



DES 해석과 속도 구배 텐서 불변량을 이용한 사다리꼴 혼합 탭 후류의 난류 위상 분석

양경규[†]

충남대학교 자율운항시스템공학과

Topological Analysis of Turbulent Wake Behind a Trapezoidal Mixing Tab Using DES and Velocity Gradient Tensor Invariants

Kyung-Kyu Yang[†]

Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study numerically investigates the complex three-dimensional turbulent flow around a trapezoidal mixing tab, which acts as a vortex generator in an infrared signature Suppression System(IRSS). While previous studies heavily relied on steady Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) models, this research employs the Detached Eddy Simulation(DES) to precisely capture unsteady vortex shedding and micro-scale mixing mechanisms. The simulation was conducted for an incompressible pipe flow at a Reynolds number of 150,000. Grid convergence was verified using Pope's criterion, and the DES results demonstrated a superior agreement with experimental velocity profiles compared to the RANS predictions. Furthermore, the turbulent kinetic energy spectrum closely followed Kolmogorov's $-5/3$ decay law in the inertial subrange, confirming the validity of the resolved flow scales. By utilizing the Q-R topological diagram based on the invariants of the velocity gradient tensor, the dynamic evolution of vortical structures was quantitatively classified. The analysis revealed that the stable focus/stretching(SFS) and unstable focus/compressing(UFC) topologies actively govern the turbulent energy cascade, reflecting a dynamic equilibrium of vortex creation and viscous dissipation. Ultimately, the high-fidelity DES successfully captures the intricate fragmentation of hairpin vortices, providing profound insights for optimizing fluid mixing systems.

Keywords : Infrared signature suppression system(IRSS, 적외선 신호 저감 장치), Detached eddy simulation(DES, 분리 에디 모사), Vortex generator(와류 발생기), Velocity gradient tensor(속도 구배 텐서), Turbulent energy cascade(난류 에너지 폭포)

1. 서론

함정의 적외선(infrared, IR) 신호는 주로 추진기관에서 배출되는 고온의 폐기가스와 연돌 및 배기관 가열된 금속 표면에서 방사되는 열에너지에 의해 발생한다. 이러한 적외선 신호는 적외선 탐지 장비 및 유도탄에 의해 쉽게 포착될 수 있으므로, 이를 효과적으로 저감하는 기술은 함정 생존성 확보의 핵심 요소로 간주된다. 적외선 신호 저감 장치(infrared signature suppression system, IRSS)는 고온 배기가스에 난류를 형성하는 노즐(nozzle), 배기가스와 외기 유동의 혼합을 유도하는 혼합관(mixing tube), 그리고 내외기 압력차를 이용하여 공기막을 형성함으로써 표면 온도를 저감하는 디퓨저(diffuser)로 구성된다(Birk and Davis,

1989; Yoon et al., 2017; Choi et al., 2025). IRSS 장치는 고온의 배기가스와 저온의 주변 공기를 혼합하여 배출 가스의 온도를 낮추는 것을 일차적인 목표로 한다. 이러한 혼합 성능을 극대화하기 위해 배기관 내부에 탭(tab)과 같은 형상을 부착하는 등 다양한 유동 제어 기술이 제안되어 왔다(Singh et al., 2020).

와류 발생기(vortex generator)로 작용하는 이러한 부가물은 날카로운 모서리를 통해 국부적인 압력 구배(pressure gradients) 및 전단 불안정성(shear instabilities)을 야기하여 흐름 방향 및 횡방향 와류 구조(streamwise and transverse vortical structures)를 인위적으로 생성한다. 와류 발생기 후류에서는 역회전 와류 쌍(counter-rotating vortex pair, CVP)과 주기적인 헤어핀 형태의 구조(hairpin-like structures)가 발달하며, 이들은 주 유동과의 상

호작용을 통해 거시(macro-), 중간(meso-), 그리고 미시 혼합(micro-mixing) 메커니즘을 주도하여 유체의 질량 및 열전달을 비약적으로 촉진시킨다(Zaman and Samimy, 1994; Dong and Meng, 2004; Habchi et al., 2010). 이와 같은 수동적 유동 제어(passive flow control) 기법은 혼합 장치뿐만 아니라, 선박 분야에서 선미 유동을 제어하는 에너지 절감 장치(Energy Saving Device, ESD)로도 활발히 응용되고 있다(Choi et al., 2009; Park et al., 2009; Park et al., 2016).

국내에서도 제어 핀(fin)이나 날개 단면 형상 주변의 유동 해석과 와류 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대부분의 연구들은 실험적 접근이나 시간 평균화된 레이놀즈 평균 나비에-스토크스(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 방정식에 주로 의존했으나(Kwon et al., 2025; Heo and Kim, 2025), 최근에는 고정밀도의 대형 와 모사(Large Eddy Simulation, LES) 및 분리 에디 모사(Detached Eddy Simulation, DES) 기법 또한 도입되는 추세이다. Jung et al. (2012)은 횡단면을 축 방향으로 회전시켜 기하학적 형상 변형을 준 트위스트 실린더(twisted cylinder) 주위 유동을 LES로 해석하여, 이러한 수동적 제어가 전단층(shear layer)을 연장시키고 Karman vortex street을 억제함으로써 저항 저감 및 와류 감쇠에 효과적임을 입증하였다. Lee et al. (2017)은 평판에 설치된 난류 촉진기(turbulence stimulator) 주위의 전이 유동(transitional flow)에 대하여 LES를 수행하였으며, 주 유동 방향의 와도가 발달하는 과정에서 각 방향의 격자 해상도가 미치는 영향을 체계적으로 검증하였다. 또한 Jung et al. (2019)은 해양 라이저(marine riser) 주위의 유동을 LES와 DES로 해석하여, RANS 모델이 진폭을 과대 추정하는 한계를 극복하고 와류기 진동(vortex-induced vibration)의 물리적 특성을 성공적으로 모사하였다. Suh and Park (2021)은 잠수함 모델 주위 유동을 DES로 해석하여 부가물에 기인된 와동과 선체 경계층 및 다른 부가물과의 상호작용을 규명하였고, 이러한 상호작용 유동이 추진기면 난류에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구의 주된 목적은 관(pipe) 유동에서 혼합을 촉진하기 위해 도입된 사다리꼴 탭(trapezoidal tab) 형태의 와류 발생기 주변에 형성되는 복잡한 난류 유동을 정밀하게 분석하여, 혼합의 물리적인 메커니즘에 대한 이해를 넓히는 데 있다. 기존의 많은 연구가 시간 평균화된 RANS 해석에 의존해 왔으나, 이는 와류의 붕괴 및 상호작용과 같은 미세 척도의 유동 구조를 모사하는 데 명백한 한계를 지닌다. 따라서 본 연구에서는 비등방성(anisotropy) 난류 및 비정상 거동 해석에 적합한 DES 기법을 도입하여, 와류 발생기로 인한 후류의 유체역학적 특성을 집중적으로 탐색하고자 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 속도 구배 텐서(velocity gradient tensor)의 제2 불변량과 제3 불변량을 이용한 QR 다이어그램(QR diagram) 기법을 적용하여, 난류의 위상기하학적(topological) 특성을 정량적으로 분류하였다. 이를 통해 와류 발생기 후류에서 지배적으로 발생하는 와류의 신장(vortex stretching) 및 압축(vortex compression) 메커니즘이 난류 에너지 폭포(turbulent energy cascade) 현상과 유체 혼합에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 RANS 해석에서는 관찰할 수 없었던 미세 와류 구조를 파악하여

IRSS의 열유체역학적 설계 최적화 및 선박의 에너지 절감 장치 적용을 위한 공학적 기반 자료를 제공하고자 한다.

