

CFD/CAA 연계 해석을 이용한 누설 유동의 공력 소음 예측

강성우¹, 김시진¹, 마평식², 서윤호², 명노신¹, 이학진^{1*}

¹경상국립대학교 기계항공우주공학부

²한국기계연구원 시스템다이나믹스연구실

NUMERICAL PREDICTION OF AERODYNAMIC NOISE OF LEAKAGE FLOW USING CFD/CAA HYBRID METHOD

S.U Kang¹, S.J. Kim¹, P.S. Ma², Y.H. Seo², R.S. Myong¹ and H. Lee^{1*}

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

²Korea Institute of Machinery & Materials

*Corresponding author, E-mail: hlee@gnu.ac.kr

Keywords:

누설 유동(Leakage Flow),
공력 소음(Aerodynamic Noise),
전산유체역학(Computational Fluid Dynamics),
전산공력음향학(Computational Aeroacoustics),
대 와류 모사(Large Eddy Simulation)

ABSTRACT

The high speed flow leaked from cracks in gas pipelines can lead to severe explosion accidents. Therefore, detecting the location of leakage flow early and precisely is important to reduce the damage from leakage flow. The three-dimensional probe array using the acoustic intensity signals is one of the useful leak detection technologies. In this study, the CFD/CAA hybrid method is used to investigate the flow and acoustic characteristics of leakage flow. The features of leakage flow, including turbulence scales, roll-up phenomenon, strong shock waves, and Mach disk are predicted through the large eddy simulation (LES), and the far-field noise is calculated using the Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) acoustic analogy with permeable surfaces. The parametric study is performed in terms of the internal pressure condition in the pipe (10, 30, 50, 100 bar) and the size of leakage hole (5, 8, 10 mm) to analyze the flow and acoustics characteristics of the leakage flow. The strong Mack disk expands widely as the internal pressure and hole size increase while screech tone noise at specific frequency is observed as the internal pressure and hole size decrease. It turns out that overall sound pressure level (OASPL) of leakage flow increases about 15 dB when screech tone noise occurs.

Received | 4 December, 2023

Revised | 6 February, 2024

Accepted | 3 March, 2024

 OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© KSCFE 2024

1. 서론

고압의 가스가 흐르는 파이프에 생긴 결함으로 인하여 질식 혹은 폭발로 이어지는 누설 사고가 지속해서 발생하고 있다. 연간 플랜트 시설에서 파이프로 인해 발생한 사고 중 약 63%가 파이프 내부에 가스가 흐르고 있었고, 이 중 70%가 결함에서 누설된

가스로 인한 질식, 그리고 21%가 폭발로 이어지는 사고였다[1]. 이에 따라 결함의 위치를 조기에 정확히 탐지함으로써 누설로 인한 피해를 최소화할 수 있는 조기 진단 및 대응 기술의 필요성이 확대되고 있다. 파이프에 발생한 결함의 위치를 탐지하기 위해 비틀림파, 와전류 센서, 그리고 초음파 등을 이용한 기술이 개발 중이다[2-4]. 그 중, 본 연구에서는 단위 면적당 소리의 강도를 나타내는 음향 인텐시티 신호를 이용하여 음원의 위치(누설 지점)를 탐지하는 기술을 개발 중이다. 해당 기술은 탐색 범위가 좁은 음향 카메라 기법을 대신하여 소수의 인텐시브 프로브 어레이를 설치하여 넓은 범위에서 빠르고 정확하게 누설 지점을 탐지할 수 있다. 본 기술을 개발하기 위해 가장 먼저 고려해야 할 요소는 누설 소음의 특성으로, 이를 파악하기 위해서는 누설 소음의 음향 인텐시티를 측정하는 과정이 필요하다. 하지만, 결함에서 누설되는 유동은 노즐에서 출력되는 유동과 같이 유동과 충격파 간의 간섭현상이 발생하여, 유동에서 발생하는 복잡하고 다양한 물리현상에 대한 고려가 필요하다[5,6]. 또한, 플랜트와 같은 대형 기계시스템 및 배관에서 측정된 누설 소음은 주파수 대역이 넓은 특징이 있다.

파이프의 결함에서 누설되는 유동은 마하수가 1이 넘는 초음속 제트 유동 및 소음 특성을 띠고 있다. 초음속 제트 소음의 특성에는 난류 혼합소음(Turbulent Mixing Noise)과 스크리치 톤 소음(Screech Tone Noise), 그리고 광대역 충격 소음(Broadband Shock-associated Noise)으로 구성된다. 난류 혼합소음은 누설 유동이 하류(Downstream) 방향으로 전파될 때 생성되는 대규모 난류 구조의 영향으로 발달하며, 누설 유동이 발달하는 하류 방향으로 전파되는 특성을 가진다. 스크리치 톤 소음은 결함 출구에서 하류 방향으로 누설 유동이 전파되면서 발달하는 불안정파의 난류 구조로 인한 Hydrodynamic Fluctuations와 상류(Upstream) 방향으로 전파되는 Acoustic Fluctuations의 충돌로 발생하며, 해당 소음이 발생하는 주파수는 정재파(Standing Wave)의 영향을 받는다. 광대역 충격 소음은 전단층에서 발생한 강한 Roll-Up 현상이 불안정파의 크기를 증가시켜, Shock-Cell Structure와 와류의 상호작용으로 대기 공기가 압축과 팽창을 반복하며 발생한다[7]. 그 중, 불연속 주파수(Discrete Frequency)를 가지는 스크리치 톤 소음은 특정 주파수에서 강한 톤(Tone) 소음이 제트 전파 방향을 기준으로 상류 방향으로 전파되므로 구조물에 직접적인 영향을 줄 수 있어 중요하다[8,9]. 또한, 음향 인텐시티를 이용하여 음원의 위치를 탐색하는 측면에서 강한 인텐시티를 갖는 스크리치 톤 소음 신호는 매우 중요하다. 해당 소음을 최초로 발견한 Powell[10]의 실험 결과에 따르면, 스크리치 톤 소음은 초음속 제트 내부에서 불안정파(Instability Wave)의 성장, 불안정파와 Shock-Cell Structure 간의 상호간섭, 노즐 출구에서 반사되는 음파에 의한 새로운 교란의 생성으로 이루어진 피드백 메커니즘에 의하여 발생한다. 이후, 여러 실험을 통해 스크리치 톤 소음에 관한 연구가 수행되어왔다. Umeda[11]는 노즐로부터 방출되는 스크리치 톤 소음의 음원에 관한 실험을 수행하였다. Panda[12]와 Raman[13]은 불완전 과소팽창 조건의 초음속 제트에서 스크리치 톤 소음의 생성과 소멸에 관한 연구를 실험으로 수행하였다. 이렇듯 실험을 통해 초음속 제트의 소음 특성을 연구한 사례가 존재하지만, 실제 플랜트의 누설 환경을 실험실 내부에서 구현하기 어렵기 때문에 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 해석과 같은 수치 해석 기법을 통해 가상 환경에서 누설 유동과 소음의 음향 특성을 확인하는 과정이 필요하다[14].

