

유로조건에 따른 압축공기 초음속 유동 현상의 해석 연구

김승모¹, 김무선^{2*}

¹한국기술교육대학교 기계공학부, ²한국철도기술연구원 도시철도연구팀

Numerical Study on the Super Sonic Phenomenon of Compressed Air according to the Flow Path Conditions

Seung Mo Kim¹, Moosun Kim^{2*}

¹School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

²Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 일반적으로 열차 제동을 위한 제동력은 압축공기를 활용하여 제공된다. 열차에 상환별로 적절 제동력을 가하기 위해 사용하는 압력밸브 시스템은 복잡한 유동 회로를 가진다. 이를 일반적인 기계가공으로 제작 시, 유로형상 설계에 제약이 있는 반면, 3D 프린팅 기법으로 제작시 유동 효율을 증대할 수 있는 유로형상 제작이 가능하다. 따라서 이번 연구에서는 기존의 제작 방식으로 유로를 제작하는 경우와, 3D프린팅의 장점을 살려, 자유로운 형상의 유로를 제작하는 경우를 비교하여, 압력 밸브 시스템 내의 압축공기 유동의 현상을 해석적으로 분석하였다. 해석을 위한 조건으로는, 유로 방향이 바뀔 때 유로의 곡률 크기, 유로의 직경, 입구 및 저장소 압력의 크기, 그리고 압축공기의 초기 온도로 구분하였다. 압력손실의 최소화 및 유동 특성의 균일성이 제동 효율 개선에 영향을 주는 요인이므로, 수치해석을 통한 연구를 통해 일반적인 기계가공을 통한 직각 유로 형상보다는 3D 프린팅을 통한 곡률 유로의 경우가 제동효율 개선에 유리함을 확인하였다.

Abstract The braking force for a train is generally provided by compressed air. The pressure valve system that is used to apply appropriate braking forces to trains has a complex flow circuit. It is possible to make a channel shape that can increase the flow efficiency by 3D printing. There are restrictions on the flow shape design when using general machining. Therefore, in this study, the compressed air flow was analyzed in a pressure valve system by comparing flow paths made with conventional manufacturing methods and 3D printing. An analysis was done to examine the curvature magnitude of the flow path, the diameter of the flow path, the magnitude of the inlet and reservoir pressure, and the initial temperature of the compressed air when the flow direction changes. The minimization of pressure loss and the uniformity of the flow characteristics influenced the braking efficiency. The curvilinear flow path made through 3D printing was advantageous for improving the braking efficiency compared to the rectangular shape manufactured by general machining.

Keywords : 3D printing, Brake valve system, Flow path, Numerical analysis, Pressure loss

1. 서론

3D 프린팅 제작 공법은 기존 제작 방식과 달리, 2차원 레이어들의 적층 과정을 통해 3차원 형상을 만드는

원리로 이루어진다. 이러한 특징 때문에, 복잡한 형상의 부품 제작이 가능하고, 부품 하나에 여러 기능을 복합적으로 삽입할 수 있는 설계 자유도가 높아지는 장점이 있다. 하지만, 제작 속도가 느린 단점이 있으며, 현재까지

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업과 2018년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제의 연구비지원, 산업통상자원부가 지원하는 권역별신산업육성사업 지원(R0006465)으로 수행되었음

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krii.re.kr

Received October 2, 2018

Revised (1st November 26, 2018, 2nd December 26, 2018)

Accepted January 4, 2019

Published January 31, 2019

는 크기 및 물성의 제약에 의해 적용 분야에 제약이 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 3D 프린팅은 형상 설계 및 제작의 자유도가 높은 특성 때문에, 내부 구조가 복잡하고 일체형으로 제작하기 어려운 부품 제작에 개선된 성능을 발휘한다. 그러한 이유 때문에 기존 제작방식으로 는 제약조건이 많은 구조물 내부 삽입유로 제작에 많이 적용되고 있다.

레이저를 활용한 소결방식의 3D 프린팅 기술을 제품 제작에 효과적으로 적용하기 위해서는 소재의 특성 및 공정 조건에 따른 물성 변화와 레이저 소결 시 발생하는 열변형을 고려한 구조물 위치선정, 구조물을 지지하기 위한 지지대의 최소화, 구조물의 적층 방향 등 조건에 따른 제작 특성에 대한 연구가 기반이 되어야 한다.

