

● 論 文

운하 운송 barge 시스템의 최적 시스템 개발 연구⁺

조 규 남* · 조 관 희*

(97년 10월 28일 접수)

A Study on the Development of Optimal System of Canal Barge System

Kyu-Nam Cho* · Kwan Hee Cho*

Key Words : Tow-Barge System(예인 바지 시스템), Push-Barge(밌 바지 시스템), I.T.B System(통합 바지 시스템), CATUG System (CATUG 시스템), Non-rigid Systems(연성 연결 시스템), Rigidly Connected Combinations(강성 연결 시스템)

Abstract

Construction of the Kyung-Inn Canal between Incheon and Han River water way of 18 kilometer length is considered recently. The canal may reduce traffic congestions between Seoul and Incheon, remarkably. Since the type of transportation system of the canal will be barge system, an analysis on the canal barge characteristics is carried out in this paper. The merits and demerits of various canal barge transportation systems are studied, respectively.

Also, several barge connecting systems are studied and the corresponding characteristics are analyzed and compared. Optimal barge system is selected based on the simple modeling of the several barge systems and the relevant evaluations.

Primitive design issue of the barge transportation system of the canal is also presented.

1. 서 론

경제발전의 결과로 국내 물동량의 규모가 급증하므로 화물의 운하 운송 필요성에 관심을 가지게 되고 앞으로도 이러한 추세는 계속될 것으로 여겨진다.

수로를 이용하는 수송이 육로에 의한 수송보다 에너지 소모가 훨씬 적으며, 최근의 유류가 앙등에

따라 그 효과가 더욱 커질 것을 감안하여 수로에 의한 화물수송에 대한 많은 검토가 요청되고 있다.

또한 많은 섬을 갖고 있는 반도국가로서 경제 성장에 따르는 연안 수송 물동량의 증가도 클 것으로 예상되어 연안수송에 대한 활발한 육성방안이 강구되어야 할 것이다.

최근에 이르러 운송방식은 컨테이너선의 출현에

⁺ 본 연구는 1996~8년 학술진흥재단 대학부설연구소 연구비에 의하여 연구되었음

* 종신회원, 홍익대학교 조선해양공학과

따라 화물선의 형태와 항구의 형태가 변화하여가고 있고, 정기운항선의 컨테이너선이 그 대부분을 점하기에 이르렀고 멀지 않아 일반화물선형의 선박은 그 자태를 감추려고 하고 있다.

이와 마찬가지로 운항형태를 일변하려고 하는 시도는 barge line에도 진출의 길을 열었고 또한 요망도 있는 것으로 보아 해운계에도 제 2의 변혁의 시대가 도래하려고 하고 있는 것으로 추측이 된다. 이와 관련하여 운송 시스템의 종류와 특성을 분석하고 각 운하 운송 시스템의 장·단점을 비교하여 우리나라 운하 운송에 있어서 최적 시스템을 찾아내고자 한다.

2. Tug-barge 시스템의 종류 및 특성 분석

2.1 예인 Barge 시스템^{1)~5)}

예인 barge 시스템은 예인선에 예인 줄을 이용하여 barge를 끌고 운항하는 것이다. 북미주에서는 tug-barge에 의한 화물수송 초기에 강의 상류로부터 이송 되어온 소규모의 barge들이 하류에서 수십척씩 연결되어 예인선에 의해 예인되었던 것으로 여겨진다.

한편, 해상에서는 파도가 일어 여러 척의 barge가 묶여서 이동하는 것이 곤란하므로, 상당한 거리를 두고 일렬로 연결되거나 tug에 barge 한 척씩만을 연결하여 끌고 나갔다. 2차 대전 후에 미국 동지에서 tug-barge에 의한 연안수송이 활발하였던 것은 노후선이 barge로 많이 전환 되었으며, 군용선으로 사용되던 많은 선박 및 tug-barge들이 화물수송에 투입되었기 때문이다.

예인에 의한 운항방법이 제한된 수로를 항해하는데 많은 문제가 있으므로 예인-barge의 형태가 push-barge의 형태로 바뀌면서 그 모습이 거의 사라지게 되었다. barge의 선수형태와 그 각각의 특성은 정수중에서 저항이 작으며, 갑판면적이 넓어 좋으나, 파도중에서 slamming등이 문제가 되는 ship shaped bow 형태와 deadrise를 크게한 것으로, 내파성 및 방향 안정성이 좋으나, 갑판면적과 화물창 용적의 감소를 감수해야 하는 ship shaped bow 형태로 크게 두가지로 나눌수 있다.

예인 Barge 시스템의 장점

노후선에 있어서 그 선체만은 수년간 더 사용할 수 있으므로 수리·유지비가 많이들고 효율이 좋지않은 낡은 기관을 새 기관으로 바꾸는 것 보다 기관부를 절단하여 barge로 개조하는 것이 유리함에 따라 많이 변용되어 사용되었다. 또한 군용선은 2차 대전시에 많이 건조된 LTS등이 barge로 변경되어 사용되었으므로 수리·유지비가 적게 든다.

예인 Barge 시스템의 단점

barge들을 tug boat에 예인줄로 연결하여 예인할 때 barge가 심한 yawing을 한다. (이에 대해 barge의 선미에 대형 skeg를 달고 그것을 진행방향에 대해 적당한 각도를 주어 yawing을 방지하였다.)

파도중에서 tug과 barge는 예인줄을 중심으로 relative surge를 하고 악천후에서는 속도를 줄여야 할 경우가 발생한다.

여기에 tug의 크기 및 배수량이 크면 surge등이 감소하는 등 악천후에서 예인작업을 수행하는데 수월하게 되므로 tug를 대형, 대마력화해야 하는 것도 큰 단점이다.

2.2 Push - Barge 시스템

push-barge 시스템은 tug의 선수에 push-knee 등을 설치하여 barge를 뒤에서 미는 방법으로 운항하는 것이다.

예인 barge 시스템은 예인줄에 의존하여 barge를 원활히 조종하면서 예인하는 것이 힘들 뿐 아니라 yawing 방지를 위해서 설치한 skeg에 때문에 저항이 약 30% 정도 증가하는 등 많은 불리한 점이 있다.

그래서 고안된 이 push-barge 시스템의 시작은 미국에서 19세기의 중반경인 남북전쟁직전에 barge를 하천용 증기선에 옆에 달고 운항을 한 시기부터 라고 알려져 있다.

