

유량분배 매니폴드의 유출유동에 대한 출구형상 영향 해석

이 준 우, 박 태 선*

경북대학교 기계공학부

EFFECT OF EXIT SHAPE ON TURBULENT OUTFLOWS IN A DISTRIBUTION MANIFOLD

Joon Woo Lee and Tae Seon Park*

School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

Three-dimensional turbulent flows of a distribution manifold are studied by a turbulence model. To investigate the geometrical effects of the manifold, the length and area of exit port are changed. From the results, flow structures related to the outflow uniformity are examined and the departure angles are obtained. The exit configuration depending on the departure angle has advantages to the outflow uniformity. That is, the decreased exit area in the streamwise direction improves the uniformity of exit flow. For the uniform effusion, the change of exit port by departure angle is more effective than the change of exit area.

Key Words : 유출 균일성(Outflow Uniformity), 질량유량(Mass Flow Rate), 분배매니폴드(Distribution Manifold), 재순환유동(Recirculating Flow), 유출각도(Departure Angle), 면적비(Area Ratio)

1. 서 론

열교환기, 태양집열기, 연료전지, 플랜트, 자동차 혹은 액체 로켓 엔진의 연료공급장치와 같은 다양한 응용기기에서 유량을 배분하거나 한 곳으로 모으기 위한 목적으로 매니폴드가 보편적으로 사용되어 지고 있다. 보통 분배형(distribution)과 집합형(collection)으로 나누어진다[1]. 일반적으로 분배형매니폴드는 한 개의 입구와 두개 이상의 출구를 가지고 있으며 입구를 통해 유량이 들어가고 두개 이상의 출구로 분배되어 유량이 빠져 나가는 형태이다. 유량분배매니폴드의 효과적인 형태는 입구로 들어간 유량이 각 출구포트로 균일한 유량을 가지고 빠져 나가는 것이다. 또한, 집합형 매니폴드는 분배형과 달리 여러 개의 입구에서 유동이 유입되면서 한 개의 출구로 모여지면서 유동구조의 변화로 인한 손실을 최소화하는 형태가 효율적이라고 할 수 있다. 그렇지만 여러 유입구가 한 개의 출구와 연결되는 형상의 특징으로 인해 복잡한 유동구조가 발생할 수 있는 형태이다. 이러한 형상의 특징은 유출유량의 균일성에 커다란 영향을 줄 수 있기 때문에 형상변수의

변화에 따른 유동특징을 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서는 집합형과 분배형 중 한 개의 입구와 두개 이상의 출구를 가지는 분배형매니폴드에 대해 수치해석 연구를 수행하고자 한다. 분배형 매니폴드의 세부적인 설계안은 분배매니폴드가 장착되는 시스템의 특징에 달라지겠지만 일반적인 특징은 동일하게 나타나기 때문에 수치해석결과는 매니폴드 설계에 좋은 자료로 활용될 수 있다. 문헌조사에 의하면 분배형매니폴드에 대해 유량분배 성능을 파악하고자 몇몇 연구가 진행되어 왔다. Chen and Sparrow[1]은 일정한 개수의 원형단면 출구형상을 가진 매니폴드에서 유량입구 단면적과 출구 단면적의 비의 변화에 따라 출구에서 질량유량의 변화를 살펴보았다. 입구단면적에 대한 출구단면적의 비가 1에서 0.1로 작아질수록 각각의 출구에서 질량유량의 크기가 비슷해지는 것을 보여주었다. Yeol et al.[2]은 베르누이방정식에 근거한 수정등압법(modified equal pressure method)을 이용하여 출구포트에 저항이 증가할수록 유출유량이 균일하게 분배되었고 출구포트의 면적이 증가할수록 유출유량이 불균일하게 배분됨을 보여주었다. Chen and Sparrow[3]은 출구 단면형상을 원형, 정사각형, 직사각형의 배열, 혹은 긴 홈의 형태를 가질 때 매니폴드의 중심축에서 운동량의 변화를 살펴보았다. 긴 홈을 가진 출구형태가 다수 배열에 비해 심한 압력강하가 나타나 유량분배에 좋지 않은 형상임을 보여주었다. Hassan et al.[4]은 2차원 비압축성 난류유동조건에서 난류모델을 이용하

Received: March 4, 2014, Revised: March 21, 2014,

Accepted: March 21, 2014.

