

어선의 선형 설계(Ⅱ)

현대선박해양연구소
책임연구원 이 귀 주

1. 서 언

연안 수산 자원의 고갈로 점차 어로 거리가 멀어지고 인건비가 급격히 상승하고 있는 우리 나라의 실정으로는 어선의 고속화 및 대형화가 필수적인 과제이며 이를 위하여 범국가적으로 시대에 적합한 우수한 선형 개발에 노력을 기울여야 할 것이다.

어선의 선형은 일반 상선에 비하여 종류가 다양하고 지역 특성이나 어민들의 요구 사항이 주요 변수가 되므로 새로운 선형의 설계시 세심한 주의를 기울여야 한다. 기존 재질이나 선형에 변화를 주어 설계된 배가 건조 후 어민들의 반응이 좋지 않으면 동형 어선의 추가 건조 가능성이 없어질 뿐 아니라 새로운 선형에 대한 시도도 실패로 돌아가는 경우가 많이 있다.

본 원고에서는 이러한 관점에서 앞으로 예상되는 수요에 대비한 과감한 선형의 변화에 필요할 것으로 예상되는 자료를 정리하였다. 또한 이제까지 한국어선협회와 현대선박해양연구소가 공동연구로 수행한 표준어선의 모형시험 결과를 통계적 해석 방법으로 정리하려고 하였으나 자료의 양이 통계해석을 수행

하기에는 충분치 않아 일본 자료의 소개를 주로 하였고 표준어선의 통계해석을 제한된 부분만 기술하였다.

2. 주요선형 특성의 결정

가. 기본 형상

어선의 선형은 일반적으로 배수량형(displacement type), 활주형(planing type), 각형정, Kunckle형선 등으로 나눌 수 있으며 각 선형마다 장·단점을 갖고 있어 배의 속도, 안정성, 작업성 등을 고려하여 선형의 기본 윤곽을 결정하게 된다. 비교적 저속선형인 경우 배수량형 및 각형정의 형상으로 선형이 이루어지고 있으며 배수량형의 경우 선체 주위의 유선의 흐름이 매끄럽게 되어 저항추진 선능이 각형정에 비하여 우수하나 복원성이나 조업성의 측면에서는 다소 불리한 면이 있다.

반면 각형정의 경우 어민들이 오래전부터 묵선으로 이 형상의 선형을 사용해 오고 있고 특히 넓은 갑판면적과 우수한 복원성능의 이점으로 아직도 많은 어민들이 선호하고 있는 실정이다. 또한 활주형선은 저속의 범위

에서는 기대하는 효과를 얻지 못하고 오히려 hard chine으로 인하여 큰 저항이 발생하는 단점이 있으나 고속에서는 동역학적 부양에 의한 침수표면적의 감소에 의해 저항이 감소하기 때문에 고속 범위에서는 경제적이다.

1980년대 후반에 들어서면서부터 국내 인건비 상승 및 어가의 개선으로 인하여 계획 선속이 점차 고속화하고 있는 바 활주형 선형이나 SWATH 그리고 쌍동선 등의 선형은 진보적인 자세에서 어선 적용 가능성을 검토해야 할 것이며 고속화 선형들도 각각 장·단점이 있기 때문에 선속, 어획방법, 종류에 따라 그 특징을 잘 고려하여 선형을 결정해야 할 것이다. 다른 고속 선박에 비하여 활주선은 비교적 건조나 설계가 용이하고 건조비도 저렴하여 낮은 홀수로 운항하기 때문에 항구 및 항로 개설이 용이하다.

우리나라에는 아직까지 어선은 물론 다른 선종에서도 활주형선에 대한 연구조사가 미흡하여 본 원고에서는 현재까지 조사한 설계 참고 자료를 정리하여 보았다.

1) 활주형 선형의 특성

- 선체와 수면 사이의 동적 압력에 의하여 선체가 부양됨으로서 저항이 감소하도록 선형이 설계됨.
- 대부분의 활주형 선형이 샤인(chine)의 형상을 하고 있고 이 샤인은 고속에서 선체로부터 파도의 분리를 촉진시켜 충격 가속도를 감소시키며 샤인의 최대 폭은 통상 transom으로부터 전장의 60~65% 전방에 위치.

을 하고 있고 이 샤인은 고속에서 선체로부터 파도의 분리를 촉진시켜 충격 가속도를 감소시키며 샤인의 최대 폭은 통상 transom으로부터 전장의 60~65% 전방에 위치.

- 파운딩(pounding)시 선저로부터 박리(separation)를 용이하게 하여 충격하중을 감소시키고 횡동요(roll), 종동요(pitch)등의 운동성능을 개선시키기 위하여 spray rail을 설치하며 이는 저속에서 다소 저항 증가 요인이 되나 고속에서는 선형에 따라 10% 이상까지도 저항을 감소시킴.

이 저항 감소 효과는 장·폭비(L/B ratio)가 작을 수록 크게 나타남.

- 항해 중 파에 의한 충격하중을 감소시키고 측면적 증가로 인한 조종성능을 개선시키기 위하여 홀수 하부는 deadrise를 갖는 형상을 하고 있으며 이 deadrise 각도는 최대 폭에서 10°~25°이고 transom에서는 10°~15° 그리고 선수로부터 전장의 10% 위치에서는 30°~40° 정도임.
- 선저로부터 발생된 급류를 선미에서 신속히 제거시키기 위해서 선미의 형상은 transom으로 하며 transom의 폭은 60%~40% 정도임.
- 일반적으로 어선 및 레저용은 길이가 5m~30m이며 배수량은 0.4MT~140MT 이고, $L_p/\nabla^{1/3}$ 은 5~7임. 한편 군수용의 통계적 주요 특성은 다음과 같음.

LOA (m)	Percent (%)	Vs (Kts)	Percent (%)	$L_p/\nabla^{1/3}$	Percent (%)	F	Percent (%)
15~25	30	~20	1	4.5~5.4	14	1.5~1.9	18
26~40	51	20~30	34	5.5~5.9	37	2.0~2.4	24
41~50	15	31~40	38	6.0~6.4	18	2.5~2.9	39
51이상	4	41~50	27	6.5~7.5	31	3.0~4.0	19

- 선미의 뒤틀린 형상(twisted hull)은 사각 흐름(oblique flow)을 유도하여 성능을 개선시킬 수도 있으나 뒤틀림의 정도가 지나치면 역효과가 있을 수 있음.