2. 해석 대상 및 해석 방법

2.1 지배방정식 및 수치해석 방법

본 연구에서는 와류 발생기 주변의 복잡한 3차원 유동을 모사하기 위해 비압축성(incompressible) 유동으로 가정하고 수치해석을 수행하였다. 해석 영역 내 질량 보존을 나타내는 연속 방정식(continuity equation)과 운동량 보존을 나타내는 운동량 방정식(momentum equation)은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 u_i 와 x_i 는 각각 i 방향 속도 벡터와 공간 좌표를 나타내며, p 는 압력, ρ 는 유체의 밀도, ν_{eff} 는 동점성계수(kinematic viscosity)와 난류 모델에 의해 계산되는 와점성계수(eddy viscosity)의 합인 유효 점성계수를 의미한다.

RANS 모델의 경우 시간 평균화된 유동장을 도출하기 때문에, 후류 박리 유동(separated flow)이나 복잡한 3차원 와류 구조를 세밀하게 포착하는 데 근본적인 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 고해상도 해석 기법인 SST $k-\omega$ DES 모델을 적용하였다. 적용된 DES 모델은 벽면 인근의 경계층(boundary layer) 영역에서는 해석의 안정성과 계산 효율성이 높은 SST $k-\omega$ RANS 기법으로 유동을 모사하고, 벽면에서 떨어진 유동 박리 및 후류 영역에서는 LES 기법으로 전환되어 거대 와류를 직접 격자 분해(resolving)하는 방식을 취한다. 본 연구에서는 Simcenter STAR-CCM+ 18.04 (Siemens, 2023)를 이용하여 수치 해석을 수행하였다.

2.2 해석 대상 및 제한

본 수치해석의 검증 및 유동 특성 분석을 위한 기하학적 모델은 원형 관 내부에 부착된 단일 탭(tab) 형상을 대상으로 하였다(Habchi et al., 2010). 관의 내경 d 는 0.02m이며, 입구로부터 $2d$ 위치에 탭이 유동 영역 중심부를 향해 기울어진 형태로 부착되어 있다. 설치 각도는 $\alpha = 30^\circ$ 이고 유동에 노출되는 수직 높이 h 는 3.9mm이다. 탭의 기하학적 형상은 사다리꼴 형태를 띠며, 하단부 너비는 6.2mm, 상단부 너비는 4.7mm이다. 후방으로 관의 길이는 $10d$ 이다(Fig. 1 참조).

수치해석 과정에서 소요되는 계산 비용을 저감하고 원형의 기하학적 대칭성을 활용하기 위해, 90° 부채꼴 영역만을 계산 영역

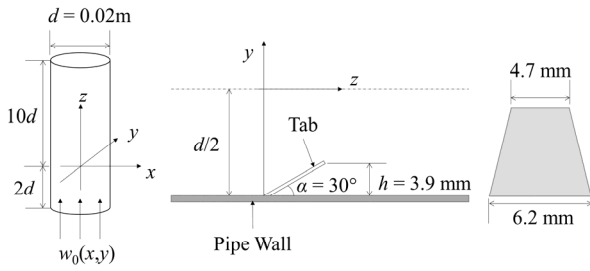


Fig. 1 Schematic diagram of the computational domain and geometric parameters of the trapezoidal mixing tab

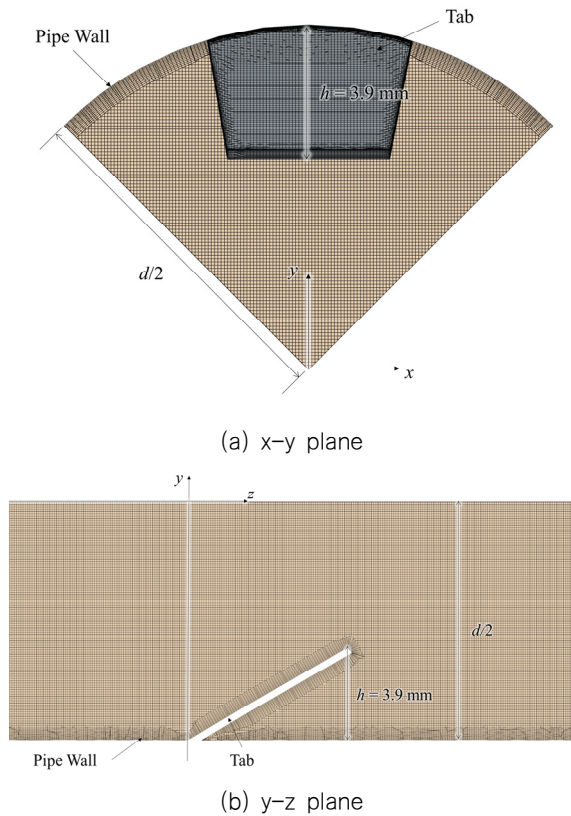


Fig. 2 Cross-sectional views of the quadrant computational domain and mesh distribution around the mixing tab

으로 한정하여 반복 경계조건(periodic boundary condition)을 적용하였다. 이와 같은 1/4 부채꼴 영역의 경계조건은 방위각 방향(azimuthal direction)으로 유동 구조가 동일하게 반복됨을 수학적으로 강제한다. 이는 단일 탭 후방에서 발생하는 와류 붕괴 및 난류 천이의 근본적인 메커니즘을 효율적으로 모사하는 데에는 물리적 타당성을 가지나, 실제 다중 탭(multiple tabs) 시스템에서 발생할 수 있는 탭 간의 3차원적 유동 간섭이나 후류 전체의 거시적인 비대칭 불안정성(asymmetric instability)을 모사하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서 구축된 단면의 격자계 구성 및 형상 치수 정보는 Fig. 2에 도식화하여 나타내었다.

