

해양한국발전프로그램(KSGP)연구개발사업
연 구 보 고 서

해양사고 방지를 위한 안전 활어창 개발에 관한 연구

Development of Safe Live-Fish Tank
to Prevent Marine Casualties

2004. 5. 27.

부산대학교 SG 연구 사업단

해 양 수 산 부

제 출 문

해양수산부 장관 귀하

본 보고서를 “해양사고 방지를 위한 안전 활어창 개발에 관한 연구”
과제의 최종보고서로 제출합니다.

2004 년 5 월 27 일

대학교명 : 부산대학교

사업단장 : 이 승 건

연구팀장 : 이 승 건

참여교수 : 김 수 영

요 약 문

I. 과 제 명

해양사고 방지를 위한 안전 활어창 개발에 관한 연구

II. 연구 개발의 목적 및 필요성

1. 연구 개발의 목적

어선의 해양사고는 전체 선박사고의 80%를 차지할 정도로 빈번하고, 사고의 원인으로서는 충돌, 좌초, 전복 및 기관 손상 등이 대부분이다. 이중, 어선의 고유 특성과 관련하여, 선박내부에 활어창을 갖고있는 경우 자유수에 의한 GM 감소 효과로 전복이나 침몰에 이르는 치명적인 해양사고를 야기하는 경우가 많다. 본 연구에서는, 종래 활어창 내부 자유수에 의한 복원성 약화 현상을 규명하고, 새로운 형태의 활어창을 설계하여, 활어창의 역할을 완수하면서도 복원성에 악영향을 끼치지 않도록 하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여서는, 기존의 활어창에 대한 이론적 분석과, 이를 개선할 수 있는 새로운 형태의 활어창 개발 및 실제 어선에 장착했을 경우의 효과 등에 대하여 이론 및 수조시험을 통한 연구가 수반되어야 한다.

2. 연구의 필요성

활어창 내부의 유동수는, 그 자유표면 효과 때문에 배 전체의 GM을 감소시켜, 원래 배가 갖고있는 복원성을 약화 시킨다. 한편, 어선의 경우 포획 어종에 따라서는 활어창이 필수적인 경우가 많고, 최근 활어 선호도가 증가하면서 활어창은 보편적으로 보급되게 되었다. 그러나, 어업 종사자의 대부분은 활어창에 의한 복원력 감소 현상이나, 해양사고 유발 가능성에 관해서는 인식이 부족하고, 활어창의 잘못된 사용에 의해 전복, 침몰 등의 치명적인 사고를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구는, 자유표면 효과를 최소화하고, 또 실선에 적용가능한 새로운 개념의 활어창을 개발 보급하여, 어선의 해양사고 방지에 일익을 담당하려고 한다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

1. 연구 개발 내용

기존의 활어창 내의 자유수에 의한 GM 감소효과는, 종래의 조선공학적 측면에서 이미 검토가 이루어져 있고, 또 ART(Anti-Rolling-Tank)나 능동제어 Fin Stabilizer 등에 의한 횡요 저감 System 등도 개발되어 있다.

그러나, 이러한 장치들은 고가이고 또 장소를 많이 점유하여, 소형 어선과 같은 경우 장치하기가 어려운 현실이다. 따라서, 새로운 개념의 경제적이고 안전한 활어창을 개발하여 보급하면, 어선의 해양사고 방지에 큰 도움이 될 것으로 생각한다.

본연구의 주된 개발 내용은 다음의 3가지이다.

1. 기존 활어창의 자유수 영향분석
2. 새로운 형태, 새로운 개념의 활어창 설계
3. 이론 및 실험에 의한 복원성 측면의 검증

2. 세부 내용 및 범위

1. 기존 활어창의 자유수 효과 해석
2. 기존 활어창의 형태, 운용방법 검토
3. 새로운 개념의 활어창 설계
4. 모형제작 및 수조시험에 의한 성능 해석

IV. 연구개발 결과 및 활용계획

1. 경제적 산업적 활용

어선 운항에 있어, 안전성을 향상시켜 해양사고 예방 및 인적 물적 손실을 감소시킬 수 있다.

또한, 어선이나 소형선의 건조에 본 기술을 활용시여 고부가 선박설계 및 생산에 기여하게 된다.

2. 학술적 활용

어선의 자유수에 의한 복원성 약화 및 해양사고 방지에 관하여, 실용적이고 유용한 Tool을 확보하게 된다.

V. 기대효과

1. 산업수요 측면

어선의 경우, 활어창의 자유수에 의한 GM 감소 및 복원성 열화 등에 대해서는 어업 종사자들의 인식이 부족하다. 따라서, 선박의 건조단계에서부터 안전한 활어창을 설계, 장착하면 근본적으로 어선의 안전성을 저해하는 요소를 제거하게 되어, 그로인한 인명손실 및 재산손실을 막을 수 있어 경제적인 파급효과가 클 것으로 생각된다.

2. 연구수행 측면

최근 해양수산부는 어선의 해양사고 방지 종합 대책을 수립하고, 어업종사자의 안전교육, 어선의 안전성 확보, 해양사고 예방 및 대응체제 구축 등에 힘을 쓰고 있다.

이러한 노력의 결과로, 상선의 경우 해양사고율이 점차 감소하고 있으나, 어선의 경우 오히려 증가하고 있다. 이 원인으로서는 어선의 대부분이 20ton 미만의 소형선이고, 선박의 노후화와 어로 종사자들의 자질문제 등의 관련되어 해양사고가 발생되기 때문으로 사료된다.

이를 예방하기 위해서는, 조선공학적 측면에서 안전한 설비(예를 들면 활어창, 양망기)를 개발하고, 승조원의 교육 및 운항지침서 등의 배포 및 소양교육 등이 필요하다.

본 연구는, 근본적으로 안전한 활어창을 설계하여 보급하는 것을 목표로 하고 있고, 이 연구가 성공적으로 수행되면 해양사고 방지에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

S U M M A R Y

Development of Safe Live-Fish Tank to Prevent Marine Casualties

Accidents of fishing vessels have accounted for about 80% of ship disasters, where one of main sources of the trouble is a reduction in GM due to the free surface of a fish hold.

Recently a strong demand for raw fish has popularized the fish hold in spite of its possible danger. Furthermore, people in the fishery industry are lack of information on the danger, which may cause the critical accidents like overturning and sinking.

As ART(Anti-Rolling-Tank) and Fin Stabilizer, which were developed as a roll reduction system in the past research, may not be commercially used in terms of their high price and large installation area, an economical and safe fish hold was recommended and studied in this research.

The capability of the newly designed fish hold was investigated via the theoretical and experimental approach as follows:

The theoretical formula to estimate the GM reduction due to the free surface of the fish hold was established.

Three types of the fish hold, made of acrylic, were tested in regular waves, such as the commonly used type, a type with vertical partitions and a newly designed type.

CONTENTS

1. Introduction	11
1.1 Summary	11
1.2 Dynamics of a Floating Body	11
1.3 Sea Conditions	13
1.4 Roll Motion	13
1.5 Ship Stability	15
1.6 The Need for a Mathematical Model	16
2 The Mathematical Models of Roll Motion	18
2.1 Summary	18
2.2 Formulation of the Problem	18
2.3 The Linearization of Roll Motion Equation	19
2.4 Procedure to find the Coefficients of Roll Motion	20
2.4.1 The Virtual Mass Moment of Inertia	20
2.4.2 Damping Moment	20
2.4.3 Restoring Moment	21
2.4.4 Exciting Moment	22
2.5 Nonlinear Roll Motion	23
2.5.1 Mechanism of Nonlinear Rolling Motion in Beam Sea Condition	23
2.5.2 Model of Nonlinear Roll Motion	23
2.5.3 Damping Moment	24
2.5.4 Restoring Moment	24
2.5.5 Exciting Moment	26
2.5.6 Equation of Nonlinear Roll Motion	27
2.6 Results and Discussions	28
2.6.1 Test Vessel	28
2.6.2 Linear Roll Response	29
2.6.3 Nonlinear Roll Response	29

3 Roll Motion Stability of Trawler with Live-Fish Tanks	32
3.1 Summary	32
3.1.1 Statical Stability Approach	32
3.2 Roll Motion Stability	36
3.2.1 The Environmental Effects on Righting Arm Curve	36
3.2.2 Upper Limit of Stability Margin	38
3.3 Wind Heeling Moment	39
3.4 Discussion of Roll Motion Stability	39
3.4.1 Implementation of Roll Motion Stability Concept	39
3.4.2 Evaluation of Stability Margin	40
3.4.3 Upper Limit of Stability Margin	41
3.4.4 Stability Evaluation with Live fish Tanks	42
3.4.4.1 The Restoring Moment of a ship with Live fish Tanks	43
3.4.4.2 Effect of high and low positions of Liquid Mass	45
4 Experiment of Roll Characteristic in Live-Fish Tank	46
4.1 Introduction	46
4.2 Experiment Summary	46
4.3 The Inclination Test	59
4.3.1 Performance Test of Ship with Tank A	59
4.3.2 Performance Test of Ship with Tank A	61
4.3.3 Performance Test of Ship with Tank B	63
4.3.4 Performance Test of Ship with Tank C	65
4.4 Comparison and Discussions among the Tank A,B and C	67
5 Conclusion	69
Reference	70

목 차

1. 서문	11
1.1 개요	11
1.2 부유체의 6자유도 운동	11
1.3 해상상태	13
1.4 횡요	13
1.5 선박 복원성	15
1.6 수학적 모델의 필요성	16
2 횡요 운동의 수학적 모델	18
2.1 개요	18
2.2 문제의 수식화	18
2.3 횡요 운동 방정식의 선형화	19
2.4 횡요 운동 계수 결정 과정	20
2.4.1 겹보기 질량 관성 모멘트	20
2.4.2 감쇠 모멘트	20
2.4.3 복원 모멘트	21
2.4.4 경사 모멘트	22
2.5 비선형 횡요 운동	23
2.5.1 횡파 상태에서 비선형 횡요 운동의 메커니즘	23
2.5.2 비선형 횡요 운동 모델	23
2.5.3 감쇠 모멘트	24
2.5.4 복원 모멘트	24
2.5.5 경사 모멘트	26
2.5.6 비선형 횡요 운동 방정식	27
2.6 결과 및 고찰	28
2.6.1 공시선	28
2.6.2 선형 횡요 응답	29
2.6.3 비선형 횡요 응답	29

3 활어창이 적재된 어선의 횡요 운동 복원성	32
3.1 서론	32
3.1.1 정적 복원성 평가	32
3.2 횡요 운동 복원성	36
3.2.1 복원정 곡선에 미치는 환경적 영향	36
3.2.2 한계 복원력의 상한	38
3.3 바람에 의한 경사 모멘트	39
3.4 횡요 운동 복원성 평가	39
3.4.1 횡요 운동 복원성 평가 방법	39
3.4.2 한계 복원력의 평가	40
3.4.3 한계 복원력의 상한	41
3.4.4 활어창 적재 시 복원성 평가	42
3.4.4.1 활어창 적재 시 선박의 복원 모멘트	43
3.4.4.2 액체 화물 질량의 위치의 영향	45
4 활어창의 Roll 특성에 관한 실험	46
4.1 서론	46
4.2 실험개요	46
4.3 경사시험	59
4.3.1 Tank A 장착 시 성능시험	59
4.3.2 Tank A 장착 시 성능시험	61
4.3.3 Tank B 장착 시 성능시험	63
4.3.4 Tank C 장착시 성능시험	65
4.4 Tank A, B, C 간 비교 및 고찰	67
5 결론	69
참고문헌	70

1. 서 문

1.1 개 요

최근 10여 년간 일어난 높은 해상 사고 발생률로 인해, 해상 사고로부터의 인명 보호와 해양 환경의 보호는, 정부 기관과 기업 그리고 대중에게 점차 중요 관심사가 되고 있다. 최근에 발생한 해상 사고의 일례로 Estonia에서 발생한 Ro-Ro 여객선의 사고를 들 수 있다. Ro-Ro 선은 사람과 차량을 동시에 수송하는 특징을 가지고 있고, 이러한 Ro-Ro 선의 설계 개념에 의해 Ro-Ro 선은 상업적인 관점에서 관심을 끌고 있다. 더불어 사고가 일어났을 때 보이는 높은 인명 손실률로 인해, 해상에서의 안전성 문제¹⁾ 또한 관심을 끌고 있다. 적화 및 양화 속도를 높이기 위한 작업과, 매우 큰 중량을 가진 화물차 등 화물의 고박(lashing)은 Ro-Ro 선과 같은 선박의 안정성을 저해하게 된다. 최근 어선 사고의 비율이 증가하면서 어선에 대한 안정성의 연구 또한 활발히 행해지고 있다.

선박은 다음의 경우에 의해 전복 될 수 있다.

가) 화물의 순간적 이동으로 인한 해상 사고, 혹은 구조적 손상으로 인한 침수의 결과

나) 극심한 해상 상태에 대한 선박의 횡요 반응의 결과

첫 번째 경우에 의한 전복은 주로 정적복원성(Statical Stability)의 문제이나, 파랑 작용으로 인한 전복의 Mechanism은 아직까지는 완전히 규명되지 않고 있다. 그러나 진보된 내항성 이론(Seakeeping Theory)과 운동 예측 기술은 선박 안정성 분야의 연구를 촉진시키고 있으며, 특히 선박 안정성 문제를 선박의 복잡한 동적 거동의 측면에서²⁾ 다룰 수 있도록 하였다.

1.2 부유체의 6자유도 운동

선박은 사람과 화물을 운반하기 위한 목적으로 만들어졌다. 이러한 목적을 완수하기 위해 선박은 반드시 정해진 기본 특성을 갖추어야 한다. 선박은 안정적인 부양성과 충분한 이동 속도 그리고 조종 성능을 가져야 하며, 수밀이 되어야 하고 혹독한 파랑에도 견딜 만큼 강해야 한다. 이러한 특성을 갖춘 선박을 설계하기 위해 설계자는 반드시 선박의 역학 원리를 이해해야 한다.

해상에서 선박은 거의 언제나 동요(Oscillatory)운동을 한다. 선박의 동요 운동은 6자유도 운동으로서 Fig. 1. 1 에서 볼 수 있듯이 3축에 대한 병진 운동과 회전 운동이다.

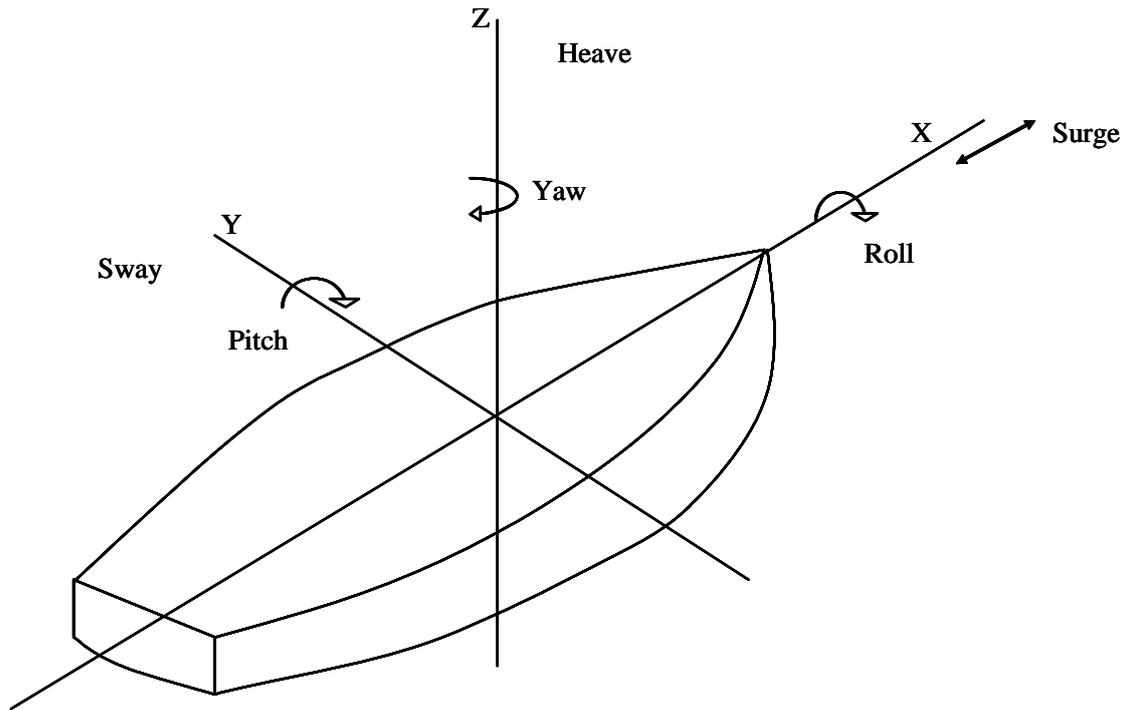


Fig. 1.1 Motions of a Floating body

- 가) 전후요(Surge) : 선체 진행 방향으로의 전후 운동.
- 나) 좌우요(Sway) : 선체를 가로지르는 방향으로의 좌우 운동.
- 다) 상하요(Heave) : 수직 방향의 상하 운동.
- 라) 횡요(Roll) : 종축에 대한 회전운동.
- 마) 종요(Pitch) : 횡축에 대한 회전운동.
- 바) 선수요(Yaw) : 수직 축에 대한 회전운동.

상하요, 횡요, 종요만이, 선박이 평형 상태를 잃었을 때 복원력(Restoring Force)이나 복원모멘트(Restoring Moment)에 의해 작용되므로, 부유체의 6자유도 운동 중 순수 동요 운동이다. 전후요, 좌우요, 선수요의 경우, 동요 방향의 반대 방향으로의 외력이나 모멘트가 작용하지 않는 한 선박은 원래의 평형상태로 돌아오지 않는다. 본 연구에서 선박 안정성의 문제는 선박의 횡요 운동의 문제이다.

1. 3 해상 상태

조우각(μ : Encountering Angle)은 파 진행 방향과 선박 진행 방향 사이의 각으로 정의되며, 파 진행 방향으로부터 시계방향으로 측정된다. 조우각에 따라 해상 상태는 향파(Head Sea), 추파(Following Sea), 횡파(Beam Sea) 등으로 구분된다. 해상 상태의 종류를 Fig. 1. 2 와 같이 나타낼 수 있다.³⁾

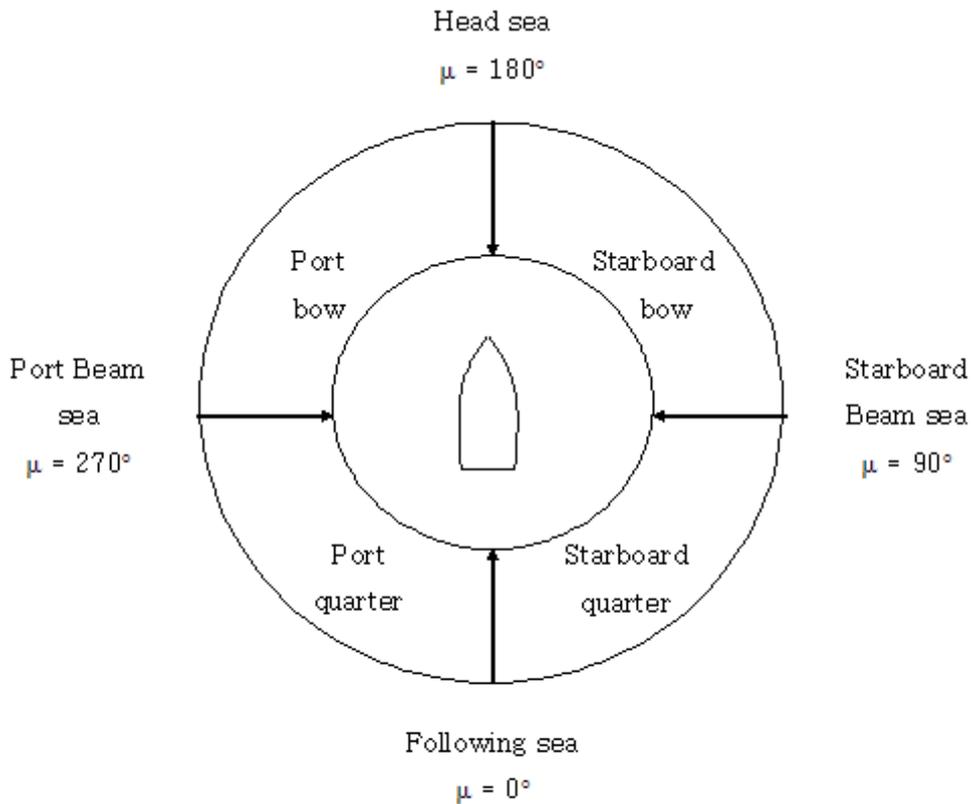


Fig. 1.2 Different sea conditions

향파 상태의 경우, 선박은 파 진행 방향과 180° 방향으로 진행한다. 마찬가지로 추파와 횡파의 조우각(μ)은 그림에서 볼 수 있듯이 0° 와 90° 임을 알 수 있다. 사추파(Quartering Sea)는 조우각 0° 에서 90° 사이의 각이며 전사파(Bow Sea)는 90° 에서 180° 사이의 각으로 정의된다.

