

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.9.789>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

다양한 디퓨저 형상의 유량 분배 특성에 관한 수치해석 연구

김명수* · 김후배** · 최형권***†

* 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과,

** 서울과학기술대학교 산업대학원 기계공학과, *** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

Numerical Analysis of Flow Rate Distribution of Diffusers with Various Shapes

Myoung Soo Kim*, Hoo Bae Kim** and Hyoung Gwon Choi***†

* Dept. of Energy System, Graduate School of Energy and Environment, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

** Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Industry, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

*** Dept. of Mechanical/Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

(Received June 24, 2014 ; Revised July 17, 2014 ; Accepted July 21, 2014)

Key Words: Open-type Thermal Storage System(개방형 축열시스템), Diffuser Shape(분배기 형상), Distribution Characteristics(분배 특성), Head of Pump(펌프양정)

초록: 본 연구에서는 개방형 축열시스템에 설치되는 다양한 형상을 가진 디퓨저의 유량 분배 특성을 수치해석 하였다. 작동유체가 분기배관의 양 방향으로 나뉘어져 있는 구멍들을 통하여 균등하게 분배되도록 4가지 형상의 디퓨저를 설계하였다. 상용 해석 프로그램인 ANSYS-FLUENT를 사용하여 비압축성 유체의 3차원 정상 층류 유동으로 시뮬레이션을 수행하였다. 한 방향 또는 양 방향으로 분배되는 디퓨저는 유량이 일정하게 분배되지 않는 반면에 양 방향 헤더 형식과 H형 대칭구조의 디퓨저는 균등한 분배 특성을 보였다. 한편, H형 대칭구조의 디퓨저는 양 방향 헤더 형식 디퓨저보다 높은 펌프 양정을 필요로 하므로 유량분배도 일정하고 펌프 양정도 낮은 양 방향 헤더 형식 디퓨저가 최적임을 확인하였다.

Abstract: In this study, the distribution characteristics of diffusers with various shapes that are installed in an open-type thermal storage system are numerically investigated. Four diffusers are designed to distribute a working fluid evenly through the holes on bifurcated pipes. Three-dimensional steady simulations of incompressible laminar flow are conducted using commercial software (ANSYS-FLUENT). The simulation results show that both the bidirectional header-type diffuser and the H-type diffuser distribute the working fluid evenly whereas both the unidirectional and the bidirectional diffusers distribute the working fluid unevenly. The results also show that the H-type diffuser requires a higher head of pump than the bidirectional header-type diffuser. Therefore, the bidirectional header-type diffuser is recommended for use because it enables even distribution of the working fluid and requires a low head of pump.

1. 서론

냉방수요에 의한 여름철 전력사용의 꾸준한 증가로 인한 전력수요관리의 방안으로 심야시간대 남는 잉여 에너지를 이용하는 축열시스템이 1990년대 이후부터 우리나라에 보급되어 왔다.

대표적인 축열시스템으로는 얼음의 잠열을 이용한 빙축열시스템과 물의 현열을 이용하는 수축열시스템이 있으며, 근래에는 지열 및 공랭식 히트펌프와 결합된 냉난방 겸용 축열시스템이 꾸준히 보급되고 있다.

축열시스템에서 시스템 효율을 결정하는 주요 요인은 축열조의 효율적인 이용이다. 특히 캡슐형 빙축열시스템의 경우 축열 시 얼음의 밀도 차에 의한 축열조 내 사(死) 공간이 없어야 한다. 이를 위한

† Corresponding Author, hgchoi@seoultech.ac.kr

핵심기술 중 하나가 바로 축열조 상부에 있는 디퓨저의 유량분배이다. 디퓨저의 분기배관에서 유출 구멍의 크기가 같으면 말단 부분의 구멍으로 많은 유체가 흐른다. Kang 등⁽¹⁾은 디퓨저의 모든 구멍에 같은 양의 유체가 흐를 수 있도록 베르누이 방정식에 근거하여 말단 부로 갈수록 출구 구멍의 크기를 작게 하는 방식을 제시하였다. 또한 아이스슬러리 빙 축열시스템은 고체-액체의 2상 유동으로 디퓨저에서 유량이 고르게 분포되지 않고 편중되면 얼음입자의 빙핵이 성장하여 얼음으로 고형화될 수도 있다. 이는 곧 배관 내에서 유체의 흐름을 막는 현상을 야기한다. Park 등^(2,3)은 분기부나 확대, 축소부 등에서 속도 증가와 마찰에 의한 압력손실 그리고 빙충진율(IPF-Ice Packing Factor)의 높고 낮음에 따라 아이스슬러리가 유동에 미치는 영향을 연구하여 균등 흐름의 중요성을 확인하였다.

