

비대칭 입출구를 갖는 장방형공간의 유동특성

이철재*

* 동명대학교 자동차공학과

Flow Characteristics of Rectangular Space with Asymmetric Inlet and Outlet

Cheol-Jae Lee*

* Department of Automobile Engineering, Tong Myong University, Busan, 608-711, Korea

요 약 : 이 연구에서는 실제선박의 후드룸을 1/15로 축소한 비대칭 입출구를 갖는 장방형 모델을 대상으로 가시화 실험을 수행하고 내부의 유동 특성을 고찰하고자 하였다. 속도장의 계측은 CACTUS'2000을 이용한 2차원 PIV기법으로 하였으며 4개의 계측영역을 설정하여 계측한 결과 유동장의 환기구조를 지배하는 흐름은 유동장의 좌측 벽면의 흡기구로부터 대각방향의 우측상부로 흐르는 나선형의 "L"형 유동이었다. 또한 주 흐름의 영향으로 유동장의 중앙부분에 강제와류형태의 재순환 흐름이 존재하였다.

핵심용어 : 유동가시화, 환기특성, 후드룸, 입자영상유속계, 전단혼합현상, 계조치상호상관법)

ABSTRACT : In this study, a scaled model chamber was built to investigate ventilation characteristics of the hood room in LNG carrier. Experimental study was performed in model by visualization equipment with laser apparatus. Four different kinds of measuring area were selected as experimental condition. Instant simultaneous velocity vectors at whole field were measured by 2-D PIV system and its software adopting two-frame grey-level cross correlation algorithm. The flow pattern reveals the large scale counter-clockwise forced-vortex rotation at center area.

KEY WORDS : Flow Visualization, Ventilation Characteristics, Hood-room, PIV, Sheared Mixing Phenomena, Grey-Level Cross Correlation

1. 서 론

LNG(liquefied natural:액화천연가스)란 메탄을 주성분으로 하는 천연가스를 영하 1백62도로 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 생산기지에서 수요지의 인수지까지 대량으로 수송할 수 있는 효율적인 운반수단이 필요하게 되었다.

LNG의 해상수송은 1958년 미국 앨라배마조선소에서 화물선을 개조해 운항한 이후, 현재까지 건조했거나 건조 중인 LNG선은 모두 1백20여척에 이른다. LNG선의 분류는 탱크의 형식에 따라 크게 독립형(Moss)과 멤브레인형으로

대별되며, 1964년 '메탄 프린세스'호 (2만7천4백m³)와 1969년 '폴라알래스카'호 (7만1천5백m³)가 각 방식에 따라 처음 건조된 선박이다. 대량의 화물을 운반할수록 단위중량 당 운송비가 절감되는 선박의 운송 특성 상, 1975년 이후 건조된 선박은 탱크의 형식에 관계없이 모두 12만5천m³급 이상의 LNG선으로 건조되고 있는 상황이다. 그러나 이러한 추세는 운송비를 절감하는 효과가 있으나, 한번의 사고로서 대형참사가 발생 할 수 있는 점에서 설계 및 관련 작업의 안전이 더욱 중요하게 되었다. 특히 LNG는 증발성 및 가연성의 성질을 갖고 있고, 시스템상 증발 가스를 기관실로 보내 추진연료로 사용하고 있으므로 누설의 위험이 있는 곳에는 누출 경보장치와 함께 충분한 환기가 이루어 질 수 있도록 설계되어야 한다.

후드룸(vent hood room)은 LNG선의 화물의 이동경로를 결정하는 밸브가 가장 많이 설치된 장소이며, 기관실로 가는 기화된 가스가 혼합된 LNG가 기관실로 이송되는 경우로서 가스의 누출 위험이 가장 큰 구역이다. IGC code⁽¹⁾에서는 환기능력에 대해 환기에 1시간당 30회의 공기치환이 되는 배기식 동력통풍장치를 설치할 규정하고 있다. 환기 구조와 관련된 연구는 주로 수치적 모델링을 통한 연구결과들이 시험적 연구보다는 많이 보고되고 있으며, 이러한 기술들은 모두 내부유동패턴을 개선하여 환

*대표저자 : 중신회원, lcj@yongma.tmc.ac.kr, 051)620-3538

기구조에서 정체구역을 없애는 것을 목표로 하고 있다.