1. 4 횡 요

6자유도 운동 중에서 선박을 전복시키는 가장 결정적인 운동은 횡요(Rolling) 운동이다. 횡요 운동은 선박 안정성의 유체 동역학적(Hydrodynamic)부분과 관련되어, 오랫동안 연구돼 왔으며, 주된 관심사는 큰 횡요 각이 일어나는 상황에 있다. 즉, 횡파 상태에서 직접적으로 바람과 파도에 의해 일어나는 횡요 상황과, 간접적으로 추파 상태에서 파도의 작용에 의해 일어나는 횡요 상황

을 말하며, 일반적인 형상을 가진 선박의 고유 횡요 특성과 밀접한 관계를 가진다. 또한 횡요 운동은 내항성(Seakeeping, Seaworthiness, Seakindliness)과도 관련되어 매우 중요하다.

선박의 동요 운동은 시간의 함수이며, 선박에 작용하는 해상의 외력이나 모멘트에 의해 발생한다. 큰 횡요 운동은 화물의 쓸림 현상을 초래하여 전복에 이를 위험이 있어 특히 중요하다.

해상에서의 선박 횡요 기진원은 다음의 두 가지이다.

가) 선체에 가해지는 외력(External Forces).

나) 길이 방향 파(Longitudinal Sea)의 영향으로 인한 선체 응답의 시간 변화.

본 연구에서, 선박의 안정성은 횡파(Beam Sea)에서의 선박의 횡요 운동과 관련하여 고려되었다. 횡파에서는 오직 외부 기진원(External Excitation)만이 존재한다. 횡파 상태 중 선박에 있어서 가장 위험한 상황은 선박의 고유 횡요 주파수(Natural Frequency)와 조우 주파수(Encounter Frequency)가 같을 때 일어나는 공진 상태(Resonance Conditions)이다. 공진 상태는 복원정 곡선(Righting Arm Curve) 특성과, 중량 분포, 횡요 감쇠(Roll Damping), 조우각(Heading Angle), 선속, 그리고 파 경사(Wave Steepness) 등의 조합으로 결정된다. 횡파에서의 선박 전복의 중요 원인은 큰 횡요 운동으로 인한 복원력 손실(Loss of Stability)과 복원에너지 부족(Lack of Righting Energy)이다.

횡요 운동은 강한 비선형 현상(Nonlinear Phenomenon)임이 알려져 있다. 감쇠력(Damping)과 복원력(Restoring)의 비선형적 특성은 종종 선체 운동의 선형성(Linearity)을 깨트린다. 그러므로 대부분의 시간적 비선형성은 감쇠력과 복원력의 변수(Parameter)를 통해 운동 방정식에 도입된다. 고유한 비선형성은 질적인 면(Qualitative)이나 양적인 의미(Quantitative sense) 모두에서 나타난다. 주파수 영역과 시간 영역 모두에서 비선형 미분 방정식을 풀기 위한 비교적 정확한 방법이 연구되어, 해상에 부유해 있는 구조물에 대한 감쇠력은 선형 Diffraction 이론이나 Radiation 이론에 의해 계산이 된다. Diffraction 이론이나 Radiation 이론에 의해 유도된 감쇠력은 구조물의 Surge, Sway, Heave 와 Pitch, Yaw 운동을 표현하기에 충분하나 횡요 운동을 표현하기에는 부족하여, 횡요시의 감쇠력은 Radiation만을 통해서서는 정확히 예측 될 수 없다. 횡요 운동 예측의 어려움은 바로 횡요 운동의 비선형적 특성에 기인한다. 그러므로 구조물에 맞는 정확한 횡요 감쇠력의 계산이 가장 중요하다.

1. 5 선박 복원성

거친 바다에서 전복을 피하기 위해 선박의 복원성은 중요한 필수 고려 사항이며 동시에 선박 설계의 우선 고려 사항이다. 선박이 확실히 복원성 기준(Stability Standards)을 충족함에도 불구하고 전복되는 경우가 많다. 예를 들어 전복된 선박 중에는 국제해사기구(IMO) 규정의⁴⁾ 복원성 기준을 만족한 선박도 있다. 그러나 여러 국제 복원성 기준들이 상당한 차이를 보일 수 있어, 선박의 정확한 복원성을 평가하기 위해서는 종래의 정적 복원성 해석이 필요로 하는 것보다 더 많은 정보가 요구된다.

본 연구의 주된 목적은 파랑 중 선박의 복원성을 평가할 수 있는 방법을 제시하는 것이며, 선박의 한계 복원력(Stability Margin)의 계산을 통해 이뤄진다. 그러기 위해 먼저 복원성에 미치는 자유 표면(Free Surface)의 영향을 평가할 필요가 있다. 이는 해상에서 선박에 작용하는 다양한 동역학적 영향과, 다수의 해석적 환경 변수를 도입하는 횡요 복원성 개념(Rolling Stability Concept)에 기초를 두고 있다. 최소 한계 복원력의 평가는 비선형 횡요 운동 모델의 결과로부터 얻어지며, 이는 많은 변수들을 포함하고 이들의 상세한 연구를 필요로 한다. 파랑 중 선박의 복원성에 영향을 미치는 변수들은, 종래의 정적 복원성 해석의 고려 사항을 포함하여, 다음의 그룹으로 나눌 수 있다.

1. 정적 복원력 변수(Static Stability Parameter)

- 가) 초기 메타센터 높이(GM)
- 나) 복원정 곡선 특성

2. 경사 모멘트(Upsetting Moments)

- 가) 파 하중
- 나) 풍압

3. 선박의 관성(Inertia), 강성(Stiffness) 특성

- 가) 중량 분포
- 나) 부가 중량
- 다) 선박의 고유 주기 및 고유 주파수

4. 선박의 감쇠 특성

- 가) 선체 선형 감쇠 계수
- 나) 선체 비선형 감쇠 계수
- 다) 부가 감쇠력(Appendages)과 감쇠 속도(Speed on Damping)의 영향

5. 파 특성

- 가) 파 경사(Wave Steepness)
- 나) 파 방향
- 다) 기진 주파수 및 조우 주파수

6. 손상된 복원력에 해당하는 자유수

- 가) 자유수 중량의 낮은 위치(Low Position of Liquid Mass)
- 나) 자유수 중량의 높은 위치(High Position of Liquid Mass)
- 다) 침수 계수(Permeability Coefficient)
- 라) 특수 액체 탱크의 수직 위치

대부분의 선체 복원성 규정은, 국제해사기구(IMO) 복원성 기준의 예를 들어 1. 가) 와 1. 나) 의 항목을 요구한다. 또 다른 기준으로는, 미 해군 복원성 기준의 예를 들어, 다양한 선박 경사각에서의 바람에 의한 경사 모멘트(Wind Heeling Moment)를 결정하기 위해 2 의 항목을 요구한다. 두 기준 모두 잘 알려진 메타센터(GM)에 의한 복원성 평가 방법을 기본으로 하고 있지만 여전히 위에서 언급된 변수 모두를 포함하는, 파랑 중 선박의 복원성능을 충분히 판단하기 위한 동역학적 방법은 빠져 있다. 이를 위한 연구가 국제적으로 행해지고 있다.

1. 6 수학적 모델의 필요성

해상에서의 선박 내향성을 평가하기 위한 방법(Methodology)은 충분히 확립되었고, 일반적으로 인정되어 사용되고 있다. 이는 선체 운동은 안정된 선형 동역학적 계에서 발생한다는 가정 하에, 기진력(Excitement)과 선체 응답 간의 관계는 전달 함수로 표현하고 있다. Fig 1.3 은 그러한 System의 블록선도를 보여준다.

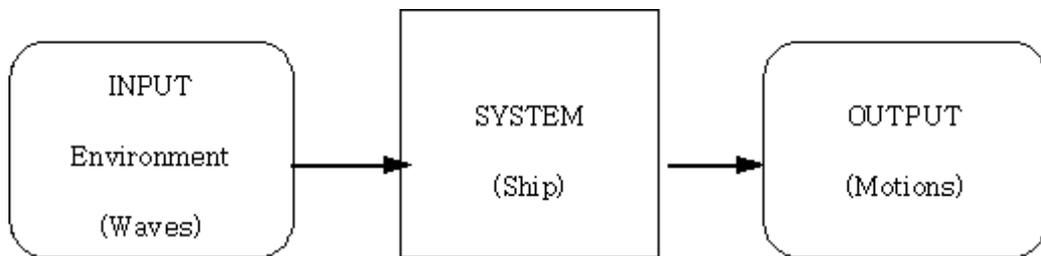


Fig. 1.3 Block diagram of analytical model

선박에 있어 외적 영향은 바람, 파도와 기타 자연적 현상이 될 것이고, 그에 대한 선박의 응답은 운동으로써 나타난다. 그러나 이러한 평가 방법은 선박 전복의 Mechanism이나 거친 파도에서의 강한 비선형적 거동과 갑작스런 일시적 거동의 연구에 적합하지 않다. 극심한 파도에서의 선박의 반응을 예측하기 위한 시간 영역 혹은 주파수 영역의 Simulation을 적용하기 위해서는, 파도에 대한 적합한 수학적 모델이 필요하다. 그러므로 횡파에서 실제 선박의 반응을 예측하기 위한 운동의 수학적 모델링과 그 결과가 중요하다.

많은 연구자들이 비선형 감쇠력과 복원력 항을 포함한 횡요 운동의 다양한 모델을 연구하고 있다. 대부분의 횡요 운동 모델이 서로 비슷하긴 하지만 사실상 서로 다른 감쇠력과 복원력 변수의 표현을 사용하고 있어 서로 다른 횡요 진폭 결과 값을 보이고 있다. 본 연구에서는 두 가지 별개의 감쇠력과 복원모멘트 변수가 사용되었으며 각각 크기와, 유체 정역학적, 복원성 특성이 다른 두 모형선을 사용하였다.

2. 횡요 운동의 수학적 모델

2.1 개요

선박의 횡요 운동이란 선체 중심선을 따르는 종축에 대한 횡 방향 회전운동을 말하며, 선박의 안정성에 있어 가장 주요한 운동이다. 이는 선박의 전복이 주로 횡요 운동의 결과라는 사실에 의해 입증 되었다. 선박의 횡요 응답에 영향을 주는 요소들은 다음과 같다.

가) 선박의 고유 주파수와 조우 주파수 사이의 관계

나) 선체 형상과 복원력 그리고 중량과 부력 분포

다) 파 경사(The wave steepness)

라) 수면 하 선체의 감쇠 효율(Damping efficiency)

마) 탱크 내 자유표면(Free surface)

2.2 문제의 수식화

두 가지의 선박 안정성 평가 방법을 생각할 수 있다.

가) 선형 선박운동 이론의 이용

나) 이론적 비선형 모델의 이용

2. 3 횡요 운동 방정식의 선형화

기본 횡요 운동 방정식의 수식화에서, 선박의 유체 동역학적 횡요 모멘트는 선박 자체만의 횡요 운동에 의한 것 이라기보다는 선체와 파의 상관적인 운동에 기초하여 결정됨을 가정한다.

선체의 유체 동역학적 모멘트는,

$$\text{관성 모멘트 (Inertia moment)} = -\delta I_{44}(\ddot{\theta} - \ddot{\alpha}) \quad (2.1a)$$

$$\text{감쇠 모멘트 (Damping moment)} = -B_{44}(\dot{\theta} - \dot{\alpha}) \quad (2.1b)$$

$$\text{복원 모멘트 (Restoring moment)} = -C_{44}(\theta - \alpha) \quad (2.1c)$$

규칙적 횡파에서의 일반적인 선박 횡요 운동은 다음의 1자유도 2계 미분방정식으로 표현이 가능하다.

$$I_{44}\ddot{\theta} = -\delta I_{44}(\ddot{\theta} - \ddot{\alpha}) - B_{44}(\dot{\theta} - \dot{\alpha}) - C_{44}(\theta - \alpha) \quad (2.2)$$

양변에서 $I_{44}\ddot{\theta}$ 을 빼고 상대 횡요 각을 $\phi = \theta - \alpha$ 로 정의하면, 횡요 운동 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(I_{44} + \delta I_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + C_{44}\phi = -I_{44}\ddot{\alpha} \quad (2.3)$$

횡요 운동 방정식의 물리적 의미에서 볼 때, 운동 방정식은 일반적으로 질량 관성 모멘트, 감쇠, 그리고 복원 모멘트와 기진력 들을 따로 분리하여 생각할 수 있다는 가정 하에 유도된다. 방정식의 좌변은 정수 중에서의 선체의 고유한 유체 정역학적, 유체 동역학적 특성을 표현하고, 우변은 선체에 작용하는 외부 하중을 나타낸다. 횡요 응답을 얻기 위해서는 운동 방정식의 부가 질량, 감쇠력과 복원모멘트 계수들을 알아내야 한다.

2. 4 횡요 운동 계수 결정 과정

2. 4. 1 겉보기 질량 관성 모멘트(The virtual mass moment of inertia)

횡요 운동의 겉보기 질량 관성 모멘트는 선박의 실제 질량 관성 모멘트(I_{44})와 부가 질량 관성 모멘트(δI_{44})의 합이다. 이미, 선박의 횡요 부가 질량 관성 모멘트는 실제 질량 관성 모멘트의 약 20% 임을 알고 있다. 관성 모멘트의 비선형성은 매우 작아서 무시할 수 있다고 가정하면,

$$(I_{44} + \delta I_{44}) = \frac{\Delta}{g} k_{44}''^2 \quad (2.4)$$

단, k_{44}'' 는 겉보기 관성 반경(Virtual radius of gyration)이다. k_{44}'' 의 값은 배 폭과의 비로서 표현할 수 있으며 보통 $0.33B \leq k_{44}'' \leq 0.45B$ 의 범위를 가진다.

2. 4. 2 감쇠 모멘트(Damping moment)

정확한 횡요 운동의 예측은 주로 감쇠 계수 B_{44} 의 계산으로 결정된다. 파랑 중에서 특정한 자유도 운동을 하는 부유체의 동역학적 운동 진폭은 계의 감쇠에 의해 제한된다. 일반적으로 선박의 횡요 감쇠 계수는 선속 U 와 운동 주파수 ω , 그리고 횡요 진폭 ϕ_a 의 함수이다.

가능한 한 정확한 총 감쇠력(Total damping)을 표현하기 위해 감쇠의 원인을 다음으로 구분하여 생각한다.

- 가) 자유수면 파(Free surface waves)에 의한 감쇠
- 나) 양력 효과에 의한 감쇠(Lift effect damping)
- 다) 선체 표면 마찰(Skin friction of the hull)에 의한 감쇠
- 라) 선체로부터의 와류 발생(Eddy shedding from the hull)에 의한 감쇠
- 마) Bilge keel에 의한 감쇠

모든 감쇠 요소가 선속과 주파수, 진폭에 의존하는 것은 아니라는 것을 알 수 있다. 표면 마찰과 와류 발생 (Eddy making) 그리고 Bilge keel에 의한 감쇠만이 횡요 진폭에 의존하여 비선형성을 가진다. 선형 감쇠는 횡요 각과 무관한 양력 효과 감쇠와 조파 감쇠로 이루어진다. 일반적으로 감쇠 모멘트는 횡요 속도(Roll velocity)의 선형 함수이다.

$$B_{44}(\phi) = B_L \phi^2 \quad (2.5)$$

단, B_L 는 선형 감쇠 계수로서, $B_L = B_w + B_l$ (2.6)

B_w : 자유수면 파(Free surface waves)에 의한 감쇠 계수

B_l : 양력 효과(Lift effect)에 의한 감쇠 계수

2. 4. 3 복원 모멘트(Restoring moment)

선박의 복원 모멘트(복원 우력)는 복원정 길이와 배수량의 곱과 같고 다음과 같이 표현한다.

$$C_{44} = \Delta \overline{GZ} \quad (2.7)$$

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \sin \phi \quad \text{이므로,} \quad C_{44} \phi = \Delta \overline{GM} \sin \phi \quad (2.8)$$

미소 경사각에 대해 $\sin \phi \cong \phi$ 이므로,

$$C_{44} \phi = \Delta \overline{GM} \phi \quad (2.9)$$

$$C_{44} \phi = \rho g \nabla \overline{GM} \phi \quad (2.10)$$

그래서, 복원 모멘트 계수는

$$C_{44} = \rho g \nabla \overline{GM} \quad (2.11)$$

2. 4. 4 경사 모멘트(Exciting moment)

횡요 운동의 경사 모멘트(경사 우력)는 주로 파랑 중 선박의 부력 변화에 의해 발생한다. 경사 모멘트는 Bhattacharya의 Dynamics of Marine Vehicles(1978)에 있듯이, 선체 각 부분 썸기 모양의 부력 차를 적분함으로써 계산된다. 선형 횡요 운동 해석에서 파에 의한 모멘트는 다음의 표현으로 계산된다.

$$M_{\phi} = M_0 \sin(\omega_e t) \quad (2.12)$$

파에 의한 경사 모멘트 계수는

$$M_0 = \frac{2}{3} \rho g k \zeta_a \sin \mu \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx \cos \mu) y^3 dx \quad (2.13)$$

횡파(=90°)에서 파 경사 모멘트의 진폭은,

$$M_0 = \rho g \nabla k \zeta_a \overline{GM} \quad (2.14)$$

$$\frac{2}{3} \int y^3 \text{ 가 수선면의 관성 모멘트 이므로, } M_0 = \rho g \nabla \alpha_M \overline{GM} \quad (2.15)$$

$$M_{\phi} = \Delta \alpha_M \overline{GM} \sin \omega_e t \quad (2.16)$$

그러므로, 식 (2.3) 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(I_{44} + \delta I_{44}) \ddot{\phi} + B_{44} \dot{\phi} + C_{44} \phi = \Delta \alpha_M \overline{GM} \sin \omega_e t \quad (2.17)$$

식 (2.17)은 선박의 횡요 운동을 표현하는 선형 2차 미분 방정식이다. 이는 4차 Runge - Kutta 방법을 이용하여 풀 수 있으며, 계의 초기 조건은 0° 횡요 각과 횡요 속도 0으로 가정한다.

2. 5 비선형 횡요 운동

선박 운동의 연구에서 횡요 특성을 예측하기 위해 운동 방정식의 선형화는 흔히 사용되고 있고, 실제로 미소 횡요 각에서 선형 운동 방정식의 결과는 대체로 정확하다. 그러나 큰 횡요 각에서는 비선형성이 보다 현저하게 나타난다. 비선형 방정식을 푸는 것은 상당히 어려운 일이지만, 보다 실제적이고 정확한 횡요 운동을 평가하기 위해 필요한 결과로서 점차 활발히 연구되고 있다. 비선형 연구의 기본적인 목적은 공진 혹은 또 다른 비선형 현상에 의해 전복될 수 있는 선박의 설계를 피하기 위함이다. 즉, 비선형성은 선박의 최대 횡요 진폭을 예측하기⁶⁾ 위해서 매우 중요하다. 선박의 비선형 횡요 운동의 연구는 향상된 컴퓨터 성능과 프로그램으로 인해서 보다 활발히 진행되고 있다.

2. 5. 1 횡파 상태에서 비선형 횡요 운동의 메커니즘

횡파에서의 선박의 횡요운동은 단진자의 운동과 유사하게 Modeling할 수 있다. 단진자의 동역학이 선박 횡요의 동역학과 매우 유사하므로, 복원력 소실 각 부근에서의 선박 횡요 동역학을 이해하기 위해 먼저 간단한 단진자의 동역학을 이해하는 것이 도움이 될 것이다. 그러나 거친 바다에서의 횡요 운동은 큰 비선형 특성을 보이며 특히 큰 진폭에서 급격히 두드러지게 나타난다. 심한 바람과 파도와 같이 결국 선박을 전복하게 하는 다른 비선형적⁵⁾ 환경적 요소도 있다. 선박은 선박 고유의 복원 에너지와 감쇠에 의한 에너지 소산 능력으로써 전복에 저항한다. 그러나 정확한 전복의 메커니즘은 보다 복잡하며, 갑판수(Water on deck)와 액체 화물 등의 외적 요인들의 영향도 받는다. 횡파 상태 중 선박에 있어 가장 위험한 상황은 조우파와 선박의 주파수 일치에 의한 공진 상태이며, 횡파 중 전복의 가장 큰 이유이다. 현존하는 대부분의 선박이 파도의 주파수 영역 범위에 들어가는 고유 주파수를 가지는 한, 자연적으로 공진을 피하는 것은 어렵다.

2. 5. 2 비선형 횡요 운동 모델

선박 비선형 횡요 운동의 수학적 모델링은 비선형 선박 동역학의 광범위한 주제 중의 하나이며 수학적 모델을 설정하는데 있어 다음의 가정이 문제를 단순화 시켜준다.