또한, 제 1차대전시에 화물 운송의 급증을 해결하기 위해 화물 열차처럼 다수의 barge를 연결하여 barge선단 방식이라는 새로운 운송 방식이 생기기도 하였다.²⁾

Push-Barge 시스템의 장점

한 척의 barge를 한 척의 push boat로서 미는

경우와 자항선을 비교하여 보면 건조원가는 크게 차이가 나며 수십 척의 barge를 한 척의 push boat로도 운항 할 수 있다. push boat는 원동기와 추진기를 장치하는 것만으로 compact한 설계가 가능하고 barge는 구조규정이나 각종 rule의 제약을 거의 받지 않으므로 목적에 부합되는 가장 합리화된 설계를 할 수 있다. 또 push-barge는 형태가 단순하고 선원거주구가 없어도 되므로 건조비가 줄어들게 된다. 이런 점에서 barge선단의 건조가격이 자항선에 비하여 상당히 저렴하다.

barge 선단에서 일당직의 경우는 5~6명의 선원으로 족하고 주야 연속작업일 때에도 12명 정도로써 운용이 가능하다. 이것이 자항선의 경우에는 최저 15명에서 20명이 필요하게 된다. 인건비가 총비용의 약 1/3이라고 하면 승무원의 반감에 의한 총비용이 15% 감소된다.

한 척의 push boat로서 다수의 barge를 취급할 수 있다는 것은 운용방법에 따라서는 큰 이점이 있으므로 손쉽게 운항할 수가 있으며 각종 화물을 화물종류와는 무관하게 자유로이 혼재할 수 있고 따라서 선적을 고정화할 필요가 없다.

예인 시스템에 비하여 추진효율이 우수하기 때문에 소요마력이 적게 든다.

예인 barge의 경우에는 barge가 tug boat의 프로펠러의 후류를 받으므로 저항이 증가한다. Geber의 실험⁵⁾에 의하면 예인되어 항해중인 barge에서, tug boat의 후류중에 있는 선두 barge는 저항이 약 30% 정도 증가한다고 한다. push-barge에서는 이러한 영향이 없으며 그 위에 barge후류중을 push boat가 항주함으로 추진효율이 올라간다. 예인 barge의 경우 일부가 물에 잠겨서 생기는 저항(약 5.6%)증가와 skeg에 의한 저항의 증가가 이 시스템에서는 소멸된다.

또한, 조종성능이 우수함으로 협소한 해역에서의 운항이 용이하며 barge에는 선원을 승선시킬 필요가 없으므로 필요 인원이 적어도 되며 무인이기 때문에 barge의 규격, 검사등도 완화될 수 있다. push-barge는 자항선에 비해 홀수를 적게 할 수 있고 barge의 wake가 tug의 저항을 감소시킬 뿐 아니라 프로펠러의 추력을 향상시킨다.

Push-Barge 시스템의 단점

연결부가 파랑에 대하여 약하다. 이것은 하천에서는 문제가 없지만 광대한 수면에서 운항되는 때에는 중요한 문제점이 된다. 연결부는 여러 가지의 새로운 방식이 개발시도 되고 있으나 근본적으로 파랑에 약하므로 내파성능, 대양항해 성능이 약하다.

또, 육상에 관리자를 필요로 하고 또 항만시설로서도 barge pool과 같은 풍랑에 대하여 가장 안전한 수면을 필요로 한다. barge에 승조원이 없기 때문에 barge관리에 문제가 있다. 파도의 길이가 barge 길이의 절반을 넘게 되면 연결 장치에 어려운 문제가 발생하고 그에 따라 연결장치에 의한 건조비 증가와 tug의 안전성 문제 등이 발생한다. 파도가 일면 tug와 barge의 상대운동에 의한 충돌 등으로 인해 pushing이 불가능해져 예인 할 수밖에 없으며, 항해 중에 pushing에서 towing으로 전환할 때 번거로우며 많은 시간이 소비된다.

이러한 결점을 보완하기 위하여 tug와 barge의 상대운동 특히 surge를 제한하는 여러 가지 연결장치들이 고안되었다.

이 시스템은 일반적으로 고속을 기대할 수 없으며 속력이 느리다. push boat와 barge가 서로 별개의 것이 조합되어 있는 것이기 때문에 아무래도 저항이 커져서 속력이 늦어진다. 이 밖에, 장대한 선단에서는 특히 조항자가 최후 부에 위치하게 됨으로 앞을 잘 볼 수가 없다는 점과 홀수의 주요치수, 집안안벽, 하역설비에 제약을 받지 않는 때에는 자항화물선에 비하여 저항이 크다는 단점들도 있다.

2.3 통합 Tug - Barge 시스템 (I. T. B)

I.T.B 시스템은 hinge 등과 같이 상대운동이 일부 허용되는 연결장치의 결과가 별로 만족스럽지 못하였으므로³⁾ 이를 해결하기 위해 barge의 선미에 notch를 두어 tug의 선수를 끼우고 췌기(wedge) 등을 이용하여 tug를 barge에 완전히 고정시키는 방법이다. 이 방법은 B. Burling에 의해 1895년에 이미 특허화했던 것인데 그것이 첫 번째로 실용화 된 것은 1950년에 미국에서 건조된 Carport에 의해서였다.⁴⁾

I.T.B 개념의 Carport는 Aztec Chief라는 이름으로 Caribbean, South Atlantic 그리고 Gulf Coast 등지에서 성공적으로 운항되고 있다.²⁾

draft 운항에 적합하다. tug에 충분한 공간을 이용할 수 있어서 거주구역, 창고, 기관실의 공간이 충분하며, 그 배치가 용이하다.

tug-barge 연결부분에 부하가 적게 걸리므로 간단하고 저렴한 연결장치를 사용할 수 있으며, tug과 barge의 분리가 간편하고 신속하므로 구명보트를 따로 설치할 필요가 없다. 이 시스템은 I. T. B에서 나타나는 cubic capacity 감소 등의 불리한 점이 없어질 수 있다.

CATUG 시스템의 단점

단추진기인 I. T. B보다 추진효율이 떨어지고 항해 시간이 길어지는 대양항해에서는 조종성능이 떨어진다.