본 해석의 작동 유체 온도는 298 K 상태로 물성치 변화가 없는 비압축성 유동으로 가정하였다. 목표 유동 조건은 관 내경 기

준의 레이놀즈 수가 $Re = 15,000$ 이 되도록 구성하였다. 유동장의 입구 경계조건(inlet boundary condition)으로는 상류에서 관내 유동이 충분히 발달된 난류(fully developed turbulent pipe flow) 상태임을 모사하기 위해, 1/7 승수 법칙(power-law) 기반의 속도 프로파일을 부여하였다. 해당 축 방향 입구 속도 분포는 유동 반경 위치에 따라 아래와 같다.

$$w_0(x, y) = w_{\max} (1 - r/R)^{1/7}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

RANS와 DES 해석 간의 명확한 유동 모사 성능 비교를 위해, 완전히 동일한 격자계와 입구 경계조건이 적용되었다. 비교 대상으로 사용된 RANS 해석의 난류 모델로는 복잡한 3차원 유동 특성과 난류의 비등방성(anisotropy)을 고려할 수 있는 레이놀즈 응력 모델(Reynolds Stress Model, RSM)을 적용하였다. 실험에서 계측된 값(Habchi et al., 2010)을 이용하여 입구면의 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy)는 0.00156 J/kg 으로 부여되었으며, 난류 에너지 소산율(dissipation rate)은 $0.00723 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 로 설정되었다. 이는 SST DES 모델 적용 시 요구되는 비소산율(specific dissipation rate) 51.5 /s 에 해당한다.

2.3 와류 구조 식별 및 분석 기법

유동장 내에 형성되는 복잡한 3차원 와류(vortex) 구조를 정량적으로 식별하고 국소적인 난류 특성을 파악하기 위해 속도 구배 텐서(velocity gradient tensor)를 기반으로 한 λ_2 기준과 Q-R 다이어그램(Q-R diagram) 분석 기법을 도입하였다(Chong et al., 1990; Paul et al., 2022).

3차원 유동장의 임의의 점에서 속도 구배 텐서 A_{ij} 는 대칭 텐서인 변형률 텐서(strain rate tensor, S_{ij})와 반대칭 텐서인 회전 텐서(rotation tensor, Ω_{ij})의 합으로 분해되며, 다음과 같이 정의된다.

$$A_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = S_{ij} + \Omega_{ij} \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

와류 코어(vortex core) 영역을 시각화하고 식별하기 위해 고안된 λ_2 기준은 유동장 내 국소적인 압력 최소점(local pressure minimum)을 와류의 중심으로 정의한다. 압력 최소값 조건은 텐서 $S_{ij}^2 + \Omega_{ij}^2$ 로 정리되며, 해당 대칭 텐서의 세 고유값(eigenvalues,

$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 중 두 번째로 큰 고유값인 λ_2 가 음수인 영역을 와류 코어로 판별한다(Jeong and Hussain, 1995).

속도 구배 텐서 A_{ij} 의 고유값(λ)은 다음의 3차 특성 방정식(characteristic equation)을 만족한다.

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0 \quad (7)$$

여기서 P , Q , R 는 각각 속도 구배 텐서의 제1, 제2, 제3 불변량(invariants)을 의미한다. 본 해석 대상과 같은 비압축성 유동의 경우 연속 방정식에 의해 속도의 발산(divergence)이 0이 되므로, 제1 불변량 P 는 항상 0이다. 따라서 제2 불변량 Q 와 제3 불변량 R 은 각각 다음과 같이 유도된다.

$$Q = \frac{1}{2}(\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij}) \quad (8)$$

$$R = -\frac{1}{3}(S_{ij}S_{jk}S_{ki} + 3\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}) = -\det(A_{ij}) \quad (9)$$

제2 불변량 Q 는 국소 유동장 내에서 회전율(rotation rate)의 크기와 변형률(strain rate)의 크기 간의 상대적인 차이를 나타내며, $Q > 0$ 인 영역은 유체의 변형보다 회전이 지배적인 상태를 나타낸다. 제3 불변량 R 은 난류 유동 내에서 와류 구조의 신장(vortex stretching)과 압축(vortex compression) 현상을 판별하는 지표이다.

본 연구에서는 와류의 동적 붕괴 및 발달 거동에 대한 수학적 해석을 위해 Q 와 R 의 상관관계를 도식화한 Q-R 다이어그램을 활용하였다. 다이어그램 상에서 $R < 0$ 인 영역이 와류의 신장을, $R > 0$ 인 영역이 와류 압축을 나타낸다. 이때 고유값이 실수인지 복소수인지 결정하는 판별식 D 는 다음과 같이 정의된다.

$$D = \frac{27}{4}R^2 + Q^3 \quad (10)$$

판별식 D 와 제3 불변량 R 의 부호 조합에 따라, 국소 유동장의 위상 기하학적(topological) 형태와 물리적 특성은 크게 네 가지 영역으로 분류할 수 있으며(Chong et al., 1990), 이에 대한 상세한 내용과 물리적 해석은 3.3절에서 다루기로 한다.

3. 해석 결과

3.1 격자 수렴도 및 해석 결과 검증

DES 해석의 타당성 및 해상도 품질을 평가하기 위해 격자 의존성 연구를 수행하였다. 본 수치해석은 계산 비용 저감을 위해 원형관의 1/4 부채꼴 영역을 대상으로 수행되었으며, 무차원화된 격자 해상도 $d/\Delta z$ 가 80.0에서 213.3으로 증가함에 따라 총 격자 수는 약 50만 개에서 700만 개로 증가하였다. 벽면 인근의 점

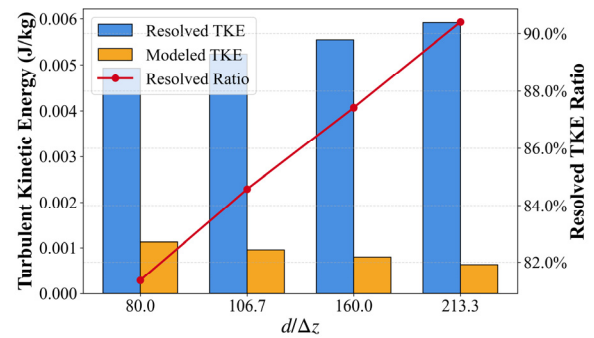


Fig. 3 Grid dependency of turbulent kinetic energy

성 저층 유동을 정밀하게 모사하기 위해 모든 격자계에서 프리즘 레이더(prism layer)의 구성은 동일하게 유지하였으며, 첫 번째 벽면 격자의 높이는 0.0157 mm로 설정하였다. 이를 통해 대부분의 벽면 영역에서 무차원 벽면 거리 y^+ 는 1 이하를 유지하였다. 다만, 탭과 관 벽면이 교차하는 형상 부근에는 조밀한 프리즘 레이더의 형성이 제한되어 국부적으로 y^+ 가 3~4 수준을 나타내었다.