- 가) 부가 질량 관성 모멘트는 상수이다.
- 나) 횡요와 다른 자유도 운동과의 연성은 없다.
- 다) 파는 규칙 정현파로 간주 한다.

라) 복원, 감쇠 모멘트의 비선형 값은 작다.

마) 운동 방정식의 정상 상태 해는 알려져 있다.

최대 횡요 각을 결정하기 위해서 공진을 고려하며, 적합한 좌표의 설정을 통해 횡요 운동과 기진력 사이의 위상 지연을 제거한다. 횡요와 수직 운동들 간의 연성을 고려할 때, 통상의 선박의 Heave와 Pitch의 고유 주파수는 횡요 고유 주파수의 거의 두 배 가량 되므로, 횡요 상태 중 횡요 공진 영역에서 파에 의해 직접적으로 발생하는 큰 진폭의 Heave 혹은 Pitch 는 발생되지 않는다. (Franciscutto, 1999)

비선형계의 모델링과 관련된 문제들 중의 하나는 결정적인 비선형 항의 입증의 어려움이다. 본 연구에서는 운동 방정식이, 큰 횡요 각에 대한 횡요 응답을 정확하게 표현할 수 있게 하기 위해 복원력 $C_{44}(\phi)$ 와 감쇠력 $B_{44}(\dot{\phi})$ 의 두 비선형 항이 고려되었다. 이 두 비선형 항의 특성은 상당히 다른데, 복원력의 비선형성은 복원력 곡선의 형상에 의존하는 반면 감쇠력의 비선형성은 마찰 저항과 빌지 킬과 Hard bilge corners 후미의 와류와 관련된다.

본 연구에서 복원력과 감쇠력의 비선형성 강조의 이유는 다음과 같다.

가) 전통적으로 복원력은 오랜 시간 동안 선박 복원성 평가의 기본으로 사용 되어져 왔다. 모멘트에 기초한 정적 복원성의 접근은 선박 복원성 해석에서 사용되면서 발전되어 왔다. 복원력에 의한 방법은 운동 방정식의 해와 횡요 운동 예측의 정확성에 상당한 영향을 끼치는 것으로 다루어져 왔다.

나) 전통적 비선형 접근법은 횡요 감쇠력을, 공진 시 최대 한계 값과 관련되어 매우 중요한 것으로 생각했다.

선박의 겉보기 질량 관성 모멘트는 2. 4. 1 항에서 주어진 과정을 통해 계산되었다.

2. 5. 3 감쇠 모멘트(Damping moment)

Diffraction 혹은 Radiation 이론에서 유도된 감쇠력은 Surge, Sway, Heave, Pitch 그리고 Yaw 상태에 있는 구조물의 운동을 표현하기에 충분하지만, 횡요 운동을 표현하기에는 부족하다. 다른

자유도의 운동과는 달리 횡요 감쇠력은 매우 큰 비선형성을 띤다. 횡요 감쇠력의 정량적 평가는 어려운 일이지만, 계의 응답을 예측하는데 있어 그 수치적 값은 반드시 필요하다. 게다가 구조물 주변의 유동장은 선박의 전진속도(Forward speed of the vessel)에 의해 변화한다. 그러므로 파와 구조물 주변의 정상 속도(steady speed)의 결합에 의한 횡요 감쇠력의 크기 또한 중요한 양이다. 본 연구에서 다루는 감쇠력은 선형 항과 비선형 항으로 이루어진다. 본 연구에서는 두 가지의 비선형 감쇠력 항이 고려되었고 식 (2.3)으로 각각에 대한 결과를 얻는다. 감쇠력의 표현은 다음과 같다.

$$B1(\phi) = B_L\phi + B_N\phi|\phi| \quad (2.18)$$

$$B2(\phi, \dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\phi^2\dot{\phi} \quad (2.19)$$

단, B_L 는 2. 4. 2 항에서 설명한 바와 같이 선형 감쇠 계수이다.

B_N = 비선형 감쇠 계수

$$B_N = B_f + B_e + B_{bk} \quad (2.20)$$

단. B_f = 표면 마찰에 의한 감쇠 계수

B_e = 와류 생성에 의한 감쇠 계수

B_{bk} = 벌지 길에 의한 감쇠 계수

2. 5. 4 복원 모멘트(Restoring moment)

복원력은 복원정 곡선을 고차 방정식으로 표현함으로써 비선형화 된다. 복원정(GZ) 곡선은 기함수이므로 방정식으로 표현하기 위해 기함수 방정식이 사용될 것이다. 고차 방정식의 사용은 수학적으로 복잡하고 어렵기 때문에 본 연구에서 복원력은 3차, 5차 방정식으로 제한한다. 그러므로 복원정 곡선은 다음으로 표현할 수 있다.

$$3차 : GZ = C_1\phi + C_3\phi^3 \quad (2.21)$$

$$5차 : GZ = C_1\phi + C_3\phi^3 + C_5\phi^5 \quad (2.22)$$

단 방정식의 계수, C_1, C_3, C_5 는 다음과 같이, 메타센터 반경(GM), 복원력 소실각(ϕ_v), 그리고 곡선 아래 면적 A_{ϕ} 등, 복원정 곡선의 동적, 정적 특성에 의해 결정된다.

$$C_1 = \frac{d(GZ)}{d\phi} = GM \quad (2.23a)$$

$$C_3 = \frac{4}{\phi_v^4}(3A_{\phi} - GM\phi_v^2) \quad (2.23b)$$

$$C_5 = -\frac{3}{\phi_v^6}(4A_{\phi} - GM\phi_v^2) \quad (2.23c)$$

3차 방정식을 고려할 경우 C_5 는 제거된다.

2. 5. 5 경사 모멘트(Exciting moment)

최대 기울기 α_m 을 가지는 규칙파에 의한 경사 우력은 식 (2.3)의 우변, $-I_{44}\omega^2$ 으로 주어졌다.

$$\text{단, } \alpha = \alpha_m \cos(\omega_e t) \quad (2.24)$$

$$\alpha_m = \frac{\pi H_w}{L_w} \quad (2.25)$$

$$\text{그러므로, 경사우력} = I_{44}\omega_e^2 \alpha_m \cos(\omega_e t) \quad (2.26)$$

$$\text{단, } \omega^2 = \frac{d^2\alpha}{dt^2} \quad (2.27)$$

2. 5. 6 비선형 횡요 운동 방정식

식 (2.3)에 위의 관성, 감쇠, 복원력 그리고 경사우력의 표현을 대입하면 다음의 식이 얻어진다. 이는 B1형 감쇠, 5차 복원력의 비선형 2차 미분 방정식이다.

$$(I_{44} + \delta I_{44})\ddot{\phi} + B_L\dot{\phi} + B_N\phi + \Delta(C_1\phi + C_3\phi^3 + C_5\phi^5) = I_{44}\omega_e^2\alpha_m \cos(\omega_e t) \quad (2.28)$$

감쇠력은 항상 운동 방향의 반대 방향으로 작용하므로, 속도의 제곱 항 $\dot{\phi}^2$ 의 부호는 ϕ 의 부호가 변할 때 같이 변한다.

$(I_{44} + \delta I_{44})$ 로 나누고, C_1, C_3, C_5 의 계수 값을 대입하면 식 (2.28)은 다음이 된다.

$$\ddot{\phi} + b_L\dot{\phi} + b_N\phi + \omega_\phi^2\phi + m_3\phi^3 + m_5\phi^5 = \lambda\omega_e^2\alpha_m \cos(\omega_e t) \quad (2.29)$$

$$\text{단, } \omega_\phi^2 = \frac{\Delta GM}{(I_{44} + \delta I_{44})} \quad (2.30a)$$

$$m_3 = \frac{\Delta C_3}{(I_{44} + \delta I_{44})} = \frac{4\omega_\phi^2}{\phi_v^2} \left[\frac{3A_{\phi_v}}{GM\phi_v^2} - 1 \right] \quad (2.30b)$$

$$m_5 = \frac{\Delta C_5}{(I_{44} + \delta I_{44})} = -\frac{3\omega_\phi^2}{\phi_v^4} \left[\frac{4A_{\phi_v}}{GM\phi_v^2} - 1 \right] \quad (2.30c)$$

$$b_L = \frac{B_L}{(I_{44} + \delta I_{44})} \quad (2.30d)$$

$$b_N = \frac{B_N}{(I_{44} + \delta I_{44})} \quad (2.30e)$$

2. 6 결과 및 고찰

2. 6. 1 공시선

본 연구의 개념을 설명하기 위해 트롤선(어선)의 모형선을 사용하였다. 모형선의 주요 제원은 표 (2.1)과 같다.

표 2. 1 어선의 주요 제원

제원	모형선	실선
전장 (L_{OA})	2 m	35.35 m
수선간장 (L_{BP})	1.5 m	26.5 m
형폭 (B)	0.39 m	6.9 m
형깊이 (D)	0.147 m	2.6 m
흘수 (d)	0.125 m	2.21 m
배수량	46.36 Kg	256 Tones

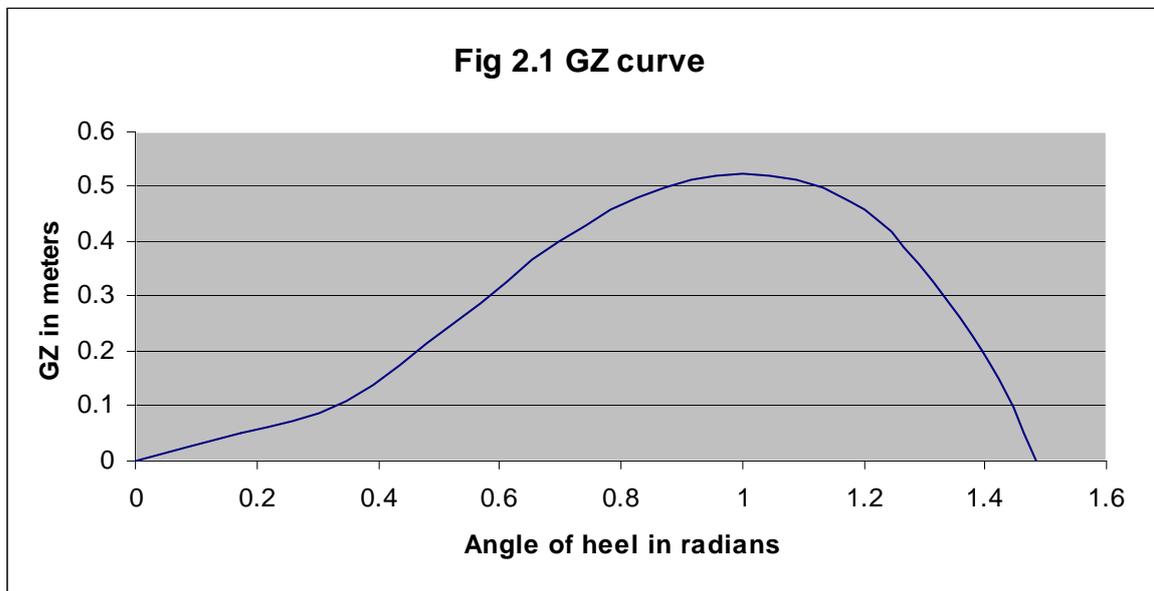


Fig. 2.1 은 모형선의 경사각에 따른 복원정의 변화를 보여준다. 중량중심 G와 경심(M)의 위치는 하중 조건과 선박의 수선면적의 관성모멘트에 의해 결정된다. 또한 GZ는 선박의 하중 조건에 의한 경사각에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 곡선의 0에서의 기울기는 선박의 초기 메타센

터 높이로 정의 된다. 복원력 소실각 ϕ_v 는 복원정이 0 이 되는 지점의 각도이다. 복원정 곡선의 특성은 다음과 같다.

$$\text{초기 메타센터 높이} = GM = 0.2678 \text{ m}$$

$$\text{복원력 소실각} = \phi_v = 85^\circ = 1.48 \text{ radian}$$

$$\text{GZ곡선하 면적} = A_{\phi_v} = 0.42 \text{ m-radian}$$

$$\text{최대 복원정} = GZ_{\max} = 0.52 \text{ m (경사각 } 60^\circ \text{ 에서)}$$

2. 6. 2 선형 횡요 응답

지금까지 횡요 운동 방정식의 계수들을 계산하였다. 위의 공식에 기초하여, 정현파에서의 횡요 운동 진폭을 측정하기 위한 MATLAB 프로그램이 개발 되어있다. Fig. 2.2 에서 횡요 운동의 수치계산을 위한 순서도를 보인다. 이는 선박의 정지 상태에서 파 경사(Wave steepness)를 변화시키면서 계산되었다. 수치 시뮬레이션을 위해 1/30 의 파 경사와 0.2 rad/sec간격의 0 에서 2.40 rad/sec 범위의 파 주파수들, 그리고 규칙 횡파 상태를 설정하였다.

횡요 전달 함수(RTF : Roll Transfer Function)는 최대 파 경사(Wave slope)에 대한 횡요 진폭의 비이다. Fig. 2.4.b 는 조우 주파수와 횡요 전달 함수 간의 관계를 나타내고 있다. 그림으로부터 최대 횡요 응답은 어림잡아 어선의 횡요 고유 주파수와 조우 주파수가 같을 때 발생함을 알 수 있다. 조우 주파수와 계의 고유 주파수가 일치하는 지점이 공진 상태로서 횡파 상태에서 매우 위험한 상태이다. 또한 그림으로부터, Runge-Kutta 방법에 의한 운동 방정식의 수치 해석적 결과 값이 Bhattacharyya(1978)가 제안한 방법의 결과와 일치함을 알 수 있다.

2. 6. 3 비선형 횡요 응답

비선형 횡요 운동 방정식의 감쇠력과 복원력 항을 각각 분석하였다. 감쇠력과 복원력이 Ro-Ro 선과 같은 선박의 횡요 운동에 미치는 영향을 파악하기 위해, 복원력과 감쇠력의 여러 표현 방법을 제시하였고 그 둘을 동시에 고려하여 표현하였으며, 해석은 파 경사와 조우 주파수 각각의 변화에 따라 이루어졌다. Fig. 2.3 은 비선형 횡요 운동의 수치 해석의 순서도를 보인다.