2) 활주형선의 장점

- 설계 및 건조가 비교적 용이
- 건조 비용이 저렴
- 홀수가 낮아서 항구 및 항로 개설 용이
- 횡요 및 피치가 타 소속선형에 비하여 작음

- 선회 선능이 우수
- 취급 용이

3) 활주형선의 단점

- 내파성이 좋지 않으므로 파에 의한 선체 충격이 과다하여 고속에서 불안정하고 항해 중 돌발적 운동 발생
- 프로펠러를 경사지게 장착하여야 하므로 선체 진동이 심함
(물 분사 추진기를 사용하면 문제가 없음)
- 선수 slamming으로 인한 가속도가 큼
- 트림 각의 변화가 심함

4) 적용의 한계

- 50노트 이상의 고속은 무리
- 배의 길이 60m, 배수량 300MT 이상이면 경제성이 급격히 저하
- 파랑 외력 등 충격력과 부양력을 동시에 고려해야 하므로 고강도, 경량화 재료가 사용되어야 함
- 폭이 충분히 커야 부양되었을 때 안정성 유지

나. 주요 요목의 결정

목적하는 배의 요구 조건을 만족시킬 수 있는 주요요목의 조합은 수 없이 많다. 이들 중에서 최적의 조합을 찾아내는 것이 기본설계의 첫 단계이며 가장 중요한 일이다. 주요요목의 초기 선택은 이미 건조된 선박의 실선 자료를 기준하여 선택하는 방법과 각 계수들을 체계적으로 분석하여 최적화하는 두 가지 방법이 있다. 이들 중 첫번째 방법은 충분한 자료가 축적되어 있는 경우 신속하면서도 안전하게 시도할 수 있는 방법이나 유가의 인하에 따른 선속의 저속화 같은 예기치 못한 변수에 의해 새로운 개념의 선박을 설계해야 할 때와 같은 특별한 경우에는 적합하지 않다.

한편 두번째 방법인 최적화 기법에 의한 방법은 첫째 방법에 의한 경험이 쌓인 후 좀 더 합리적으로 주요요목을 결정하는 방법으로서 이때의 목적함수로는 주로 RFR(Required Freight Rate), NPVI(Net Present Value Index) 및 CRF(Capital Recovery Factor) 등이 있고 이러한 목적함수는 선가, 연간 운항비용, 연간 운반 물동량 등의 함수로 표시되며 이러한 값들에 가장 크게 영향을 미치는 변수들은 길이, 폭, 깊이, 홀수, 배수량, 속도 등이다. 이러한 변수들은 상호 유기적인 관계를 갖고 있으므로 분리하여 최적화하면 의미가 없다.

주요 변수 및 관련 계수들의 특성은 다음과 같다.

- 길이
 - 길이의 증가는 가격 증가를 초래
 - 항해조건, 도킹에 제한되며 조업 규모의 확대를 초래
 - 마찰저항의 증가(길이의 증가는 조파저항의 감소)
 - 장-폭비는 저항·추진성능과 밀접한 관계
 - 폭
 - 복원성을 지배하는 요소
 - 폭-홀수비가 어떤 최소치 값 이상이 되어야 함
 - 폭의 증가는 침수표면적 및 선수압력의 증가를 초래하여 저항이 증가
 - 깊이
 - 화물창의 용적, 경하중량의 중심 등에 영향
 - 낮을수록 가격면에서 유리하나 건현을 만족시켜야 함
 - 홀수
 - 홀수의 증가는 폭의 증가보다 상대적으로 가격 및 저항에 유리
 - 항구, 운하, 강, 도크 문턱의 길이 등에 의해 계산
 - 방형비척계수(C_B)
 - C_p(전후 방향의 배수량 분포)와 더불어 저

항에 영향이 큼

- 상선의 C_B 는 선종별로 고속정을 제외하고는 거의 일정
- 속장비(speed length ratio, V/\sqrt{L})가 1.0 이상에서는 C_p 와 같이 속장비의 증가에 따라 C_B 를 증대시키는 것이 저항에 유리
- 길이를 크게, 폭을 작게, $\nabla/(L/100)^3$ 을 작게 하는 선형, 즉 세장선형이 최소저항의 견지에서 바람직함
 - 중당단면계수(C_M)
- C_M 이 큰 배에서는 속장비 1.1 정도까지는 잉여저항이 약간 작음
- 중앙단면의 형상은 잉여저항에 영향을 거의 미치지 않음
 - 중앙평행부
- 긴 편이 건조에 유리하고 경제적이며 화물 적재가 편리함
- 고속정을 제외한 선박에서는 평행부가 어느정도 저항을 감소시킴
 - 부심의 위치
- 선체 중앙부로부터 LCB까지의 거리에 따라 저항이 영향을 받음. 즉, 길이에 의한 배수량의 분포 형태가 저항에 영향을 미침
 - 속력
- 어획량을 고려한 항차수 결정에 주요 변수
- 경제성과 밀접한 관계
- 속도의 증가는 고마력 엔진과 선가의 증가 초래
 - 주형계수(C_p)
- C_p 의 변화는 선수미 단면의 변화를 초래하여 조파작용에 영향
- 길이방향 선수미파의 발생점에 영향을 미쳐 조파장을 변화
- 저속($V/\sqrt{L} < 0.95$)에서는 C_p 가 일정하면 배수량비($\nabla/(L/100)^3$)가 변하여도(30~250) 잉여저항비(R_R/Δ)는 크게 변하지 않음.
- 상선은 $V/\sqrt{L} < 0.95$ 에서 C_p 가 낮을수록 R_R/Δ 감소

- C_p 곡선으로부터 선도 작성

주요요목이 일차적으로 결정되면 이 요목에 의한 선박이 목적인 선박에 적합한지 그리고 제반 선박 성능에 문제가 없는지를 확인해 보기 위하여 여러 가지 계산을 수행해야 하나 계산 종류가 복잡하기 때문에 다음과 같은 내용을 순차적으로 반복하여 확인하여야 한다.

- 연간 항차수와 운반 어획량 등을 고려하여 재화중량을 구한다.
- 재화중량, 배수량의 관점에서 주요요목을 개략적으로 추정한다.
- 복원성능과 안전운항에 필요한 경하중량을 계산한다.
- 성능과 경제성을 검토한다.

