

## 전산 유체 역학을 이용한 선박 방향타 주변의 항력 및 양력 계수에 대한 수치 시뮬레이션

구본국

창원대학교 조선해양공학과

## Numerical Simulation on Drag and Lift Coefficient around Ship Rudder using Computational Fluid Dynamics

Bon-Guk Koo

Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon National University

**요약** 방향타는 조선 분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 방향타의 유체역학적 특성을 조사하기 위해 수치 시뮬레이션이 수행되었다. 유체역학적 힘과 같은 일부 값은 예인 탱크에서 쉽게 측정할 수 있지만, 실험을 통해 압력 분포, 속도 분포, 와류 발생과 같은 유동장에 대한 자세한 정보를 얻기는 어렵다. 본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 이용하여 방향타에 작용하는 유체역학 계수와 레이놀즈수가 미치는 영향을 연구하였다. 상용 전산유체역학 프로그램 Ansys Fluent를 이용하여 방향타 주위의 유동 특성을 연구하였고, 이때 k-epsilon 난류 모델이 사용되었다. 먼저 CFD 상용코드를 이용하여 KCS 방향타의 받음각에 따른 항력 계수와 양력계수를 구하였다. 둘째, 동일한 조건에서 2차원 양력계수와 항력계수를 3차원 계수와 비교되었다. 셋째, 레이놀즈수가 유체역학적 힘에 미치는 영향이 연구되었다.

• **주제어** : 방향타, 항력계수, 양력계수, 전산유체역학, 수치해석, 받음각

**Abstract** Numerical simulations have been performed to investigate the hydrodynamic characteristics of the rudder since they play an important role in naval architecture fields. Although some values such as hydrodynamics forces can be measured easily in the towing tanks, it is difficult to obtain the detailed information of the flow fields such as pressure distribution, velocity distribution, vortex generation from experiments. In the present study, the effects of hydrodynamic coefficients and Reynolds number acting on the rudder were studied by using Computational Fluid Dynamics(CFD). Ansys fluent, one of commercial CFD solvers, solves the Navier-Stokes equations and the k-epsilon turbulence model is selected for the viscous model to solve RANS equations. At first, drag coefficients and lift coefficient for different angle of attack are obtained by using a CFD commercial code for KCS rudder. Secondly, the 2-D lift coefficients and drag coefficients are compared with 3-D coefficients at the same conditions. Thirdly, the effects of Reynolds number on the hydrodynamic forces are investigated.

• **Key Words** : Rudder, Drag coefficient, Lift coefficient, CFD, Numerical analysis, Angle of attack

Received 02 February 2023, Revised 19 June 2023, Accepted 28 June 2023

\* **Corresponding Author** Bon-guk Koo, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea. E-mail: bonguk9@changwon.ac.kr

## I. 서론

선박의 방향타는 선박 조종 및 선박 항해에 중요한 역할을 한다. 방향타는 선박에 조종성, 안정성, 조종성능을 제공하기 때문에 선박의 조종성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 방향타의 유체역학적 힘을 계산하고 조사해야 한다.

잘 알려진 바와 같이 유체 역학에는 주로 세 가지 유형의 분석(분석 유체역학(AFD), 실험 유체역학(EFD) 및 전산 유체역학(CFD)이 있다. EFD는 보다 신뢰할 수 있고 정확한 결과를 제공하지만, 비용이 많이 들고 특히 압력 분포, 속도 분포, 와류 발생 등 유동장에 대한 자세한 정보를 실험에서 얻기가 어렵다. 최근에는 메모리가 더 높은 계산 기술의 발전으로 연구원과 엔지니어들이 CFD를 널리 사용할 수 있게 되었다.

