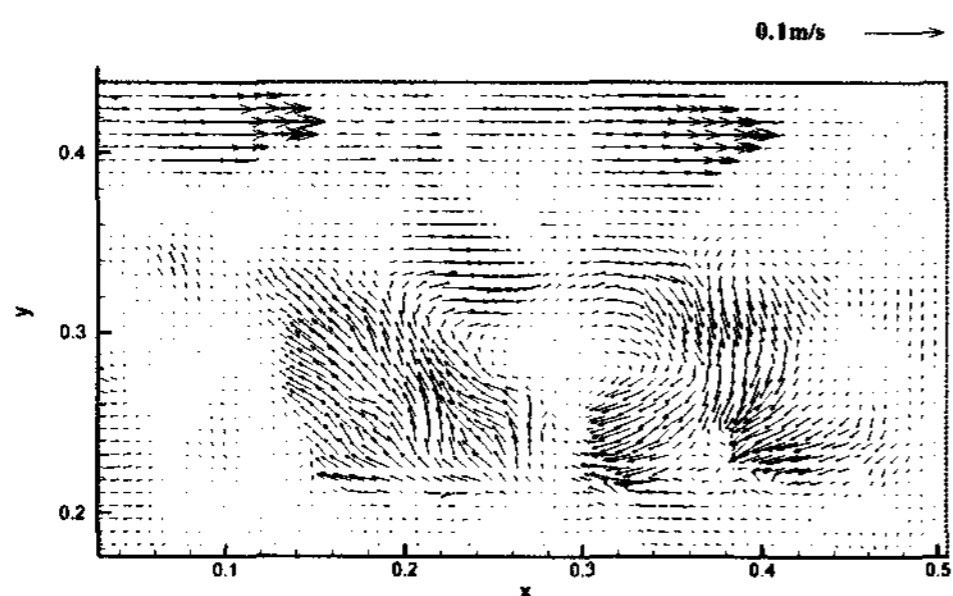


Fig. 4 Cumulative percentage sum of kinetic energy in case of initial shape case and both modified case

