

## 선체구조의 좌굴·최종강도에 관한 연구동향



백 점 기\*

### 1. 서 언

선체구조, 교량은 대표적인 상자형 박판구조물로서 기본적으로 판, 보강판, 거더등의 구조부재로 구성되어 있다. 선체구조에 작용하는 외력의 크기가 설계하중보다 작으면 일반적으로 부분적인 소성화를 제외하고는 구성부재에 좌굴 또는 붕괴가 발생하는 일은 거의 없다. 그러나, 선박은 운항중에 각종 불확실한 상황에 놓일 가능성이 있으며, 그 결과 설계하중보다 큰 외력이 작용하거나 작용외력은 설계하중보다 작더라도 잔류강도가 설계기준치보다 작아질 가능성이 있다.

이 경우 구성부재는 국부적으로 좌굴 및 소성붕괴하게 된다. 이를테면 화물의 적재방법(순서)이나 적재량에 관한 실수, 격심한 파랑중에서의 운항회피의 실패 등에 의해 선체구조에는 설계하중보다 큰 외력이 작용할 가능성이 있다. 또한, 노후 선박의 경우 부식이나 피로균열 등에 의한 구조손상으로 말미암아 잔류강도가 저하하거나 충돌이나 좌초와 같은 돌발적인 재난사고에 의해 선체구조가 부분적으로 손상을 받으면 잔류강도가 저

하하여 설계하중보다 작은 외력이 작용하더라도 선체구조는 좌굴 붕괴할 가능성이 있다.

해양구조물을 비롯한 골조구조물에 비해 판구조물은 보다 고차의 부정정구조물로서 구성부재가 국부적으로 좌굴 붕괴하더라도 구조전체적인 붕괴에 까지 곧바로 연결될 가능성은 일반적으로 많지 않다고 알려져 왔다. 그러나, 일단 구성부재가 좌굴 붕괴하고 나면 국부적으로 구조강성이 저하하고, 그 결과 주변의 타 구조부재가 받는 하중분담이 증가함으로써 연쇄적으로 구성부재가 소성붕괴하여 결국에는 구조전체적으로 붕괴할 위험성이 있다. 특히 노후된 구조물의 경우 부식이나 피로균열에 의해 잔류강도가 저하한 상태에서 과대한 외력이 작용하면 구조전체적으로 붕괴할 위험성이 더욱 높아진다. 또한, 최근에 널리 사용되고 있는 고장력강 박판재로 구성된 판구조물의 경우 연강재에 비해 높은 인장강도 특성치만을 고려하고, 좌굴 붕괴의 가능성을 소홀히 하여 설계를 수행하면 구성부재의 좌굴 붕괴에 의해 구조전체적으로 붕괴할 가능성이 있으므로 주의를 요한다.

\* 정회원·부산대학교 조선해양공학과, 교수

지금까지 일반 강구조물의 설계는 주로 탄성설계개념을 적용하여 수행하여 왔다. 탄성설계는 재료의 허용응력 (일반적으로 허용응력=항복강도 / 안전률)을 기준으로 수행하는 것으로서 구조물 전체가 탄성법칙을 따른다고 가정하여 작용외력에 대한 구조물의 응력분포를 계산하고, 그 최대응력이 사전에 설정된 허용응력과 동일하게 될 때의 하중을 그 구조물의 최대 안전하중으로 평가하는 개념이다.

지금까지 수많은 강구조물이 이 탄성설계 개념을 적용하여 설계되어 왔으며, 실제로 훌륭한 설계실적을 가지고 있다. 그러나, 작용응력이 허용응력이하가 되도록 하는 방법에는 이 방법만이 유일한 것은 아니다. 또한, 실제구조물에서는 탄성설계법의 기초가 되는 허용응력의 개념이 지켜지지 않는 경우가 많다. 예를들어 강구조물의 건조에 사용되는 형강에는 잔류응력이 필연적으로 존재하고 있으며, 용접·절단 등의 열가공을 통하여 건조되는 구조물의 열영향부 근방에는 재료의 항복응력정도의 인장잔류응력이 존재하고 있으므로 탄성설계상의 응력이 허용응력 이하일지라도 실제응력은 허용응력보다 클 가능성이 있다<sup>1)~3)</sup>.

또한, 실제 구조물의 가동중에는 설계하중과 다른 외하중을 받을수도 있고, 복잡한 구조에 대하여는 설계계산을 위한 단순화에 의해 계산된 응력과 실제응력의 분포가 다를 수도 있다. 이외에도 조립 건조시에 발생하는 초기결함 때문에 설계 허용응력의 개념이 실제로 지켜지지 못하는 경우가 많다.

이같은 문제점에도 불구하고 탄성설계법에 의해 건조된 구조물이 안전성을 유지하는 이유는 재료로서 사용하고 있는 구조용강의 특성중의 하나인 연성 때문이다. 즉, 부재가 국부적으로 항복 하더라도 재료의 연성에 의해 바로 파괴하지 않고 그 부분이 소성변형하여 더 이상의 하중은 주변의 응력이 낮은 부재에 재분배되기 때문에 구조물의 안전성이 유지되는 것이다.

탄성설계법의 또 다른 문제점중의 하나는 이 방법으로는 구조물의 진정한 안전성 수준을 평가하기 어렵다는 것이다. 실제 구조물을 구성하는

부재는 외하중의 증가와 함께 인장에 의해 소성항복하고 압축에 의해 좌굴하면서 이들 파괴의 상호간섭에 의해 복잡한 거동을 보이면서 구조강성이 저하하여 구조 전체적으로 최종한계상태에 이르게 된다.

따라서, 구조물의 안전성을 합리적으로 확보하고 균일한 안전성을 얻기 위하여는 좌굴과 소성항복을 고려한 최종강도를 기준으로 설계를 수행할 필요가 있다. 이같은 측면에서 부정정도 (redundancy)가 상대적으로 낮은 골조 해양구조물의 경우는 오래전부터 최종강도를 중요한 설계기준으로 설정하고 있다.

이와 함께 최근에 선체구조도 최종강도를 기준으로 한 설계의 필요성이 널리 인식되고 있으며, 각국 선급협회에서도 최종강도를 기준으로한 선체구조설계지침의 개발에 박차를 가하고 있다.

지금까지 이 문제에 대하여 많은 연구성과가 보고되어 왔으며, 이들 중에는 구성부재의 좌굴 및 최종강도 계산법의 개발과 선체구조의 최종붕괴거동을 상세하게 해석하기 위한 해석수법의 개발 및 초기구조설계 단계에서 최종붕괴강도를 간단하게 추정하기 위한 간이계산식의 도출에 관한 연구등이 있다<sup>4)~5)</sup>. 이들 문제는 기본적으로 대변형에 기인된 기하학적 비선형성과 재료 항복에 의한 재료적 비선형성을 모두 고려하여 다룰 필요가 있다.

본 고에서는 선체구조의 좌굴 및 최종강도에 관한 연구현황을 조사 분석하고자 한다. 먼저 대표적인 구성부재인 판 및 보강판의 좌굴 최종강도에 관한 연구현황을 분석하고, 다음으로 선각거더의 최종붕괴강도에 관한 연구동향을 분석하고자 한다.

## 2. 판 및 보강판의 좌굴 최종강도

여기서는 대표적인 선체 구조부재인 판 및 보강판의 좌굴 최종강도에 관한 연구동향을 분석한다.

