技術報告

SWATH형 고속 연안 여객선의 설계기술에 관한 연구

이규열* · 이동곤* · 김응섭** · 김진구** · 김정환**

A Study on the Design Technology of SWATH Ship for High Speed Coastal Passenger Vessel

by

K-Y Lee* · D-K Lee* · E-S Kim** · J-G Kim** · J-H Kim**

Abstract

There is at present a growing interest in the use of SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull) ship for a variety of purposes due to their good seakeeping characteristics, small speed reduction in wave, and large deck area. Highly sophisticated design technology is requested to develop the SWATH ship.

This paper describes the design technology for high speed coastal passenger SWATH ship which includes feasibility study, general arrangement and hull form design, resistance and propulsion test, motion test in regular waves, control fin design, and structural design.

1. 서 언

SWATH선은 수선면적이 작고 부력을 받는 주선체(lowerhull)가 물속깊이 잠겨 있으므로 파랑에 의한 파의 강제력을 작게 받게 되어 선체운동이 일반선에 비하여 대폭 감소하게 되고, 선체의 고유주기가 길어지게 되어 일반적인 해상상태에서 공진상태를 피할 수 있다. 또한 운동성능이 우수하므로 파랑중의 부가저항이 적어 속력 손실(speed loss)이 적을뿐만 아니라 쌍동형의 선체는 넓은 갑판면적을 제공한다[1, 2]. 따라서 현재까지 건조된 SWATH선은 악천후속에서도 정상항해가 요구되며 넓은 갑판면적을 필요로 하는 조사선이나 군사용 선박 및 여객선 등에 응용되어 왔다. SWATH선은 80년대에 본격적으로 건조되기 시작하였고 실선 시운전 및 운항경험에 의해 우수한 성능이 속속 입증됨에 따라[3, 4] 앞으로 보다 많은 SWATH형 선박이 건조될 것으로 예상된다. 그러나 SWATH선은 수선면적이 작으므로 중량변화에 의한 흘수변화나 트림이 일어나기 쉽고, 종복원 모멘트가 작아 어느 속력 이상에서는 종방향 수직면상에서의 운동자세가 불안정하게 되는 경우가 있으며 파랑에 의한 횡방향 힘을 받게 되면 횡강도상의 문제점이 발생할 수 있다. 그러므로 SWATH선의 설계기술은 일반선의 경우와는 많이 다르고 실적선의 수가 적을 뿐만 아니라 설계기술 자체가 공개되고 있지 않기 때문에 이의 습득이 쉽지 않다.

본 연구에서는 이상의 장단점을 고려하여 SWATH선의 설계에 관련된 설계기술을 자체 연구하였고 이를 고속 연안 여객선에 응용하여 SWATH형 여객선의 prototype에 대한 초기설계를 수행하였다.

본 연구결과는 과학기술처 특정연구사업의 일환으로서 한국기계연구소 대덕선박분소와 현대중공업(주) 특수선사업부가 공동으로 수행한 "최소 수선면 쌍동선(SWATH)의 개발"의 1차년도 연구 결과[5]의 일부분임을 밝혀 둔다.

본 기술보고는 대한조선학회 1987년도 춘계연구발표회에서 발표된 내용임
접수일자 : 1987년 4월 30일, 재접수일자 : 1987년 6월 27일
* 정회원, 한국기계연구소 대덕선박분소
** 정회원, 현대중공업(주) 특수선사업부

2. 기본 계획

타당성조사를 통하여 다음과 같은 설계조건 하에서 prototype의 고속여객 SWATH선의 기본계획을 수립하였다.

2.1. 항로 및 항속거리

현재 국내의 쾌속 여객선이 운항하고 있는 항로 가운데서 계절에 관계없이 일정한 승객이 있으며, 다른 항로 보다 선복량이 많은 부산~거제도 항로를 대상으로 하였다. 본 항로는 향후 육로의 발달로 인한 경쟁력 상실의 위험이 적고 꾸준한 승객의 증가가 예상되며, 기상악화에 의한 기존선박의 결항이 많아 SWATH선의 운항이 적합한 것으로 사료된다. 본 항로의 항해거리는 1항차당 약 46해리이며, 선박의 크기를 제한하는 항구의 수심이나 여객 터미널의 안벽길이 등은 소형 여객선에서는 별 문제가 되지 않으나 부산 영도대교의 통과높이는 6 m로 제한을 받는다.

2.2. 크기 및 항해속력

선박의 크기는 과거 물동량의 체계적인 분석과 아울러 물동량의 증가 추이를 고려하여야 한다. 타당성 조사를 통하여 약 150명 정도의 승객규모가 적정한 것으로 판단되었다. 항해속력은 기존 SWATH선의 속력분포와 SWATH선 자체의 특성(pitch instability)으로 인하여 Froude number 0.9 이상은 기술상 어려울 것으로 판단되므로 23 kts를 운항속력으로 계획하였다.

2.3. 주기관

주기관 소요마력은 유사실적선 자료를 이용하여 추정한 결과 약 2,100 PS정도 되었으며, 주기관은 단위마력당 중량이 비교적 가벼운 MTU의 1,045PS 고속디젤 엔진 2대를 탑재하는 것으로 계획하였다.

Table 1 Principal dimensions

Length O.A.	19.2m
Length B.P.	17.2m
Breadth, mld.	9.2m
Depth, mld.	4.5m
Design draft, mld.	2.3m
Scantling draft, mld.	2.4m
Lowerhull spacing between the centerline	7.4m
Length of lowerhull	17.2m
Length of strut	17.7m
Diameter of lowerhull	1.6m
Thickness of strut	0.6m
Displacement	abt. 71ton
Gross tonnage	abt. 90ton
No. of passengers	150P

2.4. 주요치수

타당성 조사와 기본계획에 의하여 검토된 prototype 고속 여객 SWATH선의 주요치수는 Table 1과 같다.

3. 일반배치 및 선형설계

3.1. 일반배치

일반배치는 Fig. 1에 나타내었으며 여객들이 쾌적한 여행을 할 수 있도록 하는데에 주안점을 두었다.

소형 SWATH선에서는 대형 SWATH선과는 달리 lowerhull내의 공간이 작기 때문에 기관실을 연결부 상부구조물(cross-structure)의 내부나 위에 설치한다. 기관실이 선미쪽에 위치하면 여객실의 배치가 용이하나 SWATH선의 특성상 선미트림이 과도하게 발생하고, 선수쪽에 위치하면 동력전달 시스템이 길어져 중량이 증가하고 lowerhull내의 각종 탱크배치가 용이하지 않을뿐만 아니라 전방을 막아 좋지 않다. 따라서 기관실은 선체 중앙부의 좌우 양현에 설치하였다. 기관실의 길이는 주기관과 동력전달장치의 설치를 고려하여 4.5 m로 계획하였으며 내벽에는 방음 재료를 사용하고 출입문을 2중으로 하여 소음을 가능한한 줄이도록 하였다. 기관실 내에는 발전기와 축전지 등이 같이 설치되어 있고 pump room은 기관실 뒤쪽의 cross-structure 내에 배치하였다.

여객실은 기관실 등에 의하여 전후부로 분리되어 있으며 전부 여객실에 72개, 후부 여객실에 78개의 좌석을 설치하였고 조종실은 양호한 시계확보를 위하여 선수 끝단 중앙부에 설치하였다.

