

벤츄리관 형상이 제트 믹서의 성능에 미치는 영향

김근배* · 마상범** · 김광용***†

Effects of Venturi Pipe Shape on Performance of a Jet Mixer

Geunbae Kim*, Sang-Bum Ma**, Kwang-Yong Kim***†

Key Words : Venturi effect(벤츄리 효과), Jet Mixer(제트믹서), Agitation(교반), Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations(레이놀즈평균 나비에스톡스 방정식)

ABSTRACT

In this paper, a numerical analysis was performed to analyze the effects of a venturi pipe on mixing performance of a jet mixer used for liquid agitation in a large capacity fluid storage tank. The numerical analysis was performed by using the three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and standard k-ε turbulent model. In order to evaluate the mixing performance of the jet mixer for different shapes of the venturi pipe, three geometric parameters, i.e., the throat area of venturi pipe, distance between nozzle and venturi pipe and diffuser angle, were used. It was found that a low pressure region was generated near the throat of the venturi pipe. And, the characteristics of the surrounding fluid flowing into the venturi pipe by the pressure difference were observed. The mixing efficiency was most affected by the diffuser angle, and the maximum mixing efficiency of 39.35% was achieved at a diffuser angle of 5.0°.

1. 서 론

교반(Agitation)은 물리적이거나 화학적 성질이 다른 2종 이상의 물질을 균일한 혼합 상태로 만드는 것으로 화학 산업에서 매우 일반적이면서도 중요한 공정이다. 교반의 속도나 효율 등을 향상시키기 위해 추가적인 장치가 사용되는데, 대표적인 장치로는 유체기계를 사용한 기계식 교반 장치와 제트믹서(Jet Mixer)가 있다.

기계식 교반 장치는 유체 저장 탱크 내부에 임펠러(Impeller)를 설치하여 외부 동력을 사용해 회전 시키는 방식이며, 주로 유체의 점성이 높은 소형 저장 탱크에 사용된다. 반면, 제트믹서는 외부 동력을 사용하지 않고, 노즐을 통해 유체의 흐름을 제어하여 혼합하는 방식이다. 제트믹서는 기계식 교반 장치와 비교하여 추가부품(임펠러, 모터, 축 등)을 사용하지 않기 때문에 구조가 간단하고, 초기 투자비가 상대적으로 저렴하다. 또한 유지보수가 용이하고, 운영비가 적게 소모된다. 이와 같은 특징으로 인해 제트믹서는 수리·보

수(Overhaul) 주기가 긴 대용량 저장 탱크에 많이 사용된다.

제트믹서가 사용되는 대표적인 예는 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 저장탱크에서 층상화(Stratification) 방지가 필요한 경우이다. LNG의 물성은 산지에 따라 조성 차이가 발생한다. 밀도가 다른 LNG를 동일한 탱크에 저장하는 과정에서 고밀도의 LNG를 하부에, 저밀도의 LNG를 상부에 나누어 저장하게 되면 완전히 섞이지 않고, 층이 나누어 대류하게 되는데 이러한 현상을 층상화라고 한다. 층상화는 외부 열전달에 의한 롤오버(Roll-over) 현상⁽¹⁾을 초래하기 때문에 이를 방지하고자 탱크 내부의 LNG를 주기적으로 강제 혼합시키며, Fig. 1과 같이 저장탱크 하부에 제트믹서를 설치하는 방법이 사용된다.

제트믹서는 설치하는 방법에 따라서 유체의 교반 성능에 다른 영향을 미치게 된다. 제트믹서를 사용해 저장 탱크 내부의 효율적인 교반을 위해 많은 선행연구들이 수행되었다. Lane⁽²⁾은 제트믹서에 의한 저장 유체의 혼합 시간 방정식을 연구하였고, 저장된 유체의 혼합 시간은 제트의 레이놀즈수에

* 인하대학교 대학원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University)

** 인하대학교 대학원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University)

*** 인하대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Inha University)

† 교신저자, E-mail : kykim@inha.ac.kr

크게 의존하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. Patwardhan⁽³⁾은 제트믹서의 분사 속도, 각도 및 직경에 따른 혼합 시간과 농도 프로파일을 수치해석을 통해 분석해 실험값과 비교했다. 혼합 시간은 실험결과와 비교하여 잘 예측됐지만, 농도 프로파일의 경우 실험결과와 잘 일치하지 않는 것이 관찰되었다. Zughbi⁽⁴⁾는 제트믹서의 각도, 높이 및 수량이 교반 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 혼합 시간은 제트 분사각도에 크게 좌우되며, 탱크 바닥에서 분사되는 제트믹서의 최적 각도는 30°인 것으로 확인하였다. Engelbrecht⁽⁵⁾는 제트믹서와 벤츠히관(Venturi pipe)이 결합된 형상의 성능에 영향을 미치는 6개의 변수(벤츠히관의 길이, 제트믹서 출구와 벤츠히관 사이의 거리, 변곡점 수량, 위치 등)를 선정하고 최적 설계를 통해 교반 성능을 향상 시키는 연구를 수행 하여, 유량 증가 비율을 기존 제품 대비 87% 향상시킨 형상을 도출하였다. Hosseinzadeh 등⁽⁶⁾은 물과 톨루엔의 혼합 시스템에서 제트믹서 앞에 벤츠히관을 설치하는 것이 내부 혼합 영역을 확장시키는데 도움이 된다는 것을 확인하였고, 분사 속도가 작으면 흡입비와 혼합 에너지 효율이 증가하지만 혼합 효율은 감소한다는 결과를 도출하였다. 아울러, 제트믹서의 입출구 면적비가 증가함에 따라 혼합 효율이 증가하지만 혼합 에너지 효율은 감소하였다. Skrzypek⁽⁷⁾은 제트믹서를 활용한 아세톤과 벤젠의 혼합에 대한 수치해석적 연구를 수행했으며, 제트믹서 출구 속도 및 위치 변화가 제트믹서의 혼합 효율에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 아울러, 벤츠히관 목의 중심부에서 제트유동을 분사했을 때 다른 조건에 비해 우수한 혼합 효과를 나타내었다.

