

PIV와 CFD에 의한 LNG선박의 Hood room 환기특성에 관한 연구

조대환*, 김동찬**, 김만웅**, 이영호***

A Study on Ventilation Characteristics of LNG Carrier Hood room by PIV and CFD

D. H. Cho*, D. C. Kim**, M. E. Kim**, Y. H. Lee***

Key Words : PIV(입자영상유속계), LNG(액화천연가스), Image Intensifier Camera(영상강화카메라), Stagnation area (정체구역)

Abstract

LNG Carriers are currently known as sole commercial means of shipping natural gas on the sea. They are designed to preven dangerous explosion for shipping a lot of gas over long distance. In this study. In this study, a scaled model chamber was made to investigate ventilation characteristics of the hood room in LNG carrier. Experimental study was performed in model using visualization equipments with laser apparatus and image intensifier CCD camera gated by an AOM controller. Twelve different kinds of measuring area were selected as experimental condition. Instant simultaneous velocity vectors at whole field were measured by using 2-D PIV system which software adopts two-frame grey-level cross correlation algorithm. To look into stagnation area of hood room for LNG carrier, a three-dimensional numerical simulation with standard k-ε model was carried out by using PHOENICS for three kinds of Reynolds number, 6.5×10^3 , 9.7×10^3 and 1.29×10^4 , based on the cavity inlet velocity and cavity height.

The flow pattern showed the large scale counter-clockwise forced-vortex rotated at center area, small eddies at each corner and stagnation area located at left-back upper side of model.

1. 서 론

LNG(liquefied natural gas : 액화천연가스)란 메탄을 주성분으로 하는 천연가스를 영하 162 ℃로 냉각하여 그 부피를 6백분의 1로 줄인 무색 투명한 초저온 액체이다. LNG는 화학적으로는 색깔과 냄새가 없고, 탄광에서의 폭발과 같이 산소와 혼합하면 폭발의 위험이 있다. 특히 고온의 수증기와 작용하면 수소가스를 발생 ($CH_4 + H_2O = 3H_2 + CO$)시켜 취급에 매우 주의하여야 한다. 또한 액화비중과 가스비중이 각각 0.425 (물 = 1)와 0.555 (공기 = 1)로서 공기 중에 부유하는 성질을 갖고 있다. 이러한 액화천연가스가 에너지자원으로 등장함에 따라 이 가스를 에너지로 이용하기 위해서는 생산기지에서부터 수요지의 인수지까지 대량으로 수송할 수 있는 효율적인 운반수단이 필요하게 되었다. 우리 나라에서도 액화된 천연가스를 수입하여 각 지역의 LNG기지에 저장한 후 다시 기화시켜 지하배관을 통해 도시가스 및 발전용 연료로 사용하고 있다.

LNG선의 설계 및 건조는 LNG의 물리적 특성에

의해 영하 162℃의 초저온에 견딜 수 있는 화물 적재장소를 갖추어야 할 뿐 만 아니라 취급이 매우 위험하므로 여객의 편의와 안전을 중시하는 여객선과 함께 조선공업 전반에 관한 최고 수준의 건조기술이 필요하며, 또한 LNG는 증발성 및 가연성의 성질을 갖고 있고, 시스템상 증발 가스를 기관실로 보내 추진 연료로 사용하고 있으므로 누설의 위험이 있는 곳에는 누출 경보장치와 함께 충분한 환기가 이루어 질 수 있도록 설계되어야 한다.

후드실(vent hood room)은 LNG선의 화물의 이송 경로를 결정하는 밸브가 가장 많이 설치된 장소이며, 기관실로 가는 기화된 가스가 혼합된 LNG가 기관실로 이송되는 경유지로서 가스의 누출 위험이 큰 구역이다. 국제협약 과 관련해서는 IGC code¹⁾(International code for the construction and equipment of ships carrying liquid gases in bulk)에 다음의 규정이 있다.

● 12장 1절 : 통풍장치는 그 구역의 총 용적을 기준으로 하여 시간당 30회 이상의 환기능력을 가지는 것이어야 한다.