발라스트 탱크는 lowerhull의 선수부와 strut의 선미부에 두어 heeling과 트림을 용이하게 조절할 수 있도록 하였으며 연료유 탱크는 기관실 하부의 lowerhull 내에 설치하여 기관실에서 연료유 취급이 용이하도록 하였다.

주기관이 cross-structure위에 설치될 경우에 lowerhull의 프로펠러 축에 동력을 전달하기 위한 동력전달 장치는 bevel gear, chain, belt, 등속 universal joint 및 전기적 방식 등이 사용되고 있다. 본고에서는 실적선의 채택실적과 신뢰성, 소음 및 동력전달 마력의 한계 등을 고려하여 bevel gear를 이용한 Z-drive 방식을 채택하였다. Z-drive 방식은 허용전달 마력을 높일 수 있고 소형화가 가능하며 보수가 용이하다. 또한 수직축이 2개이므로 좁은 strut내에 축을 배치하는데 유리

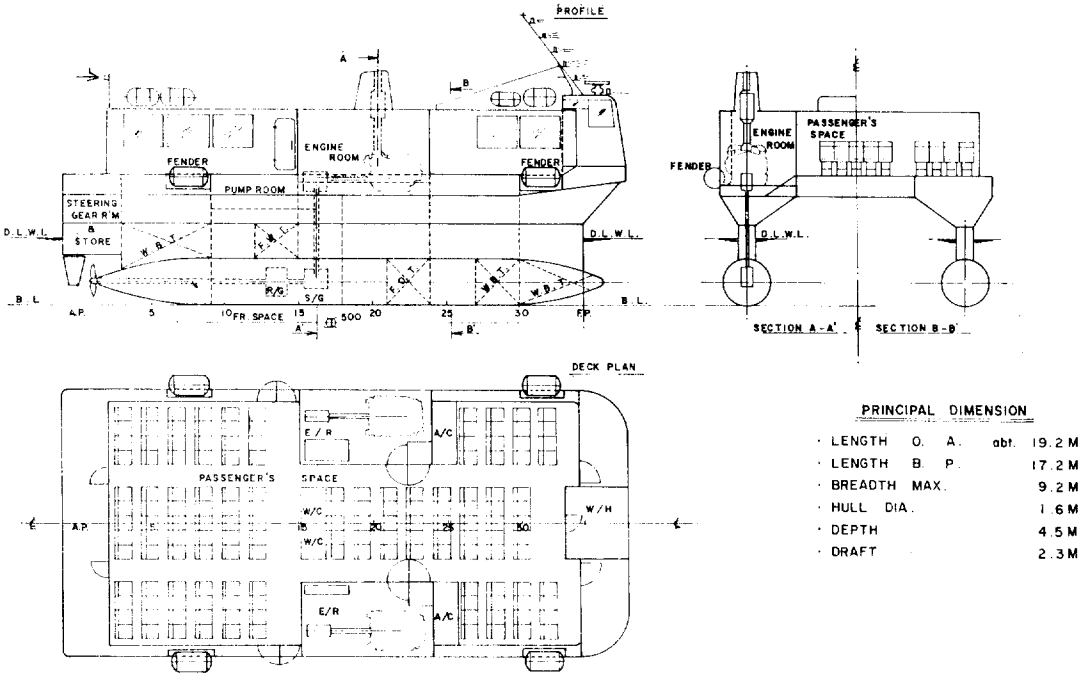
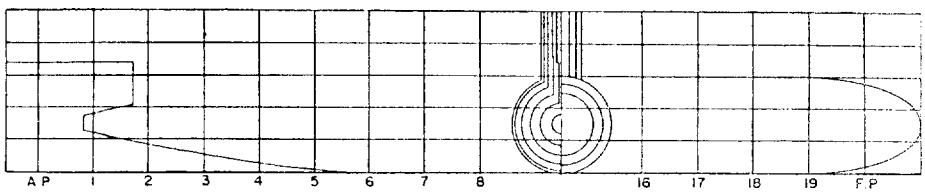
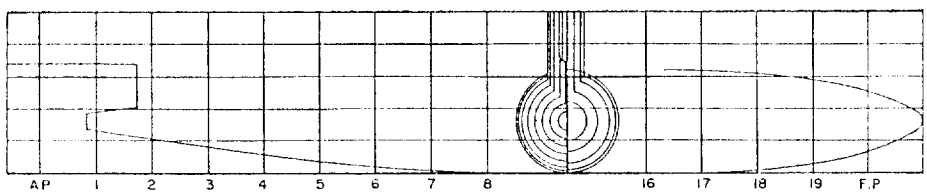


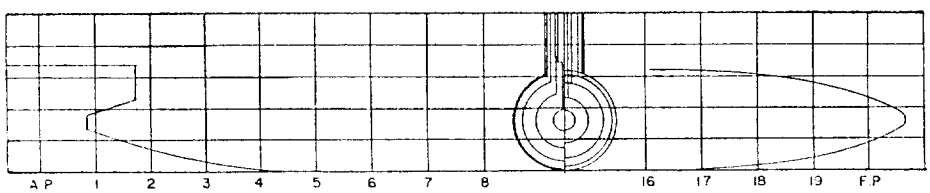
Fig. 1 General arrangement



a) TYPE I



b) TYPE II



c) TYPE III

Fig. 2 Profile and body plan of three different hull forms

하며 flexible coupling이 수직축에 장치되어 있기 때문에 strut의 변형에 대하여 부드럽게 작동한다.

3.2. 선형설계

Lowerhull은 횡단면 형상과 profile이 결정되면 그 형상이 정의되고 strut 역시 수선면의 형태에 따라서 거의 결정된다. lowerhull의 횡단면 형상은 단위 배수량당 침수표면적이 작은 원형으로, strut은 tandem strut보다 저항 성능이 우수한 single strut으로 채택하였다[4]. 선형의 형상변화에 따른 저항성능을 1차적으로 검토하기 위하여 두가지 형상의 선형 type Ⅰ, Ⅱ를 설계하였다. Type Ⅰ 선형은 type Ⅱ 선형에 비하여 lowerhull의 L/D(길이/직경)가 크고 상대적으로 선수부가 full하다. strut의 형상은 type Ⅰ, Ⅱ가 동일하다. 저항시험 결과(저항, 추진성능 참조) type Ⅰ이 Ⅱ에 비하여 저항성능이 우수함이 확인되었으나, type Ⅰ, Ⅱ 선형 모두 LCB가 너무 앞쪽에 위치하여 배치계획된 LCG와는 약 1.0 m 정도 차이가 나므로 트림이 과도하게 발생하였다. 따라서 LCG와 LCB를 일치시키기 위하여 새로운 선형 type Ⅲ를 설계하여 LCB를 선미쪽으로 이동시킴과 동시에 선체의 주요치수를 바꾸지 않는 범위내에서 조종실, 승객실, 기관실 등을 1 frame(0.5 m) 선수쪽으로 이동 배치하였다. SWATH선의 LCB의 위치는 lowerhul의 LCB 위치에 의하여 거의 결정되므로 lowerhull 선형을 수정한 뒤 strut 형상을 lowerhull에 적합하도록 수정하였다. Lowerhull의 LCB를 뒤로 이동시키기 위해서는 선수부분의 volume을 선미쪽으로 옮겨야 하는데 선미쪽이 너무 full 하여지면 추진효율에 나쁜 영향을 주게 된다. 따라서 가능한한 추진성능을 나쁘지 않게 하고 LCB를 뒤쪽으로 이동시키기 위하여 lowerhull의 직경을 type Ⅱ 선형과 같이 1.6 m로 계획하여 선수부의 형상을 fine하게, 선미부의 형상을 moderate full하게 설계하였다. Type Ⅲ 선형은 type Ⅰ, Ⅱ 선형보다 lowerhull 및 strut의 선수가 fine하고 선미가 full한 선형으로서 저항측면에서는 불리할 것으로 예상된다. Fig. 2에는 세가지 type 선형의 횡단면 및 측면형상을, Table 2에는 선형의 주요제원을 각각 나타내었다.