수축열시스템은 축열조 내의 고온과 저온의 유체가 혼합되지 않도록 온도차와 디퓨저에서 분배되는 유속을 조절하여 중력 방향으로 흐름이 형성되면서 이루어지는 온도 성층화를 유지하는 것이 중요하다. 이를 위한 디퓨저 연구로는 Lin⁽⁴⁾ 등이 디퓨저 설계 시 반영되는 무차원 수로 디퓨저의 입구 노즐과 축열조 직경을 특성 길이로 한 Re 수와 Fr 수가 갖는 중요성을 강조하였다. Chung 등⁽⁵⁻⁸⁾은 직사각형 축열조에서 원형 평판형, 원형 조절 평판형 그리고 H형 3가지 형상의 디퓨저에서 유량분배가 온도 성층화에 미치는 영향을 연구하였다. 유동특성을 결정하는 무차원 수인 Re 수와 Fr 수의 범위를 달리 하면서 연구를 수행한 결과 축열조 길이에 따라 차등화 된 유, 출입 속도를 조절할 수 있도록 유동저항체를 설치한 원형 조절 평판형이 가장 우수한 성능을 가지고 있다고 제시하였다. Lee 등^(9,10)은 원형 축열조 상부에서 형상이 곡면형과 평면형이고, 직경이 다른 레디얼 디퓨저를 사용하여 각 디퓨저에서 분사속도와 Fr 수와의 관계에 의한 온도 성층도를 연구하였다.

디퓨저에서 비압축성 유체의 유량분배에 대한 기초 연구로는 Lee 등⁽¹¹⁾이 유동의 끝부분이 막히고, 홀의 면적은 같으며, 길이가 일정한 사각 덕트에서 작동유체를 물로 하여 홀의 개수를 달리하여 얻는 BR(block ratio)의 값과 Re 수의 변화에 따라 유출 곡선의 기울기를 가지고 유량의 분포를 비교하였다. Lee 등⁽¹²⁾은 CFD를 활용하지 않고 비교적 정확한

유동추이를 알 수 있는 코드를 생성하여 개발한 프로그램으로 디퓨저 hole의 직경 변화와 디퓨저 pipe의 직경 변화에 따라 유출속도를 관찰하여 비압축성 유체의 유량분배에 대해서 연구하였다. Lee⁽¹³⁾는 모든 출구포트의 질량유량이 균일하게 되도록 출구포트 형상을 기준으로 출구포트길이 변화에 대한 영향, 출구포트 면적 비 변화에 대한 영향, 그리고 유량 출구 각에 따른 출구포트 형상을 조건으로 수치해석 연구를 수행하였다. 그 결과 동일한 면적비 조건에서 출구포트 길이는 길수록, 출구포트 단면적이 감소할수록 그리고 유동방향성을 고려해서 출구포트 형상을 수정한 경우 균일한 유량분배 특성이 얻어짐을 보였다.

본 연구에서는 디퓨저 내부의 3차원적인 유동특성과 재순환 유동의 존재로 인한 출구포트에서 mass-flow값에 따른 유량 분배율과 압력분포를 통해 유량분배 성능을 비교하고자 한다. 4가지 형상의 배관구성을 가진 디퓨저 중에서 가장 원활한 균등흐름을 보장하는 디퓨저의 형상에 대해서 연구하고자 하며, 한편 본 연구의 수치해석에서 Fr 수와 관련된 사항은 고려하지 않았다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

파이프 입구에서의 유입 유량과 Hole을 통해 유출되는 유량은 동일하므로 연속방정식을 적용하였다. 뉴턴유체, 정상유동, 비압축성 유동으로 가정하여 운동량 방정식을 적용하였고, 점성소산 및 열전달은 고려하지 않기 때문에 에너지 방정식은 적용하지 않았다.