2.5 각 시스템의 장·단점 비교 및 검토

Table. 1 Comparison of merit or demerit of systems

	장점	단점	비고
Tow Barge System	① 노후선의 barge를 개조하여 사용할 수 있다.	① towline을 중심으로 relative surge를 한다. ② yawing 방지를 위한 skeg에 의한 저항 증가 ③ surge를 줄이기 위해 대형, 대마력화 해야 한다.	연안 항해에 이용
Push Barge System	① 저항선에 비해 건조가격이 매우 싸다. ② 형태가 단순하므로 수리비, 유지비가 작다. ③ 한 척의 push boat로 다수의 barge를 취급할 수 있다. ④ skeg에 의한 저항 증가 소멸 ⑤ barge의 wake가 tug의 저항을 감소 시킴 ⑥ towing system 보다 조종 성능 향상 ⑦ 일부가 물에 잠기는 towline에 의한 저항 소멸	① 저항선보다 저항·추진 성능이 약간 뒤진다. ② 내파성능·대양항해 성능이 약하다. ③ 일반적으로 고속을 기대할 수 없으며 속력은 느리다. ④ 항해중에 pushing에서 towing으로의 변환이 번거로우며 소요시간이 길다.	연안 항해에 이용
ITB System	① 저항선의 lines와 같으므로 대양 항해가 가능 ② 저항·추진성능 향상 ③ tug의 길이가 짧으므로 tug의 scantling을 작게할 수 있다.	① notch 부분의 구조 강도 상결함 ② notch 구조가 복잡하고 연결장치의 비용이 많이 든다. ③ notch에 의한 화물 적재 능력의 감소	대양 항해에 적합
CATUG System	① 프로펠러에 의한 water flow 양호 ② shallow draft 운항에 적합 ③ Tug-Barge 연결 장치가 간단, 저렴 (연결부에 부하가 작게 걸린다.) ④ tug과 barge의 분리가 간편, 신속	① 쌍추진기 이므로, 단추진기인 ITB 보다 추진효율이 떨어진다. ② 항해시간이 길어지는 대양항해에서는 조종성능이 떨어진다.	대양과 연안 항해에 적합

3. Barge 시스템의 연결방식의 종류 및 특성 분석

push-barge의 연결방식을 살펴보면 크게 연성 연결 시스템과 강성 연결 시스템으로 나눌 수 있으며, 이 연결 방식의 특성에 따라 대양 및 연안의 각각의 해상상태에 적합한 방식을 찾아내어 경제성과 신빙성을 고려할 수 있다.

3.1 연성 연결 시스템

연성 연결 시스템은 연안항해용으로 사용되는 것으로 부선과 예선 사이에 heave, pitch, roll 등 부분적인 상대운동이 허용되도록 설계된 것이다. 즉 대부분이 shallow notch를 가지며 연결장치가 상대적으로 간단하므로, 항해 가능한 해상상태가 제안되지만, 연결장치의 비용이 적게들 뿐 아니라 연결과 분리작업이 간단히 이루어진다. 항해의 제한을 받는 대신, 연결장치의 비용의 절감, 운항상의 편리, shallow notch에 의한 화물창 축소, 즉 화물창의 용적 감소 방지 등의 이점을 얻을 수 있다.

연성 연결 시스템의 종류

① Deep-notch, Cable connected 시스템

운항상의 편리로 미국에서 해안을 따른 barge의 pushing 방법으로 가장 널리 사용되는 것이다. Fig. 3에서 보인 것처럼 주로 사용되는 tug은 barge의 선미에 deep-notch를 두고 그 곳에 알맞게 들어간다. notch의 길이는 tug의 25~50% 정도이다.

이 시스템의 큰 장점은 홀수에 관계없이 barge의 수직벽면 때문에 notch 안으로 tug이 들어갈 수 있다는 것이다.

이 시스템은 원유, 석유제품, 그리고 광석화물의 운반용으로 미국에서 30000 DWT 까지 barge로 사용되고 있다.¹¹⁾

pushing mode로 연안항해에서 tug는 적어도 10~14 knots의 속도와 7,500 BHP 이상의 힘을 가지고 있어야 한다.

tug와 barge는 그 형태, 위상파에서의 위치 때문에 motion response가 달라진다.

따라서, 선미 notch로부터 tug가 뒤로 당겨지지 않으면 두 배(tug and barge)를 연결한 장치가 부서지게 되므로 이 시스템은 비교적 낮은 파고에서

가능하며 대양항해에는 한계가 있다. 그 위에 나쁜 기상상태가 예상된다면 예인 시에 barge의 밑부분에 방향안정성(directional stability)을 위해서 skeg flap 이나 rudder를 설치 할 수 있다.

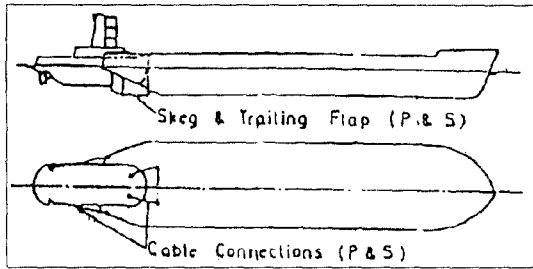


Fig. 3 Sketch of general arrangement Deep notch

② Artubar 시스템

이 시스템의 특징은 Fig. 4에서와 같이 tug를 barge에 연결하는 방법으로 pitching을 자유로이 허용하도록 고안된 pin connection이며 이것에 추가하여 barge 선미 양단에 wing wall을 채택하고 있는 점이다. tug의 선수 옆면에 가로 방향으로 주갑판의 약간 뒷부분에 강철고정핀(steel hinge pin)을 가지고 있다. 이 핀이 barge의 notch 옆면에 있는 socket에 들어간다. 이와 같은 이유로 pitching mode에서 편 축을 중심으로 tug이 종 방향으로 회전하는 것을 제외한 다른 상대적인 운동이 편에 의해서 구속된다. notch의 양 면에 있는 두 개의 socket은 고무 베어링으로 연결되어 있는데 이것은 충격완충 및 힘의 분산작용을 한다.

배의 특성에 따라서 발생하는 파의 운동으로 생기는 전단력에 대한 고려, 편 의 bending을 생각한 tug의 선미 구조의 적당한 보강도 필요하다.

이 시스템의 가장 큰 장점은 화물적재 중량당 건조비가 재래선에 비하여 저렴하고 보선비용이 재래선 보다 저하된다는 점이다. 또한 선원비가 현저하게 감소하며 재래선에 비교하여 화물적재량이 많다. 그리고 tug 및 barge의 탈착이 용이하다는 것이다.