이 연구에서는 실제선박의 후드룸을 1/15로 축소한 비대칭 입출구를 갖는 장방형 모델을 대상으로 가시화 실험을 수행하고 내부의 유동 특성을 고찰하고자 하였다. 그리고 속도장의 계측은 CACTUS'2000을 이용한 2차원 PIV 기법으로 하였다. 그 결과 좌측 하부의 외부 공기 흡기구로부터 우측상부의 공기 배기구로 나팔관 모양의 주 흐름이 존재하며 각 영역별로 큰 속도구배를 나타내었다.

2. 실험

Fig. 1은 H 조선소에서 건조하고 있는 LNG선박의 후드룸을 1/15로 축소 한 모델의 구조를 개략적으로 보이고 있다. 설명의 편의를 위해 좌표축은 x:가로, y:세로, z:스팬방향으로 정의하고 원점(0,0,0)을 전면의 좌측 하부의 모서리로 하였다. 여기서 흡입구와 위치는 좌측벽면에서 $z=0.53$ 이며 배기구는 상부벽면에서 $z=0.7$ 의 위치이다. 그림 2는 이 연구에서 채택한 후드룸의 속도장 계측단면을 나타내고 있다. PIV계측에서 계측단면은 좌측 전면을 원점으로 할 때 스펬방향(Z-axis)을 기준으로 $z=0.53$ 의 위치이며, 좌측의 흡입구의 중앙을 연장한 단면에 대하여 Table 1과 같은 4개의 계측영역을 설정하였다.

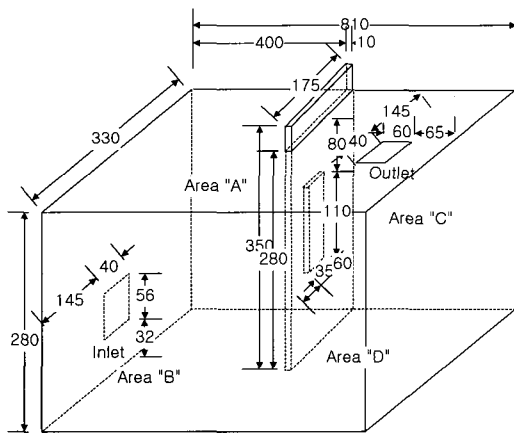


Fig. 1. Dimension of LNG carrier hood room.

Table 1. Definition of measuring region

| section | Area:x,y | Max. V. | Avg. V. |
|----------------------------|-----------|---------|---------|
| suction area $z/Z=0.53$ | 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 |

Table 1에서는 각 영역의 원점좌표와 속도장에 대한 PIV계측결과에서 각 영역의 최대속도 및 평균속도도 함께 나타내고 있다. 후드룸의 환기방식은 좌측의 외기 입구로

부터 유입된 공기가 후드룸을 순환시키며 우측 상부의 배기구를 통해 배출되는 배기식 동력통풍 방식이다. 후드룸의 내부에는 x축 방향으로 중앙부위에 스펬방향(Z-axis) 0.5 위치에 격벽이 설치되어 있고 격벽의 중앙부에는 통기구가 설치되어 있다. 그리고 우측 상부에는 그림1에서 나타나 있는 것과 같은 가로세로 600×560mm의 배기구가 설치되어 있다.

실제 선박에서 후드룸은 장방형의 공간으로 가로와 세로 그리고 높이가 12.2×7.0×4.95m이고 가시화 실험을 위한 모델은 1/15 크기인 0.81×0.33×0.28m이다. 실험은 모델의 측면에 설치된 수조를 이용하여 작동유체를 펌프로 강제 순환시켜 행하였다. 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 위하여 지면에 접지 하였다. 유량계의 공칭내경은 40 mm이며 신호입력주기는 0.5초이고, 측정값은 24회의 계측치를 평균하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 가시화 실험의 결과를 간략히 도시한 것으로 유동장의 내부유동의 흐름패턴을 보이고 있다. 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 있으며, 세 번째로 출구측에 근접하여 주위의 유체를 흡입하여 배기하는 흐름(C)이다. 세 번째의 유동의 흐름특성을 규명하기 위해서는 보다 개선된 실험기법이 필요하다.