● 13장 6절 : 화물펌프실, 화물 압축기실, 화물을 취급하는 기기용 전동기실, 가스안전장소로 지정되지 아니한 화물제어실에는 의무적으로 가스탐지기를 설치해야 한다. 환기 구조와 관련된 연구^{2),3)}는 주로 수치적 모델링을 통한 연구결과들이 시험적 연구보다는

* 목포해양대학교 기관공학부

** 한국선급

*** 한국해양대학교 기계·정보공학부

많이 보고되고 있으며, 이러한 기술들은 모두 내부유동패턴을 개선하여 환기구조에서 정체구역을 없애는 것을 목표로 하고 있다.

Wurtz¹⁾는 장방형의 공간에서 공기유동 및 온도분포에 대하여 3-D 수치해석을 하였고 상용코드인 FLUENT의 결과 및 실험결과와 비교하였다. 그러나 온도분포에서 FLUENT와 상이한 점을 보인 점에 대한 명확한 견해가 나타나 있지 않은 점이 지적된다.

Denev⁵⁾는 하나의 유입구와 두 개의 배출구를 갖는 실내공간을 다중격자방식으로 모델링하고 공기 중에 부유해 있는 오염물질입자를 배출과정에 대해 수치해석을 행하였다.

이와 같은 배경으로 이 연구에서는 LNG선박의 Hood room을 대상으로 축소모델을 제작하여 모형실험과 수치해석에 의해 환기 조건을 검토하고 정체구역을 파악하였다.

2. 실험장치

2.1 PIV 실험장치

Fig. 1은 H 조선소에서 건조하고 있는 Dead weight 69000 ton, 배의 전장 268.5 m, 배의 최대 속도 20.3 knot, 기관 마력 38900 PS인 멤브레인형 LNG선의 후드실을 1/15로 축소한 모델의 구조를 개략적으로 보이고 있다. 설명의 편의를 위해 유동장을 구역(block), 단면(section) 그리고 영역(area)으로 구분한다. 그리고 모델에서의 좌표축은 X:가로, Y:세로, Z:스팬방향으로 정의하고 원점(0,0,0)을 선미측(후면)의 좌측 하부의 모서리로 정하였다. 구역은 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 $x/X=0.5$ 와 $z/Z=0.5$ 로 분할하여 "A", "B", "C" 그리고 "D"의 구역으로 하였다. 여기서 공기가 유입되는 입구의 중심위치는 좌측벽면에서 $z=0.75$ 이며, 배기구의 중심위치는 상부벽면에서 $z=0.3$ 의 위치이다. Fig. 2에 이 연구에서 채택한 후드실의 속도장의 계측단면을 나타내었다. 여기에서 각각의 계측단면은 원점에서 Z축방향으로 $z=0.30$, $z=0.75$ 그리고 $z=0.95$ 의 3단면이다. 그림 설명의 편의를 위하여 이 세 단면을 벽면으로부터 가까운 계측단면으로부터 벽주위단면(wall section), 유입단면(inlet section) 그리고 격벽중앙단면(mid section)으로 구분한다. 벽주위단면의 경우 선수측 벽면으로부터 실선에서는 약 0.25m, 모델에서는 16mm의 거리에 있다. 유입단면은 좌측의 흡입구의 중앙을 연장한 단면이며 격벽중앙단면은 Fig. 1에서 보이는 배기구의 중앙부분을 연장한 단면이다. 그리고 각 단면에 대하여 Fig. 2와 같은 4개의 계측영역을 설정하였다. 그리고 Table 1에서는

각 영역의 원점좌표와 속도장에 대한 PIV계측결과에서 각 영역의 최대속도 및 식 1에 의해 구한 평균속도도 함께 나타내었다.

