

해양공학개론

Part 3 : 수동역학적 성능

주제

- 모형시험과 프루드의 가정
- 프로펠러 추진기
- 선박의 운동
- 해양의 좌표계

프루드는 이렇게 말했다 "길고 짧은 건 안 대 봐도 안다!"

- Scale Effect (모형시험의 단점)
 - 불꽃이 단순하게 보인다, CG필수, 아니면 실제스케일...!
 - 모양, 물리적 상황이 같아도, 질량과 표면적 등에 의해 다른물리적 효과가 발생



프루드는 이렇게 말했다 "길고 짧은 건 안 대 봐도 안다!"

- 선박, 항공기의 추진력 설계에서 모형실험을 수행
 - 추진력은 단순히 크기에 비례하지 않음...!
 - 모형실험의 결과를 가지고 실제크기를 예측하기위한 보정방법이 필요
- 19세기 영국의 공학자 윌리엄 프루드(William Froude)
 - 수많은 실험 끝에 모형 선박과 실제 선박의 크기 효과를 보정할 수 있는 방법 발견
 - 영국은 강력한 해상 군사력을 얻어 영향력을 전 세계로 확대, 세계사의 흐름을 주도

프루드가 사용한 것은 차원해석

- 차원해석 (Dimensional Analysis)
 - 물리현상을 이해하고 공식화, 모델링을 하기 전에 먼저 차원을 분석하는 단계
 - 여기서 차원은 공간표현의 차원이 아닌 물리량의 차원!
 - 물리변수 기본차원 : 질량(M), 길이(L), 시간(T), 전류(I), 온도(Θ), 물질량(N), 광도(J)의 7개의 독립적인 차원
- 사고의 시작은 수식의 동차성과 기본차원의 독립성
 - 동차성 : 수식 양쪽(좌항과 우항)의 물리변수 차원은 같아야만 하며
 - 독립성 : 면적과 길이, 질량과 열량, 그리고 키와 몸무게처럼 차원이 다른 물리량을 서로 더하거나 뺄 수 없다

버킹엄의 파이 정리

- Buckingham의 Pi (Π) 정리
 - "물리 현상을 지배하는 관련 변수가 모두 k개이고 이들을 이루는 기본차원이 r개라면, 무차원 변수는 k-r개 유도될 수 있다" 😳
 - 무슨말..? 😳😳
 - Π 는 X 와 비슷하게 물리량의 차원을 나타내는 기호 (미지수값)
 - $X_1 = f(X_2, X_3, \dots, X_k)$, 각 변수의 거듭제곱 (X_1, X_2^a, X_3^b, \dots)으로 이루어진 무차원변수를 k-r 개 구할 수 있고 이들 사이의 관계를 $\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{k-r})$ 와 같이 표현할 수 있다.
 - 😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳😳

코코넛의 낙하속도 문제

- 코코넛이 땅에 떨어질때 낙하속도는?

낙하속도 v 를 결정하는 변수 : 코코넛 질량 m , 매달린 높이 h , 중력가속도 g

$$v = f(m, h, g)$$

- 각변수를 기본차원(질량(M), 길이(L), 시간(T))으로 표현

$$[v] = [L/T], [m] = [M], [h] = [L], [g] = [L/T^2]$$

- 등장한 변수의 갯수 = 4개, 사용된 기본차원의 갯수 = 3개
 - 버킹엄의 파이이론에 의해 무차원 변수는 1개 ($k-r$)개

코코넛의 낙하속도 문제 (계속)

- 각 변수에 대한 거듭제곱의 곱 $= v^1 m^a h^b g^c$ 이 무차원이 되는 a,b,c는?

$$a = 0, b = -1/2, c = -1/2$$

- 따라서 무차원변수는 다음과 같다.

$$\Pi = v^1 m^0 h^{-1/2} g^{-1/2} = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

- 무차원변수는 어떤 상수값을 가질 것이다. 예를들어 $\Pi = 0.1$.
 - 정확한 상수값은 실험을 해야만 하나, 중요한 물리적 사실을 알수있다!
 - 코코넛의 낙하속도에 질량 m 은 상관이 없다! 🤔

냉동 치킨의 조리시간 문제

- 코스트코에서 초대형 7 kg 짜리 브라질리안 냉동치킨을 샀다. 이 치킨의 반마리 3.5 kg 만 조리해서 먹고싶다. 그런데 설명서엔 6시간 오븐에 구으라고 되어있다. 3.5 kg 를 구우는데는 얼마나 두어야 할까?
- 냉동치킨 조리시간에 관여하는 변수 : 조리시간 t , 칠면조의 질량 m , 칠면조 살코기 밀도 ρ 오븐의 온도 T , 열전달계수 h
- 각변수를 기본차원(질량(M), 길이(L), 시간(T))으로 표현

$$[t] = [T], [m] = [M], [\rho] = [M/L^3], [T] = [\Theta], [h] = [L^2/T]$$

- 등장한 변수의 갯수 = 5개, 사용된 기본차원의 갯수 = 4개, 즉 무차원변수 1개

냉동 치킨의 조리시간 문제 (계속)

- 각 변수에 대한 거듭제곱의 곱 $= t^1 m^a \rho^b T^c h^d$ 이 무차원이 되는 a,b,c,d는?

$$a = -2/3, b = 2/3, c = 0, d = 1$$

- 따라서 무차원변수는 다음과 같다.