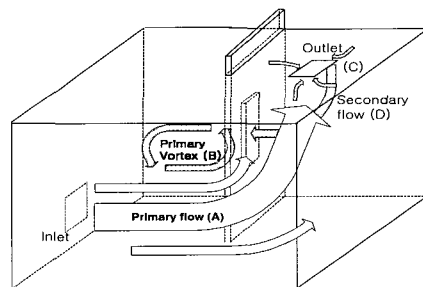
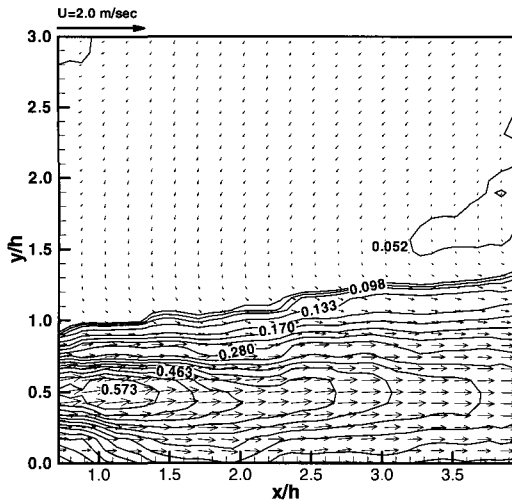
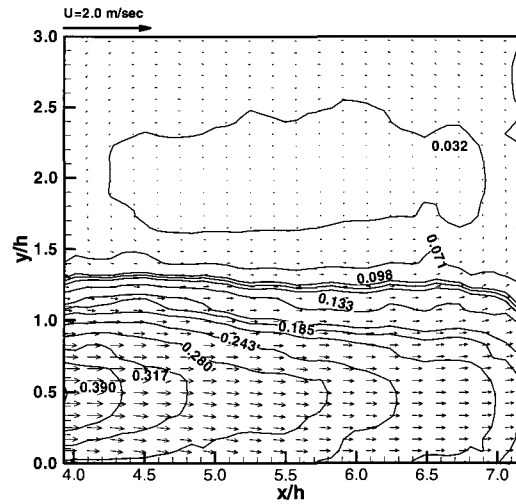


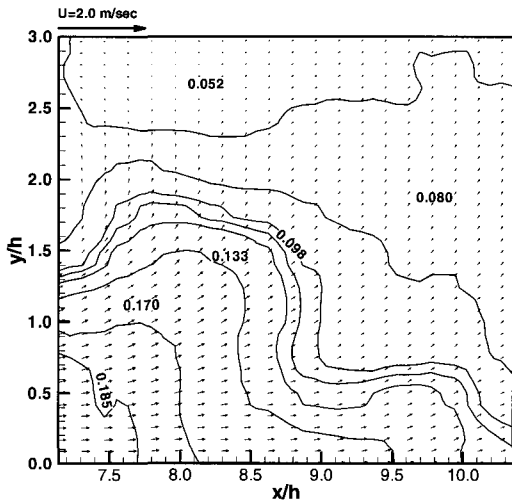
Fig. 2. Schematic diagram of model hood room.



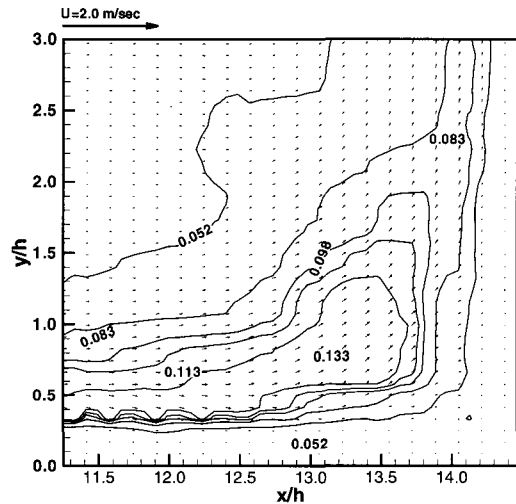
(a) Coordinate of measuring region (xy:40,40)



(b) Coordinate of measuring region (xy:40,220)



(c) Coordinate of measuring region (xy:40,410)



(d) Coordinate of measuring region (xy:0,630)

Fig. 3. Time-mean velocity vector at $z/Z=0.53$ section(calculation area 180×180 mm).