Artubar 개념은 Edwin H. Fletcher에 의해 1967년 특허화 되었으며 특허권은 Transway International Corp이 가지고 있다.¹¹ 1975년 초기에 대만과 일본 사이를 원형 Artubar tug-barge가 운항하여 왔다.

4000 BHP의 tug에 4600 DWT의 일반적인 화물

barge 두 개로 이루어져 있다. 하중이 실린 속도는 12 knots 정도로 보고되고 있다.

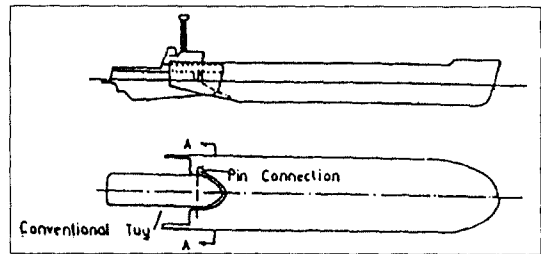


Fig. 4 Sketch of general arrangement Artubar

③ Sea-Link 시스템

Sea-Link의 개념은 1962년 이후에 미국의 L. R. Glostene에 의해 발전된 것으로 barge의 선미 양쪽이 수평방향의 축에 힌지된 고정 pushing frame과 지지대(strut)로 이루어져 있다.¹¹

frame은 barge의 한 쪽 측면과 자유회전고리(universal-swivel)로 통해 frame에 맞닿는 tug의 옆면이 연결된다. frame은 tug의 추진력을 barge에 전달하며, 바람과 바다에 의한 측면운동과 조종에 걸리는 힘으로 생기는 tug의 수평방향의 운동을 억제시킨다.

tug의 다른 한쪽 면에는 tug과 barge사이의 roll 운동에도 조종할 수 있도록 지지대가 frame과 같은 방법으로 연결되어 있다.

시스템의 기본 원리는 tug과 barge 사이의 자유도를 조절하는 것이다. 따라서, 연결장치는 yaw, surge와 sway가 충분히 억제되고 heave와 pitch의 진동을 허용하도록 고안되어 있다.

Fig. 5의 이 시스템은 기차의 연결방식처럼 barge를 상호 연결하는 것이 가능하다.

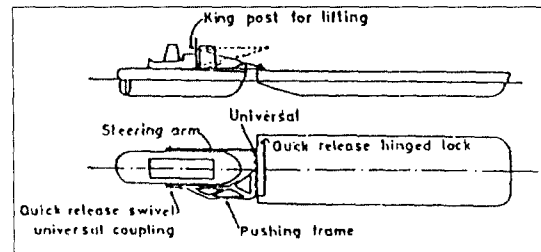


Fig. 5 Sketch of general arrangement Sea-Link

④ Lunde 시스템

San Francisco의 Thomas L. Lunde Inc.에 의해 설계된 이 시스템은 채래의 tug 디자인을 이용하여 연안을 따라 운항하도록 설계되었으며 수직하게 구부러진 pusher bar가 붙여져 있는 straight stern을 가진 barge를 위해 고안되었다.¹⁾ pushing rod의 충격을 흡수하는 이 bar는 barge와 연결된 tug의 roll과 pitch 운동이 가능하도록 하는 ball과 socket joint로 구성되어 있다. Fig. 6에서 보는 것과 같이 barge 선미의 좌현, 우현의 끝에 있는 손잡이(tiller)가 tug의 선미에 탑재된 유압 tension cylinder에 고장력선으로 연결되어 있다. 이 tension cylinder가 고장력선을 조절한다. 이것은 tug과 barge 사이의 흡수문제를 발생시키지 않으며 몇몇 중형 크기가 이 시스템에 설치되어 사용되었다.

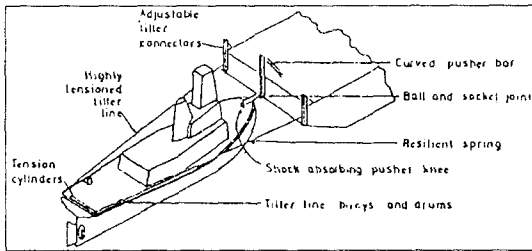


Fig. 6 Sketch of general arrangement Lunde

⑤ Seebeck 시스템

독일의 A. G. Wester에 의해 최근 설계된 방식으로 ball-type coupling으로 tug과 barge 선미의 guide bar를 "trolley" 처럼 연결하는 방식이다.¹⁾

충격완충장치가 coupling된 부분을 감싸고 있으며 pitch와 heave를 구속하지 못한다. Seebeck 시스템은 모델 예인 수조 (model towing tank)에서 파의 상태는 Beaufort Scale 12 까지로 테스트한 것으로 보고되고 있다. Hapag-Loyd는 정박을 목적으로 하는 배로서 이 시스템의 tug을 채택했으며 Seebeck 롤러가 작업중에 효율적인 것이라고 알려져 있다. 이런 상황에서 높은 충격을 흡수할 수 있는 Fig. 7의 ball-type 이중롤러 방현재(fendering head)는 tug과 barge의 심한 손상을 막아 준다. 또한 3m나 그 이상의 파도에서 배를 정박시키는 동안 정박이 수월하게 tug의 자세를 유지할 수 있도록 도움을 준다. ball-type 이중 롤러 방현재는 높은 에

너지 흡수 능력을 갖고 있어 push barge에서 널리 사용되고 있다. 가장 작은 이중 방현재는 길이 방향으로 110 tones, 측면으로 45 tones의 thrust를 버티도록 설계되었다.

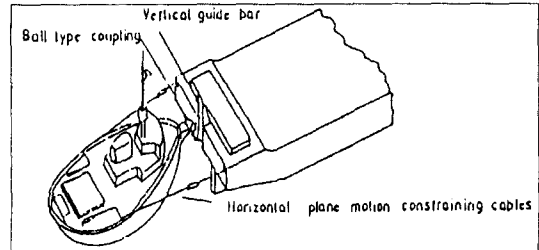


Fig. 7 Sketch of general arrangement Seebeck

⑥ Mitsubishi 시스템

Mitsubishi 시스템은 pushing knee가 달려 있는 정방향 선수의 tug과 정방향 선미의 barge가 직접 맞닿아 있는 형태로 구성되어 있다. tug과 barge는 두 개의 강철선으로 연결하는데 이 강철선은 tug에 설치된 유압 실린더에 의해 팽팽하게 긴장시켜 두 선박을 결합시킨다. 이 시스템이 처음으로 이용된 것은 일본에서 평균 8 knots의 속도로 해안에서 강재를 운송한 것으로 알려져 있다. 운항상 파고가 3 m 정도로 제한 된다.¹⁾

⑦ Hydropad 시스템

프랑스의 ACB사에서 고안된 이 시스템은 파고 4.5 m에서 견딜 수 있으며 건조상의 규격오차를 어느 정도 허용할 수 있다.¹⁾ Hydropad 시스템은 Tug-Barge 시스템 Inc.와 같은 notch를 채택하고 있다.