과거에 다양한 연구자들이 방향타에 작용하는 유체역학적 힘에 대해 연구가 진행되었다. 에너지 세이빙 방향타에 대한 수치해석(CFD)이 [1]에 의해 수행되었고 표준 방향타 설계 제안이 [2]에 의해 제안되었다. 60년 동안의 방향타 성능을 위한 설계 및 해석이 진행되었다[3]. [4]는 CFD 예측으로 NACA0012 날개단면을 해석함으로써 방향타의 성능을 해석하였다. [5]는 고양력저 레이놀즈 수의 날개단면을 CFD를 통해서 예측하였다. 유선타의 효율성에 대한 선택된 요소의 영향에 대한 수치 분석을 제공했다[6]. 그 후 [7]은 높은 양력을 갖는 3차원 방향타뿐만 아니라 여러 유형의 방향타 단면에 대해 수치적으로 연구했다. 또한 그들은 해양 방향타에 대한 3차원 흐름의 영향도 조사했습니다. 최근 [8]은 방향타 프로파일이 선박의 조종 성능에 미치는 영향을 연구했다.

본 연구에서는 크리소 컨테이너선 (Kriso Container Ship, KCS) 방향타에 대한 항력계수와 양력계수를 조사하였다. 동일한 조건에서 2차원 항력계수와 양력계수를 3차원 계수와 비교하였다. 또한, 레이놀즈수 변화에 따른 방향타에 작용하는 유체역학적 힘의 변화를 이 논문에서 연구하였다.

## II. 시뮬레이션 방법

### 2.1 방향타 형상 및 제원

본 연구에 사용된 방향타 형상과 제원은 Fig. 1과

Table 1에 나타나 있다. 3D 방향타의 형상은 2D 날개 단면을 수직으로 쌓아 올린 형상을 나타내고 있고 각 단면의 용어를 Fig 1 (a)에서 정의하고 있고 그 값들은

Table 1에서 확인할 수 있다. 방향타의 아래 단면(bottom)에서부터 중앙(middle) 그리고 상부 단면(top)까지의 형상과 값들이 Fig 1 (b)와 Table 2에 나타나 있다.

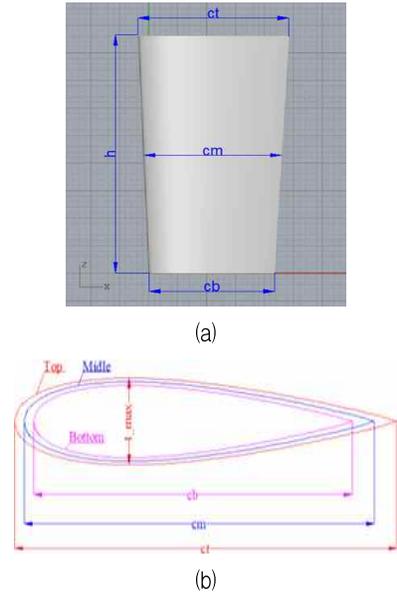


Fig. 1. Geometry of rudder: (a) spade rudder; (b) rudder cross section.

Table 1. Rudder specifications

Parameter		Value(mm)
Chord at top section	ct	26
Chord at mid section	cm	24
Chord at bottom section	cb	22
Rudder height	h	43
Rudder area	s	0.001054 mm <sup>2</sup>
Aspect ratio	AR	1.79

Table 2. Rudder cross sections parameters

Section	Chord length	Value (mm)	Max. thickness	Value (mm)
Top	ct	26	tt	4.7
Mid	cm	24	tm	4.31
Bottom	cb	22	tb	3.91

## 2.2 시뮬레이션 조건 및 격자 시스템

Fig. 2는 본 연구에 사용된 2D 및 3D 계산 도메인과 경계조건을 보이고 있다. 날개 단면 해석에 많이 사용되는 C 타입 경계조건이 적용되었고 인플로우와 아웃플로우의 영향을 고려하여 도메인 크기를 방향타로부터 앞으로 5c, 뒤로 10c를 설정하였다. 여기서 c는 방향타 단면의 코드 길이를 의미한다. 그리고 폭방향과 깊이 방향의 도메인 크기는 10c이다.

유입 경계조건은 유동이 일정한 속도를 가지고 유입되고 대류 속도 조건이 바깥 경계조건에 적용되었다. 방향타 표면에는 속도가 없는 조건이 적용되었고 다른 경계에는 슬립 조건이 사용되었다. 그리고 아래, 위, 양쪽 벽면의 경계조건은 대칭 경계조건이 적용되었다.