이처럼 유체 교반을 위해 제트믹서를 활용한 선행 연구들

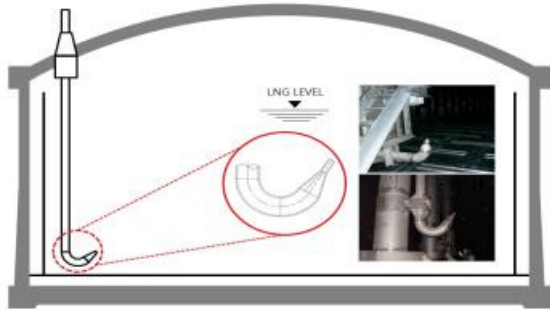


Fig. 1 Jet mixing nozzle in LNG storage tank

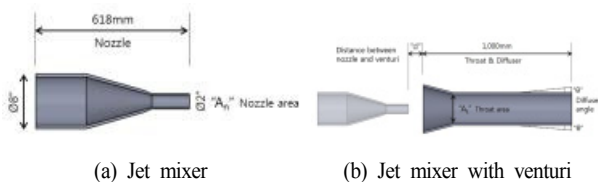


Fig. 2 3-D Geometry of jet mixer with venturi pipe

이 수행되어 왔으나 대용량 저장 탱크에서 벤츠히관을 결합한 제트믹서에 대한 연구는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 효과적인 교반을 위해 벤츠히관을 결합한 제트믹서를 저장 탱크에 설치했을 경우의 유동 특성을 관찰하고, 벤츠히관의 형상 변화에 따른 교반 성능을 평가하여 대용량 저장 탱크 등에 사용되는 제트믹서의 효과적인 설계 방안을 제시하고자 하였다.

2. 유동해석방법

2.1 유동해석 영역과 경계조건

유동해석을 위해 RANS(Reynolds-averaged Navier - Stokes) 방정식 기반의 상용유체역학 코드인 ANSYS CFX 15.0⁽⁸⁾을 사용하였다. 제트믹서와 벤츠히관의 3차원 형상을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 제트믹서는 8인치의 입구 배관과 2인치의 출구 배관으로 구성해 유동을 가속시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 Fig. 2(b)와 같이 제트믹서 출구 측에 벤츠히관을 설치하여 빠른 제트유동으로 인해 주변 유체가 벤츠히관 내로 흡입된다. 이로 인해 벤츠히관 내부에서 제트 유동과 주변 유동의 혼합되어 토출되는 유동 메커니즘을 갖는다. 벤츠히관 유·무에 따른 제트믹서의 교반 성능을 분석하기 위해 벤츠히관의 기준 형상을 선정하여 설계사양을 Table 1에 나타내었다.

벤츠히관 형상 변화에 따른 제트믹서의 교반 성능을 분석하기 위해 Fig. 2(b)에 나타낸 제트믹서 노즐과 벤츠히관 목 단면적 비율(A_v/A_n), 노즐과 벤츠히관 사이 거리(d), 벤츠히관 출구 확산 각도(θ)를 형상변수로 선정하였고, 각 형상변수의 범위는 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서는 대용량 유체 저장 탱크를 반영하기 위해 Fig. 3과 같이 직육면체(2.5 m×2.5 m×8 m) 형태의 유동장(계산영역)을 설정하였다. 직교좌표계의 원점은 노즐 입구 중심이다. 고압의 유체분사를 모사하기 위해 노즐의 입구(Inlet)에는 1 MPa의 정압 조건을 부여하였고, 저장 탱크의 출구(Outlet)에는 표준 상태(1 atm 및 298.15 K)의 조건을 부여하였다. 벤츠히관 벽면과 저장 탱크의 벽면에서는 점착조건(No-slip condition)을 적용하였고, 난류모델은 Standard

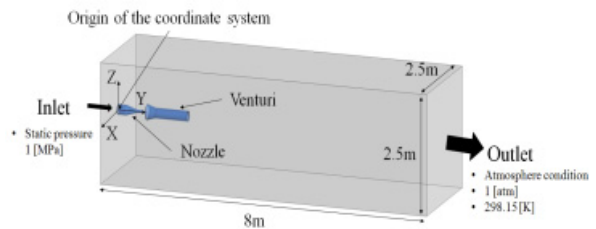


Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

Table 1 Design specifications of venturi pipe

Length (L) [mm]	1,000
Diameter of inlet (D_i) [mm]	304.8
Diameter of throat (D_t) [mm]	203.2
Diameter of outlet (D_o) [mm]	203.2
Diffuser angle (θ) [$^\circ$]	0
Distance from nozzle (d) [mm]	100

Table 2 Geometric parameters of venturi pipe

Parameter	Lower Bound	Upper Bound
Throat area ratio (A_t/A_n)	8.8	41.6
Distance between nozzle and venturi (d) [mm]	-50	150
Diffuser angle (θ) [$^\circ$]	0	10

