

## 공항 용량 증대를 위한 수직 와후류 시스템 연구 Vertical Four-Vortex System for Increasing Airport Capacity

본 연구는 선행 항공기와 후행 공기에 의해 생성된 서로 다른 wake vortex pair간의 상호 작용으로 인해 발생하는 이동 및 소산 특성 프로세스를 수치해석으로 분석하였다. wake vortex의 소산에 선행 항공기에 의해 형성된 vortex pair가 미치는 영향에 대해 조사한 첫 번째 연구이다. 본 연구의 해석 결과는 선행 항공기에 의해 형성된 wake vortex가 상호 작용으로 후행 항공기의 wake vortex를 효과적으로 소산 시킬 수 있음을 밝혀냈다. 상호 작용으로 발생하는 소산 특성은 vortex의 빠른 소산을 유도하며 단일 wake vortex pair로의 합병, 빠른 소산, vortex ring의 형성 이후 하부 vortex pair를 변형하거나 변형없이 각각 소산하는 프로세스를 확인하였다. 또한, vortex pair 간의 상호 작용을 고려할 때 발생하는 추가적인 소산 효과를 이륙 분리 시간에 적용하였다. 본 연구 결과는 항공기 간 이륙 분리 시간을 줄이고 공항 용량을 크게 늘리는 데 도움이 될 수 있기 때문에 연구 결과가 기여하는 바가 크다고 생각합니다. 또한 본 논문은 항공기 이륙을 위한 최적의 조건에 중점을 두어 항공 교통을 보다 효과적으로 통제할 수 있기 때문에 항공기 분리 시간 단축을 위해 노력하는 학술 연구원 및 항공기 엔지니어에게 사용될 수 있다.

항공기의 wake vortex는 자기 유도에 의해 하강하는 특징을 가지기 때문에 그 위치를 식별할 수 있다. 이륙하는 조종사는 선행 항공기의 이륙 지점 앞에서 이륙하고 선행 항공기의 등반 경로 위로 비행하면 wake vortex를 피할 수 있다. 이러한 회피 비행은 동시에 wake vortex 두 쌍이 대기 중에 존재하게 한다. 선행 및 후속 항공기에 의해 생성된 wake vortex pair는 가까이 위치하는 경우 서로 상호 작용할 수 있다. 이러한 상호 작용이 vortex의 소산 과정을 가속한다면 다음 항공기의 이륙 분리 시간을 단축할 수 있어 공항 처리 용량이 증가한다. 따라서, 선행 항공기에 의해 생성된 vortex가 있는 경우 새로 생성된 wake vortex의 소산 특성을 조사할 필요가 있다.

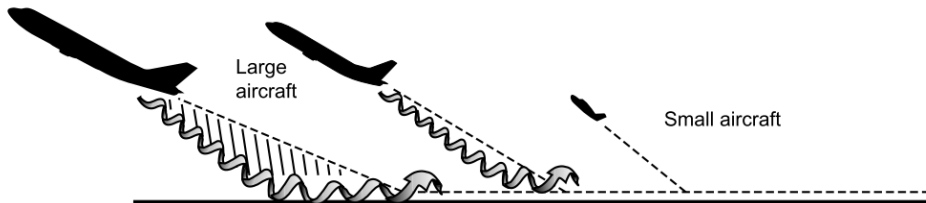


Fig. 1 같은 활주로에서 큰 항공기 뒤에서 이륙하는 경우 wake vortex 회피

Vortex의 이동 및 소산 프로세스는 선행 항공기의 wake vortex의 하강과 다음 항공기의 높은 고도를 고려한 초기 조건을 사용하여 분석되었다. 발생 가능한 wake vortex 상호 작용을 고려하기 위해, 매개 변수는 상용 항공기 크기 및 경로를 기반으로 정의되었다. Vortex 불안정성 및 Crow instability로 알려진 비선형 소산 프로세스를 설명하기 위해 대기 난류 조건을 LES에 적용하였다. 계산 결과를 분석하여 wake vortex의 빠른 소산과 유도하는 특성 과정과 그 조건을 확인하였다. Wake vortex pair간의 상호 작용이 vortex의 빠른 소산을 유도한다면, 이륙 분리 시간을 조정하는데 적용할 수 있어 공항 용량을 증가시킬 수 있다.

