

활주형선(Planing Hull)의 선형설계와 유체동력학적 특성고찰

박 명 규* · 신 영 균** · 신 영 식***

Hull Form Design and Hydrodynamic Characteristic Consideration of Planing Hull Form

Myung-Kyu Park · Young-Kyun Shin · Young-Sik Shin

〈 목 차 〉

- | | |
|--------------------|-----------------|
| I. 서 론 | IV. 선형설계 및 모형실험 |
| II. 활주형선에 대한 기본개념 | V. 결 론 |
| III. 주요 유체역학적 특성고찰 | ※ 참고문헌 |

Abstract

The planing hull is designed specifically to achieve relatively high speed on the surface of the water and is perhaps the oldest, simplest and most extensively employed member of the family of modern marine vehicles.

It is expected that the planing hull will continue to find increasing utilization in military and commercial applications.

In this paper, we will describe the hydrodynamic characteristics of planing hull, discuss the effect on planing performance.

Also, model tests are carried out in towing tank and the results are compared with hydrodynamic technology of planing hull.

* 한국해양대학교 해양시스템공학부 교수

** (주)한진중공업 특수선설계부 차장

*** (주)현대중공업 대동조선 기술고문

I. 서 론

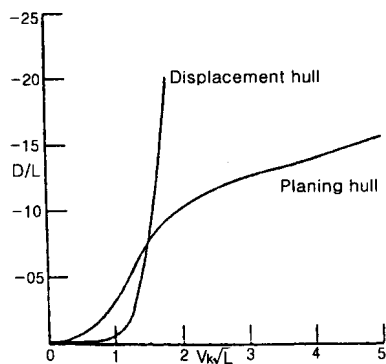
활주형선(Planing hull)은 고속선형 가운데 역사가 가장 깊고 보편적으로 활용되고 있는 선형이다. 그 이유는 건조비가 비교적 저렴하며 운항하기가 쉽고 고속을 낼 수 있기 때문에 전세계적으로 상용은 물론 각국 해군의 공격용 및 연안경비용으로 활발하게 개발되어져 왔다.

Jane's Fighting Ship[1]에 의하면 군사용으로만 개발된 실적이 전세계적으로 약 2000여 척 이상이 되는 것으로 알려져 있다. 우리나라에서도 해군 및 해경에서 70년대 이후 상당수의 활주형선이 건조되어져 왔으며 특히 지난 서해상에서 발생한 연평해전에서 북한 해군과 접전을 벌인 우리나라의 경비정이 활주형 고속 경비정인 PKM이었다.

이와같이 활주형선은 앞서 언급한 여러가지 장점과 수많은 건조실적으로 설계 및 건조기술이 완숙 단계에 이르러 있음에도 불구하고 내항성능(Seakeeping performance)의 불량으로 상업용으로는 개발 실적이 미미한 실정이다. 그러나 자세제어장치 즉 Fin-stabilizer나 A.R.T등의 횡동요 감쇄장치를 이용하면 운동성능의 향상을 기대할 수 있음으로 향후 상용으로의 발전 가능성은 대단히 밝다고 하겠다. 더구나 활주형선의 근본원리가 고속 배수량선(Fast displacement ship)이나 고속 카타마란(Fast catamaran)선형 개발시 그대로 이용되고 있고 이들 선형들의 건조 실적도 빠른 증가추세에 있음으로 활주형 선형의 유체 동력학적 특성을 이해하는 것이 상당히 중요하게 된다.

이러한 배경을 바탕으로 본 논문에서는 활주선형 설계시 반드시 이해해야할 유체동력학적 설계요소를 살펴보고 직접 선형설계 및 모형실험 결과와 비교 검토함으로써 조선 기술자들에게 이해의 폭을 넓히도록 하였다.

II. 활주 선형에 대한 기본 개념



〈그림 1〉 Typical Curves of D/L Ratio vs Speed Length Ratio

활주선형은 고속에서 물의 동압(Hydro-dynamic pressure)을 이용하여 선체를 부양함으로써 선체 중량의 대부분을 이 동압을 이용하여 지지 하게 된다. 결국 마찰저항(Frictional resistance)을 극소화 시킬수 있고 고속을 얻을수 있다.