$$\Pi = t^1 m^{-2/3} \rho^{2/3} h^1 = \frac{t \rho^{2/3} h}{m^{2/3}}$$

$$t = C \frac{m^{2/3}}{\rho^{2/3} h}$$

냉동 치킨의 조리시간 문제 (계속)

$$t = C \frac{m^{2/3}}{\rho^{2/3} h}$$

- 브라질리언치킨의 크기에 상관없이 근밀도가 일정하고 열전달계수가 일정하다고 하면, ρ, h 도 상수 C 안으로 들어간다.

$$t = C' m^{2/3}$$

- 7 kg 조리엔 6시간이라면, 반마리 3.5 kg은 6시간의 $0.5^{2/3} = 0.63$ 배 이므로, 3시간 47분 오븐조리하면 된다 😎

저항계수를 도출하는 차원분석

- 자동차의 공기저항은 얼마나 되며 어떤 물리적 변수가 어떻게 관여하는가?
- 공기의 저항력 F 에 관여하는 변수 : 자동차의 속도 v , 자동차의 투영면적 A , 공기의 밀도 ρ

$$F = f(v, A, \rho)$$

- 각변수를 기본차원(질량(M), 길이(L), 시간(T))으로 표현

$$[F] = [ML/T^2], [v] = [L/T], [A] = [L^2], [\rho] = [M/L^3]$$

- 등장한 변수의 갯수 = 4개, 사용된 기본차원의 갯수 = 3개, 즉 무차원변수 1개

$$F = Cv^2\rho A$$

프루드수를 도출하는 차원분석

- 선박이 받는 저항력에 중 주위에서 형성되는 파도에 의한 저항(조파저항)을 중심에 두고 차원분석
- 조파저항에 관계있는 변수 : 선박의 속도 v , 길이 l , 유체의 밀도 ρ , 중력가속도 g
- 선박이 받는 저항 $R = f(v, l, \rho, g)$

$$[R] = [ML/T^2], [v] = [L/T], [l] = [L], [\rho] = [M/L^3], [g] = [L/T^2]$$

- 등장한 변수의 갯수 = 5개, 사용된 기본차원의 갯수 = 3개, 즉 무차원변수 2개
- $\Pi_1 = R^1 v^a l^b \rho^c g^d$, $\Pi_2 = v^1 l^a \rho^b g^c$ 이 무차원이 되는 a, b, c, d 는?

프루드수를 도출하는 차원분석 (계속)

$$\Pi_1 = \frac{R}{v^2 \rho L^2}, \Pi_2 = \frac{v^2}{gL} = Fr$$

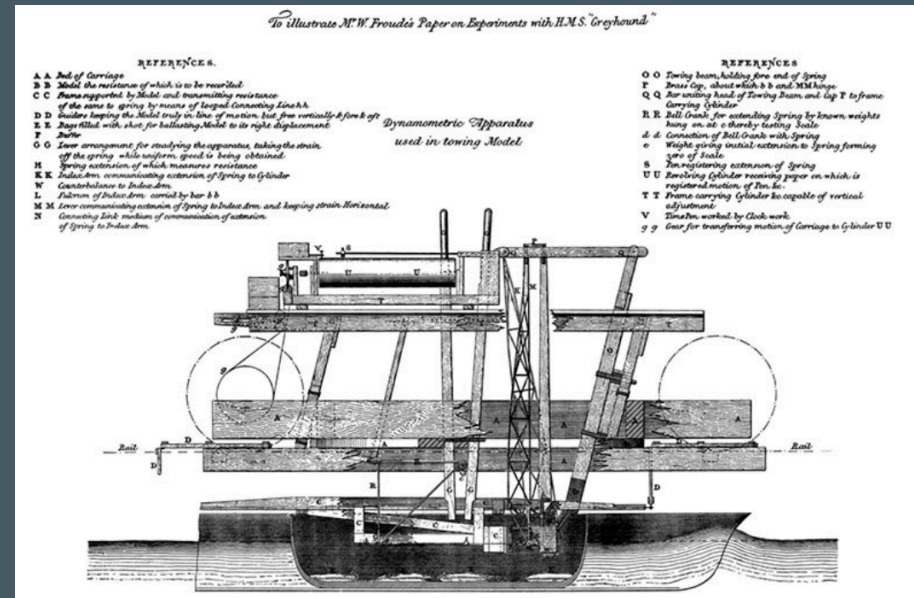
- 저항계수와 프루드수가 등장! 임의의 상수 G 를 사용하면,

$$\frac{R}{v^2 \rho L^2} = G \left(\frac{v^2}{gL} \right)$$

$$\frac{\text{Resistance Force}}{\text{Gravitational Force}} = \frac{v^2 \rho L^2}{g \rho L^3} = \frac{v^2}{gL}$$