다. 선도의 설계

1) C_p -Curve의 작성

설계선의 C_p , LCB와 모선의 C_p -Curve로부터 설계선의 C_p -Curve를 작성하는 방법은 다음과 같다.

가) C_p 값 차이에 의한 수정

모선의 C_p -Curve를 중앙부(최대 횡단면이 중앙에 있지 않으면 최대 횡단면)에서 선수미의 두 부분으로 나누어 각각에 대하여 다음 그림과 같이 모선의 C_p -Curve의 각 station에 있어서의 횡단면적비(A/A_m)와 동일한 횡단면적비를 갖는 설계선의 좌표 위치를 찾는다.

$$d_x(\text{선수}) = \frac{\Delta C_p}{1 - C_{pOF}} (1 - X_0)$$

$$d_x(\text{선미}) = \frac{\Delta C_p}{1 - C_{pOA}} (1 - X_0)$$

여기서: C_p, C_{p0} : 설계선 및 모선의 C_p
 ΔC_p : $C_p - C_{p0}$
 C_{pOF}, C_{pOA} : 모선의 선수·미 C_p

X₀: 선체 중앙으로부터 모선의 임의의 station까지의 거리를 L_{pp}로 무차원화 한 값
 dx: 같은 횡단면적비를 갖는 모선의 station 위치와 설계선의 좌표간의 거리

새로운 선수·미 C_p값을 C_{PNF}, C_{PNA}로 정의한다.

나) LCB 차이에 대한 수정
 설계선의 선수·미 C_p값을 C_{PF}, C_{PA}라 하면

$$C_{PF} = C_P + Q$$

$$C_{PA} = C_P - Q$$

여기서 Q는 통계자료로 부터

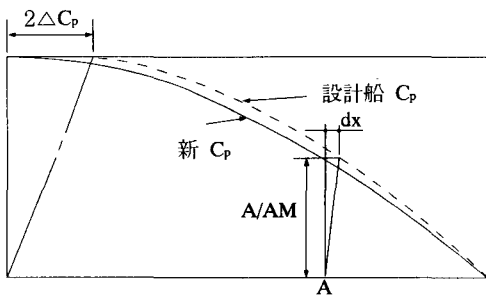
$$Q = 0.021 LCB + 0.0015$$

설계선의 LCB 값으로부터 Q를 구하면 C_{PF}, C_{PA}를 계산할 수 있다. 또한 ΔC_{PF}, ΔC_{PA}는,

$$\Delta C_{PF} = C_{PF} - C_{PNF}$$

$$\Delta C_{PA} = C_{PA} - C_{PNA}$$

이 식은 다음 그림과 같이 도시될 수 있다.



이 그림에서 선수·미의 dx값은 다음과 같다.

$$dx(\text{선수}) = 2 \cdot \Delta C_{PF} (A/A_m)$$

$$dx(\text{선미}) = 2 \cdot \Delta C_{PA} (A/A_m)$$

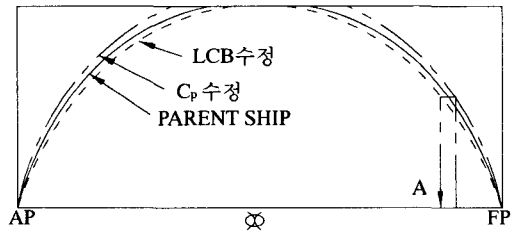
위 식에서 구한 dx 만큼 각 station의 위치를 이동시켜 최종적인 설계선의 C_p-Curve 를

작성한다.

다) Body Plan의 작성

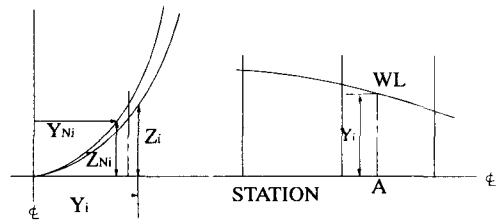
모선의 C_p-Curve 및 선도를 이용하여 설계선의 body plan을 작성하는데는 다음의 2가지 방법이 있다.

a) 모선의 선도를 직접 이용



위 그림에서와 같이 설계선의 횡단면적비와 같은 면적비를 갖는 모선의 좌표를 구하고 이 좌표 A를 포함하는 3개의 station을 택하여 A 점에서의 반폭 Y_i를 waterline으로부터 아래 좌측 그림과 같이 찾는다.

필요한 개수의 waterline으로부터 상기 방법을 반복하여 Y_M값을 구하여 연결을 하면 아래 우측 그림과 같이 A 좌표에서의 모선의 frame line을 얻을 수 있다.

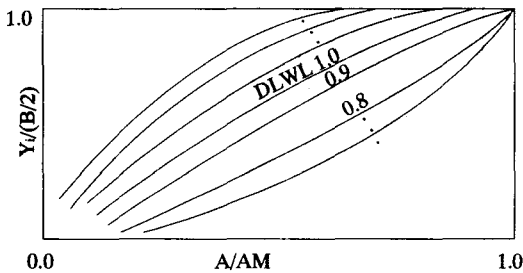


이 모선의 frame line을 모선-설계선 흘수비 (d/d_M) 및 반폭비 (B/B_M)을 매개변수로 하여 설계선의 frame line을 다음과 같이 구한다.

$$Y_i = Y_{Mi} \times \left(\frac{B}{B_M} \right)$$

$$Z_i = Z_{Mi} \times \left(\frac{B}{B_M} \right)$$

b) 횡단면적비와 각 수선별 최대 반폭에 대한 반폭(Y_M)비에 의한 방법
 모선의 Cp-Curve 및 선도로부터 각 station의 횡단면적비를 기준하여 각 수선별 Y_M ($B/2$)를 다음 그림과 같이 작도한다. 이때 수선의 높이는 홀수로 무차원화 한다.



위 그림으로부터 설계선의 각 station의 A/A_M 값을 가지고 각 수선에 대한 $Y_M/(B/2)$ 를 구하고 이 폭비 값으로부터 설계선의 offset값을 구할 수 있다.

라. 성능 개선을 위한 아이디어

현재까지 많이 알려진 일반 상선의 성능 개선 장치들 중에서 어선의 성능 개선에 사용 가능할 것으로 추측되는 장치들을 정리하였다.