지금까지 판 및 보강판부재의 좌굴 및 최종강도 문제에 대해서는 방대한 연구가 수행되어 왔

다. 기하학적 및 재료적 비선형성을 고려한 판부재의 비선형거동은 유한요소법을 비롯한 수치해석법을 적용하면 상세히 해석할 수 있으며, 현재 이를 위한 각종 범용 유한요소해석 프로그램도 개발되어 있다<sup>6), 7)</sup>.

그러나, 유한요소해석에는 보통 방대한 계산시간이 소요되므로 초기 구조설계단계에서 유한요소법을 직접 적용하는 것은 실용적인 측면에서 효율적이지 못한 경우가 많다. 이 문제에 대한 대책은 명시적인 형태의 간이 계산식을 개발하여 구조설계시에 이용하는 것이며, 이를 위해 이론해석적 수치적 및 실험적 방법이 동원되고 있다.

이하에서는 판 및 보강판의 좌굴 최종강도에 관한 연구현황을 조사한다.

## 2.1 판

일반적으로 판의 거동은 초기결합의 존재여부에 따라 달라진다. 초기처짐을 가진 판의 경우 압축력이 작용할 때 명확한 좌굴현상을 보이지 않고 하중의 초기단계에서부터 처짐이 서서히 증가하여 면내강성이 저하한다. 좌굴은 크게 탄성좌굴과 탄소성좌굴로 분류할 수 있으며, 전자는 재료의 탄성범위내에서 좌굴이 발생하는 것이고, 후자는 부분적으로 소성화가 진전된후에 좌굴이 발생하는 경우를 말한다.

판의 기동과는 달리 탄성좌굴이 발생하더라도 처짐의 증가에 대항하는 인장막력의 발생으로 인하여 바로 붕괴하지 않고 좌굴후에도 외력의 증가에 견딘다. 이에 비해 탄소성좌굴이 발생하면 보통 곧바로 붕괴에 이르게 된다. 탄성좌굴이 발생한 후에도 외력의 증가와 함께 부재내부에 큰 응력이 발생하는 부위에서 소성화가 발생하고, 이것이 확산됨에 따라 강성이 급격히 저하하여 붕괴에 이르게 된다.

단일 하중성분을 받는 판의 탄성좌굴강도 계산 문제는 극히 복잡한 경계조건을 가진 경우를 제외하고는 대부분 해결되어 있다고 볼수 있다<sup>8), 9)</sup>.

그러나, 실제 판부재는 주변의 부재와 접속해 있으며, 그 결과 판의 경계조건은 단순지나 고정과 같은 이상적인 상태가 아니고, 주변부재

에 의한 회전구속과 비틀림효과에 의해 부재거동이 큰 영향을 받으며, 이 효과를 고려하여 강도를 평가할 필요가 있다<sup>10)</sup>.

Williams<sup>11)</sup>는 판의 거동에 미치는 보강재의 비틀림강성의 효과를 이론적인 방법으로 분석하였다. 최근에 Paik 등<sup>12)</sup>은 주변 보강재의 회전구속 효과를 고려한 판부재의 탄성좌굴 조건식을 이론해석적인 방법으로 도출하였으며, 이 방법을 적용한 시리즈 해석결과를 바탕으로 판부재의 압축좌굴강도 간이 계산식을 도출한 바 있다.

판구조물을 구성하는 판부재는 일반적으로 조합하중을 받으며, 이 경우 판의 좌굴강도는 조합하중 작용의 영향을 고려한 좌굴강도 상관관계식을 이용하여 평가하여야 한다. 해양구조물을 구성하는 각종 구조부재의 좌굴강도 상관관계식은 참고문헌<sup>13)</sup>에서 소개하고 있다.

Mansour<sup>14)</sup>는 면내하중과 횡하중의 조합하중을 받는 판부재의 좌굴강도 설계도표를 제시하였으며, 上田等<sup>15)</sup>은 5가지의 면내하중성분, 즉 2축방향 압축력, 2축방향 면내굽힘모멘트 및 전단력의 조합하중을 받는 판의 탄성좌굴강도 상관관계식을 도출한바 있다. 또한, Paik<sup>16)</sup>등은 2축방향압축력과 전단력의 3가지 면내하중성분이외에 횡압력을 동시에 받는 판의 탄성좌굴강도 상관관계식을 도출하였으며, 이들<sup>17)</sup>은 용접잔류응력이 판의 좌굴강도에 미치는 영향을 분석하고, 용접잔류응력의 효과를 고려하여 3가지 하중성분, 즉 2축방향 압축력 및 전단력의 조합하중을 받는 판부재의 탄성좌굴강도 상관관계식도 도출한 바 있다. 판의 좌굴강도에 미치는 잔류응력의 영향에 관하여는 참고문헌<sup>1)~3)</sup>에서도 상세히 다루고 있다.

실용적으로 판의 탄소성좌굴강도는 탄성좌굴강도를 소성수정하여 계산하고 있으며, 이를위해 보통 Bleich-Ostenfeld 소성수정식을 이용하고 있다. 그런데, Bleich-Ostenfeld 소성수정식은 초기항복상태를 기준으로 한 접선강성계수법<sup>8)</sup>을 적용하여 도출된 것으로서 좌굴강도를 실제보다 과소평가하는 경향이 있다. 이 문제에 대해 Paik 등<sup>17)</sup>은 탄소성대변형 유한요소 시리즈해석결과를 바탕으로 새로운 소성수정식을 도출하고 그 정도

와 유용성을 검토한 바 있다.

판의 붕괴에 관한 연구에서는 유효폭 (effective width)의 개념<sup>18)~20)</sup>이 널리 사용되고 있다.

즉, 좌굴후 판의 면내강성 저하를 유효폭의 개념을 적용하여 평가하고, 막응력성분이 붕괴조건을 만족하면 판이 최종강도에 도달한다고 가정하여 최종강도 계산식을 도출하는 것이다. 참고로 독자들은 "Effective width"와 "Effective breadth"는 서로 다른 개념을 가지고 있다는 점에 주의할 요한다. 즉, 전자는 면내압축력에 의해 좌굴이 발생한 후 막응력분포가 비선형적으로 변화함으로써 면내강성이 저하하게 되는 경우에 유효면내강성을 평가하고자 할 때 사용되는 것이며, 후자는 면외굽힘모멘트 또는 횡하중의 작용으로 판에 처짐이 발생한후의 유효면내강성을 평가하고자 할 때 사용되는 개념이다.