이륙 분리 시간 조절 전략을 도출하기 위해 18개의 해석결과를 다음과 같은 순서로 분석하였다. 1) 해석 결과를 정리해서 V4VS의 거동을 특징 별로 분류하였다. 2) 동일한 거동 특징이 발생하도록 하는 해석 조건을 추출하였다. 3) 해당 조건에서 그 특징이 나타나는 원인을 선행연구 및 물리적인 관점에서 분석하였다. Large and same circulation ratio 조건에서 정리된 single pair로 합쳐짐, 급격한 소산, ring을 형성과 같이 3개의 거동 특징에 small circulation ratio 조건에서 추가로 발견한 vortex의 소산이 느림 특징을 추가하여 총 4개의 거동 특징으로 정리할 수 있다. 이를 non-linear interaction이 발생하는 쌍으로 다시 정리하면 2개로 요약할 수 있다. co-rotating 하는 vortices 간의 non-linear interaction이 발생하는 거동

특징은  $Hv = 0.5, 1.0$  조건에서 발생하며 순환 비의 영향이 거의 없는 것으로 보인다. counter-rotating하는 upper vortex pair의 interaction이 먼저 발생하는 거동 특징은  $Hv \geq 1.5$  조건에서 발생하며 순환 비의 영향으로 이 후 소산 특징이 나뉜다.

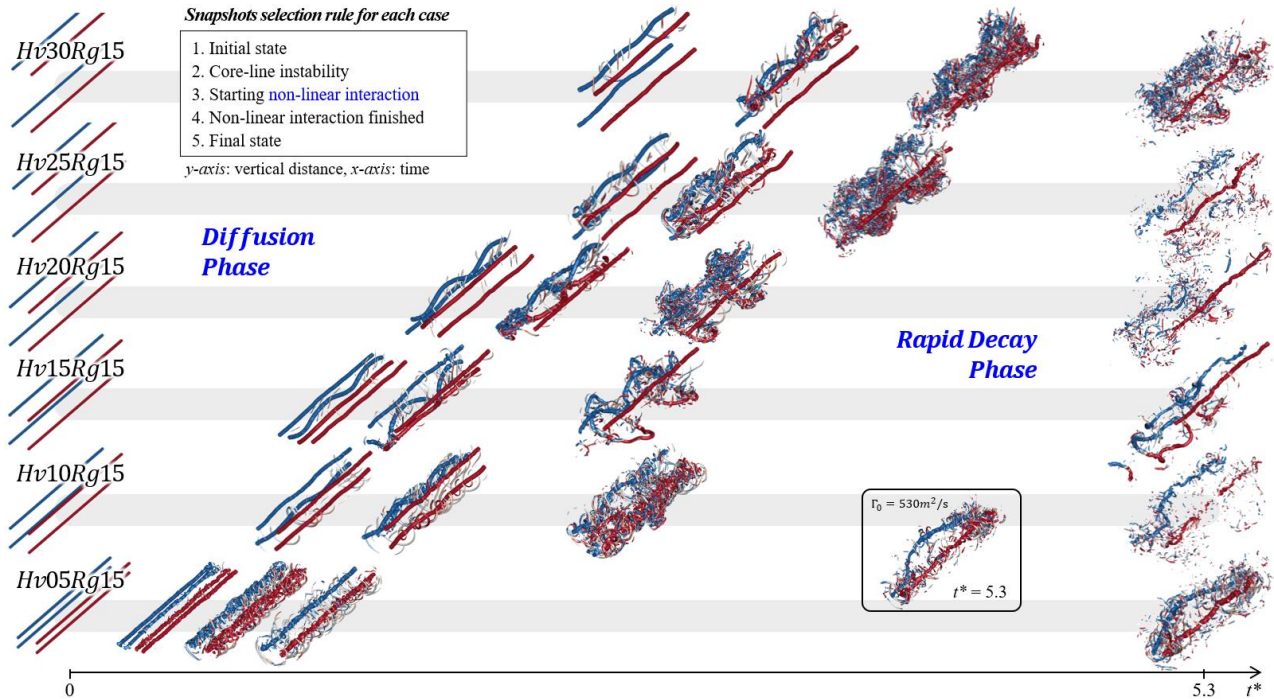


Fig. 2. V4VS ( $R_\Gamma = 1.47$ ) 소산 가시화 및 단일 wake vortex ( $\Gamma_0 = 530m^2/s$ )와 비교

