

# 슬래밍과 Green Water에 의한 선수부 충격하중의 산출 및 설계에의 응용

김 용 직 (부경대학교 조선해양시스템공학과)

## 1. 서 언

선박이 악천후 상태에서 운항할 때 선수부는 수면과의 과도한 상대운동으로 큰 충격하중을 받게 된다(Photo 1 참조). 대표적인 선수 충격현상으로 슬래밍(해양파가 선체바닥 또는 플레어가 심한 선체측면, 비대선의 선수앞면과 충돌하는 과정에서 발생) 충격현상과 green water(갑판 위로 유입되는 짙은 색의 부서지지 않은 해수 덩어리를 지칭하며 슬래밍 과정에서 주로 발생하는 흰색 물보라 즉 white water와 구별하여 사용됨) 충격현상을 들 수 있다. 이들 충격현상들에 대비하여 적절히 설계건조되지 못한 선박의 경우 선체에 구조적 손상을 초래하게 된다(Photo 2와 Photo 3 참조). 선체의 손상은 수리료 인한 손실뿐 아니라 심한 경우 선박 자체의 상실까지도 초래할 수 있으며, 궁극적으로 선박의 안전성 및 경제성을 현저히 감소시키는 원인이 된다.

선수부 충격문제는 1920년대 들어 엔진출력과 선속이 높아짐에 따라 선저 슬래밍에 의한 구조손상이 나타나면서 연구되기 시작하여 지금까지 수많은 논문들이 발표되고 있다. 그러나 비교적 최근에 연구가 시작된 플레어 슬래밍과 green water 충격은 물론 오랫동안 연구되어 온 선저 슬래밍 문제도 아직까지 충분히 해결되었다고 할 수 없어 이에 의한 손상들이 발생하고 있다. 이들 충격현상들과 관련된 유동문제는 스프레이 형태로 자유표면이 깨어지는 매우 격렬한 유동현상을 수반하며, 선체와 해양파의 입체적 거동이 복합적으로 작용하여 일어나는 매우 복잡한 유동현상이다. 이 유동문제들을 전체

적으로 엄밀하게 직접 해석하는 것은 현재로서는 불가능한 실정이고 앞으로도 상당기간 실현되기 어려울 것이다. 이는 이들 충격현상이 본질적으로 매우 격렬하고 복합적인 현상이기 때문이며, 충격에 따른 실선의 문제들을 해결하기 위해서는 관련유동의 엄밀한 직접해석보다는 일부 이론적·수치적 해석과 병행하여 실험자료와 실선자료 등을 적절히



Photo 1. Ship in Rough Sea

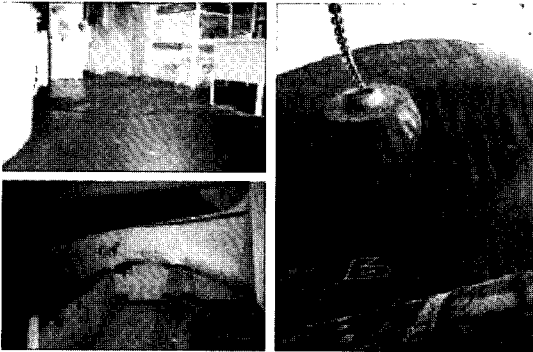


Photo 2. Damaged Bow-Flare Structures

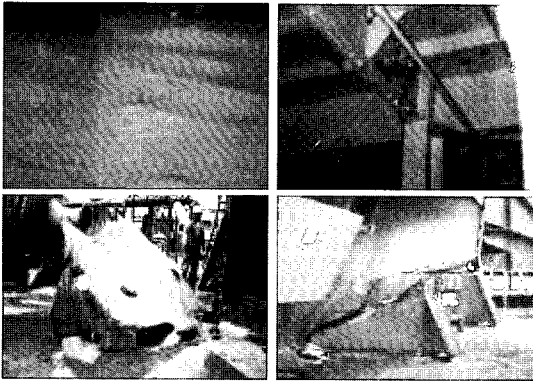


Photo 3. Damaged Bow Deck Structures and Equipments

활용하는 근사 추정방법이 모색되어야 한다.

본 고에서는 선수부 파랑충격 문제를 선저 슬래밍과 플레어 슬래밍, green water 충격으로 대별하고, 각각의 주요 연구동향과 함께 최근 필자가 참여했던 관련된 국내의 공동연구들을 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 선저 슬래밍

### 2.1 연구동향

물체가 평탄한 정수면에 낙하할 때의 충격압력의 이론적 해석은 Wagner(1931) 이후 많은 연구자에 의해 수행되어 왔고, 근래 들어 전산기 성능에 의해 수행되어 왔고, 근래 들어 전산기 성능이 획기적으로 향상되고 수치계산 기법이 발전함에 따

라 수치계산에 의한 연구들도 활발히 수행되어 왔다(Lin et al. 1984, Zhao/Faltinsen 1992, 1993 등). 그러나 최근의 성공적인 연구들(Zhao/Faltinsen 1992, 1993 등)에서도 그 대상이 2차원 임의형상 물체가 파가 없는 정수면에 낙하하는 (물체와 수면 사이에 끼는 포획공기의 영향도 배제한) 문제 정도에 그치고 있어, 슬래밍 해석 등에 필요한 3차원 선체가 해양파와 충돌하는 문제는 현재로서는 이론적·수치적 엄밀한 해석이 불가능하다고 할 수 있다.

선저 슬래밍 충격압력은 선저형상에 따른 압력계수와 선저가 수면에 충돌하는 상대속도로부터 계산될 수 있는데, 압력계수의 산출에는 이론해석(Wagner 1931, Szebehely 1952 등)이 한계가 있어 주로 실험자료에 근거를 둔 계수들이 사용되고 있다. 그 한 예로 Stavovy/Chuang(1976)의 체계적인 낙하실험에 기초한 압력계수를 들 수 있는데, 이는 선체표면과 수면과의 사잇각의 함수로 압력계수를 정의하고 있다. 그러나 이 압력계수는 spray root에서의 순간적이고 국부적인 최대 충격압력에 대한 계수이므로 통상의 정적구조해석에 사용하기 위해서는 등가정수압(같은 구조적 변형 및 응력을 주는 등가의 정적인 수압)으로의 변환을 거쳐야 한다.

선저 슬래밍에 적용할 수 있는 다른 압력계수로 Ochi의 실험에 근거한 압력계수(Ochi/Motter 1971)를 들 수 있는데, 이 압력계수는 흘수의 1/10에 해당하는 선저부의 형상에 의해 압력계수를 구하도록 되어 있다. 본래 이 방법은 선저형상을 원으로 등각 사상해서 얻어지는 3 파라메타들로부터 압력계수를 구하도록 되어 있어, 이 파라메타들의 계산을 위한 별도의 프로그램을 필요로 한다. 미국조선학회(SNAME 1993)는 이 Ochi의 실험자료를 재분석하여 선저형상으로부터 간단히 얻을 수 있는 2 파라메타들(1/10 흘수에서의 폭-흘수 비, 바닥 평단부의 폭-흘수 비)을 이용하여 압력계수를 구하는 도표를 발표하였다. 이 압력계수를 이용한 압력값은 등가정수압에 해당하므로 정적구조해석에 직접 사용될 수 있고, 현재 선저 슬래밍 충격압력 추정에 가장 널리

사용되고 있는 것으로 보인다. 이 도표가 수록된 문헌(SNAME 1993)은 선저 슬래밍에 대한 전 세계에 걸친 연구결과들을 종합한 보고서로서 총 147편의 관련 논문들을 인용하고 있으며, 선저 슬래밍에 대한 가장 포괄적인 문헌이라 할 수 있다.

현재 각국 선급규칙에는 대체로 선저 슬래밍에 대한 구조보강규정이 있으나, 그 방법 및 합리성 등에서 많은 차이를 보이고 있다. 일부 선급규칙들은 합리적인 근거에 의해서라기 보다는 단순히 경험에 의해 보강부위와 보강절차만을 규정하고 있으며, 슬래밍 충격압력에 기초한 선급규칙들(KR, DNV, GL, LR, NK 등)에서도 설계압력값과 요구 구조치수에서 서로간에 적지 않은 차이를 보이고 있다(김용직 등 1997). 또한, 이 규칙들의 제안근거가 되는 연구 결과들이 대개 공개되어 있지 않아 그 차이의 원인도 불분명한 실정이다.