1) 구상선수(Bulbous Bow)

구상선수는 배가 항주시 발생시키는 파(wave) 중에서 가장 큰 선수파의 첫번째 파정을 감소시키기 위하여 선수 앞에 위상차(phase)가 180° 다른 구(球)를 부착한다는 생각에서 Taylor에 의해 처음 시도되었다. 일반적으로 구상선수는 Froude 수가 0.2 이상인 속도 범위에서 조파저항의 감소효과가 있고 저속선에서는 파의 감쇄 효과보다는 빌지(bilge) 부분의 흐름을 안정시키거나 분리현상을 감소시킴으로서 마찰저항 및 형상저항

의 감소에 기여하는 것으로 알려지고 있다. 어선의 경우 Froude 수가 상당히 크므로 구상선수를 적절히 설계하면 효과가 클 것이다.

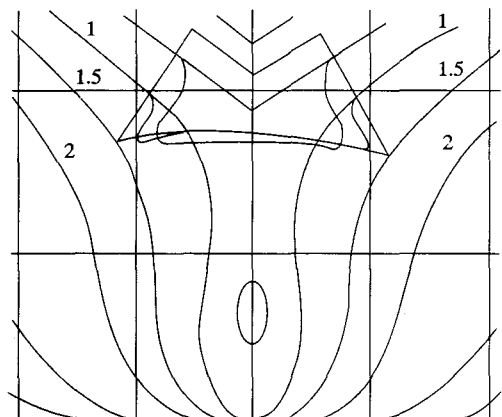
2) 쌍동형 선미(Twin Skeg Stern)

고속화로 인하여 주기관이 고마력인 경우 추진기의 효율을 높이고 복원력을 향상시키기 위하여 쌍동형 선미를 택하면 여러 가지 이로운 점이 많다. 쌍동형 선미의 장점은 다음과 같다.

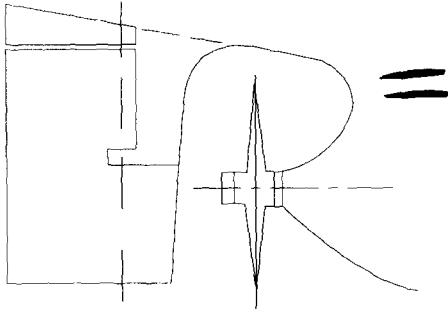
- 홀수를 낮출 수가 있다.
- 추진기 유입 유속의 증가로 추진 효율이 증가한다.
- 선미부가 넓어 기관 배치가 용이하다.
- 적재 공간이 넓어진다.
- 복원력이 증가한다.

3) 선미핀(Afterbody Fin)

가) 추진기 상부의 유속 가속을 위한 핀 추진기로 유입되는 물의 양을 많게 해 주는 장치로서 날씬한 배(slender ship)는 프로펠러로 유입되는 흐름이 수평이므로 fin의 앞쪽 끝이 영각을 갖도록 약간 위로 향하며 비대선은 프로펠러로 유입되는 물이 선체로부터 홀수 방향으로 흘러들어오므로 fin이 수평 또는 약간 아래로 향하게 부착한다.



나) 밑지 와류에 의한 정체 유속 가속을 위한 핀



선체 표면 가까이에서 아래쪽으로 향하는 흐름을 막아 밑지 와류(bilge vortex)를 제거한다.

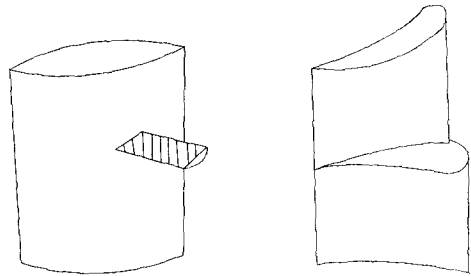
다) 후류 조절기



덕트 추진기(ducted propeller)의 덕트 모양을 추진기 축과 상단 끝 사이에 설치하며 다음과 같은 장점이 있다.

- 마력감소
- 추진기 효율 향상
- 노즐(nozzle)에 의한 추력 발생
- 선미에서의 박리(flow separation)를 방지
 - 보침성(course stability) 향상
- 흐름의 중심을 후방으로 옮겨준다
 - 진동 감소
- 추진기로 유입되는 흐름을 균일하게 하여 진동 감소

- 선체 건조 후 쉽게 부착 가능
 - 노즐 등에 비해 가격이 저렴
 - 나무, 얼음덩이 등 이물질에 대한 추진기의 보호효과
- 라) 타 핀(rudder fin)과 반동 타(reaction rudder)



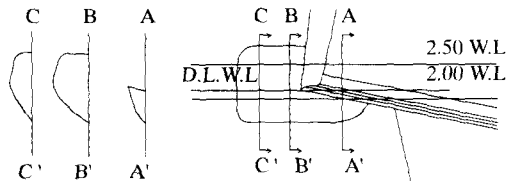
타 핀

반동타

추진기가 추진력을 얻기 위하여 회전함으로써 후류에 남겨놓은 회전 운동에너지를 회수하여 추진력을 얻는다. 즉, 추진기에 의한 유체의 회전 방향과 반대 방향의 회전을 유도하여 먼 후류에서 회전 속도가 없어지도록 하며 이를 위한 타 또는 핀의 단면을 적당히 설계하면 양력 발생으로 인한 추력 성분을 얻을 수 있다.

이러한 회전 운동에너지 회수의 개념으로는 추진기의 전방부에 설치하는 반동 핀(reaction fin), 비대칭 선미(asymmetric stern) 등이 있고, 추진기 후류에 설치하는 역회전 추진기(contra rotating propeller) 등이 있다.