그러나 활주선형이 모든 속도 범위에 걸쳐 저항성능이 우수한 것은 아니고 임계속도(Critical speed) 이하 (통상 속장비 1.3이하)에서는 일반 배수량선에 비해서 저항성능이 상당히 불량하다.[2]

〈그림 1〉에서는 활주형선에 대한 전형적인 항-양비(Drag/Lift ratio) 특성을 보여주고 있다.

저속에서 저항특성이 극히 불량한 이유는 선저가 평편하고

선저 경사각(Deadrise angle) 및 트랜섬 선미(Transom stern)를 채택하기 때문인데 이로인한 선체주위의 유동 특성 불량 및 선미부에서 와류저항이 대단히 크기 때문이다.

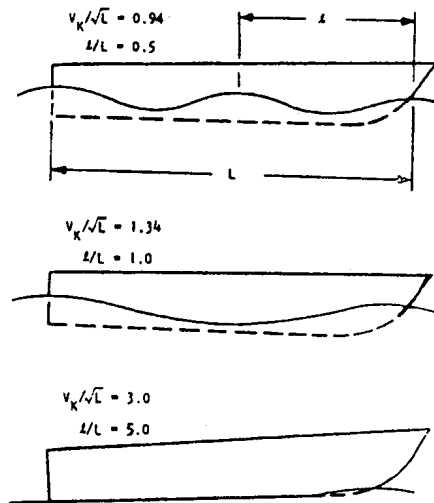
따라서 활주형선을 설계할 때에는 속장비(V/\sqrt{L})의 개념을 확실하게 이해할 필요가 있으며 통상 완전한 활주상태를 얻으려면 속장비가 3.0 이상이 될수 있도록 계획 속력과 선체길이를 상정해야 한다.

선체가 일정 속도로 전진할때 발생하는 파(Wave)는 선체와 같은 속도로 움직이게 되는데 이때 발생하는 파가 트로코이드파 (Trochoidal wave)와 유사하다고 한다면 속도 V 에 대한 파장 λ 는 다음과 같다.

$$\lambda = 0.557 V_{(Kn)}^2$$

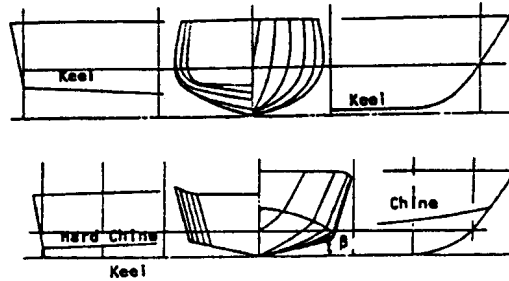
즉, 발생하는 파의 파장은 속도 제곱에 비례하는데 <그림 2>에서 볼 수 있는 바와 같이 속장비가 3.0 이상이 되어야 그때 발생하는 파의 제1 파정(wave crest)이 선미 훨씬 후방에서 생성되므로 선체자세가 일정 트림각을 갖고 안정 상태로 된다.

그러나 선수부에서 발생한 파의 제1 파정이 선미 바로 뒷쪽에서 발생하는 이른바 HUMP 속력에서는 선미가 깊게 잠기고 과도한 선미 트림형태가 된다. 이렇게 되면 소요마력이 급격하게 증가 하게 되는데 이 HUMP 속력을 넘으려면 선미 형상의 바토크 라인(Buttock Line)을 직선으로 하고 트랜섬 부위의 폭은 가급적 크게, 트랜섬 홀수는 깊게 잠기도록 하여야 한다.



<그림 2> Wave Pattern vs Speed Length Ratio

<그림 3>은 Round bilge 형상과 Hard Chine형 활주형선의 대표적인 선도(Lines) 형상으로서 위에서 기술한 선형특성을 잘 반영하고 있음을 알 수가 있다



〈그림 3〉 Planing Hull Form(round bilge type and hard chine type)

Ⅲ. 주요 유체역학적 성능 고찰.

활주형선의 유체 동력학적 특성 및 설계기술은 Savitsky[3] 및 Clement & Blount[4]에 의해서 발전되어 왔는데 그 바탕은 계통적인 실험 데이터에 근거를 두고 확립되었다. 이러한 실험 결과들은 설계에 좀더 쉽게 활용될 수 있도록 회귀분석(Regression Analysis)을 통한 경험식으로 정리 되었고 선형 설계시 직접적으로 활용하여도 충분할 정도로 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

일반 배수량형(Displacement type)의 선형과 달리 고속 활주형선을 설계할때 설계자가 특히 고려할 사항을 정리하면 다음과 같다.