파이프에 생긴 결함의 위치를 탐지하기 위해 실험 및 전산해석적 연구들이 과거로부터 수행되었다. Ebrahimi-Moghadam[15]는 파이프의 내부압력이 3~5 bar일 때 원형 형상의 결함의 크기에 따른 누설 유동의 속도와 유량의 변화를 분석하였다. Wei[16]는 파이프의 내부압력이 1~4 bar일 때 결함의 크기 및 위치가 소음에 미치는 영향을 분석하였다. Qingqing[17]은 복잡한 음향 신호의 동적 특성을 분석할 수 있는 파동 패킷 변환(Wave Packet Transform)을 이용하여 결함의 위치를 탐지하는 연구를 수행하였다. 특정 주파수에서 고음이 발생하는 스크리치 톤 소음의 유동 및 발생 구조를 파악하기 위한 수치 해석적 연구 또한 수행되었다. Han[18]은 $k-\epsilon$ 난류모델을 연계한 비정상 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 사용하여 원형 제트의 스크리치 톤 소음을 해석하였다. 해당 유동에서 관찰된 Shock-Cell Structure가 실험 결과와 일치함을 검증하기 위해 Ponton[19]의 실험 결과와 비교하였다. 언급된 선행 연구를 포함한 전산

해석 연구의 대부분은 해석기법으로 RANS 방정식을 이용하였다. 하지만, 제트 소음과 같은 누설 소음의 주된 소음원은 결합에서 발생하는 복잡한 난류 및 와류 유동이기 때문에 난류 특성에 대한 정확한 고려가 필요하다. 시간을 평균화하여 압력과 속도를 구하는 RANS 방정식은 준주기성 대규모 와류와 소규모 와류를 구분하지 못하여 유동장의 불안정한 특성을 정확하게 해석하지 못하는 단점이 있다. 이를 보완할 수 있는 해석기법으로는 Direct Numerical System(DNS)과 Large Eddy Simulation(LES)이 있다. DNS는 Navier-Stokes 방정식을 모두 직접 계산하여 대규모를 포함한 소규모 와류의 난류 성분을 정확하게 구할 수 있지만, 레이놀즈 수(Reynolds Number, Re)를 기준으로 $Re^{9/4}$ 이상의 격자 개수를 요구하여 계산 비용이 많이 든다. 이에 따라 최근에는 LES를 이용하여 제트 소음의 유동을 해석하는 연구들이 활발하게 수행되었다[20-22]. LES 기법은 Navier-Stokes 방정식에서 대규모 와류의 난류 성분만을 직접 계산함으로써 DNS 해석기법보다 요구되는 격자 개수가 적어 상대적으로 효율적인 해석이 가능하다. 또한, Subgrid Scale(SGS)을 통해 대규모 와류로부터 소규모 와류의 난류 성분을 예측할 수 있는 특징이 있다.

음향 신호를 이용하여 누설의 위치를 탐지하기 위해서는 누설 유동에 의해 발생하는 소음 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+ 해석자를 이용하였고, LES 기법을 활용하여 파이프 결합에서 발생하는 누설 유동에 대한 전산해석을 수행하였다. 또한, LES 해석을 통해 계산된 유동 정보를 바탕으로 Ffowcs-Williams and Hawkins(FW-H) 음향상사법을 이용하여 누설 소음을 예측하였다. 특히 누설 유동의 음향 특성을 파악하기 위해 파이프 내부 압력, 결합의 크기 변화에 따른 유동 및 소음 특성을 비교 분석하였다.

2. 전산 해석 기법

2.1 유동해석 기법

본 연구에서는 파이프의 결합에서 발생하는 누설 유동의 특성을 분석하기 위해 LES 전산해석을 수행하였다. LES는 대규모의 난류 성분을 Navier-Stokes 방정식을 직접 계산하여 구하고, 소규모의 난류 성분은 모델링을 통해 예측하는 기법이다. Navier-Stokes 방정식을 평균화하고 난류 유동의 영향성을 모델링을 통해 고려하는 RANS 지배방정식과 비교했을 때, LES 해석기법은 평균화가 아닌 공간 필터링을 이용하여 해석을 수행한다. 지배방정식의 변수 ϕ 는 필터링된 값 $\tilde{\phi}$ 과 Sub-Filtered나 Sub-Grid 값인 ϕ' 을 사용하여 식 (1)로 정리할 수 있다.

$$\phi = \tilde{\phi} + \phi' \tag{1}$$

이때 ϕ 는 속도 성분, 압력, 에너지 등을 나타낸다. 공간 필터링은 고주파수와 연관 있는 작은 규모의 와류를 배제하여 해석을 위한 계산의 범위를 줄여준다. 이러한 방법으로 LES의 Filtering을 Explicit Filtering이나 Implicit Filtering으로 유도할 수 있다. 본 연구에서 해석자로 사용할 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+에서는 Implicit Filtering이 사용되고, 해당 접근법을 통해 해석 격자가 필터링되는 와류의 규모를 결정한다. Implicit Filtering은 Explicit Filtering보다 해석 비용이 저렴한 등 그리드 해석에 있어서 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 필터링으로 분해된 해결 변수를 Navier-Stokes 방정식에 대입하면 필터링된 값에 대한 방정식을 구할 수 있다. 필터링된 질량, 모멘텀, 그리고 에너지 전달 방정식은 식 (2)-(4)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{v}) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{v}) + \nabla \cdot (\rho\tilde{v} \otimes \tilde{v}) = -\nabla \cdot \bar{p}I + \nabla \cdot (\tilde{T} + T_{SGS}) + f_b \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{E}) + \nabla \cdot (\rho\tilde{E}\tilde{v}) = -\nabla \cdot \bar{p}\tilde{v} + \nabla \cdot (\tilde{T} + T_{SGS})\tilde{v} - \nabla \cdot \tilde{q} + f_b\tilde{v} \quad (4)$$

여기서 \tilde{v} 는 필터링된 속도, I 는 단위 텐서, 그리고 \tilde{T} 는 필터링된 응력 텐서이다. 이렇게 필터링된 관계식은 Unsteady RANS 방정식과 같은 형태로 재배열할 수 있지만, 난류 응력 텐서는 Subgrid Scale 응력으로 표현된다. 이 응력은 계산된 대규모 와류와 계산되지 않았지만 Boussinesq 근사법으로 모델링된 소규모 와류간의 상호작용을 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$T_{SGS} = 2\mu_t S - \frac{2}{3}(\mu_t \nabla \cdot \tilde{v})I \quad (5)$$

이때 S 는 변형률 속도 텐서로, \tilde{v} 로부터 구할 수 있다. 난류 점도인 μ_t 는 계산된 흐름에 대한 작은 와류의 영향을 고려하는 Subgrid Scale 모델에 의해 정리된다. 본 연구에서 활용한 STAR-CCM+ 상용 SW에서 사용할 수 있는 LES 난류 모델에는 Smagorinsky, Dynamic Smagorinsky, Wall-Adapting Local-Eddy Viscosity(WALE) 총 세 가지가 있다. 본 연구에서는 벽면 근처에서의 추가적인 감쇠 함수를 요구하지 않고, 고주파수의 소음을 더욱 정확하게 해석할 수 있는 WALE Subgrid Scale 모델을 사용하였다[23].