$$Avg. = \frac{\sum_{x,y=1}^{i \times j} V_{x,y}}{(i \times j)} \quad (1)$$

후드실의 환기방식은 좌측의 외기 입구로부터 유입된 공기가 후드실을 순환하며 우측 상부의 배기구를 통해 배출되는 배기식 동력통풍 방식이다. 후드실의 내부에는 x축 방향으로 중앙부위에 스펠방향(Z-axis) 0.5 위치에 격벽이 설치되어 있고 중앙부에는 통기구가 설치되어 있다. 그리고 우측 상부에는 그림 1에서 나타나 있는 것과 같은 가로 및 세로가 600 mm × 560 mm의 배기구가 설치되어 있다. 실제 선박에서 후드실은 장방형의 공간으로 가로와 세로 그리고 높이가 12.15 m × 4.20 m × 4.95 m이고 가시화 실험을 위한 모델은 1/15 크기인 0.81 m × 0.28 m × 0.33 m이다. 실험은 모델의 측면에 설치된 수조를 이용하여 작동유체를 펌프로 강제 순환시켜 행하였다. 작동유체는 수도수로서 소형 원심펌프를 이용하여 모델 상부 배관으로부터 흡입하여 디지털유량계를 거쳐 수조로 순환 되도록 하였다. 수조의 물은 모델의 좌측 흡기구로 부터 유동장의 내부로 유입된다. 펌프의 최대유량은 0.1 m³/min이며 유량은 출구밸브를 조절하여 조정하였다. 실험조건으로는 환기횟수를 30회로 설정하였으며 유동장의 전체체적에 대해 디지털 유량계(ISOIL사, Model:MC108-G7)에 의해 측정된 유량으로 계산하였다. 유량계의 설치위치는 펌프의 출구밸브와 수조의 사이이며 신호 대 잡음비의 개선을

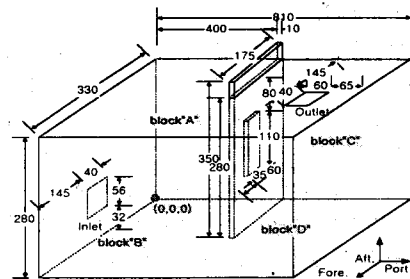


Fig. 1. Model dimension of LNG carrier hood room

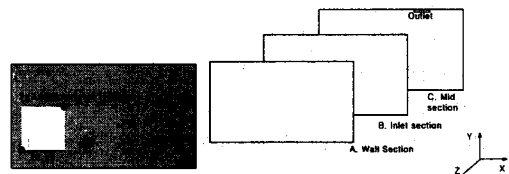


Fig. 2. Measuring section of hood room

위하여 지면에 접지 하였다. 유량계의 공칭내경은 40 mm이며 신호입력주기는 0.5초이고, 측정값은 24회의 계측치를 평균하여 구하였다.

계측 영역에 대하여 레이저를 조사하여 2차원의 단면으로 가시화 하였고, 실험시의 영상은 NTSC방식의 비디오신호를 Hi-8mm 캠코더에 기록하였다. 카메라와 광원을 제어함으로써 넓은 유동장 또는 고속 유동장에서 조명이 부족할 경우 좋은 영상을 얻기가 매우 어렵게 된다.

본 연구에서는 영상강화 CCD카메라(Image Intensifier CCD Camera, Hamamatsu사, C4273)를 사용하고, 이득(gain)을 조절하여 이러한 실험적 문제를 해결하였다. 조명조건은 펄스폭 30 μ s, 펄스간격 420 μ s이며 레이저의 출력은 3.26W이다.

2.2 계산조건

수치계산에서는 실제선박의 후드실을 실측하여 모델링 하였고 환기횟수를 계산의 변화요소로 채택하였다. 계산에 적용된 후드실의 격자분포는 Fig. 3에 나타내었다. IGC규정에 의해 환기횟수 30회를 기본으로 하고 실험에서 정채구역이 파악된 만큼 환기횟수를 45회와 60회로 증가하면서 계산을 행하였다. 이 연구에서 채택한 후드실은 폭(X)과 높이(Y)가 12.35 \times 4.2m인 장방형이며 길이(Z)는 4.95m이며 벽면에서의 슬립은 없는 것으로 하였다. 그리고 유입구의 속도는 환기횟수에 따라 0.345 m/sec, 0.520 m/sec 및 0.693 m/sec이다. 수치계산에서 격자는 계산의 안정성과 밀접한 연관이 있을 뿐만 아니라 계산시간에 많은 영향을 미친다. 격자배치는 직교좌표계 상에서 등간격 격자를 사용하였으며 속도구배가 큰 Y방향으로 1.5배로 조밀하게 배치하였다. Table 1 및 Fig 3에 계산조건과 격자배치를 나타내었다.