## 2.2 국내 공동연구

선저 슬래밍 충격압력과 관련하여 필자가 한국선급과 공동으로 수행한 연구(김용직 등 1997)를 간략히 소개한다. 이 연구에서는 선저 슬래밍 충격압력을 미국조선학회 HS-2 패널의 압력계수와 수치 계산에 의한 선저와 파면과의 수직방향 상대속도를 이용하여 계산한다. 압력계수는 만재홀수의 1/10에 해당하는 홀수에서 각 선체단면의 반폭과 홀수의 비, 바닥 평탄부 반폭과 홀수의 비를 파라메타로 하여 미국조선학회 HS-2 패널의 도표(SNAME 1993)를 내삽 또는 외삽함으로써 계산하며, 선저와 수면과의 수직 상대속도는 비선형 스트립법(황중홍 등 1985)에 의해 시간영역에서 상하동요(heave)와 종동요(pitch)를 시뮬레이션하여 계산한다. 선저 슬래밍 충격압력은 산출된 압력계수에 상대속도의 제곱을 곱하는 방식으로 계산되며, 이 압력은 사용된 압력계수의 성격상 등가정수압에 해당되어 정적 구조 해석에 이용될 수 있다. 계산조건으로는 설계파고( $H_w$ )에 한국선급 강선규칙에서 종강도 계산시의 파고를 사용하였고, 선속은 설계속도를 사용하였다. 파

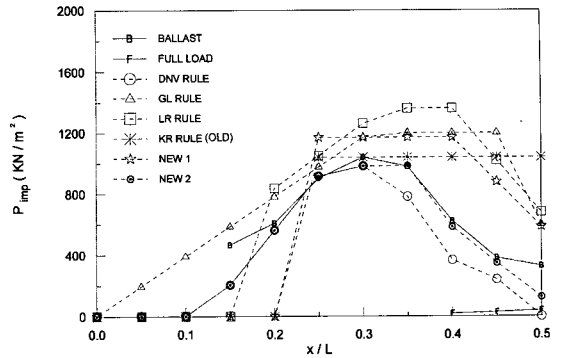


Fig. 1 Bottom Slamming Impact Pressures on 226.7m Container Ship

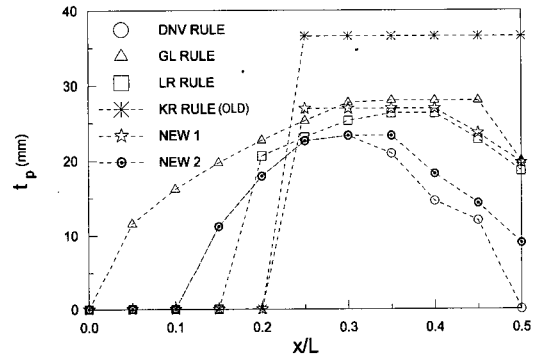


Fig. 2 Required Thickness of Bottom Shell Plate of 226.7m Container Ship under the Design Slamming Pressure (2.2m x 0.9m HT Panel)

장( $\lambda$ )과 선수각( $\mu$ )은 최대 충격압력이 나타날 수 있는 적절한 범위의 여러 값들에 대해 다수의 계산을 수행하였으며, 그 결과들로부터 최대 충격압력도 도출하였다. 선저충격은 만재상태보다 선수홀수가 작은 경하상태에서 크게 발생하므로 경하상태가 주 대상이 된다.

한국선급에 입급된 8척의 선박에 대해 충격압력을 계산하였고, 그 한 예를 Fig. 1에 보인다. 그림에서  $x/L$ 은 FP를 0.5로 선체중양을 0으로 한 길이방향 위치를 나타내며, 문자 B와 F로 표시된 압력들이 각각 경하상태와 만재상태에 대해 위의 방법으로 계산된 압력들이다. 각 선급규칙에 의한 설계압력들도 함께 보여지고 있고, 경하상태에 대한 본 계

산결과가 DNV 규칙의 설계압력과 유사한 압력을 보임을 알 수 있다. 8척의 선박에 대한 계산결과들을 분석하여 한국선급 강선규칙의 개정방향을 2가지로 제시하였고, 그에 의한 압력들이 NEW1과 NEW2로 보여지고 있다. 선저 외판두께에 대한 계산도 함께 수행되었고, 그 한 예를 Fig. 2에 보인다. 각 선급규칙의 요구두께 외에 NEW1과 NEW2는 제시한 개정방향에 따른 계산 결과이다. 한국선급 규칙은 그후 이 연구결과를 반영하여 개정되었다.

이 연구에는 당시 조선소들의 참여 없이 부경대와 한국선급만이 공동으로 수행하였으므로 실선들의 구조에 대한 직접적인 검토가 없었던 점은 아쉬움으로 남아 있고, 향후 손상자료의 수집과 분석을 통해 실선적용 결과를 추가로 반영할 필요가 있다고 생각된다. 아울러 충격압력 계산시의 해상상태 및 운항조건에 대해서도 추가 검토가 있었으면 한다.

### 3. 플레어 슬래밍

#### 3.1 연구동향

플레어 슬래밍은 근래 들어 선박이 대형화 고속화되고 플레어 각이 큰 선형들이 출현하면서 문제가 되기 시작했고 축적된 연구결과도 많지 않다. 플레어 슬래밍에 대한 연구들중 구조설계까지를 포함한 공개된 연구결과는 서부조선학회의 2차에 걸친 연구가 거의 유일하므로 이를 자세히 살펴볼 필요가 있다.

서부조선학회의 1차 연구(SNAWJ 1974)는 유조선 및 산적화물선과 같은 대형 비대선을 대상으로 하고 있다. 선형이론에 의한 계산을 바탕으로 선수부와 파면과의 상대속도에 대한 식을 도출하였고, 이 식에 의한 상대속도와 Chuang의 압력계수를 이용하여 Wagner형 입수 충격압력을 계산하였다. Chuang의 압력계수는 체계적인 나하 실험을 통해 얻어진 수면과의 교점부근에서 발생하는 충격압력의 피크값에 대한 계수이다. 또한 Bagnold형 쇄파 충격압력도 계산하여 두 충격압력 중 큰 값을 설계

압력으로 삼았다. 실적선의 손상/비손상 자료를 분석하여 실해상의 파면 경사각을 35°로 할 것 등을 제안하였다. 이 연구에서는 상대속도를 입수속도로 변환하는 계산식에 불합리한 오류가 있었으며, 등가정수압으로의 변환이 없이 Wagner형 입수 충격압력의 피크값을 그대로 구조 정적해석에 적용하는 등의 문제점이 있다고 생각된다.

서부조선학회의 2차 연구(SNAWJ 1987)는 컨테이너선 및 자동차운반선과 같은 세장형 중고속 선박을 대상으로 하고 있다. 상대속도 계산법의 기본 과정은 1차 연구에서와 같으나 1차 연구에서의 입수속도 계산식에서의 오류는 수정되었다. Wagner형 입수 충격압력만을 고려하였고, 1차 연구에서와 같이 Chuang의 압력계수를 이용하였으나, 1차 연구와는 달리 Hagiwara/Yuhara(1974)의 실험에 기초한 등가정수압계수를 도입하여 파면과의 사잇각이 작을 때 압력 피크값 보다 훨씬 작은 등가정수압을 설계압력으로 하였다. 또한, 실적선의 손상/비손상 자료를 분석하여 수면위 상갑판 높이에 따라 바람에 의한 선체 횡경사각을 고려할 것을 제안하였다. 횡경사각은 컨테이너선의 경우는 거의 고려되지 않았고, 자동차운반선의 경우는 14° 20° 정도 기우는 것으로 보고 이에 따라 충격압력을 완화시키는 방향으로 고려되었다. 이 연구는 입수속도 계산식의 정정, 등가정수압 개념의 도입등 1차 연구보다 많은 개선을 보이고 있으나, 플레어가 보다 심해진 최근의 컨테이너선 등에 적용할 때 불합리하게 과도한 보강을 요구하는 심각한 문제를 발생시키고 있다.

최근 들어 GL, LR 등의 선급이 플레어 슬래밍 충격압력 계산식과 구조 보강규정을 새로 제정하였고, DNV 등은 기존의 규칙을 개정하였다. 서부조선학회의 계산법뿐 아니라 이들 선급 규칙들에 의한 설계 충격압력 값들은 서로간에 커다란 차이를 보이고 있으며, 외판두께 등 구조치수에 있어서도 많은 차이를 보이고 있다(신찬호 등 2001, 임체환 등 2003, 김용직 등 2003a, 2003b, 2004e). 이들 선급규칙들의 제정 및 개정 근거가 되는 연구결과도

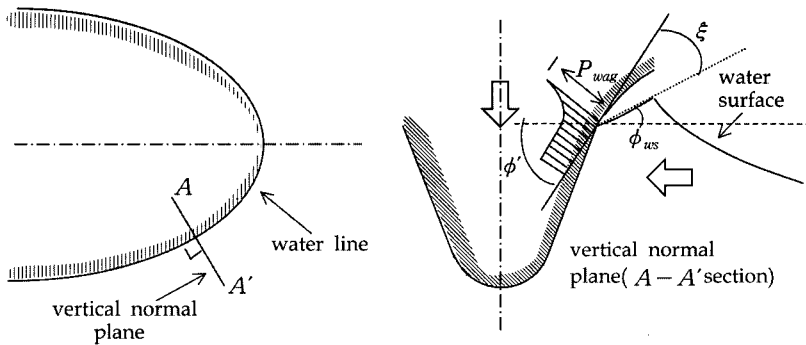


Fig. 3 Water Entry Impact on Bow-Flare Structure

거의 공개되지 않아 그 합리성을 판단하기 어렵고, 선급간 차이의 원인도 분명하지 않은 실정이다.