마) 선미 단 벌브(stern end bulb)

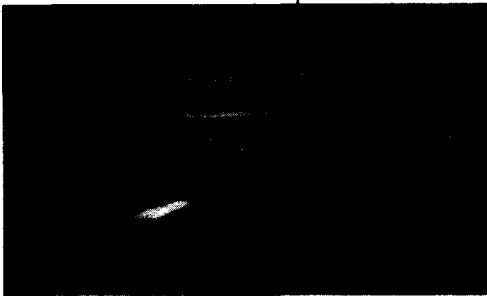


트랜섬 선미 등과 같은 선미에서 와류 저항이 크거나 선미파로 인한 조파 저항이 큰

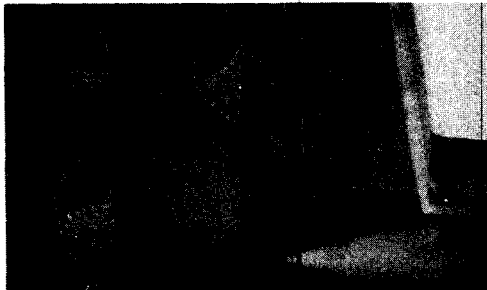
선박의 선미 끝단에 밸브를 부착함으로써 저항을 감소시킨다.

선미 밸브의 부착으로 선미에서의 흐름이 보다 부드럽게 되어 유선의 분리가 보다 더 후방으로 밀려나게 되고 따라서 와류 저항을 줄일 수 있다.

바) 트림 및 피치 개선장치



<모형시험장면>



<실선부착상태>

저자가 고속선박에 적용하기 위하여 개발한 트림 및 피치 개선장치(trim and pitching improver)를 어선에 적용하여도 좋은 효과를 얻을 수 있을 것이다.

이 장치는 선미에서 부양력을 발생시켜 고속의 배의 운동 선능을 개선시키며 정지상태에서도 배의 동요를 감쇄시킬 뿐 아니라 방향안정성을 향상시키는 효과도 있다.

3. 어선 모형시험 결과의 통계적 정리

이제까지 어선의 모형시험은 한국어선협회와 현대선박해양연구소와의 공동연구과제로 10 여척 정도 수행되었다. 모형시험 결과와

선형 특성과의 통계적 정리는 차후 어선의 설계 및 성능 추정에 귀중한 자료가 될 수 있으나 현재까지의 모형시험 결과만으로는 자료로서의 양이 충분치 못하다. 본 원고에서는 통계해석의 기본 이론의 소개와 일본에서 발표한 어선 저항의 통계해석 결과 소개 그리고 이제까지 한국어선협회와 현대선박해양연구소가 공동으로 수행한 모형시험 결과에 대한 통계해석 결과들을 정리하였다.

가. 상관분석(correlation analysis)

두 확률 변수(random variable) x, y간의 상관관계를 알고자 할 때에는 두 변수 x, y에 대한 크기 n인 확률 표본(random sample)을 취한 후, 얻어진 n개의 데이터,

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

로부터 두 변수간의 선형 관계(linear relationship)를 상관계수(correlation coefficient)라는 척도를 통하여 찾아보게 된다. 이처럼 두 변수간의 관련성을 상관계수라는 매체를 통하여 알아보는 통계적 분석을 상관분석(correlation analysis)이라고 한다.

두 변수 x, y간의 상관계수, r은 다음과 같이 정의된다.

조파저항 계수 C_w 와 구상선수의 형상계수간의 상관관계를 알아보기 위해서 상관계수를 다음식에 의해 계산한다.

$$r = \frac{S_{xy}}{S_{xx} \cdot S_{yy}}$$

여기서 $S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

나. 회귀분석(regression analysis)

1) 회귀분석 이론

변수들 간의 함수관계(functional relationship)를 측정된 데이터를 통하여 규명해가는 통계적 분석 방법을 회귀분석이라 하며, 선형 회귀 분석의 경우 다음과 같은 것들이 있다.

a) 단순회귀(simple regression)

독립변수(independent variable) 1개로 종속변수(dependent variable)와의 관계가 직선으로 가정되는 경우이며 그 모형은 다음과 같다.

$$y = a_0 + a_1x$$

예를 들면 두 변수 x와 y 간의 n개의 데이터(x_i, y_i), i = 1, ..., n에 관한 단순 회귀모형은 다음과 같은 가정아래 표현된다.

$$y_i = a_0 + a_1x_i + e_i$$

여기서 e_i: 잔차(residual)

a₀, a₁: 회귀계수

x_i: i번째 주어진 x 값

i = 1, 2, ..., n

회귀계수 a₀, a₁의 추정은 최소 제곱법(method of least squares)에 의하여 구한다.

즉, 윗식의 잔차 e_i의 제곱합을 최소로 하는 a₀와 a₁의 추정치를 구한다.

즉, 오차 자승합 S(standard deviation)가 최소가 되어야 하므로 이를 편미분하여 0으로 놓으면,

$$\frac{\partial}{\partial a_i} \left(\sum_{i=1}^n e_i^2 \right) = 0$$

따라서,
$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i) \cdot x_i = 0$$

a₀와 a₁의 추정치를 a₀' , a₁'으로 놓고 윗식을 정리하면

$$na_0' + a_1' \sum x_i = \sum y_i$$

$$a_0' \sum x_i + a_1' \sum x_i^2 = \sum x_i y_i$$

위 연립방정식으로부터 a₀'와 a₁'을 구해 다음과 같은 추정 방정식을 완성한다.

$$y = a_0' + a_1'x_i$$

b) 곡선 회귀(curvilinear regression)

독립변수 1개로 종속변수와의 관계가 곡선으로 가정되는 경우이며 그 모형은 다음과 같다.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_px^p$$

c) 중 회귀(multiple regression)

독립변수가 2개 이상이고 각 독립변수와 종속변수와의 관계가 1차 함수로 가정되는 경우이며 모형은 다음과 같다.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k$$

d) 다항 회귀(polynominal regression)

독립변수가 1개 이상이고(k ≥ 1) 종속변수와의 관계가 1차 이상(p ≥ 1)의 선형 관계를 가정하는 경우이며, k = 2, p = 2인 경우의 모형은 다음과 같다.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{22}x_2^2$$

2) 일본 어선들의 통계 해석 기법에 의한 유효마력 추정 소개

일본내의 기존 20톤 미만 각형정 어선 중, 연승어선, 저인망어선 및 채낚기 어선을 주된 연구의 대상으로 선정하였고 이 중 비

정상적으로 폭이 크거나 작은 선형은 유효마력 추정식의 정도(accuracy)향상을 위하여 제외하였다.