* Corresponding author, E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.1.073>

© KSCFE 2014

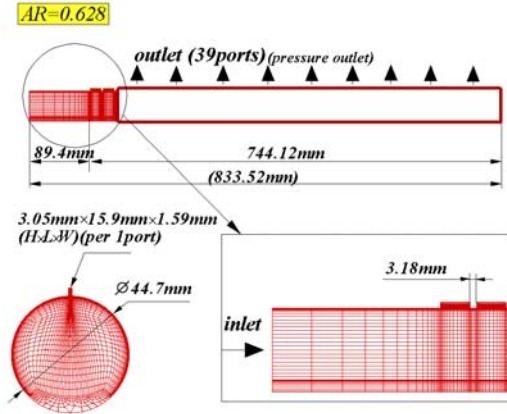


Fig. 1 Computational domain and grid system for a distribution manifold

여 매니폴드의 축중심속도, 유출속도변화, 표면마찰계수 등이 면적비(AR), 곡률, 출구포트간의 거리 등의 3가지 요인에 의해서 크게 변한다는 것을 보여주었다. Bajura[5]는 측면에 90° 형태의 출구포트가 배치된 분배, 흡입매니폴드에서 운동량 변화, 출구유동저항, 면적비 등의 세 가지 변수를 알아보고 각 출구포트마다 속도, 압력차를 계산하여 압력변화계수가 유량 분배 특성과 연관되어 변함을 보여주었다. 그렇지만, 위와 같은 연구들은 매니폴드 내부의 3차원적인 유동구조를 바탕으로 매니폴드의 특성을 충분히 살펴볼지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 난류유동조건에서 유량분배성능과 관계된 분배형 매니폴드 내부의 유동구조를 살펴보고자 한다. 또한, 유출유량의 분포를 균일하게 하기 위하여 출구포트 형상변화를 시도하고 분배효율이 좋은 형상조건을 검토하고자 한다.

2. 지배방정식 및 해석 방법

유량분배 매니폴드에 대한 정상상태, 비압축성 난류유동에 대해 난류모델을 이용한 3차원 해석이 수행되었다. 연속방정식과 운동량방정식은 생략하였고, 표준 $k-\epsilon$ 모델에 대한 난류운동에너지(k)와 난류운동에너지의 소산율방정식(ϵ)방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

여기서 P_k 는 난류운동에너지의 생성항이고 $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 이다.

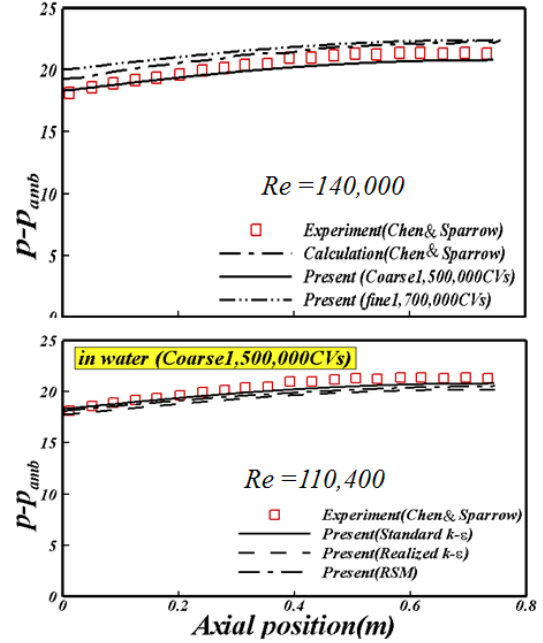


Fig. 2 Comparison of the predicted pressure (water)

계산영역은 Fig. 1과 같이 Chen and Sparrow[1,6]의 실험조건을 토대로 대표적인 유량분배매니폴드 형상을 선택하였다. 한 개의 입구에서 유입된 유량이 39개의 출구로 유출되는 형태이다. 입구로부터 출구포트가 시작되는 위치는 89.4 mm이고 출구포트가 존재하는 부분의 길이는 744.15 mm이다. 각각의 출구포트 형상은 사각형의 형태를 가지고 있고 포트 높이 3.05 mm이며 축방향 15.9 mm, 원주방향 1.59 mm의 크기를 기본형상조건으로 설정해서 출구포트의 형상변화 연구를 수행하였다. 형상의 복잡성으로 인해 상용코드인 Fluent 6.2[7]를 이용하여 해석이 진행되었고 압력-속도 연결에 SIMPLE 알고리즘, 대류항 차분법에 2차 정확도의 풍상차분법을 선택하였다. 작동유체는 비압축성 조건의 공기이고 기본형상조건은 입구면적 대비 전체 출구면적의 면적비(AR)를 0.62로 선택하였다. 입구면에서 완전히 발달된 속도분포를 부여하였고 난류강도는 5%로 설정하여 난류운동에너지와 소산율의 경계조건을 결정하였다. 입구속도는 각각 $U_{in} = 13, 36, 65.3$ m/sec로 선택하였는데 입구직경을 기준으로 한 레이놀즈수는 각각 $Re = 40000, 110400, 200000$ 이다. 출구경계는 외삽을 이용한 경계조건이 초기에 적용되었지만 출구포트가 짧은 경우 수치해석이 불안정성을 나타내어 일정한 압력경계조건이 모든 경우에 사용하였다.