이와 더불어, 3D 프린팅 기술을 활용하기 위한 제품의 최적설계 방법에 관한 연구도 중요한 연구 주제이다. 이와 관련된 연구로는 Lee[1]가 발전소 부품을 대상으로 구조최적 설계를 진행한 연구사례가 있으며, Yi[2]는 솔레노이드 밸브에 관한 최적 설계 연구를 진행하였다. 그리고 Kim[3]은 열교환기를 3D 프린팅으로 제작하기 위한 설계 방안을 연구하였다.

이번 연구에서는, 드릴링 등의 기존 제작방식으로 제작하는 철도차량용 주 제동 밸브를 대상으로, 밸브 구조물 내부의 복잡한 유로 형상을 3D 프린팅으로 제작할 때, 기존 제작방식의 직각 교차형(orthogonal) 유로와 3D 프린팅으로 제작할 수 있는 곡선형(Curvature) 유로를 비교하여, 각각의 압축공기의 유동 특성을 해석적으로 분석하였다.

2. 연구 대상 및 목적

2.1 철도 차량용 제동 밸브 시스템

철도 차량의 제동을 위한 제동력은 공기제동과 전기 모터의 저항력을 이용한 회생제동으로 구분할 수 있다. 공기제동 방식은 열차의 상용제동과 비상제동이 필요할 때 모두 쓰이며 공압을 이용하여 차축과 차륜에 담판 및 디스크 제동을 가하게 된다. 공기제동 시 열차의 속도 및 정차역까지의 거리, 차량에 탑승한 승객들의 하중 등 여러 가지 운행 조건을 고려하여 알맞은 제동력을 출력하게 되는데, 출력 조정을 위한 제동 조정 시스템은 밸브 등의 조합으로 복잡하게 구성되어 있다. 그 중 주 제동

밸브는 상용제동과 비상제동 명령 및 차량 하중 조건을 고려하여 공압을 출력하는 역할을 하는 주요 제동 조정 부품이다.

철도 차량용 주제동 밸브 시스템은 내부의 복잡한 유동 회로 때문에 제작과정이 복잡하다. 일반적으로 금속 덩어리에 드릴링을 통한 적정 위치와 길이로 홀을 뚫은 다음, 각 홀들의 연결을 통해, 유동 회로를 구성하게 된다. 그리고 회로를 구성하기 위해 만들어진 잉여홀은 홀 입구의 실링을 통해 밀폐하게 된다.

따라서, 회로의 구성에 따라 제작 절차가 상당히 복잡하게 되며, 주변 가공 홀 간의 간섭을 피하기 위한 설계상의 제약도 발생하게 된다. 그리고 성능적인 면에서는, 드릴링으로 가공한 유동 회로의 경우, 직선경로 가공과 직각의 방향변경만이 가능하기 때문에, 일반적으로 제동 시스템의 최대 사용압력인 8bar의 압축공기가 작용하는 경우에 내부 유동의 효율 측면에서 압력 강하 및 손실의 문제가 발생하기 쉽다.

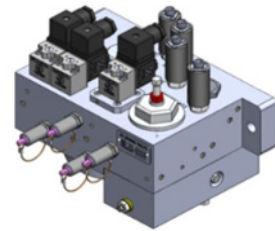


Fig. 1. Example of main brake system

Fig.1 에 주 제동 밸브 시스템을 나타내었다. 주 제동 밸브 시스템의 메인 바디에, 솔레노이드 밸브들과 압력 센서 등이 부착되는 데, 메인 바디 내부는 부착물들을 연결하는 복잡한 유동 회로가 구성되어 있다.

2.2 연구 목적

앞서 언급한 바와 같이, 현재 주제동 밸브 시스템의 메인 바디 내 유로 형성은 기계가공을 통해 이루어지기 때문에, 유동 경로는 직선 형태이며, 교차부위의 홀들은 직각으로 구성되어 있다. 따라서 8bar의 최대 압축공기 압력이 작용하는 경우, 유동 경로가 전환되는 직각 교차로에서는 압력강하가 발생할 소지가 있다.