2.2 소음해석 기법

파이프의 결합에서 누설되는 유동으로 인해 발생하는 소음을 예측하기 위해 FW-H 방정식 기반의 음향상사법을 이용하였다. 식(6)에 기재된 FW-H 방정식의 우변항에는 두께소음(Thickness Noise)과 하중소음>Loading Noise), 그리고 난류 성분에 의한 유동기인소음(Flow-Induced Noise)항이 포함되어 있다[24]. 표면소음원인 두께소음과 하중소음과 달리 체적소음원인 유동기인소음을 예측하기 위해서는 유동장에 대한 체적적분이 요구된다. 일반적으로 체적적분은 표면적분에 비해 많은 양의 계산이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 결합에서 발생하는 난류 성분에 의한 사극자 소음원(Quadrupole Source)을 효율적으로 계산하기 위해 투과면(Permeable) 경계조건을 적용한 FW-H 음향상사법을 이용하여 원거리 방사 소음해석을 진행하였다. 유동장에 대한 음압 정보를 포함한 투과면에 대해 표면 적분을 수행함으로써 수음자 위치에 도달하는 음압을 계산할 수 있다. 수음자 위치에 전달된 음압 데이터는 시간 영역에서 정의되어 있으므로 Fast Fourier Transform(FFT)을 적용하여 주파수 영역으로 변환하여 소음 스펙트럼을 분석하였다[25].

$$4\pi p'_T(x,t) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \iiint \left[\frac{T_{ij}}{r|1-M_r|} \right] dV - \frac{\partial}{\partial x_i} \iint \left[\frac{p_{ij}n_j}{r|1-M_r|} \right] dS + \frac{\partial}{\partial t} \iint \left[\frac{\rho_\infty v_n}{r|1-M_r|} \right] dS \quad (6)$$

3. 전산해석 모델 및 유동 조건

3.1 전산해석 모델 및 조건

본 연구에서는 내경과 외경이 각각 108 mm, 114 mm인 원형 파이프를 전산해석 모델로 사용하였다. 실제 산업 공정에서 사용하는 파이프는 입구와 출구 영역의 압력 차이로 인하여 내부 유동에 흐름이 존재한다. 하지만, 본 연구에서는 동일

한 입출구 조건을 부여하였고, 파이프 내부의 유동이 정체되어 있는 상황을 고려했기 때문에 파이프의 길이가 누설 유동의 소음 특성에 미치는 영향은 없는 것으로 판단했다. 이에 따라, 계산의 효율성을 높이기 위해 파이프의 길이를 0.5 m로 지정하였다.

원형 형상의 결함은 파이프 길이 방향의 중심 위치에 선정하였고, 결함 크기에 따른 영향성을 분석하기 위해 결함의 지름(D_H)을 5, 8, 10 mm로 지정하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 파이프의 형상과 마이크론의 배치를 나타내었다. 누설 소음의 특성을 비교하기 위해 결함 중심으로부터 결함 크기의 40배만큼 떨어진 거리에 결함에서 누설 유동이 전파되는 방향을 기준으로 고도각(Elevation Angle, θ)이 90°부터 165°까지 15°씩 증가하여 총 6개의 마이크론을 배치하였다.

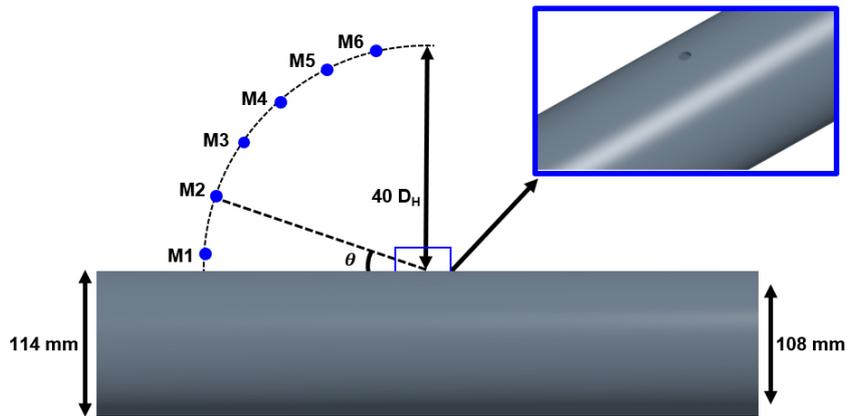


Fig. 1. Geometry of pipeline and microphone array

Fig. 2는 투과면 기반의 FW-H 음향상사법을 사용하여 결함에서 누설되는 소음을 예측하기 위해 설계한 가상 투과면이다. 단면의 형상은 파이프의 면과 투과면에 맞닿도록 아랫면을 오목하게 설계하였고, 원형으로 이루어진 윗면의 면적이 아랫면보다 큰 사다리꼴이다. 윗면의 지름과 투과면의 세로 길이는 결함 크기의 20배로 지정하여 파이프의 중심에 위치하는 결함과 닿도록 배치하였다.

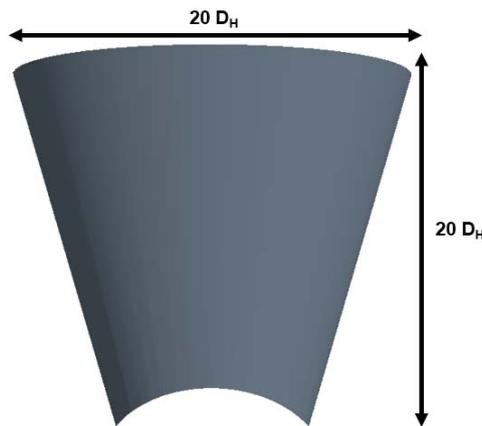


Fig. 2. Geometry of permeable surface

3.2 계산 격자 및 경계조건

파이프의 결함에서 누설되는 유동 및 소음의 특성을 분석하기 위해 설계한 계산 영역과 파이프 근처 영역의 격자계는

Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다. 파이프의 윗부분을 둘러싼 전체 계산 영역을 반지름이 1 m인 부채꼴 형상으로 설계하였고, 소음을 해석하기 위해 누설 유동의 유동장을 포함하는 가상 투과면을 구성하였다. 최소 격자의 크기는 원형 형상의 결합의 지름이 5, 8, 10 mm인 경우의 5%인 0.25, 0.4, 0.5 mm로 지정하였다. 전산해석에 적절한 격자의 개수를 결정하기 위해 3,000만 개, 5,900만 개, 1억 2,000만 개의 격자를 이용하여 격자 수렴성을 확인하였고, 그 결과는 Table 1에 비교하였다. 5,900만 개의 격자 개수를 기점으로 질량유량이 0.170 kg/s에 수렴하였고 해당 질량유량에 도달하는 위치도 격자의 개수가 1억 2,000만 개일 때의 결과와 동일하였다. 이를 통해 본 연구에서는 총 5,900만 개의 격자를 사용하였으며, 누설 지점 근처의 유동 특성을 정밀하게 해석하기 위해 다중 블록(Multi-Block) 영역에 5,000만 개의 격자를 밀집시켰다.