### 3.2 국내 공동연구

플레어 슬래밍과 관련하여 필자가 참여한 국내 7개 기관(부경대학교, 한국선급, 현대중공업, 대우조선해양, 삼성중공업, 한진중공업, 한국기계연구원)의 2차체에 걸친 공동연구(신찬호 등 2001, 임채환 등 2003, 김용직 등 2003a, 2003b, 2003c, 2004c, 2004d, 2004e)를 간략히 소개한다. 이 연구에서는 선수 플레어 충격현상을 입수충격(water entry impact)에 의한 것과 쇄파충격(breaking wave impact)에 의한 것으로 대별하고 각각에 의한 충격압력을 추정하며, 설계압력은 이들 중 큰 압력으로 한다.

입수충격은 Wagner형 충격이라고도 하며, 입수충격압력은 외판과 수면과의 교점부근에 형성되는 spray root 부근에서 최대 피크값을 갖고, 이 점보다 아래쪽 부분에도 비교적 높은 값을 보인다(Fig. 3 참조). 플레어 슬래밍 과정에서 선체는 내려가고 수면은 올라가기 때문에 선체기준으로 볼 때 수면과의 교점은 매우 빠른 속도로 선체표면을 따라 상 방향으로 이동한다. 수면과의 교점부근에서 발생하는 압력 피크값  $P_{wag}$ 는 입수속도의 제곱에 수면과 선체표면과의 사이각  $\xi$ (Fig. 3 참조)에 의해 결정되는 압력계수를 곱하는 방식으로 계산한다. 압력계수로는 Stavovy/Chuang(1976)의 압력계수를  $\xi < 3.85^\circ$

범위에서 수정(완화)하여 사용하였다.

각  $\xi$ 는 종동요(pitch)를 고려한 선체 외판의 수평면에 대한 경사각  $\phi_i$ 에서 실패상의 최대 파면 경사각  $\phi_{ws}$ 를 제하여 계산한다(Fig. 3 참조). 이 연구에서  $\phi_{ws}$ 는 실선의 손상/비손상 예들을 분석하여 실제 현상을 가장 잘 설명할 수 있도록  $29^\circ$ 로 정하였다. 바람에 의한 횡경사는 고려될 필요가 없는 것으로 판단되어 무시하였고, 이의 타당성은 실선 손상에 대해서도 확인할 수 있었다. 선체 중운동(상하동요와 종동요)은 비선형 스트립법(황중홀 등 1985)을 사용하여 계산하며, 계산조건은 선속을 설계속도의 70%로, 파고는 Zimmerman의 파고식에 의한 값으로 주었으며, 파장은 상대속도가 최대가 되도록 파장-선장비( $\lambda/L$ )를 비대선의 경우 1.1로, 대대선의 경우 1.0으로 각각 주었다. 선수각은  $180^\circ$ (선수파)로 고정하였다. 플레어 충격은 경하상태보다 만재상태에서 크므로, 모든 계산은 만재상태를 대상으로 한다.  $P_{wag}$ 의 계산에 사용되는 입수속도는 선체표면에 직각인 법선상대속도를  $\cos\xi$ 로 나누어 계산한다. 서부조선회의 비대선에 대한 연구(SNAWJ 1974)에서는 이 입수속도의 계산에 있어  $\cos\xi$ 를 곱하는 방식으로 계산하는 오류를 범하고 있으며, 이 오류가 그들의 연구에서  $\phi_{ws}$ 를  $35^\circ$ 로 과도하게 결정하게 만든 주요인으로 추정된다.

입수충격시 수면과의 교점부근에서 발생하는 압력 피크는 그 분포영역이 매우 좁고, 매우 빠른 속

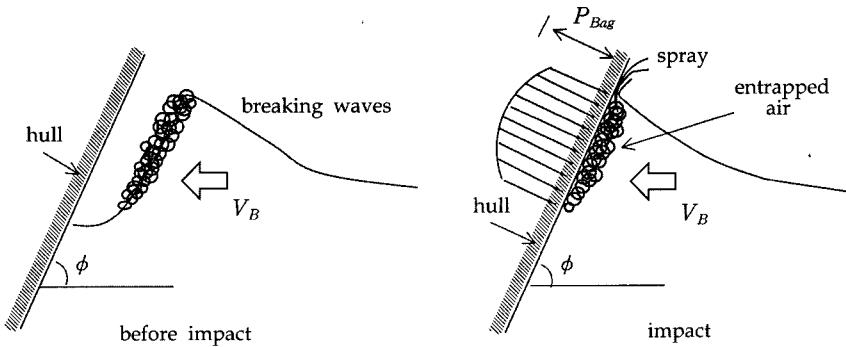


Fig. 4 Breaking Wave Impact on Bow Structure

도로 상방향으로 이동하므로 선체표면 한 부분에서의 지속시간도 매우 짧다. 따라서, 이를 구조설계용의 정적수압으로 변환하기 위해서는 계산된 압력 피크값  $P_{wag}$  에 Hagiwara/Yuhara(1974)의 실험에 바탕을 둔 등가정수압계수(SNAWJ 1987)를 곱하여 입수충격에 의한 등가 정수압  $P_{WE}$ 를 산출한다.

쇄파 충격압력은 Bagnold형 충격압력이라고도 하며, 거친 해상의 높은 파도에서 유체와 공기가 섞인 파정부분이 선체에 부딪칠 때 발생한다(Fig. 4 참조). 이 공동연구에서 쇄파 충격압력의 피크값  $P_{Bag}$  는 쇄파충격 압력계수에 쇄파와 선체와의 수평방향 상대속도의 제곱을 곱하는 방식으로 계산한다. 이 계산에는 선체 외판 경사각  $\phi$ 에 따른 영향도 함께 고려되었으나 선체동요에 의한 영향은 단순화를 위해 무시하였다. 쇄파충격 압력계수는 실선의 손상 해석시 손상/비손상 자료들을 가장 잘 설명할 수 있도록 5로 택해졌다. 쇄파와 선체와의 수평방향 상대속도의 계산에는 선속과 황천시 쇄파속도 등이 고려되며, 황천시 쇄파의 전진속도는 실선의 손상/비손상 자료 분석을 통해 12m/sec로 택해졌다. 쇄파 충격압력은 분포영역이 비교적 넓고 균일함을 감안하여 피크값  $P_{Bag}$  를 쇄파충격 등가정수압  $P_{BE}$ 로 하였다.

산출된 입수충격 등가정수압  $P_{WE}$ 와 쇄파충격 등가정수압  $P_{BE}$ 중 큰 값을 설계 등가정수압  $P_e$ 로 하였다(선종에 관계없이 일관되게 두 종류의 충격을

모두 고려함). 실선에서의 경향은 플레어가 심한 콘테이너선 등의 선척에서는 입수충격이 지배적이어서 설계압력이 입수 충격압력에 의해 정해지고, 비대선의 선수부에서는 쇄파충격이 지배적이어서 설계압력이 쇄파 충격압력에 의해 정해진다.

참여 연구기관 공동으로 외판 패널과 프레임, 웨브 프레임, 웨브 플레이트에 대해 부재내력(손상을 유발하는 최소 균일분포 정수압)의 계산식들을 정립하였고, 이 식들에 의한 부재내력  $P_c$ (또는  $P_{mf}$ 로 표시)와 충격압력 계산을 통해 얻어지는 설계 등가정수압  $P_e$ ( $P_{WE}$ 와  $P_{BE}$ 중 큰 압력)을 실선에 대해 비교하는 단순 손상해석이 수행되었다. 1차 연구(신찬호 등 2001, 김용직 등 2003c)에서 대상선박 17

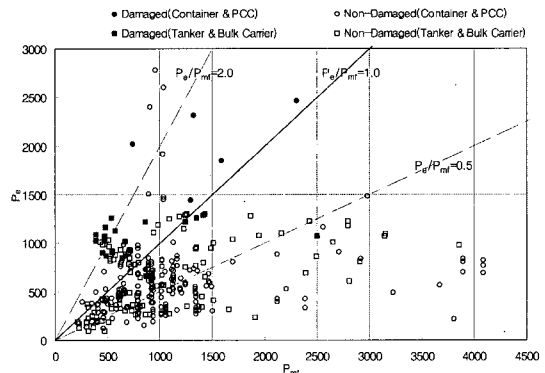
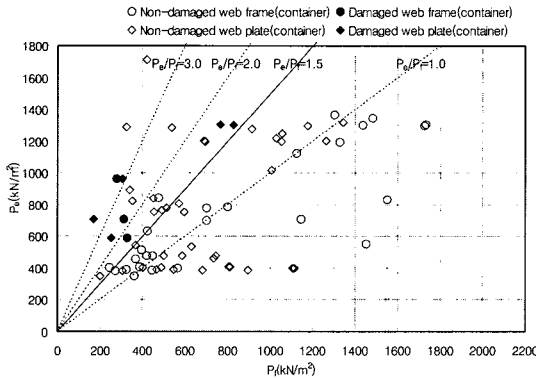