수치해석의 타당성을 검토하기 위하여 Chen and Sparrow[6]의 실험 및 수치해석 결과를 격자수와 난류모델을 변화시켰을 때 현재결과와 Fig. 2에 비교하였다. 여기서 작동유체는 물이고 p_{amb} 은 대기압을 나타내고 압력 $p - p_{amb}$ 는 밀도(ρ)와

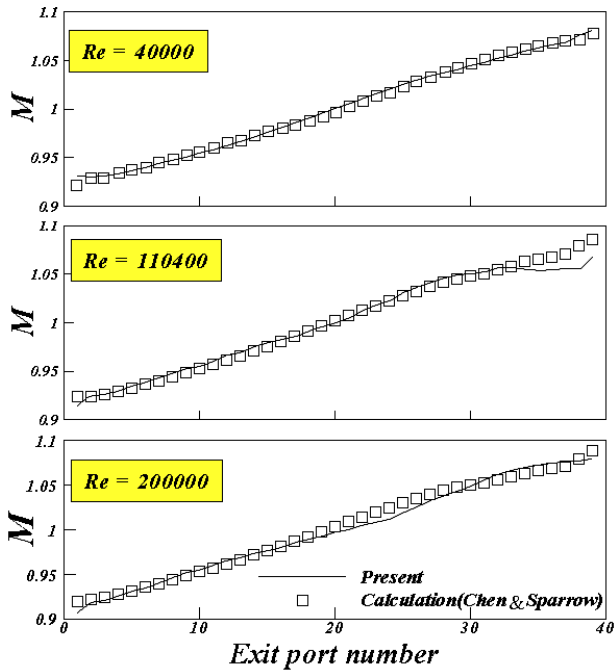


Fig. 3 Comparison of the predicted M of exit ports

입구평균속도(U_{in})에 의한 동압성분 $0.5\rho U_{in}^2$ 으로 무차원된 값이다. 그림에서 CV는 검사체적(control volume)을 나타낸다. 결과는 유량분배 매니폴드의 중심축에서 주유동방향으로 압력분포를 나타낸 것이다. 현재결과는 실험결과와 잘 일치하고 있고 격자수를 150만개에서 170만개로 변화시켰을 때 압력크기는 다소 차이가 있지만 전체적인 경향성은 서로 비슷하게 예측하고 있다. 따라서 정확한 계산결과를 얻기 위해서 많은 격자수가 유리하겠지만 150만개 수준의 격자계에서 중요구조를 충분히 예측하고 있는 것으로 판단되어 모든 계산은 150만~200만개의 격자수를 유지하면서 수행되었다. 또한, 모델변화에 대해서 값의 차이는 있지만 전체적인 압력분포가 유사하게 나타나고 있어 모델의 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델로 고정하고 형상변화에 따른 유동변화 연구를 수행하였다.

Fig. 3은 레이놀즈수 변화에 따른 출구포트의 질량유량 변화를 Chen and Sparrow[6]의 연구결과와 비교한 것이다. 여기서 $M = \dot{m}_{slot} / \dot{m}_{avg}$ 은 평균질량유량 \dot{m}_{avg} 로 각각의 포트에서 질량유량을 나눈 값이다. 입구에 가까운 출구포트에서 평균질량유량보다 작게 유출되고 입구에서 먼 출구포트에서 평균보다 많은 유량이 유출되는 특징을 보여주고 있다. 이러한 특징은 레이놀즈수가 변하여도 크게 변하지 않고 있다. 또한 Chen and Sparrow[6]의 결과와 비교할 때 본 연구의 해석결과는 매우 유사하게 나타나고 있다. Fig. 2와 Fig. 3의 결과로부터 현재 설정된 해석방법은 매우 타당한 것으로 생각할

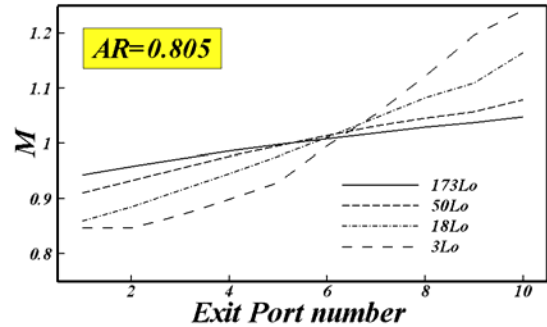
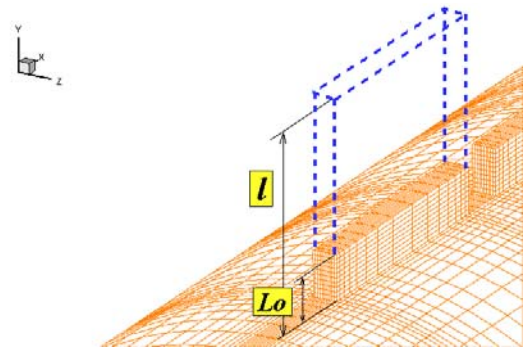