Table 1. Computational conditions

Item	Conditions	
Flow field	X \times Y \times Z	0.81 \times 0.28 \times 0.33(m)
Reynolds Number	Re	6.5 \times 10 ³ , 9.7 \times 10 ³ , 1.29 \times 10 ⁴
Grid Number	M _X \times N _Y \times D	72 \times 38 \times 42
Max. Grid Size		0.01125(m)
Min. Grid Size		0.00734(m)
In Flow Condition	U _m	0.347 m/sec
		0.520 m/sec
		0.693 m/sec

본 연구에서는 유동장의 지배방정식을 풀기 위해 열·유체 상용코드인 PHOENICS (ver 2.4.1)을 사용하였으며 계산조건은 Table 1과 같다.

$$Re = \frac{\rho v_{in} D}{\mu} \quad (2)$$

여기서 v_{in} 는 유입구의 평균유속이며, D는 대표 길이로서 모델의 높이이다.

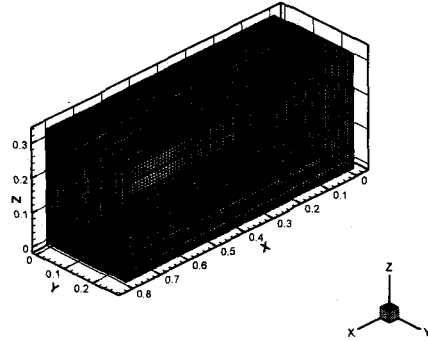


Fig. 3. Calculation grid system

3. 결과 및 고찰

3.1 PIV 계측결과

Fig. 4는 실험유동장의 개략도로서 내부유동의 흐름패턴이 간략히 도시되어 있다. 전체적인 유동패턴은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 크게 3가지로 나누어 설명할 수 있으며 그 중 전체유동패턴에 가장 큰 영향을 미치고 있는 유동형태가 나선형의 "L"형 유동이다. 촬영된 영상을 관찰하여보면 유동장의 좌측 벽면의 흡기구로부터 대각방향의 우측상부로 흐르는 흐름(A)과 미처 출구로 빠져나가지 못하고 중앙격벽의 통기구로 역류하는 흐름(D)이 이러한 유동형태를 보이고 있다. 두 번째로는 주유동의 영향으로 발생한 2차와류가 전체유동장의 중앙부분에서 재순환(B)하고 있는 흐름을 들 수 있다. 재순환 하는 방향은 크게 높이방향(y축)과 스펠방향(z축)으로 대별된다. 좌측벽면의 입구로부터 유입된 흐름은 배기구측으로 진행하면서 "U"의 형태로 높이 방향과 스펠방향으로 회전하며 진행하게 된다. 세 번째로 출구 측에 근접하여 주위의 유체를 흡입하여 배기하는 흐름(C)이다. 세 번째의 유동의 흐름특성을 규명하기 위해서는 보다 개선된 실험기법이 필요하며 이 연구에서는 3차원 수치해석의 방법으로 보완하였다.

Fig. 5는 후드실의 흡입구의 중앙부분을 관통하는 단면(inlet section)을 Fig. 1과 Table 2에서 나타낸 바와 같이 네 개의 영역으로 분할하여 속도장을 계측한 결과이다. 어느 경우이나 좌측에서 우측으로 향하는 주 흐름이 나타나 있다. Fig. 5(a)의 경우는 흡입

구 및 바닥 면으로부터 40mm 떨어진 위치로부터 가로, 세로 180mm의 크기를 갖는 계측영역을 설정하여 얻은 PIV 결과이다. Fig. 5(b)에서 보면 강제와류와 유사한 구조의 시계방향으로 회전하는 와류를 볼 수 있다. 이 와류의 위치는 중앙의 격벽을 기준으로 2/3가 B구역으로 치우쳐 있고 전체 와류의 크기는 전체 유동장의 가로축(x)과 세로축(y)의 길이에 대하여 약 $x_v/x=0.4$, $y_v/y=0.5$ 정도이다. Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)는 중앙격벽의 우측구역에 해당한다. Fig. 5(c)에서 보면 좌측하부에서 우측상부로 흐르는 주유동이 크게 나타나 있고 우측상부에는 2차와류가 일부 나타나 있다. 우측상부에서 벡터의 크기가 다소 작게 나타나고 있다. 이것은 하부의 2차와류와 배기구측으로 배기되는 흐름의 영향이 3차원성이기 때문이다. 그리고 좌측영역에 Fig. 5(b)의 2차와류의 우측부분이 일부 보이고 있다.