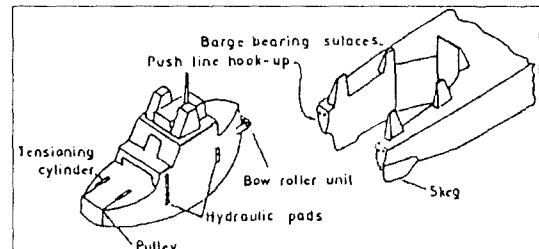


Fig. 8 Sketch of general arrangement Hydropad

그러나 이 시스템은 정박의 방법에서 상당한 차이가 있다. tug과 barge의 접촉면을 수압 pad를 사

용하여 두 요소를 탈착하게 되 있다. 이 pad는 steel-braced rubber로 수압 pack에 의해서 tug에 고정되어 있다.

3.2 강성 연결 시스템

강성 연결 시스템은 대개 대양 항해용으로 개발된 것으로 부선과 예선 사이에 상대운동이 전혀 없어, 한 척의 배와 똑같이 운항한다. 따라서 두 배 사이에 걸리는 하중을 이겨낼 수 있도록 대부분이 deep notch를 갖고 있으며, 연결장치(connecting device)의 용량이 크고 연결면적이 넓다.

강성 연결 시스템의 종류

① Carport 시스템

George G. Sharp Inc.에 의해 설계되고 1950년에 처음 건조된 이 시스템은 매우 성공적이며 최근의 tug-barge 시스템의 설계에 있어 많은 영향을 주고 있다.¹⁾ barge 선미는 bottom floor나 dock structure로 이루어진 deep notch를 두었고, barge 주갑판 높이에 구조적 돌출부(overhangs)를 갖고 있다.

나무로 피복된 dock bottom이 keel에서 구축되고 girder 돌출부(overhangs)의 윗부분이 주갑판에서 구축되어 tug이 barge에 고정된다.

보통의 것보다 훨씬 큰 깊이를 가진 tug가 자력으로 notch 안에 들어가면 유압 jack과 조임새(tumbuckles)로 barge와 고정된다. 연결부가 매끈하여 자항선의 lines와 같다.

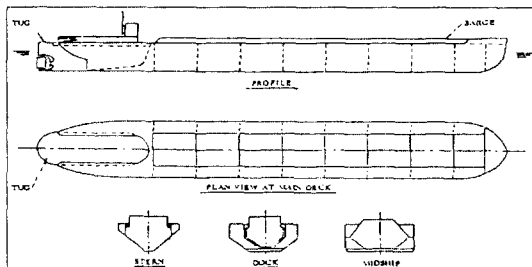


Fig. 9 Sketch of general arrangement Carport

② Ingram-Breit 시스템

Breit Engineering Co와 Ingram Ocean Systems Inc에서 현재 사용되는 탱커(tanker)의 성능과 barge 시스템의 경제성을 I.T.B 설계에 적용하여 발전시키려고 시도한 것이다.¹⁾

I.T.B나 Carport는 barge의 선미에 있어 deep notch를 두고 구조적으로 도크(dock)와 girder 돌출부를 만들고 이것을 선미의 wedge 형태의 홈에 끼우는 방법을 기본으로 계속돼 왔다. 발전된 이 시스템의 locking 장치는 tug의 선수에 1,500 ton 유압 펌프(hydraulic ram)와 가로 wedge로 이루어져 있다.

tug가 자력으로 notch로 들어가면 유압 펌프가 앞쪽으로 열린다. 이때 tug의 선체에 있는 끝이 뾰족한 돌출부가 notch에 있는 wedge 모양의 홈(receptacle)에 들어가게 된다. 이 과정에서 tug 선수 범퍼와 두 쌍의 고무패드(ram)가 압축되어 tug의 선체와 barge가 고정된다. 유압 wedge 두 개가 주갑판의 오른쪽과 왼쪽에 위치해 있다. 이 시스템을 적용시킨 I.T.B는 10.67 m의 파고가 이는 폭풍에도 견딜 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾

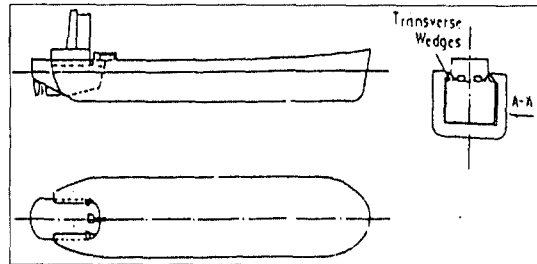


Fig. 10 Sketch of general arrangement Ingram-Breit

③ Murvicker 시스템

영국의 Tugbarges International Corp. Ltd.의 R. Murphy와 Vickers Shipbuilding Group에서 설계한 이 시스템은 tug가 지금까지의 tug의 형태와 거의 닮지 않았으므로 composite ship이나 engine-room을 분리할 수 있는 배에 비유할 수 있다.¹⁾

연결방법이 현재 운항되고 있는 기본적인 I.T.B 구성(combination)보다 복잡하며 두 배(Tug-Barge)를 연결하거나 분리시키는데 약 15분 정도 더 요구된다. tug의 선미형태가 barge의 크기나 비율에 맞춰 semi-notch 형태로 구성되어 있다.

barge notch의 벽은 외형을 매끄럽게 하여 barge jaws와 tug의 shoulder가 정확하게 맞물려 들어가게 한다.