격자 해상도에 따른 수치적 소산과 분해능을 확인하기 위해, Pope (2000)가 제시한 기준을 도입하여 전체 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy, TKE) 중 공간 격자에서 직접 해석된 난류 운동 에너지(resolved TKE)의 비율을 정량적으로 평가하였다(Fig. 3). 직접 분해된 난류 운동 에너지는 0.0049 J/kg에서 0.0059 J/kg으로 점진적으로 상승하는 반면, 모델링된 아격자 척도의 난류 운동 에너지(modeled TKE)는 감소하는 경향이 관찰되었다. 특히 가장 성긴 격자 조건에서도 해석 난류 운동 에너지 분해 비율(resolved ratio)이 약 81.4%에 도달하여 Pope(2000)가 제시한 LES 권장 기준인 80%를 상회하였다. 본 연구에서는 미세 와류의 붕괴 및 상호작용을 더욱 정밀하게 포착하기 위해 전체 난류 에너지의 90% 이상을 분해한 $d/\Delta z = 213.3$ 격자 결과를 기준으로 해석을 진행하였다.

수치해석 기법의 정량적 정확도 검증을 위해 유동 방향 단면인 $z/h = 2.482$ 및 $z/h = 10.482$ 에서 반경 방향 $y/(d/2)$ 에 따른 축 방향 무차원 속도 분포($w/w_{\max}$)를 추출하여 실험 데이터(Habchi et al., 2010)와 비교하였다(Fig. 4). 먼저 근접 후류 영역인 $z/h = 2.482$ 위치의 속도 분포를 살펴보면, 탭 형상으로 인한 강력한 장애물 효과로 인해 $y/(d/2) = 0.5 \sim 0.6$ 구간에서 급격한 속도 결손과 함께 가파른 전단층이 형성됨을 알 수 있다. 이 구간에서 시간 평균 기반의 RANS 해석은 수치적 확산으로 인해 속도 구배를 과도하게 완만하게 추정하는 경향을 보였다. 반면 빨간색 실선으로 도시된 DES 해석 결과는 박리 영역의 가파른 속도 구배를 정밀하게 추정할 뿐만 아니라, $y/(d/2) > 0.6$ 인 벽면 인근에서 관찰되는 복잡한 유속 회복 거동 및 국소적 굴곡 형상을 실험 데이터와 유사하게 예측하고 있다.

하류 방향으로 유동이 충분히 전개된 먼 후류 영역인 $z/h = 10.482$ 단면에서는, 거대 와류의 붕괴 및 주변 유체와의 활발한 운동량 교환으로 인해 전반적인 속도 결손폭이 넓어지

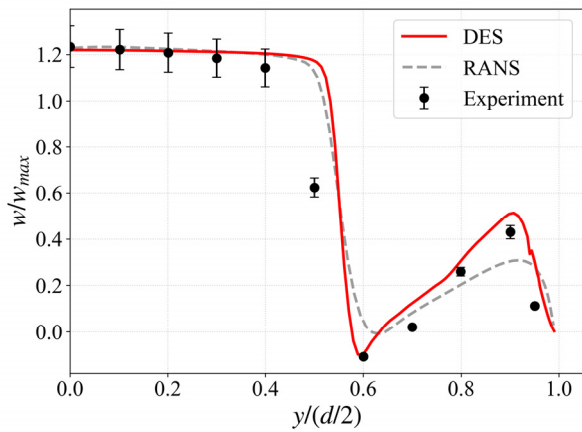
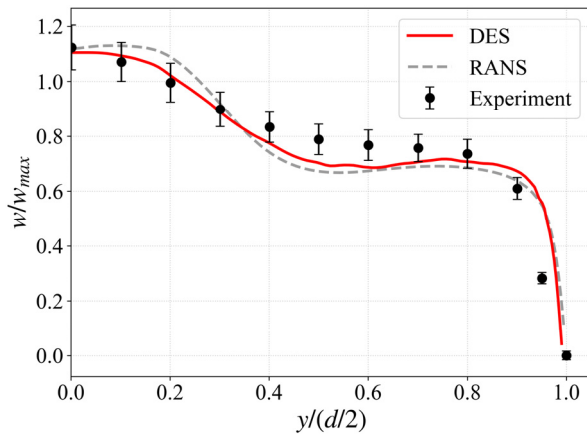
(a) $z/h = 2.482$ (b) $z/h = 10.482$

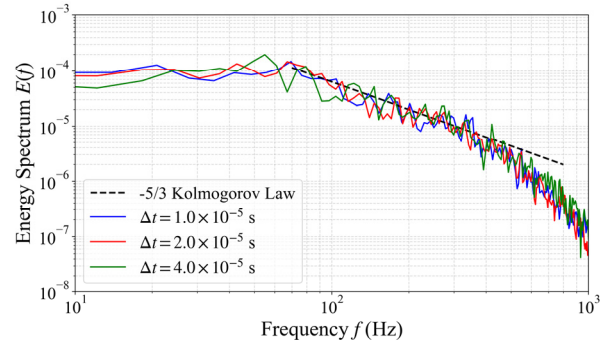
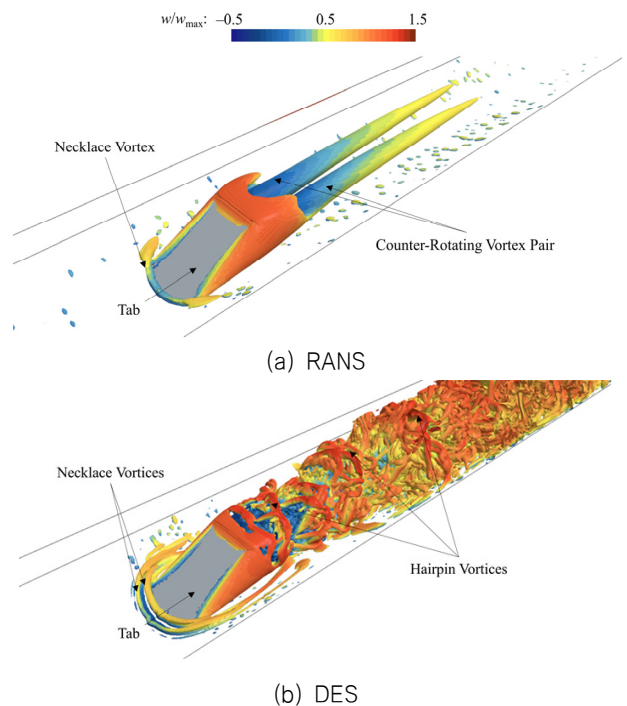
Fig. 4 Comparison of the axial velocity at the wake region

고 구배가 완만해진 프로파일이 관찰된다. 이 영역에서 RANS와 DES 결과는 광범위하게 발달한 미세 난류 혼합 및 후류 코어의 확산 거동을 전체 반경 구간에 걸쳐 실험값과 유사한 수준을 보인다.

DES와 같은 고정밀 비정상 유동 해석에서는 공간 격자 해상도 뿐만 아니라 시간 해상도(time step) 역시 난류 분해능 및 와류 구조 모사에 영향을 미친다. 따라서 적절한 시간 간격을 선정하기 위해 세 가지 조건에 대한 시간 의존성 평가를 수행하였다.