프루드수 (Fr) 을 이용한 실제선박 저항계산

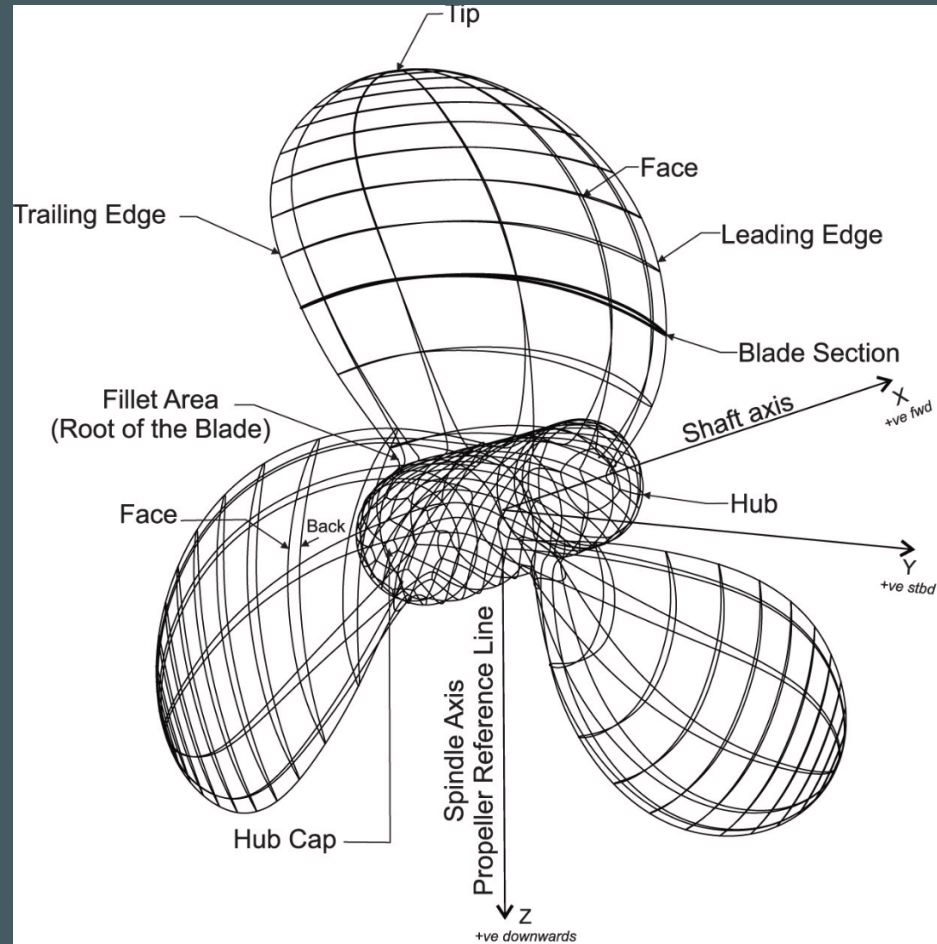
- 프루드가 실험으로 발견한 상사법칙 (Scale Law)
"선박의 크기가 모형선 치수의 D배이고 속도 V_1, V_2, V_3, \dots 에서 측정된 모형선의 저항이 R_1, R_2, R_3, \dots 일 때, 실제 선박의 경우 속도 $V_1\sqrt{D}, V_2\sqrt{D}, \dots$ 에서 R_1D^3, R_2D^3, \dots 의 저항을 받는다."
- 번역하면,
"프루드수 (Fr)이 같으면,
모형과 선박의 저항계수가 일치한다"



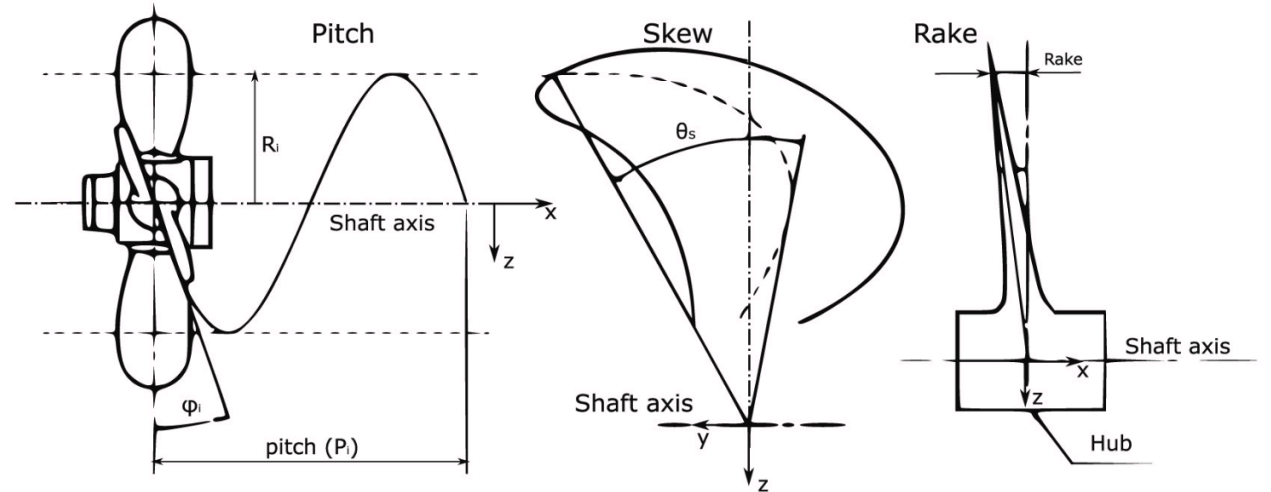
프루드수 (Fr) 을 이용한 실제선박 저항계산 (계속)

- 총길이가 100 m 인 선박이 10 m/s로 운항할때 작용하는 저항을 계산
- 1/25 스케일의 모형선을 제작해서 실험
 - 프루드수 $Fr = \frac{v^2}{gL}$ 가 같으려면, 속도를 1/5로 줄여서 2 m/s 로 실험
 - 측정하는건 저항계수값 (C_R , S는 침수표면적)
 - $R = C_R * 0.5v^2\rho S$
- 자유표면을 갖는 운동일때 유용, 수중에서는 점성저항이 크므로 레이놀즈수가 중요함
- 레이놀즈수 = 관성력/점성력 = 층류와 난류를 구분하는 척도가 되는 무차원수