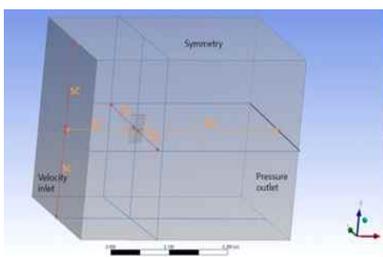
Table 3. Simulation conditions

Model	Velocity(m/s)	Re	AOA(°)
3D	0.5	12253	0~35
	0.814	19948	
	1.5	36758	
	2	49011	
2D	2	49011	0~20

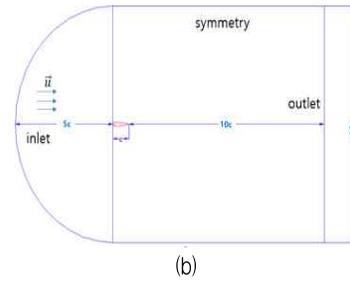
시뮬레이션에 적용된 유입 동일 속도는 2D와 3D 시뮬레이션 조건마다 달리 설정이 되었고 그에 상응하는 레이놀즈수는 Table 3에 나타나 있다. 레이놀즈수의 정의는 식 (3)과 같다.

$$Re = \frac{\rho u c}{\mu} \quad (1)$$

여기서  $\rho$  밀도,  $\mu$  점성,  $u$ , x 방향의 속도성분,  $c$  날개단면의 코드 길이를 나타낸다. 또한 방향타에 적용되는 받음각은 3D 0° ~35°, 2D 0° ~20° 이다.



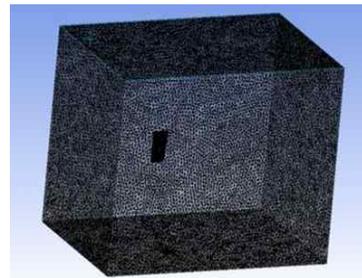
(a)



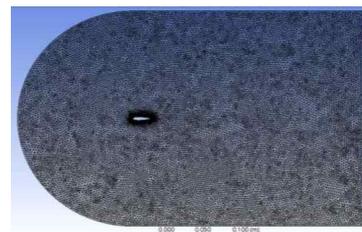
(b)

Fig. 2. Computational domain and boundary conditions: (a)3D, (b)2D.

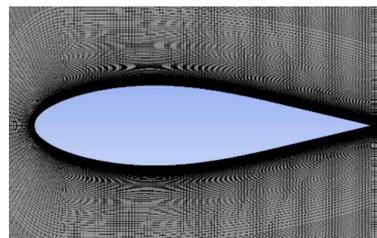
본 연구에 사용된 2D와 3D 그리드 시스템은 Fig. 3 (a), (b)에 나타나 있고 방향타 주변에 그리드는 촘촘하게 생성되어 있고 Fig. 3 (c)에 나타나 있다. 계산에 사용된 총 격자수는 2D는 약 4만 2천 개이고 3D의 경우는 약 2백 2십만 개이다. 그리고 방향타 벽면에서부터 첫 번째 그리드 포인트를 나타내는 값(y+)은 약 40 정도로 이는 RANS 시뮬레이션에 적합한 값이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Grid system around rudder: (a)3D, (b)2D, (c)close up view.

### 2.3 수학적 및 수치적인 방법

본 수치해석에서는 3차원 비정상상태 비압축성 점성 유동 상태를 고려하여 해석을 수행하였고, 이에 대응하는 지배방정식으로는 아래의 연속방정식과 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식으로 각각 고려된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( -\overline{\rho u_i' u_j'} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

여기서  $u_i = (u, v, w)$  각 방향의 속도성분,  $\mu$  점성,  $p$  압력,  $(-\overline{\rho u_i u_j})$  레이놀즈 스트레스를 나타낸다.

레이놀즈 응력(Reynolds Stress)항인  $(-\overline{\rho u_i u_j})$ 은 Realizable  $\kappa - \epsilon$  난류 모델을 사용하였다. 속도 압력 연성은 SIMPLE 방법을 사용하였으며, 대류항과 확산항은 2차 상류 차분법과 1차 중심 차분법을 각각 적용하였다.