Fig. 5(d)는 벽면의 영향을 관찰하기 위하여 계측 단면의 우측하부의 영역에 대하여 속도를 계측한 결과이다. 촬영된 영상을 관찰하여 보면 우측벽면과 하부면에서는 작은 규모의 와류가 회전하며 이동하고 있는 현상을 볼 수 있다. Fig. 5는 이러한 순간의 벡터분포를 100프레임 중첩하여 나타낸 시간평균의 분포도이므로 벡터의 크기가 감소하여 작게 나타나 있다.

이러한 현상은 나선형의 주 흐름의 유동구조와 유동장 내부에서 큰 속도구배의 영향으로 추정되며, 이러한 현상을 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

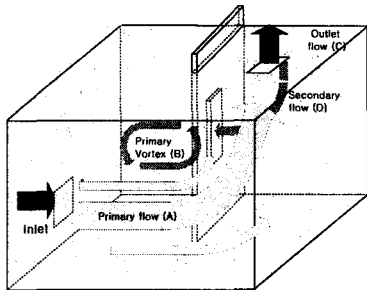


Fig. 4. Schematic diagram of hood room flow pattern

3.2 계산결과 및 고찰

Fig. 8부터 Fig. 10까지는 3차원 수치계산의 속도 분포를 $z/Z=0.47$, $z/Z=0.73$ 그리고 $z/Z=0.05$ 에 대해 xy 단면으로 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 환기횟수 30회의 경우에 대한 흡입단면의 속도분포로서 PIV계측 결과와 비교하면 속도분포가 비슷함을 알 수 있다. Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)는 환기횟수를 각각 45회와 60

회로 증가시켜 계산한 결과이다. 흡입단면에서는 레이놀즈수가 증가함에 따라 유입부에서 배기구로 흐르

Table 2. Definition of measuring region

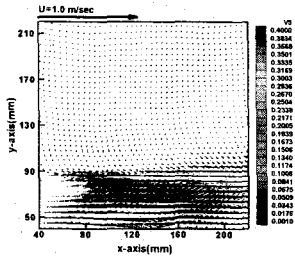
section	Area: x,y (mm)	Max. V. (m/sec)	Avg. V. (m/scc)
inlet section $z/Z=0.75$	s1:40.40	0.6099	0.1687
	s2:220.40	0.3923	0.1185
	s3:400.40	0.1961	0.0913
	s4:630.40	0.1268	0.0653
mid section $z/Z=0.30$	m1:90.50	0.0910	0.0385
	m2:270.50	0.1457	0.0549
	m3:450.50	0.0938	0.0467
	m4:630.50	0.0881	0.0387
wall section $z/Z=0.95$	w1:40.0	0.1516	0.0343
	w2:220.0	0.1091	0.0402
	w3:410.0	0.2064	0.1041
	w4:630.0	0.1911	0.1120

는 주유동과 중앙부분에 형성된 2차와류의 세기가 커지는 경향을 보이고 있다. 2차와류의 위치는 xy 단면의 기하학적 중심에서 약간 좌측상부($x/X=0.47$, $y/Y=0.51$)로 치우쳐 있다.

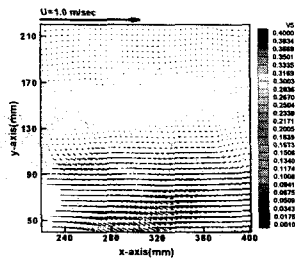
xz 단면과 yz 단면의 그림은 생략하였으나 와류의 중심은 스펠방향으로 $z/Z=0.7$ 정도 치우쳐 있으며 유입구로부터 배기구까지의 대각방향에 위치하고 있다.

Fig. 9는 중앙격벽의 통기구를 관통하는 단면의 수치계산 결과이다. 통기구를 통해 입구측으로 역류한 흐름에 의한 2차 와류가 나타나 있다. 속도분포의 전체적인 흐름의 경향이 우측에서 좌측으로 s 형하고 있는 것은 "B"구역에서 "C"구역으로 흐르는 주유동과 우측벽면에 충돌하여 "U"자의 형태로 회전하여 흐르기 때문이다. 후드실의 구조상 배기구가 직각으로 설치되어 있기 때문에 우측벽면과 상부벽면주위의 유동은 배기구로 유출되지만 급격한 유로의 변경으로 일부가 통기구를 통하여 "A"구역으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 흐름이 "B"구역으로 이동하면서 주 흐름과 합류하게 된다. Fig. 10은 벽면주위의 흐름을 보이고 있다. 이 단면에서 나타나는 전체적인 와류의 형태는 레이놀즈수가 증가하여도 거의 유사한 거동특성을 유지하고 있으나 주유동의 속도가 증가한 만큼 흐름의 세기도 커짐을 알 수 있다.