1. 유체동력학적양력(Hydrodynamic drag)

앞서 언급한 바와 같이 활주형선은 유체동력학적인 동압을 이용하여 선체를 부양하여 고속을 낼수 있는 선형이기 때문에 초기 설계시 양력계산을 수행해야 한다. 양력계수는 참고문헌[5]에 따라 다음 식을 이용하면 비교적 수월하게 초기설계시 활용할 수 있다.

$$C_{LO} = \tau^{1.1} (0.0120\lambda^{1/2} + 0.0055\lambda^{5/2}/C_v^2)$$

여기서, $C_{LO} = \Delta^{1/2} \rho V^2 b^2$

τ = 트림각, *degrees*

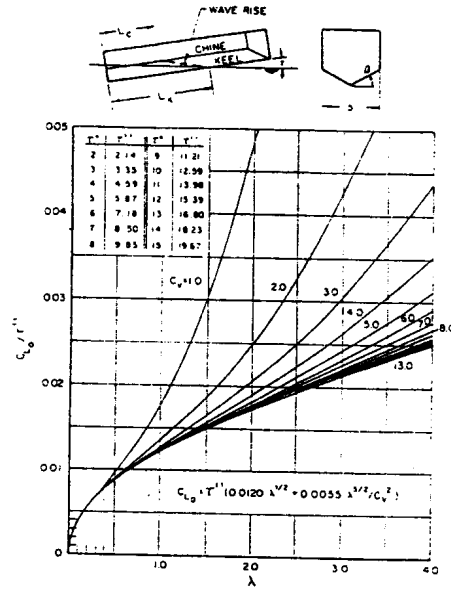
λ = 침수길이/폭비

C_v = 속력계수 = V/\sqrt{gb}

V = 속력, *ft/sec*

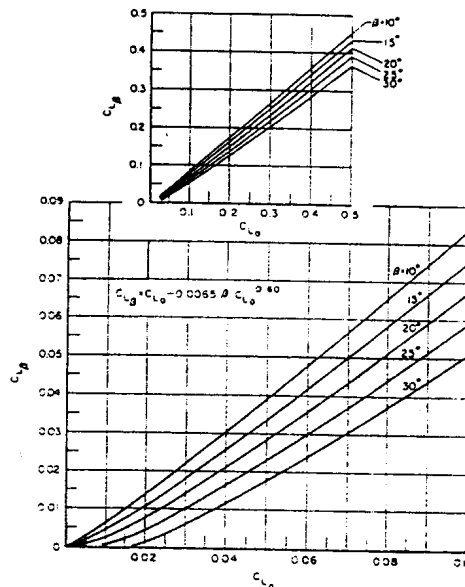
b : 활주면의폭, *ft*

g = 중력가속도, *ft/sec²*



<그림 4> Lift Coefficient of a Flat Planing Surface: $\beta = 0^\circ$

<그림 4>에서는 활주면상에서 발생하는 양력계수 C_L 을 선저각(Deadrise angle) 0° 을 기준으로 보여주고 있으며 <그림 5>는 선저각 변화에 따른 양력계수의 변화범위를 보여주고 있다. <그림 4>와 <그림 5>에서 알 수 있는 바와 같이 선형특성이 일정할 경우 선저각이 증가 할수록 양력계수는 감소함을 알 수 있다.



<그림 5> Lift coefficient of a deadrise Planing surface

2. 유체동력학적 항력 (Hydrodynamic drag)

활주형선의 유체동력학적 항력은 선저에 수직으로 작용하는 양력에 기인한 압력항력(Pressure drag)과 선저에 접선방향으로 작용하는 점성항력(Viscous drag)으로 나눌수 있다.

<그림 6>은 전체항력 가운데 이들 성분의 비율을 개략적으로 보여 주고 있는데 선형 설계시 항력과 관련하여 주요 고려 사항을 정리 하면 다음과 같다.

- 항력/양력비는 통상 트림각 4° 이하에서는 선저 마찰에 기인해서 점성저항이 커지며 4° 이상에서는 압력항력이 가파르게 증가 한다.
- 트림각이 작을때 선저 경사각이 증가 함에 따라 항력/양력비는 증가하게 된다.
- 계통적인 실험에 의하면 내항성능(Seakeeping performance)면에서 요구되는 선저 경사각은 선미부 트랜섬 부위에서 약 15°, 선수부에서 약 50° 일때 성능 특성이 우수한것으로 알려져 있다.