Fig. 4 Comparison of the mass flow rates of exit ports for different l (10 ports, AR = 0.805)

수 있고 출구포트 형상변화를 통한 난류유동의 변화를 분석하는데 적절하게 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

3. 결과 및 토의

모든 출구포트에서 작동유체가 균일하게 유출되는 출구형상을 알아보기 위해 전체 입구면적과 출구면적의 비가 일정할 경우 출구포트의 길이를 변화시킨 경우, 출구포트의 수가 일정할 때 전체 입구면적과 출구면적의 비가 변하는 경우, 출구포트가 직선관과 아닌 형태로 형상변화가 있는 경우 3차원 난류유동해석이 수행되었고 유출유량의 변화를 살펴보았다.

3.1 출구포트길이 변화 영향

출구포트 길이의 영향을 살펴보기 위하여 면적비가 $AR = 0.805$ 로 일정할 때 10개의 출구포트를 가진 매니폴드에 대한 해석이 수행되었다. 출구포트의 길이는 $Lo = 3.05 \text{ mm}$ 를 기준으로 각각 $3Lo$, $18Lo$, $50Lo$, $175Lo$ 로 선택하였다.

Fig. 4는 출구포트길이가 변할 때 질량유량의 비 M을 보여주고 있다. 출구 포트의 길이가 길어질수록 M의 균일성이 좋아지는 경향을 나타내고 있다. 유출질량유율이 평균값과 같아지는 $M = 1$ 을 기준으로 $3Lo$ 의 M은 약 $\pm 20\%$ 차이를 나

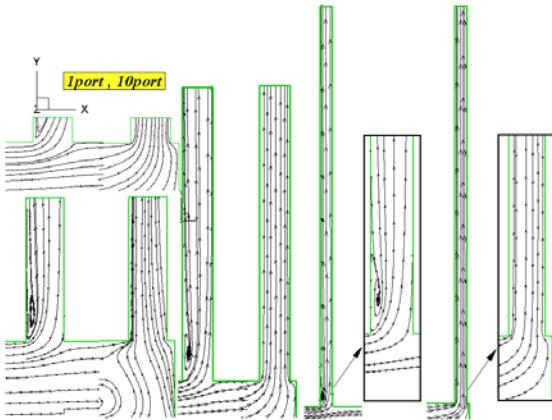


Fig. 5 Streamlines for different l

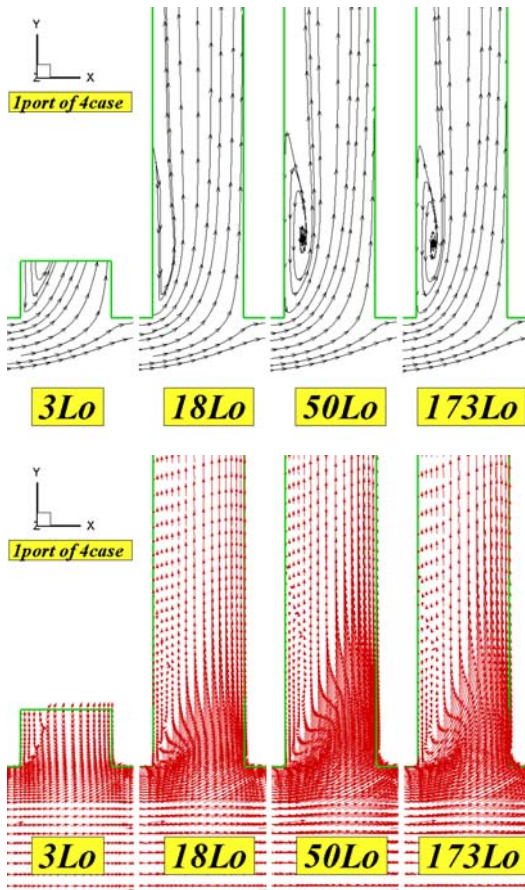


Fig. 6 Streamlines and velocity vectors for different l

타내고 있지만 175Lo의 경우 약 $\pm 5\%$ 로 변화가 작게 나타나고 있다. 이것으로부터 AR이 일정한 조건에서 출구포트의 길이가 길어짐에 따라 각 출구포트의 유출유량이 균일해져감을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6에 나타낸 유선과 속도분포를 보면 이러한 현상이 유동구조의 변화와 밀접한 관계가 있