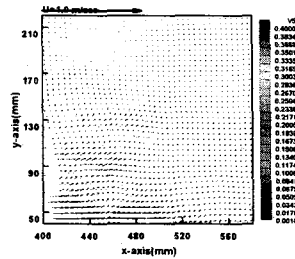
LNG 선박은 폭발 등의 위험요소를 배제하기 위하여 안전운항과 관련된 문제를 설계에서부터 적용하고 있다. 후드실의 경우 밸브 등의 조작성에서 발생된 가



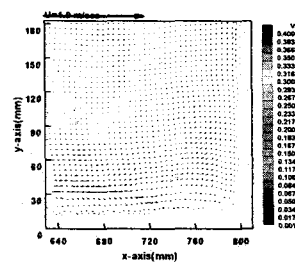
(a) Measuring area : s1



(b) Measuring area : s2



(c) Measuring area : s3

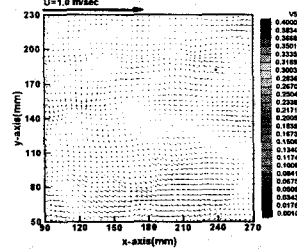


(d) Measuring area : s4

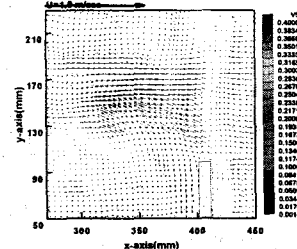
Fig. 5. Time-mean velocity vector at inlet section

스를 정체 없이 환기할 수 있게 하기 위하여 배기용 송풍기의 용량이 충분하도록 설계한다. 또한 내부에 가스의 정체가 예상되는 곳에는 가스검지기를 설치하여 누설에 따른 위험요소가 최소로 될 수 있도록 하고 있다. 본 연구에서는 후드실의 정체구역을 유선

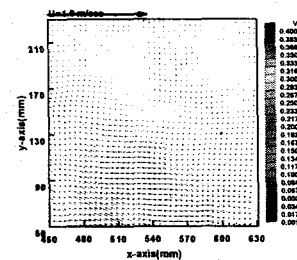
을 이용하여 파악하고자 하였다. Fig. 11은 3차원의 계산결과에 대해 각 레이놀즈수별로 나타난 볼륨라인이다. 작동유체가 흘러가는 유동로(flow passage)가 잘 나타나 있다. 어느 경우이나 우측의 벽면과 충돌하여 배기되며, 중앙격벽의 통기구를 통과하여 주유동에 합류되는 흐름의 경우에는 레이놀즈수의 증가에 따라 복잡한 변화를 가지면서 이동하고 있음을 알 수 있다. 그리고 "A" 구역 상부의 경우 yz의 속도분포에서 나타난 것과 같이 흐름이 정체되어 있는 것을 알 수가 있다. 전체적인 흐름의 경향이 "A"구역에서 "B"구역으로 이동하는 특성을 유지하고 있으나 다른 영역에 비해 환기효율이 크게 낮을 것으로 추정된다.



(a) Measuring area : m1



(b) Measuring area : m2



(c) Measuring area : m3

Fig. 6. Time-mean velocity vector at mid section

4 결론

LNG 선박의 후드실의 환기구조를 조사하기 위하여 현용 모델을 이용하여 수조실험을 하였다. PIV계측은 펄스제너레이터와 영상상화CCD카메라를 이용하였으며 3차원 수치해석은 상용소프트를 이용하여 공기흐