먼저 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 수를 확인한 결과, $\Delta t = 4 \times 10^{-5} \text{ s}$ 인 조건에서 최대 CFL 값은 12.44, 평균 CFL 값은 0.11378로 나타났다. 시간 간격이 좁아짐에 따라 CFL 값도 비례하여 절반씩 감소하여, 가장 작은 $\Delta t = 1 \times 10^{-5} \text{ s}$ 조건에서는 평균 CFL 값이 약 0.028 수준으로 낮게 유지되어 충분한 수치적 안정성을 확보하였다.

$z/h = 10.482$ 위치에서 계측된 속도 변동장 시계열 데이터를 이용하여 난류 운동 에너지 스펙트럼(turbulent kinetic energy spectrum)을 각 시간 간격에 대해 계산하고 이를 Fig. 5에 나타내었다. 검은색 점선은 Kolmogorov의 $-5/3$ 법칙을 나타낸다. 저 주파수 대역에서 탭에 의해 발생한 거시적인 난류 에너지가 주파수가 증가함에 따라 관성 하위 영역(inertial subrange)을 거쳐 점

Fig. 5 Turbulent kinetic energy spectrum evaluated at the far-wake region ($z/h = 10.482$)Fig. 6 Comparison of three-dimensional vortex structures in the wake of the mixing tab using the λ_2 criterion

진적으로 하위 척도로 전달되는 난류 에너지 폭포 현상이 세 시간 간격 조건에서 모두 뚜렷하게 관찰된다. 특히, 주파수가 대략 60Hz에서 500Hz에 이르는 구간에서 DES 해석 결과가 점선으로 표기된 이론적인 $-5/3$ 기울기를 따라가고 있음을 알 수 있다. 이는 해당 주파수 대역에서 유동의 점성 소산 효과보다 관성력에 의한 무손실 에너지 전달 메커니즘이 지배적으로 작용하고 있음을 의미한다. 더불어, 본 연구에 적용된 DES 격자계와 해석 수법이 해당 관성 척도 내의 비정상 3차원 와류 거동을 과도한 수치적 감쇠 없이 직접 분해해 내고 있음을 보여준다. 반면, 주파수가 약 500Hz를 초과하는 고주파수 대역에서는 해석 스펙트럼 곡선이 $-5/3$ 기울기에서 점차 이탈하여 에너지가 가파르게 급감하는 감쇠 현상이 나타난다. 이는 국소적인 격자 해상도의 물리적 한계로 인해 설정된 차단 주파수(cut-off frequency)를 통과하여 점성 소산 영역(dissipation range)으로 진입하였음을 뜻한다. 시간

의존성 및 스펙트럼 검토 결과를 종합하여, 본 연구에서는 관성 하위 영역의 에너지 전달 과정을 가장 정밀하고 안정적으로 모사한 $\Delta t = 1 \times 10^{-5} s$ 해석 결과를 바탕으로 이후의 분석을 진행하였다.

3.2 와류 구조 분포

탭 후방에서 촉발되는 3차원 유동 박리(flow separation) 및 후류 발달 과정을 분석하기 위해, 관 내부에서 발달하는 복잡한 와류 구조의 경계면을 시각적으로 식별하여 Fig. 6에 나타내었다. 이를 위해 λ_2 기준을 적용하였으며, 가시화하기 위한 등위면(iso-surface)의 임계값은 $\lambda_2 = -10,000/s^2$ 로 설정하였다.

RANS 해석 결과는 시간 평균화(time-averaging)된 유동장의 거시적인 응집 구조(coherent structures)를 명확하게 보여준다. 탭 구조물의 하단에는 유동이 탭과 충돌하여 정체(stagnation)된 직후, 기하학적 형상의 경사면을 따라 말려 올라가며 압력 구배에 의해 형성된 말굽 형태의 뚜렷한 목걸이 와류(necklace vortex)가 관찰되었다. 탭 구조물의 양 측면 모서리를 지나는 유동은 강한 횡방향 전단력에 의해 롤업(roll-up) 현상을 겪게 되며, 이는 후류로 흘러가면서 한 쌍의 거대한 역회전 와류쌍(CVP)으로 발달한다. 아울러 탭의 후방 영역에서는 강한 속도 결손으로 인해 국부적인 유동의 정체 및 역류 현상이 발생하는 재순환 영역(recirculation zone)이 형성된다. 후류의 하류로 진행됨에 따라 CVP의 상단부를 가로지르며 머리핀 형태를 띠는 헤어핀 와류(hairpin vortices) 구조가 연속적으로 배열되는 것으로 알려졌다(나(Dong and Meng, 2004), RANS 해석에는 초기 탭 상단에서 생성되는 헤어핀 와류의 일부만 관찰된다.

반면, DES 해석 결과는 RANS 결과와 대비되는 미세 척도(micro-scale)의 난류 거동을 보여준다. 구조물에서 떨어져 나온 전단층이 강력한 비정상 불안정성에 의해 형태를 잃고 붕괴(breakdown)되는 과정이 공간상에서 포착되었다. 거시적이고 규칙적인 형태를 띠던 헤어핀 와류와 역회전 와류쌍 구조는 하류로 이동함에 따라 점차 비대칭적인 작은 척도의 와류 덩어리(turbulent eddies)들로 쪼개지며, 이는 주 유동 에너지가 거시 척도에서 미세 척도로 전달되어 점성 소산으로 이어지는 난류 에너지 폭포 현상을 시각적으로 보여준다.

주 유동 방향인 z 축을 따른 와류 구조의 공간적 발달 양상을 단면별로 비교하기 위해, 관 횡단면 $z/h = 2.0, 4.0, 6.0, 8.0$ 위치에서 단면 유선을 추출하여 Fig. 7에 비교하였다. 탭 구조물 직후방의 근접 후류 영역인 $z/h = 2.0$ 에서는 RANS와 DES 모델 모두 강한 하강류(downwash) 현상 및 구조물 박리에 기인한 거대한 주 와류쌍(CVP)의 초기 발달을 성공적으로 모사하였다. 이 단면에서는 거시적 유동 구조의 에너지가 지배적이므로 두 해석 기법 간의 위상학적 차이가 크지 않다.