Fig. 3은 후드룸의 흡입구의 중앙부분을 관통하는 단면(Suction area)을 그림 2와 표1에서 나타낸 바와 같이 네 개의 영역으로 분할하여 속도장을 계측한 결과이다. 어느 경우에나 좌측에서 우측으로 향하는 주 흐름이 나타나 있다. Fig. 3(a)의 경우는 흡입구 및 바닥 면으로부터 40mm 떨어진 위치로부터 가로, 세로 180mm의 크기를 갖는 계측영역을 설정하여 얻은 PIV 결과이다. Fig. 4(b)에서보면 강제와류와 유사한 구조의 시계방향으로 회전하는 와류를 볼 수 있다. 이 와류의 위치는 중앙의 격벽을 기준으로 2/3가 B구역으로 치우쳐 있고 전체 와류의 크기는 전체유동장의 가로축(x)과 세로축(y)의 길이에 대하여 약 $x_w/x=0.4$, $y_w/y=0.5$ 정도이다. Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)는 중앙격벽의 우측구역에 해당한다. Fig. 3(c)에서 보면 좌측하부에서 우측상부로 흐르는 주 흐름이 크게 나타나 있고 우측 중앙부에는 2차와류가 일부

나타나 있다. 우측상부에서 벡터의 크기가 다소 작게 나타나고 있다. 이것은 하부의 2차와류와 배기구측으로 배기되는 흐름의 영향이 3차원성이기 때문이다. 그리고 좌측영역에 Fig. 3(b)의 2차와류의 우측부분이 일부 보이고 있다. Fig. 3(d)는 벽면의 영향을 관찰하기 위하여 계측단면의 우측하부의 영역에 대하여 속도를 계측한 결과이다. 촬영된 영상을 관찰하여 보면 우측벽면과 하부면에서는 작은 규모의 와류가 회전하며 이동하고 있는 현상을 볼 수 있다. Fig. 4는 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. 3(a)에서 보면 유입유동의 속도분포가 약 0.6m/sec에서 0.05m/sec 까지 확산되어가는 과정이 잘 나타나 있다. 그림에서 기준위치(좌표기준 $x,y:0,0$)은 유입구의 하부이며 스펀방향으로는 $z/Z=0.53$ 의 위치이다. 그림에서 나타나지는 않았지만 전형적인 후향계단유동이 나타나고 있다. $y/h=1.0$ 이상의 상부로 확산되는 유동이 나타나지 않은 것은 Fig. 3(b)에서 보이는 주유동에 기인한 강제와류의 영향 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 4는 계측단면의 기하학적 수직선상에 0.035h 간격으로 약 85개의 스트림 트레이서를 분포시켜 얻은 스트림 라인을 나타낸 것이다. Fig. 3의 속도벡터 분포에서는 자세히 나타나 있지 않으나 Fig. 4의 중앙 부분에서 일그러진 타원형의 와류가 형성되어있고, $x/h=7.0$ 전후에서의 상부로 급격히 흐름의 방향이 전환되고 있음을 알 수 있다. 이것은 계측단면이 중앙격벽(그림1참조)의 전면을 통과하기 때문에 흐름이 격벽을 따라 A구역으로 회전하기 때문이다. 중앙격벽의 설계의 목적은 흡기구로부터의 흐름을 통기구측과 구역B에서 구역D로 흐르는 유동으로 분류시켜 내부의 정체구역을 감소시키는 목적으로 설치되었으나 실험 결과 오히려 원활한 흐름을 방해하고, 내부에서 순환하는 2차 적인 와류의 형성을 촉진하는 장애물로 작용되는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 PIV계측으로 얻어진 시간평균 속도벡터분포도에서 각 위치별로 등간격의 50개의 추출점에 대해 수평속도성분, 수직속도성분 및 속도성분값을 얻어 나타낸 것이다. 데이터의 추출위치는 $x/h = 2.5$ 에서 2.5간격으로 5가지 경우에 대하여 분석을 하였다. PIV계측단면이 유입구의 중앙단면이므로 하부에서는 y/h 를 중심으로 전형적인 분류유동이 나타나고 있다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)를 보면 $x/h=2.5$ 의 위치에서 역방향의 속도성분이 나타나고 있다 이것은 중앙 부분에 형성된 주와류의 영향이며 y/h 면을 기준할 때 진행방향으로 갈수록 방향전환되는 위치가 상승하고 있다.

