



船舶의 衝突 및 坐礁에 관한 最新 研究動向

백 점 기 <부산대학교 조선해양공학과 교수>

1. 서 언

1989년 알래스카 연안에서 발생한 초대형유조선 엑스발데즈호의 좌초사고에 의해 다량의 기름이 유출되어 주위해양을 극심하게 오염시킨바 있다. 이 사고를 계기로 선박의 충돌 및 좌초사고 발생시 기름유출을 방지 내지는 최소화하기 위한 유조선의 구조에 관한 검토가 본격화하여, 미국의 경우 자국영해를 항해하는 모든 유조선에 대해 이중선체화를 의무화시킨 OPA90을 제정하기에 이르렀다.

국제해사기구(IMO)와 각국의 연구기관에서는 이중선체 개념뿐만 아니라 중간갑판(mid-deck) 구조 개념을 비롯한 내충돌 및 내좌초에 효과가 좋은 유조선구조의 개발을 위한 방대한 이론적 및 실험적 연구를 수행하고 있고[1-5], 이 문제들을 주요 주제로한 국제학술회의도 다수 개최되고 있다[6-9].

또한, 이문제에 대해 Jones [10], van Mater & Giannotti [11], Samuelides & Frieze [12], Ellinas & Valsgard [71], Poricelli & Boyd[72], Daidola [13]등에 의해 자료조사가 수행된바 있다.

본고에서는 선박의 충돌 및 좌초시 선체구조의 파괴에 관한 연구중에서 최근에 보고된 것을 중심으로 자료조사를 수행함으로써 이 분야의 최신 연구동향을 분석하고자 한다. 그러나, 오래전에 수행된 연구성과일지라도 현재까지 유용한 정보를 제공하고 있다고 판단되는 연구성과는 본조사에 포함시켰으며, 최근에 수행된 연구도 나열식으로 조사하기 보다는 대표적인 것만을 대상으로 하였기 때문에 본조사에 포함되지 않은 연구성과중에도 유용한 결과를 주는 것이 다수 있음은 물론이다.

충돌 및 좌초시 선체구조는 소성, 파단(rupture), 찢김(tearing), 마찰접촉(frictional contact), 대변

형/대회전, 압괴(crushing)등 복잡한 비선형구조응답을 나타내며, 이 문제의 분류방법에는 여러가지가 있으나, 본고에서는 다음에 나타내고 있는 바와 같이 통상적으로 분류하고 있는 방법에 따라 연구성과들을 조사분석하였다. 즉,

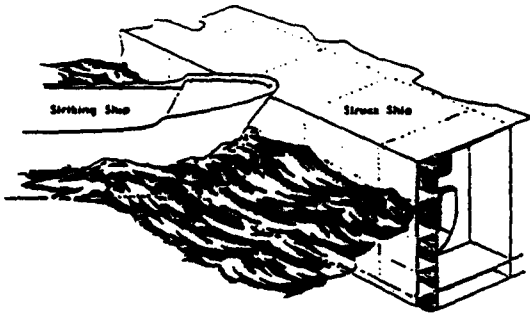
- 충돌에 관한 연구
 - 선박/선박간 충돌 (그림 1)
 - 선박/고정구조물간 충돌 (그림 2)
- 좌초에 관한 연구
 - 암초상 좌초 (그림 3)
 - 연약지반상 좌초 (그림 4)