이와 함께 좌굴후 판의 유효폭의 평가에 관한 연구가 다수 수행되어 왔다. 특히 선체구조를 구성하는 판부재는 각종 조합하중을 받을수 있으며, 유효폭도 이들 조합하중의 효과를 고려하여 평가할 필요가 있다. 조합하중을 받는 판의 유효폭에 관한 연구로는 上田<sup>21)</sup>, 白<sup>22)</sup>, Usami<sup>23)</sup>의 연구가 있다. 유효폭의 개념은 압축력의 작용에 대한 판의 면내강성을 평가하기 위한 것인데 비해 전단력의 작용에 의해 좌굴한 판의 유효강성을 평가하기 위한 유효전단강성률 (Effective shear modulus)의 개념이 Paik<sup>24)</sup>에 의해 제안된 바 있으며, 이 개념은 Plate girder와 같이 전단력을 지배적으로 받는 부재의 좌굴후 거동을 해석할 때 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

조합하중을 받는 판의 최종강도 상관관계식의 개발에 관한 연구로는 1축압축과 1축인장력을 받는 경우<sup>25)</sup>, 2축압축력을 받는 경우<sup>22)~26)</sup>, 압축과 전단을 받는 경우<sup>27)~29)</sup>, 면내하중과 횡압력을 받는 경우<sup>30), 31)</sup>가 있다. 특히 최근에 藤久保<sup>32)</sup>은 2축압축력과 전단력의 조합하중을 받는 판의 좌굴 및 최종강도를 초기처짐의 영향을 고려하여 탄소성대변형 유한요소법을 적용하여 분석하고, 그 결과를 바탕으로 간이 설계식을 도출하였다.

또한, 山本<sup>33)</sup>은 TMCP강을 더욱 발전시킨

강판, 즉 표층부의 조직입자를 극소화시킨 새로운 SUF (Surface layers of Ultra Fine grain microstructure) 강판의 좌굴 및 최종강도 특성을 탄소성대변형 유한요소법과 모형실험을 통하여 분석하였다.

선체구조를 비롯한 강구조물은 용접 절단등의 열가공을 통하여 건조하게 되며, 그 결과 구조부재에는 초기변형과 잔류응력의 초기결함이 필연적으로 발생하고, 이들은 판부재의 강도에 큰 영향을 미친다<sup>1~3, 34)</sup>. 따라서, 판의 강도는 반드시 초기결함의 영향을 고려하여 평가하는 것이 극히 중요하다. 이 같은 측면에서 판의 최종강도에 대한 초기결함의 영향을 분석하고, 초기결함의 영향을 고려한 최종강도 계산식의 개발에 관한 연구가 다수 수행되어 왔다. 초기결함의 영향을 고려하여 1축압축력을 받는 판의 최종강도를 분석한 연구의 예로는 Dwight & Moxham<sup>35)</sup>, Smith<sup>36)</sup>, Little<sup>37)</sup>, 上田<sup>38)</sup>, Guedes Spares & Kmiecik<sup>39)</sup>, Paik & Pedersen<sup>40), 41)</sup>을 들수 있다.

한편, 판의 붕괴에 대한 모형실험도 다수 수행되어져 왔으며, 이를테면 판의 최종강도에 미치는 초기처짐과 잔류응력의 영향을 분석하기 위해 仁保<sup>42)</sup>, 矢尾<sup>43)</sup>, 北田<sup>44)</sup>등이 구조모형에 대한 붕괴 시리즈실험을 수행한바 있다.

지금까지 수행되어온 방대한 연구를 통하여 판의 좌굴최종강도 거동특성은 상당한 수준까지 규명되었다고 볼수 있으나, 더욱 연구가 필요한 과제의 예로는 다음을 들수 있다.

- 1) 판의 좌굴강도에 대한 주변요소의 회전구속과 비틀림효과 규명
- 2) 조합하중을 받는 판의 좌굴후 거동 및 붕괴와 이에 미치는 초기결함의 영향규명
- 3) 면내조합하중을 받는 판의 좌굴 및 붕괴강도에 대한 횡압력의 효과 규명
- 4) 부분적인 구조손상을 가진 판의 좌굴 및 최종강도 특성규명

## 2.2 보강판

이론적으로 보강판의 파괴형식은 다음의 5가

지로 분류할수 있다<sup>36)</sup>. 즉,

- 1) 전체좌굴후 전체붕괴
- 2) 보강재간의 국부좌굴후 판재의 항복에 의한 전체붕괴
- 3) 보강재간의 국부좌굴후 보강재의 항복에 의한 전체붕괴
- 4) 보강재의 비틀림좌굴 (트리핑)
- 5) 전단면항복

이들 중에서 실제구조물의 보강판에 주로 발생하는 붕괴모드는 2), 3) 및 4)이다. 전술한 탄소성대변형 유한요소법을 적용하면 이들 파괴모드에 대한 보강판의 좌굴 최종강도를 해석할수 있다. 그러나, 일반적으로 이들 파괴모드를 모두 고려하여 보강판의 좌굴 및 최종강도를 계산하는 것은 용이한 일이 아니다. 왜냐하면 판부재와 마찬가지로 보강판의 붕괴는 기하학적 및 재료적 특성, 초기결함, 경계조건, 하중조건 및 이들의 상관효과의 영향을 받기 때문이다. 실제로 지금까지 보강판의 붕괴강도 해석법이 다수 제안되어져 왔으며, 이들 계산법에 대한 비교 검토작업 (benchmark study)이 Das & Garside<sup>45)</sup>, Hughes등<sup>46)</sup>, Rigo등<sup>47)</sup>, Paik<sup>48)</sup>에 의해 수행된 바 있으나, 각 해석법은 서로 상이한 해석결과를 주고 있다는 것이 밝혀진 바 있다. 이것은 아직도 보강판의 붕괴강도 해석문제에 대한 어려움이 많이 남아 있다는 것을 의미한다고 하겠다.

보강판의 붕괴거동을 해석하는 방법에는 탄소성대변형 유한요소법을 비롯한 수치적방법과 구조모형에 대한 붕괴실험이외에 이론해석적 방법이 있으며, 이론해석적 방법은 크게 다음의 3가지로 분류할수 있다<sup>49)</sup>.

- 1) 보-기둥요소법(Beam-column approach 또는 strut approach)
- 2) 직교이방성판요소법(Orthotropic plate approach)
- 3) 이산화판요소법 (Discretely stiffened plate approach)

보-기둥요소법은 일반적으로 보강판이 동일한 보강재가 동일간격으로 배치되어 있다는 점을 감안하여 보강판전체의 거동을 보강재간의 판재의 유효폭 부분과 보강재로 구성되는 등가기둥으로 대표시키는 방법이다. 이 방법은 비하중변의 경계조건을 엄밀하게 고려할 수 없는 결점이 있다. 직교이방성 판요소법은 보강재를 보강판 전체에 걸쳐 평균적으로 분포시켜 등가한 균일판두께를 가진 비보강 직교이방성판으로 치환하는 방법이다. 이 방법은 보강재간의 판재의 국부좌굴과 같은 거동을 평가할 수 없는 결점이 있다. 이산화판요소법은 보강판을 보강재간의 판재와 보강재의 집합체로 모델링하는 것으로서 가장 실제에 가깝게 모델링하는 방법이나 이론 해석적인 취급에 다소 어려움이 있다. 이들 방법중에서 지금까지 보-기둥요소법이 가장 널리 사용되어 왔으며, 연구성과도 이 방법에 관한 것이 가장 많다. 이들 연구성과는 참고문헌<sup>45)~48)</sup>에서 요약하여 소개하고 있다.

최근에는 보강재의 비틀림에 의한 붕괴에 관한 연구도 수행되고 있다. 보강재에 국부적인 트리핑이 발생하면 보강재가 더 이상 세기능을 발휘할 수 없고, 그 결과 보강판은 전체적으로 붕괴하게 되므로 보강재의 비틀림붕괴모드에 대한 검토는 극히 중요하다. Bleich<sup>8)</sup>, Timoshenko & Gere<sup>9)</sup>는 비틀림과 굽힘모멘트를 받는 보강재의 불안정성을 규명하기 위하여 지배미분방정식을 제시하고, 각종 하중조건과 경계조건에 대한 해를 도출하였으며, Faulkner<sup>50)</sup>는 보강판의 트리핑 현상에 대한 상세한 검토를 행한바 있다.