하류로 접어드는 $z/h = 4.0$ 단면의 경우, RANS 해석은 여전히 CVP의 대칭적인 원형 단면 형태를 중심부에 매끄럽게 유지하고 있는 반면, DES 해석 결과에서는 CVP 구조 내부 및 유동의

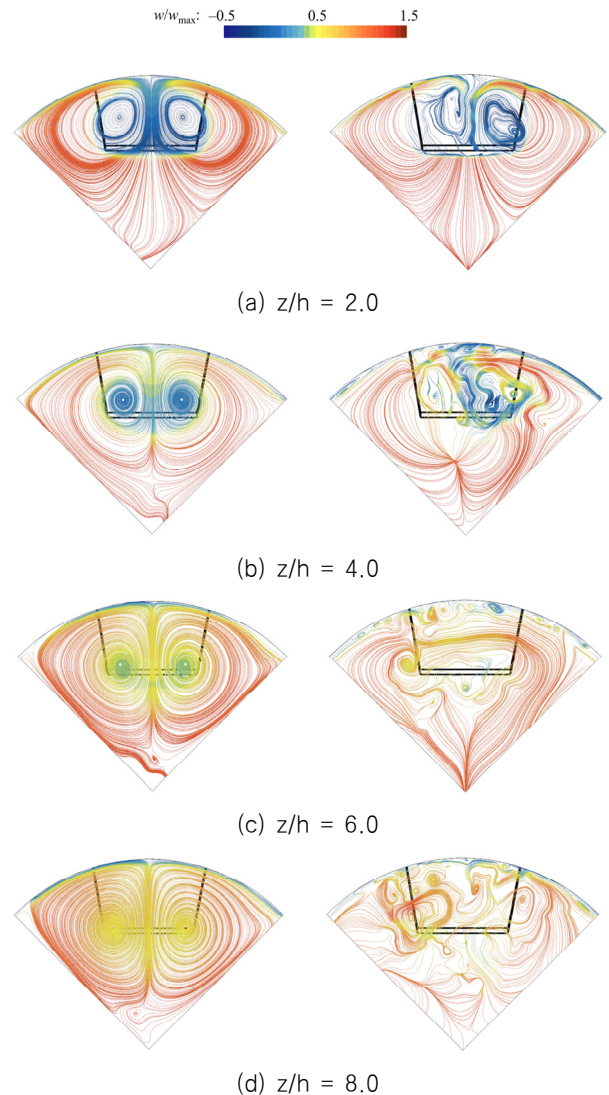


Fig. 7 Comparison of the sectional streamlines and axial velocity contours at various streamwise locations between the RANS (left) and DES (right) results

가장자리 전단층에서 미세한 섭동이 집중적으로 발생한다.

유동이 본격적으로 소산 및 천이되는 먼 후류(far-wake) 영역인 $z/h = 6.0$ 과 $z/h = 8.0$ 단면으로 이동함에 따라 두 해석 기법 간의 물리적 차이는 극명하게 도출된다. $z/h = 6.0$ 에서 RANS 해석은 전체적인 회전 궤적은 뚜렷한 응집 구조를 보존하고 있다. 그러나 DES 해석에서는 유동의 비정상(unsteady) 거동으로 인해 1차 주 와류쌍이 완전히 와해되기 시작하며, 중심 와류 코어가 여러 갈래로 분열되어 다수의 파생 와류(satellite vortices)가 형성되고 주변 유체와 섞여 소멸하는 복잡한 유동 상호작용이 관찰되었다.

이러한 DES 해석을 통해 공간상에서 포착된 일련의 비정상 유동 현상, 즉 탭 전면부의 목걸이 와류 발달, 측면 전단층 롤업에 의한 거대 역회전 와류쌍의 형성, 주기적인 헤어핀 와류의 방출 및 먼 하류에서의 무질서한 난류 파편화 과정은 기존 사다리꼴

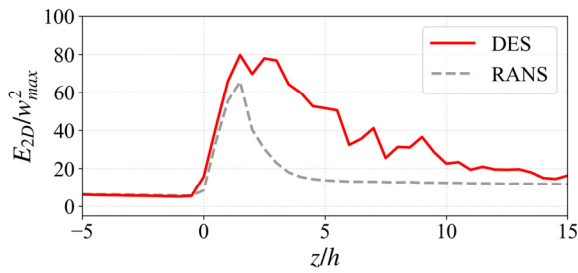


Fig. 8 Comparison of the normalized surface-integrated enstrophy along the streamwise direction between the RANS and DES results

와류 발생기 주위 유동을 다룬 주요 실험 및 선행 연구(Dong and Meng, 2004; Habchi et al., 2010)에서 보고된 물리적 유동 특성과 부합한다.

앞서 관찰된 비정상 와류 붕괴 및 미세 섭동 현상의 시각적 차이를 정량적으로 검증하기 위해, 각 유동 방향 단면에서 면적분 엔스트로피(surface-integrated enstrophy)를 다음과 같이 계산하였다.

$$E_{2D}(z) = \frac{1}{2} \int_{A(z)} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) dA \quad (11)$$

Fig. 8은 무차원화된 단면 적분 엔스트로피의 하류 방향분포를 두 해석 기법에 대해 비교한 결과이다. 먼저 탭 구조물 상류인 $z/h < 0$ 구간에서는 RANS와 DES 두 해석 기법 모두 유사하게 낮은 수준의 엔스트로피 분포를 나타낸다. 이 영역은 탭에 의한 유동 교란이 본격적으로 미치지 전이므로, 유동장 내 와도는 주로 관 벽면 경계층 내부의 속도 구배에 의해 생성된다. 즉, 두 기법 모두 유동 박리 이전의 벽면 전단 유동을 유사한 수준으로 예측하고 있음을 의미한다.

탭 구조물 중간 부근인 $z/h = 1$ 에서 RANS와 DES 해석 모두 강한 전단층 박리와 거대 역회전 와류쌍의 형성으로 인해 엔스트로피가 급격히 상승하는 경향을 보인다. 그러나 이후의 후류 거동에서는 두 기법 간의 차이가 나타난다. RANS 모델의 경우 $z/h > 1$ 이후부터 와류 에너지가 급격히 감소하며, $z/h = 5$ 이후의 먼 후류 영역에서는 유동 구조가 평탄하고 낮은 엔스트로피 수준을 유지한다. 반면, DES 모델은 $z/h = 3$ 위치에서 가장 높은 엔스트로피 정점을 형성하며 거대 와류 구조의 에너지를 먼 하류까지 보존한다. DES 결과는 하류로 이동함에 따라 국소적인 엔스트로피 진동이 관찰되는데, 이는 주기적인 비정상 와류 현상과 더불어, 1차 거대 와류가 미세한 파생 와류들로 쪼개지며 에너지를 전달하고 있음을 나타낸다.

3.3 QR 다이어그램 및 국소 유동 특성 분석

QR 다이어그램 방법을 이용하여 미세 와류의 붕괴 및 발달 거동을 정량적으로 확인하였다. Fig. 9에 나타낸 QR 다이어그램은

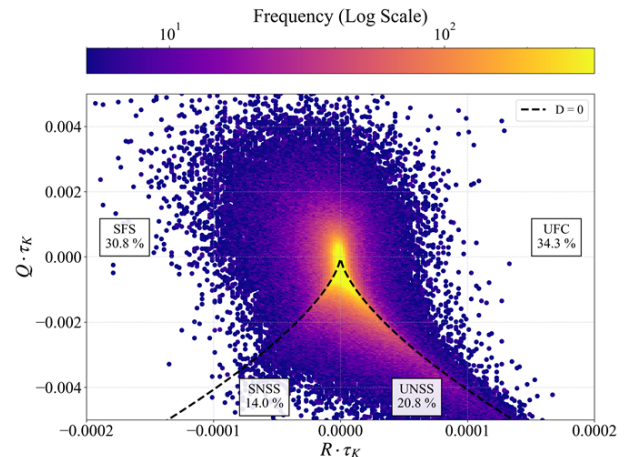


Fig. 9 Topological classification of local flow characteristics using the joint probability density function (JPDF) of the velocity gradient tensor invariants on the Q-R diagram

전체 유체 영역에서 속도 구배 텐서 제2 불변량 Q 와 제3 불변량 R 의 공간적 분포 및 통계적 발생 빈도를 도식화한 결과이다. 다이어그램의 각 축은 난류의 가장 작은 척도인 Kolmogorov 시간 척도 τ_K 를 이용하여 무차원화하였다. 다이어그램의 색은 특정 위상 상태가 발생한 빈도를 로그 스케일로 나타내며, 노란색 계열의 밝은 색상에 가까울수록 해당 유동 특성을 내포하는 격자점의 밀도가 높음을 의미한다.