또한, 계통 모형선의 선형 요소를 $L/\nabla^{1/3}$, C_B 및 B/T 의 3요소로 결정하여 이들의 변화 범위를 다음과 같이 채택하였다.

$$\begin{aligned} L/\nabla^{1/3} &= 4.5, \quad 5.0(\text{모선}), \quad 5.5 \\ C_B &= 0.50, \quad 0.55(\text{모선}), \quad 0.60 \\ B/T &= 2.5 \quad 3.5(\text{모선}), \quad 4.5 \end{aligned}$$

따라서, 계통 모형선은 위와 같이 27척이 되지만 시험 연구의 시간적 제약 및 예산상의 문제로 현재의 FRP선과 장래의 FRP선으로서 사용 빈도가 높은 선형 요소를 갖는 12척으로 선정하였다. 저항시험은 일본선박연구소(SRC), 도오쿄 대학(Tokyo Univ.) 및 수산청의 각수조에서 공동 수행되었다.

계통 모형선은 길이가 1.8m이고 예인점은 중심 위치의 언직과 skag하면에 평행한 프로펠러 축과의 교점으로 하였다. 실험 결과의 통계해석에 의해 실선의 전저항 계수를 추정하게 되는데 이때의 정도(accuracy) 향상 및 이용 가능한 선형 요소의 범위의 확대를 위해 중방향 부력 중심(LCB)을 선형 요소 속에 포함시켜, 12척의 각 모형선에 대해 만재상태, 75% 만재(트림 2.5, 5%), 그리고 50% 만재(트림 5%) 상태 등 5상태의 시험이 수행되었다.

배의 초기 설계시에는 일반적으로 배수량과 설계 속도가 주어지는 것이 보통이므로 전저항 계수를 아래와 같이 정의하였다.

$$C_T = R_T / (1/2 \rho \nabla^{2/3} V^2)$$

또한, 마력 추정식 중의 매개변수(parameter)에도 복원력에 영향을 주는 장-폭비 대신에 $L/\nabla^{1/3}$ 을 사용하였으며, Froude 수도 길이의 변화에 따른 속도의 변화를 방지

하기 위하여 다음과 같이 표현하였다.

$$F_{nV} = V / \sqrt{\nabla^{1/3} \cdot g}$$

저항시험 결과로 부터 실선의 전 저항계수 C_{ts} 를 구하는 데는 일반적으로 다음식이 사용된다.

$$C_{ts} = C_{tm} - \frac{S_s}{\nabla^{2/3}} \{ (C_{fm} - C_{fs}) - \Delta C_f \}$$

단, $C_{ts} = R_{ts} / (1/2 \rho_s \nabla^{2/3} V_s^2)$: 실선의 전저항 계수
 $C_{tm} = R_{tm} / (1/2 \rho_m \nabla^{2/3} V_m^2)$: 모형선의 전저항 계수

C_{fm}, C_{fs} = Schoenherr의 마찰저항 계수

$$\Delta C_f = 0.0004$$

그런데, 계통 모형선의 만재상태에서의 평균 배수량이 22.5t 이기 때문에 각 모형선의 저항치를 배수량 22.5t 의 어선에 대한 것으로 환산한다.

$$22.5C_t = C_{tm} - \frac{S}{\nabla^{2/3}} \{ (C_{fm} - 22.5C_{fs}) - \Delta C_f \}$$

이 전저항 계수 $22.5C_t$ 를 다음식의 다항식으로 근사화하고, 시험상태 60에 대하여 선형요소와 속도(F_{nV})에 따른 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{14}$ 의 회귀계수(regression coefficient)를 구하였다.

$$\begin{aligned} 22.5C_t * 100 = & a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 \\ & + a_5X_1^2 + a_6X_2^2 + a_7X_3^2 + a_8X_4^2 \\ & + a_9X_1X_2 + a_{10}X_1X_3 + a_{11}X_1X_4 \\ & + a_{12}X_2X_3 + a_{13}X_2X_4 + a_{14}X_3X_4 \end{aligned}$$

여기서 X_1, X_2, X_3, X_4 는 선형 요소를 정규화(normalized)한 값으로서 다음 식과 같고

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{L_{WL} / \nabla^{1/3} - 5.6009}{0.5597} * 0.1 \\ X_2 &= \frac{B/T - 4.2945}{1.3319} * 0.1 \end{aligned}$$

$$X_3 = \frac{C_p - 0.5993}{0.0550} * 0.1$$

$$X_4 = \frac{LCB - 2.8595}{3.9787} * 0.1$$

$$C_{ts} = 22.5C_l - \frac{S_s}{\nabla_s^{2/3}}(22.5C_f - C_{fs})$$

$$EHP = 0.21396*(100*C_{ts}*\nabla_s^{7/6}*Fn\nabla^3)$$

3) 한국 표준 어선들의 저항계수와 선형 특성간의 상관분석 및 통계해석

이때 구해진 회귀계수(regression coefficient)는 다음 표와 같다.(표1)

계획선의 전저항 계수 C_{ts} 및 EHP는 22.5C_l로부터 다음 식들과 같이 구한다.

한국어선협회와 현대선박해양연구소가 공동으로 수행한 어선 모형시험 결과(표2)를 상관분석해 본 결과 다음과 같은 결과가 나타났다.

표 1 회귀계수 (regression coeffecient)