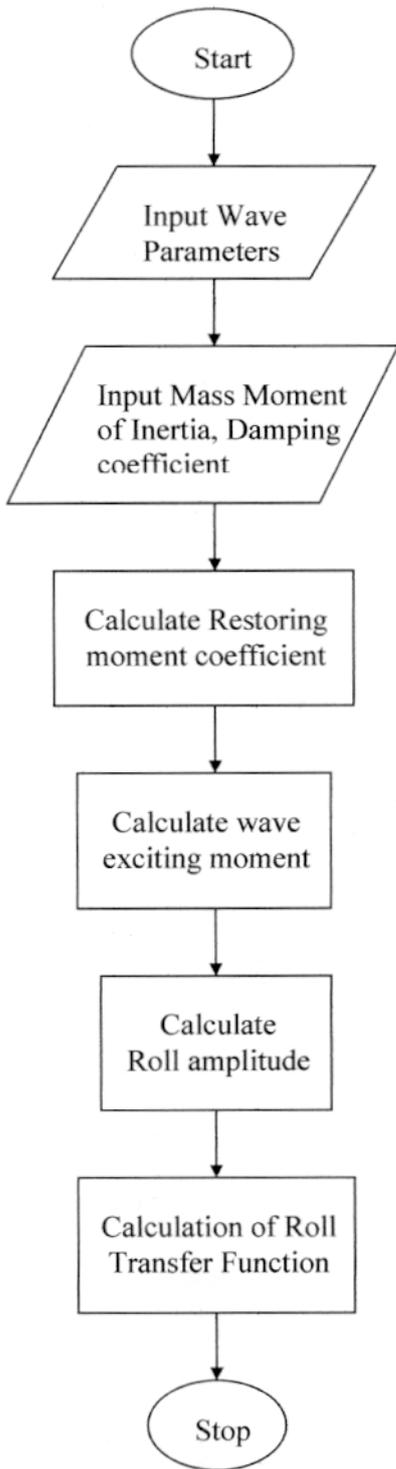


Fig. 2.2 Flow chart for computation of roll

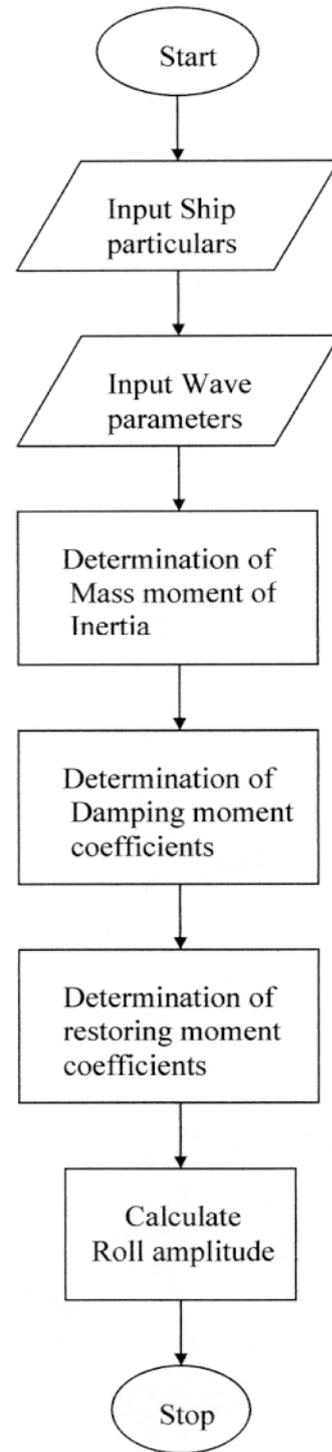


Fig. 2.3 Flow chart for computation of roll motion

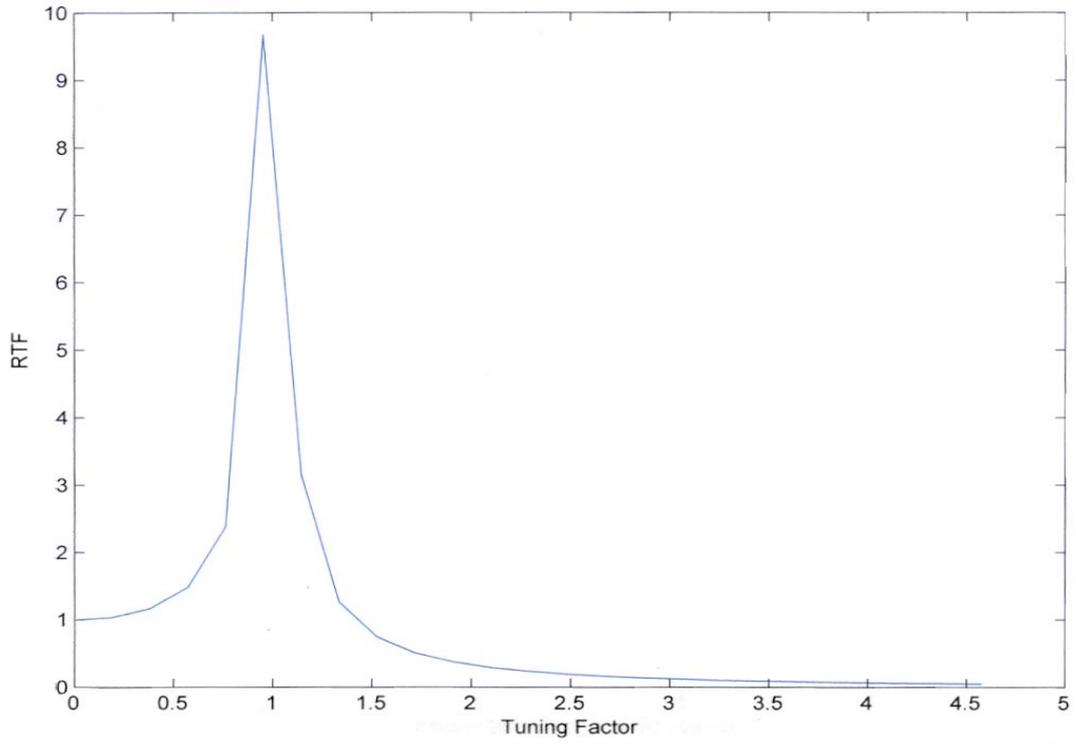


Fig. 2. 4 (a) RTF versus tuning factor

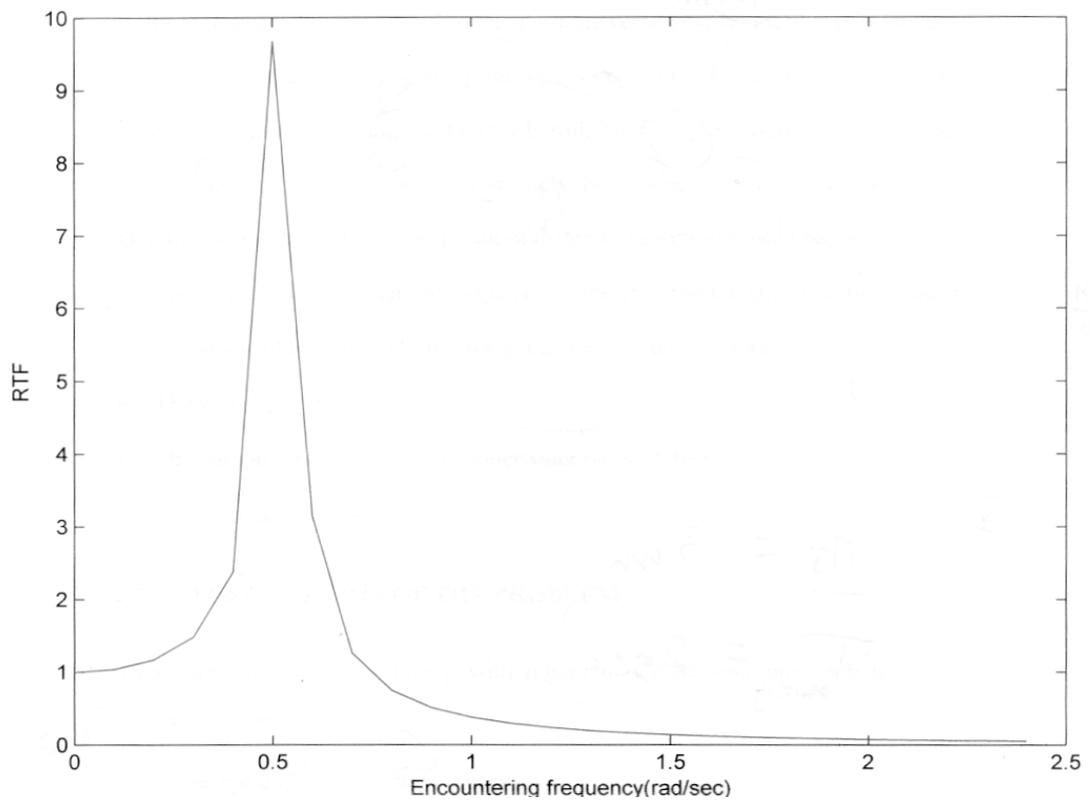


Fig. 2. 4 (b) RTF versus frequency of encounter

3. 활어창이 적재된 어선의 횡요 운동 복원성

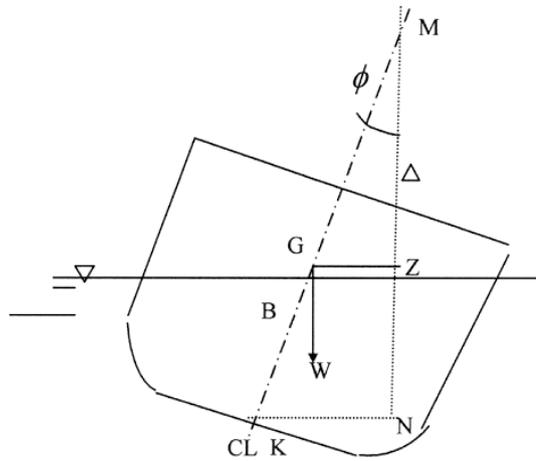
3. 1 서 론

전복에 저항하는 선박의 복원성은 해상에서의 안전성을 보장하는 설계의 중요 요소로서 선박 설계자, 운항자, 관리자 등에게 상당히 중요하게 다루어져 왔으며, 최근에는 활어창이 적재된 어선의 운동이 점차 중요하게 다루어지고 있다. 활어창 내 유동수의 Sloshing과 자유수(Free surface)의 동역학적 거동, 다시 말해 환경적 기진 주파수, 선체의 고유 주파수, 활어창 속 액체의 유동 그리고 다른 탱크들의 자유수 등은 어선의 복원성에 큰 영향을 미친다. 때문에 선박의 복원성은 과거부터 조선해양공학자, 선박 운항자, 선체 연구자들에게 중요시 되어왔다.

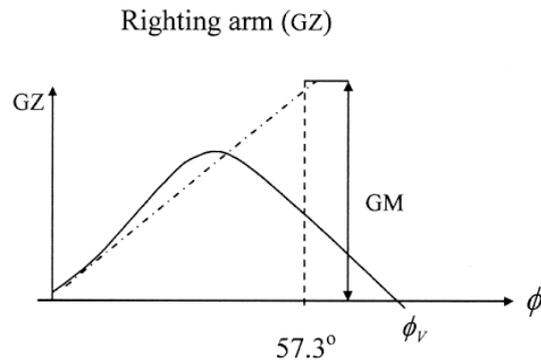
3. 1. 1 정적 복원성 평가

흔히 GZ 선도라 하는 정복원력 곡선을 기초로 선박의 복원성을 평가하는 것은 선박 설계의 일반적 방법이다. 정적 복원성 평가는 선박을 잔잔한 수면 상에 떠있는 정적 물체로 취급한다. Fig. 3.1.a 는 선박의 특정 경사각에서의 복원정(GZ)을 보여주고 있다. 전형적인 GZ선도로 경사각에 따른 GZ값의 변화량을 Fig. 3.1.b 에서 보여주고 있다. 0° 경사각에서 선도의 기울기는 선체의 초기 메타센터 높이 (GM)로 정의 되며, 복원력 소실각(ϕ_r)은 복원정이 0이 되는 각이다. IMO 복원성 기준은 최소한의 초기 메타센터 높이(GM)와 일정한 값의 정복원정(GZ) 그리고 GZ 선도 아랫부분의 넓이 등을 요구하며, 이 같은 복원성 기준들이 확립되어 있다. 정적 복원성 평가에 있어 선박은, 예를 들어 바람에 의해 생겨나는 외부 하중들에 대해 위의 기준들을 만족한다면 충분한 복원성을 가진다고 가정된다. 바람에 의한 경사 우력정 (Heeling Arm(l_h))은 Fig. 3.1.c 에 제시되어 있다. 복원정과 경사 우력정이 일치 하는 각을 정적 경사각(ϕ_s)이라 하며, 그림의 경우 25° 정도이다. Fig. 3.1.d 는 횡요 경사각의 대한 GZ선도 아랫부분 면적의 누적을 나타내고 있다. 이상

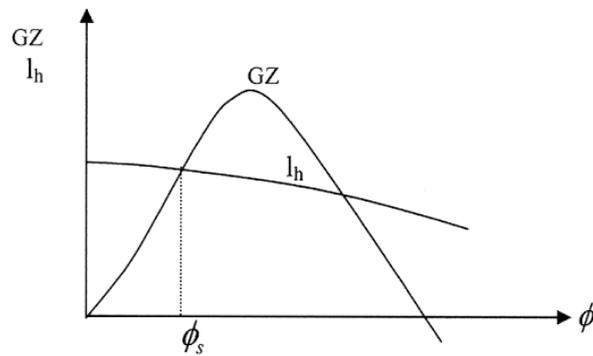
에서 제시된 모든 사항들은 횡요 각에 대한 복원성을 다룰 때 반드시 고려해야 할 사항이다.
 (표 1)은 IMO 복원성 기준을 보이고 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.1 Definition of the righting arm

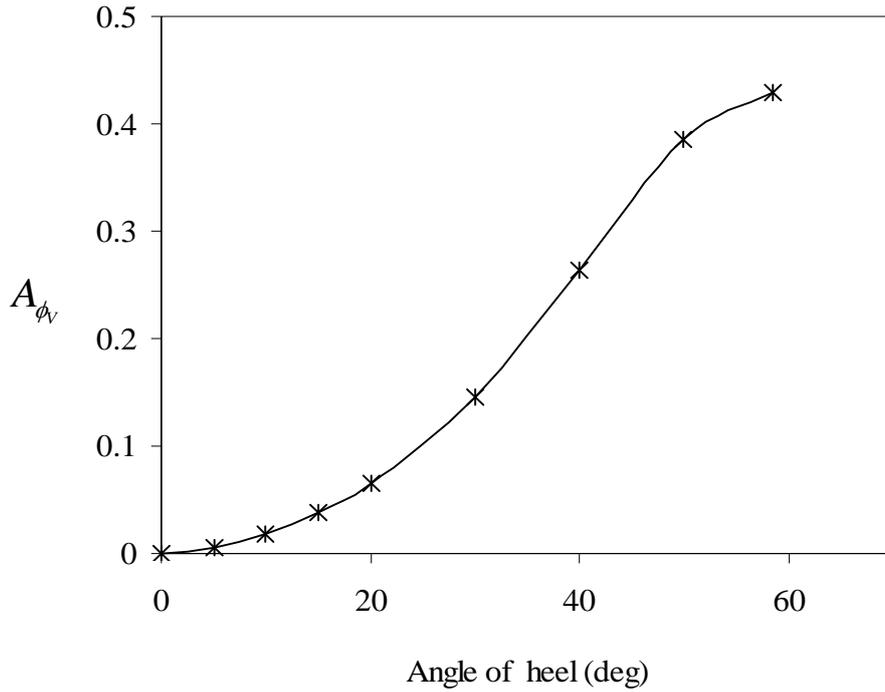
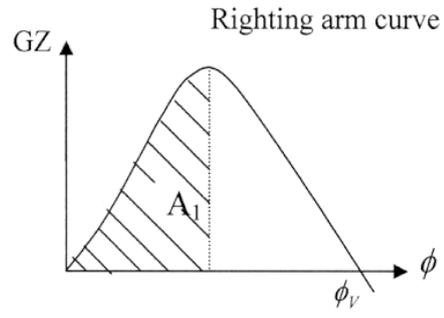


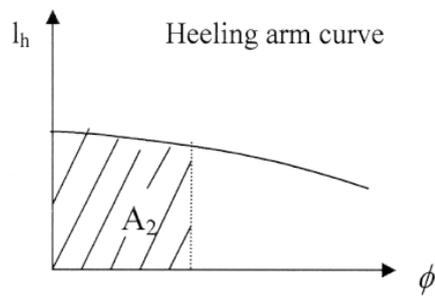
Fig. 3.1(d) Area integrated curve

(표 1) 모든 선박에 관한 일반적 IMO 복원성 기준.

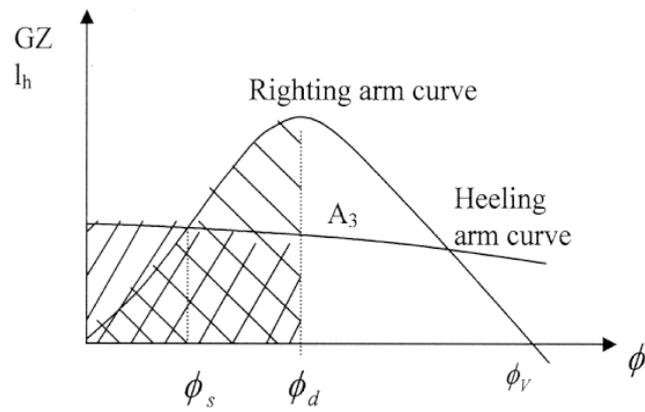
A	경사각 30° 까지의 복원정 곡선 아래 면적은 0.055m-radian보다 커야한다.
B	경사각 40° 까지의 복원정 곡선 아래 면적은 0.09m-radian보다 커야한다.
C	경사각 30° 와 40° 사이에서의 복원정 곡선 아래 면적은 0.03m-radian보다 커야한다.
D	경사각이 30° 보다 크거나 같을 때, 복원정(Righting Lever)은 적어도 0.2m 이상 되어야 한다.
E	경사각이 30° 를 초과하여 복원정의 최대 값이 나타나야 한다.
F	초기 메타센터 높이(GM)는 0.15m 보다 커야 한다.



(a)



(b)



$$(A_1 = A_2)$$

(c)

Fig. 3.2 Dynamic heel angle

주어진 경사각에서 GZ 아래의 면적 A_1 은 선박을 그 각 만큼 경사시키는데 필요로 하는 일의 양이다. (Fig. 3.2) 경사 우력정 곡선 아래 부분의 면적 A_2 은 선박 경사 시 외부 모멘트에 의한 일이다. 경사모멘트에 의한 일(A_2)이 선박을 일정한 각으로 경사 시킬 때 필요로 하는 일(A_1)과 같아지는 각을 동적 경사각(Dynamic heel angle, ϕ_d)이라 하며, 외력에 의해서 선박이 경사할 수 있는 최대 각을 나타낸다. Fig. 3.2 에서 보이는 경사 우력정 곡선의 윗부분 면적(A_3)을 한계 복원력(Stability Margin)이라 하며 복원성의 기준이 될 수 있다.

앞서 논의한 정적 복원성 평가는, 파에 의해 생성되어 선박의 횡요를 야기하는 경사모멘트를 무시하였다. 파랑 강제력(Wave Exciting Moment)은 횡요 운동 방정식에 의한 복원성 해석으로 결정 할 수 있다. 이 경우 복원 모멘트 함수는 비선형이 되며, 이러한 비선형성은 정복원력 곡선의 형태에 따라 결정된다.

3. 2 횡요 운동 복원성(Roll Motion Stability)

여기서, 횡요 운동 복원성은 전통적인 개념의 정적, 동적 복원성과는 구별되어 쓰인다. 전통적인 개념에서 선박의 복원성은 정복원력 곡선의 특성이나 선도 아래의 면적으로 평가되었다. 그러나 동적 계(Dynamic System)의 거동에서 횡요 운동 복원성은 운동 방정식의 해로서 순수하게 물리적, 수학적 개념으로 해석, 표현 될 수 있다.

3. 2. 1 복원정 곡선에 미치는 환경적 영향

선박은 횡파(Beam Wave)와 횡풍을 받는다고 가정할 때, 풍압의 작용에 의해 선박은 특정 각으로 경사한다. 복원정 곡선과 바람에 의한 경사 우력정 곡선이 일치하는 각은 Settling Angle (ϕ_s)이라 하며, 본 연구의 어선에서는 약 25° 정도이다. 파의 영향에 의해 선박은 Settling Angle

한계 복원력의 상하한 경계에 의해 둘러싸인 GZ 선도 아래의 면적을 예비 복원력(Reserve stability)이라 한다. 예비 복원력에 해당하는 면적 A_3 은 선박이 파나 바람의 모멘트를 견딘 후 가질 수 있는 잠재 에너지를 나타낸다. $A_2 < (A_1 + A_3)$ 인 한 선박은 안전한 것으로 여긴다. ϕ_m 의 횡요 각과 큰 바람에 의한 경사 모멘트(면적 A_2)가 GZ 선도의 예비 복원력(면적 A_3)을 흡수하기에 충분히 큰 $A_2 = A_1 + A_3$ 인 상태를 임계경사각(Critical angle of heel)으로 정의한다.

이상의 단순한 횡요 운동 복원성의 모델은 파랑 중 선박 복원성 평가 시 고려해야 할, 가장 중요한 요소들을 제시해준다.

3. 2. 2 한계 복원력의 상한(Upper limit of stability margin)

횡요 운동 복원성 평가는 파와 바람과 같은 외력의 작용 이후 선박이 가질 수 있는 한계 복원력 또는 예비 복원력 (Fig. 3.3 면적 A_3)의 평가를 통해 이루어짐을 알 수 있다. 선박이 이론적으로 경사할 수 있는 최대 경사각 또는 한계 복원력의 상한, 즉 임계 경사각 (ϕ_{cr})은 GZ곡선과 동복원력(Dynamical metacentric stability)의 개념으로 얻어진다. 선박의 동복원력은 선박을 특정 각으로 경사시키는데 행해진 일로 정의되며, 특정 경사각까지의 복원정 곡선 아래 면적이다.

$$\text{복원 모멘트의 일} = \int_0^{\phi} \Delta GZ d\phi = \Delta \int_0^{\phi} GZ d\phi = \Delta l_d \quad (3.1)$$

$$\text{단, } l_d = \int_0^{\phi} GZ d\phi \quad (3.2)$$

식 (3.1)에서 l_d 는 GZ 곡선의 적분으로 구해지는 동복원정(Dynamical stability arm)이라고 하며, 선박이 경사 모멘트를 견디기 위해 가질 수 있는 잠재 에너지의 평가 기준이다. 동복원정 곡선 $l_d(\phi)$ 과 정복원정 곡선의 원점에서 그 접선이 만나는 각이 최대 경사각인 ϕ_{cr} 가 됨을 뒤에

서 Fig. 3.5 를 통해 알 수 있고, 이는 선박이 이론적으로 견딜 수 있는 최대 경사 에너지를 나타낸다. 즉 ϕ_{cr} 은 한계 복원력의 상한이 된다.

3. 3 바람에 의한 경사 모멘트(Wind Heeling Moment)

바람은 무시할 수 없을 정도의 횡경사력을 선박에 가한다.

$$l_h = \frac{PAZ}{1000g\Delta} \quad (3.3)$$

단,

$P = 504 \text{ N/m}^2$, 제한된 용도의 선박에 있어서 이 값은 행정부의 승인을 전제로 감소 될 수 있다.

l_h = 경사 우력정 (m)

A = 바람에 노출된 정사면 (m^2)

Z = 수면 하 부분의 측면 면적 도심으로부터 A 의 도심까지의 수직 거리 (m)

Δ = 배수량 (tones)

l_g = 돌풍(Gust wind)에 의한 경사 우력정 (m)

계산에 의해 $l_h = 0.22 \text{ m}$, $l_g = 0.33 \text{ m}$ 이며, 어선의 제원은 표 2.1에 주어져 있다.

3. 4 횡요 운동 복원성 평가(Discussion of initial and roll stability)

3. 4. 1 횡요 운동 복원성 평가 방법

횡요 운동 복원성 평가를 위한 필요한 모든 변수들은 Fig. 3.3 에서 보인 바와 같고 횡요 운동 복원성과 한계 복원력의 평가 과정을 설명하기 위해 앞서 언급된 어선의 모형선을 사용한다.

3. 4. 2 한계 복원력의 평가

선박의 고유 횡요 주기와 복원력의 관계는 많은 연구를 통하여 확립되어 있다. 일본 해상 보안청(Japanese Marine Safety Agency)는 스톱위치를 통해 계측된 평균 횡요 주기(T)로 아래의 과정을 통해 GM을 평가할 수 있다고 제안 한다.

$$T = \frac{fB}{\sqrt{GM}} \quad (3.4)$$

위의 식은 선박의 폭(B)과 상관계수(f : Correlation Factor)를 사용하고 있다. 상관 계수는 선박의 형태에 따라 달라지며, 이중 선저인 어선의 경우 0.95m에서, 화물창을 실은 선박의 경우 0.60m의 값을 가진다. 모형 어선의 GZ 곡선은 Fig. 2.1 에서 보였다. 위의 공식은 정확한 선도, 데이터, 경사시험 없이도 적용 가능하다. 한계 복원력의 하한이 공진 상태의 선박의 횡요 특성에 따르는 것처럼, 횡요 동역학의 정확한 해석은 이루어져 있다. 비선형 횡요 운동 해석을⁷⁾ 기초로 최대 각 ϕ_m 은 32.28°이며 선형 혹은 비선형인 경우 모두 같다. 비선형의 경우 횡요는 충분한 수준으로 감소되며 이것은 Fig. 3.4 에 나타나 있다. 첫 번째 그림은 bL 선형 감소와 C5형 복원 모멘트의 경우를 보인다. C5형태의 복원 모멘트는 일반적으로 단순한 선형 복원 모멘트와 매우 유사한 것으로 보인다. B1 감소는 일반적으로 흔히 보여 지는 비선형 감소이다. 그러므로 비선형의 경우 큰 감소력으로 인하여 횡요 각은 작은 값으로 줄어들고 이 횡요 진폭 값과 바람에 의한 경사 우력정으로 경사 모멘트(Heeling moment)를 예측하는데 사용된다. 바람과 파의 영향으로 인한 경사 우력정 곡선의 아래 면적(A_2)은 Fig. 3.5 에 나타냈고, 이는 앞서 언급한 상한 한계 복원력을 보여주고 있다.