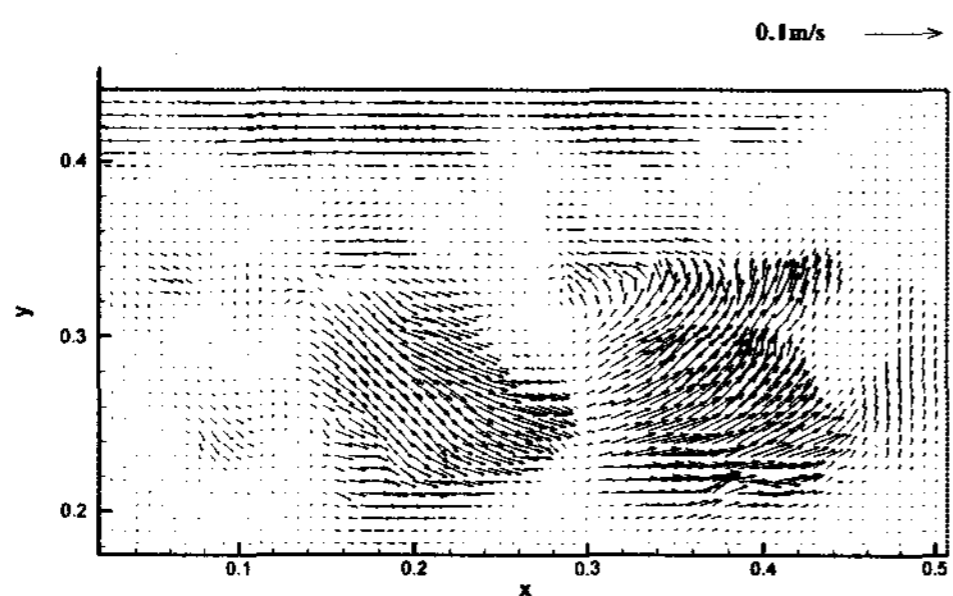


(a) 1<sup>st</sup> eigenvector

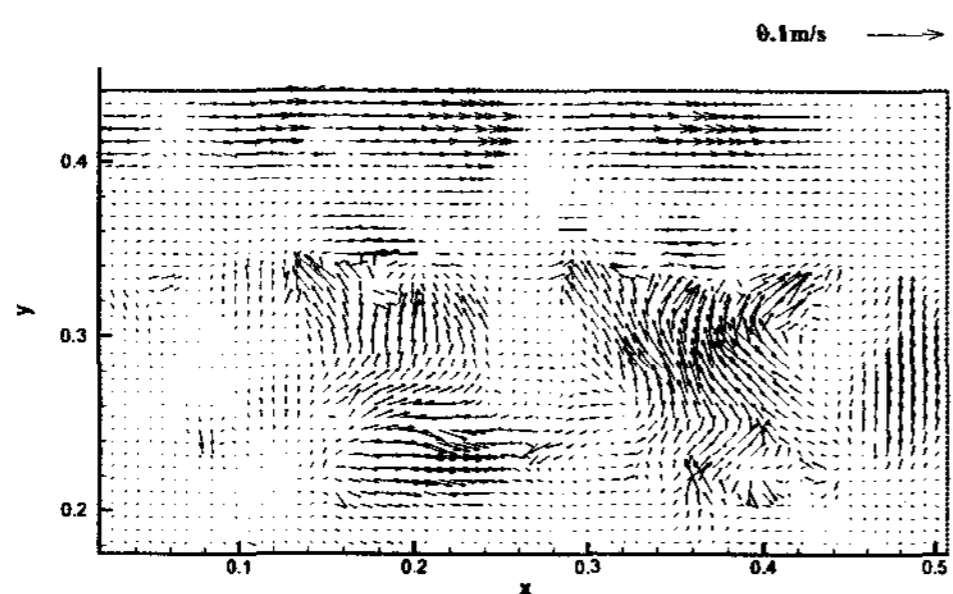


(b) 2<sup>nd</sup> eigenvector

Fig. 5 The eigenvectors of the lowest 2 modes of initial shape case



(a) 1<sup>st</sup> eigenvector



(b) 2<sup>nd</sup> eigenvector

Fig. 6 Fig.P3. The eigenvectors of the lowest 2 modes of both modified case

Fig. 7은 2가지 경우에서의 27개 점에서 측정된 온도측정결과를 보인다. 앞뒤개선인 경우에 drawer내부 온도가 모두 낮을 뿐만 아니라 온도분포도 가장 균일함을 알 수 있다.

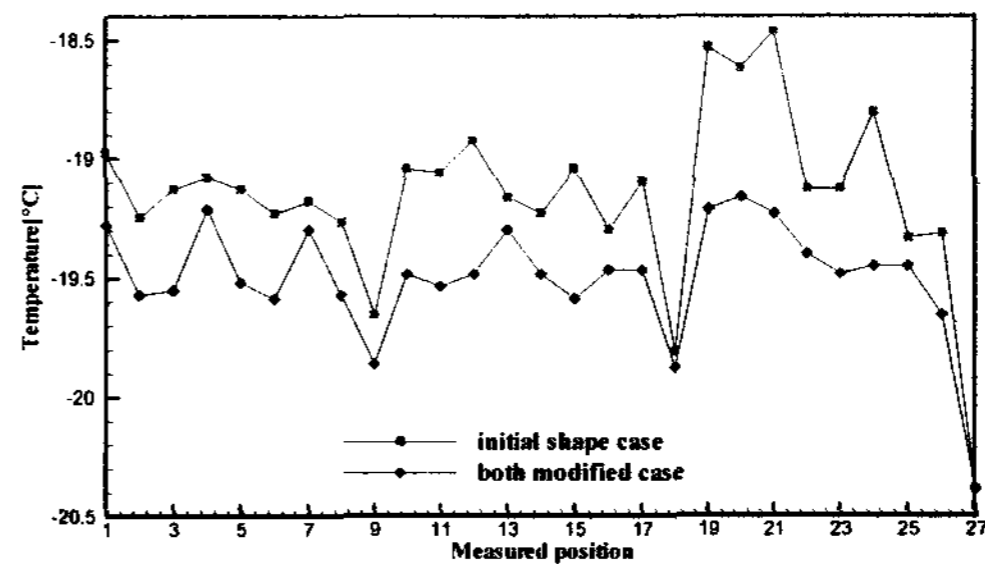


Fig. 7 Measured temperatures at the 27 points in the drawer.

이는 냉기유동 설계를 할 경우에는 난류 운동에너지가 클 뿐만 아니라 크기가 큰 동적 구조에 보다 큰 난류에너지가 집중되어 때문이며 이는 drawer내부와 외부와의 물질 및 열전달량이 많다는 것을 의미하며, 이로 인하여 drawer내부의 온도가 떨어지며 온도균일도도 좋은 상태를 나타냄을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 양문형 냉장고 내의 한 개의 drawer(No.4 drawer)에 대하여 초기상태의 경우, 앞뒤개선인 경우에 대해 PIV를 이용한 유동가시화 및 drawer의 온도 측정실험을 수행하였다. 그 결과 drawer의 앞뒤개선을 하는 것이 합당한 것으로 나타났다. PIV 기법을 통해 얻어진 순간 속도장에 대해 POD해석을 수행함으로써 난류운동에너지 분포가 냉기류 개선에 미치는 영향을 분석하였다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Hwang, T. G., Doh, D. H., Park, S. R., Bang, Y. S., Yang, M. C., Jang, G. S., Kim, S. R., Lee, Y. W., 2005, "Power Savings of a Refrigerator with 3D - PTV Measurements," Journal of SAREK, Vol.17(12), pp. 1145~1153
- 2) Baek, S. J., Lee, I. S., Chung, M. K., 1999, "A study on the air flow characteristics in a refrigerator using PIV," Proc. SAREK Summer Conference, Vol.2, pp. 1014~1019.
- 3) Lumley, J. L., 1967, The Structure of Inhomogeneous Turbulent Flow. In A. M. Yaglom and V. I. Tatarski, editors Atmospheric Turbulence and Wave Propagation, pp.166-178.
- 4) Sirovich, L., 1987, Turbulence and The Dynamics of Coherent Structures PART I : Coherent Structures. Quarterly of Applied Mathematics, pp.561-571.