연속방정식

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

x 방향:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

y 방향 :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} \frac{1}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

z 방향 :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} \frac{1}{\rho} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

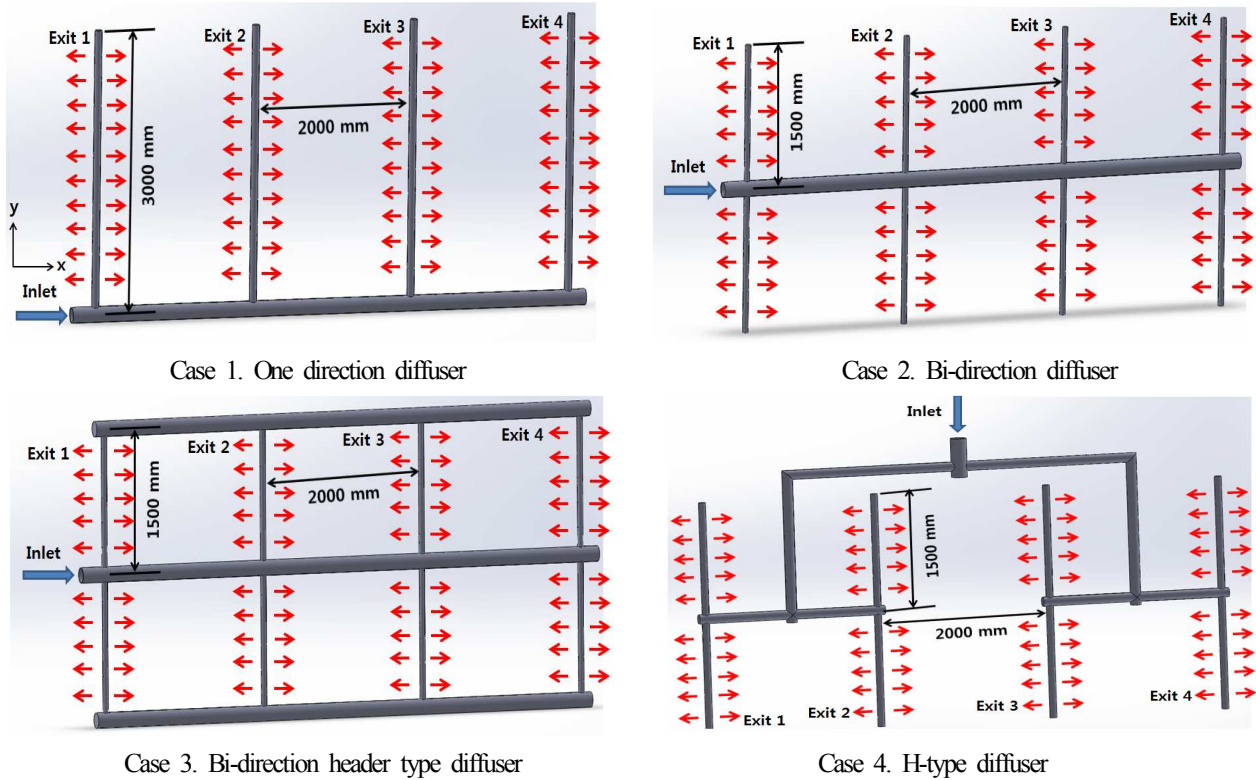


Fig. 1 Four diffuser shapes

여기에서 ρ 는 유체의 밀도, ν 는 동점성계수이며, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도 성분이다. 지배방정식의 해법을 위해서 ANSYS-FLUENT에서 제공하는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 대류항 공간 차분은 2차 정확도의 상류도식(Second Order Upwind)을 사용하였다. 수렴판정 조건은 운동량 및 연속방정식의 residual이 10^{-6} 이하일 때로 지정하였다.

2.2 형상 및 경계조건

축열조의 형상은 고정하고 4가지 다른 기하학적 구성방식의 디퓨저를 선택하여 Solid-works 프로그램을 이용하여 3차원으로 모델링하고 그 성능을 연구하였다. Fig. 1은 고려하고자 하는 각각의 디퓨저 형상이다.