Caridis<sup>51)</sup>와 Panagiotopoulos<sup>52)</sup>는 탄소성대변형 유한요소법을 적용하여 보강판의 붕괴시 굽힘 및 비틀림좌굴의 상관효과를 고찰하였으며, 矢尾 등<sup>53)</sup>도 탄소성대변형 유한요소법을 적용하여 보강재의 비틀림효과를 고려한 보강판의 붕괴강도 거동을 상세히 분석하였다. 최근에 Shanmugam & Arockiasamy<sup>54)</sup>, Paik등<sup>55)</sup>은 압축력을 받는 보강재웨브의 국부 좌굴강도를 특성치문제로서 계산하였다. 이때 경계조건으로서는 판재와 보강

재의 집합선을 따라 상호 비틀림강성에 의존하는 탄성구속상태로 가정하였다.

Mikami & Niwa<sup>56)</sup>는 2축방향으로 보강재를 가진 보강판의 압축최종강도를 이론적으로 계산하였으며, 조합하중을 받는 보강판의 붕괴에 관하여는 Kondo<sup>57)</sup>, Ueda 등<sup>58)</sup>의 연구가 있다.

한편, 보강판의 붕괴강도 실험도 다수 수행되어 왔으며, Horne 등<sup>59), 60)</sup>, Faulkner<sup>61)</sup>, 仁保<sup>42)</sup>, 矢尾<sup>43)</sup>, 田中 등<sup>62)</sup>, Ghavami<sup>63)</sup>, 白 등<sup>64)</sup>의 붕괴실험연구가 있다.

보강판의 붕괴강도에 관하여 앞으로 더 많은 연구가 수행되어야 할 과제의 예를 열거하면 다음과 같다.

- 1) 발생가능한 모든 붕괴모드를 고려한 보강판의 붕괴강도 평가
- 2) 보강재의 트리핑거동의 규명
- 3) 면내 및 면외 조합하중을 받는 보강판의 좌굴 및 최종강도 특성 규명
- 4) 보강판의 붕괴강도에 대한 초기결합의 영향 규명

### 3. 선각거더의 최종붕괴강도

선체구조는 일종의 상자형 거더로서 종굽힘모멘트의 작용에 대한 붕괴강도의 평가는 교량의 설계에서와 마찬가지로 극히 중요하다. 여기서는 선각거더의 붕괴강도 해석에 관한 연구를 크게 수치적연구, 실험적 연구 및 이론해석적 연구로 나누어 조사한다.

#### 3.1 수치적 연구

유한 요소법은 구조물의 비선형거동 해석을 위한 강력한 수법중의 하나이기 때문에 좌굴과 소성붕괴 등의 비선형거동을 고려한 선체구조의 최종강도를 해석함에 있어서도 유한요소법의 적용에 관해 당연히 고려해 볼 가치가 있을 것이다.

실제로 Chen 등<sup>65)</sup>, Kutt 등<sup>66)</sup>, Valsgaard & Steen<sup>67)</sup>은 탄소성대변형 유한요소법을 적용하여 수직종굽힘모멘트를 받는 선각거더의 최종붕괴

거동을 해석한바 있다. 그러나, 이들은 컴퓨터 기억용량과 계산시간의 제약 때문에 요소분할을 매우 크게 하였으며, 보다 높은 정도의 해석결과를 얻기 위하여는 요소분할을 더욱 작게 해야함을 지적하였다. 그러나, 컴퓨터의 성능이 급속도로 향상되고 있는 현시점에서도 선각거더와 같은 대형의 복잡한 구조물의 최종붕괴강도해석에 탄소성대변형 유한요소법을 적용하는 것은 현실적으로 실행하기가 극히 어려운 실정이다. 이같은 측면에서 컴퓨터의 실용화가 이루어지기 이전에는 물론이러니와 그 이후에도 대부분의 연구는 간이수치해석 또는 이론계산수법의 개발에 집중되고 있다.

Smith<sup>68)</sup>는 선각의 횡단면을 판-보강재로 조합된 보-기둥요소의 집합체로 모델링하고, 압축력과 인장력의 증가에 따른 보-기둥요소의 응력-변형률관계를 사전에 구축하여 두고, 선각거더 전체의 굽힘강도를 외하중의 증가에 따라 얻어지는 응력 또는 변형률상태에서 각 요소의 기여분을 적분하여 계산하였다.

Smith는 탄소성대변형 유한요소해석법에 의해 축압축력하의 보-기둥요소의 응력-변형률관계를 계산하였으나, 그 후 Yao & Nikolov<sup>69)</sup>는 해석적인 수법을 적용하여 응력-변형률관계식을 명시적인 형태로 도출함으로써 계산이 더욱 편리하도록 하였다.

Smith의 방법은 그 후 Billingsley<sup>70)</sup>, Dow 등<sup>71)</sup>, Adamchak<sup>72)</sup>, Rutherford & Caldwell<sup>73)</sup>, Gordo 등<sup>74)</sup>, Rahman & Chowdhury<sup>75)</sup>에 의해 수직종굽힘모멘트를 받는 실제 선박의 붕괴강도 해석문제에 적용되어 그 유용성이 잘 알려져 있다<sup>74)</sup>.

Hansen<sup>76)</sup>은 Smith의 방법을 적용하여 굽힘과 전단을 받는 선각거더의 최종강도를 해석한바 있으며, Gordo & Guedes Soares<sup>77)</sup>, Yao & Nikolov<sup>78)</sup>는 수직 및 수평굽힘모멘트를 받는 선각거더의 최종강도를 해석한바 있다.

Ueda 등<sup>79), 80)</sup>은 이상화구조요소법 (ISUM: Idealized Structural Unit Method)을 제안하였다.

이 방법에서는 먼저 선체구조를 판요소, 보강판요소, 보-기둥요소 등 크기가 매우 큰 기본구

성부재로 모델링한다.

사전에 이들 각요소의 비선형거동을 하중조건과 경계조건하에서 이론해석, 수치해석 또는 실험결과를 바탕으로 이상화시킨 이상화구조요소(idealized structural unit)를 개발한다. 실제해석에서는 일반적인 유한요소법에서와 같이 대상구조를 각 이상화구조요소의 집합체로 생각하여 다룬다. 구조응답은 기하학적, 재료적 비선형성을 나타내므로 하중중분 또는 변위중분법을 채용한다. 적절한 이상화구조요소를 개발하면 순수굽힘뿐만 아니라 전단, 수압, 비틀림 등의 각종 조합하중을 받는 선각거더의 최종붕괴거동을 해석할 수 있으며, 지금까지 개발된 이상화구조요소들은 이들의 영향을 고려하고 있다.

Bendiksen<sup>81)</sup>, Bai 등<sup>82)</sup>도 이상화구조요소법을 적용하여 보요소, 1축 압축/인장력하의 판요소, 순수전단 하중하의 전단요소, 스프링요소 등을 개발하였다. 최근에 Paik<sup>83)</sup>은 과도한 인장력의 작용에 의해 판재가 파단할 가능성이 있음을 보이고, 이 효과를 고려하여 이상화판요소를 개선한 바 있다.