Table 3 Detail information of grid systems

Number of Grids		Maximum y^+		
Tank	Nozzle & Venturi	Tank wall	Nozzle wall	Venturi wall
153,412	27,921	72	36	44
242,922	167,818	71	34	45
347,358	203,365	70	33	44
837,911	589,804	69	31	42

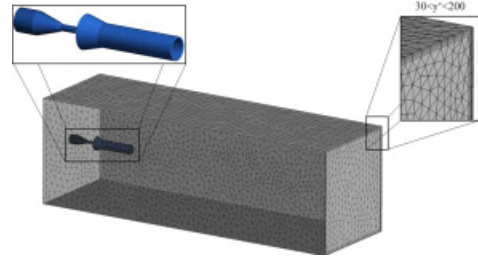
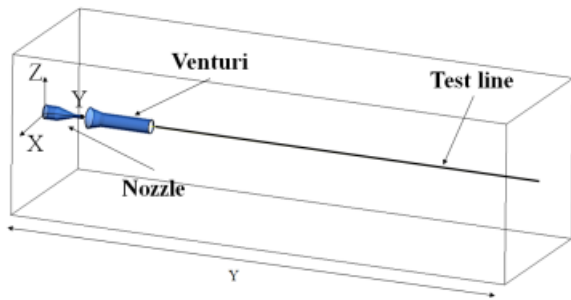
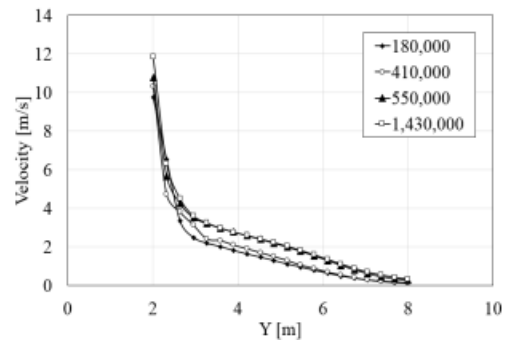


Fig. 4 Grid system



(a) Location of the test line



(b) Velocity distributions along the test line

Fig. 5 Grid dependency test

k- ϵ 모델⁽⁹⁾을 사용하였다.

2.2 격자 의존성 시험

ANSYS ICEM⁽⁸⁾을 사용하여 Fig. 4와 같은 격자계를 구성하였다. 제트믹서 노즐에서 토출되는 제트유동의 속도와 압력구배를 정확히 예측하기 위해 제트믹서 주위로 조밀한 격자를 구성하였고, 벤츄리관에서 발생하는 유체 혼합을 모사하기 위해 벤츄리관 내부에도 조밀한 격자를 구성하였다. 벽 함수를 사용하기 위해 벽면 근처의 첫 격자 거리의 무차원 수인 y^+ 의 값은 30 이상 200 이하가 되도록 설정하였다.

유동해석의 신뢰성을 확보하기 위해 격자 의존성 시험을 Fig. 5와 같이 수행하였고, 각 격자계의 자세한 정보는 Table 3에 나타내었다. 벤츄리관 출구에서부터 저장탱크 출구까지의 Test line(Fig. 5(a)) 상의 혼합 유체의 속도분포를 약 18만개에서부터 143만개의 격자수에 대해 비교한 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 약 55만개 격자수는 143만개

의 격자수와 비교하여 결과가 1.38% 미만의 상대오차를 보였다. 이에 따라 격자 의존성이 제거되었다고 판단하여 약 55만개의 격자수를 사용한 격자계를 사용하여 연구를 수행하였다.

2.3 성능 함수

본 연구에서는 벤츄리관의 형상 변화에 따른 제트믹서의 교반 성능을 평가하기 위해 유량흡입 비율(Suction Ratio(R_s)), 압력비(Pressure Ratio($R_{\Delta P}$)) 및 혼합 효율(Mixing efficiency (η_m)) 등의 성능함수를 다음과 같이 정의하였다⁽⁶⁾.

$$R_s = \frac{\dot{m}_{venturi_out} - \dot{m}_{nozzle_out}}{\dot{m}_{nozzle_out}} \quad (1)$$

$$R_{\Delta P} = \frac{P_{venturi_outlet} - P_{venturi_inlet}}{P_{nozzle} - P_{venturi_outlet}} \quad (2)$$

$$\eta_m = R_s R_{\Delta P} \quad (3)$$

여기서 \dot{m} 과 P 는 각각 질량유량 및 정압력을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 벤츠크리관 유·무에 따른 유동 해석 결과

벤츠크리관이 없는 제트믹서를 사용한 저장 탱크에서 유체의 진행 방향(y축)으로 계산한 정압과 속도 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 초기 압력 조건인 1 MPa로 유입되는 구동 유체의 압력은 노즐을 통과하면서 고속의 운동에너지로 변환되며, 이 때 정압이 강하 하면서 속도가 급격히 증가하게 된다. 구동 유체는 노즐을 빠져나오기 직전 최대 음압(Negative pressure)이 형성되고, 노즐을 통과한 후 정지 상태의 주변 유체와 충돌로 인해 일시적으로 정압이 상승하게 된다. 반면 유체의 속도는 노즐 출구(y=0.57 m)에서 약 45.4 m/s로 최대가 되며, y=0.97 m인 지점까지 9.0 m/s로 급격하게 감소하는 특성을 보였다.