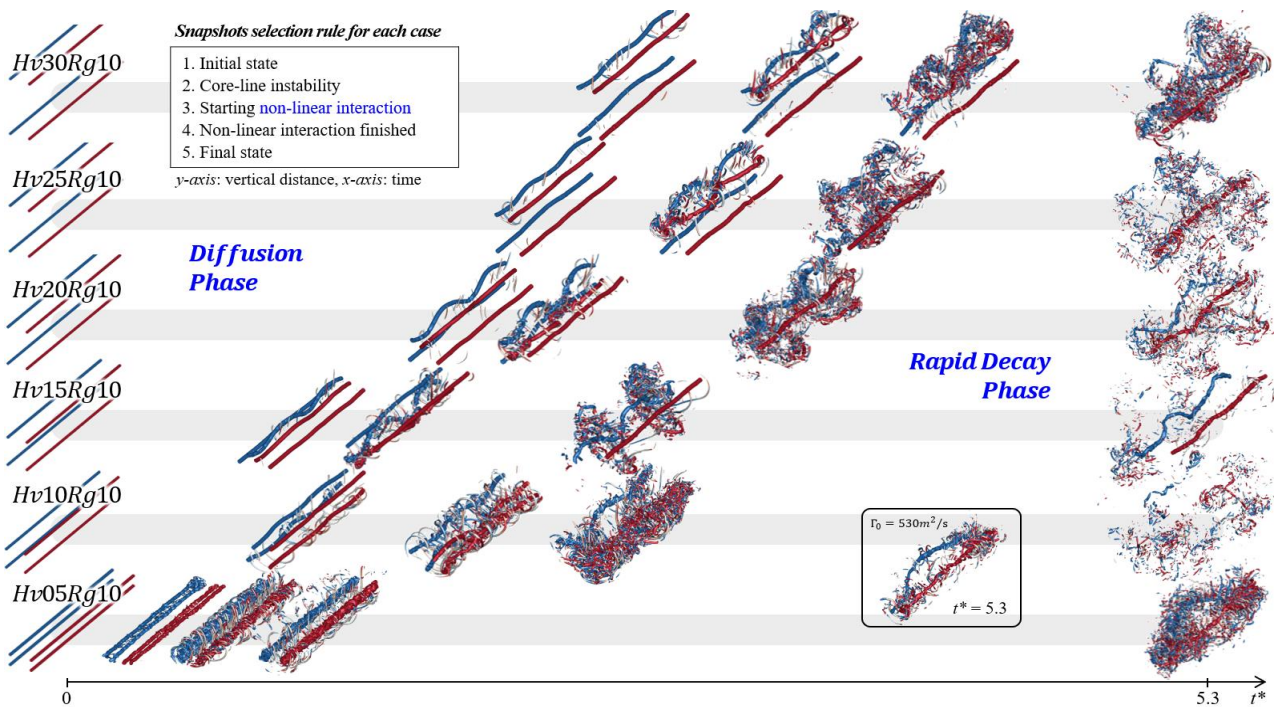


Fig. 3. V4VS ( $R_\Gamma = 1.00$ ) 소산 가시화 및 단일 wake vortex ( $\Gamma_0 = 530m^2/s$ )와 비교