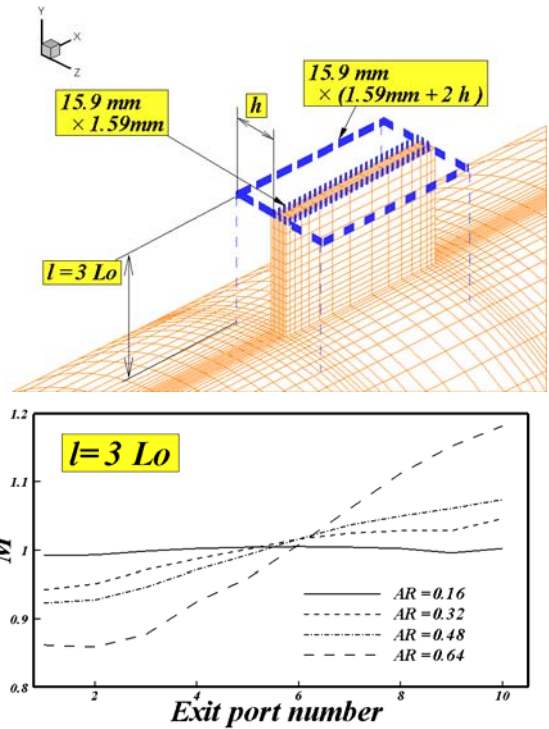


Fig. 7 Comparison of the mass flow rates of exit ports for different AR (10 ports, $l = 3Lo$)

다고 생각할 수 있다. 입구로부터 유입된 유동은 직각방향의 출구포트로 유량이 배분되는데 형상이 급격하게 변하기 때문에 매니폴드와 출구포트의 연결부분에서 재순환유동이 발생하게 된다. 출구포트에서 이러한 재순환유동 구조가 나타나는 부분은 일종의 오피리스처럼 압력변화를 초래하여 출구방향 속도성분의 불균일성을 유도하게 된다. 즉 출구방향 주유동속도가 음과 양의 크기를 가지게 하고 출구포트 내부유동의 균일성에 가장 큰 영향을 주는 변수로 작용하게 된다. 그렇지만 출구포트가 길어짐에 따라 이러한 재순환영역부분이 출구포트의 출구부분에서 멀어지기 때문에 출구포트의 출구부분은 재순환유동에 의한 영향을 적어지게 된다. 따라서 이러한 특징에 의해서 출구가 길어질수록 유출유량이 균일하게 되어 간다고 생각할 수 있다.

3.2 출구포트 면적크기와 영향

10개의 출구포트를 가진 매니폴드에 대해 출구포트의 길이가 $l = 3Lo$ 로 일정할 때 출구포트 면적의 변화에 대한 영향을 살펴보았다. 출구포트 면적의 변화는 여러 가지 선택이 있겠지만, Fig. 7에서 보는 바와 같이 단면은 직사각형 형태를 유지하면서 원주방향으로의 길이를 변화시키는 형태로 단면적 크기 변화의 영향을 살펴보았다. $AR = 0.16$ 을 기준으로 $AR = 0.32$, $AR = 0.48$, $AR = 0.64$ 의 4개 형상조건이 선