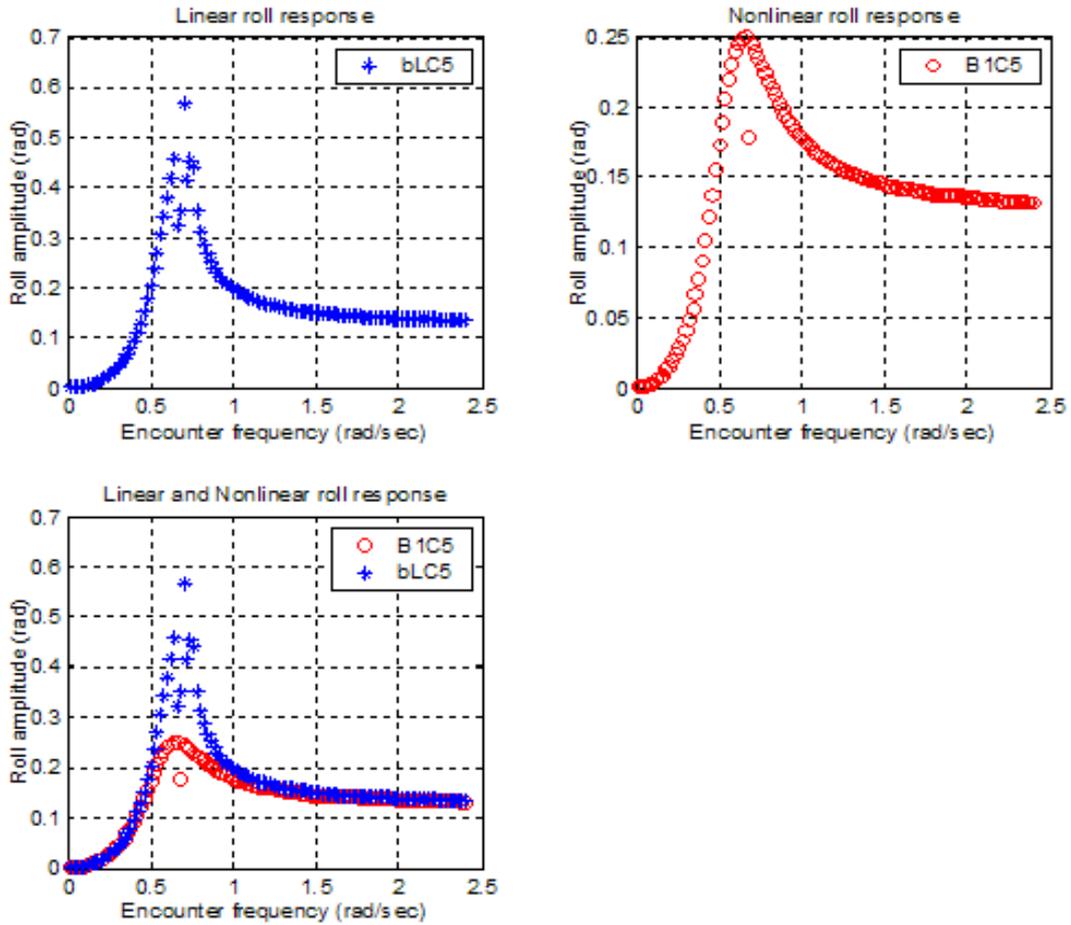


Fig. 3.4 Comparison of roll response in linear and non-linear cases

복원 에너지와 경사 에너지가 평형 상태를 이루는 동적 경사각 ϕ_d 에서, GZ 곡선의 아래 면적 (A_1)은 경사 우력정의 아래 부분 면적(A_2)과 같다. 이 각은 또한 예비 복원력의 하한을 의미하며 해석 결과 한계 복원력의 하한이 ϕ_d 임을 알 수 있다.

3. 4. 3 한계 복원력의 상한

GZ선도의 아래 면적 A_ϕ 을 계산하여 Fig. 3.5 에 그렸고 그림은 경사각에 따른 GZ곡선 아래 면적의 변화를 보여준다. 원점에서의 복원정 곡선의 기울기는 한 경사각에서 면적 곡선과 만나는데 이 각이 임계 경사각이며 본 연구의 모형 어선의 ϕ_{cr} 은 80° 이다.

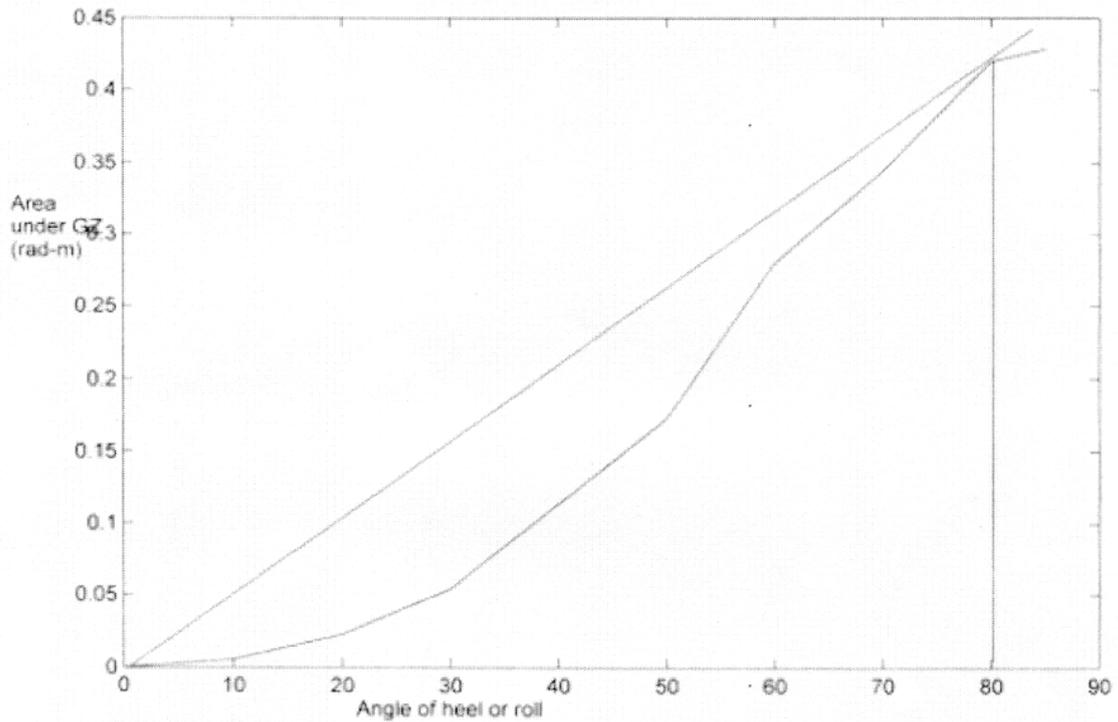


Fig. 3.5 GZ-area calculation for limit of energy for stability

그러므로 선박의 한계 복원력은 경사각 ϕ_d 와 ϕ_{cr} 사이의 복원력이며, Fig. 3.3 에 빗금 친 부분이다. 이 면적은 횡파 상태와 돌풍이 부는 경우에서 중요 할 때, 선박의 예비복원력으로 간주된다. 이상에서 설명된 방법에 의해 평가된 한계 복원력은 환경하중의 영향 하에서의 선박 복원력 기준으로 이용하고, 다른 복원력 평가 방식들과 비교하는데 사용할 수 있다. 그림으로부터 얻어진 모형선의 한계 복원력 (A_3)은 선박의 복원 성능을 기초로 하므로 중요 동역학의 수치 해석적 결과는 정복원력 곡선에 적용된다. 한계 복원력을 결정하는 이러한 과정은 일반적인 모든 선박에 사용될 수 있다.

3. 4. 4 활어창 적재 시 복원성 평가(Stability evaluation with live fish tanks)

활어창을 적재했을 경우 BM의 감소로 인한 GM의 감소는 무시할 수 있을 정도일 것이므로 최

대 횡요 각의 큰 변화는 없다. 만약 GZ가 Krylov 방식으로 계산 되었다면 보다 정확한 GZ를 얻을 수 있을 것이며, 횡 방향 관성모멘트는 GM변화에 영향을 받지 않을 것이다. Sloshing 현상과 활어창내 물의 움직임이 선박에 예측할 수 없는 힘을 가하더라도, 활어창의 영향은 무시할 수 있을 정도라고 생각한다. 갑판에 자유 표면을 가진 화물이 적재된 것으로 생각하여, 전체적인 영향은 다음의 이론을 기초로 보다 깊이 연구될 수 있다.

물이 작은 구획에서 고정된 회전축을 중심으로 각 진동을 함으로서 발생하는, 총 경사 모멘트의 크기 M_{sto} 를 무차원화하면,

$$C_m = \frac{M_{sto}}{\rho g V_i b_i \phi_0} \quad (3.5)$$

진동수는 $\omega = 0.6\sigma_1$, 상대 액체 수위는(Relative liquid depth) $f = 0.25b_i$ 으로 주어지고, 회전축의 위치는 구획 공간 바닥의 위치와 상대적인 값을 가진다. 위 식에서 ϕ_0 는 구획된 각의 크기를 의미하며(designate compartment angular amplitude), b_i 는 구획의 폭, f 는 액체의 수위, V_i 액체 체적, σ_1 액체 Sloshing의 첫째 고유 진동 모드, ρ 액체의 밀도, g 는 중력 가속도이다. 자료에 의하면 위의 무차원 계수는 진폭의 크기에 거의 영향을 받지 않지만 액체 체적 중심의 위치와 경사 모멘트의 작용에 의한 구획의 회전축의 상대적 위치는 진폭의 영향을 받는다. 회전축보다 아래에 액체 질량 중심이 위치하면 C_m 은 작아지고, 반대의 경우 C_m 이 증가한다.

3. 4. 4. 1 활어 창 적재 시 선박의 복원 모멘트

선형화 된 복원 모멘트를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_{stab}(\phi) = \Delta(GM_0 - \delta GM)\phi \quad (3.6)$$

Δ 는 배수량, GM_0 는 자유수의 영향을 고려한 GM이다. 액체의 이동성은 GM의 부분적인 수정을 필요로 하며, 이것은 주파수 영역 복소함수에서 얻을 수 있다. 구획이 하나인 경우, 일반화된 복원력의 감소량은 다음으로 결정된다. (Rekhmania & Zhivista)

$$\delta GM(\omega) = \delta GM_i(1 + Z_1\omega^2/g)K_1(\omega) \cos \varepsilon_1(\omega) \quad (3.7)$$

좌표 Z_1 는 액체의 질량 중심에서 구획의 회전 중심(선박 중량 중심)까지의 수직 거리이며,

$$K_1(\omega) = \frac{\sigma_1^2}{\sqrt{(\sigma_1^2 - \omega^2) + 4\nu_1^2\omega^2}} \quad (3.8)$$

위상과 진동수의 관계식은

$$\tan \varepsilon_1 = \frac{2\nu_1\omega}{\sigma_1^2 - \omega^2} \quad (3.9)$$

식 (3.7), (3.8)에서 σ_1 는 질량 고유 주파수를 의미하며, $2\nu_1$ 는 선형 감쇠계수이며 이 값들 또한 각 진동의 크기와 구획 침투 계수(Permeability coefficient)에 영향을 받는다.

δGM 은 유체 정역학적 GM의 증가분을 나타낸다.

$$\delta GM = \frac{i_x}{\nabla}$$

단, i_x 는 액체 자유 수면의 관성 모멘트이다.

그러므로 복원력은 자유수면 효과로 인하여 작아지거나 수정되어 짐을 보인다.

3. 4. 4. 2 액체 화물 질량의 위치의 영향(Effect of high and low position of liquid mass)

Rekmanin과 Zhivista(2000)는⁸⁾ 활어창 자유수면의 상대적인 위치가 복원력 변화에 아주 중요한 역할을 함을 보였다. 액체 질량의 위치가 낮은 경우, 자유수면의 정적 증가와 일반 상태의 차이는, 작은 선박에서는 25%, 크거나 중간 정도 크기의 선박은 10%를 초과하지 않으며, 이것은 손상되지 않은 상태의 선박에 해당한다.

4. 활어창의 Roll 특성에 관한 실험

4. 1 서론

어선의 규칙과 중 롤 특성에 활어창이 미치는 영향을 연구하고, 보다 나은 롤 특성을 가지는 활어창을 개발하기 위하여 일반 활어창과 이번 연구에서 특별히 고안된 활어창을 각각 장착하고 롤 특성을 비교한다.

4. 2 실험개요

실험은 다음의 각 4가지 상황의 형태로 진행한다.

실험 1. 활어창 A 장착, 수위 0%의 상태로 롤 특성을 구한다.

실험 2. 활어창 A 장착, 수위 90%의 상태로 롤 특성을 구한다.

실험 3. 활어창 B 장착, 수위 90%의 상태로 롤 특성을 구한다.

실험 4. 활어창 C 장착, 수위 100%의 상태로 롤 특성을 구한다.

흘수를 맞추기 위해 Weight를 추가하고 흘수는 Design Draft로 맞춘다. Weight 분포가 달라지면 GM이 변할 수 있으므로 위의 4가지 경우, 가능한 한 같은 상태로 Weight를 분포시킨다. 실험 모델의 특성상 활어창이 수평이 되지 않을 수 있으므로 실험 하기전 수평계나 활어창의 눈금을 이용하여 흘수선과 수평이 되게 한다.

어선 모델 자체의 무게는 15.45kg 이고, 활어창 A는 2.15kg, B는 2.43kg, C는 2.25kg이며 각각의 활어창에 위의 계획대로 물을 채울 경우, A는 10.45kg, B는 10.53kg, C는 11.45kg이며 Design Draft에 맞춘상태의 배수량은 46.4kg 이다.

-실험 장비



조파기



실험 선박 모델

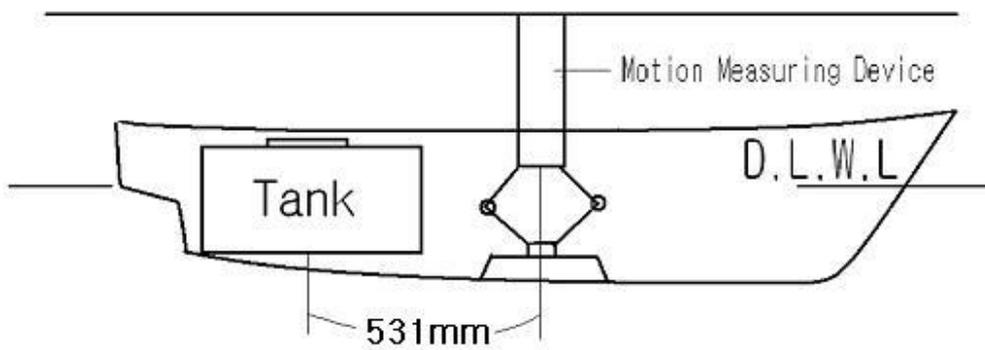
Principal Dimensions of Ship		SCALE : 1/17.68
Length O.A.	35.350 m	
Length B.P.	26.500 m	
Breadth (MLD)	6.900 m	
Depth (MLD)	2.600 m	
Design Draft (MLD)	2.210 m	



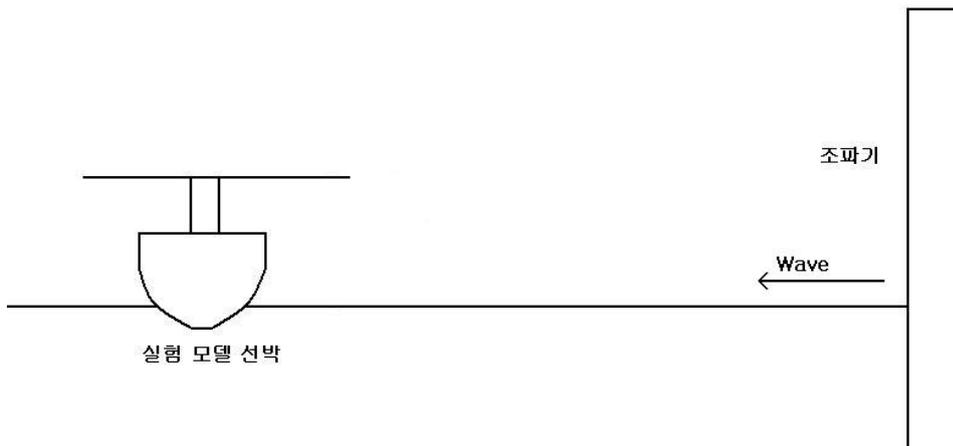
6자유도 운동 계측기

-실험 준비

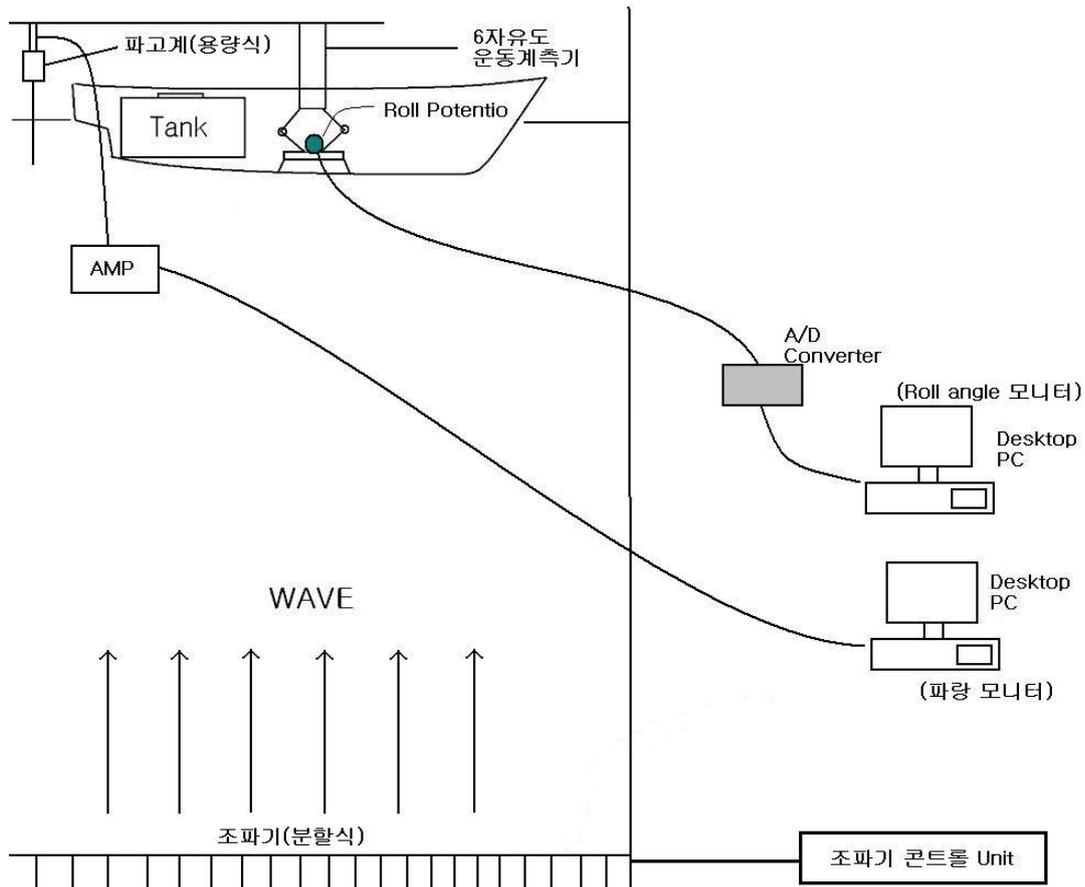
세 개의 활어창의 탈, 부착을 용이하게 하기 위하여 모델에 활어창을 놓기 위한 보형물을 놓는 것을 고안하였고, 실험장비의 배치로 인하여 활어창을 모델의 중심부분에 놓지 못하는 상황이므로 6자유도 운동계측기를 장착할 수 있는 최소한의 공간을 제외하고 최대한 모델의 중심에 오게 보형물을 장착하였다. 활어창을 장착한 모양은 다음과 같다.