수직굽힘모멘트를 받는 선각거더의 최종강도 해석문제에 이상화구조요소법을 적용시킨 예로는 이외에도 Hori 등<sup>84)</sup>, Paik<sup>85)</sup>, Paik 등<sup>86)</sup>이 있다.

또한, Paik<sup>87)</sup>은 이상화구조요소법을 적용하여 노후 살물운반선이 굽힘과 전단력의 조합하중을 받을때의 붕괴강도를 해석하였으며, Mansour 등<sup>88)</sup> 등 수직 및 수평굽힘모멘트를 받는 선각거더의 최종강도를 이상화구조요소법을 적용하여 해석하였다. 특히 최근에 Paik 등<sup>89)</sup>은 수직 및 수평굽힘모멘트와 전단력의 조합하중을 받을때의 선각거더의 최종강도를 이상화구조요소법을 적용하여 해석한 바 있다.

구조손상을 가진 선각거더의 최종강도를 이론적으로 계산하기 위한 연구로는 Maestro & Marino<sup>90)</sup>의 연구가 있다.

지금까지의 연구를 통하여 수직굽힘모멘트를 받는 선각거더의 붕괴거동 특성은 어느정도 규명되었다고 볼 수 있으나 앞으로 더욱 연구가 필요한 과제의 예를 들면 다음과 같다.

- 1) 선각거더의 붕괴거동에 대한 초기결합의 영향규명
- 2) 굽힘모멘트를 받는 선각거더의 붕괴거동에 대한 횡압력의 효과규명
- 3) 조합하중을 받을때의 선각거더의 붕괴강도 특성규명

### 3.2 실험적연구

실험적 연구로서는 상자형 거더를 대상으로한 붕괴강도 실험이 다수 수행되어 왔다. 상자형거더를 대상으로한 대표적인 연구로는 Dowling 등<sup>91)</sup>,<sup>92)</sup>, Nishihara<sup>93)</sup>, Ostapenko<sup>94)</sup>가 있다. Mansour 등<sup>95)</sup>은 대형 선각거더모형을 대상으로 붕괴강도실험을 수행한 바 있으며, Dow<sup>96)</sup>은 구축함에 대한 1/3 축척모형을 대상으로한 붕괴강도실험을 수행하였다.

선각거더의 붕괴거동특성은 극히 복잡하고, 물리적인 현상을 정량적으로 규명하기 위해서는 보다 대형의 구조모형을 이용한 붕괴실험이 더욱 필요한 실정이다.

### 3.3 이론해석적연구

좌굴과 소성의 영향을 고려하여 선각거더의 최종강도를 이론적으로 해석하고자 하는 시도는 Caldwell<sup>97)</sup>에 의해 처음으로 이루어 졌다. 그는 수직굽힘모멘트를 받는 선각거더가 최종강도에 도달했을때의 횡단면내 응력분포를 적절히 가정하여 선각거더의 최종강도 계산식을 명시적인 형태로 도출하였다. Caldwell은 최종강도상태에서의 횡단면내 응력분포로서 압축을 받는 부분은 전단면 좌굴붕괴하고, 인장을 받는 부분은 전단면 소성항복한다고 가정하였다. Caldwell의 계산식은 선각거더의 최종강도를 전반적으로 과대평가하는 경향이 있다. 이것은 선각이 최종강도에 도달한 후에서도 중립축 근방의 선축구조는 보통 선형탄성상태에 놓여있기 때문이다.

Caldwell의 연구이후에 수직굽힘모멘트를 받는 선각거더의 최종강도를 이론해석적으로 계산하기 위한 연구가 다수 되어졌으나, 대부분의 연구

는<sup>98~100)</sup> 선각거더가 최종강도에 이르기 직전까지 선형탄성적으로 거동한다고 가정하였으며, 그 결과 구성부재의 좌굴과 소성항복효과를 정밀하게 고려하지 못하였기 때문에 해석결과의 정도는 그다지 좋지 못하였다. Frieze & Lin<sup>101)</sup>은 상자형 거더에 대한 최종굽힘모멘트 실험결과를 바탕으로 새깅 및 호깅시 최종강도 계산식을 경험적으로 도출하였다.

최근에 Paik & Mansour<sup>102)</sup>는 Caldwell 방법<sup>97)</sup>의 문제점을 개선하기 위하여 수직굽힘모멘트를 받는 선각거더가 최종강도상태에 도달했을때의 횡단면내 응력분포를 보다 정확하게 가정하여 단일 및 이중선체구조의 선박에 적용할수 있는 명시적인 형태의 최종강도 계산식을 도출하였다. 이들은 탄소성대변형유한요소 해석결과를 바탕으로 수직굽힘모멘트를 받는 선각거더가 최종강도 상태에 도달했을때의 응력분포는 압축을 받는 플랜지 (즉, 갑판 또는 선저외판) 부근은 좌굴붕괴하고, 인장을 받는 플랜지 (즉, 선저외판 또는 갑판) 부근은 소성항복하되 선각거더 횡단면의 최종 중립축 근방은 여전히 선형탄성상태에 놓여 있다고 가정하였다. 극히 최근에 Paik 등<sup>99)</sup>은 이 방법을 확장하여 수직 및 수평굽힘모멘트와 전단력의 조합하중을 받는 선각거더의 최종강도 상관관계식을 명시적인 형태로 도출하였다. 또한, Paik 등<sup>103), 104)</sup>은 이 계산식을 부식에 의해 손상을 입은 선각거더의 최종강도를 기준으로한 신뢰성 평가 문제에 적용하여 선령의 증가에 따른 선각거더의 붕괴가능성을 분석하였다.

Mansour<sup>105)</sup>는 선각거더가 수직, 수평 및 비틀림굽힘모멘트의 조합하중을 받을때의 최종강도 상관관계식을 보강판의 좌굴, 항복, 소성붕괴 등 각종 파손모드를 고려하여 이론해석적으로 도출한 바 있다.

#### 4. 결 언

구조물의 안전성을 합리적으로 확보하고 균일한 안전성을 얻기위하여는 기존의 탄성설계법만으로는 부적절하며, 구성부재의 좌굴과 소성항복

을 고려한 최종강도를 기준으로 설계를 수행하는 것이 필요하다.

해양골조구조물과 같이 부정정도가 상대적으로 낮은 구조물은 구성부재에 좌굴붕괴가 발생하면 구조 전체적인 붕괴로 이행할 위험성이 극히 높기 때문에 오래전부터 구조설계에 최종강도 개념을 도입하여 오고 있다. 이에 비해 선체와 같은 판구조물은 지금까지 탄성설계법을 기준으로 설계를 수행해 왔다.

그러나, 최근에 선체구조의 붕괴사고가 다수 보고되고 있으며, 일단 구성부재가 좌굴 붕괴하고 나면 국부적으로 구조강성이 저하하고, 그 결과 주변의 타 구조부재가 받는 하중분담이 증가함으로써 연쇄적으로 구성부재가 소성붕괴하여 결국에는 구조전체적으로 붕괴할 위험성이 있다는 것이 밝혀지고 있다<sup>106)</sup>. 특히 노후된 선박이나 충돌 좌초와 같은 돌발적인 해난사고를 통하여 구조가 손상을 입은후에는 설계하중보다 작은 크기의 외력이 작용하더라도 구조물이 좌굴 붕괴할 가능성이 매우 높다.