2. 충돌에 관한 연구

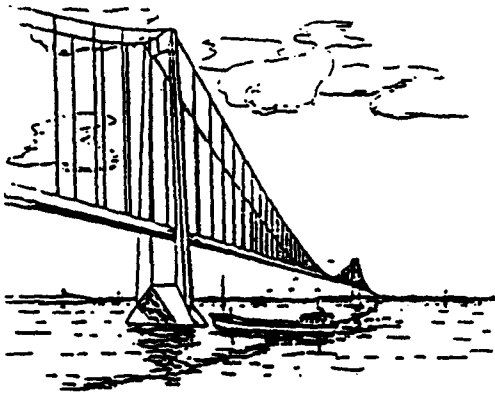
2.1 선박/선박간 충돌

선박간 충돌해석문제는 일반적으로 외부 역학적 문제(external mechanics 또는 outer dynamics)와 내부역학적 문제(internal mechanics 또는 inner dynamics)로 분류 할 수 있다. 전자는 주위해수의 영향을 고려하여 충돌선과 피충돌선의 시간의존 강체운동 응답을 시뮬레이션하여 충돌선과 피충돌선간의 반력 또는 운동에너지를 계산하는 것이며, 후자는 충돌하는 동안의 피충돌선에 대한 손상거동을 해석하여 충돌운동에너지가 어떻게 소비되는지를 계산하는 것이다. 일반적으로 위의 두문제는 별도로 해석한뒤 그 결과를 조합하여 충돌강도를 평가하는 것이 보통이지만, 최근에는 MSC/DYTRAN [14]등의 프로그램을 이용하여 이들 두 문제를 동시에 해석하는 연구도 진행되고 있다.

(1) 외부역학적 문제



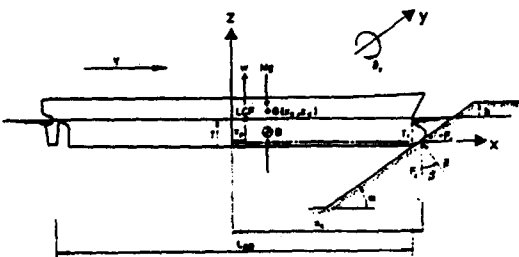
(그림 1)



(그림 2)



(그림 3)



(그림 4)

선박간 충돌시 외부역학적문제로서 충돌에너지의 계산에 관한 연구는 Minorsky[15]에 의해 처음으로 수행되어졌다. Minorsky는 충돌하는 동안에 피충돌선은 회전하지 않는다는 가정하에서 운동량의 평형 조건으로부터 충돌시 운동에너지를 부가질량의 효과를 고려하여 근사적으로 계산하였다. Motora등[16]은 이문제에 관한 이론적 및 실험적 연구를 수행하여 부가질량의 효과는 충돌주기와 시간에 따른 충돌력의 변화에도 의존하며, Minorsky의 근사식은 비교적 좋은 결과를 출때와 그렇지 못한 경우가 있음을 지적하였다.

Drittler[17]는 임의 방향의 임의 위치에서 운동하고 있는 두선박간의 충돌에너지를 계산하는 일반적인 방법을 제시하였다. 이 방법에 의해 얻어진 운동방정식은 Fourier급수 전개에 의해 풀게 되므로 엄밀한 의미에서는 시간의존성을 고려할수 없으며, 사전에 전체적인 힘-시간이력을 알필요가 있다.

Smiechen[18]은 시간의존성을 고려한 충돌에너지 계산법을 제시하였으나, 충돌선이 피충돌선의 길이방향 중앙부에서 직각방향으로 충돌하는 문제를 대상으로 하였다. Petersen[19]은 임의 방향의 임의 위치에서 충돌하는 경우에 시간의존성을 고려한 일반적인 충돌에너지 계산법을 2차원문제로서 다루었다. 그후 Samuelides & Frieze [20]는 유체-구조간 상관효과를 고려한 선박간 충돌에너지를 계산하는 일반적인 방법을 제시하였다.

(2) 내부역학적 문제

일반적으로 외부역학적 문제에서는 충돌선 및 피충돌선은 강체로서 다루어진다. 그러나, 실제로 충돌이 일어나면 충돌선의 선수부와 피충돌선의 선측부에는 모두 손상이 일어날 가능성이 있다. 특히, 피충돌선의 선측에는 큰 변형이 발생하며, 그 결과 피충돌선의 강도부재는 굽힘에 의한 항복, 압괴(crushing), 파단(rupture)등의 파손을 경험할 가능성이 있다.