물 계측 시스템을 대략적으로 도식해 보면

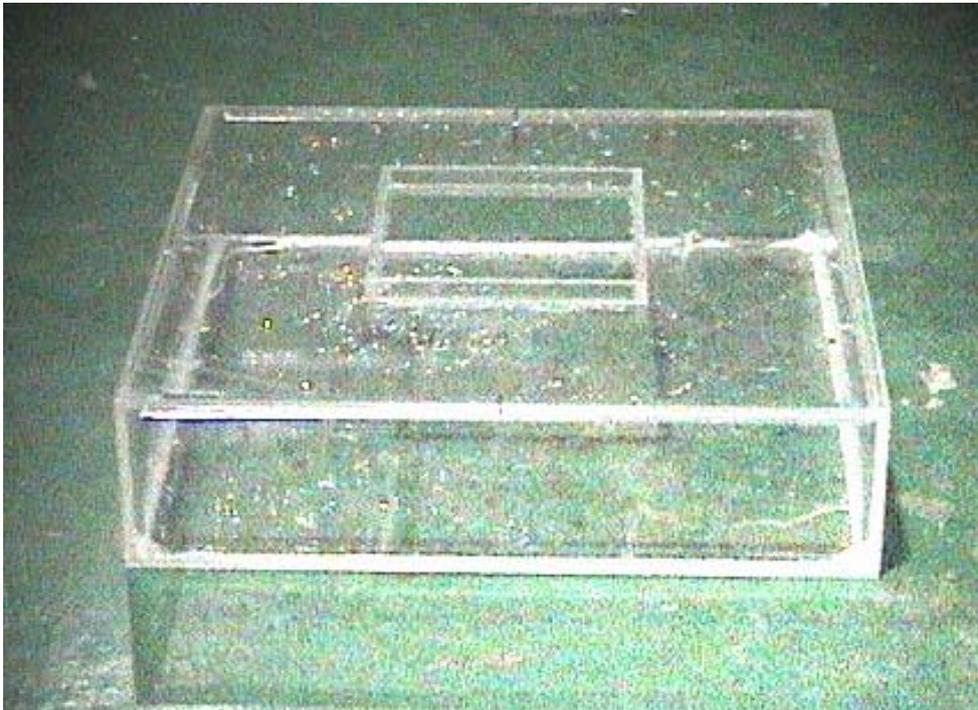
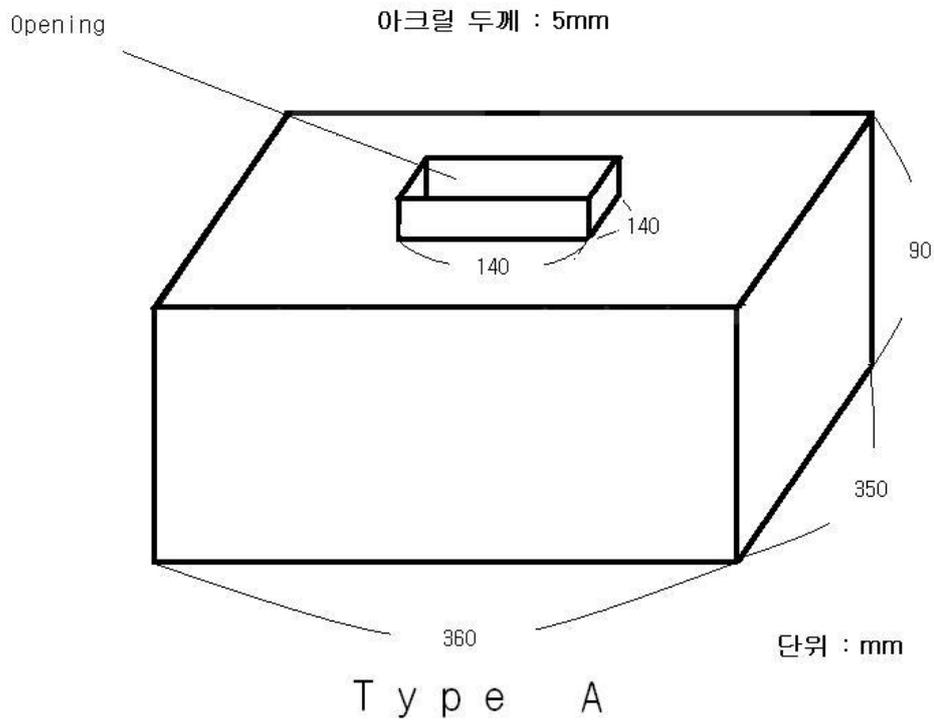


물 계측 시스템 (1)

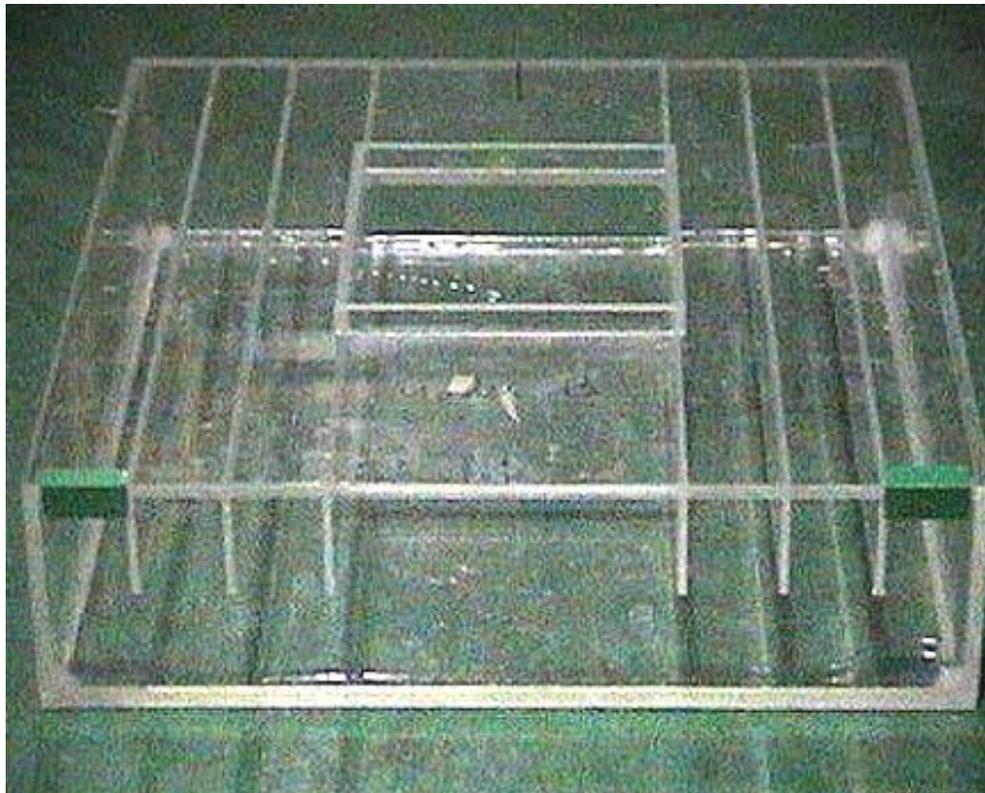
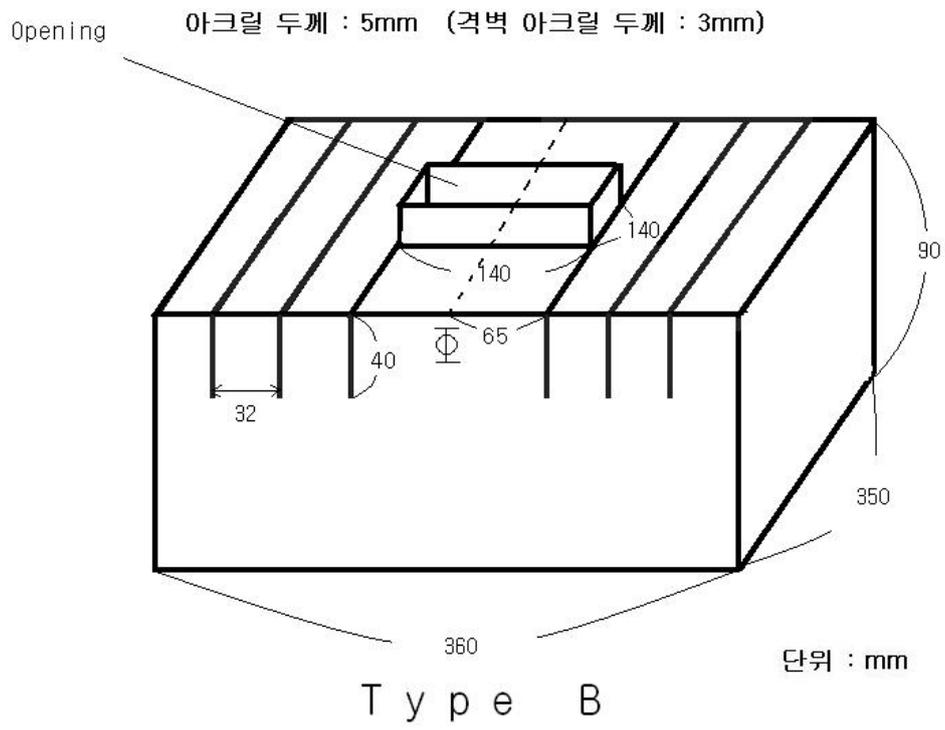


롤 계측 시스템 (2)

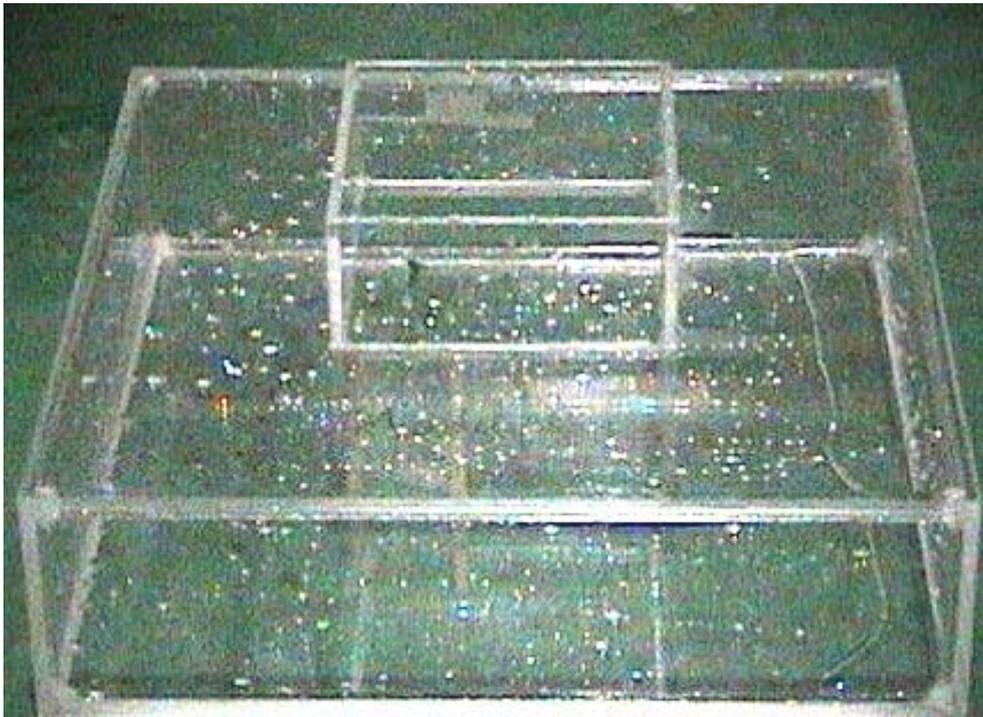
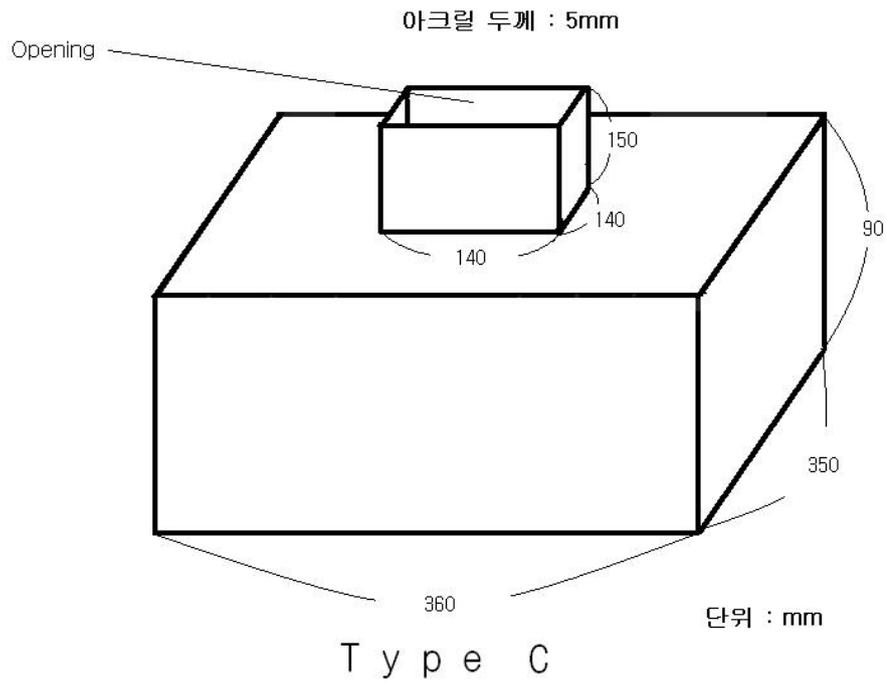
3가지 종류의 활어창의 모양은 다음과 같다.



활어창 A



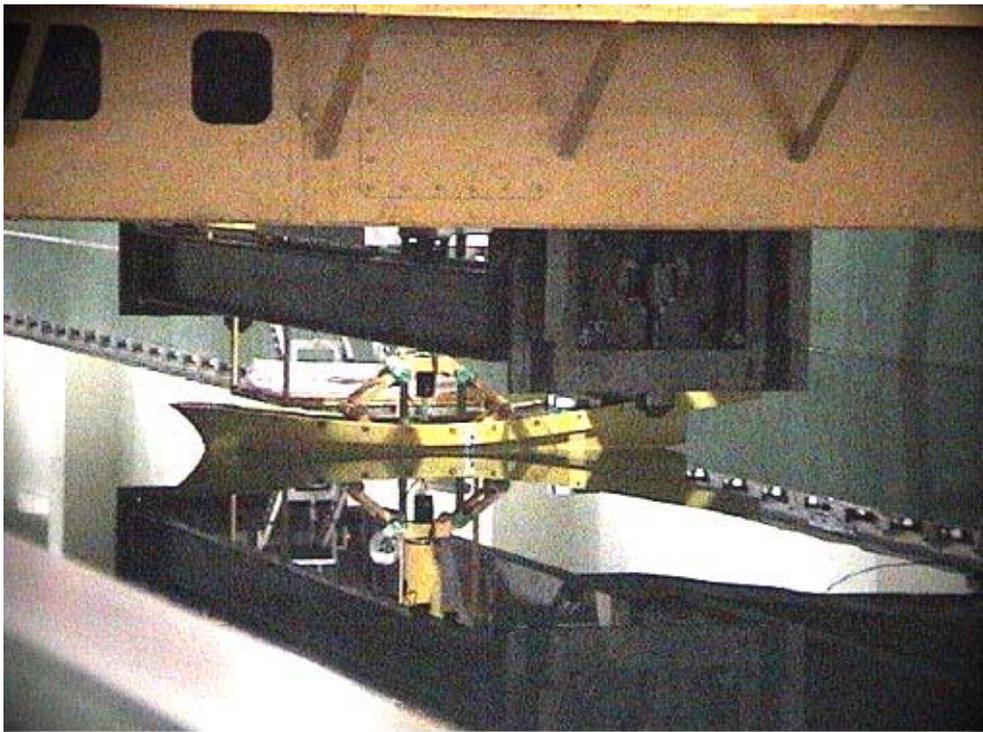
활어창 B



활어창 C

type A는 흔히 볼 수 있는 일반적인 활어창의 모양이고 B와 C는 이번 연구에서 고안한 모델로서, B는 A형과 똑같은 크기이나 격벽이 있는 형태이고, C도 A형과 크기는 같으나 입구의 목을 좀 길게 한 모양이다.

다음 그림은, 최종적으로 실험하기 직전의 모델과 계측장비의 사진이다.

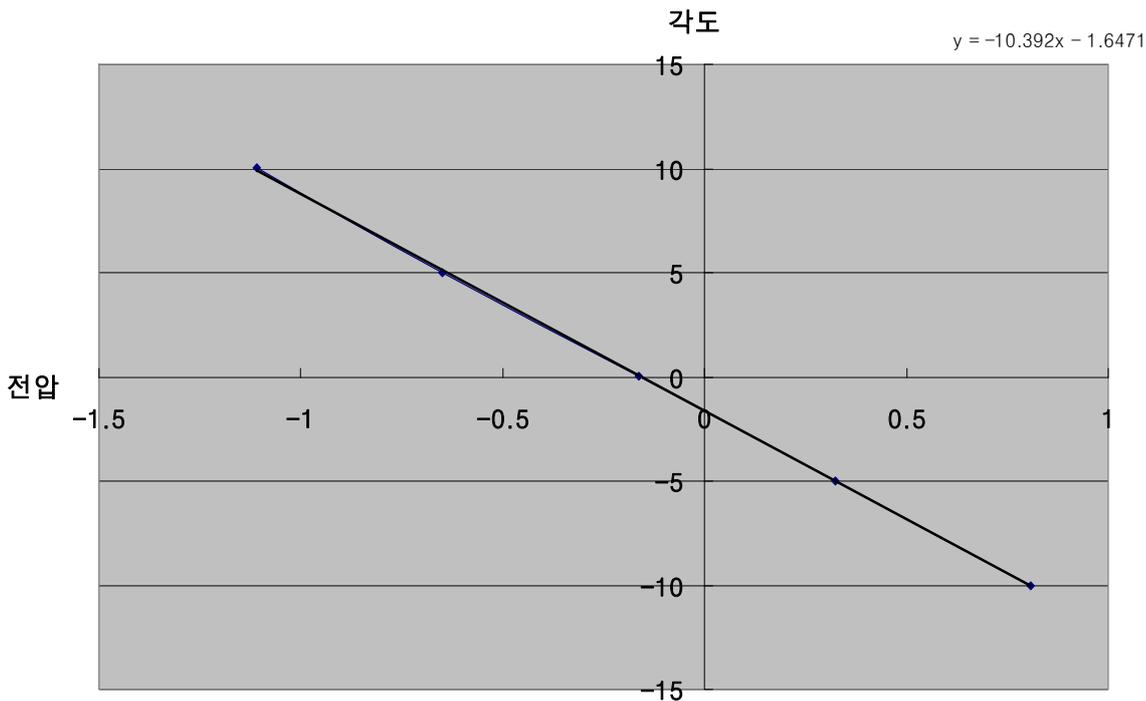


경사시험 : 모델에 추를 놓아 흘수를 맞추고 새로운 중량 w 인 추를 올려 경사 시키는 방법으로 한다.

Free Rolling Test : 각 실험 조건에 맞게 선박에 활어창을 장착한 후 6자유도 운동계측기에 선박을 장착하고 10°정도 경사를 주어서 실시한다.

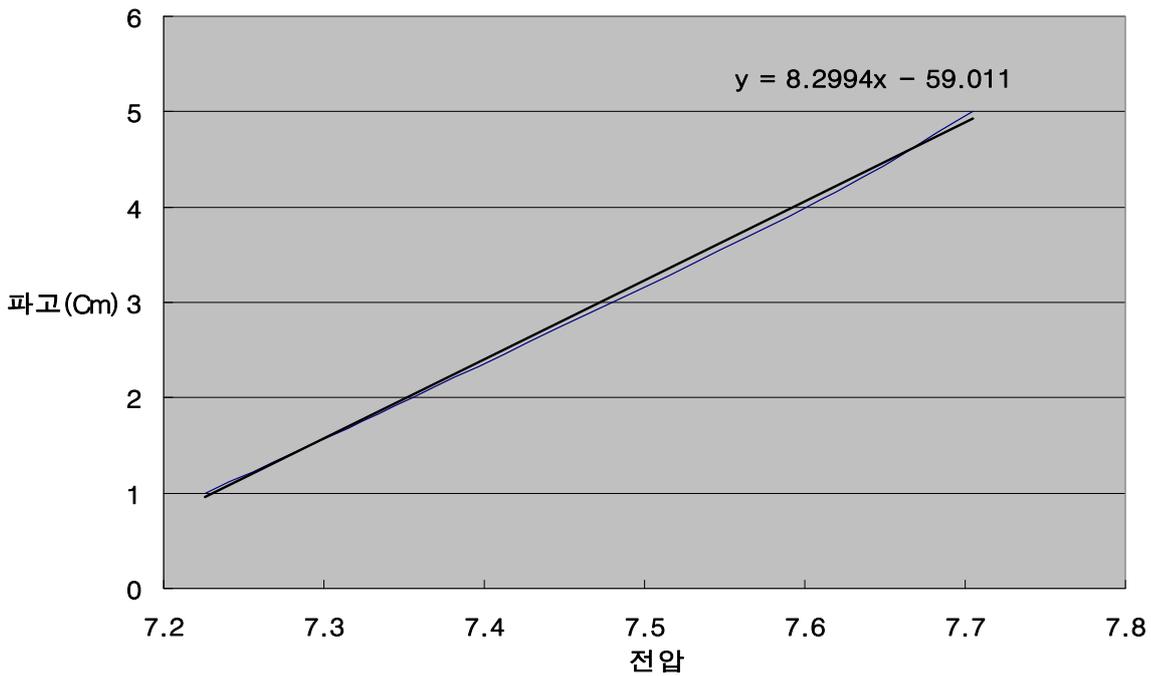
R.A.O : 조파기로 진폭 1cm 의 규칙파를 주기 0.6s에서 3s까지 0.2s 단위로 파를 발생시켜 50초 동안 롤 데이터를 받고, 그 중 최고 롤 각으로 R.A.O를 작성한다.

Calibration : 롤 가변저항 Calibration은 배를 6자유도 계측기에 부착한 후 배위에 수평계를 놓고 각도를 임의로 주어가며 하였다. 6자유도 계측기에 실험 모델을 부착한 후 확인한 결과 최대 16°정도로 보이므로, 각도를 한쪽방향을 임의로 -로 두고 -15에서 +15까지 5도 단위로 계측하여 그래프를 그려보았다.



Roll Calibration Graph

위에서 볼 수 있듯이 거의 일직선으로 선형으로 저항값이 나오는 것을 확인 할 수 있다. Calibration은 활어창을 바꾸기 위해 선박을 떼었다 다시 부착 할 때마다 시행 하여 그 값을 적용 하였다.