벤츠크리관이 결합된 제트믹서의 경우 Fig. 7에 도시한 바와 같이 벤츠크리관 입구까지는 벤츠크리관이 없는 제트믹서와 동일한 유동 특성을 보이지만 벤츠크리관 내부에서 다시 음압이 형성되는 것이 확인되었고, 벤츠크리관 목(Venturi Throat) 부근(y=0.98 m)에서 정압이 -16.9 kPa까지 감소하여 음압을 형성한 후 다시 회복하는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같이 벤츠크리관으로 인해 음압이 발생한 영역에서는 주변 유체와 비교하여 상대적으로 정압이 낮기 때문에 압력차에 의해 주변 유체가 벤츠크리관으로 유입되는 것을 Fig. 8에서와 같이 관찰할 수 있다. Fig. 8(a)에서 나타난 바와 같이 벤츠크리관이 결합된 경우 목 주변에서 정압이 낮게 분포하고 있으며, 압력차에 의해 Fig. 8(b)와 같이 주변 유체가 벤츠크리관 안으로 유입되어 구동 유체와 혼합되는 것을 확인하였다. 그러나, 벤츠크리관이 없는 경우 노즐에서 분사되는 유체의 압력이 벤츠크리관이 있는 경우 보다 급격히 감소 되고 (Fig. 8 (a)), 고속의 유체가 횡방향으로 크게 확산되어 축방향 유속이 상대적으로 빨리 감소되는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 8 (b)). 따라서 벤츠크리 목의 설계가 교반 성능에 중요한 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.

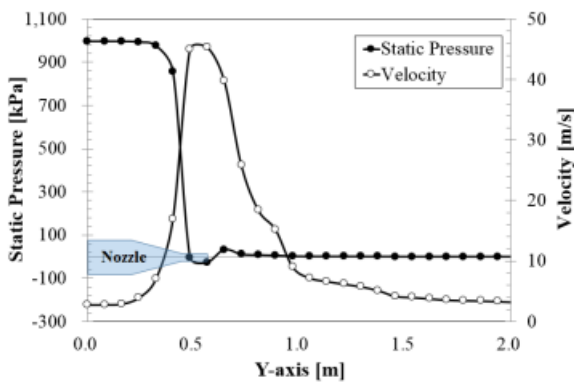


Fig. 6 Static pressure and velocity distributions with the jet mixer without venturi pipe (x=0 and z=0)

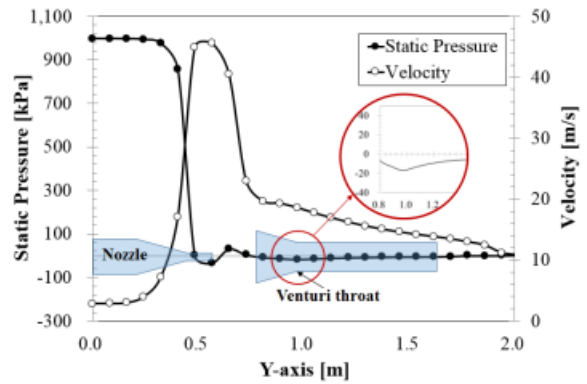
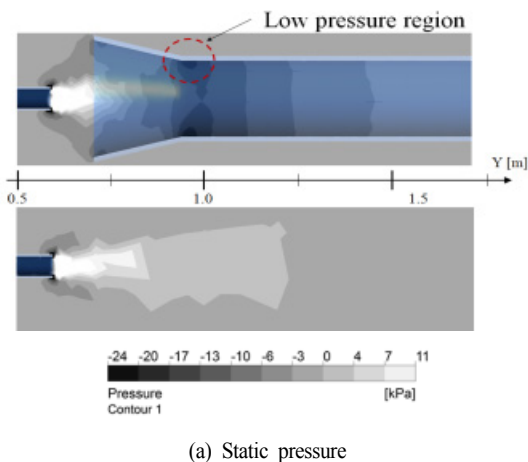
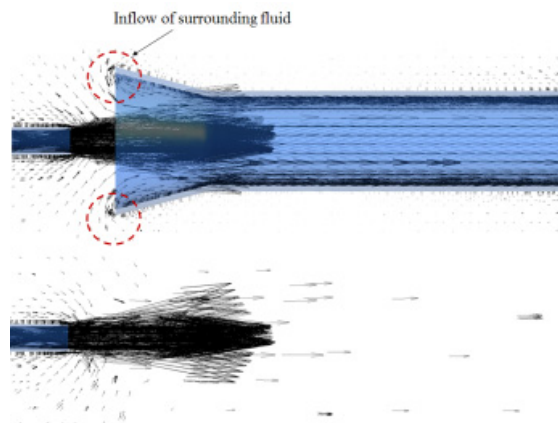


Fig. 7 Static pressure and velocity distributions with the jet mixer with venturi pipe (x=0 and y=0)



(a) Static pressure



(b) Velocity vector

Fig. 8 Static Pressure and velocity vector distributions around the jet mixer with and without venturi pipe