Case 1은 입구의 주 배관에서 한 방향으로 4개의 분기배관이 있는 형상이다. 주 배관의 내경은 154mm이고 분기배관의 내경은 77mm이다. Case 2와 Case 3은 양 방향 대칭구조로 분기배관을 구성하였다. 입구 측 주 배관의 내경은 Case 1과 같은 크기의 154mm이고, 분기배관은 양 방향 8개의 분기배관으로 구성되어 있기 때문에 분기배

관의 내경은 54mm이다. 특히 Case 3의 경우는 양 끝의 분기배관의 말단 부분들을 입구 측 주 배관과 같은 관경인 154mm의 배관으로 이어서 헤더 형식으로 구성하여 유체가 머무를 수 있도록 하였다. Case 4는 현재 가장 널리 사용되고 있는 H형의 대칭구조로 된 디퓨저이며, 입구 주 배관 내경과 분기배관의 내경은 각각 154mm, 54mm로 Case 2, 3과 같다. 분기배관의 간격은 모든 Case에서 2000mm로 같게 적용하였다.

Case 1의 각각 4개의 출구 분기배관에서는 좌우 10개씩 20개의 구멍을 뚫어서 유량이 디퓨저 밖으로 분배되도록 구성하였다. 양방향 대칭으로 되어있는 Case 2, 3, 4는 8개의 각각의 출구 분기배관에 좌우 5개씩 10개의 구멍을 뚫었으며 유량이 유출되는 전체 구멍의 수는 모든 Case에서 80개로 같다.

원래 디퓨저 구멍의 크기를 끝 부분으로 갈수록 작게 하여 유량이 균등하게 흐를 수 있도록 할 수도 있지만 본 연구에서는 전체적인 디퓨저 형상에 대한 유량분배 해석이므로 디퓨저 구멍의 크기는 동일하게 설계하였다. 경계조건으로 입구에서는 유량 조건을 주었으며, 분기배관의 출구

Table 1 Three meshes for grid independence test

	Node number	Cell number	Prism height [mm]
20D	386,309	1,467,475	1.500
30D	956,458	3,900,610	1.000
45D	2,327,701	9,874,642	0.667

Table 2 Cell numbers for four simulation cases

TYPE	Node number	Cell number
Case 1.	956,458	3,900,610
Case 2.	796,861	3,202,835
Case 3.	1,672,528	6,808,868
Case 4.	814,004	3,128,799

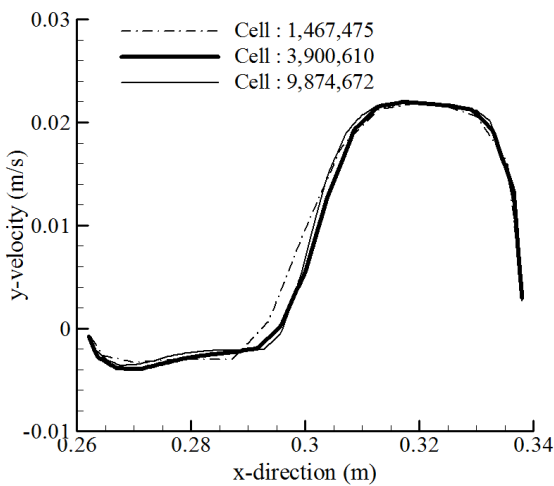


Fig. 2 Grid independence test

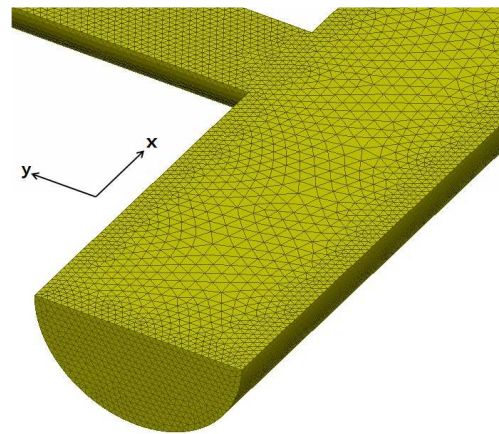


Fig. 3 Unstructured mesh

구멍에서는 대기압 조건으로 계산하였다.

디퓨저의 형상과 함께 유동특성을 결정하는 무차원수는 다음과 같이 정의하는 Re 수가 있다.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (3)$$

여기에서 ρ 는 밀도, v 는 유속, L 은 특성길이, μ 는 점성계수 그리고 ν 는 동점성계수를 나타낸다. 본 연구에서는 층류에서 디퓨저 형상에 따른 유량 분배의 균일도를 살펴 보기위하여 입구의 직경 154mm를 특성길이로 지정하여 Re 수 500에서 수치해석을 수행하였다. 이 경우에 입구유속 0.0055m/s이며, 작동유체의 밀도와 점성계수는 각각 590.32kg/m³, 0.001kg/m·s으로 설정하였다. 또한 수축열시스템의 디퓨저에서는 본 연구의 경우 수평적 유량 분배에 초점이 맞추어져 있기 때문에, 수직적 유량 분배에 영향을 미치는 정수압(높이차)적 효과는 무시하였다.