를 환기횟수별로 내부유동특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스펜방향(Z-axis)을 기준으로 $z/Z=0.95$, $z/Z=0.75$, $z/Z=0.30$ 의 3단면에 각 4개의 계측영역을 대한 PIV 계측결과에서 유동장의 환기구조를 지배하는 흐름은 유동장의 좌측 벽면의 흡기구로부터 대각방향의 우측 상부로 흐르는 L자(字)형 유동이였다. 또한 주 흐름의 영향으로 유동장의 중앙부분에 가로축(X)과 세로축(Y)의 길이에 대하여 $x_v/X \approx 0.4$, $y_v/Y \approx 0.5$ 의 크기를 갖는 강제와류형태의 재순환 흐름이 존재하였다.
2. 흐름을 제어하기 위해 설치된 중앙 격벽의 통기구는 본래의 역할과는 달리 역류하는 흐름의 통로로 이용됨을 알 수 있었으며 PIV계측을 위해 설정한 12개의 영역 중 평균속도 및 최대속도와 영역별변화가 가장 영역은 $z/Z=0.30$ 단면의 m1 영역이였다.
3. 수치해석의 3차원 속도장의 속도분포는 실험결과와 일치하였으며 정체구역은 선미측의 좌측상부 영역이였다.

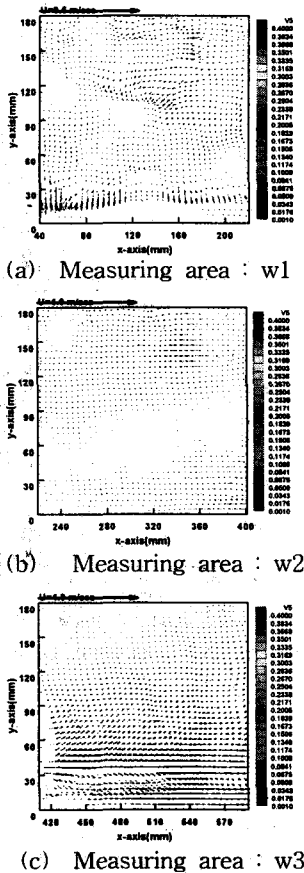


Fig. 7. Time-mean velocity vector at wall section

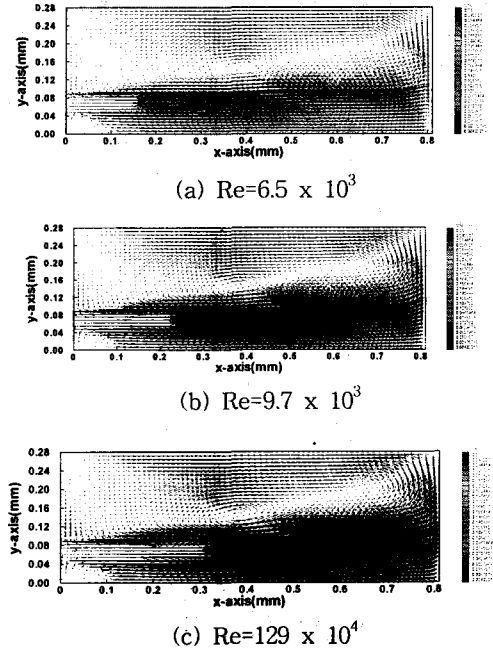


Fig. 8 Velocity distribution at inlet section

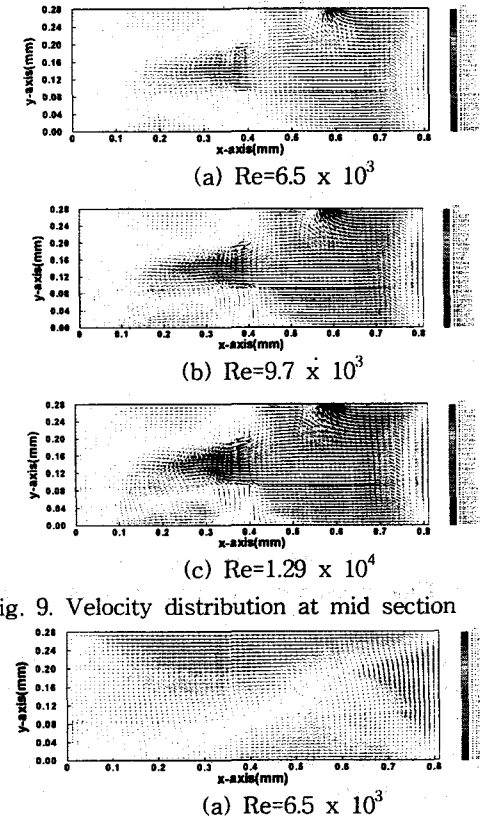
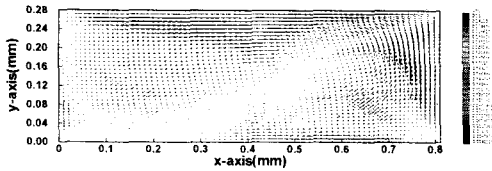
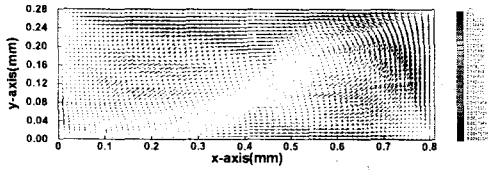