3D 프린팅으로 메인 바디를 제작하는 경우, 유동 경로의 특성을 파악하여 최적 형상으로 유로 제작이 가능

하기 때문에, 압력강하 효과를 최소화할 수 있는 최적 구조의 유로제작이 가능하다.(Fig. 2)

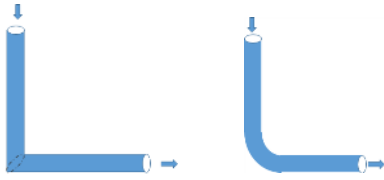


Fig. 2. Shape of flow path fabricated by typical machining(left) and 3D printing(right)

본 연구에서는 기존 orthogonal한 유로 제작 방식과 3D 프린팅으로 곡률이 있는 유로를 제작할 때, 유로 형상, 유로 직경, 압축공기의 압력 및 온도 조건에 따라 내부 압축공기의 유동 현상의 변화를 해석적으로 관찰하여, 3D 프린팅 제작방식의 압력 효율 향상 정도를 분석해 보고자 한다.

3. 모델링 및 해석 조건

본 연구는 ANSYS v.16의 전처리 프로그램인 Design Modeler를 이용하여 고압의 압축공기에 따른 유동이 발생하는 유로와 압축공기가 저장되는 Reservoir를 모델링하였으며, 디자인 변수와 드릴링 등으로 제작된 직각 교차형 유로와 3D 프린팅으로 제작되는 곡선형 유로를 Fig. 3에 함께 모델링하였다.

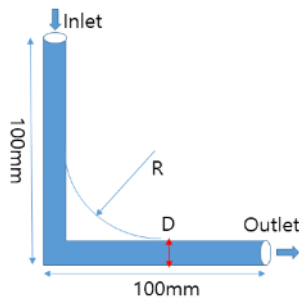


Fig. 3. Geometry of the pipe domain

해석의 변수 별 조건은 표 1에 나타내었다. 초기온도는 -25°C , 25°C , 60°C 의 경우로 세분화하였고, 직경은 4mm, 8mm, 12mm의 경우로 나누어 Case별로 해석을 진행하였다. 유로의 입구 압력은 최고 8bar에서 4bar이

며 출구의 Reservoir 압력은 1bar에서 4bar의 초기 조건으로 해석을 진행하였다.

Table 1. Design Cases for Simulation

Curvature (mm)	R0 - Orthogonal			R25			R50		
Case	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33
Temp. (celcius)	-25	25	60	-25	25	60	-25	25	60
Inlet / Reservoir Pressure (bar)	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1
Diameter (mm)	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Case	C14	C12	C15	C24	C22	C25	C34	C32	C35
Temp. (celcius)	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Inlet / Reservoir Pressure (bar)	4 / 1	8 / 1	8 / 4	4 / 1	8 / 1	8 / 4	4 / 1	8 / 1	8 / 4
Diameter (mm)	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Case	C16	C12	C17	C26	C22	C27	C36	C32	C37
Temp. (celcius)	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Inlet / Reservoir Pressure (bar)	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1	8 / 1
Diameter (mm)	4	8	12	4	8	12	4	8	12

이러한 입/출구의 큰 압력차는 초음속 유동을 유발하며 이러한 초음속 영역의 유동을 고려하기 위해 내부유동은 2차원 비정상상태, 압축성 난류유동으로 가정하였고, 작동유체의 밀도는 이상기체 방정식을 적용하였다. 난류모델의 경우, Two equation 모델 중 난류운동에너지(k)와 난류소산율(ω), 수송방정식 등의 두 개의 방정식을 고려한 SST $k-\omega$ 모델을 선정하여 적용하였다. [4, 5, 6]

$$\text{연속방정식} : \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

난류 운동에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \hat{G}_k - Y_k + S_k \quad (2)$$

난류 소산율 수송방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \hat{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3)$$

여기서 τ 는 유효확산계수, G 는 난류에너지, Y 는 난류손실, D 는 상호확산항, S 는 사용자 정의항을 나타낸다. 본 연구에서 나타나는 유로 내 유동현상은 초음속 제트유동으로 인해 충격파를 동반하는 밀도, 압력, 온도의 변화를 수반하게 되며 이러한 유동 변화를 유로 조건에 따라 Case별로 고찰하기 위해 총격자는 약 2만여개를 사용하였다.