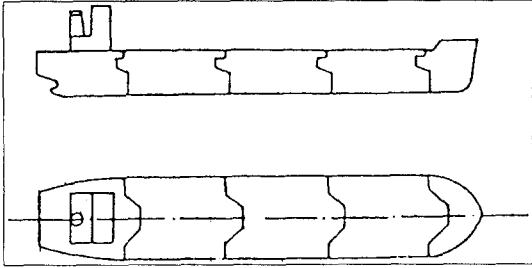


Fig. 11 Murvicker 시스템

④ Waller/Forker 시스템

Carport의 개념을 직접적으로 향상시키기 위한 이 시스템은 tug의 tension locking 장치와 barge의 jaw recess에 있는 sliding wedge를 더 깊게 결속하는 방법이 요구됨에 따라 등장하였다.

Houston에 있는 Marin Engineering System Inc의 설계자 Mr. D. Waller와 Arzteg Trading Co.의 사장 Mr. Forker는 rigid connection 방식으로 tug와 barge를 연결할 때 이 방법이 연결비용을 줄일 수 있다고 주장 하였다.¹⁾

3.3 각 시스템의 장 · 단점 비교

Table. 2 Comparison of coupling types

		장점	단점	비고
Non Rigid System	① Deep-notch	① 부선과 예선 사이의 부분적인 pitch, heave, roll 등이 허용 된다. ② 연결장치의 비용이 저렴하다. ③ 연결과 분리작업 간단하다. ④ 운항상의 편리부선의 적재상태에 따른 흡수 변화에 적응. ⑤ 화물창의 용적 감소 방지(shallow notch에 의한 화물창의 축소)	① 항해 가능한 해상 상태가 제한 (연결 장치가 간단하여 파손되기 쉽다)	연안 항해용
	② Artubar			
③ Sea-Link				
④ Lunde				
⑤ Seabeck				
⑥ Hydroad				
⑦ Mitsubishi				
Rigid Connection System	① Carport	① 부선과 예선사이의 상대운동이 없다. ② tug과 barge사이에서 걸리는 하중에 잘 견디는 다. ③ 한척의 배와 같이 운항한다. (해상상태에 잘 적응한다.)	① 연결장치의 용량 비대 ② 연결면적이 넓다. ③ deep notch에 의한 화물창용적의 감소	대양 항해용
	② Breit			
	③ Ingram			
	④ CATUG			
	⑤ Murvicker			
	⑥ Intertug Package			
⑦ Walker/Forker				

4. 효과적인 운하 운송 시스템 특성화

여러 가지 연결방식 중 우리 나라의 연안 수송에 적합한 방식을 결정하기 위해서는 우선 항로의 해상상태를 설정하여야 할 것이다. 즉 Beaufort scale, significant wave height, 연중 운항가능 일수 등을 설정하면 그 상태에 알맞은 연결장치를 결정할 수 있다. 또한, 연결 방식을 선택하는데 다음과 같은 점들을 유의하여야 한다.

첫째, 연결 및 분리작업은 간편, 신속, 그리고 안전한가, 둘째, deep notch에 의한 화물창 용적의 감소는 얼마나 되는가, 셋째, tug과 연결되었을 때 좋은 추진성능을 위한 선미형상과 lines는 어떤 것인가 마지막으로, 조종성능의 향상을 기대할 수 있는가 등이다.

선박이 연근해 뿐만이 아니라 일본, 동남아 등의 항로에 취항할 가능성이 있으므로 극동해역의 해상상태를 설계상태로 보는 것이 유리 할 것이다.

항로 거리가 길어지면, 부선과 예선의 상대운동이 없는 rigid-connection이 유리하며 조종성이 뛰어나고 화물량이 연안 항로에서 보다 크므로 화물창 용적의 감소가 적어야 한다.

우리 나라의 운하 운송은 연안 수송의 경우처럼 항해시간이 별로 길지 않으므로 파고에 의해서 연결장치에 걸리는 부하는 작을 것이다. 따라서 연결장치는 간단하여도 된다. 또한, 항만내의 잦은 입, 출항이 요구되므로 조종성능이 우수해야 한다. 이런 것들을 비교해 볼 때 저렴하고 간단한 연결장치를 갖고 있고, 조종성이 뛰어나며, shallow draft 운항에 적합한 CATUG이 유리할 것으로 여겨진다.^{6),7)}

5. 운하 운송 Barge의 최적 시스템 개발

5.1 우위비교를 통한 최적 시스템의 선정

현재 운항되는 각 시스템의 특성에 따라서 크게 tug-barge 시스템의 종류와 push-barge의 연결 방식에 따라 분류하였다. 각 항목에서 장점이 되는 특성은 다른 항목에서는 단점이 되는 등의 상외가 발생하므로 점수를 조밀하게 줄 수 없기 때문에 각 항목에 대한 점수는 5점, 3점, 1점으로 주었다.

Weight를 살펴보면 우선 조종성의 측면에서는 물이 얇을 뿐만 아니라 폭에도 제한이 있는 운하나 수로에서는, 폭에 제한이 없는 얇은 물에서 보다 유체 동력학적 도함수들이 더욱 심하게 달라지며 배를 가까운 벽 쪽으로 잡아당기는 힘이 발생하고, 또한 실선에서의 경향과, 모형실험에서 밝혀진 바와 같이, 선수를 먼 벽 쪽으로 돌리려는 모우먼트도 동시에 발생한다.⁶⁾ 이러한 이유로 배의 조종성능이 무엇보다 중요하며, 선박의 작은 입출항이 요구됨에 따라 그 중요성은 더욱 증대 된다. weight=3

안정성의 경우에는 tug에 barge를 연결하여 운항하는 것이므로 교란을 받은 뒤에 원래의 평형상태로 돌아와서 침로를 유지하는 것이 한 척의 배보다는 훨씬 더 어렵다.

교란 중에 연결장치를 중심으로 relative surge를 하게 되는데 교란 후에 초기 침로에서의 직선운동과 방향을 유지하는 것이 부선과 예선을 연결장치로 연결하였으므로 이것을 구속하는 것이 매우 어렵다.⁷⁾ 교란 후의 최종 침로가 초기 침로의 직선운동과 방향까지 유지해야 하는데 이것이 바로 방향 안정성이다.

방향안정성이 tug-barge 시스템에서 가장 중요한 만큼 이것의 증대가 필요하다. 방향안정성의 증대를 위해서 기존의 I.T.B 시스템과 같이 자항선의 lines를 갖는 시스템이 좋다. weight=2

추진효율면에서는 일반적으로 쌍추진기의 추진효율은 단추진기 보다 떨어진다.³⁾ 추진효율의 저하는 연료의 소비 증가에 의해 운항비 증가를 가져올 뿐만 아니라, 같은 속력을 내기 위해 대 마력의 기관을 장비 하여야 하므로 기관 구입비의 증가는 물론 기관의 수리, 유지비도 증가하게 되는 등 선박의 경제성에 많은 영향을 준다.