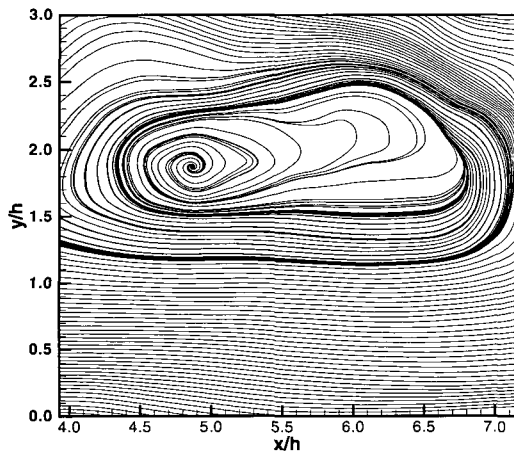
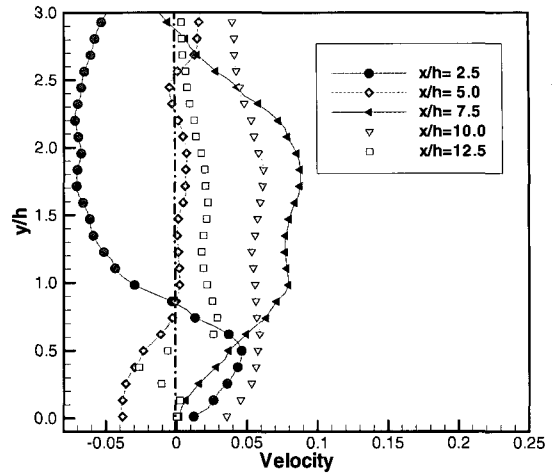
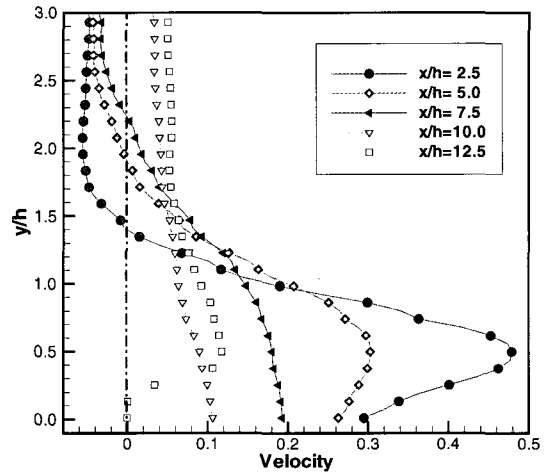


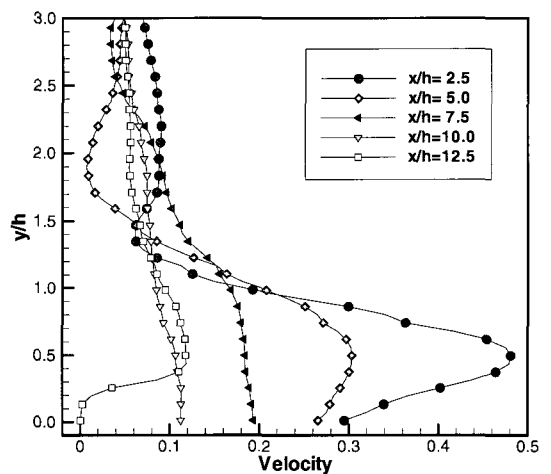
Fig. 4. Stream lines of measuring region ($xy:40,220$).