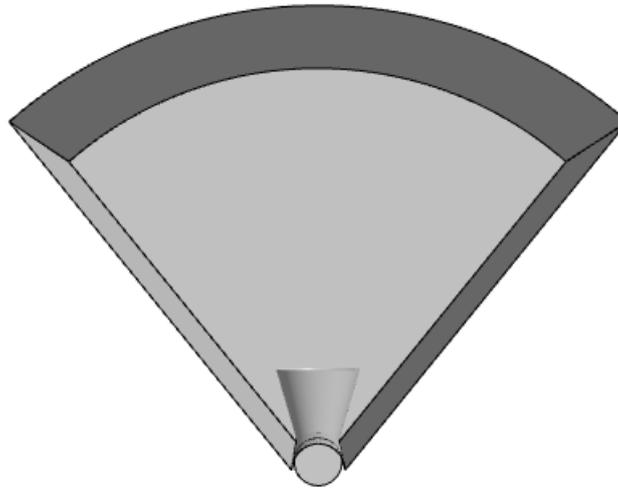


Fig. 3. Computational domain for investigation

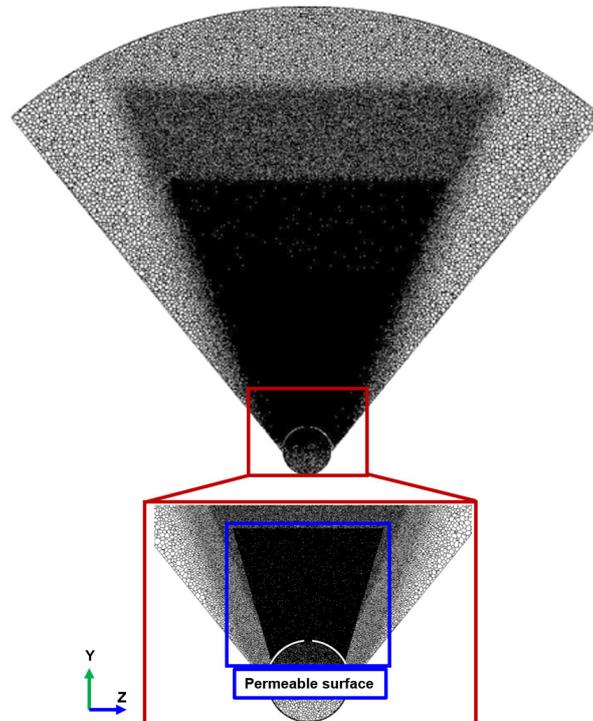


Fig. 4. Computational grid system with permeable surface

Table 1. Results of grid convergence test

Resolution level	Coarse	Medium	Fine
Total elements	30 M	59 M	120 M
Finest mesh size [m]	0.012	0.01	0.008
Simulation time [hr]	30	70	120
Mass flow rate [kg/s]	0.0168	0.170	0.170

파이프의 출입구는 내부압력이 유지되기 위해 Stagnation Inlet 경계조건을, 파이프에는 Wall 경계조건을 부여하였다. 결함 출구를 포함한 나머지 면은 Pressure Outlet 경계조건을 부여하였다. Table 2는 누설 유동 및 소음을 해석하기 위한 전체 계산 영역의 전산해석 조건을 나타내었다. 파이프의 내부압력 변화가 누설 유동 및 소음 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 10, 30, 50, 100 bar인 경우로 설정하였고, 내부 온도는 모두 300 K으로 같게 지정하였다. 대기 조건은 온도가 288.15 K일 때의 국제 표준 대기 모델을 사용하였고, 이상기체로 가정하였다. 소규모 와류 구조에서 발생하는 고주파 소음을 예측하기 위해 소음 스펙트럼의 최대 주파수를 200,000 Hz로 지정하도록 해석 시간 간격을 2.5 μ s로 설정하였고, 충분한 주파수 해상도(Δf , Frequency Resolution)를 확보할 수 있도록 0.045 s까지 전산해석을 수행하였다. 해당 시간까지 해석하기 위해 소요된 시간은 Intel(R) Xeon(R) Gold 6230R CPU 2.1 GHz 320 cores를 이용한 병렬계산으로 약 70시간이 소요되었다. 전산해석 결과, 유동의 특성이 충분히 수렴한 0.002 s 이후의 데이터를 사용하였다.

Table 2. Simulation conditions

Flow	Air
Temperature(T_∞)	288.15 K
Pressure(P_∞)	101,325 Pa
Hole diameter(D_H)	5, 8, 10 mm
Reynolds number	2.5×10^5 , 4.1×10^5 , 5.3×10^5

본 연구에서는 파이프의 결함에서 누설되는 유동 및 소음 특성을 분석하기 위해 파이프의 내부압력과 결함의 크기의 변화에 따른 파라메트릭 연구를 수행하였다. Table 3은 해석을 위해 Case 별로 지정한 파이프의 결함의 크기와 초기 내부압력 및 온도 조건이다. Case 1~4는 결함의 크기가 일정할 때 내부압력의 변화가, Case 2, 5, 6은 파이프의 내부압력이 일정할 때 결함 크기의 변화가 누설 유동과 소음에 미치는 영향성을 분석하였다.

Table 3. Initial conditions of pipeline

Case	D_H [mm]	P_0 [bar]	T_0 [K]
1	10	10	300
2	10	30	300
3	10	50	300
4	10	100	300
5	8	30	300
6	5	30	300

4. 전산해석 결과

4.1 파이프 내부압력 변화에 따른 영향성 분석

4.1.1 파이프 내부압력 변화에 따른 누설 유동 예측 결과

본 연구에서는 파이프의 내부압력 및 결함의 크기 변화에 따른 누설 유동 및 소음의 특성 분석을 집중적으로 고찰하였다. 먼저, 파이프 결함의 크기가 일정할 때 내부압력의 변화가 누설 유동 및 소음에 미치는 영향성을 분석하였다. Table 4는 원형 형상의 결함의 지름이 10 mm로 일정하고, 내부압력이 10, 30, 50, 100 bar로 증가할 때 결함의 출구에서 해석된 유동의 속도와 온도, 밀도와 질량유량, 그리고 압력을 해석하여 나타내었다. 파이프의 내부 온도가 같을 때, 등엔트로피 조건에 따라 내부압력이 증가할수록 누설 유동의 압력이 증가하였다. 내부압력과 대기압의 압력 차이로 인하여 파이프 내부에서 결함으로 유동이 흐를 때 운동에너지의 성분인 유동의 속도가 증가한다. 하지만, 결함 내부 유동의 마하수가 1을 넘었을 때, 유동의 속도가 증가하지 않는 Choking 현상이 일어나기 때문에 내부압력이 증가하여도 결함 출구에서 유동의 속도가 일정하였다. 이에 따라 운동에너지가 일정해지고 에너지 보존 법칙에 따라 내부에너지도 일정해지므로, 내부에너지와 관련 있는 유동 온도가 결함의 출구에서 일정하게 해석된 것으로 판단된다. 이상기체 방정식에서 파이프의 내부 온도와 공기의 특정 기체상수가 일정할 때, 누설 유동의 압력이 증가할수록 밀도가 증가하였다. 결함 출구에서 누설된 질량유량은 관계식에서 결함 출구의 면적과 누설 유동의 속도가 일정할 때, 유동의 밀도가 증가할수록 질량유량이 증가하였다.

Table 4. Computation results on leakage flow on pressure

P_0 [bar]	10	30	50	100
Velocity [m/s]	369.95	370.82	370.43	370.33
Temperature [K]	231.12	231.22	231.53	231.64
Mach number [-]	1.23	1.23	1.23	1.23
Density [kg/m ³]	5.47	15.40	25.35	50.23
Mass flow rate [kg/s]	0.17	0.478	0.78	1.56
Pressure [bar]	2.60	9.15	15.73	32.26

Fig. 5는 속도장 비교를 통해 파이프의 내부압력이 누설 유동장에 미치는 영향을 분석하여 나타내었다. 결함에서 누설되는 유동은 초음속 제트 유동으로 발달되어 빠른 속도로 하류방향으로 전파되는 특성을 가지지만, 파이프의 외부는 유동이 정체되어있는 상태이다. 따라서 누설 유동이 파이프 외부로 전파될 때, 누설 유동과 대기 공기 간에 속도 차이가 발생한다. 이에 따라 누설 유동이 전파되는 하류 방향으로 속도가 다른 두 유체 층의 움직임에 의해 전단층(Shear Layer)과 Kelvin-Helmholtz 불안정성이 발생하였다. 또한, 누설 유동이 하류 방향으로 전파되면서 파동과 와류가 생성되는 Roll-Up 현상이 관찰되었다. 내부압력이 증가할수록 누설 유동의 속도가 증가하며 Kelvin-Helmholtz 불안정성이 더욱 심해져, 전단층에서 더 큰 와류가 발달하였다. 결함 출구 주위에서 생성된 작은 규모의 불안정파는 하류 방향으로 전파될 때 전단층 내의 에너지를 흡수하여 발달한다. 불안정파의 영향으로 내부압력이 증가할 때, 결함 출구 주위의 전단층에서 충격파와 난류가 상호작용하여 유동이 팽창하고 수축하는 Circular Wavefront가 넓게 형성되었다. 누설 유동과 대기 공기가 충돌할 때 공기의 점성에 의하여 강한 압력장이 생성되는데, 이 압력장이 근처 와류를 하류 방향으로 밀어내며 와류에서 가속운동이 발생하였다. 이 가속운동에 의하여 누설 유동 바깥으로 마하파가 발생하였고, 파이프의 내부압력이 증가할수록 마하파가 더 넓게 전파되었다. 누설 유동과 대기 공기 간의 속도 차이로 인하여 유체 간의 충돌이 심해져, 유동의