## III. 시뮬레이션 결과

### 3.1 받음각에 따른 유체역학 계수

Fig. 4에는 유입 속도 2m/s일 때 여러 가지 받음각에 대한 유체역학 계수가 나타나 있다. Fig. 4 (a)에 나타나 있듯이 받음각이 증가함에 따라 항력계수도 증가함을 알 수 있다. Fig. 4 (b)에서 받음각이 증가하면 양력계수는 증가하다가 15도 (2D), 20도 (3D) 정도에서 최대값을 보인다. 이는 받음각이 15도 또는 20도보다 커지면 날개 주위에 스톨 현상이 발생하여 양력이 감소하는 것으로 보인다.

양항력비(drag/lift ratio)는 Fig 4. (c)에 나타나 있고 받음각이 10도일 때 가장 큰 것으로 계산되었다. 따라서 이 방향타의 성능은 받음각이 10도를 유지할 때 가장 좋을 것으로 예상된다.

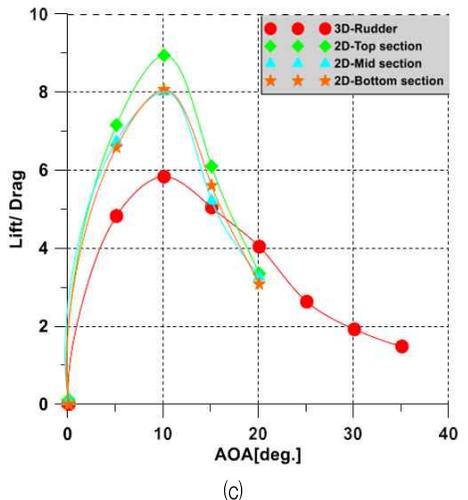
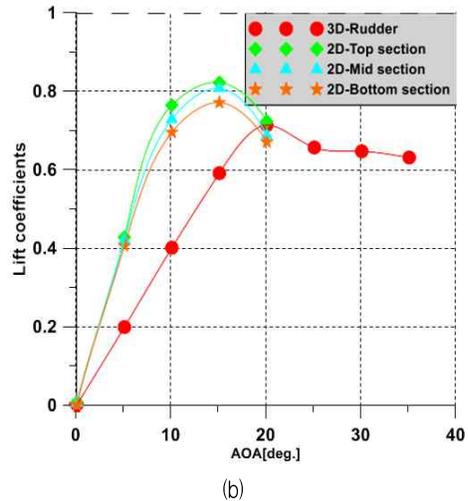
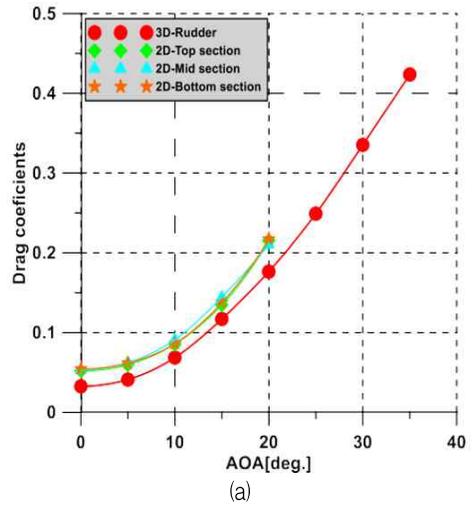
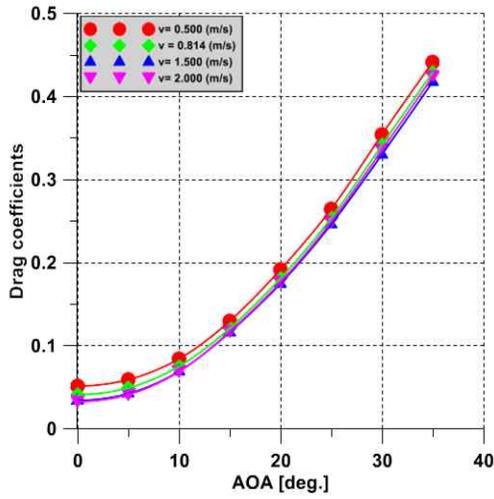
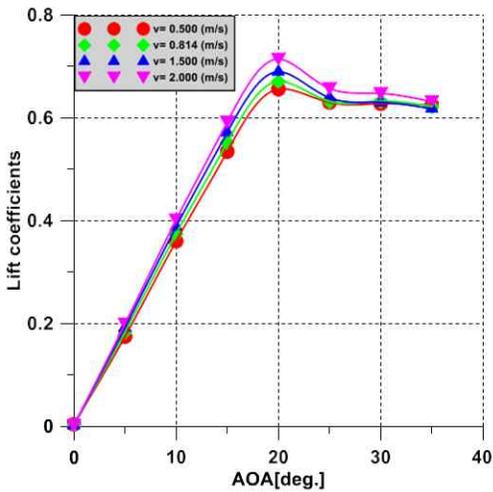