따라서, 선체구조를 비롯한 판구조물의 설계는 구성부재의 좌굴과 소성항복 및 붕괴거동을 고려한 최종강도를 바탕으로 수행하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 구조부재 및 구조전체에 대한 좌굴붕괴거동 특성을 상세히 규명할 필요가 있다.

지금까지 이 문제에 대해 방대한 연구가 수행되어져 왔으며, 본고에서는 선체구조의 좌굴 붕괴강도에 관한 대표적인 연구동향을 분석하였다. 그 결과 부분적으로는 상당한 수준까지 규명된 경우도 있으나, 전반적으로 아직도 불확실하거나 규명되지 않은 문제가 많이 남아 있으며, 보다 많은 연구가 필요한 실정이다.

#### 참 고 문 헌

1. 佐藤邦彦, 上田幸雄, 藤本二南, "熔接變形殘留應力", 産報出版, 1979.
2. K. Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press, Oxford, 1980.



3. 佐藤邦彦, "熔接構造便覽", 黒木出版社, 1988.
4. J.J. Jensen et al., Report of Committee III.1 "Ductile Collapse", International Ship and Offshore Structures Congress, Vol. 1, St. John's, Canada, September 1994, pp. 299-387.
5. T. Moan et al., Report of Committee V.1 "Applied Design-Strength Limit States Formulations", International Ship and Offshore Structures Congress, Vol.2, St. John's, Canada, September 1994, pp. 1-58.
6. 鷺津久一郎 外, "有限要素法ハンドブック (I 基礎編)", 培風館, 1981.
7. 鷺津久一郎 外, "有限要素法ハンドブック (II 應用編)", 培風館, 1981.
8. F. Bleich, "Buckling Strength of Metal Structures", McGraw-Hill Book Co., New York, 1953.
9. S.P. Timoshenko and J.M. Gere, "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill Book Co., London, 1963.
10. O.F. Hughes, "Ship Structural Design, A Rationally-Based, Computer-Aided, Optimization Approach", John Wiley & Sons, New York, 1983.
11. D.G. Williams, "The Influence of the Torsional Rigidity of Plate Stiffeners on Plate Effectiveness", International Shipbuilding Progress, Vol. 23, No. 268, 1976, pp. 355-360.
12. J.K. Paik, J.Y. Kim, W.S. Kim and Y.S. Chung, "A New Plate Buckling Design Formula (3rd Report)-On the Real Edge Condition", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 174, 1993, pp. 625-633.
13. C.P. Ellinas, W.J. Supple and A.C. Walker, "Buckling of Offshore Structures, A State-of-the-Art Review", Gulf Publishing Co., Houston, 1984.
14. A.E. Mansour, "Charts for the Buckling and Post-Buckling Analyses of Stiffened Plates under Combined Loading", Technical and Research Bulletin, No. 2-22, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, July 1976.
15. 上田幸雄, S.M.H. Rashed, 白点基, "矩形板の彈性座屈相關關係式", 日本造船學會論文集, 第157號, 1985, PP. 445-458.
16. J.K. Paik, J.H. Ham and U.N. Kim, "A New Plate Buckling Design Formula", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, 1992, pp. 559-566.
17. J.K. Paik, J.H. Ham and J.H. Ko, "A New Plate Buckling Design Formula (2nd Report) -On the Plasticity Correction", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.172, 1992, pp. 417-425.
18. T. von Karman, E.E. Sechler and L.H. Donnell, "Strength of Thin Plates in Compression", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol.54, No.5, 1932, pp. 53-57.
19. D. Faulkner, "A Review of Effective Plating for Use in the Analysis of Stiffened Plating in Bending and Compression", J. of Ship Research, Vol.19, No.1, 1975, pp. 1-17.
20. J. Rhodes, "Effective Widths in Plate Buckling", In: Developments in Thin-Walled Structures, Edited by J. Rhodes and A.C. Walker, Applied Science Publishers, London, 1982.
21. 上田幸雄, S.M.H. Rashed, 白点基, "大たわみを伴う矩形板の組合せ荷重に對する有効幅", 日本造船學會論文集, 第159號, 1986, pp. 269-281.
22. 백점기, "2축압축력을 받는 단순지지평판에 대한 비선형거동의 해석해", 대한조선학회 논문집, 제28권, 제1호, 1991, pp. 169-181.
23. T. Usami, "Effective Width of Locally Buckled Plates in Compression and Bend-

- ing", J. of Structural Engineering, The American Society of Civil Engineers, Vol. 119, No. 5, 1993.
24. J.K. Paik, "A New Concept of the Effective Shear Modulus for a Plate Buckled in Shear", J. of Ship Research, Vol.39, No.1, 1995, pp. 70-75.
  25. C.S. Smith, P.C. Davidson, J.C. Chapman and P.J. Dowling, "Strength and Stiffness of Ships' Plating Under In-Plane Compression and Tension", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 129, 1987, pp.277-296.
  26. 大坪英臣, 吉田二郎, "組合せ應力下での長方形板の最終強度(その2)", 日本造船學會論文集, 第158號, 1985, pp. 368-375.
  27. 藤田 讓, 野本敏治, 仁保 治, "組合せ荷重を受ける平板の最終強度(第1報) - 壓縮と剪斷を受ける正方形板", 日本造船學會論文集, 第145號, 1979, pp. 194-202.
  28. 上田幸雄, S.M.H. Rashed, 白点基, "組合せ荷重を受ける矩形板および防撓板の座屈および最終強度の 相關關係(第1報) - 2軸力と剪斷を受ける場合", 日本造船學會論文集, 第156號, 1984, pp. 377-387.
  29. P.C. Davidson, J.C. Chapman, C.S. Smith and P.J. Dowling, "The Design of Plate Panels Subjected to In-Plane Shear and Biaxial Compression", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 132, 1990, pp. 267-286.
  30. 上田幸雄, S.M.H. Rashed, 白点基, "矩形板および防撓板の理想化構造要素の開発 - 初期たわみと熔接 残留應力を有し, 面内荷重と横荷重を受ける場合", 日本造船學會論文集, 第160號, 1986, pp. 321-339.
  31. P.C. Davidson, J.C. Chapman, C.S. Smith and P.J. Dowling, "The Design of Plate Panels Subject to Biaxial Compression and Lateral Pressure", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 133, 1991, pp. 149-160.
  32. 藤久保昌彦, 矢尾哲也, B. Varghese, "組合せ面内荷重を受ける矩形板の座屈 最終強度に関する 研究", 西部造船會會報, 第93號, 1997, pp. 81-89.
  33. 山本元道, 矢尾哲也 他, "表層超細粒鋼板座屈 塑性崩壊強度特性關一考察", 西部造船會會報, 第93號, 1997, pp. 73-80.
  34. T.H. Soreide, "Ultimate Load Analysis of Marine Structures", TAPIR, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, May 1981.
  35. J.B. Dwight and K.E. Moxham, "Welded Steel Plates in Compression", The Structural Engineer, Vol. 47, 1969.
  36. C.S. Smith, "Compressive Strength of Welded Steel Ship Grillage", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol.117, 1975, pp. 325-359.
  37. G.H. Little, "The Collapse of Rectangular Steel Plates under Uniaxial Compression", The Structural Engineer, Vol. 58B, No. 3, 1980, pp. 45-61.
  38. 上田幸雄, 矢尾哲也, 中長啓治, 田中義照, 半田和久, "熔接初期不整を有する矩形板の壓壊強度に関する研究(第3報) - 複雑な初期たわみを有する矩形板の壓壊強度の推定法", 日本造船學會論文集, 第154號, 1983, pp. 345-355.
  39. C. Guedes Soares and M. Kmiecik, "Simulation of the Ultimate Compressive Strength of Unstiffened Rectangular Plates", Marine Structures, Vol. 6, 1993, pp. 553-560.
  40. J.K. Paik and P.T. Pedersen, "Ultimate and Crsuhing Strength of Plated Structures", J. of Ship Research, Vol. 39, No. 3, 1995, pp. 250-261.
  41. J.K. Paik and P.T. Pedersen, "A Simplified Method for Predicting the Ultimate Compressive Strength of Ship Panels",