Table 2 Particulars of type I, II and III hull form

Designation \ Hull form / Unit	Unit	Type I	Type II	Type III
Length, B.P.	M	17.2	17.2	17.2
Length, submerged	M	18.58	18.58	18.4
Breadth, mld	M	9.2	9.2	9.2
Depth, mld	M	4.5	4.5	4.5
Draft, mld, mean	M	2.3	2.3	2.3
Draft, mld, F.P	M	2.3	2.3	2.3
Draft, mld, A.P	M	2.3	2.3	2.3
Disp. volume, barehull	M^3	65.24	64.31	69.02
Lowerhull length	M	17.38	17.38	17.2
Lowerhull Dia.	M	1.5	1.6	1.6
Lowerhull length/Dia.		11.59	10.86	10.75
Strut length	M	17.7	17.7	17.7
Strut thickness	M	0.6	0.6	0.6
Strut length/thickness		29.5	29.5	29.5
Dist. BTN lowerhull C.L	M	7.4	7.4	7.4
Midship section area	M^2	4.49	4.86	4.86
Waterplane area	M^2	16.5	16.52	16.72
LCB fr. midship, FWD(+)	M	1.26	1.29	0.5
LCF fr. midship, FWD(+)	M	0.33	0.34	−0.49
KB above B.L	M	0.99	1.02	1.0
Cp of lowerhull		0.839	0.737	0.822
Cwp of strut		0.777	0.777	0.787

4. 저항, 추진성능

4.1. 시험 해석 방법

—Froude 해석법(CTS=CFS+CRM+CA)

—마찰저항계수 : CFS=ITTC 1957년 모형선—실선 상관곡선

—모형선 실선 상관 수정계수 : CA=0.0004

—추력일치법

4.2. 모형선 및 시험상태

Type Ⅰ, Ⅱ 선형은 축척비 1/10로 제작되었고 bare hull 상태에서 저항시험을 수행하였다. Type Ⅰ 선형은 fixed model(fixed trim, fixed heave)과 free model (free trim and free heave) 두가지 상태에서 저항시험을 수행하였고, type Ⅱ 선형은 fixed model 상태에서만 저항시험을 수행하였다. Type Ⅲ 선형은 축척비 1/10과 1/7의 두가지 모형으로 제작되었고 appended hull 상태에서 저항 및 자항추진시험을 수행하였다. 즉 1/10 모형선은 free model 상태에서 저항시험을 수행하였고 1/7 모형선은 fixed model 상태에서 자항, 추진 시험을 실시하였다.

4.3. 저항 시험 결과

Type Ⅰ, Ⅱ 선형의 fixed model 상태의 저항시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 시험결과에 의하면 lowerhull의 L/D가 크며 상대적으로 선수부가 full한 선형인 type Ⅰ의 저항성능이 type Ⅱ보다 우수함을 알 수 있다. 이러한 결과는 최소저항을 갖는 lowerhull의 형상을 이론적인 방법으로 계산하였을 때 속력이 증가할수록 선수부의 형상이 full하여 지는것과 잘 일치함을 알 수 있다[6]. Fig. 4는 type Ⅰ과 Ⅲ의 저항시험을 free model 상태에서 수행한 결과이다. type Ⅰ

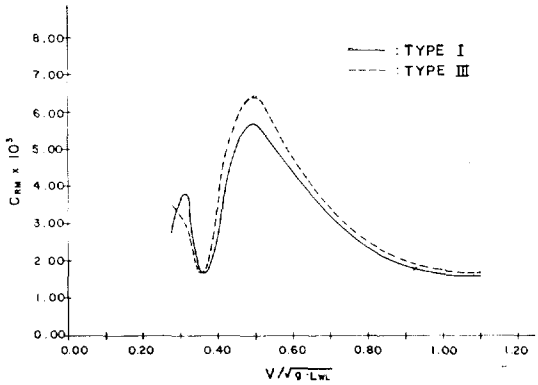


Fig. 3 Residual resistance coefficients of type I and II hull forms (fixed model condition)

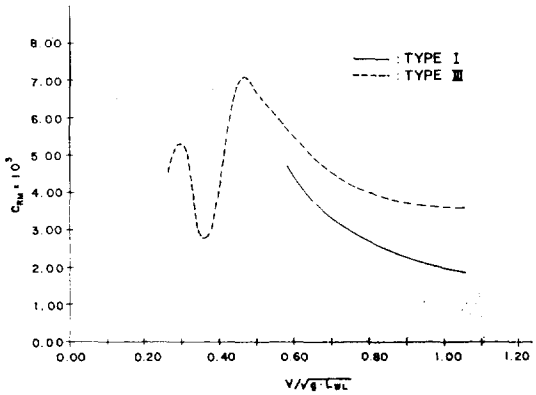


Fig. 4 Residual resistance coefficients of type I and III hull forms (free model condition)

에 비하여 Type Ⅲ의 CRM 값이 상당히 큰 것은 type Ⅲ의 lowerhull의 L/D가 작고 선수부가 fine하기 때문이다. Fig. 5는 type Ⅲ 선형의 free model 상태의

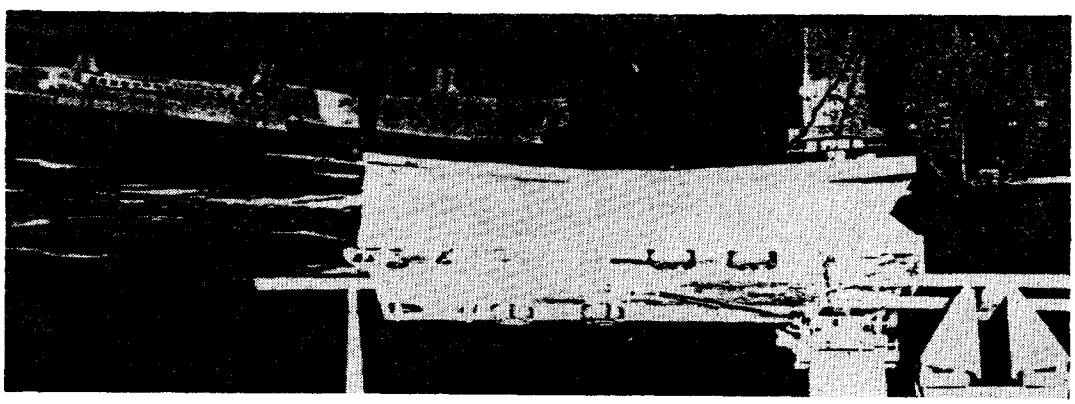


Fig. 5 Wave profile of resistance test for type III hull form at speed 21kts (free model condition)