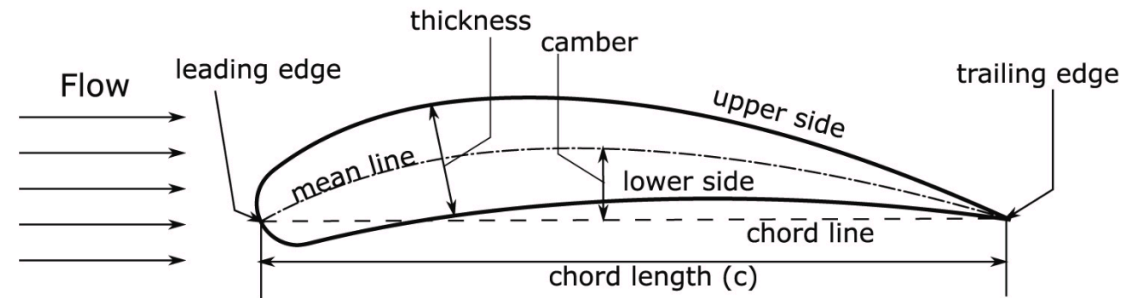
프로펠러 추진기 - 형상정보 명칭



(a) Marine propeller model



(b) Pitch, skew & rake



(c) Hydrofoil geometry

프로펠러 추진기 - 수중익(hydrofoil) 단면, NACA 모델

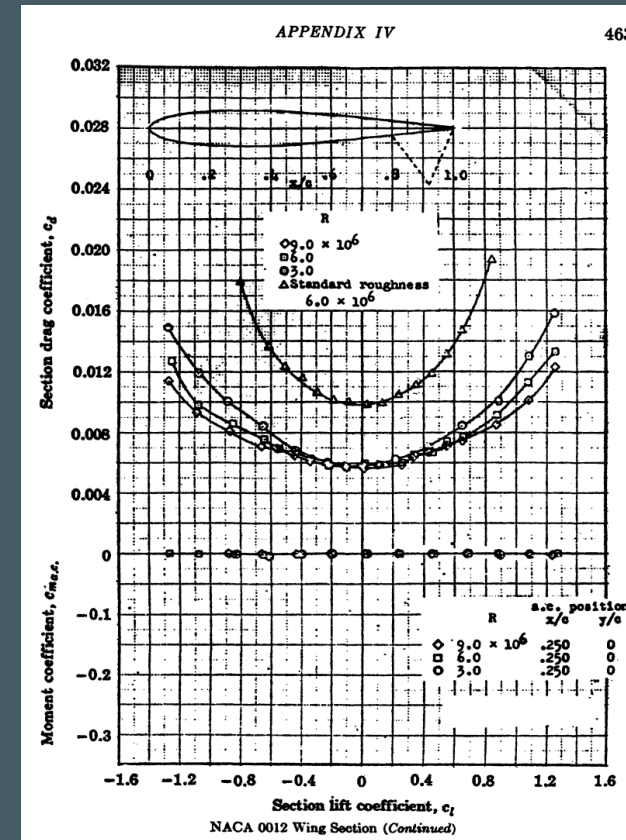
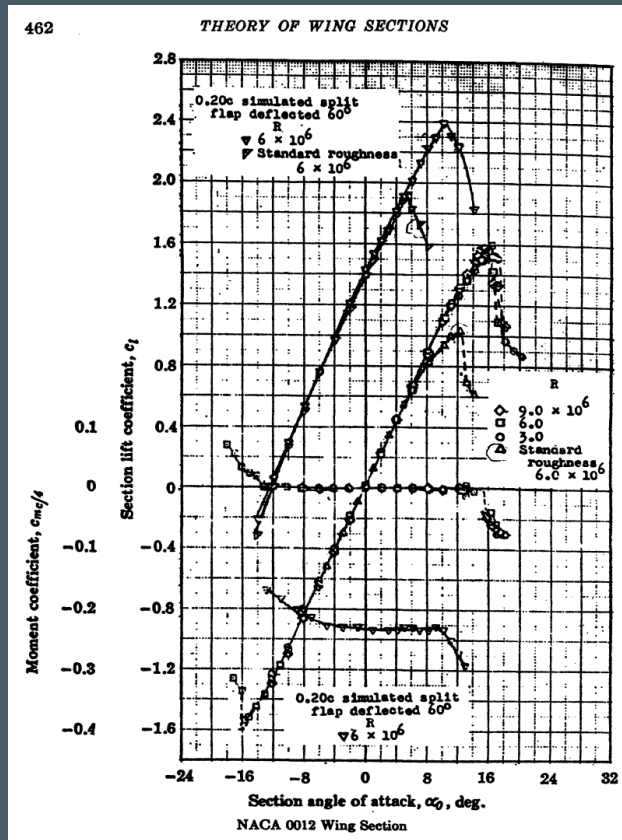
- NACA 단면 모델
 - NACA (미국 항공 자문위원회), NASA의 전신에서 1933년 공개
 - 실험자료 공개
 - 1949년 발간한 700장 짜리 책에 모든 실험자료 수록함