| $F_n \nabla$
回歸係數 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.3 | 1.5 | 1.7 | 1.9 | 2.1 |
|----------------------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| a ₀ | 4.2706 | 5.4663 | 8.6821 | 11.131 | 10.385 | 9.0290 | 7.6773 | 6.7325 | 6.1804 |
| a ₁ | -1.6608 | -6.8835 | -22.488 | -23.268 | -16.020 | -9.9775 | -7.3211 | -6.4861 | -6.3538 |
| a ₂ | 2.6236 | 4.3830 | 5.9437 | 2.2408 | 0.79837 | 0.87141 | 0.92681 | 1.3553 | 1.6577 |
| a ₃ | 2.2334 | 7.2743 | -1.2670 | -5.7397 | 0.30298 | 1.8156 | 2.0679 | 1.4353 | 0.62295 |
| a ₄ | -2.8917 | 0.30280 | 0.42152 | -0.50669 | -4.9641 | -3.4939 | -2.2287 | -1.2402 | -0.55818 |
| a ₅ | 11.276 | 20.155 | 52.037 | 40.248 | 14.158 | 12.270 | 9.1514 | 9.5660 | 11.471 |
| a ₆ | 12.214 | 10.745 | 13.346 | 4.2819 | 7.5200 | 1.7743 | 2.5243 | 2.2428 | -0.69320 |
| a ₇ | 6.3787 | 18.165 | 24.329 | 13.266 | 48.165 | 35.445 | 35.183 | 34.872 | 29.969 |
| a ₈ | 27.000 | 46.429 | 63.184 | 70.309 | 14.817 | 11.534 | 7.7379 | 4.1677 | 1.0344 |
| a ₉ | -10.855 | -0.86288 | -25.658 | -8.5464 | 9.3504 | 2.8744 | -3.1630 | -7.7654 | -7.6400 |
| a ₁₀ | 0.97256 | 1.4677 | 36.113 | 27.515 | 5.3804 | 2.3055 | 3.6671 | 10.464 | 15.879 |
| a ₁₁ | 6.5492 | 9.3891 | -4.7469 | 12.580 | 4.6480 | 0.50649 | -9.1023 | -18.863 | -25.270 |
| a ₁₂ | 7.7692 | 15.925 | 13.882 | 7.9623 | 21.991 | 13.099 | 8.1253 | 1.1900 | -5.0611 |
| a ₁₃ | 10.490 | 26.912 | 26.957 | 22.878 | 10.227 | 0.96951 | -2.1015 | -7.9877 | -15.640 |
| a ₁₄ | 1.3534 | 31.899 | 33.414 | 28.661 | 12.649 | 3.3822 | 0.28958 | -5.3504 | -11.169 |

○ 전 모형시험 결과의 상관 분석

| F_n | $L/\nabla^{1/3}$ | B/T | C_p | LCB |
|-------|------------------|---------|---------|---------|
| 0.30 | -0.4176 | -0.0736 | 0.0317 | 0.0208 |
| 0.35 | -0.5740 | 0.6447 | -0.5729 | -0.1710 |
| 0.40 | -0.7435 | -0.4791 | 0.1516 | 0.3467 |
| 0.45 | -0.5641 | -0.7393 | 0.5217 | -0.2348 |

$L/\Delta^{1/3}$ 이 타 계수보다 대체적으로 저항에 는 고속 영역에서 저항과 더욱 관계가 깊은 많이 미친 것으로 나타났으며 폭-홀수비(B/T) 것으로 나타났다.

○ 각형정 선형 모형시험 결과의 잉여저항 계수 대비 선형 특성간의 상관분석

| F_n | $L/\nabla^{1/3}$ | B/T | C_p | LCB |
|-------|------------------|---------|---------|---------|
| 0.30 | 0.2073 | 0.1532 | 0.6695 | -0.7334 |
| 0.35 | -0.5378 | -0.1541 | 0.5435 | -0.4885 |
| 0.40 | -0.6597 | -0.9224 | -0.0857 | 0.2869 |
| 0.45 | -0.3069 | -0.8238 | 0.2697 | -0.0558 |

저속에서는 LCB와 C_p 가 고속에서는 폭-홀 수비(B/T)가 저항에 영향을 많이 미친 것으로 나타났다.

○ 한국 표준 어선 모형시험 결과의 회귀 분석

저항 계수와 속도별 회귀분석을 수행하여 표 3 과 같이 회귀 계수들을 구하였고 이 계 수들에 의한 잉여저항 값과 모형시험 결과와 상관 분석에 의해서 선정된 변수들과 잉여 를 표 4 에 비교하였다.

표 2 모형선 제원 및 저항 비교
(한국어선협회, 현대선박해양연구소 공동연구)

| 항 목 | 선종 * | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------------------|-----------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| L_{WL} | (m) | 14.63 | 24.93 | 17.64 | 21.24 | 12.63 | 21.33 | 12.86 | 22.7 | 6.937 |
| ∇ | (m^3) | 23.62 | 142.49 | 63.66 | 86.8 | 18.1 | 114.13 | 22.6 | 118.4 | 2.06 |
| $L_{WL}/\nabla^{1/3}$ | | 5.10 | 4.77 | 4.42 | 4.80 | 4.81 | 4.40 | 4.55 | 4.62 | 5.45 |
| B | | 3.2 | 5.4 | 4.3 | 4.74 | 3.0 | 5.1 | 1.25 | 4.8 | 1.84 |
| T | | 0.93 | 1.7 | 1.40 | 1.38 | 0.936 | 1.672 | 0.989 | 1.764 | 0.29 |
| B/T | | 3.44 | 3.18 | 3.07 | 3.43 | 3.21 | 3.05 | 1.26 | 2.72 | 6.35 |

| 항 목 | | 선종 * | | | | | | | | | |
|----------------------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| C _p | | 0.70 | 0.75 | 0.69 | | 0.75 | 0.68 | 0.74 | 0.694 | 0.745 | * |
| LCB (%) | | -5.2 | -3.8 | -4.5 | | -7.7 | -4.6 | -3.1 | -4.2 | -3.3 | -0.5 |
| C _R × 103 | Fn=0.30 | 4.10 | 2.69 | 3.82 | 4.42 | 6.05 | 5.21 | 4.72 | 4.64 | 4.69 | 4.62 |
| | Fn=0.35 | 5.75 | 4.65 | 7.22 | 3.26 | 8.22 | 7.11 | 7.95 | 7.34 | 7.93 | 6.85 |
| | Fn=0.40 | 8.12 | 7.67 | 9.72 | 8.41 | 9.81 | 9.68 | 11.52 | 12.50 | 10.71 | 9.38 |
| | Fn=0.45 | 12.51 | 13.53 | 12.35 | 10.58 | 16.11 | 13.10 | 15.83 | 19.80 | 18.68 | 10.98 |
| EHP (KW) | Vs=8 노트 | 20.52 | 32.43 | 29.85 | 24.53 | 41.52 | 19.33 | 36.06 | 25.69 | 40.13 | 7.14 |
| | Vs=9 노트 | 37.79 | 56.11 | 54.58 | 43.87 | 75.47 | 34.85 | 66.83 | 50.36 | 72.04 | 10.08 |
| | Vs=10노트 | 74.91 | 94.73 | 90.28 | 73.62 | 113.14 | 61.71 | 115.38 | 90.37 | 119.25 | 12.78 |
| | Vs=11노트 | * | 157.39 | 138.74 | 114.19 | 168.39 | 106.79 | 190.36 | 140.94 | 185.04 | 15.00 |
| | Vs=12노트 | * | 266.25 | 194.44 | 160.41 | 300.51 | 182.19 | 307.04 | 197.32 | 289.13 | 17.50 |
| 모형시험일자 | | 92.4.1 | 92.4.3 | 88.3.10 | | 91.4.19 | 89.10.31 | 89.11.7 | 88.8.20 | 88.9.30 | 91.5.27 |
| 선 형 | | 각형정 | 배수형 | 각형정 | 복 합 | 각형정 | 각형정 | 배수형 | 각형정 | 복 합 | 반쌍동선 |