대양을 항해하는 경우처럼 항해시간이 상당히 긴 경우에는 단추진기선이 절대적으로 유리하겠으며, 연안수송의 경우에는 단추진기선의 이점이 상당히 감소하고, 그밖에 다른 인자들이 포함되어야 한다.

경인 운하의 경우 항속이 6 knots 이하이므로 추진효율의 차이는 더 감소하게 된다. weight=0.5

선체저항의 관점에서 살펴보면 배의 저항은 물 깊이의 영향을 매우 민감하게 받게 된다. 운하처럼

특정 깊이의 물에서는 저항이 얇은 물에 비하여 크게 증가하게 된다.⁶⁾ 운하는 폭 방향으로도 제한되어 있으므로 저항 증가나 속도 감소가 더욱 두드러진다. 속도 손실이 나타나면 결국 tug-barge 시스템의 추력을 감소시키므로 tug의 속도를 높여야 한다. 하지만 항속이 6 knots 이하로 규정되어 있으므로 저항을 줄여야 한다. 저항을 최소화하는 것은 속도손실을 줄여야 하는 것이며 선박의 경제성에 직결되는 문제이므로 매우 중요하다. weight=3

Table. 3을 살펴보면 조종성의 경우 쌍추진기인 CATUG 시스템이 기존의 것들에 비해 선회반경이 약 절반으로 되는 등 조종성능면에서 가장 유리하여 5점을 주었으며, 다른 시스템은 연결장치로 인한 조종성능의 저하로 3점을, 예인-barge 시스템의 경우에는 예인 줄로 연결되어 있으므로 조종성능면에서 제일 떨어지므로 1점을 주었다.

안정성의 경우에는 강성연결 시스템인 I.T.B 시스템, CATUG 시스템은 자항선과 같이 운항하므로 연결장치에 걸리는 각종 운동에 대해 잘 견디므로 5점을 주었고, push-barge 시스템은 상대적인 운동을 허용하므로 교란 후에 방향안정성을 갖기 어려우므로 3점을, tow-barge 시스템은 relative surge등을 하므로 안정성 면에서 가장 떨어지므로 1점을 주었다.

연결방식의 경우에는 강성 연결 시스템인 I.T.B 시스템, CATUG 시스템은 위 두 방식보다 연결장치가 안전하므로 5점을, push-barge 시스템은 파도의 길이가 barge 길이의 절반을 넘게 되면 부분적인 pitching, heaving, yawing을 허용하는 연결장치가 안전치 못하므로 3점을 주었으며, tow-barge 시스템은 예인 줄에 의한 연결장치이므로 가장 안전치 못해 1점을 주었다.

분리작업면에서는 tow-barge 시스템, push-barge 시스템의 분리가 신속·간편하므로 5점을, 강성 연결 시스템인 I.T.B 시스템, CATUG 시스템은 상대적으로 분리가 어려우나, 둘을 비교하면 CATUG 시스템은 3점을, I.T.B 시스템은 1점을 주었다.

선체저항면에서는 I.T.B 시스템, CATUG 시스템은 강성연결 시스템으로 자항선의 lines와 같으므로 선체저항면에서 유리하므로 5점을 주었다.

push-barge 시스템은 push boat와 barge가 서로 별개의 것이 조합되어 있는 것이기 때문에 아무래도 저항이 커져서 속력이 늦어지므로 3점을 tow-barge 시스템은 yawing 방지를 위해 설치한 skeg에 의한 저항이 증가하고 예인줄의 일부가 물에 잠겨 저항이 증가하게 되는 등 최악의 조건이므로 1점을 주었다.

추진효율면에서는 단추진기인 push-barge 시스템 I.T.B 시스템이 쌍추진기인 CATUG 시스템에 비해 추진 효율면에서 15% 정도 유리하여 5점을 주었고, CATUG 시스템은 3점을 주었으며 tow-barge 시스템은 push-barge 시스템이 속력으로 10~15% 정도 차이가 날 만큼 좋지 못하여 1점을 주었다. 이상의 결과를 종합하여 Table. 3에, Table. 4 에는 연결방식에 따라, 정리하였으며 이를 이용하여 최적시스템을 선정하게 된다.

5.2 최적 시스템 선정을 위한 단순 모델링

각각의 변수를 정하고 강조되는 항목의 변수에 대해 weight를 주어 사용목적에 적합하도록 하였고, "f(x) = 시스템의 최적 성능"이라는 식을 정하여 선형 합으로 계산하였다.

$$f(x) = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + X_3 + \alpha_3 X_4 + \alpha_4 X_5 + X_6 + X_7 + \alpha_5 X_8 + \alpha_6 X_9$$

변 수

- X₁ = 조종성
- X₂ = 안정성
- X₃ = 연결방식
- X₄ = 분리작업
- X₅ = 수리·유지비
- X₆ = 실선운용
- X₇ = 건조비
- X₈ = 선체저항
- X₉ = 추진효율

weight

$$\alpha_1 = 3$$

$$\alpha_2 = 2$$

$$\alpha_3 = 2$$

$$\alpha_4 = 3$$

$$\alpha_5 = 3$$

$$\alpha_6 = 0.5$$

1차적으로 최적 시스템을 선정, 각 항목을 위 식에 대입하여 Table로 나타내면 다음과 같다. (Table. 4.) 이 경우 CATUG시스템이 점수가 가장 높다.