속도가 급격히 감소하는 Mach Disk 충격파가 생성되었다. Mach Disk로 인하여 Shock-Cell Structure의 중심에서는 유동 흐름의 수직 방향으로 Normal Shock이, 측면에서는 기울어진 방향으로 Oblique Shock이 발생하였다. 이 충격파들로 인하여 초음속으로 누설된 유동의 속도는 아음속으로 급격히 감소하고, 온도와 밀도, 그리고 압력이 급격히 증가하였다. 특히, Fig. 5(a), (d)에서 파이프의 내부압력이 증가할수록 하류 방향에서 유동의 속도가 증가하고 전단층이 더욱 두꺼워지므로 Mach Disk의 크기가 커지고 세기가 강해졌다. 이에 따라 Mach Disk 이후 영역에서 유동의 속도가 더 많이 감소하였고, Shock-Cell Structure가 난류에 의하여 소산이 심해졌다.

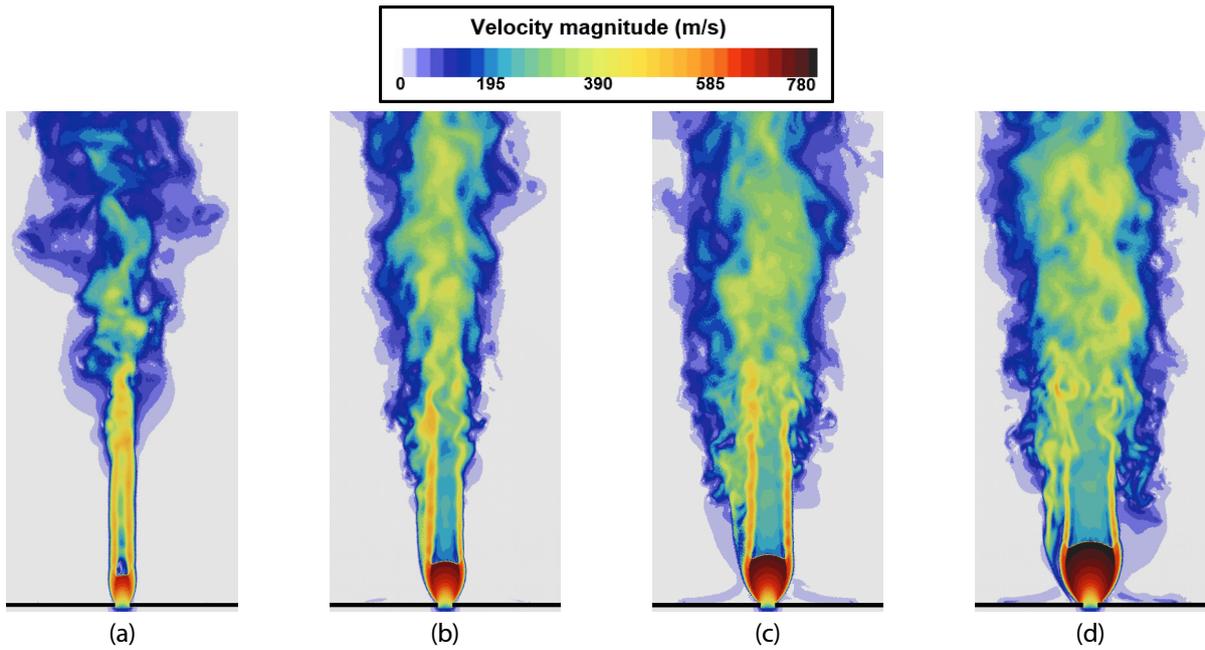


Fig. 5. Velocity contours of leakage flow: (a) 10 bar, (b) 30 bar, (c) 50 bar, (d) 100 bar

4.1.2 파이프 내부압력 변화에 따른 누설 소음 예측 결과

파이프의 내부압력 변화가 소음에 미치는 영향성을 분석하기 위해 고도각별로 배치한 마이크로폰에서 해석된 소음의 세기를 분석하였다. Fig. 6은 내부압력의 변화에 따른 고도각별 소음 스펙트럼을 나타내었다. 해석 결과, 내부압력이 10 bar인 경우, 주파수가 6,000 Hz일 때의 소음이 30, 50 bar인 경우보다 약 15 dB 높은 고음이 발생하는 스크리치 톤 소음을 관찰했다. 내부압력이 10 bar인 경우는 30, 50, 100 bar인 경우보다 대기압과 압력 차이가 작게 발생하여 하류 방향으로 전파되는 유동의 속도가 느리다. 따라서, 누설 유동과 대기 공기 간의 압력 및 속도 차이로 충돌하여 생성되는 Mach Disk 영역의 크기와 그 세기가 가장 작음을 확인할 수 있다. 상대적으로 Mach Disk의 세기가 강한 내부압력이 30, 50, 100 bar인 경우에는 Mach Disk를 지난 누설 유동의 속도가 급격하게 감소했지만, 내부압력이 10 bar인 경우 속도 감소가 적게 발생하였다. 이에 따라 하류 방향으로 전파되는 Hydrodynamic Fluctuations와 상류 방향으로 전파되는 Acoustic Fluctuations가 충돌하는 Feedback Mechanism이 반복적으로 발생하여 스크리치 톤 소음을 야기한 것으로 판단된다.

마이크로폰의 고도각이 커질수록 주파수에 따른 소음의 세기가 크게 예측되었고, 내부압력이 10 bar일 때는 스크리치 톤 소음이 발생한 6,000 Hz에서 고도각이 165°인 경우가 90°인 경우보다 소음이 약 30 dB 크게 예측되었다. 마이크로폰이 고도각이 커진 곳에 있을수록 하류 방향에서 흐르는 누설 유동과 가까워진다. 이때, 유동에서는 대규모의 난류 구조가 발달하며 난류 혼합소음의 영향을 크게 받기 때문에 소음이 크게 예측된 것으로 판단된다.