Fig. 4. Hydrodynamic coefficients with various angle of attack at 2m/s: (a)Cd, (b)Cl, (c)Cl/Cd.



(a)



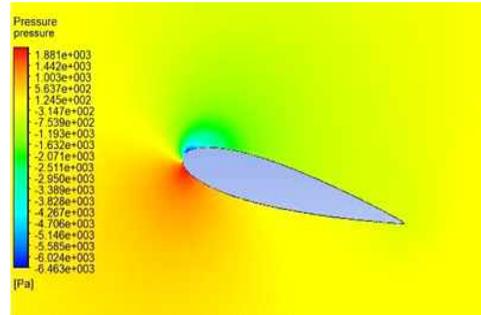
(b)

Fig. 5. Hydrodynamic coefficients with different inlet velocities: (a)Cd, (b) Cl.

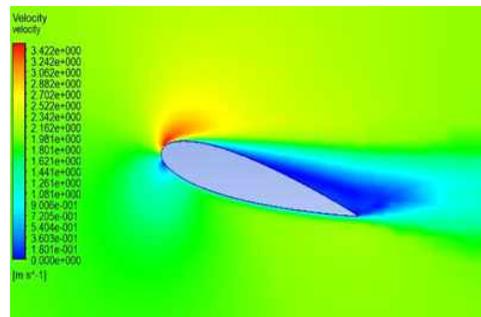
### 3.2 속도에 따른 유체역학 계수

3D 방향타 주변 속도에 따른 유체역학 계수(항력 계수, 양력계수)가 Fig. 5에 보이고 있다. 항력 및 양력 계수의 경향은 속도가 증가함에 따라 비슷하다.

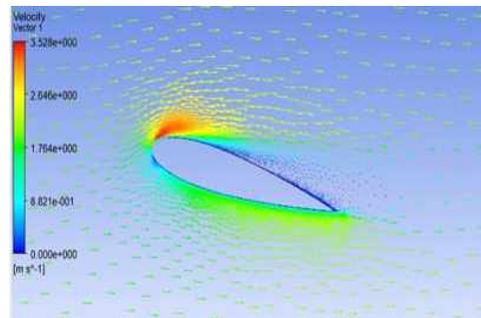
최대 양력계수가 나타나는 받음각은 20도이고 이것은 모든 유입속도에서 나타나고 있고 이런 현상은 3D 효과라고 볼 수 있다.



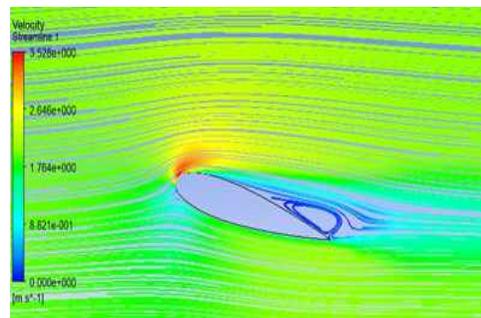
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Contours at AOA 15° and 2m/s: (a)pressure, (b)velocity, (c)velocity vector, (d)streamline.