Fig. 5 Simple Damage Analysis for Bow-Flare Impact (Frame, Unit:kN/m<sup>2</sup>)



**Fig. 6. Simple Damage Analysis for Bow-Flare Impact (Web Frame and Web Plate)**

척에 대해 총 782개의 손상/비손상 자료가 작성되었고, 2차 연구(임채환 등 2003, 김용직 등 2004e)에서는 대상선박 10척에 대해 대부재(웹 프레임과 웹 플레이트)만을 대상으로 총 100개의 손상/비손상 자료가 작성되었다. 프레임에 대한 예를 Fig. 5에 보이고 웹 플레이트에 대한 예를 Fig. 6에 보인다(검은 점들은 손상자료이고 흰 점들은 비손상자료임). 각 그림에서 실선으로 표시된 사선들이 최종 결정된 설계기준(손상기준)선들이며, 이 기준에 의한 손상/비손상 자료의 설명가능 비율(설명된 자료의 수/자료의 총수)은 Fig. 5와 Fig. 6에서 각각 84%와 80%이다.

플레어 슬래밍 충격압력의 계산예를 Fig. 7과 Fig. 8에 보인다. Fig. 7의 PCC는 최소 외판 경사각(플레어각의 보각)이 26° 정도인 플레어가 매우 심한 선박이고, Fig. 8의 컨테이너선은 최소 외판 경사각이 37° 정도인 선박이다. 플레어가 심한 이런 선박들에서는 최대 압력이 입수충격압력에 의해 결정됨을 볼 수 있다. 서부 조선회와 선급규칙들의 설계압력도 함께 보여지고 있고, 이들 사이에 매우 큰 차이가 있음을 볼 수 있다.

국내 공동연구에 의한 외판 요구두께의 계산예를 Fig. 9와 Fig. 10에 보인다. 각각 Fig. 7 및 Fig. 8과 같은 선박의 같은 위치이며, 실선의 실제 외판두께

와 함께 다른 지침 및 규칙에 의한 요구두께도 보여지고 있다. Fig. 9의 선박은 손상을 받은 선박이고, Fig. 10의 선박은 비손상 선박이다. 국내 공동연구의 방법이 손상/비손상 여부를 잘 설명하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10에 보인 바와 같이 서부 조선회의 설계지침은 손상이 없었던 컨테이너선에서도 비정상적으로 과도한 두께를 요구함을 알 수 있고, 이러한 서부 조선회의 과도한 보강요구 경향은 외판뿐 아니라 다른 부재들의 경우에도 공통적으로 나타난다(신찬호 등 2001, 임채환 등 2003, 김용직 등 2003a, 2003b, 2004e).

국내 7개 기관이 공동으로 수행한 이 연구들 중 2차 연구(임채환 등 2003, 김용직 등 2004c, 2004d)에서는 플레어 충격압력의 시공간(time and space) 분포도 정식화되었다. Wagner형 입수충격 압력은 상방향으로 이동하는 압력이며, 한 순간 상하방향 압력분포 형태는 spray root 부분의 압력 피크부를 나타내는 이등변 삼각형과 그 아래의 압력 테일부를 나타내는 평행 사변형으로 단순화하여 나타내었고, 횡방향의 압력분포는 cosine 함수 형태로 가정하였다. 압력의 강도와 이동속도는 압력을 구하고자 하는 선체표면상의 기준점에서 계산하며, 피크부의 압력은 파면과의 사잇각이 작을 때 앞서 언급한  $P_{wag}$ 로 하고, 테일부의 압력은 썩기 입수시의 꼭지점 압력으로 하였다. 상방향 이동속도는 입수속도와 선체와 수면과의 사잇각으로부터 계산된다. 초기에 점진적으로 성장하는 생성과정과 중기에 기준점 부근을 변화없이 통과하는 상대적으로 짧은 유지과정, 말기에 점진적으로 약화되는 소멸과정이 있는 것으로 가정되었다. Fig. 11에 시공간 분포모델의 개형을 보이고(기호는 임채환 등 2003, 김용직 등 2004c, 2004d 참조), Fig. 12에 기준점에서 나타날 수 있는 시간에 따른 압력변화의 계산예를 보인다(시간  $t_s$ 는 충격압력이 처음 발생한 시점부터의 경과시간을 나타냄). Bagnold형 쇄파 충격압력은 이동하지 않고, 같은 영역에서 짧은 시간동안 점진적으로 증가하여 앞서 언급한 쇄파 충격압력의 최대

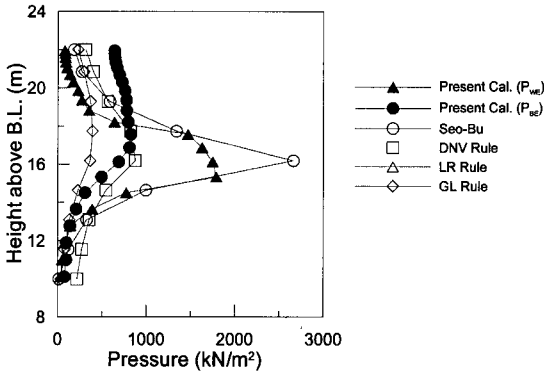


Fig. 7 Bow-Flare Impact Pressures on Damaged 190m PCC (at  $x/L = 0.489$ )

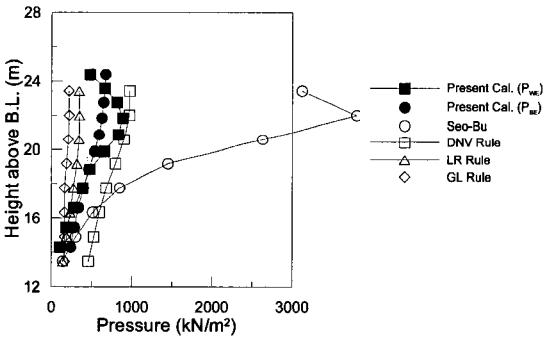


Fig. 8 Bow-Flare Impact Pressures on Non-damaged 282m Container Ship (at  $x/L = 0.46$ )

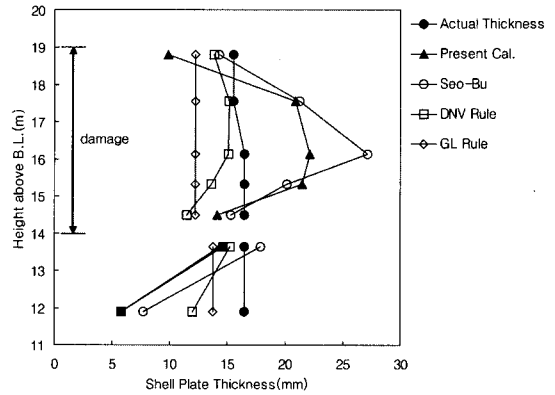


Fig. 9 Bow-Flare Shell Plate Thickness of Damaged 190m PCC (at  $x/L = 0.489$ )

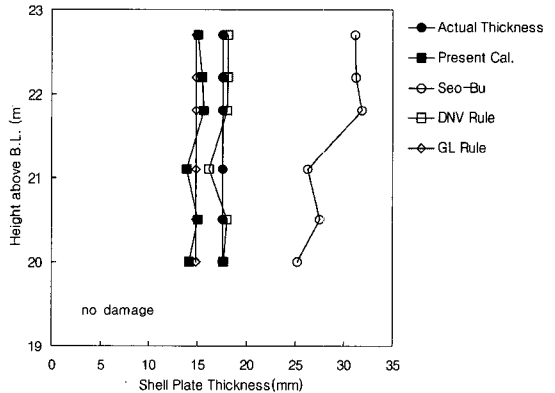


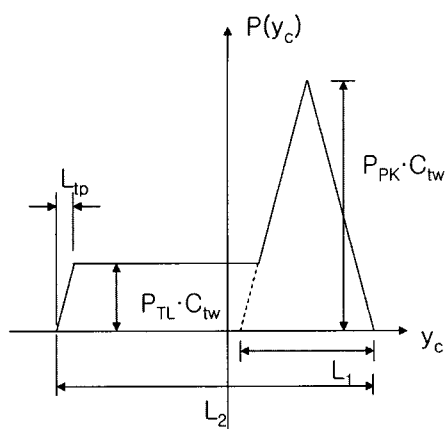
Fig. 10 Bow-Flare Shell Plate Thickness of Non-damaged 282m Container Ship (at  $x/L = 0.46$ )

값  $P_{Bwg}$  에 이르고, 이후 점진적으로 감소하여 소멸하는 형태로 나타내었다. 공간상의 분포형태는 cosine 함수 형태로 가정하였고, 시간상의 변화는 이등변 삼각형 형태로 가정하였다. 이 입수충격과 쇄파충격 압력들의 시공간 분포를 이용하여 실적선 4척에 대한 선수구조의 동적응답 해석이 수행되었고, 외판 및 외판에 인접한 대소부재들의 손상/비손상 예들은 적절히 설명되었다고 할 수 있다(임채환 등 2003, 김용직 등 2004c, 2004d).