- International Shipbuilding Progress, Vol. 43, No. 434, 1996, pp. 139-157.
42. 仁保 治, "板構造物の最終強度に関する研究", 東京大學 工學博士論文, 1978年 12月.
  43. 矢尾哲也, "船體構造部材の壓壊強度に関する研究", 大阪大學 工學博士學位論文, 1980年 5月.
  44. 北田俊行, "壓縮力を受ける鋼板および補強板の極限強度に関する研究", 大阪大學 工學博士學位論文, 1980年 6月.
  45. P.K. Das and J.F. Garside, "Structural Redundancy for Continuous and Discrete Systems", Ship Structure Committee, Report No. SSC-354, 1991.
  46. O.F. Hughes, E. Nikolaidis, B. Ayyub, G. White and P. Hess, "Uncertainty in Strength Models for Marine Structures", Ship Structure Committee, Report No. SSC-375, 1994.
  47. P. Rigo, T. Moan, P.A. Frieze and M. Chryssanthopoulos, "Benchmarking of Ultimate Strength Prediction for Longitudinally Stiffened Panels", Proc. of the 6th Int. Symp. on Practical Design of Ships and Mobile Units (PRADS'95), Vol. 2, Seoul, September 1995, pp. 869-882.
  48. J.K. Paik, "A Benchmark Study of the Ultimate Strength Formulations of Stiffened Panels", Joint PNU-ABS Research Project, Final Report to the American Bureau of Shipping, by Pusan National University, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan, January 1997.
  49. P.J. Dowling and J.E. Harding, "Box Girders", In: Constructional Steel Design, An International Guide, Edited by P.J. Dowling, J.E. Harding and R. Bjorhovde, Elsevier Applied Science, London, 1992, pp. 175-195.
  50. D. Faulkner, "Towards a Better Understanding of Compression Induced Stiffener Tripping", Proc. of Int. Conf. on Steel and Aluminum Structures, Edited by R. Narayanan, Elsevier Applied Science Publishers, London, July 1987, pp. 145-158.
  51. P.A. Caridis, "Interactive Flexural-Torsional Buckling Behavior of Stiffened Plating", Marine Structures, Vol. 1, 1988, pp. 115-138.
  52. G.D. Panagiotopoulos, "Ultimate Torsional Strength of Flar-Bar Stiffeners Attached to Falt Plating under Axial Compression", Marine Structures, Vol. 5, 1992, pp. 535-557.
  53. 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 柳原大輔, 大野禎久, "防撓パネルの壓壊舉動に関する研究(第1報)", 日本造船學 會論文集, 第178號, 1995, pp. 451-462.
  54. N.E. Shanmugam and M. Arockiasamy, "Local Buckling of Stiffened Plates in Offshore Structures", J. of Constructional Steel Research, Vol. 38, No. 1, 1996, pp. 41-59.
  55. J.K. Paik, Y.I. Park and A.K. Thayamballi, "Local Buckling of Stiffeners in Ship Plating", Submitted for Possible Publication in J. of Ship Research, May 1997.
  56. I. Mikami and K. Niwa, "Ultimate Compressive Strength of Orthogonally Stiffened Steel Plates", J. of Structural Engineering, The American Society of Civil Engineers, Vol. 122, No. 6, 1996, pp. 674-681.
  57. J. Kondo, "Ultimate Strength of Longitudinally Stiffened Plate Panels Subjected to Combined Axial and Lateral Loading", Fritz Laboratory Report No. 248. 13, Lehigh University, Bethlehem, Pa., August 1965.
  58. Y. Ueda, S.M.H. Rashed and J.K. Paik, "Buckling and Ultimate Strength Interaction of Plates and Stiffened Plates under

- Combined Inplane Biaxial and Shearing Forces", *Marine Structures*, Vol. 8, 1995, pp. 1-36.
59. M.R. Horne and R. Narayanan, "Design of Axially Loaded Stiffened Plates", *J. of Structural Division, The American Society of Civil Engineers*, Vol. 103, No. ST11, November 1977.
  60. M.R. Horne, P. Montague and R. Narayanan, "Influence on Strength of Compression Panels of Stiffener Section, Spacing and Welded Connection", *Proc. of Inst. of Civil Engrs.*, Vol. 63, Part 2, 1977, pp. 1-20.
  61. D. Faulkner, "Compression Tests on Welded Eccentrically Stiffened Plate Panels", In: *Steel Plated Structures*, Edited by P.J. Dowling et al., Crosby Lockwood Staples, London, 1977, pp. 581-617.
  62. 田中義照, 遠藤久芳, "防撓材の局部座屈を伴う防撓板の壓縮強度", *日本造船學會論文集*, 第164號, 1988, pp. 475-486.
  63. K. Ghavami, "Experimental Study of Stiffened Plates in Compression up to Collapse", *J. of Constructional Steel Research*, Vol. 28, 1994, pp. 197-221.
  64. 백점기, 이체명, "판 및 보강판의 압축최종강도 실험식", *대한조선학회 논문집*, 제33권, 제3호, 1996, pp. 8-21.
  65. Y.K. Chen, L.M. Kutt, C.M. Piaszczyk and B.P. Bieniek, "Ultimate Strength of Ship Structures", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 91, 1983.
  66. L.M. Kutt, C.M. Piaszczyk, Y.K. Chen and D. Liu, "Evaluation of the Longitudinal Ultimate Strength of Various Ship Hull Configurations", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 93, 1985.
  67. S. Valsgaard and E. Steen, "Ultimate Hull Girder Strength Margins in Present Class Requirements", *Proc. Marine Structural Inspection, Maintenance, and Monitoring Symposium, SSC/SNAME, Arlington, March 1991.*
  68. C.S. Smith, "Influence of Local Compressive Failure of Ultimate Longitudinal Strength of a Ship's Hull", *Proc. of Int. Symp. on Practical Design in Shipbuilding, Tokyo, October 1977.*
  69. T. Yao and P.I. Nikolov, "Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull under Longitudinal Bending", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 170, 1991, pp. 449-461.
  70. D.W. Billingsley, "Hull Girder Response to Extreme Bending Moments", *Proc. SNAME Spring Meeting, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, April 1980.*
  71. R.S. Dow, R.C. Hugill, J.D. Clarke and C. S. Smith, "Evaluation of Ultimate Ship Hull Strength", *Proc. SSC/SNAME Sym. on Extreme Loads Response, Arlington, October 1981.*
  72. J.C. Adamchak, "ULSTR: A Program for Estimating the Collapse Moment of a Ship's Hull under Longitudinal Bending", *DTNSRDC Report 82/076, Bethesda, October 1982.*
  73. S.E. Rutherford and J.B. Caldwell, "Ultimate Longitudinal Strength of Ships: A Case Study", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 98, 1990.
  74. J.M. Gordo, C. Guedes Soares and D. Faulkner, "Approximate Assessment of the Ultimate Longitudinal Strength of the Hull Girder", *J. of Ship Research*, Vol. 40, No. 1, 1996, pp. 60-69.