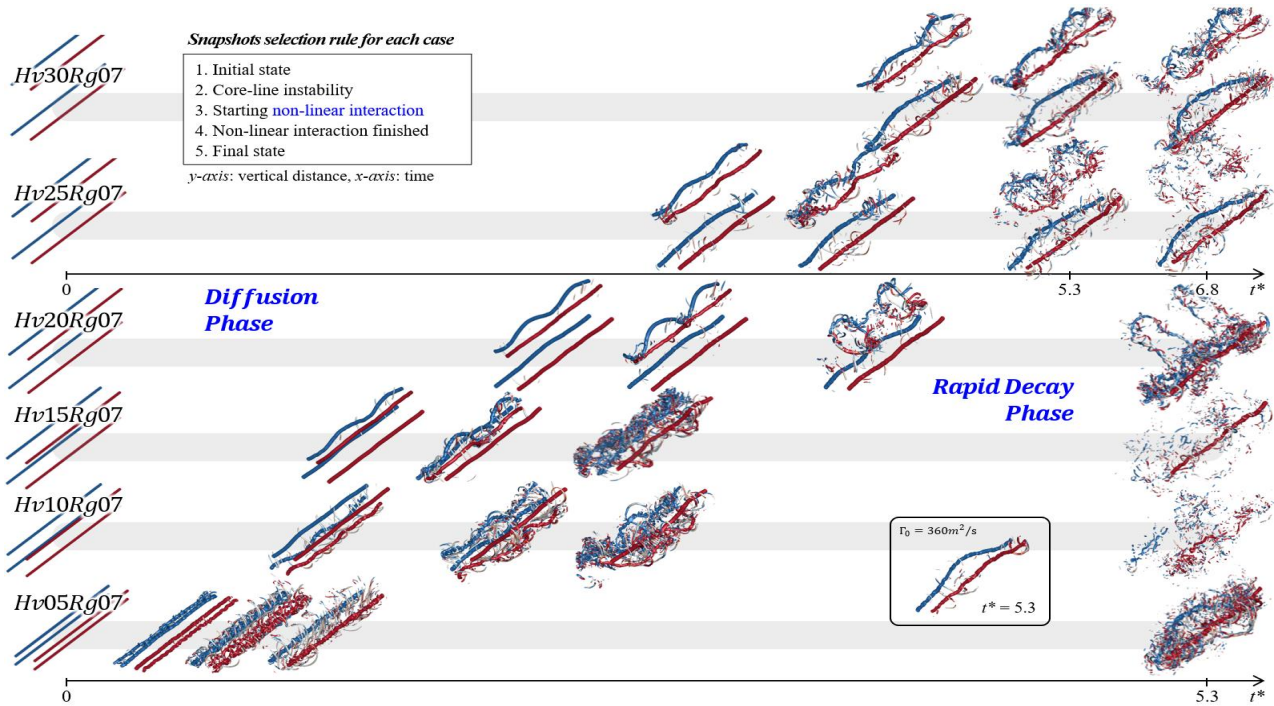


Fig. 4. V4VS ( $R_r = 0.67$ ) 소산 가시화 및 단일 wake vortex ( $\Gamma_0 = 360\text{m}^2/\text{s}$ )와 비교

두 쌍의 wake vortex pair가 수직으로 배열된 V4VS의 거동을 주요한 non-linear 거동 특징을 분류하여 Fig. 12에 정리하였다. 해석 파라미터인 vertical distance와 circulation ratio에 따라 총 4개의 category로 분류되었으며 각 category의 거동 특징과 기준을 함께 정리하였다. 4개의 카테고리는 크게 vertical distance 1.25를 기준으로 2가지 종류로 나뉘며 non-linear interaction이 발생하는 vortices가 달라진다. Co-rotating vortices의 non-linear interaction이 발생하는 characteristics는 merging, wrapping 으로 정리하였고 vertical distance를 0.75를 기준으로 거동 특징이 나뉜다. Upper vortex pair의 linking이 발생하는 characteristics는 ring-deformation ring-deformation과 ring-parallel로 정리하였고 두개의 파라미터의 영향을 모두 받으며 eq. (10)을 기준으로 거동 특징이 바뀐다.

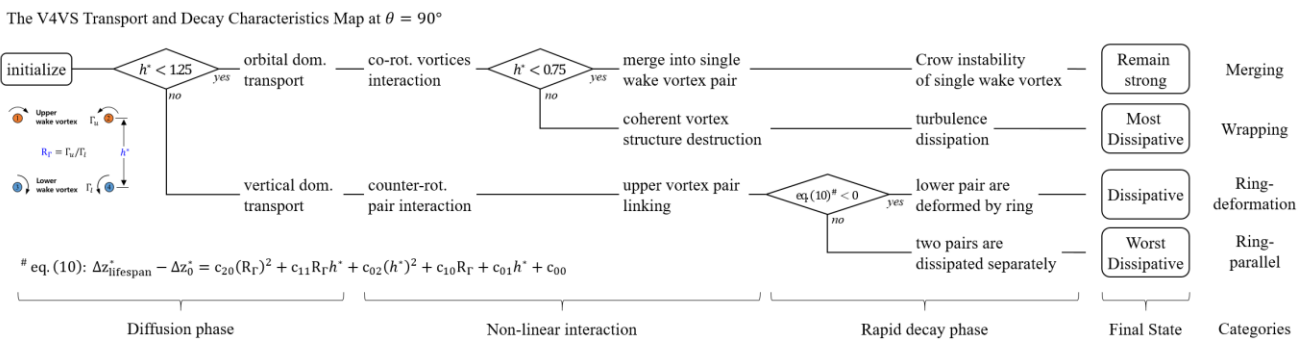


Fig. 5. The vertical four-vortex system transport and decay characteristics map at  $\theta = 90^\circ$