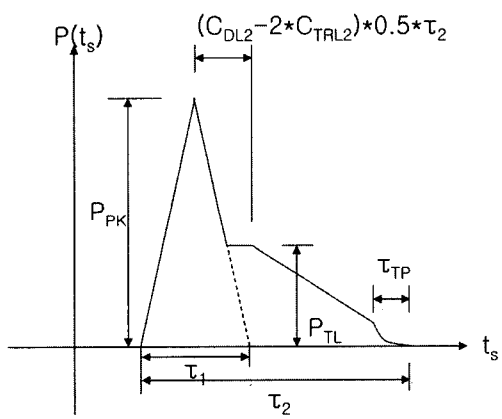
국내 7개 기관이 공동으로 수행한 이 연구들은 다양한 선종에 폭넓게 적용할 수 있지만, 충분한 실선의 손상/비손상 자료들이 확보되면 세부적인 설계기준 등은 재검토할 필요도 있다고 생각된다. 돌

출된 볼스터나 선수벌브에 인접한 부분에 대해서는 관련 유동에 대한 추가적인 고려가 있어야 할 것으로 판단되며, 특히 충격압력의 시공간분포를 이용한 구조 동적해석은 향후 압력모델의 개선을 위해 지속적인 연구가 필요하다고 생각된다. 이 연구들의 결과에 의해 기존의 선규규칙들로는 해결할 수 없었던 손상부분들의 적절한 보강정도를 결정할 수 있게 된 것과 서부조선회의 설계지침을 최근의 콘테이너선과 일부 비대선에 적용할 때 발생하는 과도한 보강요구의 문제점이 해소된 것, 향후 개선이 필요하겠지만 구조 동적응답 해석에 이용할 수 있





(1) Space Distribution along the Vertical Axis



(2) Time-Variation at the Reference Point

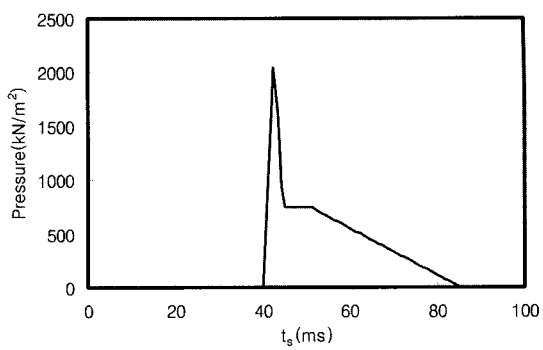
**Fig. 11** Space and Time Distribution Model of Wagner Type Water Entry Impact Pressure

는 플레어 충격압력의 시공간분포 모델이 새로이 정립된 것 등은 이 연구들을 통해 얻어진 주요 성과들이라고 할 수 있다.

### 4. Green Water 충격

#### 4.1 연구동향

Green water 충격현상은 선수갑판으로 쏟아져 들어온 green water(white water라 불리는 흰색 물보



**Fig. 12** Time History of Calculated Bow-Flare Impact Pressure on 184m Container Ship

라와 구별되며 갑판위로 유입된 짙은 색의 거의 부서지지 않은 해수 덩어리)가 일차적으로 선수갑판 자체에 큰 충격을 가하고, 갑판상을 빠른 속도로 흘러가면서 물결막이(water breaker)와 같은 갑판상 구조물과 의장품들에 부딪혀 충격을 가함으로써 발생한다. Green water에 대한 그간의 여러 연구들은 그 유동현상 및 충격현상의 근본적인 해석보다는 주로 갑판침수의 발생여부 및 확률, 선수부 상대수위 등에 관한 연구라고 할 수 있다. 이와 관련하여 Ochi(1964), Takezawa et al.(1977), O'Dea et al.(1984), Lloyd et al.(1986), Takagi et al.(1990), 홍사영 등(1990), 배광준 등(1992)의 연구가 있다. 선수갑판과 갑판상의 의장품, 물결막이(water breaker) 등에 작용하는 충격하중을 산출하기 위해서는 green water의 수위변화와 유속변화 등을 계산할 수 있는 유동해석법이 요구된다. 최근 들어 이에 관한 소수의 연구결과들이 발표되고 있다.

선수갑판 green water의 유동해석까지를 다룬 연구로는 Mizoguchi(1988)의 연구와 Ogawa et al.(1997, 2000)의 연구, Fekken et al.(1999)의 연구 등을 들 수 있다. Mizoguchi(1988)는 콘테이너선을 대상으로 하여 green water 실험을 수행하였고, 수치적 방법으로 유동을 해석하였다. 유동해석에 실험에서 얻어진 선수부 상대운동 계측값들을 이용하였고, 유동해석 계산결과를 실험결과와 비교하였다. 유동 시

물레이션 방법으로는 3차원 특성 곡선법(method of characteristics)을 이용하였다. 유동해석에서 얻어진 수평유속과 Suhara et al.(1976)의 압력계수를 사용하여 선수부 후단 수직벽에 작용하는 충격압력을 계산하였다. 이 연구에서는 갑판 들레에서의 수면 높이 및 선체 종운동 값들을 이론계산에 의하지 않고 실험에서의 계측값을 사용하였다. 따라서, 이 연구는 계산만에 의한 추정법을 정립하지는 못하였고, green water 유동에 큰 영향을 미칠 수 있는 선체 운동(수직 가속도, 속도 등)의 영향도 고려하지 못하였다.

Ogawa et al.(1997, 2000)은 원유 운반선을 대상으로 green water에 대한 실험과 유동해석을 수행하였다. Green water에 의해 선수갑판에 작용하는 수직하중과 갑판상 수직벽에 작용하는 수평충격압력도 다루었다. 유동해석에 2차원 홍수파(flood wave) 이론을 사용하고 있으며, 수평충격압력 추정에는 Wagner 이론을 응용하였다. 선체 종운동은 선형 스트립법을 이용하여 계산하였고, 선수에서의 상대운동 계산에 동적 수면상승(선체와 수면과의 상대운동에 의해 발생하는 수면상승)은 고려하지 않고 정적 수면상승(선체의 전진속도에 의한 수면상승)만을 고려하고 있다. 이들이 스스로 지적하였듯이 유동해석에 2차원 이론을 사용함에 따라 갑판 측면에서 유입되는 유량이 반영되지 못하였고, 이에 의한 실험과의 차이가 보여지고 있다. 또한, 일반적으로 동적 수면상승의 영향이 큰 것으로 알려져 있어 동적 수면상승을 무시한 이들의 방법은 다른 선박에 적용하기는 곤란할 수 있다. 선체운동을 선형이론으로 계산한 점은 비선형 효과가 크게 나타날 수 있는 콘테이너선 등에서는 이로 인한 오차가 커질 수 있다. 입수 충격문제에 대한 Wagner 이론을 수평방향 충격압력 추정에 이용한 점도 계산의 불안정성을 초래할 수 있다고 생각된다.

Fekken et al.(1999)은 Navier-Stokes 방정식을 3차원 직교좌표계상에서 풀어 선수갑판상 green water 유동을 시뮬레이션하였고, 갑판과 갑판상 구

조물들에 작용하는 압력들도 산출하였다. 이들의 방법은 갑판상의 임의 형상 물체를 고려할 수 있는 장점도 있으나, 계산시간과 계산의 복잡성 등에서 비효율적이라는 단점도 있다. 또한 이들의 연구는 갑판상으로 유입되는 해수의 경계조건으로 실험결과를 사용하고 있고, 선체운동(갑판 등의 기울기 변화, 가속도, 선속 등)의 영향이 무시되어 실험과의 차이도 보이는 등 아직 실용적인 추정법이라고 할 수는 없다.

설계실무에서의 선수갑판과 갑판상 구조물의 강도설계는 주로 선급규칙들(KR, DNV, GL 등)에 의존하여 왔다. 그러나, 선급규칙들의 강도요구를 충족시킨 기존의 선박들에서 종종 green water에 의한 손상이 발생하여 왔고, 이들 선급규칙들의 선수갑판 설계하중은 실선의 손상사례들을 설명하기에는 대부분 너무 작은 하중들이다(김용직 등 2004f). 또한, 이 설계하중들은 서로간에 많게는 몇 배의 차이를 보이고 있지만 이 하중들의 제안 근거가 되는 연구결과들이 거의 공개되지 않아 그 차이의 원인도 분명하지 않은 실정이다. 또한, 많은 인명과 재산피해를 수반했던 Derbyshire호의 침몰사고가 green water에 의한 손상에 원인이 있었음이 밝혀짐(Faulkner 2002)으로써 green water 하중 및 이에 대비한 설계법의 연구에 최근들어 국내외의 많은 관심이 집중되고 있다.