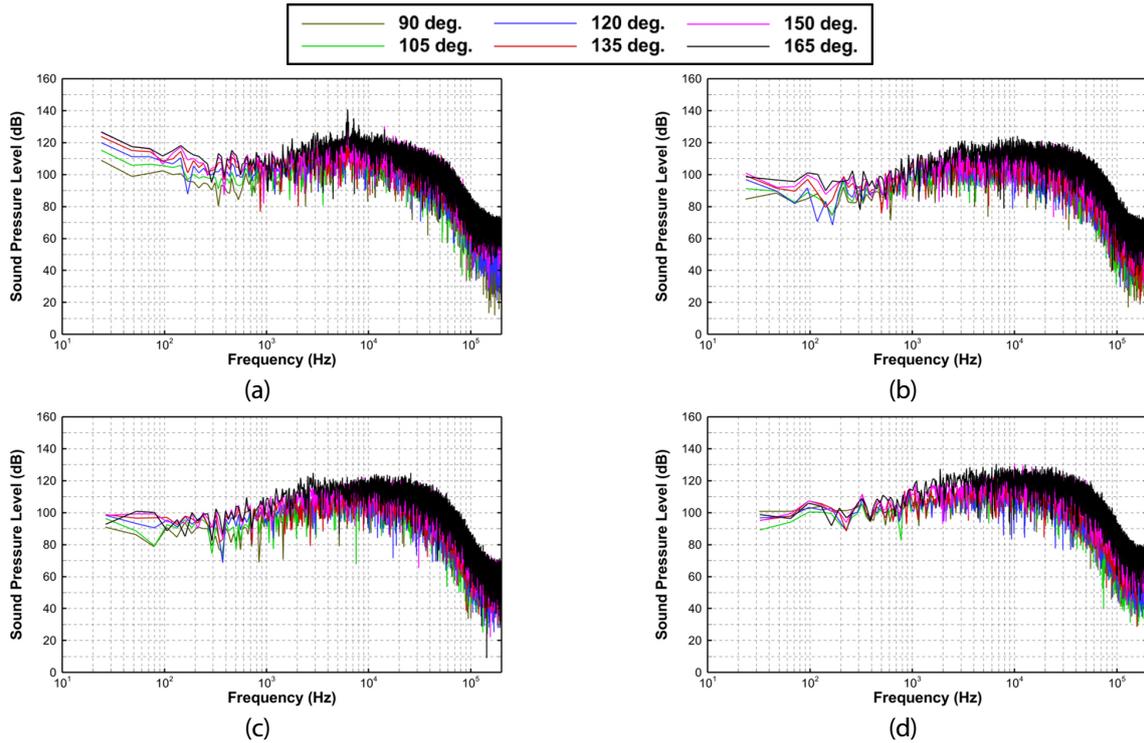


Fig. 6. Acoustic spectra depending on microphone: (a) 10 bar, (b) 30 bar, (c) 50 bar, (d) 100 bar

Fig. 7에서는 내부압력의 변화에 따른 고도각 범위의 Overall Sound Pressure Level(OASPL) 소음을 나타내었다. 고도 각이 165°인 경우가 90°인 경우보다 소음이 약 7 dB 크게 예측되는 등 고도각이 커질수록 소음의 세기가 증가하였다. 이것은 Fig. 6에서 확인했듯이 마이크론의 고도각이 커질수록 난류의 영향으로 발생하는 난류 혼합소음의 영향이 큰 것으로 판단된다. 내부압력이 10 bar인 경우, 스크리치 톤 소음에 의하여 마이크론의 모든 위치에서 30, 50 bar인 경우보다 소음이 크게 예측되었다. 파이프의 내부압력이 증가할수록 결함에서 누설되는 유동의 속도가 증가하고, Kelvin-Helmholtz 불안정성이 심해진다. 이에 따라 하류 방향에서 유동으로부터 대규모 난류가 발달하고 난류 혼합소음의 영향성이 커진다. 이러한 원인으로 압력이 30 bar인 경우보다 50 bar인 경우에서 소음이 약 2 dB 크게 예측되었고, 내부압력이 100 bar일 때 특정 위치에서 고음이 발생하는 스크리치 톤 소음이 관찰되지 않았지만, 전단층에서 대규모 난류가 가장 심하게 발달하며 모든 마이크론 위치에서 소음이 가장 크게 예측된 것으로 판단된다.

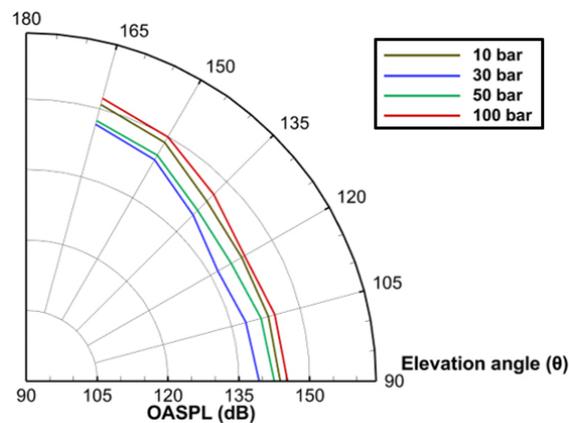


Fig. 7. Comparison of OASPL with elevation angle

4.2 파이프 결함 크기 변화에 따른 영향성 분석

4.2.1 파이프 결함 크기 변화에 따른 누설 유동 예측 결과

파이프의 내부압력이 30 bar로 일정하고 원형 형상의 결함의 지름이 5, 8, 10 mm로 커질 때 누설 유동 및 소음에 미치는 영향성을 분석하였다. Table 5는 결함의 크기 변화에 따른 결함 출구에서 누설되는 유동의 속도, 온도 등을 분석하였다. 결함의 지름이 커질 때 결함 출구에서 해석된 유동의 압력 차이는 Case 별로 약 2% 내로 유사하게 예측되었다. 이는 파이프 내부압력과 온도가 같을 때, 압축성 기체의 등엔트로피 조건에 의하여 누설 유동의 압력 차이가 없는 것으로 판단된다. 결함의 내부에서 Choking 현상과 에너지 보존 법칙에 따라 속도와 온도가 일정하다. 이상기체 방정식에서 밀도 외의 성분들이 모두 일정하여 결함의 지름이 커져도 밀도는 변하지 않는다. 질량유량은 관계식에서 결함의 지름이 커질 때 결함 출구의 면적이 증가하기 때문에 증가한 것으로 판단된다.

Table 5. Computation results on leakage flow on hole diameter

Hole diameter [mm]	5	8	10
Velocity [m/s]	373.31	371.24	370.82
Temperature [K]	230.09	230.75	231.22
Mach number [-]	1.26	1.21	1.23
Density [kg/m ³]	14.97	14.96	15.40
Mass flow rate [kg/s]	0.118	0.304	0.478
Pressure [bar]	8.81	9.02	9.15

Fig. 8은 속도장 변화 비교를 통해 결함의 크기 변화가 누설 유동장에 미치는 영향을 분석하였다. 결함의 지름이 커질수록 하류 방향에서 누설 유동이 전파되는 속도가 증가하고, 정체되어있는 대기 공기와의 속도 차이가 벌어진다. 이에 따라 대기 공기와 누설 유동 간에 전단층이 생성되는 Kelvin-Helmholtz 불안정성이 심해져, 강한 Roll-Up 현상으로 유동으로부터 와류가 크게 발달했다. 불안정파가 하류 방향으로 발달하면서 결함 출구 주위에 위치하는 전단층에서 충격파와 난류의 상호작용이 늘어나서 크기와 세기가 큰 Circular Wavefront가 생성되었다. 또한, 결함의 지름이 커질수록 하류 방향에서 누설 유동과 대기 공기가 충돌 시 점성에 의하여 생성된 강한 압력장이 와류를 밀어낼 때 발생하는 가속운동이 심해져,