# eq. (10):  $\Delta z_{\text{lifespans}}^2 - \Delta z_0^2 = c_{20}(R_r)^2 + c_{11}R_r h^* + c_{02}(h^*)^2 + c_{10}R_r + c_{01}h^* + c_{00}$



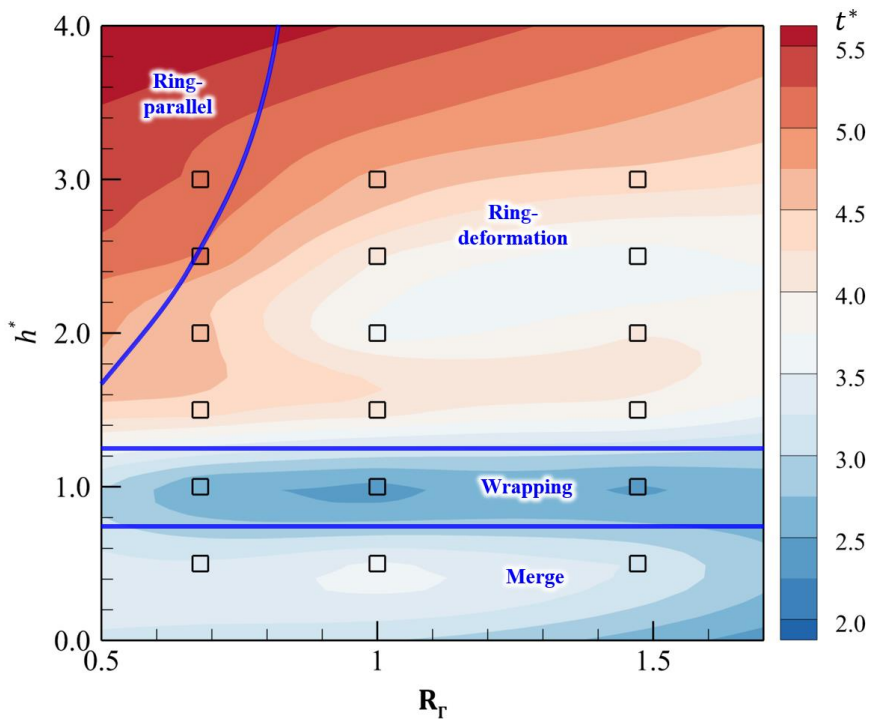


Fig. 6. Classification of V4VS transport and decay characteristics dimensionless time where circulation strength is less than 50% (contour)

각 카테고리가 vortex의 소산에 미치는 영향을 항공기 안전과 밀접한 관련이 있는 total circulation을 적도로 분석하였다. Circulation은 lower vortex pair의 소산이 늦어진다면 the latter aircraft에 영향을 미칠 수 있기 때문에 upper and lower vortex pair에서 각각 계산하여 max값을 사용하였다. 기준이 되는 값은 각 vortex pair의 circulation이 초기 값의 50% 이하로 낮아지는데 걸리는 시간을 Fig. 6에 정리하였다. V4VS의 거동 특징을 기준으로 분류한 categories를 나누는 기준을 overplot하였을 때, 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 비슷한 경향이 나타나는 것을 보면 vortex의 소산효과가 categories별로 다르게 나타난다는 것을 증명한다. V4VS의 소산 효과가 가장 우수한 category는 wrapping이며 non-linear interaction이후 빠르게 소산한다. 다음으로 소산 효과가 우수한 category는 ring-deformation이며 upper vortex ring이 lower vortex pair와 interaction 하며 급격히 소산하기 때문이다. 특이하게 vertical distance가 1.5이고 circulation ratio가 1이상인 Hv15Rg10, Hv15Rg15 케이스는 소산 효과가 상대적으로 크지 않다. 이는 vortex pair의 vertical location의 역전이 발생하고 linking이 발생하는 시점에 두 쌍 사이의 거리가 멀기 때문이다. 따라서 적당한 vertical distance에서 interaction 효과를 극대화되어 vortex 소산 효과가 우수하며 vertical distance가 2 또는 2.5 지점인 것을 알 수 있다. 소산 효과가 가장 좋지 않은 카테고리는 ring-deformation이며 upper vortex ring이 lower vortex와 interaction하지 않으며 오히려 mutual induction에 의해 vortex lifespan을 증가시키는 영향을 미친다. 따라서 가장 vortex pair가 늦게 소산하게 되는 결과를 볼 수 있다.