#### 4.2 국내 공동연구

Green water 충격과 관련하여 필자가 참여한 국내 5개 기관(부경대학교, 현대중공업, 대우조선해양, 삼성중공업, 한국선급)의 공동연구(김용직 등 2004a, 2004b, 2004f, 김화수 등 2004, 서용석 등 2004, 허주호 등 2004)를 간략히 소개한다. 이 연구에서는 green water 유동을 유한차분법으로 시뮬레이션하며, 이때 얻어지는 유동정보를 이용하여 선수갑판과 갑판후단의 물결막이에 작용하는 충격압력 등을 산출한다.

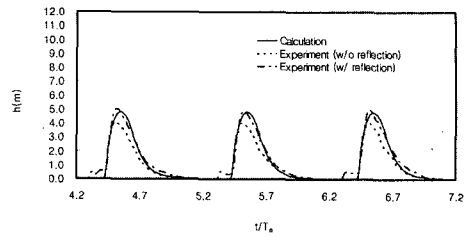
갑판위 green water 유동은 수심이 파장에 비해

알다는 가정에 의해 천수와 방정식(Stoker 1957)을 이용하여 효율적으로 계산될 수 있다. 이 연구에서는 천수와 방정식을 선체 종운동(상하동요와 종동요)에 의한 상하방향 및 수평방향 가속도를 고려할 수 있도록 정식화하였고, 안정적인 시뮬레이션을 위해 보존형의 방정식을 도출하여 사용하였다. 선체 종운동은 비선형 스트립법(황종홀 등 1985)을 사용하여 계산하였다. Green water 유동의 효율적인 시뮬레이션을 위해 유한차분법의 일종인 predictor-corrector/2중 상류차분법(김용직 1995)을 자체 개발하여 적용하였으며, 이 수치해법은 green water 해석에 사용되고 있는 기존의 수치해법들(특성곡선법 등)보다 안정적이고 효율적인 새로운 수치해법이라 할 수 있다. 수치계산의 경계조건으로 사용되는 갑판둘레의 수위를 적절히 추정하기 위해 동적/정적 수면상승을 고려하였고, 동적/정적 수면상승량의 계산에는 기존의 실험식(Tasaki 1961, Mitsui 1975)을 자체 실험결과를 바탕으로 수정하여 사용하였다.

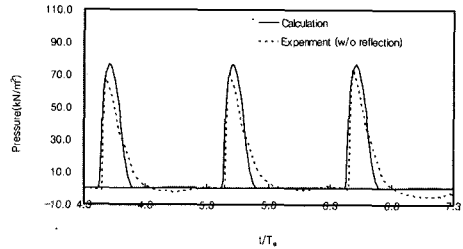
Green water 유동 시뮬레이션에서 얻어진 green water 수위정보와 유속정보를 이용하여 갑판에 작용하는 압력이 수위에 따른 정수압과 각 위치에서의 상하방향 운동량 변화로부터 계산되며, 물결막이 등의 수직벽에 작용하는 충격압력이 수직벽에 의한 green water의 전후방향 운동량 변화와 자체 실험에 기초한 상하방향 압력분포계수에 의해 계산된다.

개발된 계산법의 검증 및 개선점을 모색하기 위해 4척의 모형선을 이용한 green water 실험을 부경대학교 예인수조에서 수행하였고, 그 결과를 계산법의 보완에 반영하였다. Fig. 13에 계산결과와 실험결과를 비교한 예를 보이며( $T_w$ 는 조우주기), 개발된 계산법이 green water 유동과 이에 의한 하중들을 적절히 추정함을 볼 수 있다.

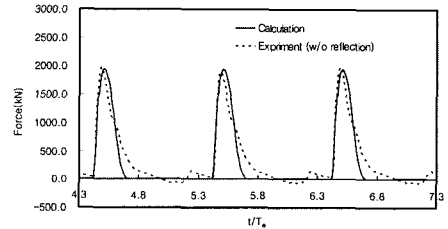
개발된 계산법이 실선의 손상/비손상 사례에 비추어 타당한 하중을 주는가를 검증하기 위해 3척의 실적선에 대해 유한요소법을 이용한 선수상부 구조의 동적응답 해석을 수행하였다. 이 구조 동적응답



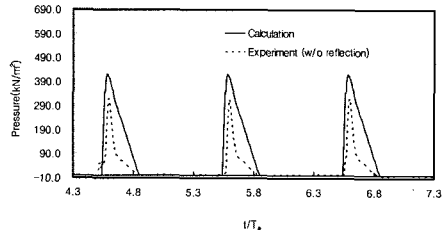
(1) Green Water Height  $h$  on Bow Deck at St. 9.5



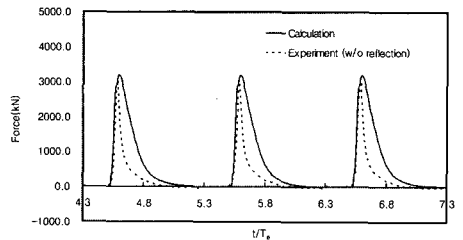
(2) Pressure on Bow Deck at St. 9.5



(3) Force on Bow Deck Panel

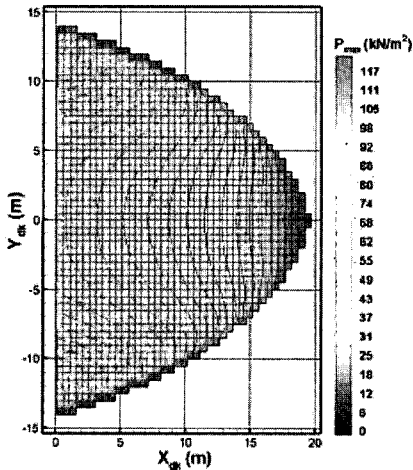


(4) Pressure on Water Breaker at 2.0 m height

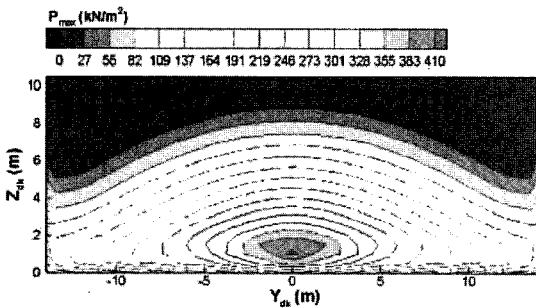


(5) Force on Water Breaker Panel

Fig. 13 Comparisons of Calculated Result and Experimental Measurement for Green Water Phenomenon of 175m Container Ship



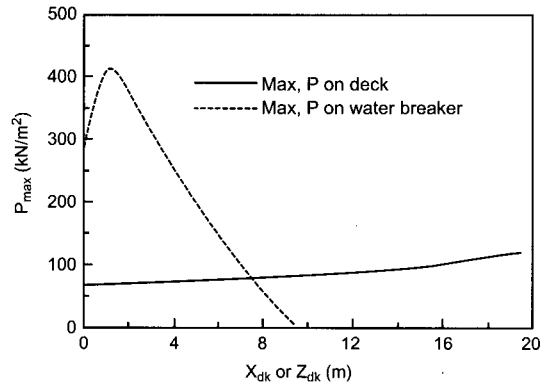
(1) Calculated Maximum Pressures on Bow Deck



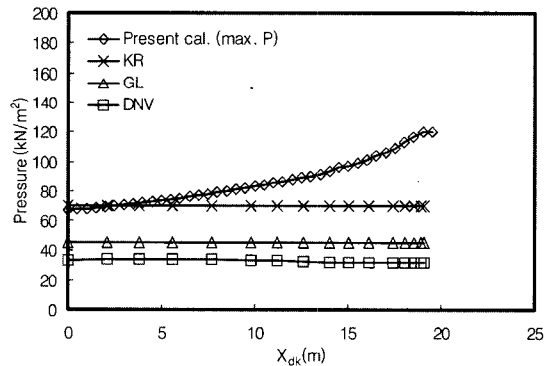
(2) Calculated Maximum Pressures on Water Breaker

**Fig. 14** Calculated Maximum Pressures on Bow Deck and Water Breaker of 283m Container Ship

해석에는 green water 수치계산에서 산출된 충격압력의 시공간(time and space) 분포가 선수갑판과 물결막이에 작용하는 외력으로 가해졌고, 실선의 손상/비손상 예들을 잘 설명할 수 있음이 밝혀졌다. 계산된 충격압력의 시공간분포에서 각 위치별로 선별한 최대압력값의 한 예를 Fig. 14에 보인다. 계산시 선속은 설계속도의 70%로, 파고는 Zimmerman의 파고식에 의한 값으로 주었으며, 파장은 선장의 1.2 배로 주었고, 선수각은 180°(선수파)로 고정하였다. Green water 충격은 경하상태보다 만재상태에서 크므로 모든 계산은 만재상태를 대상으로 한다. 그림