일상적인 하중 또는 극한 하중상태하의 구조설계시와는 달리 충돌문제에서는 구조부재의 잔류용력이나 초기처짐의 영향은 극히 적고 무시할 수 있다. 선수충돌 문제에서와는 달리 피충돌선의 선측구조는 국부적으로 뿐만아니라 구조전체적으로도 변형하게되며, 충돌선의 선수가 진입해,감에 따라 피충돌선의 선측외판뿐만아니라 내판도 변형하고 손상을 입게된다. 즉, 국부적 및 전체적 파손의 상관효과가 구조거동에 크게 영향을 미치게 된다. 더우기, 선박충돌

은 기본적으로 동적문제도 다루어야하며 동적효과에 관한 검토가 필요하다.

내부역학적문제도 Minorsky[15]에 의해 처음으로 다루어졌다. 그는 고에너지 충돌문제를 대상으로 충돌시 운동에너지와 피충돌선 손상부 체적간에 선형적인 관계를 주는 경험식을 제안하였다. Minorsky의 방법은 그후에 Haywood[21], Woisin[22], Hutchison등[67]에 의해 수정 보완되었다. 이 방법은 실제 선박의 충돌자료와 실험결과를 바탕으로 하고 있기 때문에 기존의 구조방식을 가진 선체의 충돌 문제에 있어서는 유용한 정보를 제공해준다. 그러나, 이중선체 유조선과 같이 새로운 구조방식을 가진 선박의 충돌문제에 이 방법을 적용하기에는 무리가 따른다.

선박간 충돌응답해석을 위해 많은 수치적 방법도 개발되어져 왔다. 그중에서 유한요소법은 가장 강력한 방법중의 하나이다. 실제로 Lenselink등[23]은 MSC/DYTRAN [14]을 적용하여 선박간 충돌시 손상거동을 아주 높은 정도로 해석한바 있다. 그러나, 유한요소법의 약점중의 하나는 대형선체구조의 해석시 모델링과 수치계산에 방대한 시간이 요구된다는 점이다. 따라서, 새로운 해석법을 개발함에 있어서는 어떻게 하면 모델링과 수치계산을 위한 소요 시간을 줄일 수 있을 것인가에 초점을 맞추고 있다.

Pettersen[24]은 항복과 압괴를 고려하여 피충돌선 선체구조의 손상거동을 해석할 수 있는 간이 유한요소법을 개발하였으며, 그후 Valsgard등[25]은 파단효과도 고려하여 이 방법을 개선하였다. Egge & Bockenbauer [26]도 유사하게 선체구조의 파단을 고려한 상세유한요소해석법을 제시하였다. 이들 방법은 모두 기존의 유한요소법의 해석기법을 채용하고 있기 때문에 모델링과 계산에 여전히 많은 시간이 소요되어 실제설계를 위해 적절치 못하다.

Ito등[27-30]에 의해서도 충돌에 관한 일련의 연구가 이론적 및 실험적으로 행해졌다. 이들은 선박간 충돌시 물레이션을 위해 간이수치해석법을 제안하였다.

최근에 Ueda등[31]은 선체충돌 손상해석문제에 대한 범용 유한요소법 프로그램의 적용성을 검토하기 위하여 구조모형실험과 비선형구조해석 프로그램인 ABAQUS에 의한 탄소성대변형해석을 수행하여 변형과 파단과의 관계를 고찰하였다. 또한, Paik & Pedersen [32, 33]은 이상화구조요소법을 적용하여 설계응용을 겨냥한 충돌손상 해석기법을 개발하고, 이중선체유조선의 선체충돌시 손상거동을 각종설계인자(이중선체폭, 선체 부재치수등)를 변화시켜 가

면서 시리즈해석을 수행하여 그 특성을 분석하였다. 이 해석법에서는 항복, 압괴(crushing), 파단(rupture), 국부 및 전체파손의 상관효과, 변형속도(strain-rate) 영향, gap/contact조건등을 고려하고 있다.

한편, Lee [34], Hegazy[69, 70]는 선박충돌시 손상크기를 줄이기 위한 적극적인 방법(active approach)의 하나로 모든 선박이 연성선수부(soft bow)를 갖도록 제안하고, 그 유용성을 검토하였다. 또한, Robeson등 [68]은 저에너지 충돌문제를 대상으로 구조부재의 배치와 치수설정을 최적화함으로써 선체구조의 충돌에너지 흡수능력을 30%정도 향상시킬수 있음을 보였다.