Wave Calibration Graph

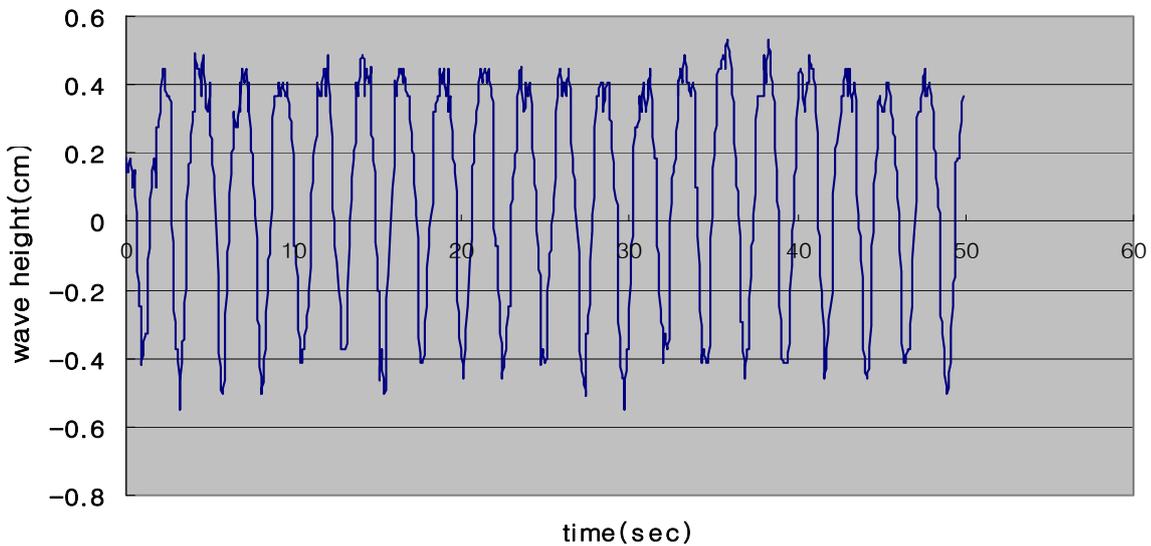
Wave Calibration 역시 거의 선형으로 나오는 것을 확인 할 수 있다.

-입력파형

실험 시 조파기로 구현한 파를 몇 개만 살펴보면 다음과 같다.

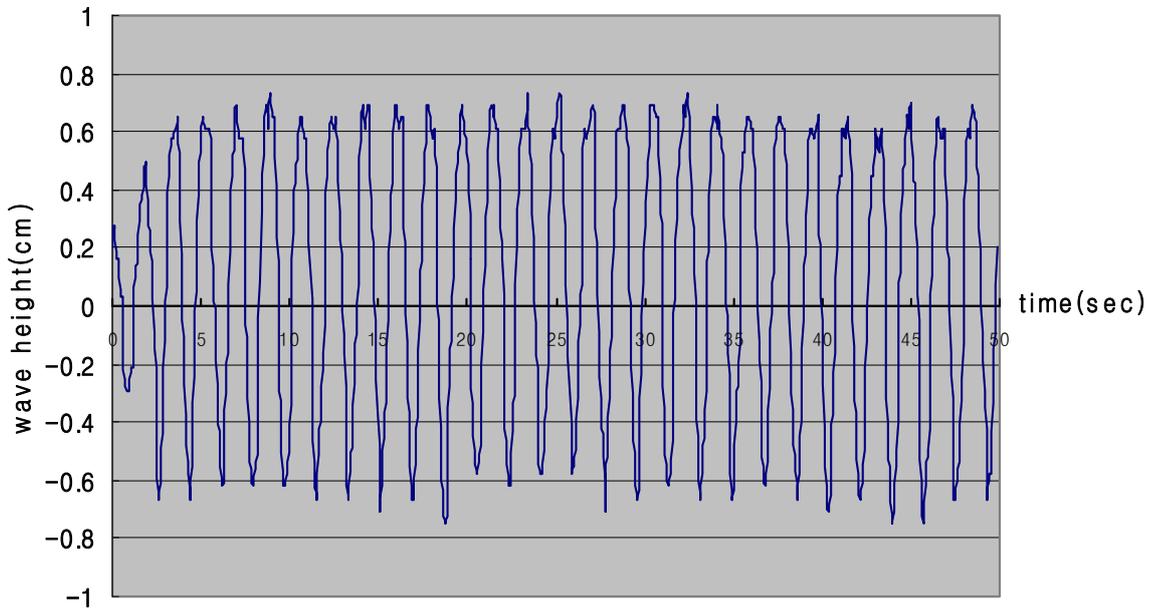
진폭 1cm, 주기 2.4초

1cm-2.4s



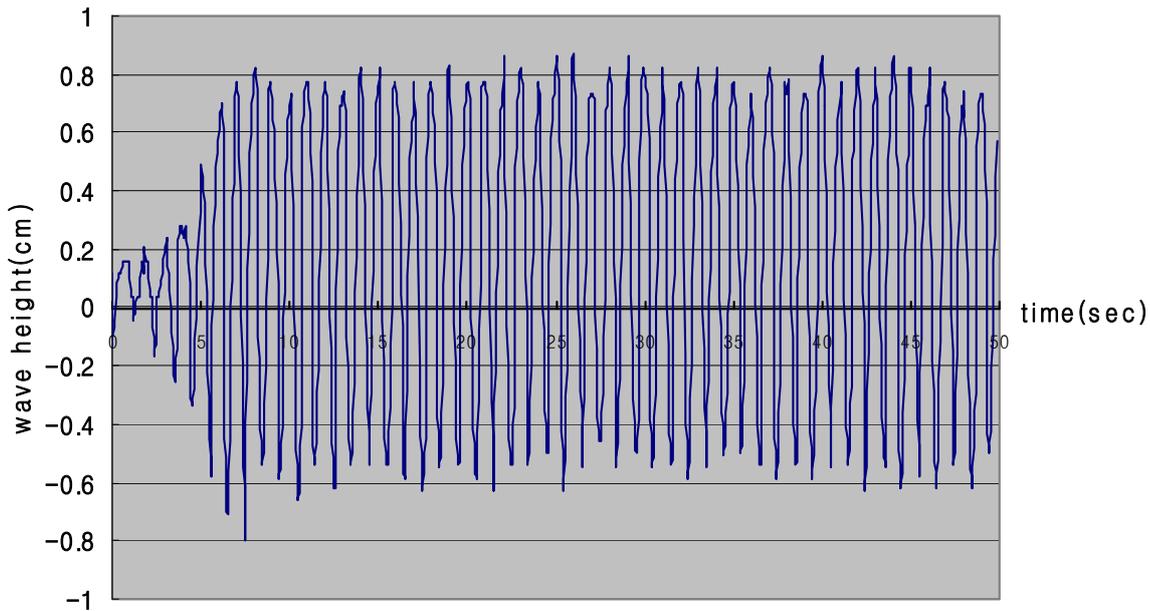
진폭 1cm, 주기 1.8초

1cm-1.8s



진폭 1cm, 주기 1.0초

1cm-1.0s



앞에서 볼 수 있듯이 조파기에 입력한 진폭 1cm 는 정확하게 나오지는 않지만 주기는 정확하게 나오고 있고, 또한 각 실험에서 비교해본 결과 같은 입력값에서 일정한 파형이 나오는 것을 알 수 있다.

진폭이 정확하게 나오지 않는 요인으로는, 수조의 수위문제이거나 조파기 자체의 에러로 보인다.

4. 3 경사시험

4. 3. 1 Tank A 장착시 성능시험

1) 경사시험

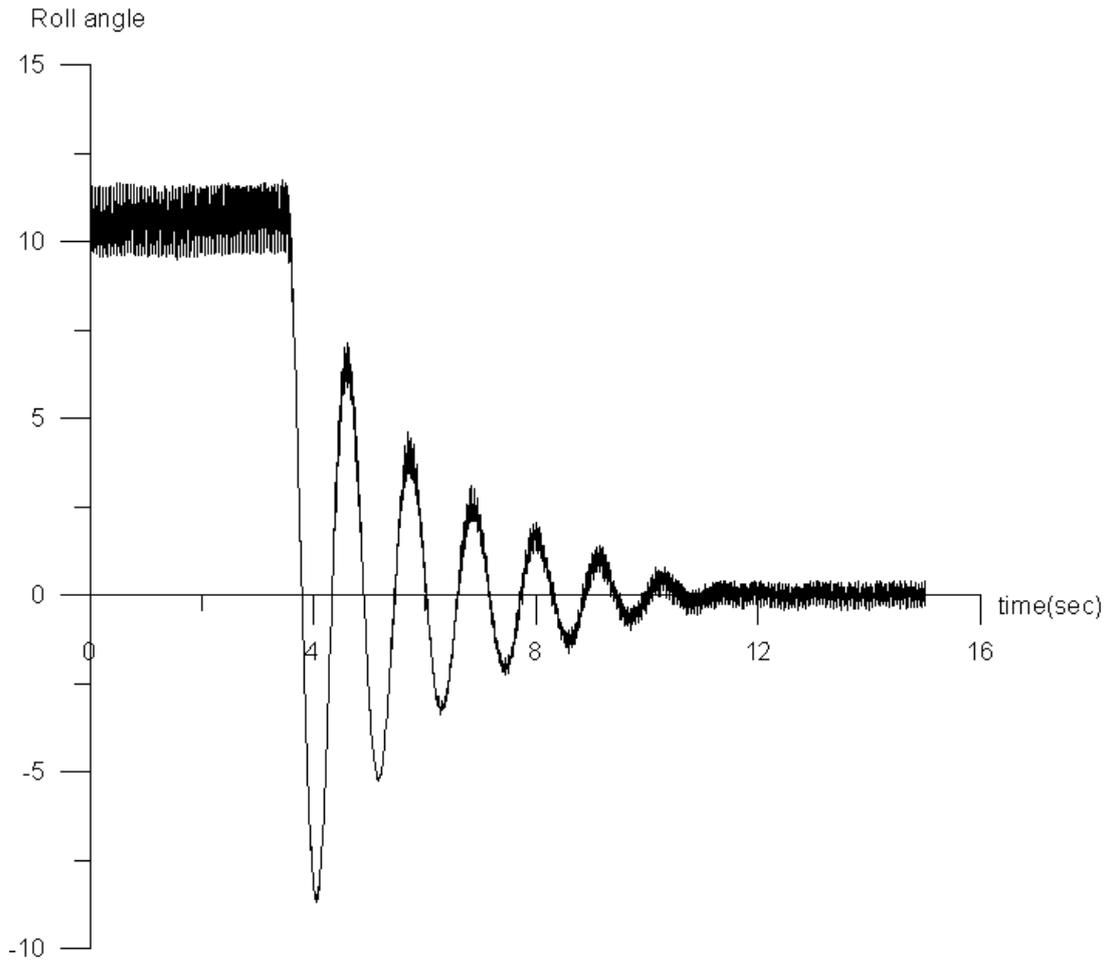
$$\overline{GM} = \frac{w \cdot h}{W+w} + \frac{w \cdot l_y}{(W+w)\tan\phi}$$

$$= \frac{2.04 \cdot 0.08678}{46.4 + 2.04} + \frac{2.04 \cdot 0.186}{(46.4 + 2.04)\tan 5.4147}$$

$$= 0.08678 \text{ m}$$

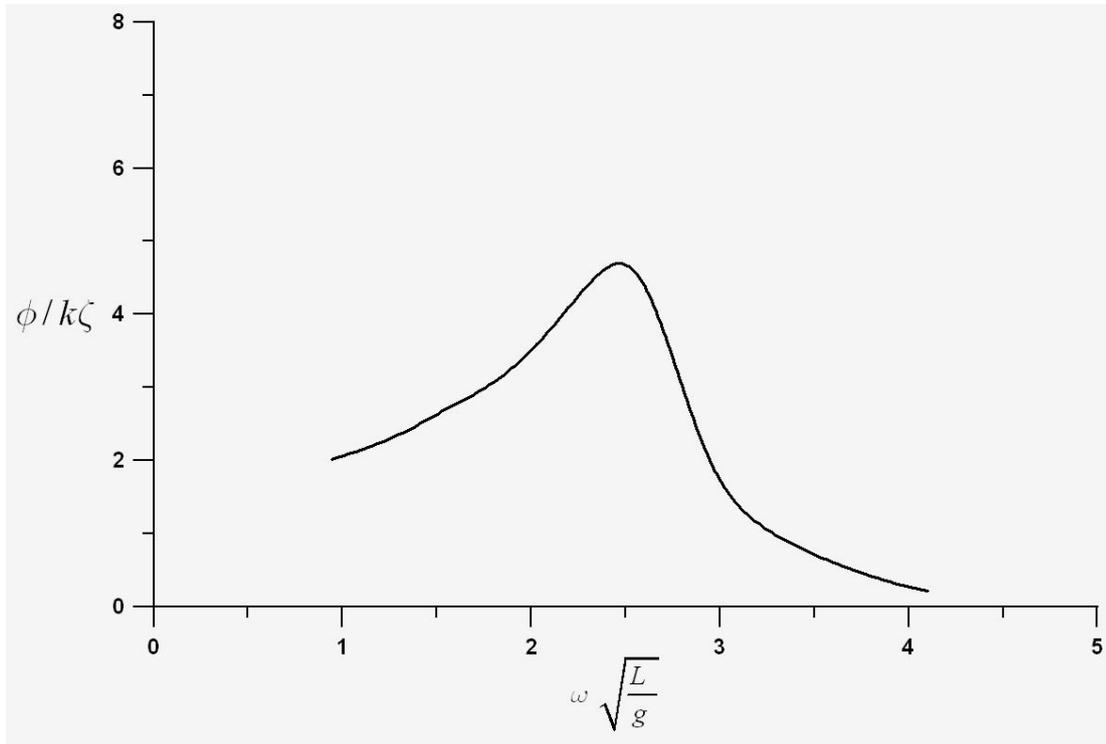
$$\left(\begin{array}{l} w(\text{사용 Weight}) = 2.04 \text{ kg} \\ l_y(\text{이동 거리}) = 0.186 \text{ m} \\ \phi(\text{계측된 각도}) = 5.4147^\circ \\ h(\text{G에서 추의 중심까지의 거리}) = 0.08678 \text{ m} \end{array} \right.$$

2) Free Rolling Test



실험 1. 활어창 A, 물 0%
고유주기 : 0.9s

3) 규칙파중 Roll 특성 (Tank A)



4. 3. 2 Tank A 장착시 성능시험

1) 경사시험

$$\overline{GM} = \frac{w \cdot h}{W+w} + \frac{w \cdot l_y}{(W+w)\tan\phi}$$

$$= \frac{2.04 \cdot 0.07593}{46.4 + 2.04} + \frac{2.04 \cdot 0.186}{(46.4 + 2.04)\tan 7.2921}$$

$$= 0.06441 \text{ m}$$

{

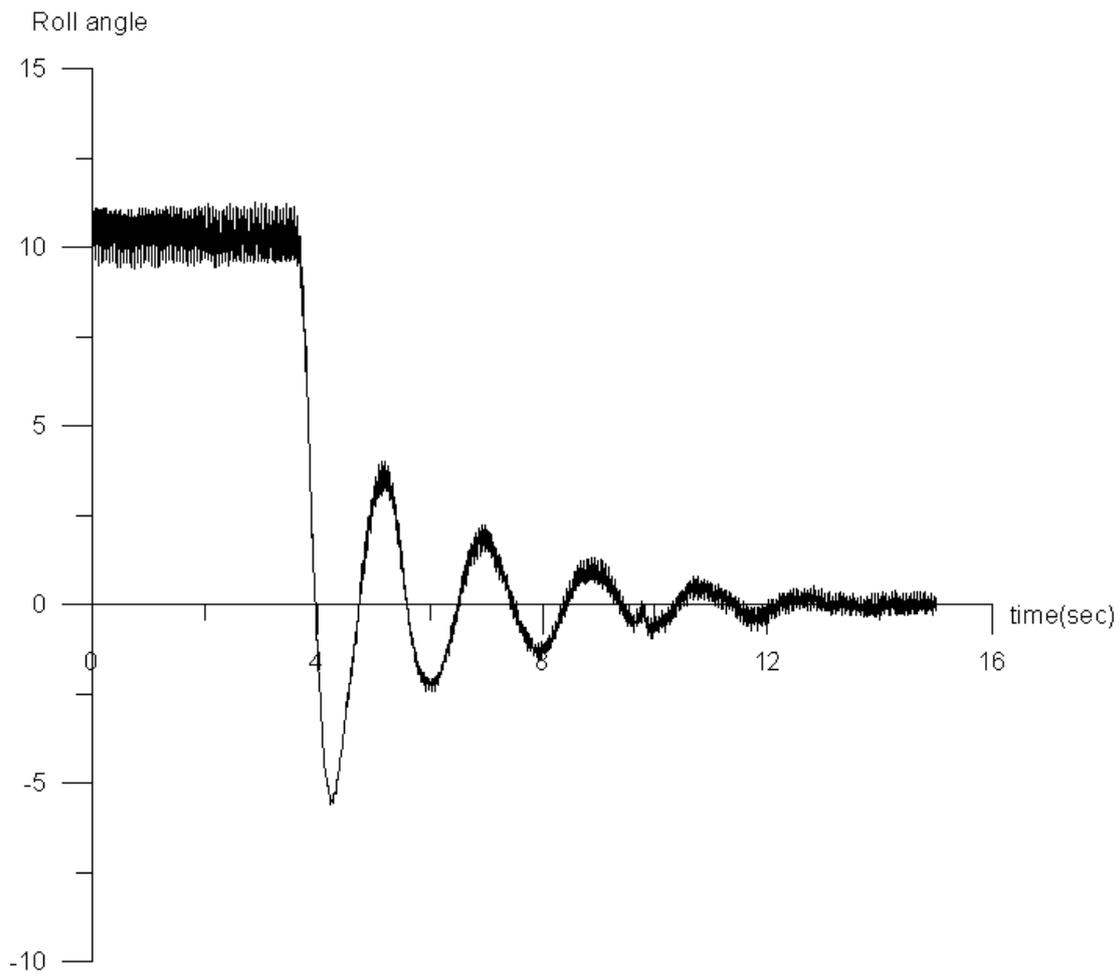
w (사용 Weight) = 2.04 kg

l_y (이동 거리) = 0.186 m

φ (계측된 각도) = 7.2921°

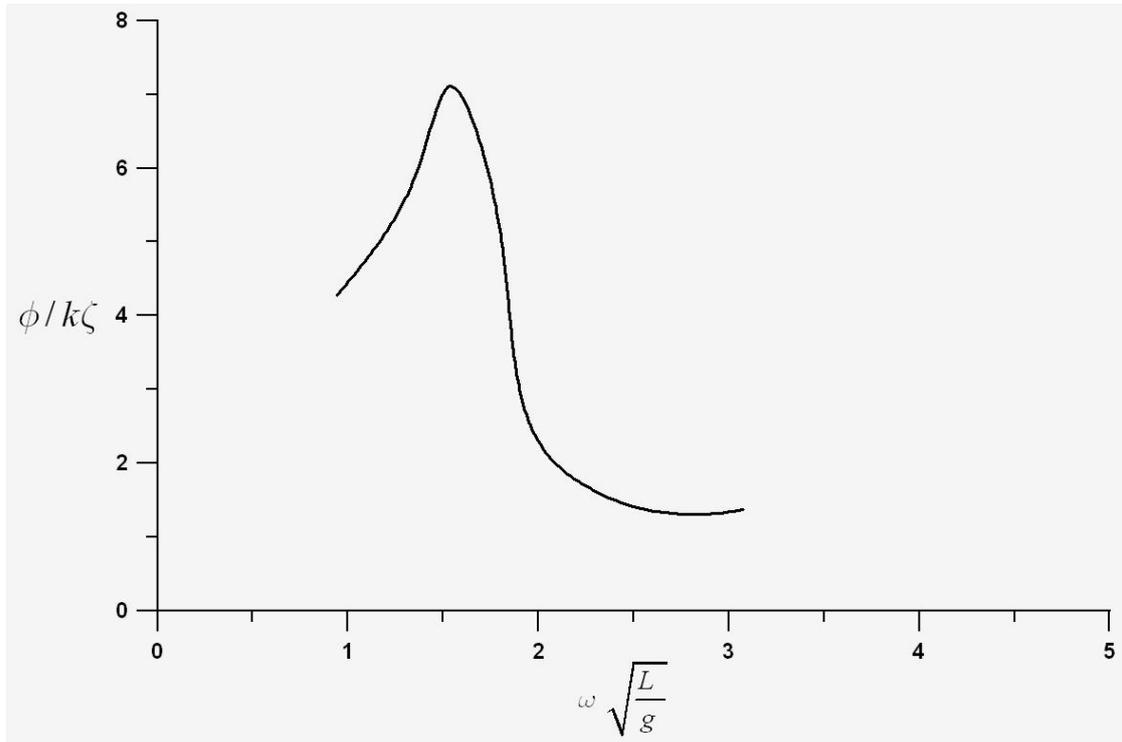
h (G에서 추의 중심까지의 거리) = 0.07593 m

2) Free Rolling Test



실험 2. 활어창 A, 물 90%
고유주기 : 1.55s

3) 규칙파중 Roll 특성 (Tank A)