한편 완전활주 상태에서 활주선의 저항은 참고 문헌[3]에서 제시한 다음식에 의해서 쉽게 추정할 수가 있다.

$$R = W \tan \tau + \frac{1}{2} \rho V^2 \lambda b^2 C_{FO} / (\cos \tau \cos \beta)$$

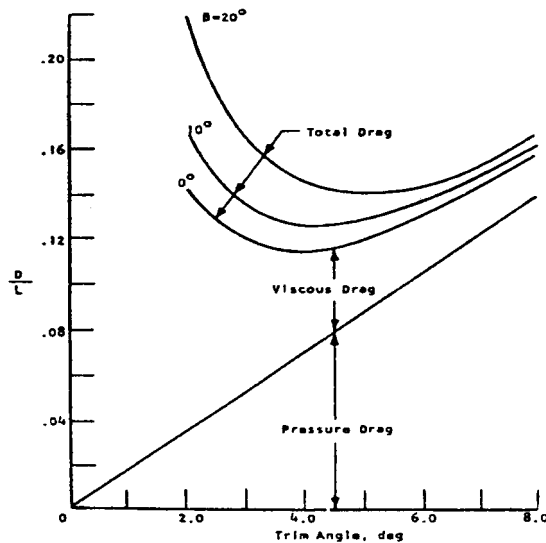
여기서, $C_{FO} = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2}$

$R_n = \text{Reynold's No.} = VL/\nu$

τ = 트림각

β = 선저경사각

W = 선체중량

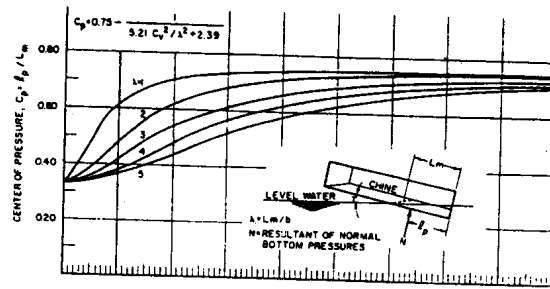


<그림 6> Variation of drag-lift ratio for prismatic planing surface

3. 압력중심 및 트림

활주형선의 트림각은 성능에 지대한 영향을 미치므로 초기 선형설계시 계획된 트림각이 유지될수 있도록 각별히 주의 해야 한다. 따라서 일반배치시 중량의 종방향 분포를 충분히 고려해야 하며 선체 완성시에는 트랜섬 플랩(Transom flap)이나 연료유 발라스트를 이용하여 적정 항주자세를 유지할 수 있다.

활주형선의 압력 중심은 <그림 7>에서 보여주고 있는 경험식으로 부터 추정할 수 있는데 저속에서 고속범위에 걸쳐 트랜섬 앞부분 평균 침수길이의 33~75% 범위에서 변화함을 알수가 있다



<그림 7> Center of pressure of planing surface

4. 파랑 충격 가속도(Wave impact acceleration)

활주형선의 파랑충격 가속도 값을 구하기 위해서는 현재로서는 모형실험외에 별다른 방법이 없는데 초기설계시에는 Fridma가 계열실험을 수행하여 만든 경험식을 이용하면 만족할만한 값을 추정할 수가 있다.[6]

$$\overline{n_{CC}} = 0.0104(H_{1/3}b + 0.084) \frac{\tau}{4} \left(\frac{5}{3} - \beta/30 \right) \times (V_k/\sqrt{L})^2 (L/b) C_d$$

여기서,

$H_{1/3}$ = 유의파고
(Significant Wave Height)

τ = 트림각

β = 선저경사각(deg.)