2.2 선박/고정구조물간 충돌

해양구조물 또는 교각등과 같은 고정구조물과 선박간의 충돌문제도 중요한 과제중의 하나이다. 이 경우는 대개 선박의 선수와 고정구조물이 충돌하게 되며, 선수부와 고정구조물이 모두 구조손상을 입게 될 가능성이 있다. 그러나, 여기서는 충돌시 고정구조물의 손상문제를 다룬 연구성과를 제외시키고, 선박의 손상, 특히 선수구조의 손상을 다룬 연구성과만을 조사하였다.

앞절의 (2)항에서 소개한 방법들은 선박/고정구조물간의 충돌시 선수부의 손상해석문제에도 그대로 적용될수 있을 것이다. 그러나, 지금까지는 이 문제를 위주로 다루기 위한 방법들이 다수 제안되었다.

Wierzbicki & Abramowitz [35]는 과도한 압축변형에 의한 구조부재의 압괴거동을 해석하기 위한 기초이론을 제시하였으며, 이 이론을 적용하여 Amdahl[36], McDermott등 [37], Reckling [38,39], Kinkead [40], Hysing [41], Yang & Caldwell [42], Pedersen등 [43], Kierkegaard [44], Paik & Pedersen [45]등은 기본적인 구조단위에 대한 압괴강도(crushing strength)의 계산모델을 제시하였다. 이들 모델은 기본적으로 단위 구조부재에 대한 압괴강도를 계산하기 위한 것이며, 이들을 조합하여 구조전체의 손상을 해석하는 경우에 국부적 및 전체적인 파손의 상관효과를 고려하지 않는한 주로 국부파손이 지배적인 선수부 손상해석에만 적용할수 있다.

한편, 선박과 유빙(ice)과의 충돌문제에 관한 연구도 다수 수행되어 왔으며, Daley등 [76], Aldwinckle등 [77]의 연구가 있다.

3. 좌초에 관한 연구

3.1 압초상 좌초

선박이 단단한 압초위에서 좌초하는 문제는 보통 격좌형 좌초(stranding), 충돌형 좌초(grounding) 및 이들의 조합상태의 3종류로 분류할수 있다. 격좌형 좌초는 선박이 기관고장등으로 표류중에 해안등의 압초위에 올라앉힌뒤 조류나 간만차에 의해 큰 집중하중을 받아 선저부가 구조손상을 당하는 경우이며, 충돌형 좌초는 운항중에 선박이 압초위를 스쳐 지나감으로써 선저부가 손상을 입는 경우이다. 또한, 경우에 따라서는 충돌형 좌초발생후에 추가로 격좌형 좌초손상을 입는 경우도 있을 수 있다.

격좌형 좌초시의 구조손상 특성은 선측충돌시와 매우 유사하며, 국부적으로 과도한 변형이 생기면 선체외판이 파단하게 된다. 이 경우는 좌초후의 파랑 및 조류상태등이 파손응답에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 비해 충돌형 좌초의 특성은 뾰족한 압초위를 지나가는 경우에 배의 길이방향에 걸쳐 선저외판의 찢김(tearing) 손상이 일어난다. 이 경우는 좌초하는 동안의 상황, 즉 좌초속도, 압초모양등이 중요한 인자이다.

지금까지의 좌초사고예를 보면 중소형선박의 경우는 격좌형 좌초가 많고, 대형선박의 경우는 충돌형 좌초가 대부분을 차지하고 있다. 이것은 중소형선박의 경우 기관등의 고장이 잦은데 그 원인이 있으며, 대형선박의 경우 협소한 항로를 운항중에 조선실수를 할 가능성이 많기 때문으로 여겨진다.

격좌형 좌초문제에 대한 연구는 Ueda등 [46], Paik & Kim [47], Amdahl & Kavlie [48] 등의 연구가 있다.