75. M.K. Rahman and M. Chowdhury, "Estimation of Ultimate Longitudinal Bending Moment of Ships and Box Girders", *J. of Ship Research*, Vol. 40, No. 3, 1996, pp. 244-257.
76. A.M. Hansen, "Reliability Methods for the Longitudinal Strength of Ships", PhD. Thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, January 1995.
77. J.M. Gordo and C. Guedes Soares, "Collapse of Ship Hulls under Combined Vertical and Horizontal Bending Moments", *Proc. of Int. Symp. on Practical Ships and Mobile Units (PRADS'95)*, Seoul, September 1995, pp. 2.808-2.819.
78. T. Yao and P.I. Nikolov, "Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull under Longitudinal Bending (2nd Report)", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 172, 1992, pp. 437-446.
79. Y. Ueda, S.M.H. Rashed and J.K. Paik, "Plate and Stiffened Plate Units of the Idealized Structural Unit Method (1st Report)", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 156, 1984, pp. 389-400.
80. Y. Ueda, S.M.H. Rashed and J.K. Paik, "Plate and Stiffened Plate Units of the Idealized Structural Unit Method (2nd Report)", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 160, 1986, pp. 321-339.
81. E. Bendiksen, "Hull Girder Collapse", PhD. Thesis. Department of Ocean Engineering, Technical University of Denmark, March 1992.
82. Y. Bai, E. Bendiksen and P.T. Pedersen, "Collapse Analysis of Ship Hulls", *Marine Structures*, Vol. 6, 1993.
83. J.K. Paik, "Tensile Behavior of Local Members on Ship Hull Collapse", *J. of Ship Research*, Vol. 38, No. 3, September 1994, pp. 239-244.
84. T. Hori, M. Sekihama and S.M.H. Rashed, "Structural Design by analysis Approach Applied to Product Oil Carrier with Unidirectional Girder System", *Proc. RINA Spring Meeting*, The Royal Institution of Naval Architects, April 1990.
85. J.K. Paik, "Ultimate Longitudinal Strength-Based Safety and Reliability Assessment of Ship's Hull Girder (2nd Report)-Stiffened Hull Structure-", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 169, 1991, pp. 403-414.
86. J.K. Paik, D.H. Kim, H.S. Bong, M.S. Kim and S.K. Han, "Deterministic and Probabilistic Safety Evaluation for a New Double-Hull Tanker with Transverseless System", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 100, 1992, pp. 173-198.
87. J.K. Paik, "Hull Collapse of an Aging Bulk Carrier under Combined Longitudinal Bending and Shearing Force", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 136, Part B, 1994, pp. 217-228.
88. A.E. Mansour, Y.H. Lin and J.K. Paik, "Ultimate Strength of Ships under Combined Vertical and Horizontal Moments", In: *Proc. of the Int. Symp. on Practical Design of Ships and Mobile Units (PRADS'95)*, Seoul, September 1995, pp. 2.844-2.851.
89. J.K. Paik, A.K. Thayamballi and J.S. Che, "Ultimate Strength of Ship Hulls under Combined Vertical Bending, Horizontal Bending, and Shearing Forces", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 104, 1996.
90. M. Maestro and A. Marino, "An Assessment of the Structural Capacity of Dam-

- aged Ships: The Plastic Approach in Longitudinal Unsymmetrical Bending and the Influence of Buckling", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 36, No. 408, 1989, pp. 255-265.
91. P.J. Dowling, S. Chatterjee, P.A. Frieze and F.M. Moolani, "Experimental and Predicted Collapse Behaviour of Rectangular Steel Box Girders", *Proc. of Int. Conf. on Steel Box Girder Bridges*, London, February 1973.
  92. P.J. Dowling, F.M. Moolani and P.A. Frieze, "The Effect of Shear Lag on the Ultimate Strength of Box Girders", In: *Int. Congress on Steel Plated Structures*, Imperial College, London, July 1976, pp. 108-147.
  93. S. Nishihara, "Analysis of Ultimate Strength of Stiffened Rectangular Plates", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 154, 1983, pp. 367-375.
  94. A. Ostapenko, "Strength of Ship Hull Girders under Moment, Shear and Torque", *Proc. of SSC/SNAME Symp. on Extreme Loads Response*, Arlington, October 1981.
  95. A.E. Mansour, J.M. Yang and A.K. Thayamballi, "An Experimental Investigation on Ship Hull Ultimate Strength", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 98, 1990, pp. 411-440.
  96. R.S. Dow, "Testing and Analysis of a 1/3-Scale Welded Steel Frigate Model", *Proc. of Int. Conf. on Advances in Marine Structures*, Edited by C.S. Smith and R.S. Dow, Elsevier, London, 1991, pp. 749-773.
  97. J.B. Caldwell, "Ultimate Longitudinal Strength", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 107, 1965.
  98. A.E. Mansour and D. Faulker, "On Applying the Statistical Approach to Extreme Sea Loads and Ship Hull Strength", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 115, 1973.
  99. A.C. Viner, "Development of Ship Strength Formulations", *Proc. of Int. Conf. on Advances in Marine Structures*, Admiralty Research Establishment, Dunfermline, Scotland, Elsevier Applied Science, May 1986.
  100. D. Faulkner and J.A. Sadden, "Toward a Unified Approach to Ship Structural Safety", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 121, 1979.
  101. P.A. Frieze and Y.T. Lin, "Ship Longitudinal Strength Modeling for Reliability Analysis", *Proc. of Marine Structural Inspection, Maintenance, and Monitoring Symposium*, SSC/SNAME, Arlington, March 1991.
  102. J.K. Paik and A.E. Mansour, "A Simple Formulation for Predicting the Ultimate Strength of Ships", *J. of Marine Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, 1995, pp. 52-62.
  103. J.K. Paik, S.K. Kim, S.H. Yang and A.K. Thayamballi, "Ultimate Strength Reliability of Corroded Ship Hulls", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol.139, 1997.
  104. J.K. Paik, S.K. Kim, S.K. Lee and A.K. Thayamballi, "Ultimate Hull Girder Strength Reliability of Corroded Bulk Carriers", Submitted for Possible Publication in *J. of Ship Research*, May 1997.
  105. A.E. Mansour, "Ultimate Strength of a Ship's Hull Girder in Plastic and Buckling Modes", *Ship Structure Committee*, Report No. SSC-299, 1980
  106. D.J. Ghose, N.S. Nappi and C.J. Wiernicki, "Residual Strength of Damaged Marine Structures", *Ship Structure Committee*, Report No. SSC-381, 1995. 