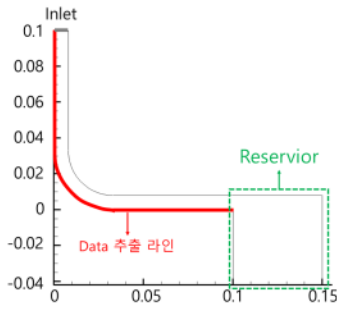


Fig. 4. Reference Line for Data Extraction

초음속으로 발현되는 유동해석 결과의 분석을 위해 Fig. 4와 같이 기준 데이터 추출선에서 밀도, 온도, 압력에 대한 내부 유동의 결과를 분석하였다. 그리고 유로에서 나타나는 유동현상을 동일 기준에서 서로 비교하기 위해 충격파가 Reservoir에 도달하는 순간의 시간을 기점으로 Case별로 비교, 분석하였다. Fig. 5에서 데이터 추출 시점의 압력 분포 형상을 구조별 케이스에 대해서 간단히 나타내었다. 즉, 적색으로 표시된 것처럼 충격파가 Reservoir에 도달하는 시점을 기준으로 각 케이스의 데이터를 추출하여 서로 비교하였다.

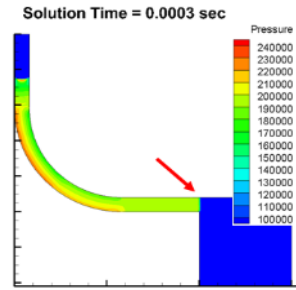
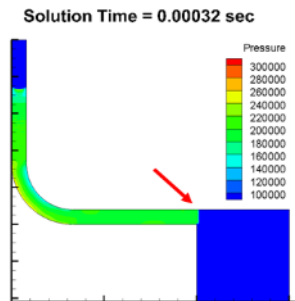
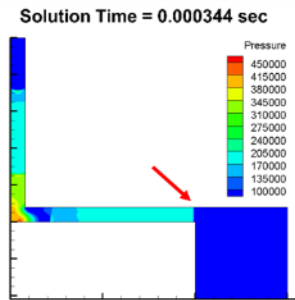
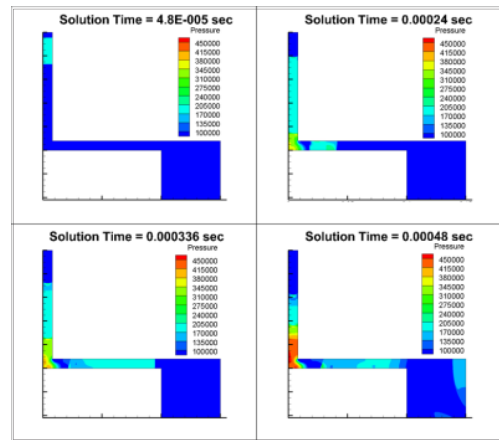


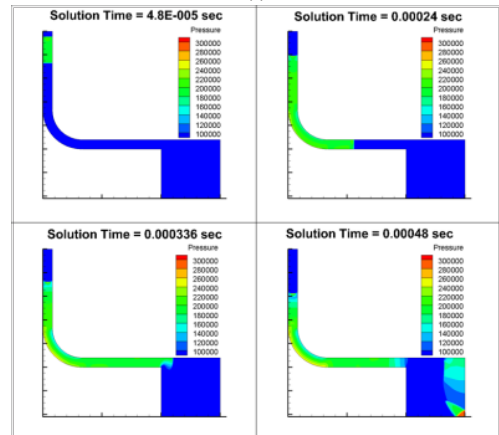
Fig. 5. Data Acquisition Time for Comparison (3 Cases : C12 at R0, C22 at R25, C32 at R50)

4. 해석 결과 및 고찰

표 1에서 세분화된 변수별 해석을 진행하였다. 대표적인 C12, C22, C32 케이스에 대한 시간에 따른 압력 분포를 Fig. 6에 나타내었다.