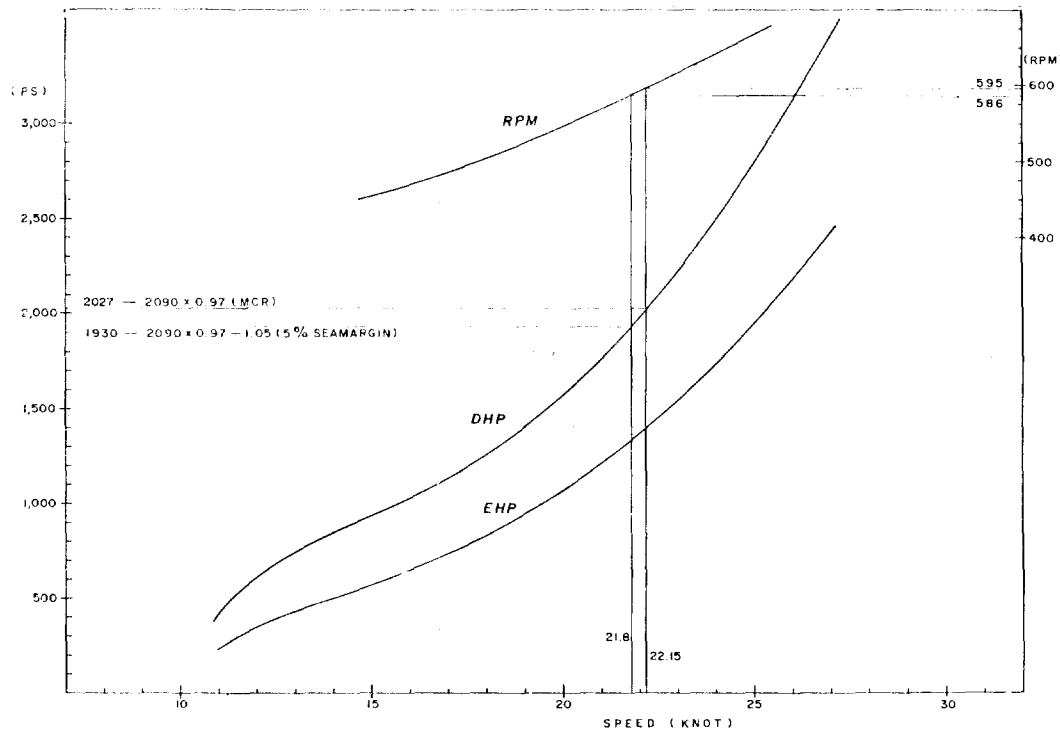


Fig. 6 Resistance and propulsion characteristics of type III hull form

저항시험시 선속 21 kts에서의 파형을 나타낸 것이다. 선수부에서는 파형이 높아졌다가 선미부에서는 크게 낮아져서 strut가 거의 수면 가까이 나타나는 것을 관찰할 수 있었고, 이에 따라 선미쪽에 심한 와류현상도 발생하였는데 이러한 현상은 선속 약 15 kts 부근부터 관찰되었다.

4.4. 추진시험

자항추진 시험은 type Ⅲ 선형의 1/7 모형선으로 fixed model 상태에서 수행되었다. 실선상태와 같은 조건을 유지하기 위하여서는 free model 상태로 추진시험을 실시하여야 하나 계획선의 크기와 속력, 예인전차의 속력 및 계측장비의 용량을 고려하여 모형선을 축척비 1/7 보다 크게 제작할 수가 없었으며 이에 따라 모형선의 중량이 계획흘수를 유지할 수 없을 정도로 무거워져 free model 상태의 자항, 추진 시험이 불가능 하였다. 따라서 1/7 모형선으로 fixed model 상태에서 저항 및 자항 추진시험을 수행하여 추진계수들을 구하고, 1/10 모형선의 free model 저항시험에서 얻은 유효마력을 이용하여 전달마력을 구하는 방법을 사용하였다.

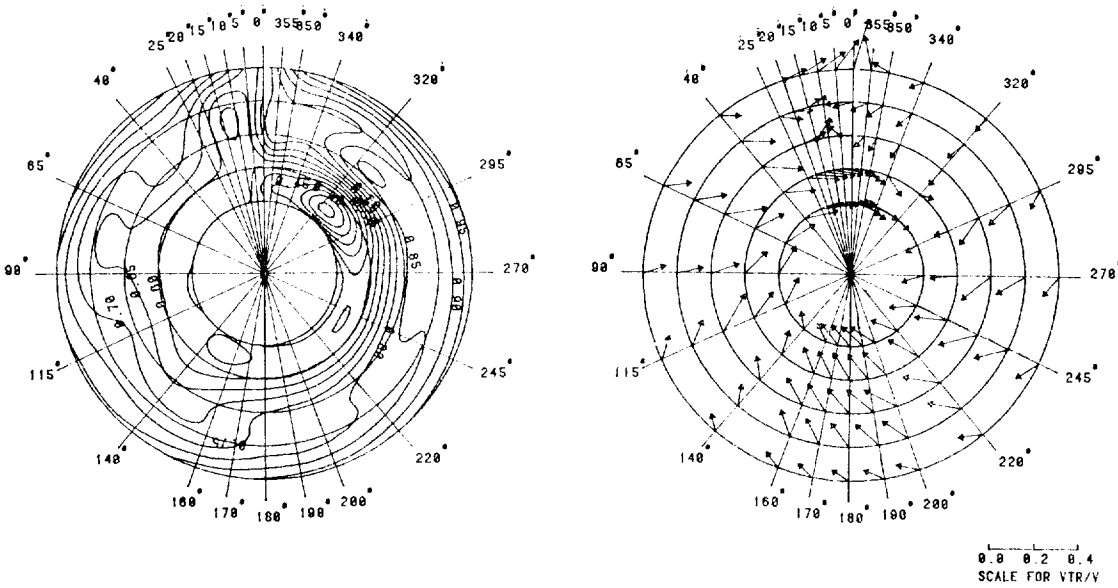
저항 및 추진시험에서 얻은 유효마력과 추진계수들을 이용하여 구한 전달마력을 Fig. 6에 나타내었다. 축계의 전달효율을 0.97로 가정하고 sea margin을 5%로 하였을 때 주어진 기관마력 2,090 PS로 만재상태에서 약 21.8 kts의 항해속력을 낼 수 있는 것으로 추정되며 최대속력은 약 22.15kts로 추정된다.

4.5. 반류분포 특성

1/7 모형선의 우현측 프로펠러 단면에서 계측된 반류분포 특성을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 a)는 축방향의 유속성분 분포를 나타낸 것인데 비대칭형으로 나타나고 있다. 이것은 lowerhull에 부착된 제어 fin의 영향인 것으로 생각되나 전반적으로 원형분포를 나타내고 있어 축방향 유속은 상당히 균일한 것으로 판단되며 이에 따라 프로펠러에 의한 진동은 작을 것으로 예상된다. Fig. 7의 b)는 횡방향의 유속벡터 분포를 나타내는데 우회전 하는 것으로 나타나고 있으므로 회전 에너지를 흡수하기 위해서는 프로펠러를 inward 방향으로 회전시키는 것이 바람직할 것으로 예측된다.