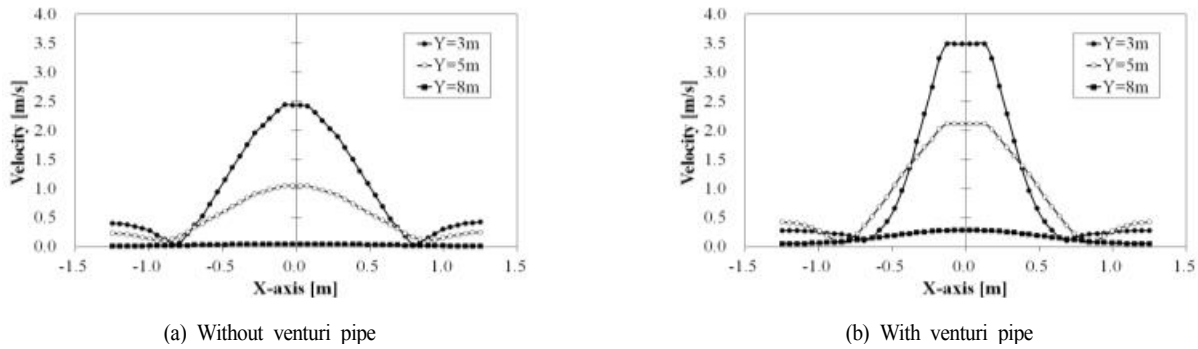


Fig. 9 Comparison of velocity distribution between jet mixer with and without venturi pipe ($z=0$)

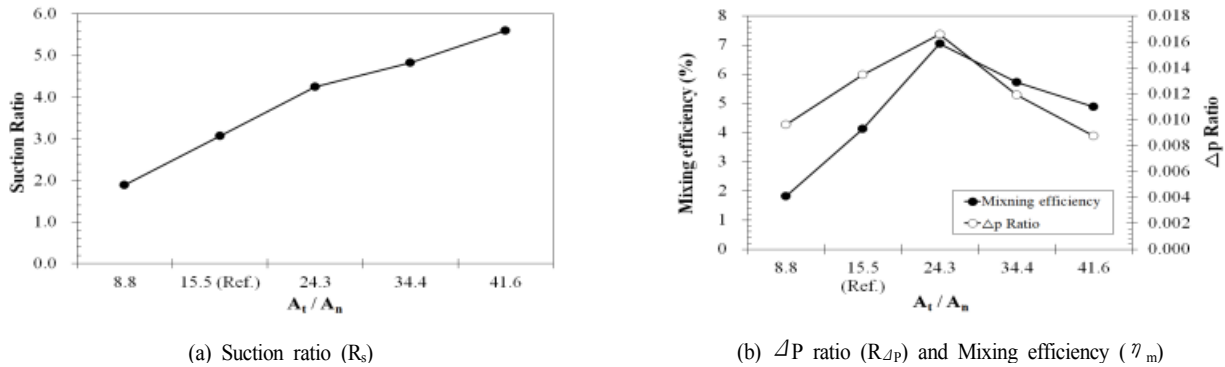


Fig. 10 Effects of venturi throat area on mixing performance

Fig. 9는 유동 방향으로 $y=3\text{ m}$, 5 m 및 8 m 인 지점의 단면($x-z$ 평면)에서 x 축 상의 속도 분포를 나타내었다. 벤츄리관이 결합된 제트믹서를 사용한 경우 일반 제트믹서와 비교하여 유동 중심부에서 높은 속도를 보임과 동시에 고속 영역의 폭은 좁아짐을 알 수 있다.

벤츄리관 유·무에 따른 제트믹서의 유동 분석 결과, 동일 조건에서 벤츄리관이 결합된 제트믹서를 사용한 경우 Fig. 8(a)와 같이 벤츄리관의 목 부근에서 발생하는 저압 영역으로 인해서 주변 유체가 벤츄리관 안으로 유입되는 것을 볼 수 있다. 따라서 벤츄리관 형상에 따라 벤츄리관 목 부근에서 저압영역의 분포와 압력차를 제어할 수 있고, 이는 교반 성능에 영향을 줄 것으로 사료된다.

3.2 노즐-벤츄리관 목 단면적 비(A_t/A_n) 변화에 따른 유동 특성

벤츄리관 목 단면적 변화에 따른 유동 특성을 확인하기 위해 동일한 경계 조건에서 노즐과 벤츄리관 목 단면적 비율(A_t/A_n)에 따른 유동해석을 수행하였다. 기준 형상의 경우 벤츄리관 목 직경이 8인치로 $A_t/A_n=15.5$ 인 형상이다. 벤츄리관 목의 직경을 각각 6, 10, 12 및 14인치로 변경하여 A_t/A_n 이 각각 8.8, 24.3, 34.4 및 41.6인 4개의 형상에 대해 연구를 수행하였다.

단면적 변화에 따른 유량 흡입 비율(R_s), 혼합 효율(η_m)

및 압력비($R_{\Delta p}$)의 변화를 Fig. 10에 도시하였다. 기준형상의 유량 흡입 비율은 약 3.06인 것으로 확인되었다. A_t/A_n 가 8.8인 경우 유량 흡입 비율이 1.89이고, 기준형상과 비교하여 약 38% 감소하였으나 A_t/A_n 가 41.6인 경우 유량 흡입 비율이 5.60으로 기준형상 대비 83% 향상된 것을 확인할 수 있다. Fig. 10(a)에서 확인한 바와 같이 벤츄리관 목의 단면적이 증가할수록 유량 흡입 비율이 증가하는 경향이 나타났으나, Fig. 10(b)에서와 같이 압력비와 혼합 효율의 경우 A_t/A_n 가 24.3일 때 가장 높은 값을 보였다. 유동 방향으로 $y=8\text{ m}$, $z=0\text{ m}$ 인 지점에서 $x-z$ 평면의 x 축 상의 속도 분포를 나타낸 Fig. 11에서 A_t/A_n 가 34.4일 때 최대 유속이 0.44