- NACA 단면 온라인 사이트 : <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>

프로펠러 추진기 - 수중익(hydrofoil) 단면, NACA 모델

- Theory of Wing Sections 수록내용 중

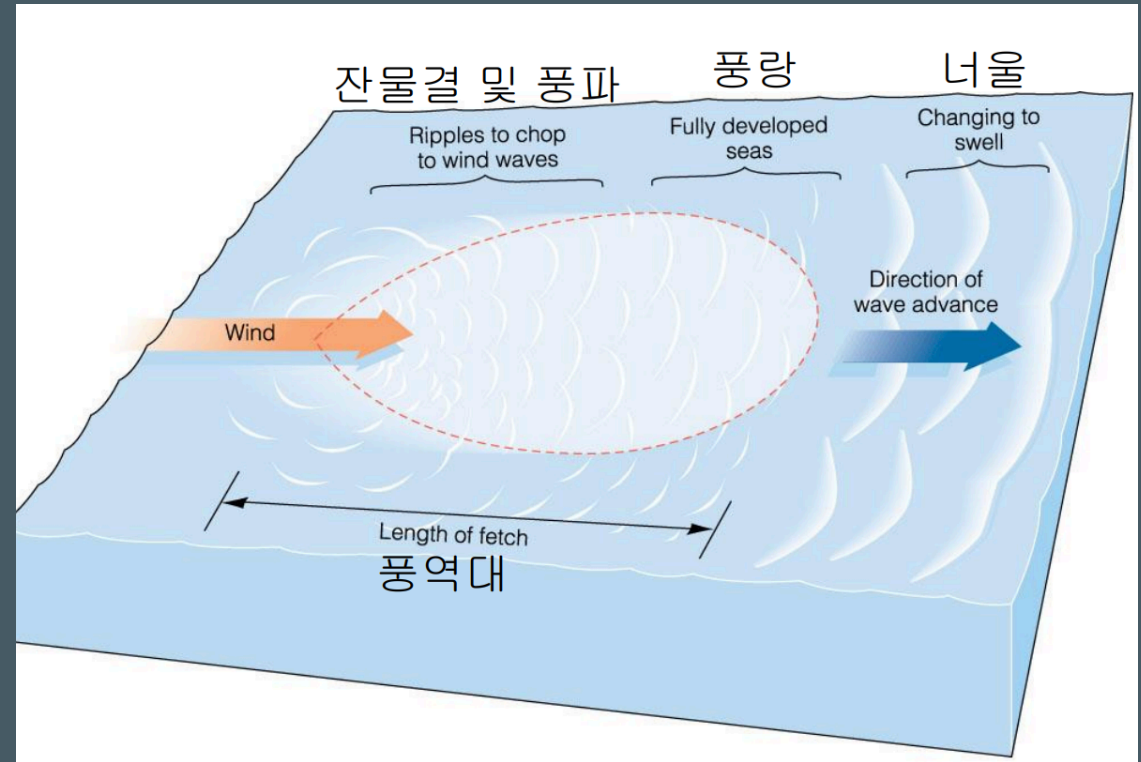


상선 추진기 vs 잠수함 추진기



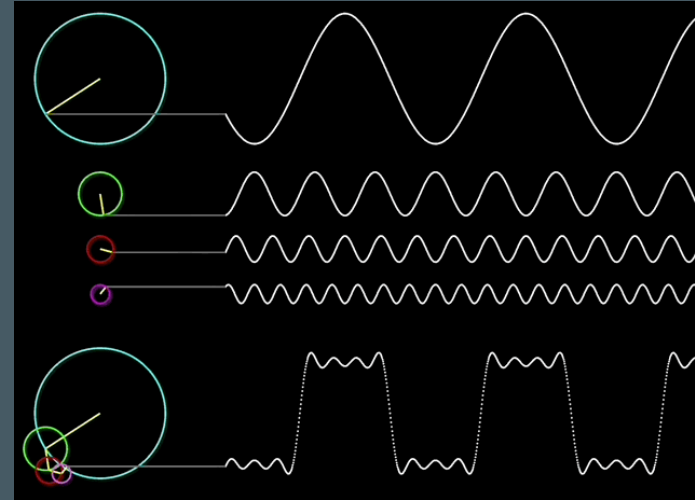
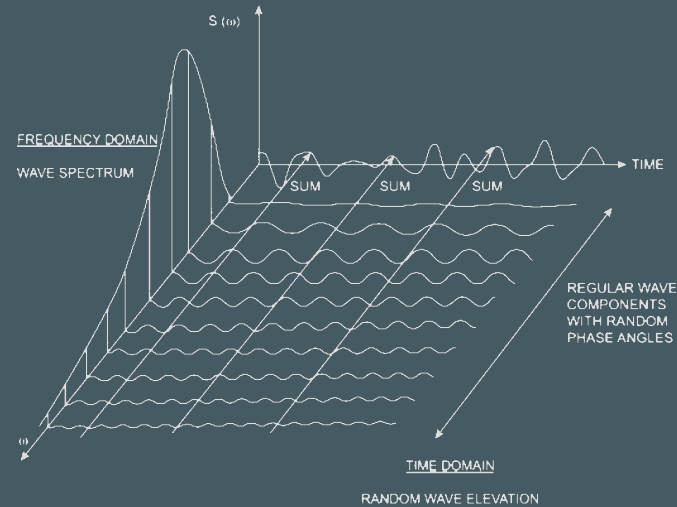
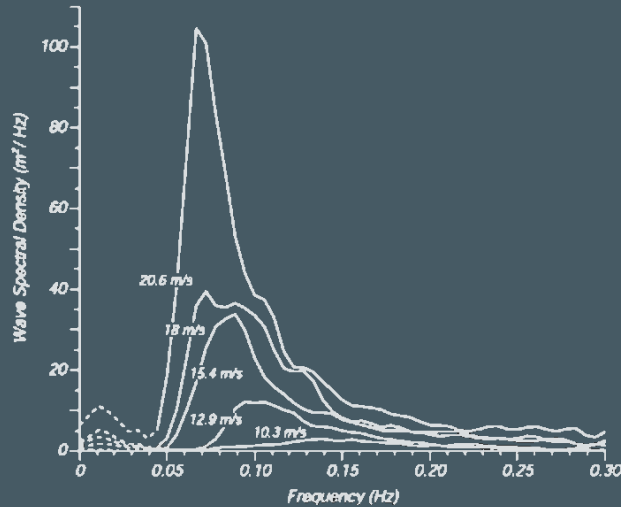
선박의 운동 - 바다가 가하는 힘