(a)



(b)

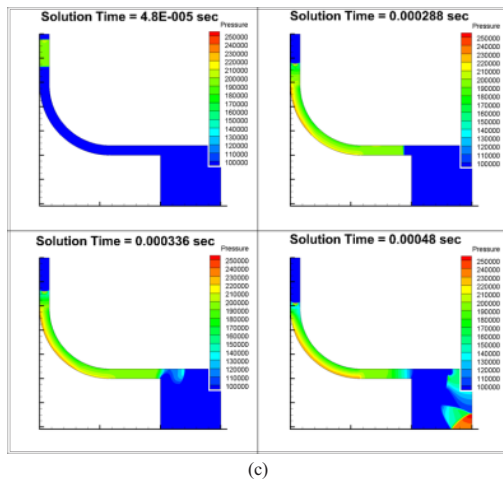


Fig. 6. Typical Pressure Contour according to time : (a) C12 Case, (b) C22 Case, (c) C32 Case

초음속 유동은 음속 이상의 속도를 가진 유동으로 Mach 수에 따라 아음속 유동으로 변화한다. 이러한 충격파는 노즐이나 유로를 지나 폭풍파(Blast wave)를 발생시키고 Reservoir에서 구의 형태로 퍼져나가는 특성을 보인다. 본 연구에서도 이러한 충격파와 폭풍파의 영향을 전체 시간에 따른 해석을 통해 확인할 수 있었다.[7] 다만, 본 연구의 주제는 유로 조건별 특성변화에 초점을 두었기에, 전체 시간에 따른 폭풍파와 같은 유동현상의 분석보다는 유로의 형상과 조건별 밀도, 압력, 온도의 변화를 서로 비교 분석하는데 초점을 두었다.

앞서 서술한 바와 같이 시간의 흐름에 따라 충격파가 reservoir에 전달되는 전체 결과 데이터에서, 동일 시점의 유로 형상별 비교를 위해 충격파가 Reservoir에 도달하는 시간을 기준으로, 데이터 추출 라인에서의 밀도, 압력, 온도에 대한 그래프를 Fig. 7-9에 표시하였다.

Fig. 7은 초기온도 세 종류($-25^{\circ}\text{C} = 248.15\text{K}$, $25^{\circ}\text{C} = 298.15\text{K}$, $60^{\circ}\text{C} = 333.15\text{K}$)에 대해 직각유로형상과 곡률반경 25mm와 50mm에 대한 결과 비교이다. 결과를 통해 유로에서 나타나는 압력분포는 초기 온도와는 큰 연관이 없는 것을 확인하였고, 밀도와 온도는 초기온도에 따라 변화형상은 비슷하고 절대값은 편이되는 모습을 보였다. 즉, 초기온도가 낮을수록 밀도는 크고 발열온도는 낮아지는 경향을 동일하게 관찰할 수 있었다.

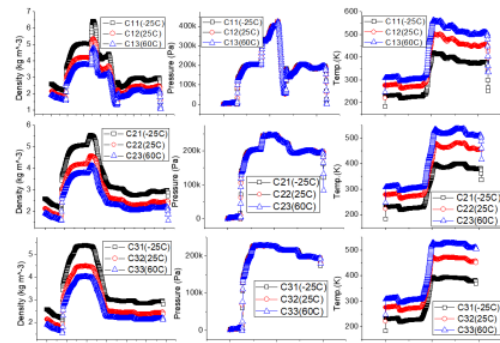


Fig. 7. Result Distribution by Initial Temperature

Fig. 8은 입구와 출구 Reservoir의 압력 차이에 따른 유로 내 밀도, 압력, 온도에 대한 결과이다. 입구와 출구 Reservoir의 압력차가 클수록 유로 내 압력분포의 크기는 급격하게 상승하는 것을 관찰하였으며, 절대압의 크기는 입구와 출구 Reservoir의 초기 압력의 크기에 비례하고, 특히 입구보다는 출구 Reservoir의 압력에 주로 영향을 받는 것을 확인하였다. 밀도는 압력과 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였고, 발열온도는 압력차가 클수록 급격한 상승을 나타내었다.