Fig. 9. Velocity distribution at mid section

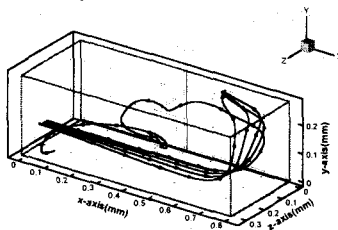


(b) $Re=9.7 \times 10^3$

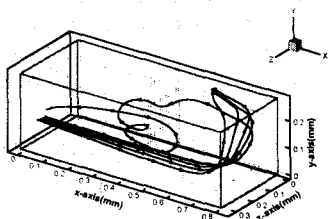


(c) $Re=1.29 \times 10^4$

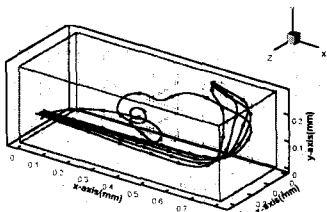
Fig. 10. Velocity distribution at wall section



(a) $Re=6.5 \times 10^3$



(b) $Re=9.7 \times 10^3$



(c) $Re=1.29 \times 10^4$

Fig. 11. Volume line

참고문헌

1. International code for the construction and equipment of ships carrying liquid gases in bulk
2. H.Han, T.H.Kuehn, J.W.Ramsey, H.Liang and K.Elayed, 1991, "Turbulent Modeling of Airflow

- Patterns and Ventilation Effectiveness in a Half Scale Office Building", Proceedings of 12th AIVC Conference, vol. 3, pp. 1-8.
3. Y.H. Lee, C.S. Kim, D.H. Cho, J.W. Choi, 1994, "PIV Measurement of Cubic Cavity Driven 2-D Plane Poiseuille Flow, Proc. of the Third JSME-KSME Fluids Engineering Conference", pp.335-340.
4. E.Wurtz, J.Nataf and F.Winkelmann, 1999, "Two and three dimensional natural and mixed convection simulation using modular zonal models in buildings", Int. J. Heat and mass Trans., Vol.42, pp.923-940
5. A.Denev, F. Durst and B.Mohr, 1997, "Room ventilation and its influence on the performance of fume cupboards", Ind. Eng. Chem. Res. Vol.36, pp.458-466
6. 김용경, 정순성, 권양구 and 이정재, 1999, "취출 공기 온도에 따른 실내기류 및 온도분포의 변화 특성", 공기조화냉동공학회, '99하계학술발표회논문집, pp.631-635.
7. 이기섭, 김영일 and 조형희, 1999, "냉방 및 난방 조건에서의 바닥급기용 급기구의 특성실험", 공기조화냉동공학회, '99하계학술발표회논문집, pp. 636-640.
8. 박찬수, "강제 환기 장치에 있는 밀폐된 공간내의 난류기류에 관한 수치적연구", 1998, 목포대학교, 석사학위논문
9. 최장운, 이영호, 1995 "PIV에서의 계조치 상호 상관법 개발", 대한기계학회 춘계학술대회, 논문집(II), pp.396-400.
10. 최장운, 이영호, 1995 "PIV에서의 보간방법의 적용", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), pp.49-56.
11. P.M. Gerhart, R.J. Gross, J.I. Hochstein, 1992, "Fundamentals of Fluid Mechanics, Second Edition", Addition Wesley, Sep. pp.368-386.
12. K.A. Hoffmann, S.T. Chang, 1993, "Computational Fluid Dynamics for Engineers Vol.1", Engineering Education System, July pp.344-411.