4.6. 저항 및 추진성능 개선 방안

저항 및 자항추진 시험에서 파형이 선수부에서는 높아졌다가 프로펠러 위치에서는 크게 낮아져 strut가 수면위로 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 이를 개선하



a) Iso-Axial velocity contours　　b) Transverse velocity vectors

Fig. 7 Wake distribution characteristics

기 위하여 선체길이를 길게 하고 또한 strut 선수끝 부분보다 앞쪽에 돌출되어 있는 lowerhull 부분을 더욱 앞쪽으로 길게 연장하므로써(bulbous bow effect) 선수부에서 높아지는 파형을 더 앞쪽에서 발생하게 하여 선미부에서는 strut가 수면위로 떠오르지 않도록 하는 방안을 생각할 수 있다. 일단 주요치수가 정해진 이후에는 배치가 허용하는 범위내에서 lowerhull의 길이와 직경비(L/D)를 크게, 선수부의 형상은 full하게, 선미부 형상은 moderate fine하게 설계하는 것이 바람직 하겠다. 또한 선미부의 strut은 프로펠러와 rudder와의 최소간격이 허용하는 범위내에서 최대한도로 수면하 깊게 잠기게 하여 흘수가 변하더라도 선미부 수선면의 형상이 거의 일정한 형상을 유지하도록 하면 저항, 추진성능이 향상될 것이다. 계획선의 프로펠러 직경은 1.2 m로 계획하였으나 lowerhull 직경의 90% 정도인 1.35 m(lowerhull 직경 1.5 m 기준)로 증가시켜도 진동 문제가 발생하지 않을 것으로 예상되며 이에 따라 추진효율이 향상될 것이다.

만일 일반배치상에 문제가 없을 경우, 저항성능이 우수한 type I 선형을 택하고 프로펠러 직경을 증가시키면 계획선은 최대 항해속력을 약 24 kts까지 낼 수 있을 것으로 예상된다.

5. 제어 fin설계

SWATH선은 단동선형에 비하여 같은 배수량의 경우 수선면적이 작고 선체의 길이가 짧으므로 GMl이 작다. 따라서 종 복원 모우멘트가 작으므로 어떤 특정한 속력에서부터 종방향의 수직면상에서의 운동자세가 불안정(pitch instability)하여 질 수 있는데 이를 극복하기 위하여 lowerhull에 제어 fin을 부착하게 된다. 제어 fin은 일반적으로 선수와 선미부분에 부착하게 되는데, 선미 제어 fin은 면적이 클수록 안정성을 향상시키나 선수 제어 fin은 반대로 안정성을 감소시킨다. 그러므로 안정성의 관점에서는 선미 제어 fin만을 부착하면 좋으나 선수 제어 fin은 상하동요의 운동성능을 향상시키는 효과가 있으므로 선수미 fin이 적절히 설계되어야 한다[7,8]. 제어 fin의 설계시에는 안정성 뿐만아니라 heave와 pitch mode에서 적절한 natural period와 damping ratio를 갖도록 하여야 하므로 여러가지의 fin 조합에 대하여 계산한 후에 적정한 fin을 선정하여야 한다. 본고에서는 이론적인 방법으로 제어 fin의 크기 및 위치를 선정한 후에 모형시험에서 그의 안정성을 확인하였다.

외력이 작용하지 않을때 heave와 pitch mode가 조합된 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$a\lambda^4+b\lambda^3+c\lambda^2+d\lambda+e=0$$

여기서,

$$a=(M+A_{33})\cdot(I_5+A_{55})-A_{53}A_{35}$$

$$b=(M+A_{33})\cdot B_{55}-A_{53}B_{35}+B_{33}\cdot(I_5+A_{55})-B_{53}A_{55}$$

$$c=(M+A_{33})\cdot C_{55}-A_{53}C_{35}+B_{33}B_{55}-B_{53}B_{35}+(I_5+A_{55})\cdot C_{33}-A_{35}C_{53}$$

$$d=B_{33}C_{55}-B_{53}C_{35}+C_{33}B_{55}-C_{53}B_{35}$$

$$e=C_{33}C_{55}-C_{35}C_{53}$$

M : mass of ship

I_5 : mass moment of inertia about transverse axis

SWATH선이 안정하기 위한 필요 충분조건은 routh stability criteria인 다음 조건이 만족되어야 한다.

$$a, b, d, e>0$$

$$bdc-ad^2-b^2e>0$$

안정성 해석에 필요한 fin의 양력계수들은 [7]에 따라, 부가질량과 감쇄계수는 이론적인 방법[10]으로 추정하였다. 이때 감쇄계수 B_{ij}에 영향을 주는 점성효과는 몰수체의 모형시험에서 얻은 경험식[11]을 사용하였는데 다음과 같다.