V_k = 속력(kts)

L = 수선길이(ft)

b = 폭(ft)

$C_d = \Delta/wb^3$

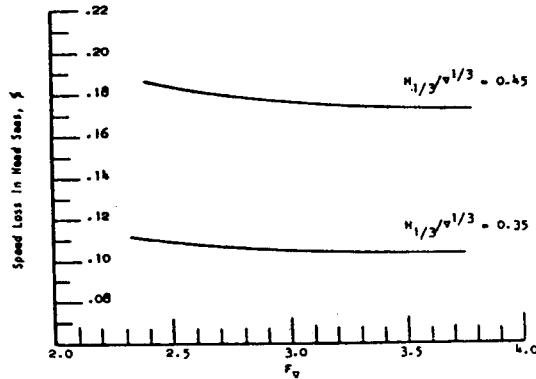
w = 물의중량밀도(lbs/ft³)

5. 파랑중 속도손실(Speed loss in seaway)

활주형선의 파랑중 속도손실을 정확하게 초기에 예측한다는 것은 유사선의 모형실험 결과 및 실선 데이터가 없으면 불가능 한데 여하간에 설계인자는 개략적인 값을 상정해야 한다. 가장 영향을 미치

는 주요요소는 해상상태이며 계열 모형실험 결과에 의하면 트림각 및 선저경사각이 감소 할 수록 파랑중 속도손실은 증가하는 것으로 알려져 있다.

〈그림 8〉은 L/B가 비교적 큰 활주형선의 파랑중 속도손실을 보여주고 있는데 전 속도범위에 걸쳐 대략 12~18%정도 속도 손실이 일어 남을 알수 있다.



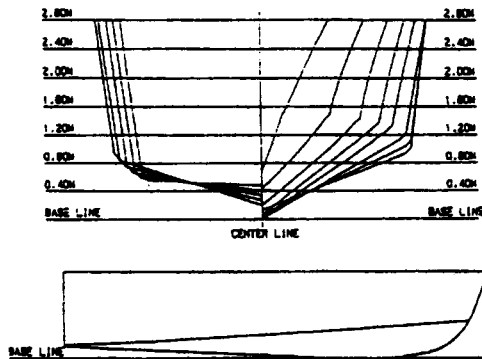
〈그림 8〉 Speed loss in a seaway for typical high L/B planing hull

IV. 선형설계 및 모형실험

이상에서 검토한 바와 같이 활주선형 설계시 고려해야할 유체역학적인 특성을 충분히 고려하여 선형을 설계하였으며 모형실험을 수행하여 관련특성을 비교 검토 하였다.

설계선형은 45 ton급 연안 경비정으로서 설계속력은 30 노트이며 일반 배치특성에서 요구되는 길이 및 활주형 선형에서 요구 되는 속장비 ($V/\sqrt{L}=3.0$)를 고려하여 주요 존법을 결정 하였다.

선체 주요특성 및 정면선도는 table 1 및 〈그림 9〉에서 나타내었다.



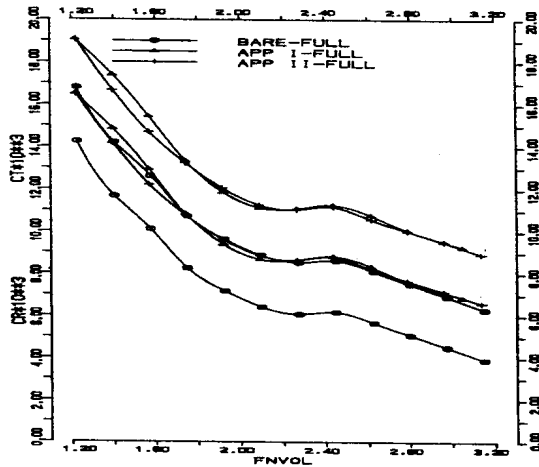
〈그림 9〉 설계선형의 정면선도 및 측면도 형상

〈table 1 설계선형의 주요제원〉

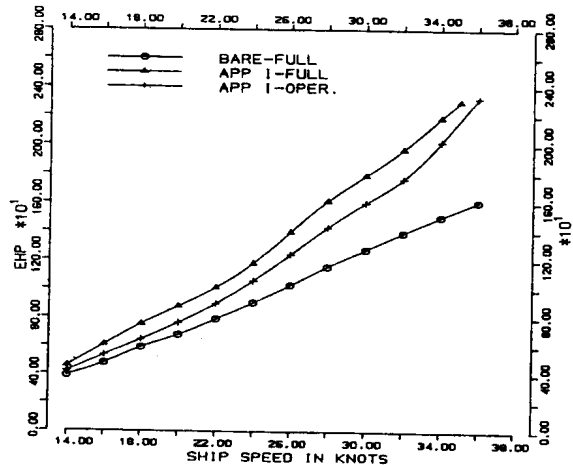
Lbp(m)	18.6
Bmld(m)	5.5
Dmld(m)	3.2
d(m)	1.12
S(m ²)	94.3
Δ(ton)	45
KB	0.789
LCB	1.061
Cb	0.383
Cp	0.8363