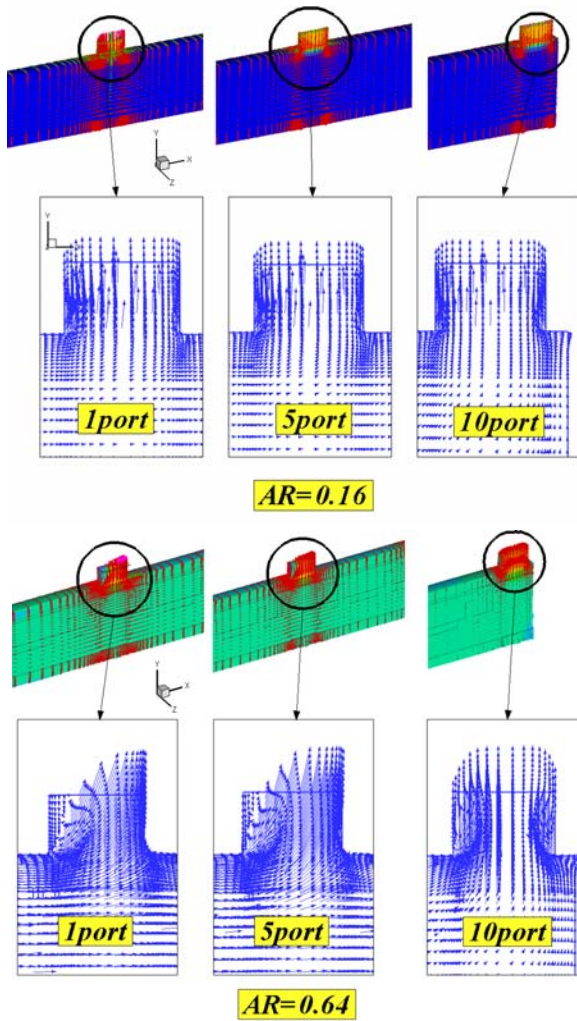


Fig. 8 Velocity vectors on the center planes of two area ratios

택되어 질량유량을 변화에 대한 수치해석이 수행되었다. $AR=0.64$ 에서 질량유량의 비는 $M=1$ 에 비해 약 $\pm 15\%$ 가 차이가 나타났고, AR 이 감소함에 따라 출구포트의 M 의 차이는 감소하는 경향이 나타나고 있다. AR 이 가장 낮은 $AR=0.16$ 의 경우 M 의 차이가 약 $\pm 2\%$ 로서 거의 균일하게 나타나고 있다. 이러한 면적크기 변화의 영향을 유동장과 연관지어 살펴보기 위하여 M 의 차이가 가장 큰 $AR=0.64$ 와 가장 작은 $AR=0.16$ 에 대해 Fig. 8에 속도벡터를 나타내었다. 그림에서 보면 $AR=0.16$ 인 경우 재순환유동이 존재하지 않고 출구포트 벽면과 평행한 유동구조를 보여주고 있다. 그렇지만 $AR=0.64$ 에서는 입구에 가까운 출구포트일수록 재순환유동이 크게 발생하고 있다. 이러한 유동구조가 반영되어 Fig. 7에서 볼 수 있는 유출유량의 변화가 나타난 것으로 생각 된다. 결과적으로 면적비가 증가함에 따

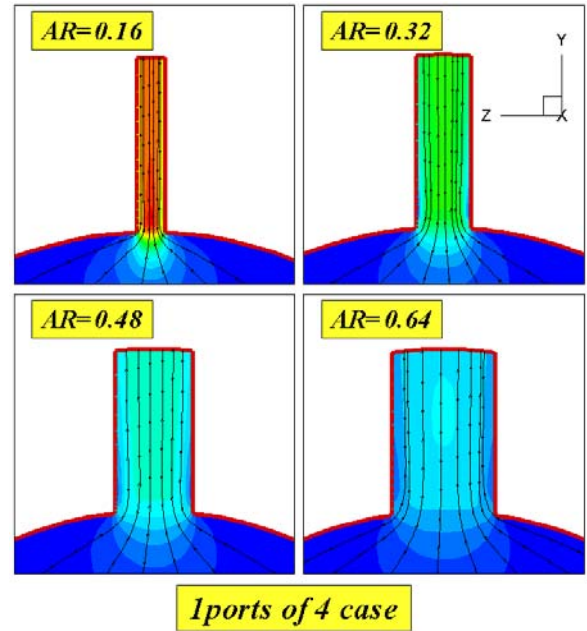


Fig. 9 Streamlines and y-velocity of the first port for different AR

라 출구포트에 평행하지 않은 유동이 발생하거나 재순환유동과 같은 3차원 유동구조가 발생하기 때문에 유출유동에 저항이 발생하여 질량유량이 불균일하게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 면적비 증가에 따라 재순환영역이 존재하는 1번 포트의 중심단면에서 유선과 y -속도를 나타낸 것이다. 유선의 분포를 살펴보면, 출구포트의 단면적이 클수록 출구포트 시작 부분에서 재순환 영역에 의한 오리피스 형태의 유동구조가 확실하게 나타나고 있다. 출구포트의 중심부분에서 속도가 증가하고 벽면에 가까울수록 속도가 감소하게 되어 출구포트 단면에서 속도차이가 크게 발생하지만 출구면에 가까워짐에 따라 그 차이는 점점 감소하게 된다. 이러한 현상은 앞서 살펴본 재순환유동의 존재에 기인한다. 따라서 재순환 영역이 만들어 지지 않는 면적비를 가진 매니폴드구조이거나 재순환 영역이 생기지 않는 형태를 가진 출구형상이 균일한 질량유량을 가지는 매니폴드가 되고 최적조건의 매니폴드가 될 것으로 예상할 수 있다.

3.3 출구포트 형상변화 영향

앞선 결과에서 재순환유동의 발생으로 인해 출구포트의 벽면과 평행하지 않은 유동구조의 발생으로 인해 유량분배의 불균일성이 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 불균일성의 주된 원인인 재순환 유동구조를 제거하기 위하여 유동의 방향성을 고려한 출구포트형상을 제시하고 형상변화에 따른 유량분배특성을 살펴보고자 한다.