$$B_{33}^*=-\rho L^2 Z_w'/2$$

$$B_{35}^*=-\rho L^3 Z_q'/2 \qquad \text{for one hull}$$

$$B_{55}^*=-\rho L^4 M_q'/2$$

$$B_{53}^*=-\rho L^3 M_w'/2$$

여기서,

$$Z_w'=-2.439\cdot(A_{33}'\cdot m')^{4/3}-m'$$

$$Z_q'=-0.1256\cdot m'$$

$$M_q'=-0.0413\cdot m'$$

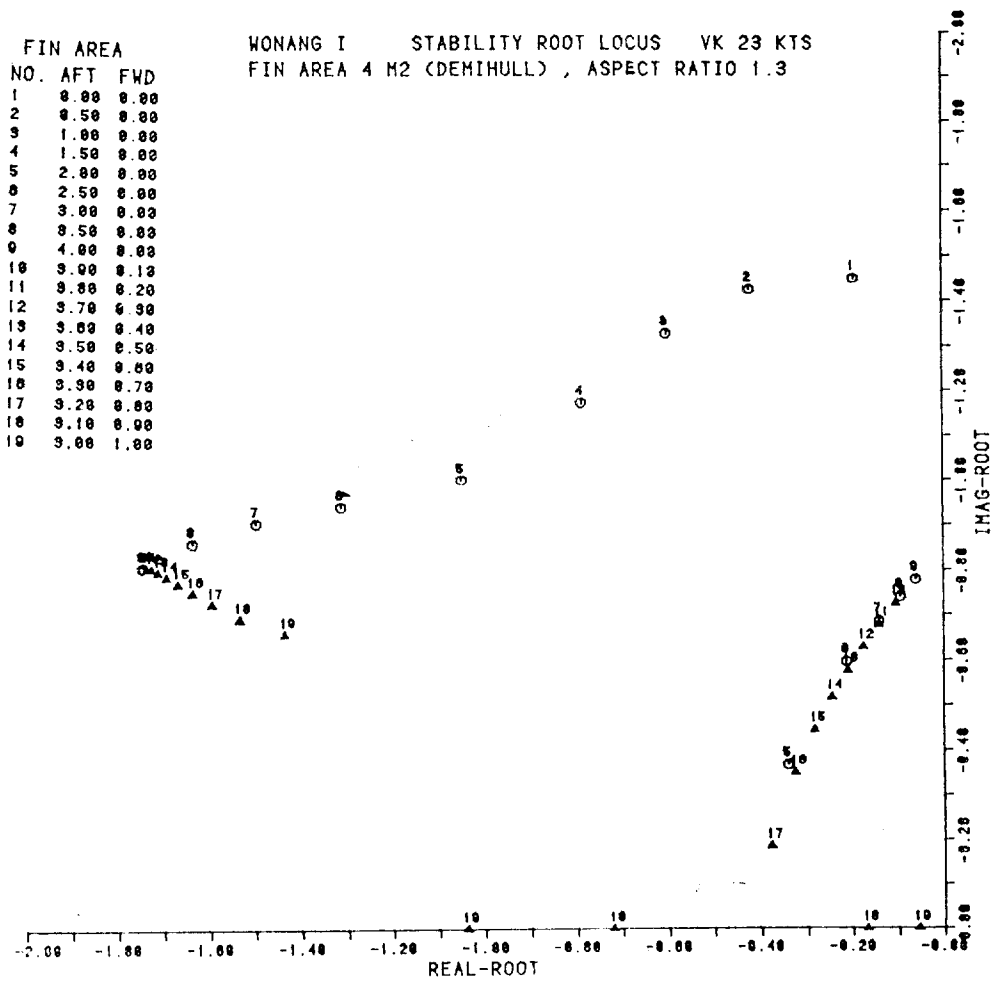


Fig. 8 Stability root locus at speed 23kts

$M_w' = 0.793 \cdot A_{33}' m'$

$m' = 2 \cdot \nabla / L^3$

$A_{33}' = A_{33} / \rho \nabla$

L=lowerhull length

A_{33}=heave added mass of one hull

∇=volume of one hull

Fig. 8은 선속 23 kts에서의 stability root locus를 나타낸 것이다. Locus의 형상이 대형선의 경우[8]와는 차이가 있으나 소형선의 경우[9]와는 잘 일치하고 있다. 본고에서는 위의 계산결과에 따라 첫째 충분한 안정성을 갖고 둘째 적절한 상하동요 감쇄력을 보유하며 셋째 종동요 및 상하동요 고유주기가 적절히 분리되도록 하는 면적 3.4 m²의 선미 fin과 0.6 m²의 선수 fin (Fig. 8의 ▲15)을 선정하였다. fin의 위치는 선미 fin이 5.5 frame에 선수 fin이 25 frame에 설치되었고 aspect ratio는 1.3이다. 또한 이론적인 방법에 따라 선정된 여러가지 크기의 fin을 부착하여 모형선의 안정성 여부를 조사하였다. 일정속력으로 모형선을 예인하면서 모형선에 외력을 가했을 경우에 모형선이 원래의 위치로 돌아오면 안정한 것이고 그렇지 않으면 불안정한 것이다. 조사결과 모형시험과 이론계산에 의한 안정성 여부가 대체적으로 잘 맞음을 확인하였다. 그러나 계획선의 선미 제어 fin의 크기는 선체의 크기에 비해서 상대적으로 큰편으로 부가물 저항과 fin의 구동마력이 상당히 증가하게 되었다. 이를 개선하기 위해서는 KMl을 증가시키는 방향으로 strut 수선면 형상을 설계하고, KG를 낮추도록 배치에 유의해야 할 것으로 사료된다.

6. 운동성능

운동성능을 추정하기 위하여 이론적 해석 및 규칙파중 모형시험을 수행하였다. 이론적 해석은 SWATH 선형의 운동계산 전용 전산 프로그램[10]을 이용하였고, 모형시험에서는 선수, 선미 및 횡 규칙파중에서 선체 운동시험(heave, pitch, roll and relative bow motion)이 수행되었다. 시험에 사용된 규칙파의 파고는 파장의 1/40~1/200이고 시험의 안전을 위하여 선속 0 kts, 5 kts 및 10 kts에서만 시험을 수행하였다.

Fig. 9에는 시험 및 이론해석의 한 예로써 선수파중에서의 상하동요를 나타내었다. 선속 0 kts에서 계산치가 $\lambda/L = 2.5$ 부근에서 뚜렷한 공진현상을 보이고 있으나 시험결과는 오히려 그 부근에서 최저값을 나타내고 있고 뚜렷한 공진점이 없이 파장이 길어지면서 응답값이 1에 접근하고 있다. 시험결과로 보아 계산상태보다 시험상태에서 공진점이 긴 파장쪽으로 이동한 것으로 보이고 시험상태에서의 감쇄효과가 큰것을 알 수 있다. 이 원인으로는 다음의 2가지를 생각할 수 있

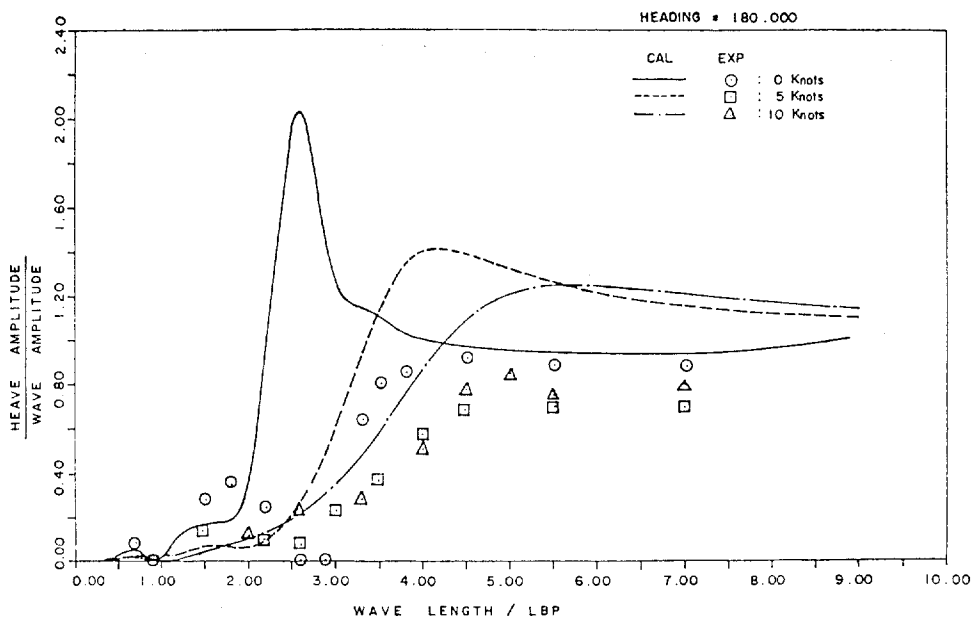


Fig. 9 Heave response of regular head waves for speed 0, 5 and 10kts

겠다.

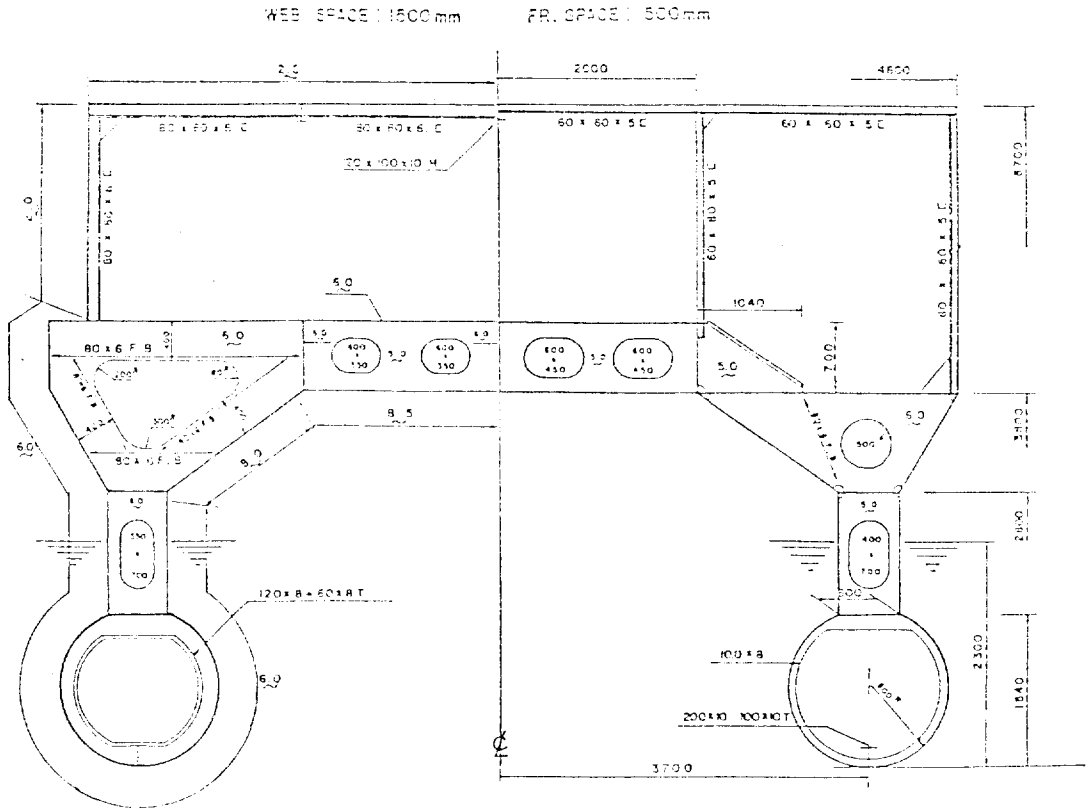
첫째로 본 시험에서는 모형선의 중량이 약 70 kg 정도로 작아서, 일반적인 수상선의 운동시험에서 무시되는 계측장비 및 가이드에 의한 연성된 관성 모우멘트 및 질량효과가 영향을 끼쳤을 가능성을 생각할 수 있다.