- * 1. G/T 7.93톤급 다목적 어선
 2. G/T 52톤급 유자망/채낚기 어선
 3. G/T 20톤급 연승어선
 4. G/T 29톤급 연승어선
 5. G/T 6.7톤급 연안채낚기어선
 6. G/T 39톤급 근해유자망어선
 7. G/T 7.9톤급 연안연승어선
 8. G/T 39톤급 중형기저어선
 9. G/T 1.0톤급 다목적어선

표 3 어선 모형시험 결과(C_R)의 회귀분석에 의한 회귀계수

| 변수 | 각 형 정 모 형 | | | | 전 체 모 형 | | | |
|----------------------|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
| CONST. | 18.180 | 27.496 | 20.794 | -26.330 | 12.114 | 18.434 | 21.588 | 25.084 |
| Lwl/▽ ^{1/3} | -0.5263 | -2.9461 | -1.6669 | 1.5133 | -1.4412 | -1.9763 | -1.8941 | 0.0748 |
| B/T | - | - | -1.5793 | -3.6224 | 0.1723 | 0.0672 | -0.4018 | -2.0795 |
| C _p | -22.3066 | -14.8562 | - | 63.1423 | -1.8366 | -3.2966 | - | -5.5770 |
| LCB | -0.9072 | -0.7694 | -0.3087 | - | - | - | 0.3205 | - |

표 4 모형시험 결과와 회귀분석에 의한 계산 결과의 Cr 비교

□ 각형정 모형

| Fn
선종 | 모형시험 결과 | | | | 회귀분석에 의한 계산 결과 | | | | 오차 (%) | | | |
|----------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|--------|------|------|------|
| | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
| 1 | 0.00410 | 0.00575 | 0.00812 | 0.01251 | 0.00460 | 0.00607 | 0.00847 | 0.01313 | 12.2 | 5.6 | 4.3 | 5.0 |
| 3 | 0.00382 | 0.00722 | 0.00972 | 0.01235 | 0.00454 | 0.00769 | 0.00997 | 0.01281 | 18.8 | 6.5 | 2.6 | 3.7 |
| 4 | 0.00605 | 0.00822 | 0.00981 | 0.01611 | 0.00591 | 0.00814 | 0.00975 | 0.01587 | 2.3 | 1.0 | 0.6 | 1.5 |
| 5 | 0.00521 | 0.00711 | 0.00968 | 0.01310 | 0.00465 | 0.00676 | 0.00913 | 0.01226 | 10.7 | 4.9 | 5.7 | 6.4 |
| 7 | 0.00464 | 0.00734 | 0.01250 | 0.01980 | 0.00411 | 0.00701 | 0.01252 | 0.01981 | 11.4 | 4.5 | 0.2 | 0.1 |

□ 전체모형

| Fn
선종 | 모형시험 결과 | | | | 회귀분석에 의한 계산 결과 | | | | 오차 (%) | | | |
|----------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|--------|------|------|------|
| | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
| 1 | 0.00410 | 0.00575 | 0.00812 | 0.01251 | 0.00407 | 0.00628 | 0.00888 | 0.01441 | 0.7 | 9.2 | 9.4 | 15.2 |
| 2 | 0.00269 | 0.00465 | 0.00767 | 0.01353 | 0.00441 | 0.00675 | 0.01006 | 0.01465 | 63.9 | 45.2 | 31.2 | 8.3 |
| 3 | 0.00382 | 0.00722 | 0.00972 | 0.01235 | 0.00501 | 0.00763 | 0.01054 | 0.01518 | 31.2 | 5.7 | 8.4 | 22.9 |
| 4 | 0.00605 | 0.00822 | 0.00981 | 0.01611 | 0.00441 | 0.00671 | 0.00865 | 0.01413 | 27.1 | 18.4 | 11.8 | 12.3 |
| 5 | 0.00521 | 0.00711 | 0.00968 | 0.01310 | 0.00449 | 0.00690 | 0.00971 | 0.01498 | 13.8 | 3.0 | 0.3 | 14.4 |
| 6 | 0.00472 | 0.00795 | 0.01152 | 0.01583 | 0.00494 | 0.00750 | 0.01103 | 0.01494 | 4.7 | 5.7 | 4.3 | 5.6 |
| 7 | 0.00464 | 0.00734 | 0.01250 | 0.01980 | 0.00450 | 0.00724 | 0.01112 | 0.01893 | 3.0 | 1.4 | 11.0 | 4.4 |
| 8 | 0.00469 | 0.00793 | 0.01071 | 0.01868 | 0.00456 | 0.00703 | 0.01069 | 0.01562 | 2.8 | 11.3 | 0.2 | 16.4 |
| 9 | 0.00462 | 0.00685 | 0.00938 | 0.01098 | 0.00462 | 0.00677 | 0.00855 | 0.01006 | 0.0 | 1.2 | 8.8 | 8.4 |
| 10 | 0.00650 | 0.00890 | 0.01350 | - | 0.00604 | 0.00911 | 0.01338 | 0.01594 | 7.1 | 2.4 | 0.9 | - |

4. 결 언

모형시험을 수행한 선형 자료가 충분하였으면 유사한 선형들끼리 모아서 여러 각도로 통계해석을 시도하여 실제 설계에 필요한 좋은 자료를 얻을 수 있었을 것으로 사료되나, 아직까지는 이에 미치지 못한 것이 아쉽다.

그리고 지면 관계상 이제까지 어선협회와

현대선박해양연구소가 공동으로 모형시험을 수행한 선형 중 선형 개선 내용의 비교 정리 부분은 차기에 기회가 되면 정리할 예정이다.

선형 개선 내용의 정리는 선형 설계에 직접적으로 좋은 자료가 될 것이다.