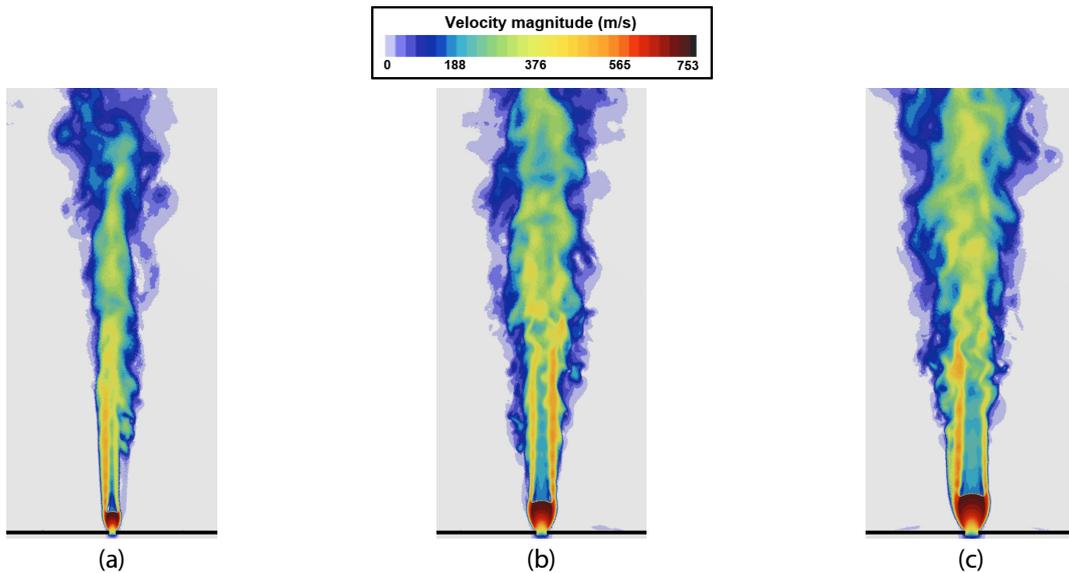


Fig. 8. Velocity contours of leakage flow: (a) 5 mm, (b) 8 mm, (c) 10 mm

유동 바깥으로 강한 마하파가 넓게 전파되었다. 결합의 지름이 커질수록 하류 방향에서 초음속으로 전파되는 누설 유동과 대기 공기와의 속도 차이가 벌어지고 전단층이 두꺼워져, 속도가 급격히 감소하고 압력과 밀도 등이 증가하는 Mach Disk 가 더 크고 강하게 생성되었다. 이에 따라 Shock-Cell Structure가 난류에 의해 소산이 심해졌다.

4.2.2 파이프 결합 크기 변화에 따른 누설 소음 예측 결과

Fig. 9에서는 결합 크기의 변화가 소음에 미치는 영향성을 확인하기 위해 고도각 별 소음 스펙트럼을 분석하였다. 결합의 지름이 5 mm인 경우, 하류 방향에서 유동의 속도가 느리고 전단층이 얇아서 Mach Disk의 크기와 세기가 작게 생성되었다. 이에 따라 8, 10 mm인 경우보다 하류에서 누설 유동의 난류가 소산되는 속도가 느려, Hydrodynamic Fluctuations와 Acoustic Fluctuations가 충돌하는 Feedback Mechanism의 횡수가 늘어나며 주파수가 9,000 Hz일 때의 소음이 8, 10 mm인 경우보다 약 15 dB 높은 스크리치 톤 소음이 발생하였다. 해당 주파수를 기준으로 주파수가 낮은 영역과 높은 영역을 각각 저주파수와 고주파수로 고려했을 때, 저주파수에서 발생하는 소음의 주된 요인은 대규모 난류의 발달로 인한 난류 혼합소음이다. 또한, Shock-Cell Structure와 와류 간의 상호작용으로 인하여 발생하는 광대역 충격 소음이 고주파수에서 발생하는 소음의 지배적인 원인이다. 결합의 지름이 5, 8, 10 mm로 증가할 때 저주파수 영역에서 소음의 세기는 약 2 dB 씩 증가하였다. 이는 지름이 5 mm일 때 하류 방향으로 전파되는 유동의 속도가 두 경우보다 느려서 Kelvin-Helmholtz 불안정성이 약하게 발생하였고, 난류 발달에 의한 영향성이 감소하여 난류 혼합소음의 기여도가 가장 낮은 것으로 판단된다. 결합의 지름이 5 mm에서 8 mm로 증가할 때와 8 mm에서 10 mm로 증가할 때 고주파수에서 소음의 세기가 약 7 dB과 1 dB씩 증가하였는데, 지름이 5 mm일 때 전단층에서 Roll-Up 현상으로 인한 와류가 적게 발달하며 불안정성이 약해, Shock-Cell Structure와 와류 간의 상호작용이 줄어들며 광대역 충격 소음의 영향이 작은 것으로 판단된다. 이에 반해 지름이 8, 10 mm인 경우는 비슷한 크기의 와류가 발달하여 광대역 충격 소음의 영향이 비슷하므로 고주파수에서의 소음 차이가 거의 없는 것으로 판단된다.

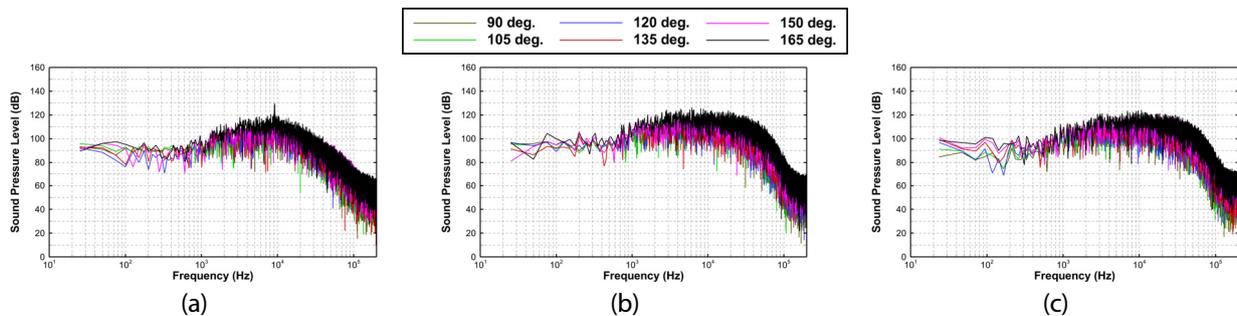


Fig. 9. Acoustic spectra depending on microphone: (a) 5 mm, (b) 8 mm, (c) 10 mm

Fig. 10에서는 결합의 크기 변화에 따른 고도각 범위의 OASPL을 비교하였다. 고도각이 커질수록 마이크론이 누설 유동과 가까워진다. 이때 하류 방향으로 전파되는 유동에서 대규모 난류가 발달하며 난류 혼합소음의 영향성이 커지기 때문에 고도각이 90°인 경우보다 165°인 경우에서 소음이 최대 약 7 dB 크게 예측되었다. 결합의 지름이 5 mm인 경우, 스크리치 톤 소음이 발생했음에도 불구하고 모든 마이크론의 위치에서 소음이 가장 작게 예측되었다. 이것은 하류 방향에서 해석된 스크리치 톤 소음보다 유동으로부터 발달한 난류와 와류로 인한 난류 혼합소음과 광대역 충격 소음의 영향성이 큰 것으로 판단된다. 지름이 8 mm인 경우와 10 mm인 경우의 소음 세기 차이는 약 2 dB 내로 비슷하게 해석되었다. Fig. 9에서 각각의 난류 혼합소음과 광대역 충격 소음의 세기 차이가 약 2 dB과 1 dB만큼 발생하였으며, 마이크론의 모든 위치에서 소음의 세기가 유사하게 예측되었다.

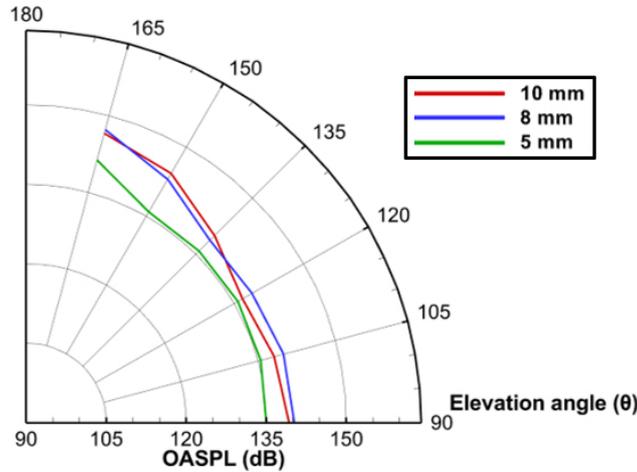


Fig. 10. Comparison of OASPL with elevation angle

5. 결론

본 연구에서는 음향 인텐시티 신호를 통하여 누설 지점을 탐지하는 기술의 개발 과정으로 누설 소음의 특성을 분석하기 위해 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+에서 LES 해석기법과 Permeable FW-H 음향상사법을 사용하여 파이프의 내부압력과 결함의 크기 변화가 누설 유동과 소음에 미치는 영향성을 분석하였다.