다이어그램의 중심부인 원점 근처에 가장 높은 데이터 빈도가 집중되어 있음이 알 수 있다. 이는 전체 계산 영역 내에서 상대적으로 속도 구배가 크지 않고 유동이 안정적인 배경 유동(background flow) 영역이 상당한 부피를 차지하고 있기 때문이다. 그러나 원점 외부로 뻗어나가는 점들의 산포도를 분석하면, 대부분의 난류 유동에서 전형적으로 관찰되는 특징인 눈물방울(teardrop) 형태(Musci et al., 2025)가 뚜렷하게 도출되었음을 알 수 있다.

해당 다이어그램은 판별식 및 제3 불변량의 조합에 따라 크게 4개의 위상학적 사분면으로 분할되며, 각 영역이 전체 유동장에서 차지하는 체적 점유율이 정량적으로 표시되어 있다. 첫째로, $D > 0$ 및 $R < 0$ 조건을 만족하는 안정된 초점 및 팽창(stable focus/stretching, SFS) 영역은 전체 해석 유동장의 30.8%를 차지한다. 물리적으로 이 영역은 3차원 와류 코어가 축 방향으로 강하게 잡아당겨지며 길어지는 상태를 나타낸다. 각운동량 보존 법칙에 따라 축 방향으로 유체 요소가 늘어나면 단면의 회전 반경이 수축하고 회전 속도는 급격히 증가하게 된다.

둘째로, $D > 0$ 및 $R > 0$ 조건에 해당하는 영역은 불안정한 초점 및 수축(unstable focus/compressing, UFC) 영역이다. 이 영역은 전체 유동의 34.3%를 차지하고 있으며, 가장 높은 발생 빈도를 나타냈다. 물리적으로 UFC 구역은 와류가 축 방향으로 강하게 수축됨과 동시에 단면 반경이 팽창하여 와류 구조 자체가 와해 및 붕괴되는 불안정한 상태를 의미한다. 앞선 SFS 영

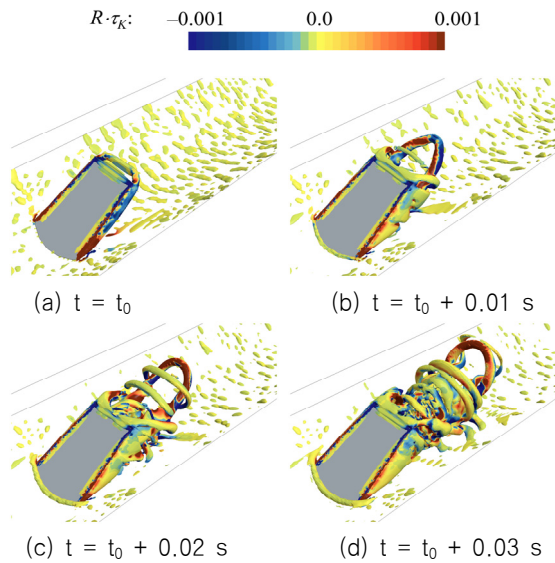


Fig. 10 Time evolution of the three-dimensional vortical structures colored by the normalized third invariant

역에서 에너지를 전달받아 점성 마찰(viscous friction)에 의해 운동 에너지를 열에너지로 변환하며 소멸하게 된다.

셋째로, 판별식 기준선 아래에 위치한 $D < 0$ 및 $R > 0$ 구역인 불안정한 변형(unstable node/saddle/saddle, UNSS) 영역은 전체 유동의 20.8%를 점유하고 있다. 다이어그램 상에서 이 영역의 데이터 점들은 양의 R 축 방향으로 넓고 길게 꼬리를 늘어뜨리며 뻗어나가는 특징을 보인다. 위상학적으로 UNSS 구역은 회전 운동보다는 강한 국소 전단력 및 변형률이 지배하는 안장점(saddle point) 영역에 해당한다. 난류 에너지 폭포 관점에서 이 영역의 유체 요소는 하나의 축 방향으로서는 강하게 압축되고 나머지 두 축 방향으로서는 팽창하는 2축 변형(biaxial strain) 상태에 놓이게 된다. 이러한 상태는 유체 요소를 얇고 넓은 판(sheet) 구조로 압착시키며 높은 속도 구배와 전단 마찰 현상을 유발한다.

마지막으로, $D < 0$ 및 $R < 0$ 조건에 해당하는 안정된 변형(stable node/saddle/saddle, SNSS) 영역은 가장 낮은 점유율인 14.0%를 기록하였다. 이 구역은 유체가 특정한 점이나 선을 향해 안정적으로 수렴 및 응집되는 거동을 뜻한다. 일반적으로 이와 같은 유동 형태는 유동이 고체 벽면과 충돌하여 형성되는 정체점(stagnation point) 인근이나 안정적인 재순환 영역(recirculation zone) 내부에서 제한적으로 관찰된다.

본 해석 대상인 탭 구조물 후방의 유동장은 강렬한 박리(separation) 및 비정상 와류 흘림(vortex shedding) 현상이 지배적으로 발생하고 있으므로, 안정적인 유동 수렴을 나타내는 SNSS 상태가 전체 유동 중 가장 적은 비율로 존재한다는 것을 설명할 수 있다.

와류 발생기 주변 3차원 와류 구조의 비정상(unsteady) 발달 메커니즘을 시간에 따라 분석하여 Fig. 10에 나타내었다. 임의의 초기 시간 t_0 로부터 0.01s 간격으로 도출된 와류 코어의 등위면 발달 과정을 나타내며, 각 표면의 색은 $R\tau_K$ 크기이다. 여기서

파란색 계열은 와류 신장이 지배적인 영역을, 붉은색 계열은 와류 압축을 나타내는 영역이다.

초기 상태에서는 탭 구조물 전면부와 측면을 따라 발달한 목결이 와류와 후류 박리의 초기 형태가 관찰된다. 0.01초 이후에는 탭의 trailing edge 에서 강력한 롤업(roll-up) 현상과 함께 거대한 헤어핀 와류(hairpin vortex)가 떨어져 나오기 시작한다. 헤어핀 와류가 입구 방향으로 구부러지면서 와류 후면은 신장하고 앞면은 압축되는 것을 알 수 있다.