충돌형 좌초문제의 경우는 선저외판을 이상화시킨 한개의 판부재에 대한 찢김응답을 파악하기 위한 연구가 집중적으로 이루어 졌다. Jones & Jouri [49,66], Vaughan [50,51], Woisin [52], Lee [53], Atkins [54], Lu & Calladine [55]등은 강체 웨지를 사용하여 보강되지 않은 강판의 찢김실험을 수행하고, 이를 바탕으로 흡수에너지와 찢김길이간의 관계를 주는 실험식을 제안하였다. 이에 비해 Wierzbicki & Thomas [56]는 강판의 찢김응답 특성을 간단한 손상모델을 이용하여 이론적으로 정식화하였다. 이들 연구는 모두 보강되지 않은 판을 대상으로 하고 있으나, Paik등[57-59]은 중보강재를 가진 판에 대해 수행한 찢김실험결과를 바탕으로 실험식을 제안하였다. 최근에 Paik & Lee [60]는 중보강재가 붙은 판에 대한 찢김응답의 해석모델을 제안하였다.

충돌형 좌초시 실제선박의 선저부의 찢김손상을 예측하기 위한 이론적 및 실험적 연구도 다수 수행되어졌다. Arita & Aoki[73]는 이중저구조에 대하여 2종류의 좌초실험, 즉 충돌형 좌초실험과 격좌형 좌초실험을 수행하고, 이들의 거동특성을 분석하였으며, Kuroiwa [61]등은 1/3 축척의 단저 및 이중저 구조모형에 대한 충돌형 좌초실험을 수행하였다. Poudret등[75]은 Vaughan[50,51]이 기재안한바 있는 간이 찢김응답 해석모델을 이용하여 대형 LNG의 충돌형 좌초시 선저부의 손상을 해석하였다. Thomas & Wierzbicki [74], Wierzbicki & Thomas[62]도 자체적인 판의 찢김응답 해석모델을 적용하여 실선의 선저부 좌초손상을 예측하였다. Paik & Lee [60]도 자체적인 찢김응답 해석모델을 이용하여 충돌형 좌초시 이중선체 유조선의 찢김길이를 해석하였다.

3.2 연약지반(Soft Soil)상 좌초

이 사고는 선박이 모래, 자갈, 갯벌등 비교적 부드럽고 평평한 지반위를 스쳐지나가는 것으로서, 대개 연안 여객선등 소형선박이 당할 가능성이 높다. 이 경우는 선저부의 국부적인 구조손상보다는 구조전체적인 붕괴손상이 문제시되며, 특히 고속여객선의 경우 구조설계시 이 문제에 대한 검토가 필요하다고 생각된다.

이 문제에 대하여는 Huther & Letourneur [63]의 연구가 있으며, Pedersen [64]은 Great Belt Link Project의 일환으로 이 문제에 대하여 방대한 이론적 및 실험적 연구를 수행한바 있다.

4. 결 언

최근 유조선을 비롯한 위험물운반선의 구조설계 개념은 과거의 선체와 적재화물의 보호차원에서 점차 벗어나서 위험한 적재화물의 선외유출에 의한 해양오염 방지문제가 우선적으로 고려되고 있는 추세에 있다. 선가가 1억불 남짓한 엑스발데즈호의 기름 유출사고를 계기로 기름제거작업 및 배상을 위한 금액이 50억불에 이르고 있다는 사실이 이같은 추세를 가속화시키고 있다.

ISSC '94의 V.6위원회 [65]에서도 토의된바와 같이 현재 국제적으로 이 분야에서 방대한 연구가 수행되고 있으나, 아직도 완전한 해결책이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 현재 유럽, 미국, 일본등에서 이 문제에 관하여 많은 연구를 수행하고 있는데 그 연구