선저경사각은 중앙에서 약 18°를 주었으며 설계선형의 주 운항구역이 평수 구역임으로 내항성능 보다는 저항성능을 극대화 할 목적으로 선미 트랜섬 부위의 선저경사각은 2°로 하였다

모형실험은 나선저항 및 본선형의 주요 부가물인 2개의 Rudder와 2개의 스트럿(Strut)를 부착한 부가물 저항실험을 모두 수행하였으며 만재상태(Full load)와 최소 운항상태(Min.operating load) 2홀수에서 수행하였다. <그림 10>은 설계선형의 속도에 따른 저항특성의 변화를 보여주고 있는 모형실험 결과로서 2항에서 언급한 바와 같이 속장비 1.3 이상에서 활주현상이 발생함으로 인하여 잉여저항이 급격하게 감소함을 알수가 있다.



<그림 10> Curves of Resistance Coefficients



<그림 11> Curves of Effective Power (Bare hull /with App.)

<그림 11>은 설계선형의 나선저항 및 부가물 저항실험 결과로서 설계속력 30 노트에서 만재상태에서는 부가물로 인한 저항 증가량이 약 40%, 최소 운항상태에서는 약 25%의 저항증가를 보이는등 고속활주형선에서 부가물 저항은 전체저항에서 차지하는 비율이 대단히 크다는 것을 알수있다.

그 이유는 활주상태에서 선체는 침수표면적이 급격히 감소되지만 주요 부가물은 그대로 수면하에 있기 때문이다. 따라서 저항특성이 우수한 활주선형을 설계하기 위해서는 부가물 설계시 특히 주의해야 할 필요가 있다.

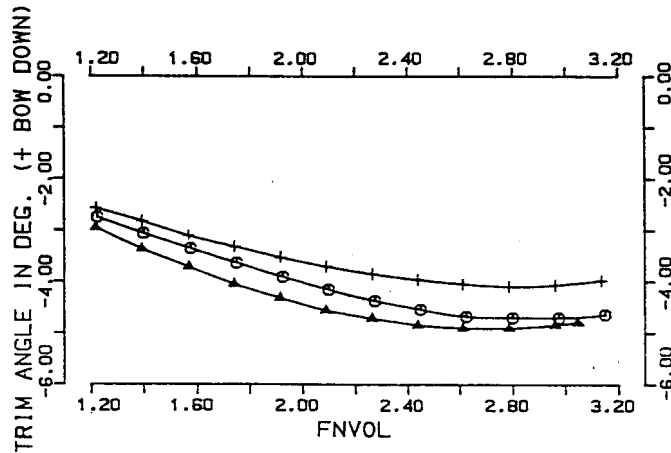
한편 활주선형은 고속에서 침수길이가 변하고 양력 발생으로 선체가 부양하기 때문에 배의 수선간장(Lbp) 또는 수선길이(Lwl)를 바탕으로한 속장비는 더이상 의미가 없게된다.따라서 용적 Fn를 사용하게 되는데 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{용적 } F_n = V/\sqrt{g\nabla}^{1/3}$$

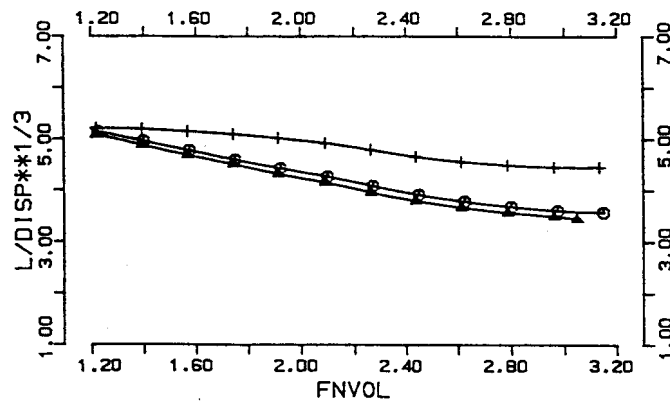
여기서 V = 속력, kts , g = 중력가속도, ft/sec^2 , ∇ = 배수용적, ft^3

〈그림 12〉는 설계선형의 항주트림 변화를 보여주고 있는데 3항에서 언급한 바와 같이 계획속력(용적 $F_n=0.28$)에서 약 4~5°의 항주자세가 유지됨을 알 수가 있다. 초기설계시 상정한 적정 트림각 4°와 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