0.02초 이후에는 주기적인 비정상 와류 흘림에 의해 다수의 고리형 헤어핀 와류들이 연속적으로 후류로 방출된다. 방출된 선행 와류와 뒤따르는 후행 와류 간의 운동량 상호작용이 발생하며, 유동 구조가 심하게 일그러진다. 강한 신장을 나타내는 파란색 영역과 압축을 의미하는 붉은색 영역이 좁은 공간 내에서 복잡하게 얽히는 특성을 보인다.

0.03초 이후에는 초기에 거시적이고 규칙적인 형태를 띠던 단일 와류 구조가 파편화(fragmentation)되는 붕괴 과정을 겪는다. 짙은 파란색의 와류 신장 구역과 짙은 붉은색의 와류 압축 구역이 무질서하고 조밀하게 섞인 난류 eddies들로 분열된다.

4. 결 론

본 연구에서는 함정 적외선 신호 저감 장치의 혼합 성능을 극대화하기 위해 적용되는 혼합 탭 주변의 복잡한 3차원 난류 유동을 DES를 활용하여 분석하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

난류 운동 에너지의 분해 비율이 80%를 초과하여 LES 격자 적합성 기준을 만족하였다. 또한, 먼 후류 영역에서 도출된 난류 운동 에너지 스펙트럼이 관성 하위 영역에서 Kolmogorov 의 $-5/3$ 법칙을 명확히 추종함을 검증하였다.

RANS 모델에서는 총류화된 형태의 매끄러운 응집 구조(목결이 와류 및 CVP)만이 도출되는 한계가 있었다. 반면, DES 모델은 주기적으로 방출되는 헤어핀 와류가 하류로 이동함에 따라 전단 불안정성에 의해 점차 붕괴되며, 작은 척도의 파생 와류들로 파편화되는 과정을 뚜렷하게 묘사하였다. 나아가 하류 방향의 단면 면적분 엔스트로피 분포를 정량적으로 비교하여 RANS 모델의 급격한 에너지 감쇠와 달리, DES 모델은 먼 후류 영역에서도 뚜렷한 진동 거동과 다중 피크를 보여주며 거시 척도에서 미세 척도로 에너지가 전달되는 과정을 수치적으로 입증하였다.

Q-R 다이어그램을 분석을 통해 안정된 초점 및 팽창 구역이 30.8%, 불안정한 초점 및 수축 구역이 34.3%로 가장 높은 체적 점유율을 나타냈다. 이는 와류 발생기에 의해 촉발된 난류가 끊임없이 신장되고 점성 소산으로 수축되는 상태를 유지하며 유체 혼합을 주도하고 있음을 의미한다.

본 연구의 결과는 향후 IRSS 설계 최적화뿐만 아니라, 선박의 에너지 절감 장치 개발을 위한 공학적 기반 자료로 활용될 것으로 기대된다. 다만, QR 분석 방법만으로는 난류 특성을 완전히 정량화하는 데 한계가 존재하므로 다른 와류 분석 기법의 교차 검증이 필요하다.

후 기

이 논문은 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥 연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(CT230031).

References

- Birk, A.M. and Davis, W.R., 1989. Suppressing the infrared signatures of marine gas turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 111, pp.123–129.
- Choi, J.E., Kim, J.S., Lee, S.B. and Lee, H.G., 2009. Computational Prediction of Speed Performance for a Ship with Vortex Generators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(2), pp.136–147.
- Choi, J.K., Kim, H.T., Kim, K.H. and Hwang, Y.S., 2025. An investigation on the heat flow characteristics by a mixing tube shape of IRSS. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 62(5), pp.290–302.
- Chong, M.S., Perry, A.E. and Cantwell, B.J., 1990. A general classification of three-dimensional flow fields. *Physics of Fluids*, 2, pp.765–777.
- Dong, D. and Meng, H., 2004. Flow past a trapezoidal tab. *Journal of Fluid Mechanics*, 510, pp.219–242.
- Habchi, C., Lemenand, T., Valle, D.D. and Peerhossaini, H., 2010. Turbulence behavior of artificially generated vorticity. *Journal of Turbulence*, 27(36), pp.1–28.
- Heo, N. and Kim, J.H., 2025. Prediction of cavitating flow characteristics around flexible wings through fluid–structure interaction analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 62(2), pp.88–95.
- Jeong, J. and Hussain, F., 1995. On the identification of a vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 285, pp.69–94.
- Jung, J.H., et al., 2012. Large eddy simulation of flow around twisted offshore structure with drag reduction and vortex suppression. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(5), pp.440–446.
- Jung, J.H., Jeong, K.L., Gill, J.H. and Jung, D., 2019. Large eddy simulation of free motion of marine riser using OpenFOAM. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(5), pp.387–393.
- Kwon, Y., Kim, D.H. and Seo, J., 2025. Hydrodynamics modeling of control fins of TL–AUV by computational fluid dynamics analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 62(5), pp.343–353.
- Lee, S.B., Park, D.W. and Paik, K.J., 2017. Grid tests for large eddy simulation of transitional flows around turbulence stimulators. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 23(1), pp.112–121.
- Musci, B., Dubrulle, B., LeBris, J., Geneste, D., Braganca, P., Foucaut, J.M., Cuvier, C. and Cheminet, A., 2025. Experimental measurement of the vorticity strain alignment around extreme energy transfer events. *Journal of Fluid Mechanics*, 1016, A53.
- Park, D.W., Choi, H.J., Yoon, H.S. and Chun, H.H., 2009. A numerical study for improvement of the speed–performance of a ship with flow control flat plate. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp.268–278.
- Park, H.J., Kim, K.S., Suh, S.B. and Park, I.R., 2016. CFD analysis of marine propeller–hub vortex control device interaction. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(4), pp.266–274.
- Paul, I., Fraga, B., Dodd, M.S. and Lai, C.C.K., 2022. The role of breakup and coalescence in fine-scale bubble-induced turbulence. II. Kinematics. *Physics of Fluids*, 34, 083322.
- Pope, S., 2000. *Turbulent flows*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Siemens, 2023. STAR-CCM+ 18.04 User Guide.
- Singh, L., Singh, S.N. and Sinha, S.S., 2020. Effect of Reynolds number and slot guidance on passive infrared suppression device. *Aerospace Science and Technology*, 99, 105732.
- Suh, S.B. and Park, I.R., 2021. Numerical simulation of the flow around the SUBOFF submarine model using a DES method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 58(2), pp.73–83.
- Yoon, S.T., Cho, Y.J. and Ko, D.E., 2017. A study on the heat flow analysis of infra-red signature suppression system for naval ship. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 18(11), pp.740–746.
- Zaman, K.B.M.Q., Reeder, M.F. and Samimy, M., 1994. Control of an axisymmetric using vortex generators. *Physics of Fluids*, 6, pp.778–793.

Authorship Contribution Statement

Kyung-Kyu Yang: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.



양경규