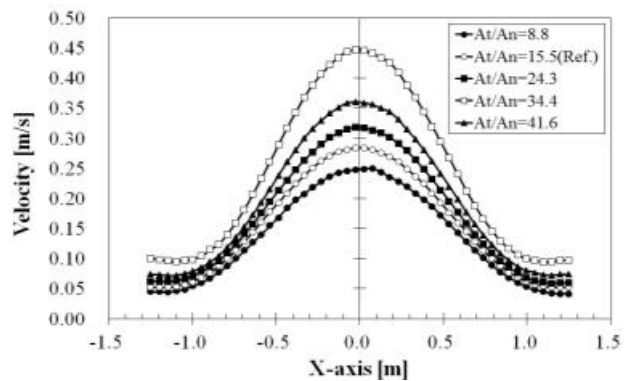


Fig. 11 Effect of venturi throat area ratio on velocity distribution at $x-z$ plane ($y=8\text{ m}$, $z=0$)

m/s로 가장 큰 것으로 나타났다. Fig. 12는 노즐 출구에서부터 벤츠크리관 출구까지 정압 분포를 나타내었는데 교반성능을 좌우하는 음압 분포 면적이 A_t/A_n 가 24.3일 때 가장 큰 것으로 관찰되었으며, Fig. 10(b)에 도시한 혼합 효율과 밀접한 관련이 있는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 벤츠크리 목 단면적 비(A_t/A_n)가 증가할수록 혼합 유체의 속도는 증가하지만 혼합 효율에는 영향을 미치지 않고, 벤츠크리관에서 발생한 음압 분포가 혼합 효율에 민감한 영향을 주는 것을 알 수 있다.

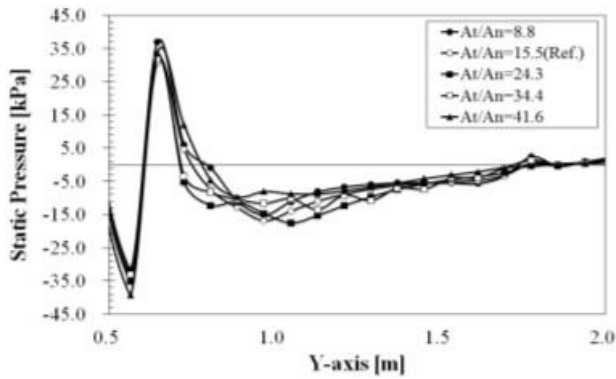


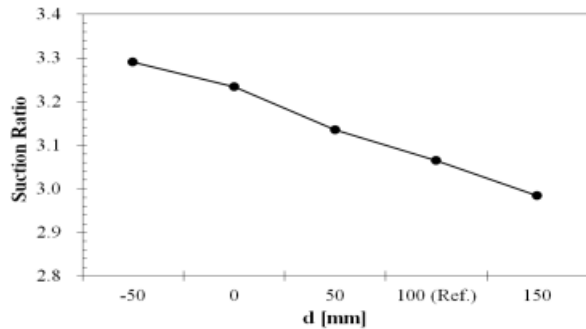
Fig. 12 Effect of venturi throat area ratio on static pressure distribution ($x=0$ and $z=0$)

3.3 노즐 출구-벤츠크리관 입구간 거리(d) 변화에 따른 유동 특성

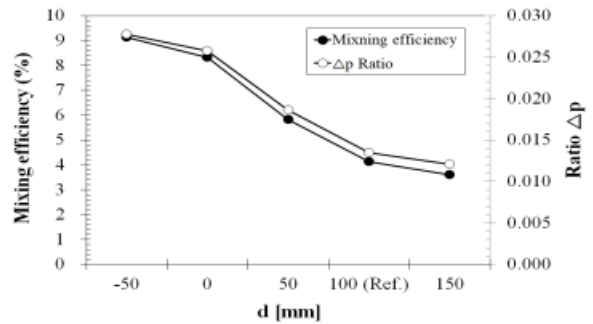
노즐 출구와 벤츠크리관 입구간 거리(d) 변화에 따른 유동 특성 분석을 위하여 기준 형상($d=100$ mm)을 기준으로 동일한 경계 조건에서 d 를 각각 -50 mm, 0 mm, 50 mm 및 150 mm로 변경하여 유동해석을 수행하였다. Fig. 13에 나타난 바와 같이 이 거리가 감소할수록 유량 흡입 비율, 압력비 및 혼합 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 노즐과 벤츠크리관의 거리가 가장 가까운 -50 mm인 경우 유량 흡입 비율이 3.29로 가장 높고, 혼합 효율 또한 9.13%로 가장 높음을 알 수 있다. 반면 노즐과 벤츠크리관의 거리가 가장 먼 150 mm인 경우 유량 흡입 비율이 2.98로 가장 낮고, 혼합 효율 또한 3.60%로 가장 낮다.

유동 방향으로 $y=8$ m, $z=0$ m 인 지점에서 $x-z$ 평면의 x 축 상의 속도 분포를 나타낸 Fig. 14에서 $d=150$ mm인 형상의 속도가 0.29 m/s로 가장 높게 나타났다.

Fig. 15에서 나타난 바와 같이 노즐과 벤츠크리관 거리가 가까울수록 음압 분포 면적이 증가하고, 정압을 회복하여 주변 유동과 정압이 같아지는 거리가 짧아진다. 즉, 음압 분포의 면적이 가장 크기 때문에 혼합 효율도 가장 높게 예측된 것을 알 수 있다.