- 선박의 주요 외력은 해양파! (파도!)
- 해양파 발달요소
 - 풍속
 - 지속시간
 - 풍역대
- 일정한 파장과 주기를 갖는 파동이 일정한 속도로 진행하면 (=규칙파 특성) 너울(스웰)이라고 함



선박의 운동 - Pierson-Moskowitz 스펙트럼

- Pierson-Moskowitz 스펙트럼 : 대표적 완전히 발달된 '해양파 스펙트럼'
 - 푸리에 변환



- 규칙파에 대한 운동응답(motion response)을 설계에 고려

선박의 운동 - 배의 운동 명칭과 기호

- Surge(전후동요), Sway(좌우동요), Heave(상하동요)
- Roll(좌우회전), Pitch(전후회전), Yaw(방향회전)

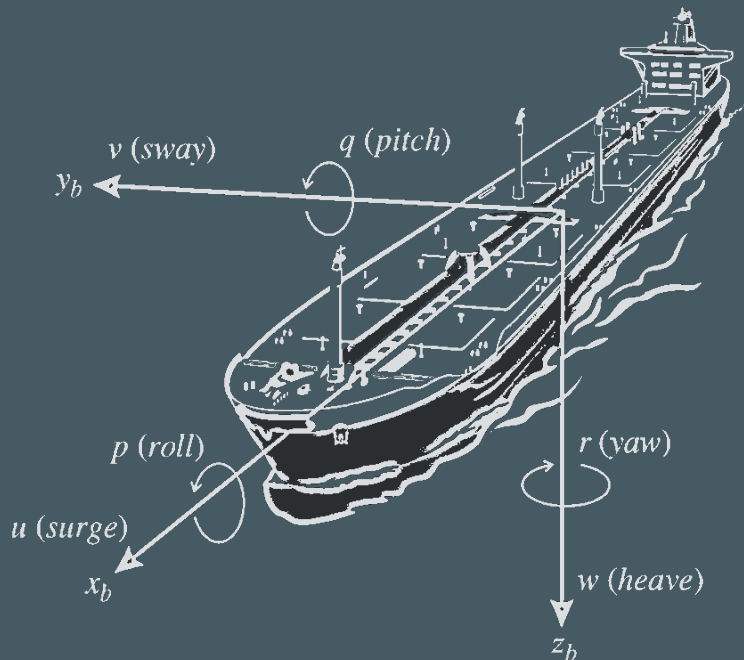


Table 2.1 The notation of SNAME (1950) for marine vessels

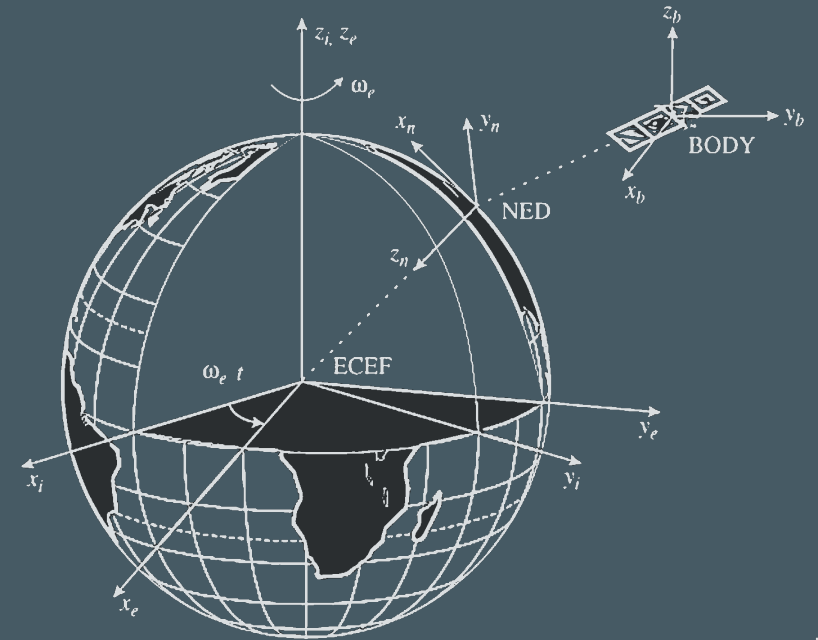
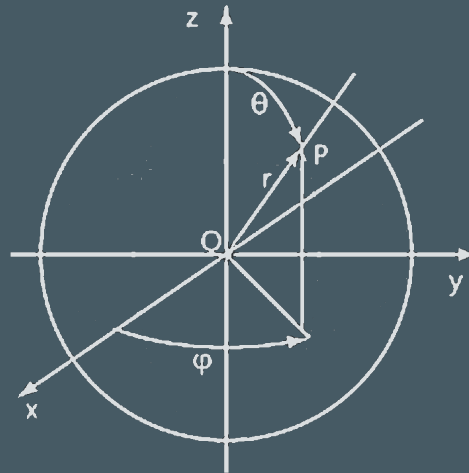
DOF		Forces and moments	Linear and angular velocities	Positions and Euler angles
1	motions in the x direction (surge)	X	u	x
2	motions in the y direction (sway)	Y	v	y
3	motions in the z direction (heave)	Z	w	z
4	rotation about the x axis (roll, heel)	K	p	ϕ
5	rotation about the y axis (pitch, trim)	M	q	θ
6	rotation about the z axis (yaw)	N	r	ψ