성과는 잘 공개되지 않고 있다. 이같은 상황에서 국내의 조선소, 연구소, 학계가 공동으로 일종의 컨소시엄을 구성하여 이 문제의 독자적인 해결책을 마련할 필요가 있다고 사료된다. 현재의 우리나라 조선기술 수준과 연구역량으로 불태 산학연이 공동으로 노력하면 독자적인 해결책을 충분히 마련할수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] MOT/ASIS Research Program, Prevention of Oil Spills from Crude Oil Tankers, Japan.
- [2] DnV Research Program, Oil Spill from Tankers in Grounding and Collision, Norway.
- [3] Joint MIT-Industry Project, Tanker Safety, U.S.A.
- [4] DTMB Project, Advanced Double Hull Technology, U.S.A.
- [5] Great Belt Link Project, Denmark.
- [6] International Conference on Technologies for Marine Environment Preservation, Japan.
- [7] MIT-DnV Workshop on Mechanics of Ship Collision and Grounding, U.S.A. & Norway.
- [8] Conference on Prediction Methodology of Tanker-Structural Failure, Japan & The Netherlands.
- [9] International Symposium on Structural Crashworthiness, U.S.A. & U.K.
- [10] Jones, N., A Literature Survey on the Collision and Grounding Protection of Ships, Ship Structure Committee, Report No.SSC-283, 1979.
- [11] van Mater, P.R. and Giannotti, J.G., Critical Evaluation of Low Energy Ship Collision Damage Theories and Design Methodologies, Literature Search and Review, Ship Structure Committee, Report No.SSC-285, 1979.
- [12] Samuelides, E. and Frieze, P.A., Literature Review on Ship-Ship Collisions, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Glasgow, U.K., Report No. NAOE 84-01, January 1984.
- [13] Daidola, J.C., Tanker Structure Behavior During-Collision and Grounding, Marine Technology, Vol.32, No.1, January 1995, pp.20-32.
- [14] The MacNeal-Schwendler Corporation, MSC/DY-TRAN V2.1 User's Manual, 1993.
- [15] Minorsky, V.U., An Analysis of Ship Collision with Reference to Protection of Nuclear Power Ships, J. of Ship Research, Vol.3, No.1, 1959, pp.1-4.
- [16] Matora, S., Fujino, M., Sugiura, M. and Sugita, M., Equivalent Added Mass of Ships in Collisions, Selected Papers from J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.7, 1971, pp.138-148.
- [17] Drittler, K., Die Bestimmung von hydrodynamischen Kenngrößen bei Schiffsbewegungen parallel zur Wasseroberfläche und bei Kollisionen, Schiffstechnik, Vol.13, 1966, pp.63-69.
- [18] Smiechen, M., Zur Kollisionsdynamik von Schiffen, Jb. schiffbautech. Ges., Vol.68, 1974, pp.357-372.
- [19] Petersen, M., Dynamics of Ship Collisions, J. of Ocean Engineering, Vol.9, No.4, 1982, pp.295-329.
- [20] Samuelides, E. and Frieze, P.A., Fluid-Structure Interaction in Ship Collisions, Marine Structures, Vol.2, 1989, pp. 65-88.
- [21] Haywood, J.H., A Note for Collision Estimates for LNG Carriers, Naval Construction Research Establishment, St. Leonard Hill, Dunfermline, Scotland, 1971.
- [22] Woisin, G., Design Against Collision, Proc. of Int. Symposium on Advances in Marine Technology, Trondheim, Norway, June 1979, pp.309-336.
- [23] Lenseink, H., Thung, K., Stipdonk, H.L. and van der Weijde, P.J., Numerical Simulations of Ship Collisions, Proc. of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.I, San Francisco, June 1992, pp. 79-88.
- [24] Pettersen, E., Analysis and Design of Cellular Structures, Department of Marine Technology, The Norwegian Institute of Technology, Report No. UR-79-02, 1979.
- [25] Valsgard, S. and Pettersen, E., Simplified Non linear Analysis of Ship/Ship Collisions, Norwegian Maritime Research, No.3, 1982, pp. 2-17.
- [26] Egge, E.D. and Bockenbauer, M., Calculation of the Collision Resistance of Ships and Its Assessment for Classification Purposes, Marine Structures, Vol.4, 1991, pp.35-56.
- [27] Ito, H., Kondo, K., Yoshimura, N., Kawashima, M and Yamamoto, S., A Simplified Method to Analyse the Strength of Double Hulled Structures in Collision (1st Report), J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 156, 1984, pp.283-295.
- [28] Ito, H., Kondo, K., Yoshimura, N., Kawashima, M and Yamamoto, S., A Simplified Method to Analyse the Strength of Double Hulled Structures in Collision (2nd Report), J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.158, 1985, pp.420-434.
- [29] Ito, H., Kondo, K., Yoshimura, N., Kawashima, M and Yamamoto, S., A Simplified Method to Analyse the Strength of Double Hulled Structures in Collision (3rd Report), J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.160, 1986, pp.401-409.
- [30] Ito, H., Hayashi, K. and Kitano, K., A Design-