2.3 격자 계 및 Grid Test

본 연구에서 사용된 3차원 격자는 사면체(Tetra) 격자로서, 격자 생성 전용 프로그램인 ICEM-CFD 13.0 프로그램을 이용하여 생성하였다. 수치해석에 사용될 격자 계를 결정하기 위하여, 배관 외경(D)을 기준으로 기준 셀의 크기가 D/20, D/30, D/45의 세 가지 격자 계를 사용하여 격자 독립성 검증실험을 실시하였다. D/20의 격자 개수는 146만개, D/30의 격자 개수는 390만개, D/45의 격자 개수는 987만개일 때 입구 주 배관에서 한 방향으로 분배되어 있는 Case 1의 첫 번째 분기배관에서 x방향에 대한 y-velocity 값을 비교하였다. Fig. 2는 그 격자 계 검증실험 결과이고 Table 1은 각 격자 계의 node와 cell의 개수이다. 가장 조밀한 격자계인 D/45와 D/30의 격자 계 실험 결과치가 유사하나, D/20의 격자 계에서는 차이가 생기기 시작 하므로 본 연구에서는 모든 수치해석에 대하여 최대격자 크기 D/30의 비

균일 격자 계를 사용한다. 검증된 격자 계의 Case 별 디퓨저의 전체 cell수와 node수를 Table 2에 나타내었다. Fig. 3은 계산에 사용된 격자 계를 나타낸다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 디퓨저 형태에 따른 Case별 유량분포

Fig. 4는 디퓨저 Case별 분기배관 말단부에서 분배되는 mass-flow 값을 기준으로 한 유량 분배율을 나타낸 그래프이다. 주 배관 입구의 가까운 분기배관에서부터 Branch 1이고 가장 먼 분기배관이 Branch 4이다. 한 방향으로 분배되는 Case 1의 경우에는 입구에서 가까운 분기배관인 Branch