4. 3. 3 Tank B 장착시 성능시험

1) 경사시험

$$\overline{GM} = \frac{w \cdot h}{W+w} + \frac{w \cdot l_y}{(W+w)\tan\phi}$$

$$= \frac{2.04 \cdot 0.09046}{46.4 + 2.04} + \frac{2.04 \cdot 0.186}{(46.4 + 2.04)\tan 5.9525}$$

$$= 0.07894 \text{ m}$$

{

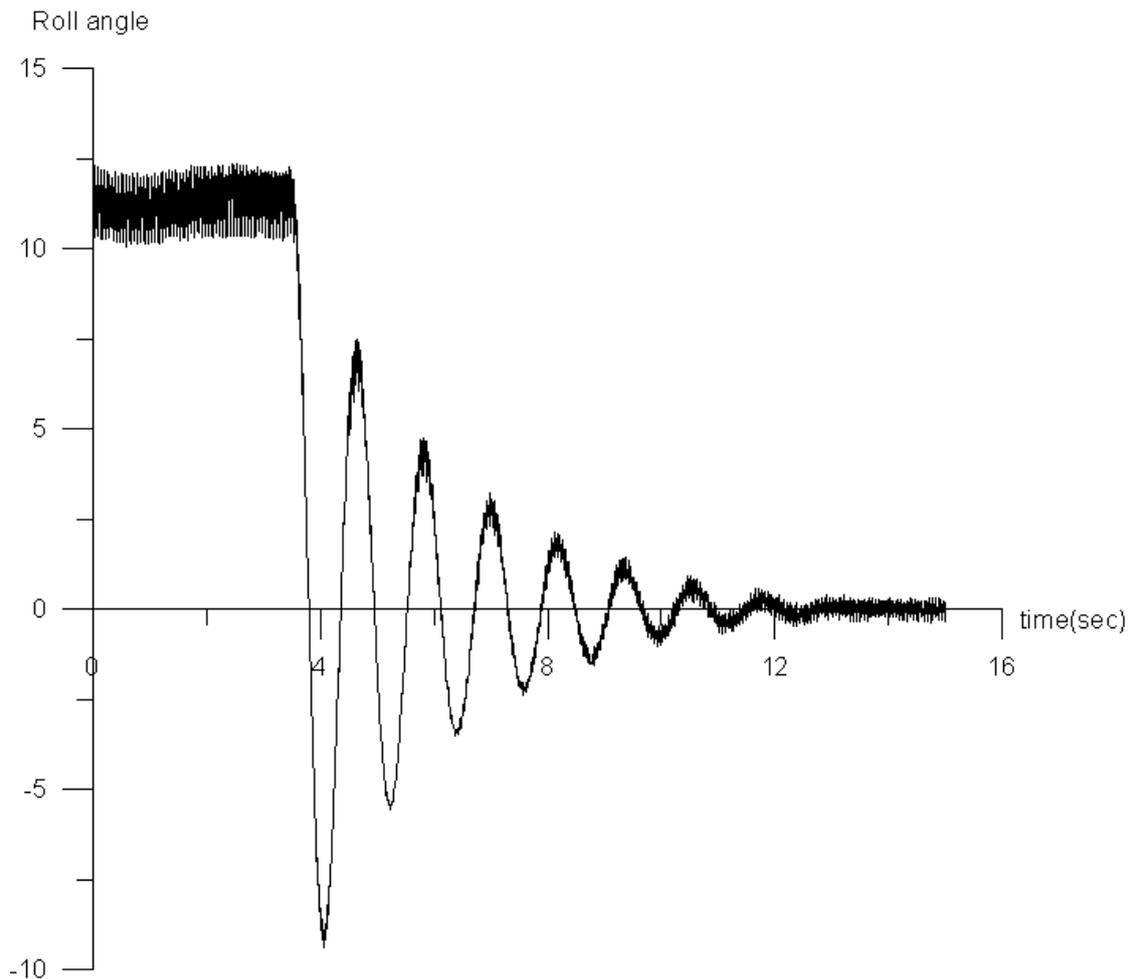
w (사용 Weight) = 2.04 kg

l_y (이동 거리) = 0.186 m

φ (계측된 각도) = 5.9525°

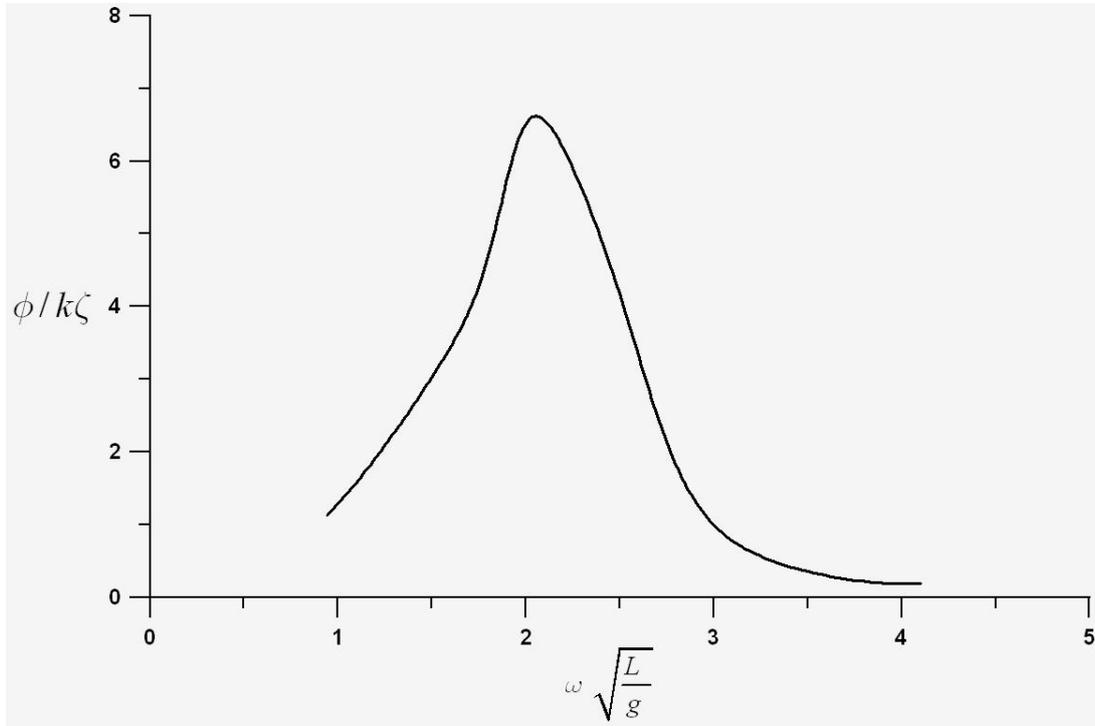
h (G에서 추의 중심까지의 거리) = 0.09046 m

2) Free Rolling Test



실험 3. 활어창 B, 물 90%
고유주기 : 1.05s

3) 규칙파중 Roll 특성 (Tank B)



4. 3. 4 Tank C 장착시 성능시험

1) 경사시험

$$\overline{GM} = \frac{w \cdot h}{W+w} + \frac{w \cdot l_y}{(W+w)\tan\phi}$$

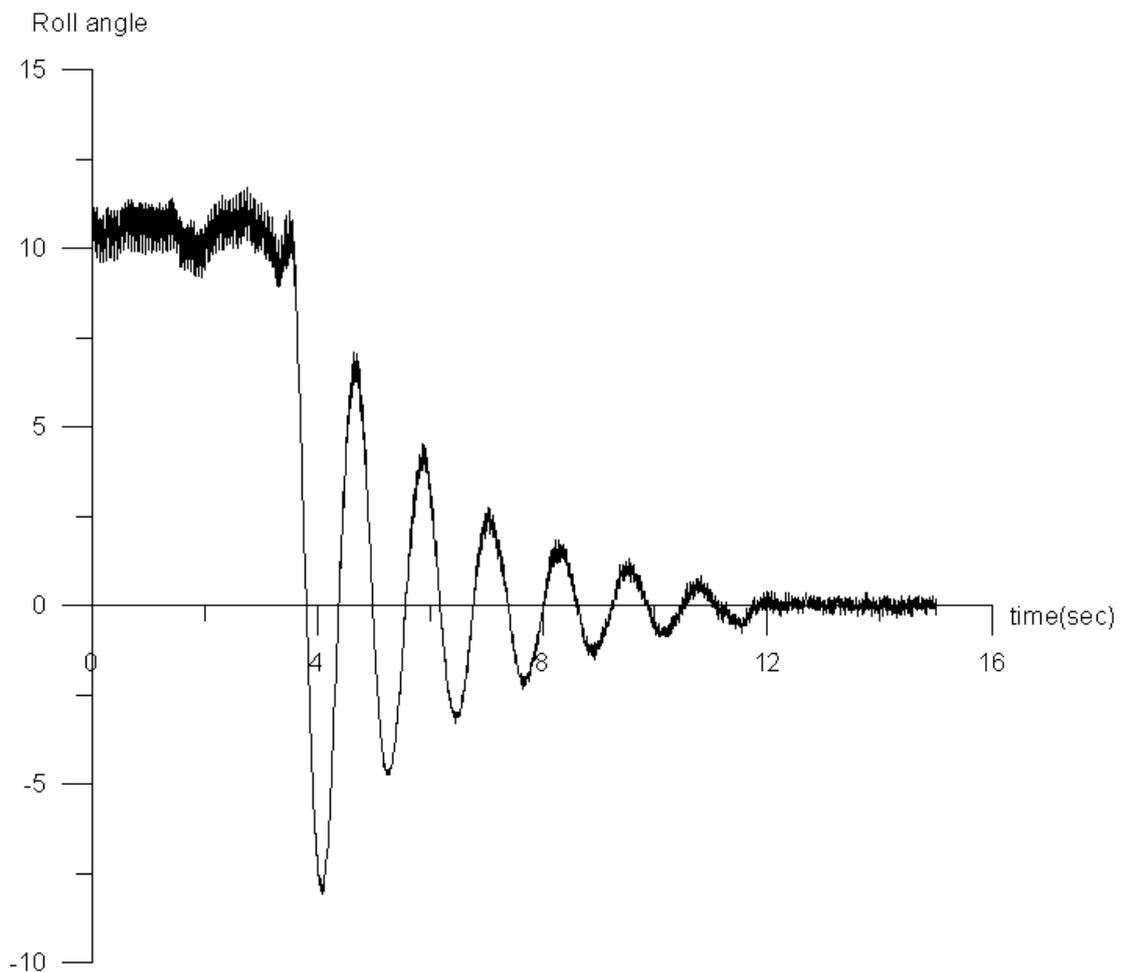
$$= \frac{2.04 \cdot 0.08545}{46.4 + 2.04} + \frac{2.04 \cdot 0.186}{(46.4 + 2.04)\tan 6.3551}$$

$$= 0.07393 \text{ m}$$

{

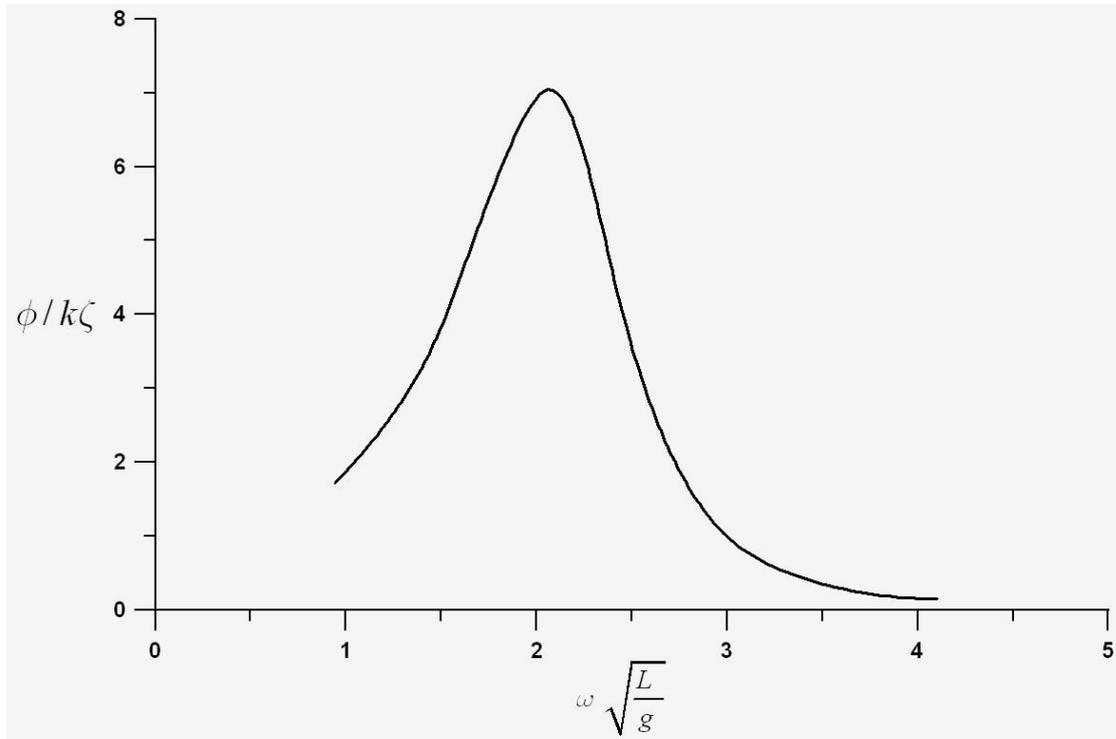
w (사용 Weight) = 2.04 kg
 l_y (이동 거리) = 0.186 m
 ϕ (계측된 각도) = 6.3551°
 h (G에서 추의 중심까지의 거리) = 0.08545 m

2) Free Rolling Test



실험 4. 활어창 C, 물 100%
고유주기 : 1.15s

3) 규칙파중 Roll 특성 (Tank C)



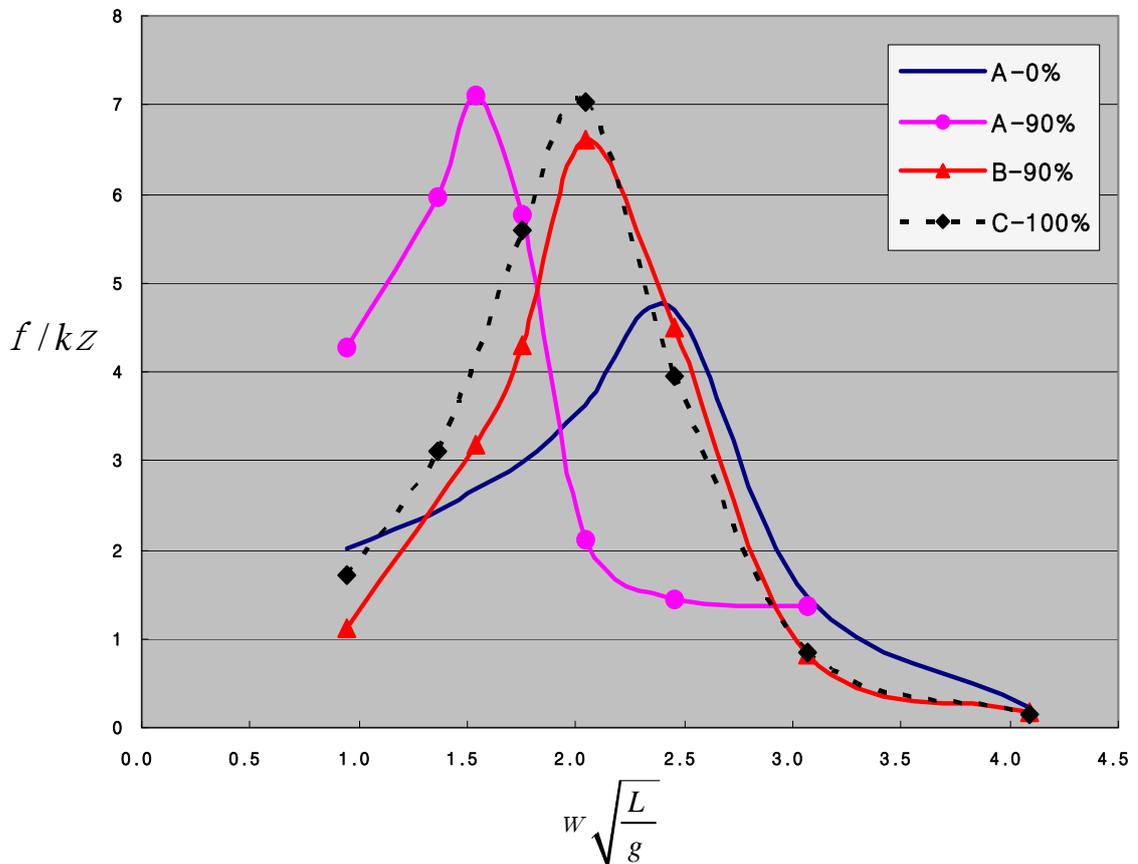
4. 4 탱크 A,B,C간 비교 및 고찰

	GM			
실험내용	실험1. (Tank A, 물0%)	실험2. (Tank A, 물90%)	실험3. (Tank B, 물90%)	실험4. (Tank C, 물 100%)
GM(m)	0.08678m	0.06441m	0.07894m	0.07393m

	주기			
실험내용	실험1. (Tank A, 물0%)	실험2. (Tank A, 물90%)	실험3. (Tank B, 물90%)	실험4. (Tank C, 물 100%)
모델 고유주기	0.9s	1.55s	1.05s	1.15s

실험시 최대 틀 특성 웨이브 주기	1s	1.6s	1.2s	1.2s
--------------------------	----	------	------	------

틀 특성 (낮은순으로 우수함)	①	④	②	③
------------------------	---	---	---	---



이번 실험에서 볼 수 있듯이 활어창의 자유수면 효과로 인하여, 롤 특성이 변화하는 것을 알 수 있다.

활어창에 물을 90% 채울 경우 GM도 작아지고 Free Rolling Test에서도 확인할 수 있듯이 고유주기가 커지는 것으로도, 롤 특성이 좋지 않게 나올 것이라고 예상할 수 있었다.

특별히 고안된 B형과 C형은 예상대로 A형 보다는 좋은 롤 특성을 보였으나, C형은 예상했던 것보다 특성이 좋지 않게 나왔다. 그 이유는, C형은 자유수면효과 감소를 위해 목을 높여 물을 100% 채우는 것이었으나 배가 롤운동을 할 때 생기는 롤각에 의해 활어창에 빈공간이 생기고 이로 인해 자유수면효과가 생기고 90% 물을 채웠을 때보다 조금은 감소되지만 기대한 만큼의 결과는 보여주지 못하였다. 그러나 최대 롤각을 감안하여 목부분까지 물을 조금 더 채우면 좋은 롤 특성을 가질 것으로 예상 된다. 이 실험은 추후에 행할 계획이다. B형은 격벽으로 인한 자유수면 효과 감소가 롤 특성을 좋게 하였다. 두 경우 전부 고유주기가 A형 물90% 경우보다 짧고 GM도 많이 커진 것을 볼 수 있다.

금후, 앞에서 언급했듯이 C형 활어창에 목부분까지 물을 채우는 것과, 다른 형태의 활어창을 고안하여 실험을 해볼 계획이다.

앞으로, 좀더 실용적인 연구를 위해서 실험장비의 개선이 시급하고, 또한 활어창을 좀 더 다양하고 실용적인 형태로 설계하는 것이 바람직하다고 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 어선의 활어창에 의한 복원력 감소현상을 이론적으로 해석하고, 활어창의 자유수면을 Control 할 수 있는 새로운 형태의 활어창을 설계하고, 수조에서 모형 시험을 통하여 그 성능을 확인 하였다.

본 연구에서 얻은 결과는, 새로운 개념의 활어창 제작에 즉시 응용 가능하고, 금후 보다 더 실용적인 활어창 개발에 기본 자료로 활용이 가능하다.

REFERENCE

- [1] D.Vassalos, M.Hamamoto, "Contemporary ideas on ship stability" Elsevier press(2000)
- [2] 일본조선학회, "선체운동 및 제어와 해상", 제 13회 운동성능 Symposium (1997)
- [3] 이승건, "선박운동 조종론", 부산대학교 출판부 (2004)
- [4] 박영선 편저, "IMO 업무해설", 해인출판사(1996)
- [5] Peter Tragardh, " Roll motion of maneuvering ship"
Marsim'03 proceeding (2003)
- [6] S. Surendran et al, " Roll dynamics of a ro-ro ship"
Journal of ocean engineering vol.49 no.4(2002)
- [7] A. Millward et al, "The development of a novel concept for improving the stability
of fishing vessel to prevent accidents at sea" , ISP vol.47 no.451(2000)
- [8] N.N. Rakhmanin et al, " The influence of liquid cargo dynamics on ship stability"
Contemporary Ideas on Ship Stability, Elsevier Press(2000)

주 의

1. 이 보고서는 해양수산부에서 시행한 “해양한국발전프로그램(KSGP)연구개발사업”의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 해양수산부에서 시행한 “해양한국발전프로그램(KSGP)연구개발사업”의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.