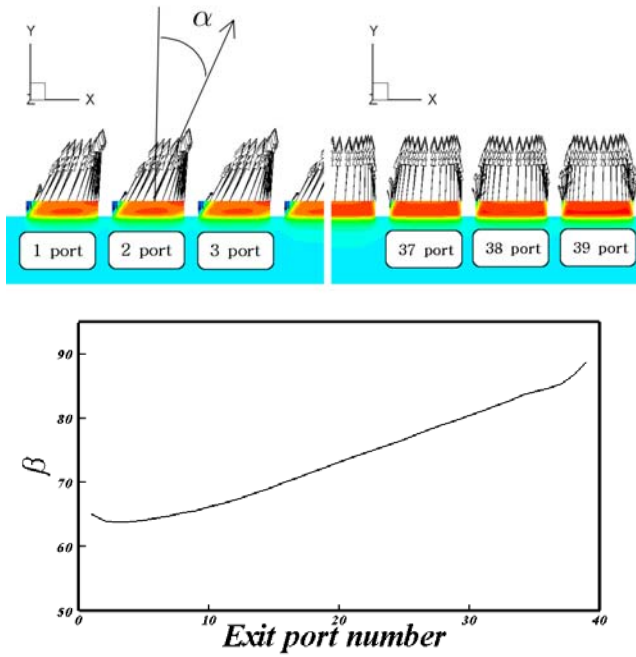


Fig. 10 Departure angles for a manifold with 39 exit ports (Re = 110,000)

Fig. 10에 각각의 출구포트 중심에서 출구포트 벽면에 대하여 평행한 정도를 알 수 있는 유출유동의 유출각도 β 를 나타내었다. 출구포트 중심에서 정의된 유동의 각도 α 에 근거해서 유출각도 β 는 $\beta = 90^\circ - \alpha$ 의 관계로 정의되었다. 유출각도가 90도 가까울수록 출구포트 벽면에 평행한 조건을 가지고 있음을 나타낸다. 그림에서 보면 1번 포트에서는 벽면의 방향과 크게 차이가 있는 $\beta = 65^\circ$ 이지만 39번 포트에 갈수록 점진적으로 유동이 벽면에 평행해지면서 $\beta = 90^\circ$ 로 유출각도가 증가하고 있다. 증가하는 형태는 포트번호에 거의 선형적인 함수형태를 보여주고 있다. 이러한 유동구조의 특징을 이용하여 출구포트 형상을 변경하고자 한다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 재순환 유동이 발생하는 면을 γ 만큼 경사지게 출구포트 형상을 변경하였다. 이러한 형상조건에서는 유동의 방향을 급격하게 변화시킴으로써 국부적인 압력강하를 초래하여 발생하는 재순환 유동의 발생을 억제할 수 있을 것으로 생각할 수 있다. 형상의 변화는 포트번호에 대한 선형함수형태로 설정하였다. 예를 들어 형상변화각도가 $\gamma = 55^\circ + 35^\circ(P-1)/38$ 일 경우 1번 포트의 55° 에서 마지막 39번 포트의 90° 까지 선형적으로 증가하게 된다. 비교를 위하여 출구포트의 변형이 없는 즉 모든 포트에서 $\gamma = 90^\circ$ 인 경우의 결과를 나타내었다. 결과에서 보면 유출유동의 유출각도에 가까운 $\gamma = 55^\circ + 35^\circ(P-1)/38$ 형상변화의 경우와 $\gamma = 65^\circ + 25^\circ(P-1)/38$ 인 경우가 전체적으로

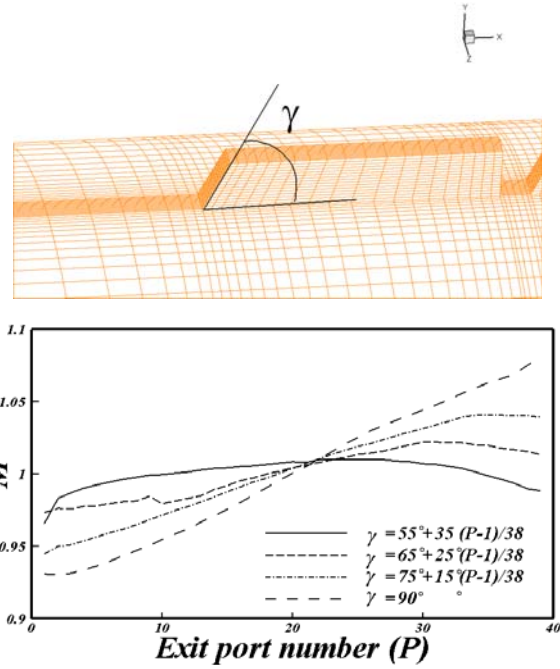


Fig. 11 Comparison of the predicted M for the modified exit ports

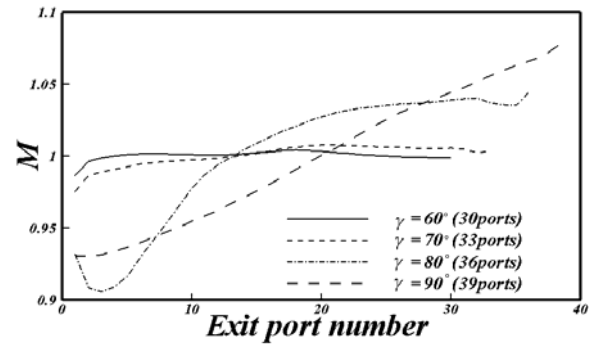


Fig. 12 Comparison of the predicted M for different the number of ports

$M=1$ 에 근접한 결과를 보여주고 있다. 이와 같이 각각의 포트마다 유출각도에 고려하여 γ 를 설정하면 좋은 유량분배 특성을 얻을 수 있을 것으로 생각되지만 실제 시스템의 경우 많은 포트마다 형상을 변화시키는 것은 제작에 복잡성을 초래하여 특별한 목적 외에는 활용될 가능성이 낮을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 좀 더 단순한 경우에 대한 분석이 수행되었다.