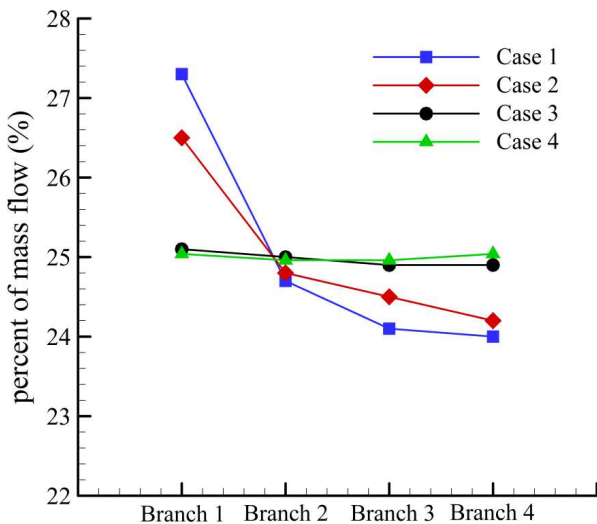


Fig. 4 Flow-rate distributions of four cases

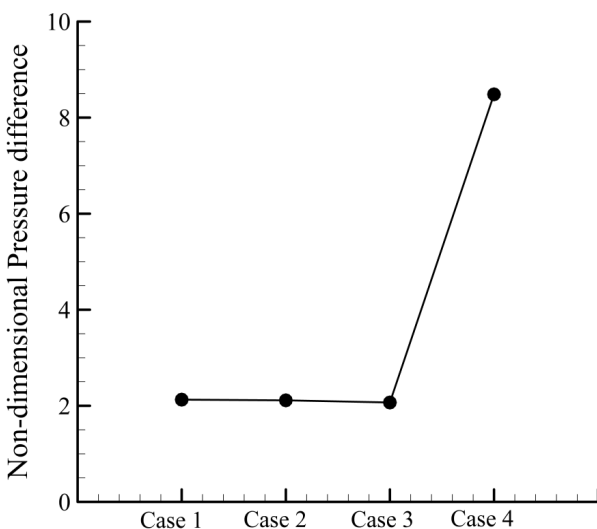


Fig. 5 Pressure difference between inlet and exit hole

1의 말단에서 유량이 가장 많이 유출되고 멀수록 유량 값이 점점 감소하였으며 그 편차가 크다. 이때 편차가 큰 만큼 균일하지 못한 유동 분포이다. Case 2에서는 양 방향 대칭으로 분배되는 구조이지만 Case 1과 비슷한 양상을 보인다. 물론 그 편차는 작지만 유동특성은 불균일한 분포를 갖는다. Case 3, 4는 배관 구성이 대칭이고, 유량도 대칭적으로 유출되면서 매우 균일하게 분포된다.

3.2 디퓨저 형태에 따른 Case별 압력분포

Fig. 5는 각 Case 별 입구 압력과 분기배관 말단 부분의 출구 압력과의 차이를 무차원화 한 값을 나타낸 그래프이다.

$$\Delta p^* = \frac{\Delta p}{\rho u_{inlet}^2} \quad (4)$$

여기에서 Δp^* 는 무차원화 한 압력강하량이고 Δp 는 입구와 출구의 압력차, ρ 는 유체의 밀도, u_{inlet} 은 입구 유속이며, 즉 ρu_{inlet}^2 은 입구에서 유의 동압이다.

Case 1, 2, 3에서는 입구와 출구의 압력차가 크지 않지만 Case 4의 경우는 매우 크게 나타난다. 이는 먼저 입구에서부터 유체가 진행 방향이 아닌 수직 방향으로 분배되고, 대칭구조이지만 계속적인 수직 분기가 원인으로 보인다. 따라서 관로저항이 크기 때문에 펌프의 양정도 커져야 하며 분기배관의 간격도 유량분배에 중요한 변수가 된다. 전체 형상에 대한 압력 분포를 나타낸 Fig 7에서 Case 4는 큰 압력차를 보여준다.