Table. 3 Comparison of tug-barge systems

항 목 \ type	Tow-Barge	Push-Barge	I.T.B	CATUG
조종성	3	9	9	15
안정성	2	6	10	10
연결방식	1	3	5	5
분리작업	10	6	2	6
수리·유지비	6	10	2	6
실선운용	1	3	3	5
건조비	5	3	1	3
선체저항	3	9	15	15
추진효율	0.5	2.5	2.5	1.5
합 계	31.5	51.5	49.5	66.5

Table. 4 Comparison of push-barge systems for optimal selection

항목 \ type	연성 연결 시스템				강성 연결 시스템		
	Deep-notch	Artubar	Sea-link	Lunde	Carpport	Breit-Ingram	CATUG
조종성	9	3	9	9	9	9	15
안정성	6	2	2	2	10	10	10
연결방식	3	3	3	3	5	5	5
분리작업	2	10	6	6	2	2	6
수리·유지비	10	6	10	10	2	2	6
실선운용	5	1	5	5	5	5	5
건조비	5	3	5	5	1	1	3
선체저항	3	9	3	3	15	15	15
추진효율	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.5
합 계	45.5	39.5	45.5	45.5	51.5	51.5	66.5

5.3 Barge 시스템의 최적 설계

전절에서 선정된 CATUG 시스템을 기준으로 하여, barge 시스템을 구성하고 있는 각종 요소를 설계변수로 하여 barge 시스템의 최적 설계를 수행하여 보았다. 제한조건을 만족시키며, 경제성을 목적함수로 하여 최적 시스템을 찾아보았으며, 그 구성요건은 다음과 같이 정리될 수 있겠다.

- 목적함수 : 경제성
- 설계변수 : Barge의 길이(L), 폭(B), 깊이(D), 흘수(T), 연결시스템의 연결방식, 추진시스템의 선정
- 제한조건 : 안전성, 항로제약(운하의 길이, 폭) 복원성능, 선사의 요구조건
 운하내 항속 : 6 knots 이하
 연안 또는 근해 항해여부
 barge 폭(B) : 15 m
 (barge 선단이 갑문을 통과해야하므로 규정된 갑실과 문비의 최소 폭 18 m를 기준으로 잡고 계산)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize Yield} = f(L, B, D, C_B, V, \dots) \\ &\text{Subject to DWT}(L, B, D, \dots) \geq \text{DWT required} \\ &\text{GM}(L, B, D, \dots) \geq \text{GM min} \\ &\text{FB}(L, B, D, \dots) \geq \text{FB min} \\ &0.85 \leq C_B \leq 0.9 \\ &L/D \leq 15.7 \end{aligned}$$

SUMT-external method를 통해 unconstrained 문제화 한 후에 Hook and Jeeves pattern search를 이용하여 최적점을 구하는 프로그램으로 barge의 최적 주요치수를 결정하였고 이윤율을 계산하여 얻은 결과를 Table. 5에 나타내었다.^{8)~10)}

최적의 시스템은 마지막 것으로 규명되어 졌다.

Table. 5 Barge dimension and maximum yield

L (m)	107.9	152.4	182.8	207.5
B (m)	14.47	14.47	14.47	14.47
D (m)	6.8	9.3	11.0	12.3
T (m)	4.9	5.2	5.4	5.6
C _B	0.87	0.87	0.87	0.85
V (knot)	6.08	6.02	6.00	5.56
BHP	253	424	577	793
CAP	241	361	477	574
배의 척수	3	3	3	5
Loadfactor	0.8	0.8	0.8	0.8
이윤율	12.9%	12.9%	13.1%	13.3%

6. 토론 및 결론

본 논문에서는 tug-barge 시스템의 추진형태와 push-barge 시스템의 연결방식에 대해 특성을 파악하고 장·단점을 비교 검토하였으며, 최적화 기법을 이용하여 barge 시스템의 주요요목과 이윤율을 계산하였으며, 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 추진의 형태에 따른 비교에서는 저항과 방향안정성의 감소 등의 여러 불리한 점으로 인해 예인 barge 시스템보다 push-barge 시스템이 월등히 우수한 것으로 판단된다.

둘째, push-barge의 연결방식에 따른 비교에서는 연성연결시스템은 연안항해용에, 강성연결시스템은 대양항해용에 적합한 방식으로 나타났다.

강성연결시스템 중에서 CATUG 시스템은 tug-barge 연결부에 상대적으로 부하가 적게 걸리고, tug과 barge의 분리가 간편할 뿐만 아니라 운하 운항시 가장 중요한 조종성능의 측면에서 우수하므로 가장 적합한 방식으로 판단된다.

셋째, 최적의 시스템을 단순 모델링 하는데 있어서는 운하 운항시 영향을 주는 변수들을 정하고 사용목적에 적합하도록 중요도에 따라 weight를 주어 선형합(linear summation)으로 계산하였다.

넷째, 최적화 기법을 이용하여 기본설계 상에서 barge 시스템의 주요요목과 최대 이윤율을 계산하였다. 목적함수와 제한조건함수를 사용하여 복합함수를 구성하고 최적점의 추정에 영향을 줄만한 변화가 없을 때까지 계속하는 SUMT method를 통해 비제약 문제화 한 후에 각 변수에 약간씩의 변수를

주어 목적함수가 감소하는 방향으로 변수를 변화시켜 가는 Hook & Jeeves pattern search의 방법으로 최적점을 구하여 barge 선의 최적 주효 치수와 이윤율을 계산하였으며 이 방법은 이 경우 매우 효과적임이 밝혀졌다.

이상의 결과로써 CATUG 시스템이 경인운하 및 연근해 수송에 적합한 최적의 시스템이라고 판단되며, 이 CATUG 시스템을 도입함으로써 수도권의 육상교통체증을 완화시키고 육로를 이용한 화물 운송을 연안해상으로 전환시키므로써 화물 유통의 효율성을 제고할 수 있을 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

- 1) Marcello D. Arcos, "Integrated Tug Barge combinations", Motor Ship, 1980
- 2) 金 赫 俊, "Pusher 海上運送方式, Barge Line System의 現況", Personal Note
- 3) Robert P. Giblon and Robert J. Tapscott, "Design and Economics of Integrated Tug-Barge Systems", Marine Technology, July 1973
- 4) "Push-Barge System의 경제적 타당성에 대하여", Personal Note, S. H. Han, KRISO, 1980
- 5) R. F. Allan and H. F. Muhlet, "Design of Tug-Barge Systems for Minimum Energy Consumption", SNAME Spring Meeting, 1975
- 6) T. H. Havelock, "The Propagation of Groups of Waves in Dispersive Media, with Application to Waves on Water Produced by a Traveling Disturbance," *Proceedings of The Royal Society*, London, England, Series A, Vol. 81, 1908.
- 7) L. Landweber, "Tests of a Model in Restricted Channel," EMB Report 460, May 1939.
- 8) Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill Book Co.
- 9) S.S. RAO, "Optimization Theory and Applications", A Hasted Press.
- 10) 한승홍, "선박기본설계 과정에서 경제성 검토와 최적화 기법의 응용", 서울대 대학원 석사 학위논문, 1979