둘째로는 계산시 공진구간에서의 점성감쇄력 추정과 strip 이론을 적용하는데 따른 부가질량 추정에 있어서의 오차를 생각할 수 있겠다. 선속 5 kts에서는 시험치와 계산치가 비슷한 경향을 보이고 있으나 앞에서와 같은 이유로 시험치에서 공진점이 장파쪽으로 이동한 것으로 보인다. 선속 10 kts에서도 계산치와 시험치가 비슷한 경향을 보이고 있으며 시험치가 장파구간에서 계산치보다 작게 나타나고 있다. 선수파에서 선속이 커지면서 상하동요 공진점이 점점 장파로 이동하는 것은 만남진동수가 증가하기 때문이며 공진점에서 극대값이 나타나지 않는 것은 제어 fin의 감쇄력의 영향이 선속이 커지면서 증대되기 때문이다. 전반적으로 운동성능이 우수한 것으로 나타났으며 특히 선속이 증가하면서 제어 fin에 의한 감쇄작용이 증대하여 운동성능이 더욱 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

7. 구조설계

7.1. 개 요

SWATH선은 일반 선박과는 달리 primary stress가 종방향보다 횡방향이 더 큰점을 고려하여 계획선의 선체구조는 transverse framing system을 채택하였다. frame space는 500 mm로 공작에 필요한 최소한의 작업공간을 확보하면서 외판의 두께를 줄일 수 있도록 하였고, 3 frame마다 floor type의 web frame을 설치하였으며, 전체적으로 얇은 구조임을 고려하여 6 frame마다 격벽을 설치하였다. 기관실은 바닥이 여객실보다 낮게 되어 있어서 매 frame마다 특설 bracket을 설치하여 상갑판과의 구조적 불연속성을 해소시켰고 기관실 하부에는 매 frame마다 실체늑판 구조로 하여 강성



a) Passenger space b) Engine room

Fig. 10 Midship section

도를 높혔다. 구조재료는 선체중량을 줄이기 위하여 Al합금을 사용하였고 상갑판을 경계로 하여 아래쪽은 용접을 위쪽은 리벳구조로 하였다.

7.2. 구조설계 기준

SWATH선에 대한 rule이나 설계기준이 마련되어 있지 않기 때문에, 먼저 설계하중을 정하고 그에 따라 각 구조부의 판재두께와 보강재 단면계수에 대한 요구치를 결정하는 것으로 설계를 수행하였다. 설계하중은 DnV의 'high speed light craft' 규정[12]의 값을 기본으로 하였으며 횡방향 동하중(transverse side force)은 문헌[13,14]에 인용된 Sikora[15]의 약산식을 사용하였다. 이 식에 의하여 계산된 값은 DnV 규정에 의한 값과 거의 같은 정도의 값을 보이고 있어 규정치로서 큰 무리가 없음을 알 수 있다. 판재두께 및 보강재의 단면계수에 대한 규정요구치의 산식은 기본적으로 DnV의 강선규칙을 따랐으나 각 구조부재별로 primary stress에 대한 응력 분담률을 새로 고려하여 허용응력을 정하였다. Fig. 10에 기관실 부분과 여객실 부분의 중앙 횡단면도를 나타내었다.

7.3. 횡강도 해석

SWATH선 특유의 구조적인 특징 즉, 쌍동선체 구조로서 두개의 선체를 연결하는 cross-structure의 횡방향 단면계수가 단일 선체구조의 선박에 비해 훨씬 작은 값을 가지며 동시에 횡방향으로 구조적 불연속성이 많은 단면형상을 가진다는 사실로부터 횡강도가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 횡방향의 구조적 안정성을 검토하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석 대상으로 선정한 부위는 길이방향의 대표적인 두단면 즉 상갑판 위에 기관실이 설치되어 있는 부분과 여객실만 있는 부위로서 기관실 부위는 다른 부위에 비해 구조배치나 부재칫수 등이 비교적 견고한 구조로 설계되어 있으나 상갑판이 기관실 안까지 연속되지 못하여 횡방향 불연속성이 더 크다. 또한 기관실 부위의 길이방향 전후에서도 구조배치와 치수가 변화하는 불연속부가 있기 때문에 1차적인 해석대상으로 선정하였으며 여객실 부위는 기관실 부위에 비해 구조배치나 치수가 약한 구조로 되었고 특히 상갑판 구조에 있어서 기관실 전후벽에 해당하는 부분적인 격벽이 없고 객실 외판에 커다란 창문이 설치되어 있어 갑판상 구조물이 횡강도에 거의 기여하지 못하는 정도여서 해석모델을 별도로 택하였다. 기관실 부위와 여객실 부위의 구조해석 결과(Fig. 11, 12 참조)에 의하면 전반적으로 cross-structure의 bottom 부분과 구조적 불연속부에 응력집중 현상이 나타나나 다만 그 크기가 허용응력의 10~20%정도 내외로서 cross-structure bottom 부분의 scantling에 지배적인 하중이 slamming force임을 감안하고 불연속부의 형태를 보다 원형단면으로 점속하게 하는 등의 방법으로 응력집중 현상을 피하도록 한다면 횡강도 역시 종강도처럼 설계의 안전계수를 약간 높임으로써 별도의 응력분담률을 고려하지 않아도 구조적인 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