### 3.3 유동 가시화

Fig. 6(a)는 받음각 15도에서 방향타 주위의 압력과 속도 분포를 나타낸다. 양력을 발생시키는 물리적 메커니즘은 압력면의 높은 압력과 흡입면의 낮은 압력의 존재이고 이 압력차로 인해서 양력이 발생하고 있는 것을 잘 보여 주고 있다.

방향타 날개 단면 주위의 속도 분포는 Fig. 6 (b)에서 보여 주고 있고 압력 분포와 반대로 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6 (c)와 (d)는 각각 방향타 주변의 속도 벡터와 유선 분포가 나타나 있다. 날개 윗면의 유동이 날개를 타고 뒤로 흐르다가 박리가 발생하고 이 박리가 떨어져 나감으로 보텍스가 발행하고 항력이 많이 생기는 이유이다.

## IV. 결론

상용 전산유체역학 프로그램 Ansys fluent를 이용하여 방향타 주위의 유동 특성을 연구하였다. 2D와 3D 형상을 생성하고 여러 가지 계산 조건(유입속도, 받음각)을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

받음각이 증가함에 따라 항력계수도 증가하는 반면 양력계수는 증가하다가 받음각이 각각 15도 (2D), 20도 (3D) 정도에서 최댓값을 보인다. 양항력비(drag/lift ratio)는 받음각이 10도일 때 가장 크고 받음각 10도를 유지할 때 가장 성능이 좋을 것으로 예상된다.

속도 및 압력 컨투어, 속도 벡터, 유선 등을 이용하여 방향타 주위의 유동을 가시화할 수 있었고 유동의 박리 및 보텍스 생성 등을 확인할 수 있었다. 방향타에 의해 생기는 항력은 단면 위에서 생기는 박리 및 보텍스가 기인한 것으로 형상의 변화 등으로 박리 및 보텍스를 줄임으로써 항력을 감소시킬 수 있고 양력을 극대화할 수 있다. 향후 방향타 최적 설계를 통하여 항-양력비를 극대화할 수 있는 설계를 진행할 예정이다.

## REFERENCES

[1] W. Kwon, and W.J. Oh, "Study of numerical analysis verification with CFD about energy saving rudder," Korean Society For Fluid Machinery, 2021.

[2] H.J. Kim, S.H. Kim, J.K. Oh, D.W. Seo, "A proposal on standard rudder device design procedure by investigation of rudder design process at major Korean shipyards," J. Mar. Sci. Technol., 20, 2012, pp. 450-458.

[3] J. Liu and R. Hekkenberg, "Sixty years of research on ship rudders: Effects of design choices on rudder performance," Ships Offshore Struct., 12, 2017, pp. 495-512.

[4] P.C.S Kapsalis, S. Voutsinas, N.S. Vlachos, "Comparing the effect of three transition models on the CFD predictions of a NACA0012 airfoil aerodynamics," J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn., 157, 2016, pp. 158-170.

[5] J. Morgado, R. Vizinho, M.A.R. Silvestre, and J.C. Pascoa, "XFOIL vs CFD performance predictions for high lift low Reynolds number airfoils," Aerosp. Sci. Technol., 52, 2016, pp. 207-214.

[6] T. Abramowski, "Numerical analysis of influence of selected elements on effectiveness of stream-line rudder," Polish maritime research, 3(66), Vol 17, 2010, pp 3-7.

[7] T.V. Nguyen and Y., Ikeda, "A numerical study on 3-D effects of marine rudder by using CFD," Proceedings of the 3rd International Symposium of Maritime Sciences, Nov. 10-14, 2014, Kobe, Japan.

[8] J.L. Liu, "Impacts of rudder profile on maneuvering performance of ships," Ocean Engineering, 124, 2016, pp 226-240.

## 저자 소개

구 본 국 (Bon-Guk Koo)



2002년 2월 : 부산대학교  
조선해양공학과(공학사)  
2004년 2월 : 부산대학교  
조선해양공학과(공학석사)  
2006년 5월 : UCLA  
기계공학과(공학석사)  
2011년 12월 : Univ. of Iowa  
기계공학과(공학박사)

2014년 3월~현재 : 창원대학교 조선해양공학과 교수  
관심분야 : 유동해석/전산유체역학