τ ν η
 타우 누 에타

선박의 운동 - 좌표계

- 선박의 위치와 운동을 표현하기 위한 좌표계

- 수직좌표계; 데카르트 좌표계 (Cartesian)
- 극좌표계 (Polar), 구면좌표계 (Spherical)



목적에 따라 적절한(=편리한) 좌표계를 설정해 사용

선박의 운동 - 해양의 좌표계 (구면좌표계)

○ ECI (Earth-Centered Inertial)

- 지구중심을 원점으로 하는 고정좌표계 (Inertial)

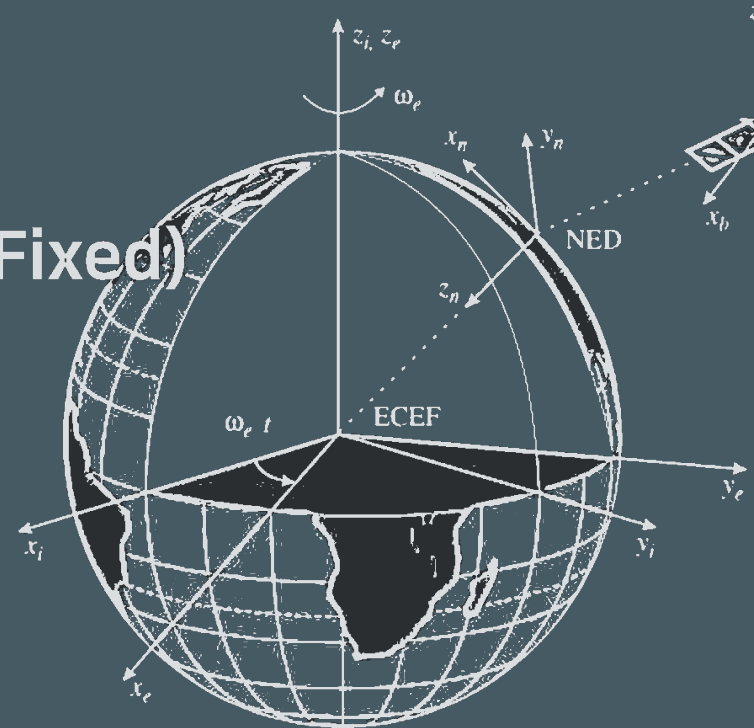
$$\{i\} = (x_i, y_i, z_i)$$

○ ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed)

- 해양운동체 기술의 기준이 되는 좌표
- 고정좌표계로 간주

(지구회전속도 7.2921×10^{-5} 무시)

$$\{e\} = (x_e, y_e, z_e)$$

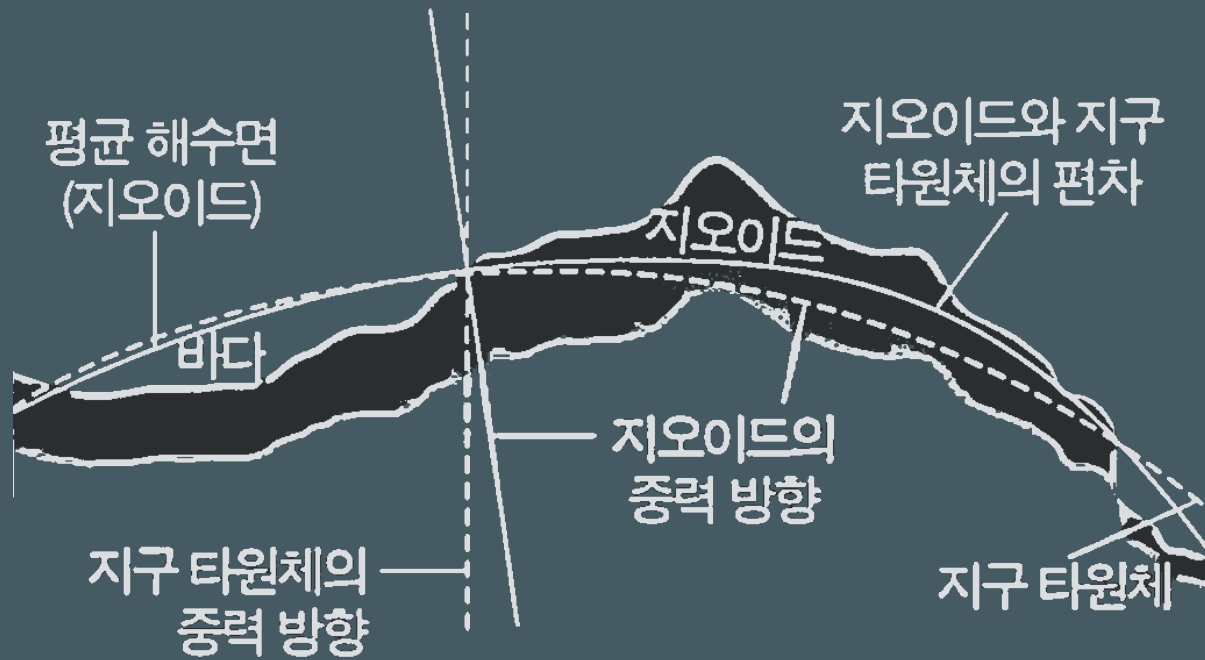


선박의 운동 - 해양의 좌표계 (수직좌표계; GPS)