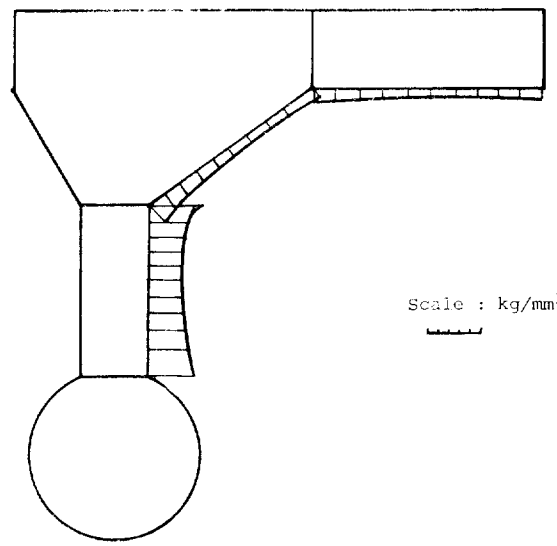


Fig. 11 Combined stress distribution at bulkhead section of engine room

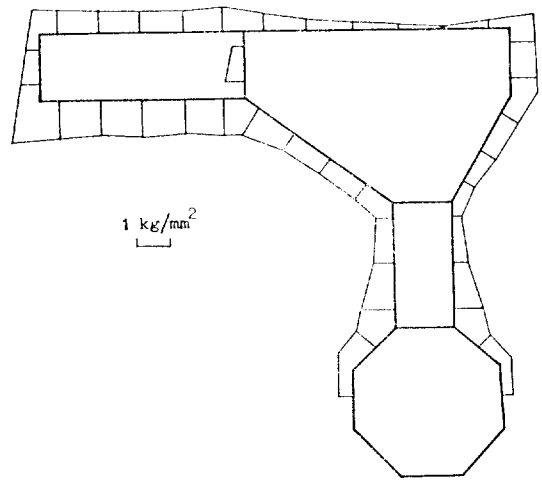


Fig. 12 Combined stress distribution near bulkhead section of passenger room

8. 결과 및 고찰

SWATH선 설계와 관련된 기술을 연구하였고 이를 고속 연안 여객선에 응용하여 prototype 선박의 초기 설계를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 SWATH 선의 설계기술을 간략하게 요약하면 다음과 같다.

세가지 type의 선형에 대한 저항시험 결과에 의하면 lowerhull의 L/D가 가능한한 크고 선수형상이 full 할수록 저항성능이 우수함을 확인하였다. 이러한 선형의 LCB는 선수쪽에 위치하게 되는데 과대한 트림이 발생하지 않도록 하기 위하여서는 LCG 또한 선수쪽에 위치하여야 하며 이에 따라 기관실배치, 여객실배치 및 각종 tank 배치 등은 주어진 LCG를 가능하면 만족하도록 수행되어야 한다. 만일 일반배치상 문제가 없을 경우 저항성능이 우수한 type I 선형을 택하고 프로펠러 직경을 lowerhull의 약 90%정도 되도록 크게 하여 프로펠러 효율을 향상시키면 계획선은 최대항해속력 약 24kts까지 낼 수 있을 것으로 예상된다.

안정성 확보 및 감쇄력 증대를 위해 선수미부에 설치되는 제어 fin의 크기는 GMl, LCG 및 LCF의 상대적 위치, fin의 moment arm 등에 크게 관계되므로 초기계획시에 선형과 배치를 함께 고려하여 결정되어져야 한다. 계획선의 선미 제어 fin의 크기는 선체의 크기에 비해 상대적으로 큰편이다. 이를 개선하기 위한 방안으로는 선체의 길이를 약간 증가시키고 수선면 형상을 BMl이 증가하도록 설계하면 적정크기의 선미 제어 fin으로써 충분한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 static 상태에서 결정된 제어 fin을 dynamic 상태에서 control하는 방법 및 controller 설계에 대한 연구가 추후 수행되어야 할 것으로 사료된다. 계획선의 파랑중 운동성능은 운동성능시험 및 이론적 해석을 통하여 우수한 것을 확인할 수 있었다. 또한 선속이 증가하면서 제어 fin에 의한 감쇄효과가 증대하여 운동성능이 더욱 향상되는 것을 알 수 있었다. 그러나 시험 및 이론적 해석 결과가 공진구간에서 차이가 나는 것을 볼 수 있었으며 그 원인을 분석하기 위해서는 시험계측의 한 방법으로 sonic probe를 사용하여 일반적인 수상선의 운동시험에서 무시되는 계측장비 및 가이드에 의한 연성된 관성모멘트 및 질량효과의 영향을 분석할 필요가 있을 것으로 생각되며 또한 계산시 공진구간에서의 점성감쇄력 추정에 대한 재검토가 필요한 것으로 사료된다.

구조강도에 있어서는 종강도는 소형 SWATH선일 경우에는 일반선의 경우와 같이 별문제가 되지 않음을 확인하였으며, 횡강도 역시 구조적인 불연속부의 응력집중을 피하도록 한다면 설계의 안전계수를 약간 높임으로서 구조적인 안정성을 확보할 수 있는 것 같다. 그러나 단정적인 결론을 내리기 위해서는 선체구조설계 기준에 대한 상세한 검토가 필요하며 파랑에 의한 횡방향의 동하중과 slamming force를 정확히 추정하여야 할 것으로 사료된다.

9. 후 기

본 연구는 계속하여 2차년도 연구사업을 진행중에 있다. 1차년도의 연구결과와 경험을 토대로 선속 25 knots급 쾌속 연안여객선을 설계중에 있으며 제반 성능추정을 위한 모형시험 및 이론적 해석을 수행할 예정이다.

본 연구에 많은 지원을 하여주신 한국기계연구소 대덕선박분소의 각 요소기술 분야의 연구원들, 또한 연구기간중 해외전문가로 초청되어 많은 자문을 하여주신 이정묵 박사님께 감사를 드린다.

참 고 문 헌

[1] T.G. Lang, "The SWATH Ship Concept and its Potential", 1978, AIAA/SNAME

[2] R.F. Burnett, "The Advent of Semi-Submersible Twin-Hull Ships", Sep. 1980, RINA

[3] J.D. Hightower, R.L. Seiple, "Operational Experience with the SWATH Ship SSP KAIMALINO", 1978, AIAA/SNAME

[4] M. Oshima, H. Narita, Y. Kunitake, "Experiences with 12 Meter Long Semi-Submerged Catamaran 'MARINE ACE' and Building of SSC Ferry for 446 Passangers", 1979, AIAA/SNAME

[5] 이규열, 김용섭외, "최소수선면 쌍동선(SWATH)의 개발", Aug. 1986, 한국기계연구소 연구보고서 BSM 500-771.D

[6] M. Oshima, H. Narita, Y. Kunitake, H. Nakamura, "Development of Semi-Submerged Catamaran", July, 1982, Mitsui Zosen Technical Review.

[7] C.M. Lee, R.M. Curphey, "Prediction of Motion, Stability, and Wave Load of Small-Waterplane-

Area, Twin-Hull Ships", 1977, SNAME Transactions.

[8] C.M. Lee, M. Martin, "Determination of Size of Stabilizing Fins for Small Waterplane Area, Twin-Hull Ships", Nov. 1974, NSRDC Report 4495.

[9] J.Y. Wu, "A Study of the Effect of Fin Size on the Pitching and Heaving of a SWATH Ship", Aug. 1984, Uni. of Glasgow NAOE-84-55.

[10] 이상무, 김영환, 홍도천, "최소수선면 쌍동선의 운동특성 해석", Dec. 1986, 대한조선학회지.

[11] C.M. Lee, Private Communication.

[12] "Rules for Classification of High Speed Light Craft", 1985, DnV.

[13] S. Bhattacharjee, "Structural Design of Small Waterplane Area Twin Hull Ships", 1981, MS Thesis, Uni. of Newcastle.

[14] F. Gabriel, "The Design of SWATH Ship's Cross-Structure", 1985, MS Thesis, Uni. of Newcastle.

[15] J.P. Sikora, "A Preliminary Study of Maximum Lifetime Side Forces for SWATH Ships", 1978, DTNSRDC Report.