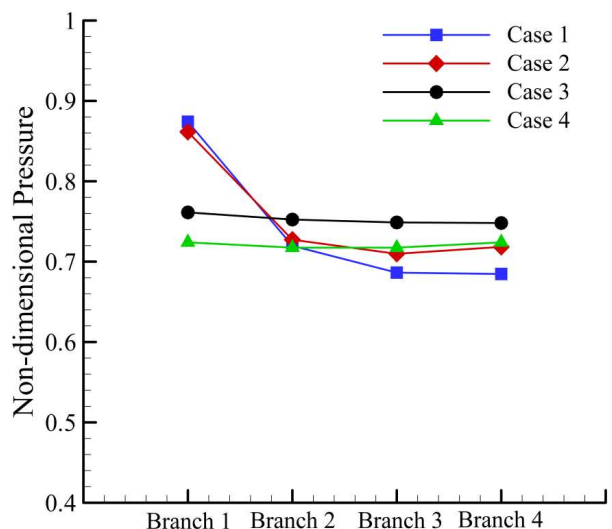


Fig. 6 Non-dimensional pressures at the exit holes of four branches

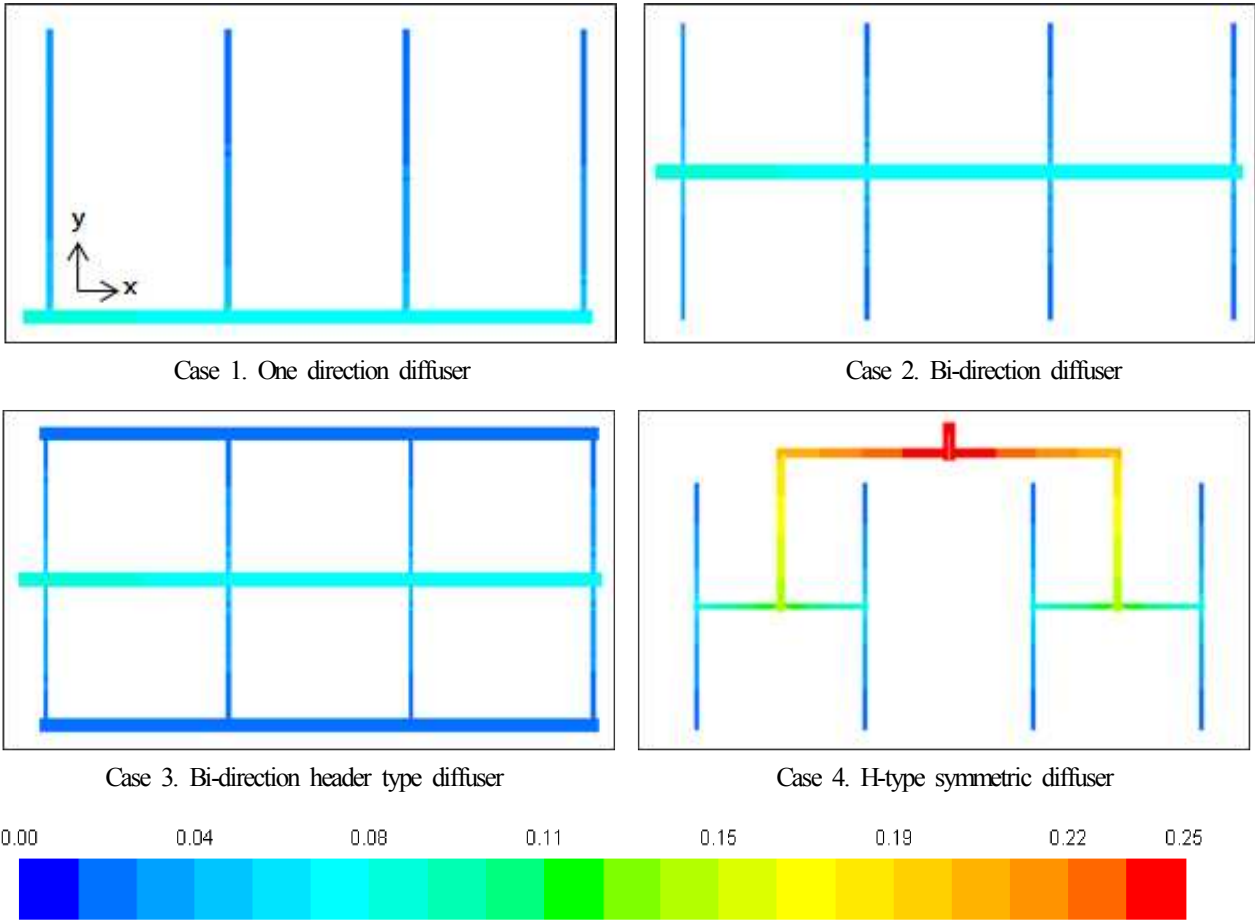


Fig. 7 Pressure contours for four simulation cases

각각의 분기배관의 말단 부분에서 출구 압력을 무차원화 한 분포도를 Fig. 6에 나타내었다. 한 방향으로 분배되는 Case 1은 입구에서 가장 가까운 분기배관의 말단 출구 압력이 가장 높고 입구에서부터 멀어질수록 압력은 점점 낮아진다. 가장 먼 분기배관과의 압력차가 크고, 그 편차가 클수록 유량 분배는 더욱 균등하지 못하며 Fig. 7의 Case 1의 그림에서도 나타난다. Case 2에서는 양방향 대칭으로 분배되기 때문에 압력 편차가 Case 1보다는 적게 보인다. 하지만 전체적인 유체 흐름의 양상이 비슷하고 불균일한 유동분포임을 알 수 있다. Case 4의 경우는 형상 구조가 대칭이므로 압력강하 또한 전체적으로 대칭을 유지하면서 균일한 분포를 보인다. 하지만 입구와 출구의 압력차가 크고, 그만큼 에너지 손실 또한 크다. Case 3은 각 분기배관에서 압력편차가 일정함을 보여주며 이는 유량분포의 결과에서도 알 수 있듯이 유량이 균등하게 분배되는 조건을 충족한다. 이는 주 배관과 동일한 관경의 배관이

분기배관 말단의 양쪽에 설치되어 압력이 회복되는 공간을 제공함과 동시에 압력 밸런스를 유지하기 때문이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 축열시스템에 적용된 4가지 형상의 배관구성을 가진 디퓨저에서 유량분배에 대한 문제를 수치해석 하였다. 입구 유속 조건과 출구 측 압력조건을 경계조건으로 하여 층류 유동으로 가정하고 해석한 결과 다음의 결론들을 도출하였다.