Fig. 12는 모든 출구포트에서 일정한 γ 를 가질 경우에 대한 M 의 변화를 나타낸 것이다. 매니폴드 전체길이 고정되었기 때문에 포트수가 포트간격에 맞추어 조정되었다. $\gamma = 90^\circ$ 인 경우 $\pm 8\%$ 정도의 변화를 보이지만 γ 가 80° , 70° , 60° 로 감소할수록 유량분배의 균일성이 개선되고 있다.

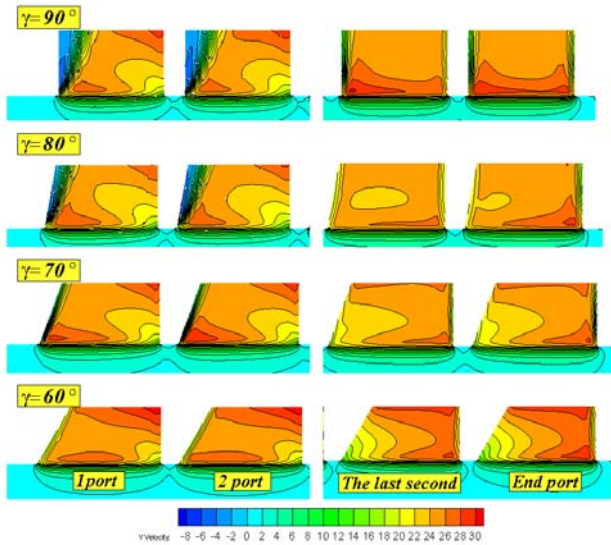


Fig. 13 y-velocity for different geometries

Fig. 13의 y-속도 분포를 보면 90°일 때 1번과 2번에 존재하는 음의 속도성분이 각도가 줄어들수록 사라짐을 확인할 수 있다. 그렇지만 마지막 포트에 접근할수록 90°일 때 존재하지 않는 불균일한 속도분포가 초래되어 분배능이 저하될 수 있는 특징이 있다. 이러한 특징은 포트길이를 증가시키면 개선될 것으로 생각된다. 따라서 균일한 질량유량을 분배하기 위하여 적절한 γ 를 선택하는 것이 중요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

유량분배 매니폴드의 성능을 개선하기 위한 출구형상 조건을 찾기 위해 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 직사각형의 단면을 가지는 출구포트형상을 기준으로 출구포트길이와 입구면적에 대한 출구포트면적의 비 변화에 대한 해석을 수행하였다. 출구포트의 길이가 길수록 면적비가 감소할수록 균일한 유출유량분배가 얻어졌다. 이러한 분배특성은 출구포트에 존재하는 3차원적인 재순환유동과 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 파악되었다. 3차원 유동구조

분석결과를 토대로 출구포트의 형상을 수정하였다. 재순환유동구조가 사라지게 하는 형상을 도입할 경우 유출유량의 균일성은 매우 크게 증대됨이 확인되었다. 이러한 해석결과는 유량분배기 설계에 의미 있는 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한전원자력연료주식회사의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] 2009, Chen, A.W. and Sparrow, E.M., "Systematic approaches for design of distribution manifolds having the same per-port outflow," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.131, pp.061101-1-061101-9.
- [2] 2008, Yeol, Y.H., Kim, D.H., Lee, K.S. and Cha, W.H., "Flow distribution in manifold using modified equal pressure method," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.21, pp.176-185.
- [3] 2009, Chen, A.W. and Sparrow, E.M., "Effect of exit-port geometry on the performance of a flow distribution manifold," *Applied Thermal Engineering*, Vol.29, pp.2689-2692.
- [4] 2008, Hassan, J.M., AbdulRazzaq, A. and Kamil, B.K., "Flow distribution in manifolds," *Journal of engineering and Development*, Vol.12(4), pp.159-177.
- [5] 1971, Bajura, R.A., "A model for flow distribution in manifolds," *ASME Journal of Engineering for power*, Vol.93(1), pp.7-12.
- [6] 2009, Chen, A.W. and Sparrow, E.M., "Turbulence modeling for flow in a distribution manifold," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.52, pp.1573-1581.
- [7] Fluent User's Manual, Version 6.2.