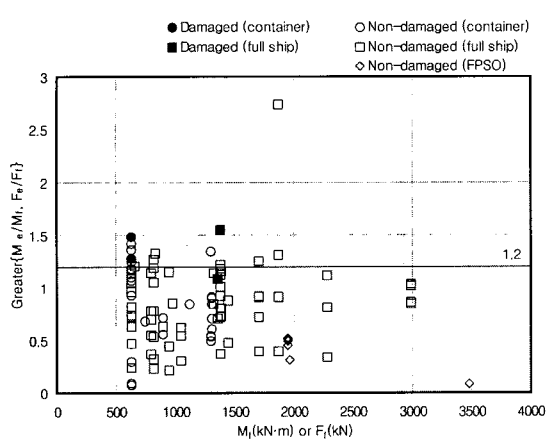
**Fig. 15** Calculated Maximum Pressure on Bow Deck vs.  $X_{dk}$  and Calculated Maximum Pressure on Water Breaker vs.  $Z_{dk}$ (283m Container Ship)



**Fig. 16** Comparison of Calculated Maximum Bow Deck Pressure with Rule Pressures (283m Container ship)

에서  $X_{dk}$ 는 선수갑판 후단(물결막이 위치)으로부터의 거리이며,  $Y_{dk}$ 는 좌우방향의 좌표이고,  $Z_{dk}$ 는 갑판으로부터의 높이를 나타낸다.

선수갑판과 물결막이 부재들의 구조 설계기준을 도출하기 위해 12척의 실적선을 대상으로 부재내력과 green water에 의한 외력을 비교하는 단순 손상 해석을 수행하였다. 9가지 부재(갑판의 패널, 스티프너, 거더/트랜스버스, 브라켓, 필러와 물결막이의 패널, 스티프너, 스테이)의 내력 계산식을 정립하여 부재내력을 계산하였고, green water에 의한 외력은 Fig. 15에 보여진 예와 같은 갑판상의 길이방향 최



**Fig. 17 Simple Damage Analysis for Bow Deck Girder/Transverse (Greater  $\{M_e/M_r, F_e/F_r\}$  vs.  $M_e$  or  $F_e$ )**

대 압력분포와 물결막이 높이방향 최대 압력분포를 이용(횡방향 변화는 단순화를 위해 고려하지 않음) 하여 계산하였다. 참고로 Fig. 16에 이 공동연구에 의한 갑판상 최대압력과 각 선급규칙(KR, GL, DNV)에서의 선수갑판 설계압력을 비교하여 보인다. 각 선급규칙들의 설계압력이 서로간에 많은 차이가 있고, 국내 공동연구에 의한 압력은 앞서 언급한 구조 동적해석을 통해 실선의 손상사례를 잘 설명함에 비추어 이 압력보다 현저히 작은 선급규칙들의 설계압력은 실선의 손상사례들을 설명하기에는 대부분 너무 작은 하중들임을 알 수 있다.

총 12척의 실적선들을 대상으로 선수갑판 부재들에 대해 총 407개의 손상/비손상 자료가 작성되었고, 물결막이 부재들에 대해 총 25개의 비손상 자료가 작성되었다. 갑판 거더/트랜스버스에 대한 단순 손상해석의 예를 Fig. 17에 보인다(검은 점들은 손상자료이고 흰 점들은 비손상자료임).  $M_e$ 와  $F_e$ 가 외력으로서의 부재에 걸리는 모멘트와 전단력이며,  $M_r$ 와  $F_r$ 가 부재내력으로서의 모멘트와 전단력이다. 종축값 1.2에 위치한 수평선이 최종적으로 결정된 이 부재의 설계기준(손상기준)선이며, 이 기준에 의한 이 부재의 손상/비손상 자료 설명가능 비율(설명된 자료의 수/자료의 총수)은 88%이다. 단순 손상

해석을 통해 9가지 부재들에 대한 설계기준(손상기준)이 각각 도출되었으며, 도출된 설계기준을 적용할 때 손상자료가 있었던 부재들(갑판 거더/트랜스버스와 웹 플레이트, 브라켓)의 종합 설명가능 비율은 90%였다.

국내 5개 기관이 참여한 이 공동연구는 아직까지 제대로 정립되지 않았던 green water 충격하중 추정법 및 관련 구조 설계법을 처음으로 정립했다는 데 그 의의가 크며, 향후 선수갑판과 물결막이의 합리적인 구조설계에 크게 기여할 것으로 기대된다. 이 연구의 수행에 있어서도 손상자료의 부족은 설계기준 도출에 있어 매우 아쉬운 점이었으며, 향후 지속적인 실선의 자료축적이 가능하도록 국내의 공동된 노력이 있었으면 한다. 후속 연구들로서, green water 충격에 대비한 선수갑판 의장품의 구조 설계법 연구와 갑판상 구조물 및 bulwark이 green water 하중에 미치는 영향에 대한 연구, 선체 횡경사가 green water에 주는 영향에 대한 연구, 플레어 등 선수부 형상을 좀더 엄밀히 고려한 green water 해석법의 연구 등이 필요하다고 생각된다.

### 5. 결 언

본 고에서는 선저 슬래밍과 플레어 슬래밍, green water 충격에 관련된 연구동향과 필자가 참여했던 국내의 관련 연구들을 간략히 소개하였다.

이들 충격문제는 스프레이 형태로 자유표면이 깨어지는 매우 격렬한 현상이고 선체운동과 해양파가 복합적으로 작용하는 복잡한 현상이다. 이 충격과 관련된 유동문제를 이론적·수치적 수단으로 엄밀하게 직접 계산하는 것은 현재로서는 불가능하고, 앞으로도 상당기간 실현이 어려울 것이다. 따라서, 일부 이용 가능한 이론적·수치적 수단과 실험자료, 실적선 자료 등을 복합적으로 활용하여 충격하중을 근사적으로 추정하는 접근방법이 현실적으로 적용 가능한 방법이라고 판단된다.

또한, 충격압력은 적용하고자 하는 대상 구조물 또는 사용하고자 하는 구조해석법에 따라 적절한

성격의 것이 요구되므로 실선설계에 직접 이용할 수 있는 연구결과를 얻기 위해서는 구조분야 연구자와 유체분야 연구자의 협동연구가 매우 바람직함을 지적해 둔다.

지금까지 국외에서 오랫동안 수행되어 온 많은 연구들에 비해 국내에서의 이 분야의 연구는 그다지 활발하지 못했던 것으로 보여진다. 향후, 국내의 연구도 활성화되어 황천 중에서의 선박의 안전성과 경제성, 더 나아가 국내 조선산업의 국제 경쟁력 향상에 크게 기여할 수 있기를 기대한다.

그동안 관련 국내 공동연구들을 수행함에 있어 좀 더 연구가 필요한 불명확한 부분들도 있었고 특히 손상자료의 부족은 설계기준 도출 등에 있어 매우 아쉬운 점이였다. 실선자료의 축적은 설계능력 향상의 중요한 기초가 되므로 향후 지속적인 실선자료의 축적이 가능하도록 국내의 공통된 노력이 있었으면 한다.

## 후 기

본 고는 필자가 참여하여 수행했던 국내 공동연구들의 결과에 기초한 것입니다. 그간의 공동연구들을 지원해 주신 한국선급과 현대중공업, 대우조선해양, 삼성중공업, 한진중공업, 한국기계연구원에 감사를 드리며, 아울러 함께 연구를 수행했던 여러 연구원들께도 감사드립니다.

## 참고문헌

김용직, 1995, 선수부에 작용하는 파랑 충격하중, 한국과학기술연구원 핵심전문 연구보고서.  
 김용직, 김진호, 송재영, 김종현, 김대현, 전영기, 1997, 선수부 슬래밍 충격압력 추정기법 개발 연구, (사)한국선급 위탁연구보고서  
 김용직, 신기석, 신찬호, 강점문, 김만수, 김성찬, 오수관, 임채환, 김대현, 김도형, 박익현, 송기종, 이춘기, 장영희, 2003a, "선수 플레어 충격압력 추정과 구조설계에의 응용 - 탱크와 산적화물선 -", 대한조선학회 논문집, 제40권, 제3호, pp. 22-28.  
 김용직, 신기석, 신찬호, 강점문, 김만수, 김성찬, 오수관, 임채환, 김대현, 김도형, 박익현, 송기종, 이춘기, 장영희, 2003b, "선수 플레어 충격압력 추정과 구조설계에의 응용 - 컨테이너선과 자동차 운반선 -", 대한조선학회 논문집, 제40권, 제3호, pp. 29-36.