- (1) 한 방향으로 분배되는 Case 1은 각각의 분기배관에서 압력강하가 다르게 나타나기 때문에 유량 분배가 균일하지 못하다. 양방향으로 분배되는 Case 2에서도 편차는 Case 1보다는 작지만 비슷한 형태의 유량 분포 특성을 가진다.
- (2) 가장 많이 적용되고 있는 H형 구조의 Case 4는 압력강하 및 유량분포도 대칭의 형태를 이루지만, 입구에서 유량이 진행방향이 아닌 T형 수

직 분기이기 때문에 입구와 출구 포트와의 압력차가 커서 에너지 손실이 증가하므로 큰 펌프 양정이 요구된다.

(3) 주 배관과 동일한 관경의 배관을 양쪽 끝에 설치한 헤더 형태의 디퓨저인 Case 3은 헤더 배관에서 압력을 회복시키면서 압력 밸런스를 이루게 한다. 따라서 전체적으로 압력강하량이 모든 분기배관에서 일정하며 유량분배도 균등하게 이루어진다.

참고문헌

(References)

- (1) Kang, H. K., Kim, H. C. and Park, C. H., 2002, "Uniform Flow Technology for High Efficiency of Ice Storage System," *Proceedings of the SAREK 2002 Summer Annual Conference*, pp. 465~470.
- (2) Park, K. W., Choi, H. W., Roh, G. S. and Jeong, J. C., 2003, "Experimental Study on Transformation of IPF and Pressure Drop in Branches with Ice Slurry," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 272~279.
- (3) Choi, H. W., Kim, K. M. and Park, K. W., 2002, "Experimental Study on Ice-slurry Flowing in Straight and Branch Tube," *Proceedings of the SAREK 2002 Summer Annual Conference*, pp. 364~368.
- (4) Lin, J.-Y., Shey, R.-J. and Fang, L.-J., 1987, "A Study of Thermal Stratification in Storage Tank with Charging," *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*.
- (5) Chung, J. D., Park, J. H. and Cho, S. H., 2004, "Effect of Diffuser Shape on the Performance of Water-Chilled Heat Storage," *Journal of the Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea*, Vol. 16, No. 4, pp. 374~383.
- (6) Jung, J. D., 2010, "Integral Approximate Solutions for Stratification Thermal Storage Tanks Considering Mixing Region," *Proceedings of the SAREK 2010 Summer Annual Conference*, pp. 43~48.
- (7) Jang, C. Y., Cho, S. H., Tae, C. S., Lee, C. K. and Kang, H. K., 2004, "Experimental Study on the Thermal Stratification of Chilled Water in the Rectangular Storage Tank," *Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference*, pp. 519~523.
- (8) Jang, C. Y., Cho, S. and Choi, S. Y., 2008, "Study on Stratification according to Diffuser Shape of the Thermal Storage Tank in Integrated Energy," *Proceedings of the KSES 2008 Spring Annual Conference*, pp. 300~303
- (9) Lee, S. N., Lee, Y. S., Park, S. R., Yoon, H. K., Park, J. T., Chang, K. C. and Ra, H. S., 2001, "Effects on Stratification due to Diffuser Shape in a Thermal Storage Tank," *Proceedings of the SAREK 2001 Winter Annual Conference*, pp. 617~621.
- (10) Shin, M. S., Kim, H. S., Jang, D. S., Song, H. Y., Lee, Y. S. and Lee, S. N., 2002, "A Study for Optimum Design of Thermal Storage Tank," *Proceedings of the KSCFE 2002 Summer Annual Conference*, pp. 127~132
- (11) Lee, S. K., Moon, N. S. and Lee, J. K., 2010, "Study of Flow Characteristics of Exit Flow in Perforated Tube with Orifice Configuration," *Proceedings of the KSME 2010 Fall Annual Conference*, pp. 2925~2929.
- (12) Lee, H. G., Park, J. H., Choi, S. B. and Choi, S. G., 2013, "Study of Incompressible Fluid Flow in Pipe," *Proceedings of the KSAE Comprehensive Sector Conference*, pp. 880~883.
- (13) Lee, J. W. and Park, T. S., 2013, "Numerical Study on Turbulent Flows in a Distribution Manifold," *Proceedings of the KSCFE 2013 Spring Annual Conference*, pp. 336~342.