(a) Suction ratio (R_s)



(b) ΔP ratio ($R_{\Delta P}$) and Mixing efficiency (η_m)

Fig. 13 Effects of distance between nozzle and venturi pipe on mixing performances

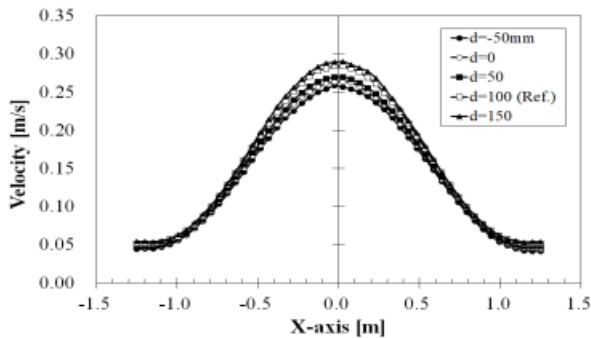


Fig. 14 Effect of distance between nozzle and venturi pipe on velocity distribution on $x-z$ plane ($y=8$ m, $z=0$)

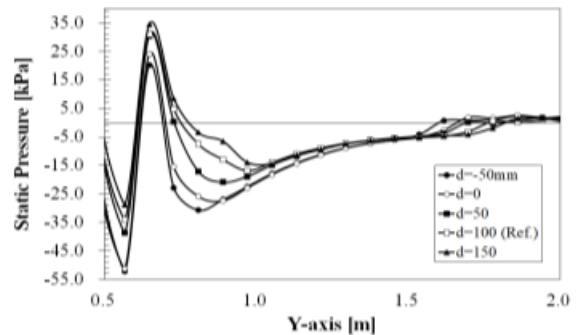
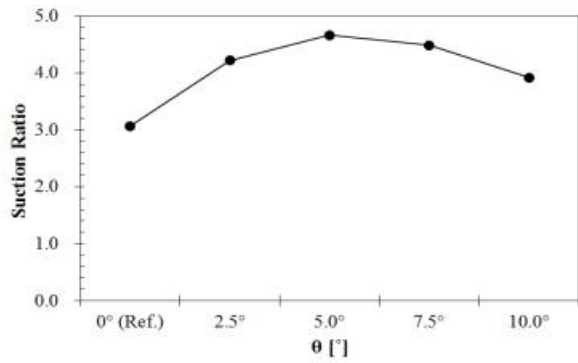
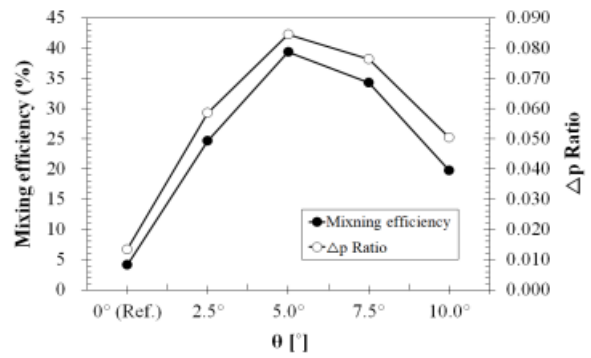


Fig. 15 Effect of distance between nozzle and venturi pipe on static pressure distribution ($x=0$ and $z=0$)



(a) Suction ratio (R_s)



(b) ΔP ratio ($R_{\Delta P}$) and Mixing efficiency (η_m)

Fig. 16 Effects of venturi diffuser angle on mixing performances

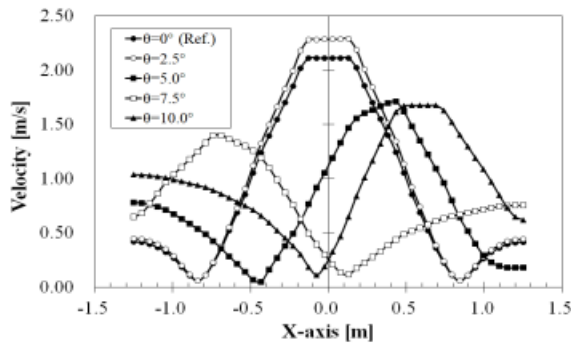


Fig. 17 Effect of venturi diffuser angle on velocity distribution on x-z plane ($y=5m, z=0$)

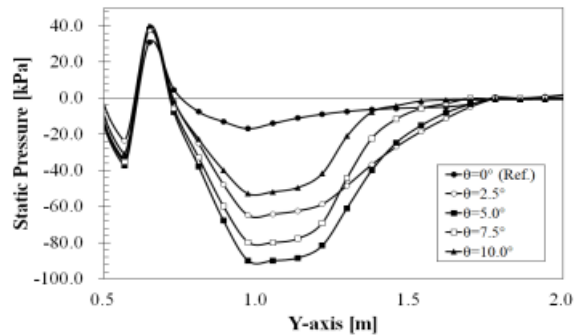


Fig. 18 Effect of venturi diffuser angle on static pressure distribution along Y-axis ($x=0$ and $z=0$)

3.4 벤츄리관 디퓨저 확산각(θ) 변화에 따른 유동 특성

벤츄리 관 출구부의 디퓨저 확산각(θ)에 따른 유동 특성을 확인하기 위해 기준 형상($\theta=0.0^\circ$)으로부터 확산각을 각각 $\theta = 2.5^\circ, 5.0^\circ, 7.5^\circ$ 및 10° 로 변경 하여 유동해석을 진행하였다.

θ 변화에 따른 유량 흡입 비율, 압력비 및 혼합 효율을 Fig. 16에 나타내었다. 확산각이 증가할수록 유량 흡입 비율, 압력비 및 혼합 효율이 증가하다가 $\theta = 5.0^\circ$ 을 기준으로 제트믹서의 성능이 다시 감소하는 경향이 나타났다.