(a) v-velocity component profiles



(b) u-velocity component profiles



(c) Velocity component profiles

Fig. 5. PIV results at each vertical line.

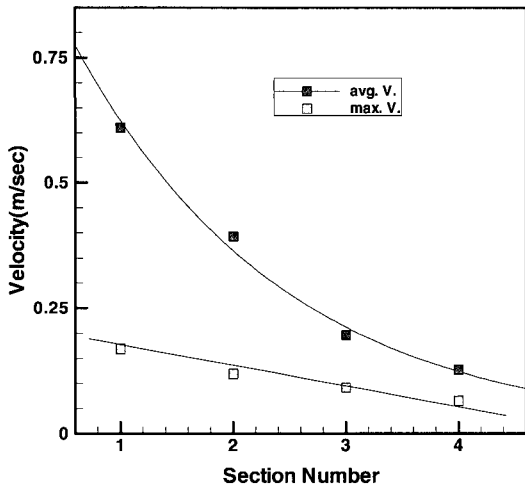


Fig. 6. Time-mean and maximum velocity at each measuring section

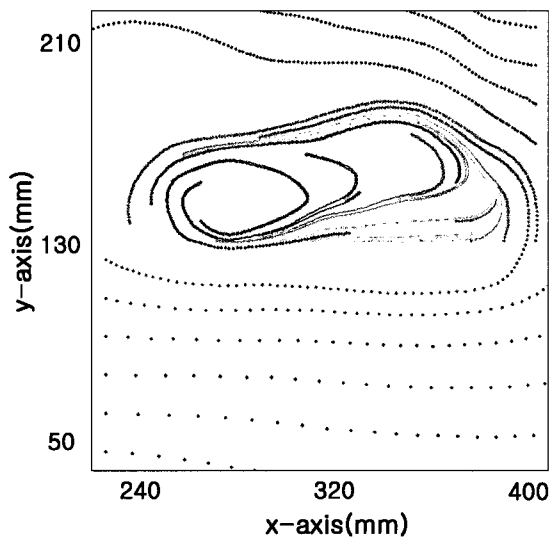


Fig. 7. Pathline at s2 region (Coordinate:220, 40).

Fig. 6은 각 계측영역에서 평균속도와 최대속도를 각 단면 별로 나타낸 것이다. 스핀방향(z축)의 깊이를 기준으로 전면에서부터 $z/Z=0.53$ 의 단면인 suction side section의 경우 하류로 진행할수록 속도가 크게 감소하고 있다. 특히 단면4의 경우는 Fig. 3(d)에 나타나 있는 것과 같이 벽면과 하부에서 약 0.05m/sec 이하의 낮은 속도분포를 보이고 있고, Fig. 5(c)의 $x/h=12.5$ 의 결과를 보면 벽면에 근접할수록 속도값이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 비대칭입출구를 갖는 장방형 공간에서는 이러한 부분이 정체역으로 분류될 수 있으므로 이를 해결할 수 있는 대책이 필요하다.

Fig. 7은 계측영역 S2의 패스라인을 나타내고 있다. 이 영역은 주와류에 2차와류가 생성되는 곳이다. Fig. 7을

Fig. 4와 비교하여보면 유선이 패스라인에서는 점선의 간격으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 패스라인이 통과한 점은 유동장의 내부에 좌우측 벽면에 10개 그리고 계측영역의 기하학적 중심선의 횡방향으로 20개를 분포시켰다. 이때 간격은 가로 6mm이고 세로 15mm이다. 속도벡터 분포에서는 자세히 나타나 있지 않으나 패스라인에서 보면 두 개의 타원형의 와류가 근접하여 나타나 있고, $x=400$ mm 전후에서의 상부로 급격히 흐름의 방향이 전환되고 있음을 알 수 있다. 이것은 계측단면이 중앙격벽(Fig. 1 참조)의 전면을 통과하기 때문에 흐름이 격벽을 따라 A 구역으로 회전하기 때문이다. 중앙격벽의 설계의 목적은 흡기구로부터의 흐름을 통기구측과 구역B에서 구역D로 흐르는 유동으로 분류시켜 내부의 정체구역을 감소시키는 목적으로 설치되었으나 실험 결과 오히려 원활한 흐름을 방해하고, 내부에서 순환하는 2차 적인 와류의 발생을 촉진하는 장애물로 작용됨을 알 수 있다.