결함의 크기나 내부압력이 증가할 때 Choking 현상 및 에너지 보존 법칙에 따라 결함 출구에서의 유동 온도와 속도가 일정하게 유지되었다. 또한, 하류 방향으로 전파되는 누설 유동의 Circular Wavefront와 마하파가 확산하였고, Mach Disk로 인하여 Shock-Cell Structure가 난류에 의하여 소산이 심해졌다. 누설 유동의 난류 및 와류의 발달로 인한 난류 혼합소음과 광대역 충격 소음이 유사하게 해석된 경우, 스크리치 톤 소음이 발생하면 모든 마이크로폰 위치에서 소음이 크게 예측되었다. 하지만, 난류 혼합소음과 광대역 충격 소음이 작게 해석된다면 스크리치 톤 소음이 발생하여도 마이크로폰의 모든 위치에서 소음이 작게 예측되었다.

본 연구를 통해 누설 소음을 추적하여 누설 위치를 조기에 탐지하는 음향 인텐시티 기반 누설 위치 탐지 기술 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 특정한 형태의 결함이 발생한다고 가정하였지만 실제 산업 공정 및 플랜트에서 사용하는 파이프에 생기는 결함은 결함은 불규칙하고 얇은 크랙 형상으로 발생한다. 따라서, 실제 산업 현장에 설치된 파이프에 생성된 결함에 의해 발생하는 누설 소음의 특성을 보다 정확하게 예측하기 위해 향후 연구에서는 결함의 형상이 실제와 유사한 얇은 크랙 형태인 경우와 파이프 내 압력 차이로 유동의 흐름이 존재할 때의 누설 유동과 소음을 분석할 예정이다.

후기

이 논문은 한국기계연구원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제명: 인공지능 기반 기계시스템 예측 진단 및 사고대응 기술 개발).

References

- [1] 2018, Qiu, Z. and Liang, W., "Tracing and prediction analysis of an urban pipeline leakage accident based on the catastrophe DBN mode," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol.57, pp.339-348.
- [2] 2010, Park, K.J., Kang, W.S. and Kang, D.J., "Flaw Detection of Petrochemical Pipes using Torsional Waves," *Journal of Power System Engineering*, Vol.14, No.3, pp.46-51.
- [3] 2015, Lee, S.G. and Song, S.J., "Eddy Current Sensor Development for Offshore Pipeline NDT Inspection," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol.29, No.2, pp.199-206.
- [4] 2019, Chung, W.G., Kim, J.H. and Cheon, K.Y., "Flaw Detection of 3/4 inch Pipe by Using Guided Wave," *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, Vol.15, No.1, pp.40-45.
- [5] 2023, Shin, C.M., Ryu, S.H., Jung, K.J. and Myong, R.S., "Computational Analysis of Thermal Flow Field and Observability of Aircraft serrated Nozzles," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.28, No.1, pp.1-11.
- [6] 2007, Seo, J.H., Cho, H.G., Lee, D.H., Jung, S.C., Myong, R.S. and Huh, H.I., "A Computational Study on the Characteristics of Flowfields in Micronozzles," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.12, No.4, pp.38-43.
- [7] 1995, Tam, C.K.W., "Supersonic Jet Noise," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.27, No.1, pp.17-43.
- [8] 2007, Kim, Y.S., Ryu, K.W., Hwang, C.J. and Lee, D.J., "Numerical Study on the Frequency Characteristics of Screech Tone in a Supersonic Jet," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.12, No.1, pp.53-59.
- [9] 2007, Kim, Y.S. and Lee, D.J., "Numerical Analysis on Screech Tone in a Supersonic Jet," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.35, No.2, pp.94-100.
- [10] 1953, Powell, A., "On the Mechanism of Choked Jet Noise," *Proceedings of the Physical Society. Section B*, Vol.66, No.12, pp.1039-1056.
- [11] 2011, Umeda, Y. and Ishii, R., "On the Sound Sources of Screech Tone Radiated from Choked Circular Jets," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.110, No.4, pp.1845-1858.
- [12] 1999, Panda, J., "An Experimental Investigation of Screech Noise Generation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.378, pp.71-96.
- [13] 1997, Raman, G., "Cessation of Screech in Underexpanded Jets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.336, pp.69-90.
- [14] 1999, Kim, J.S., "Numerical Analysis for Supersonic Off-Design Turbulent Jet Flow," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.4, No.2, pp.57-66.
- [15] 2018, Ebrahimi-Moghadam, A., Farzaneh-Gord, M., Arabkoohsar, A. and Moghadam, A.J., "CFD Analysis of Natural Gas Emission from Damaged Pipelines: Correlation Development for Leakage Estimation," *Journal of Cleaner Production*, Vol.199, pp.257-271.
- [16] 2013, Wei, L., Laibin, Z., Qingqing, X. and Chunying, Y., "Gas Pipeline Leakage Detection based on Acoustic Technology," *Engineering Failure Analysis*, Vol.31, pp.1-7.
- [17] 2012, Qingqing, X., Zhang, L. and Liang, W., "Acoustic Detection Technology for Gas Pipeline Leakage," *Process Safety and Environmental Protection*, Vol.91, No.4, pp.253-261.
- [18] 1998, Han, S. and Tam, C.K.W., "Numerical Simulation of the Generation of Axisymmetric Mode Jet Screech Tones," *AIAA Journal*, Vol.36, No.10, pp.1801-1807.
- [19] 1992, Ponton, M.K. and Seiner, J.M., "The Effects of Nozzle Exit Lip Thickness on Plume Resonance," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.154, No.3, pp.531-549.
- [20] 2015, West, A. and Caraeni, M., "Jet Noise Prediction using a Permeable FW-H Solver," *21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*.
- [21] 2019, Brès, G.A. and Lele, S.K., "Modelling of Jet noise: A Perspective from Large-Eddy Simulations," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical*, Vol.377, No.2159
- [22] 2017, Gojon, R. and Bogey, C., "Numerical Study of the Flow and the Near Acoustic Fields of an Underexpanded Round Free Jet Generating Two Screech Tones," *International Journal of Aeroacoustics*, Vol.16, No.7-8,

pp.603-625.

- [23] 2021, Lasota, M., Šidlof, P., Kaltenbacher, M. and Schoder, S., “Impact of the Sub-Grid Scale Turbulence Model in Aeroacoustic Simulation of Human Voice,” *Applied Sciences*, Vol.11, No.4, 1970.
- [24] 2022, Kim, E.M., Yang, J.Y., Lee, H.J., Kang, M.J., Myong, R.S. and Lee, H., “Numerical Prediction of Rotor-Airframe Interaction Noise,” *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.27, No.3, pp.79-88.
- [25] 2023, Yang, J.Y., Lee, H.J., Kang, M.J., Kim, E.M., Myong, R.S. and Lee, H., “Aeroacoustic Analysis of UAM Aircraft in Ground Effect for Take-off/Landing on Vertiport,” *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol.17, No.2, pp.26-37.