김용직, 신기석, 신찬호, 강점문, 김만수, 김성찬, 오수관, 임채환, 김대현, 김도형, 박익현, 송기종, 이춘기, 장영희, 2003c, "선수 플레어 구조손상 해석", 대한조선학회 논문집, 제40권, 제3호, pp. 37-44.  
 김용직, 신기석, 허주호, 서용석, 김희수, 하태범, 하영록, 추교덕, 박경원, 김대웅, 권승민, 이춘기, 김문성, 한용연, 이현호, 문중수, 김대현, 도형민, 2004a, "선수갑판 Green Water에 대한 수치계산 및 실험", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집.  
 김용직, 신기석, 허주호, 서용석, 김희수, 하태범, 하영록, 추교덕, 박경원, 김대웅, 권승민, 이춘기, 김문성, 한용연, 이현호, 문중수, 김대현, 도형민, 2004b, "Green Water 충격을 받는 선수갑판 구조부재에 대한 단순 손상해석 및 설계에의 응용", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집.  
 김용직, 임채환, 서용석, 신찬호, 유병석, 김희수, 신기석, 김대웅, 유해근, 최용호, 이춘기, 도형민, 김영남, 경우진, 김도형, 정병훈, 2004c, "2800 TEU 컨테이너선의 선수 플레어 충격에 의한 구조 동적응답 해석", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집.  
 김용직, 임채환, 서용석, 신찬호, 유병석, 김희수, 신기석, 김대웅, 유해근, 최용호, 이춘기, 도형민, 김영남, 경우진, 김도형, 정병훈, 2004d, "5300 TEU 컨테이너선의 선수 플레어 충격에 의한 구조 동적응답 해석", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집.  
 김용직, 임채환, 서용석, 신찬호, 유병석, 김희수, 신기석, 김대웅, 유해근, 최용호, 이춘기, 도형민, 김영남, 경우진, 김도형, 정병훈, 2004e, "컨테이너선의 선수 플레어 대부재에 대한 단순 손상해석", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집.  
 김용직, 허주호, 서용석, 하태범, 김희수, 신기석, 하영록, 추교덕, 박경원, 김대웅, 권승민, 이춘기, 김문성, 김대현, 도형민, 김도형, 이현호, 문중수, 2004f, Green Water에 의한 선수부 충격하중 평가법의 개발, 부경대학교, 대우조선해양(주), 삼성중공업(주), (사)한국선급, 현대중공업(주) 공동연구 보고서.  
 김희수, 한용연, 이현호, 문중수, 김용직, 신기석, 하영록, 추교덕, 하태범, 김대현, 도형민, 2004, "4800 TEU 컨테이너선의 선수갑판 Green Water 충격에 의한 구조 동적응답 해석", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집.  
 배광준, 홍도천, 홍석원, 염덕준, 박인규, 1992, "S-175 컨테이너 모형선의 갑판침수현상에 대한 공동조사연구", 대한조선학회지, 제29권, 제1호.  
 서용석, 이춘기, 김문성, 김용직, 신기석, 하영록, 추교덕, 하태범, 김대현, 도형민, 2004, "940K bbls FPSO의 선수갑판 Green Water 충격에 의한 구조 동적응답 해석", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집.  
 신찬호, 김용직, 강점문, 김만수, 김성찬, 오수관, 임채환, 김대현, 신기석, 장영희, 이춘기, 박익현, 김도형, 송기종, 2001, 선수 플레어 구조강도 평가기법 개발, (사)한국선급, 부경대학교, 대우조선공업(주), (주)삼성중공업, 한국기계연구원, (주)한진중공업, (주)현대중공업 공동연구 보고서.  
 임채환, 김용직, 김만수, 서용석, 신찬호, 유병석, 김희수, 신기석, 하영록, 추교덕, 김대웅, 유해근, 최용호, 이춘기, 도형민,



- 김영남, 경우진, 김도형, 정병훈, 2003, 선수 플래어 구조강도 평가기법 개발(2), 한국기계연구원, 부경대학교, 대우조선해양(주), 삼성중공업(주), (사)한국선급, (주)한진중공업, 현대중공업(주) 공동연구 보고서.
- 허주호, 박경원, 김대웅, 권승민, 김용직, 신기석, 하영록, 추고덕, 하태범, 김대현, 도형민, 2004, "300K VLCC의 선수갑판 Green Water 충격에 의한 구조 동적응답 해석", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집.
- 홍사영, 이관목, 공도식, 1990, "콘테이너선의 불규칙파중 갑판 침수에 관한 실험적 고찰", 대한조선학회지, 제27권, 제2호.
- 황종홍, 김용직, 김진영, 오일근, 1985, "비선형성을 고려한 규칙 파중 선체응답에 관한 연구", 대한조선학회지, 제22권 제3호.
- Faulkner, D., 2002, "An Analytical Assessment of the Sinking of M.V. Derbyshire", SOTTECH, Vol. 6, No. 4, pp. 12-76.
- Fekken, G., Veldman, A.E.P. and Buchner, B., 1999, "Simulation of Green Water Loading Using the Navier-Stokes Equations", Proc. of 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes.
- Hagiwara, K. and Yuhara, T., 1974, "Fundamental Study of Wave Impact Loads on a Ship Bow (2nd Report) - Equivalent Static Pressure of Impact to Structural Response of a Rectangular Plate Panel", J. SNAJ, Vol. 136.
- Lin, W.M., Newman, J.N. and Yue, D.K., 1984, "Nonlinear Forced Motions of Floating Bodies", Proc. 15th ONR Symp. on Naval Hydrodyn.
- Lloyd, A.R.J.M., Salsich, J.O. and Zselezky, J.J., 1986, "The Effect of Bow Shape on Deck Wetness in Head Seas", T.RINA, Vol.128.
- Mitsui Shipbuilding & Engineering Co., Ltd., 1975, "A Computer Program for Theoretical Calculation of Sea-Keeping Quality of Ships", Japan Shipbuilding & Marine Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 5-31.
- Mizoguchi, S., 1988, "Analysis of Shipping Water with the Experiments and the Numerical Calculations", J.SNAJ, Vol.163.
- Ochi, M.K. and Motter, L.E., 1971, "A Method to Estimate Slamming Characteristics for Ship Design", Marine Technology, Vol.8, No.2.
- Ochi, M.K., 1964, "Extreme Behavior of a Ship in Rough Seas - Slamming and Shipping of Green Water", SNAME Trans., Vol.72.
- O' Dea, J.F. and Walden, D.A., 1984, "The Effect of Bow Shape and Nonlinearities on the Prediction of Large Amplitude Motions and Deckwetness", Proc. 15th Symp. Naval Hydrodyn., Hamburg.
- Ogawa, Y., Ishida, S. and Taguchi, H., 2000, "A Prediction Method for Horizontal Impact Pressure on Deck Structures due to Shipping Water", J.SNAJ, Vol.187.
- Ogawa, Y., Taguchi, H. and Ishida, S., 1997, "Experimental Study on Shipping Water Volume and its Load on Deck", J.SNAJ, Vol.182.
- SNAME Panel HS-2, 1993, "Notes on Ship Slamming", Technical and Research Bulletin 2-30.
- Society of Naval Architects of West Japan (Technical Committee), 1974, Investigation of Ship Structural Damage (4), Report No. 16 (in Japanese).
- Society of Naval Architects of West Japan (Technical Committee), 1987, Investigation of Ship Structural Damage (5), Report No. 18 (in Japanese).
- Stavovy, A.B. and Chuang, S.L., 1976, "Analytic Determination of Slamming Pressure for High-Speed Vehicles in Waves", JSR, Vol.20, No.4.
- Stoker, J. J., 1957, Water Waves, Interscience Publishers, INC., New York.
- Suhara, T., 1976, "Bow Flare Damages of Large Full Ships due to Wave Impact", ISP, Vol.23, No.261.
- Szebehely, V.G., 1952, "Hydrodynamics of Slamming of Ships", DTMB Rep.823.
- Takagi, K. and Niimi, A., 1990, "A Theoretical Approach to Bow Deck Wetness of a High-Speed Ship", JSR, Vol.34, No.3.
- Takezawa, S., Kobayashi, K. and Sawada, K., 1977, "On the Deck Wetness and Impulsive Water Pressure Acting on the Deck in Head Seas", J.SNAJ, Vol.142.
- Tasaki, R., 1961, "On Shipping Water", Monthly Report of Transportation Technical Research Institute, Vol. 11, No. 8, pp. 1-32.
- Wagner, H., 1931, "Landing of Sea Planes", NACA TN 622.
- Zhao, R. and Falinsen, O., 1992, "Slamming Loads on High-Speed Vessels", Proc. 19th ONR Symp. on Naval Hydrodyn.
- Zhao, R. and Falinsen, O., 1993, "Water Entry of Two-Dimensional Bodies", J.F.M., Vol.246. ↴

김 용 직 | 부경대학교 조선해양시스템공학과



- 1957년생
- 현 재: 부경대학교 조선해양시스템공학과 정교수
- 관심분야: 내항성능, 피랑하중, 슬래밍, Green Water
- 연 락 처: 051-620-6483
- E-mail : yjkim@pknu.ac.kr