유량 흡입 비율은 $\theta = 5.0^\circ$ 에서 4.66으로 예측되고, 기준 형상 대비 52% 향상된 결과를 보여준다. 혼합 효율은 $\theta = 5.0^\circ$ 에서 39.35%로 가장 높게 예측된다.

Fig. 17은 $y=5m$ 인 지점에서 $x-z$ 평면의 x 축 상의 속도 분포를 나타내었다. 디퓨저 확산각 $\theta = 0.0^\circ$ 와 2.5° 에서는 유동이 대칭으로 형성되나 $\theta = 5.0^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ$ 에서는 유동이 한 쪽으로 편향되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 확산각이 증가함에 따라 디퓨저의 출구에서 유동 박리가 발생하기 때문에 비대칭 유동특성이 나타난 것으로 사료된다.

De Haller's ratio⁽¹⁰⁾에 따르면 디퓨저 설계시 주유동의 속도와 압력에 따라서 유동 박리로 인한 유동 손실을 최소화

할 수 있는 디퓨저 확산각을 선정해야 한다. 본 연구에서는 디퓨저 확산각이 5.0° 이상이 되면 벤츄리관의 출구에서 심한 유동 박리가 발생하여 유동 방향이 편향되는 것을 알 수 있다. 이러한 유동 특성으로 인해 확산각이 5.0° 이상으로 증가하면 유동 손실이 커져서 Fig. 16(b)에 도시한 바와 같이 혼합 효율이 급격하게 감소하는 것으로 사료된다.

Fig. 18은 디퓨저 확산각에 따른 노즐 출구에서부터 벤츄리 출구 까지의 정압 분포를 도시하였다. 디퓨저 확산각이 5.0° 일 때 음압 분포 면적이 가장 큰 것을 확인 할 수 있으며, 이 때 혼합 효율이 가장 높은 것을 알 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 음압 분포의 면적이 $5.0^\circ, 7.5^\circ, 2.5^\circ, 10^\circ, 0.0^\circ$ 순으로 크고, 혼합 효율도 이와 같은 순서로 높은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 제트믹서와 벤츄리관의 결합 여부에 따른 유동 특성과 벤츄리관의 형상 변화에 따른 혼합 성능을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 벤츄리관이 결합된 제트믹서는 주변 유체를 혼합하기 위해 필요한 음압이 일반 제트믹서와 비교하여 상대적

으로 넓게 형성되었으며, 압력차이로 인해 주변 유체가 벤츠히관 내부로 유입되어 혼합 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다.

- 2) 벤츠히관 단면적 비(A_i/A_n)가 커질수록 유량 흡입 비율이 증가하는 경향을 보였다. A_i/A_n 가 41.6일 때 유량 흡입 비율이 5.6으로 가장 높게 나타났으며, 혼합 효율은 24.3일 때 가장 높은 7.0%로 예측되었다. 제트믹서 노즐-벤츠히관 거리(d)가 짧을수록 혼합 성능이 향상되는 경향을 알 수 있었고, $d=50$ mm일 때 유량 흡입 비율 및 효율이 각각 3.29, 9.1%로 예측되었다. 벤츠히관 출구부의 디퓨저 확산각(θ)은 혼합 효율에 가장 민감한 영향을 미치는 형상 변수로서 $\theta = 5.0^\circ$ 일 때 혼합 효율이 39.35%로 가장 높게 나타났다.

이와 같이 벤츠히관 형상 변화가 혼합성능에 민감한 영향을 미치므로, 혼합성능을 극대화하기 위해서는 벤츠히관의 형상이 최적화되어야 한다. 그러므로, 향후 연구에서는 벤츠히관의 형상 최적설계와 함께 상사모델 실험을 통한 성능검증 연구가 필요하다.

References

- (1) Z.Zakaria, 2017, "Rollover phenomena in liquefied natural gas storage: Analysis on heat and pressure distribution through CFD simulation", International journal of innovations in engineering and technology, pp. 392-400
- (2) Ashley Gwilym Charles Lane, 1981, "Liquid jet mixing in tanks", Loughborough University of Technology
- (3) Patwardhan, 2002, "CFD modeling of jet mixed tanks", Chemical engineering science 57, pp. 1307-1318
- (4) H.D. Zughbi, 2004, "Mixing in a fluid jet agitated tank: effects of jet angle and elevation and number of jets", Chemical engineering science 59, pp. 829-842
- (5) Joshua Jacob Engelbrecht, 2007, "Optimization of a hydraulic mixing nozzle", Iowa State University
- (6) Mostafa Hosseinzadeh, Ahad Ghaemi, Mansour Shirvani, 2017, "Hydrodynamic performance evaluation of a novel eductor liquidliquid extractor using CFD modeling", Chemical Engineering Research and Design 126, pp. 19-31
- (7) Krzysztof Skrzypek, 2017, "The mixing hydrodynamics and efficiency of the venturi jet mixer", Technical transaction chemistry, pp. 95-106
- (8) ANSYS CFX 15.0, 2013, ANSYS CFX-solver guide, ANSYS Inc.
- (9) Z. Yang and T. H. Shih, 1993, "New time scale based k- ϵ model for near-wall turbulence," AIAA Journal, 31 (7), pp. 1191-1198.
- (10) Terry Wright, 1999, "Fluid Machinery : Performance, Analysis, and Design", CRC Press