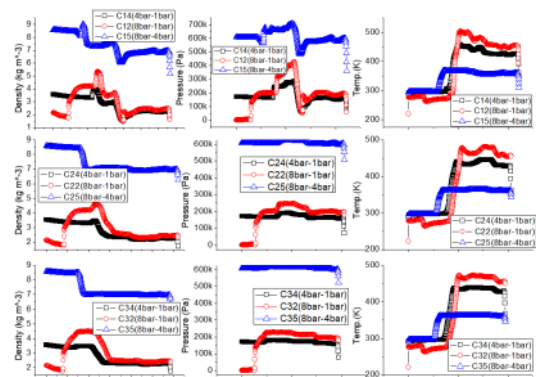


Fig. 8. Result Distribution by Pressure Difference

Fig. 9는 직경의 크기에 따른 영향을 나타내었다. 그림에서와 같이 대부분 비슷한 밀도, 압력, 온도의 변화를 보이는 것을 볼 때, 직경의 크기는 유동 특성에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

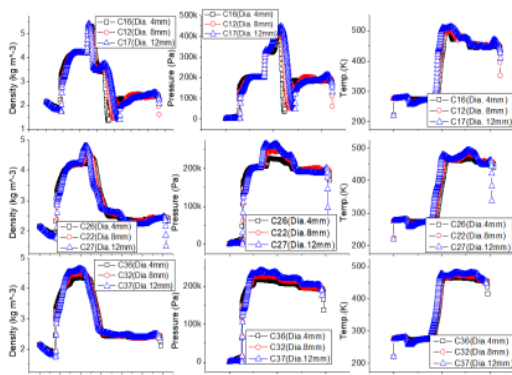


Fig. 9. Result Distribution by Flow Path Diameter

Fig. 7-9를 통해, 압력분포는 직각보다는 곡률반경이 커지는 유로일수록 압력분포의 변화가 작아지고 차츰 균일해지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 곡률 반경이 커질수록 유로에서 나타나는 압력변화가 작고, 압력 손실 또한 최소화할 수 있음을 확인하였다.

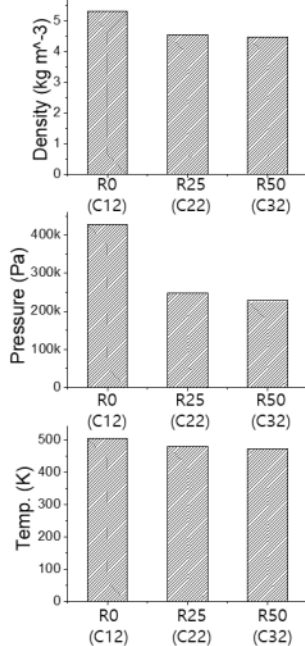


Fig. 10. Comparison of orthogonal(R0) and Curvature Radius(R25, R50) in Standard Case (Initial temp. 25°C, 8bar to 1bar, Diameter 8mm) - C12, C22, C32 Cases

Fig. 7-9의 데이터를 토대로 기준 케이스, 즉 초기온도는 25°C, 입구와 출구 압력이 각각 8bar에서 1bar 그리고 직경이 8mm인 C12, C22, C32 case들의 밀도, 압력, 온도의 데이터 추출 구간의 최대값을 Fig. 10에 도시하였다.

직각교차인 경우보다 곡률이 있을 경우에 변화값이 크게 감소하고 곡률이 커질수록 최소화되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 근거로 곡률반경이 큰 유로를 통해 압력 손실 등을 최소화할 수 있고, 주 제동 밸브의 제동 효율도 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

앞에서 수행한 2D 해석을 검증하기 위해서 C22케이스를 기준으로 3D 해석을 모델링하여 동일한 해석을 수행하여 서로 비교하였다. 3D 모델링은 2D와 같은 형태로 생성하였고 동일한 조건에 대해, 동일한 위치와 시간에서 결과를 추출하였다. Fig. 11에서와 같이 앞서 언급한 충격파(Shock wave)와 폭발파(Blast wave)를 보다 명확히 확인할 수 있었다. 또한 밀도, 압력, 온도의 그래프를 함께 나타낸 결과, Fig. 12과 같이 격자의 차이 등에 따라 데이터가 근소하게 오프셋 되는 경향은 있으나, 동일한 경향성을 확인할 수 있었다. 실험적인 연구가 어려운 주제에서 2D와 3D 결과의 일치성을 통해 앞서 수행한 다양한 해석결과들의 타당성을 검증하였다.