4. 결론

LNG 선박의 후드룸의 환기구조를 조사하기 위하여 H 조 선소에서 건조하고 있는 멤브레인형 선박의 후드룸에 대한 크기를 1/15로 축소된 모델을 만들고 PIV기법을 채택하여 속도장을 계측하였다. 스핀방향(Z-axis)을 기준으로 하여 $z/Z = 0.53$ 의 단면에 4개의 계측영역을 설정하여 계측한 결과 유동장의 환기구조를 지배하는 흐름은 유동장의 좌측 벽면의 흡기구로부터 대각방향의 우측상부로 흐르는 나선형의 "L"형 유동이였다. 또한 주 흐름의 영향으로 유동장의 중앙부분에 가로축(x)과 세로축(y)의 길이에 대하여 $x_w/x \approx 0.4$, $y_w/y \approx 0.5$ 의 크기를 갖는 강제와류형태의 재순환 흐름이 존재하였다.

참고 문헌

- [1] International code for the construction and equipment of ships carrying liquid gases in bulk
- [2] Penot F. and M. Parvolic(1986), Heat Transfer Analysis of Mixed Convection in a Heated Cavity, Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference, vol. 3, pp. 1419-1424.
- [3] Han H., T. H. Kuehn, J. W. Ramsey, H. Liang and K. Elayed(1999), Turbulent Modeling of Airflow Patterns and Ventilation Effectiveness in a Half Scale Office Building, Proceedings of 12th AIVC Conference, vol. 3, pp. 1-8.,
- [4] Lee Y.H., C.S. Kim, D.H. Cho, J.W. Choi, PIV Measurement of Cubic Cavity Driven 2-D Plane

- Poiseuille Flow, Proc. of the Third JSME-KSME Fluids Engineering Conference(1994), pp.335-340.
- [5] Suzuki, H. Hasegawa, E., and Matsufuji, H. (1988), Movement of Small particles caused by an Air Flow in a Chamber, JSME international journal, Series 2, Vol.2.
- [6] Sakamoto. Y. and Matsuo. Y. (1980), Numerical prediction of 3-D flow in a ventilated room using turbulence Models, Appl. Math. modeling, Vol.4.
- [7] Launder. B. E. and Spalding. D. B. (1974), The numerical computation of Turbulent Flows, computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.
- [8] Murakami. S. and Kato. S., Sayama. S. (1987), Three-Dimensional Numerical Simulation of Turbulence Air-flow in a ventilated Room by means of a Two-Equation Model, ASHRAE Trans, Vol.33.
- [9] Yamazaki. K., Komatsu. M., Otsubo. M., " Application Numerical Simulation for Residential Room Air Conditioning", ASHRAE Trans. No.3027
- [10] Launder, B. E. and Spalding. D. B. (1972), Mathematical Models of Turbulence, Academic press.
- [11] 최장운, 이영호(1995), PIV에서의 제조치 상호 상관법 개발, 대한기계학회 춘계학술대회, 논문집(II), pp.396-400.
- [12] 최장운, 이영호(1995), PIV에서의 보간방법의 적용, 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), pp.49-56.
- [13] Gerhart P. M., R.J. Gross, J.I. Hochstein(1992), Fundamentals of Fluid Mechanics, Second Edition, Addition Wesley, Sep. , pp.368-386.
- [14] Hoffmann K. A., S.T. Chang(1993), Computation Fluid Dynamics for Engineers Vol.1, Engineering Education System, July , pp.344-411.
- [15] 송병진, 맹주성, 이상환(1996), 상세 유체역학(하), 희중당, pp. 1078-1091.

원고접수일 : 2006 년 11월 01일

원고채택일 : 2006 년 12월 21일