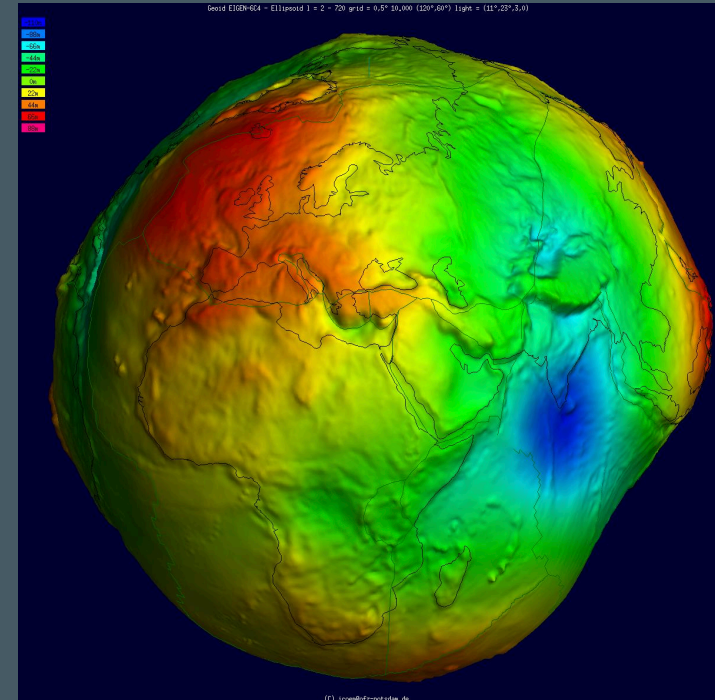
- 일반 상선은 수상운행 = 구면좌표계의 z축 필요 없음
- 지구 표면의 위치를 정확히 표현하는 것은 상당히 어려운 문제
 - [모든 지도는 틀렸다! \(Why_all_world_maps_are_wrong\)](#).
- 현재는 GPS로 표현하는 위도, 경도 표면 좌표계 사용
 - GPS는 정확한 좌표계가 아님
 - WGS84라는 약속으로 지구를 수학적 타원체로 가정해 수선의 발을 내림
 - GPS(WGS84 = EPSG:4326), 구글지도(Google Mercator = EPSG:3857)
 - 한국과 일본에 잘 맞는 지역타원체(Bessel 1841 = EPSG:4004)

선박의 운동 - 해양의 좌표계 WGS84 지구타원체

- 지구 표면에서 수선에 발(위도, 경도)을 어디에 내려야 하는가?
- 지오이드(Geoid) : 해수면 평균높이를 연장, 실제 중력방향과 가장 유사



실제지구 - 지구 타원체 - 지오이드



지오이드 (10,000배 과장)

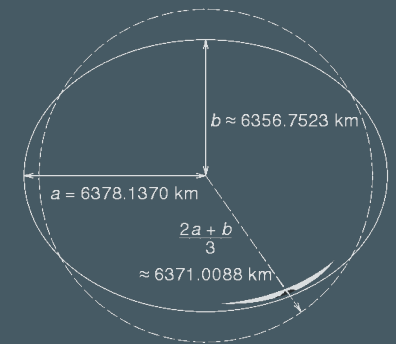
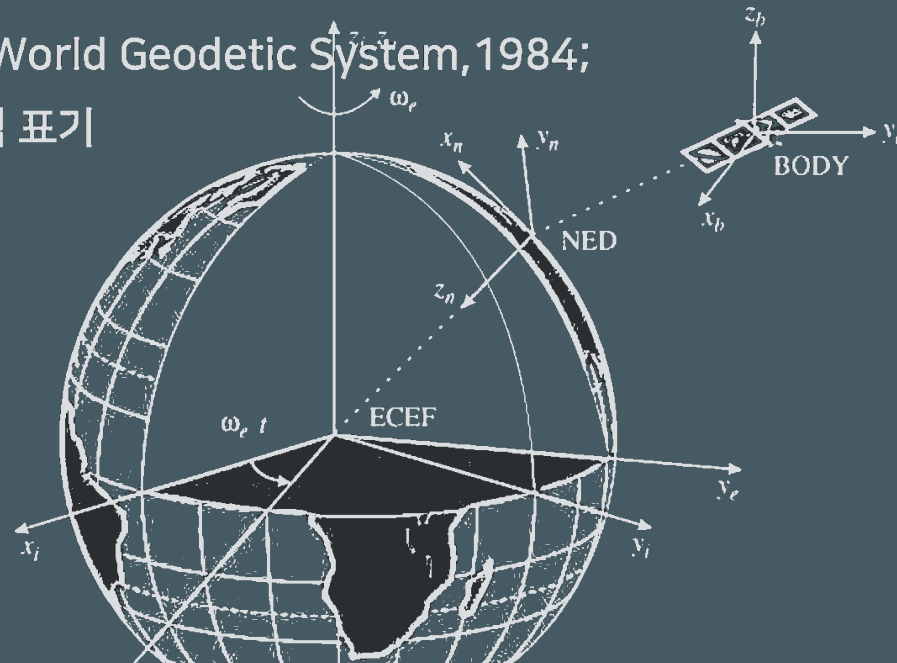
선박의 운동 - 해양의 좌표계 (수직좌표계; GPS)

○ NED (North-East-Down)

- 지구표면에서 국지적(Local) 영역을 다룰 때 사용
- 원점은 위도, 경도 값으로 설정

지구를 특정타원체로 가정한 WGS84 (World Geodetic System, 1984; GPS에 사용되는 좌표계) 를 사용해 원점 표기

$$\{n\} = (x_n, y_n, z_n)$$



* 항공분야에서는 ENU 좌표계 사용



다음 시간에 !

 교수자

[최원석 \(Woen-Sug Choi\)](#)

한국해양대학교 해양공학과

상담문의 및 질문은 [온라인 상담예약 링크 \(담당교수 아니더라도 언제든지 누구든지 😊😊\)](#).

또는 해양과학기술관(D) 301호