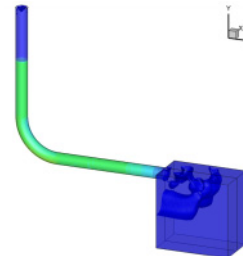
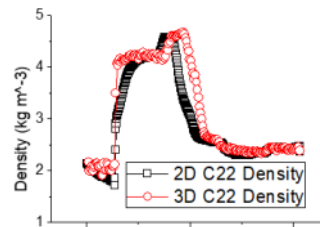


Fig. 11. Typical Super Sonic Pressure Distribution of 3D Case (C22)



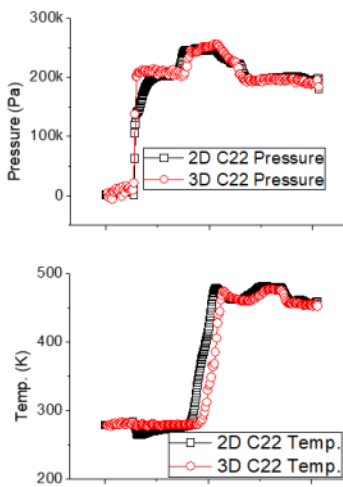


Fig. 12. Verification : Numerical Comparison of 2D and 3D Data

5. 결론

본 연구에서는 고압 공기에 따라 발생하는 초음속을 동반한 유동현상 및 특성을 유로의 형상, 초기 온도, 입구와 Reservoir 압력, 직경에 따라 수치적으로 비교 분석하였다. 압력손실의 최소화 및 유동 특성의 균일성이 제동 효율에 큰 영향을 주므로, 이러한 측면에서 Case별 다양한 해석을 수행하여 변수별 영향을 고찰하였다. 특히, 일반적인 기계가공을 통한 직각 교차형유로와 3D 프린팅으로 구현한 곡률 유로의 특성을 살펴볼 때, 곡률 반경이 커질수록 압력손실이 감소하고 유동 균일도가 향상되는 것을 관찰하였고 주 제동밸브의 작동성능이 개선될 수 있음을 확인하였다. 수치적인 검증에 위해 3D 해석을 동일하게 수행하여 2D 결과와의 비교를 통해 해석결과의 타당성을 검증하였으며, 이러한 결과를 토대로 3D 프린팅을 통한 곡률유로의 제동 효율성에 대해 확인하였다.

References

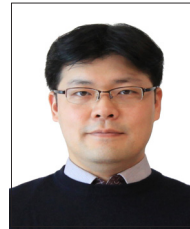
- [1] H.J.Lee, "Structure Optimization and 3D Printing Manufacture Technology of Pull Cord Switch Components Applied to Power Plant Coal Yard", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.17, no.10, pp.319-330, 2016.
- [2] H.W.Yi, Y.M.Lee, B.S.Shin, T.G.Lee, M.C.Kang, "Prototype Manufacturing Using 3D Printing and

Characteristics of Flow and Dynamics for High Temperature Solenoid", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol.33, no.5, pp.341-348, 2016.

- [3] M.Kim, "Design and Manufacturing Technology of Heat Exchanger in Air Compressor for Railroad Vehicle by 3D Printing Process", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.18, no.11, pp.802-809, 2017.
- [4] V. Yakhot, S. Thangam, T. B. Gatski, S. A. Orszag, C.G. Speziale, "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", Physics of Fluids, Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520, 1992.
- [5] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", AIAA, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [6] ANSYS FLUENT Theory Guide 16.2 ANSYS Inc., 2016
- [7] J. D. Anderson "fundamentals of aerodynamics", Fifth edition, Mcgraw hill, pp. 515-543, 2011.

김 승 모(Seung Mo Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (공학사)
- 2007년 8월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(석박통합과정, 공학 박사)
- 2007년 9월 ~ 2012년 2월 : 삼성 전자 반도체연구소
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

공정장비 최적화, 열유동 및 구조해석

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대 자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석