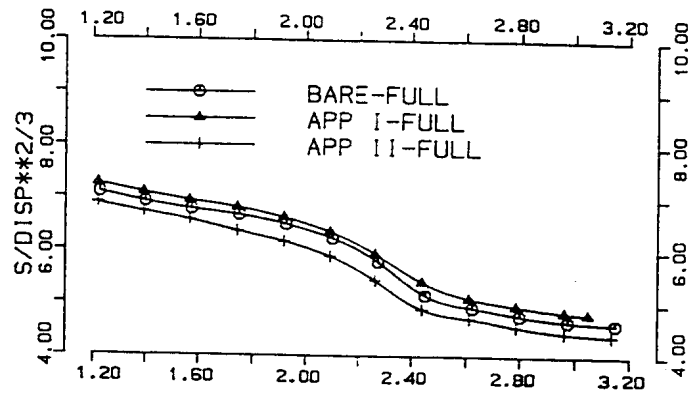
〈그림 13〉, 〈그림 14〉는 설계선형의 속도에 따른 침수길리와 침수 표면적 변화량을 보여주고 있으며 계획속력 근처에서 침수길리 및 침수표면적 값이 급격히 감소함을 알 수가 있다. 이것은 본선형이 계획 속력에서 충분히 활주상태가 일어나고 있음을 보여주고 있다고 말할 수 있다.



〈그림 12〉 Curves of Trim Angle

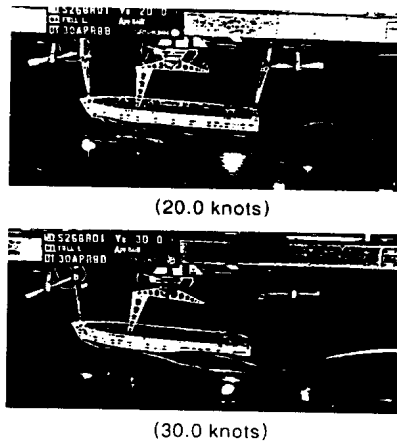


〈그림 13〉 curves of Wetted Length



<그림 14> Curves of Wetted Surface Area

<그림 15>는 설계선형의 활주상태를 보여주는 사진으로서 2항에서 기술한 바와같이 선미부 파 (Wave)가 선미 뒤편에서 발생하거 있음을 알 수가 있다.



<그림 15> Photographs of Running Ship Model

V. 결 론

이상의 연구결과를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 활주선형 설계시 계획 속장비 설정은 대단히 중요하며 계통실험 및 본 실험결과를 고려했을때 속장비는 3.0 이상으로 계획 되어야 한다.

2. 초기 선형설계시 적정 항주트림의 상정이 매우 중요한데 일반 배치 특성 및 중량제어(Weight control)에 유의할 필요가 있으며 초기 설계시 약 4°를 고려하여 설계를 진행하면 실용상 무리가 없다.
3. 활주형선의 저항특성상 주요 부가물인 스트럿과 Rudder의 저항이 전체저항 가운데 차지하는 비율이 대단히 큼으로 부가물 설계시 신중을 기해야 한다.
4. 향후 선저 경사각(Deadrise angle)이 저항특성 및 내항성능에 미치는 영향을 상세하게 검토할 필요가 있으며 고속 프로펠러로 인한 Rudder와 스트럿의 캐비테이션에 대한 연구가 함께 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. "Jane's fighting ship 1997-1998", Jane's Publishing Inc. USA
2. Savitsky, Daniel, "Hydrodynamic Design of Planing Hulls", Marine Technology, Vol. 13, No.4, Oct. 1976
3. Savitsky, Daniel and P. W. Brown, "Procedure for Hydrodynamic Evaluation of planing Hulls in Smooth and Rough Water", Marine Technology Vol.13, No.4, Oct. 1976
4. Clement, E. P and D. L. Blount, "Resistance Tests of a Systematic Series of Planing Hull Forms", SNAME Trans. Vol.71, 1963
5. Savitsky, Daniel, "Planing Craft", Naval Engineer's Journal, Vol97, Feb. 1985
6. Fridsma, G., "A Systematic Study of the Rough Water Performance of Planing Hulls in Irregular Waves", Davidson Lab., Stevens Institute of Tech. Report 1495, Mar. 1971