- Oriented Investigation into the Collision Strength of Double-Hulled Structures, Proc. of Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol.1, 1994, pp.363-369.
- [31] Ueda, Y., Murakawa, H., Tanigawa, M., Yoneda, N. and Kobashi, M., Stress Analysis of a Ship Side Collision Model Considering Large Deformation, J. of the Kansai Society of Naval Architects of Japan, No.222, September 1994, pp. 167-172.
- [32] Paik, J.K. and Pedersen, P.T., Modelling of the Internal Mechanics in Ship Collisions, Accepted for publication in J. of Ocean Engineering, January 1995.
- [33] Paik, J.K. and Pedersen, P.T., Collision Strength Analysis of Double Hull Tankers, Trans. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.32, No.1, February 1995, pp.1-15.
- [34] Lee, J.W., On the Optimization Design of Soft Bow Structure, Proc. of Int. Sym. on Practical Design in Shipbuilding (PRADS), Tokyo & Seoul, 1983, pp.429-435.
- [35] Wierzbicki, T. and Abramowitz, W., The Mechanics of Deep Plastic Collapse of Thin-Walled Structures, Structural Failure (eds. T. Wierzbicki and N. Jones), John Wiley & Sons, 1989, pp.281-329.
- [36] Amdahl, J., Energy Absorption in Ship Platform Impacts, Dr. Thesis, Report No. UR-83-34, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 1983.
- [37] McDermott, J.F., Kline, R.G., Jones, E.I., Maniar, N.M. and Chiang, W.P., Tanker Structural Analysis for Minor Collisions, Trans. SNAME, Vol.82, 1974, pp.382-412.
- [38] Reckling, K.A., On the Collision Protection of Ships, Proc. of Int. Sym. on Practical Design in Shipbuilding (PRADS), Tokyo, Japan, October 1977, pp. 129-134.
- [39] Reckling, K.A., Mechanics of Minor Ship Collisions, Int. J. Impact Engng., Vol.1, No.3, 1983, pp.281-299.
- [40] Kinkead, A.N., A Method for Analyzing Cargo Protection Afforded by Ship Structures in Collision and Its Application to an LNG Carrier, Trans. RINA, Vol. 122, 1980, pp. 1-22.
- [41] Hysing, T., Impacts and Collision Offshore Analysis and Penetration of Hull, Det Norske Veritas, Report No. 78-433, 1978.
- [42] Yang, P.D.C. and Caldwell, J.B., Collision Energy Absorption of Ships' Bow Structures, Int. J. Impact Engng., Vol. 7, No. 2, 1988, pp.181-196.
- [43] Pedersen, P.T., Valsgard, S., Olsen, D. and Spangenberg, S., Ship Impacts: Bow Collisions, Int. J. Impact Engng, Vol.13, No.2, 1993, pp .163-187.
- [44] Kierkegaard, H., Ship Bow Response in High-Energy Collisions, Marine Structures, Vol.6, 1993, pp. 359-376.
- [45] Paik, J.K. and Pedersen, P.T., Ultimate and Crushing Strength of Plated Structures, Submitted for publication in J. of Ship Research, July 1994.
- [46] Ueda, Y., Katayama, M., Kitamura, K., Okamoto, Y. and Yoshida, Y., Ultimate Strength Analysis of Double Bottom Structures in Stranding Conditions, Proc. of the 3rd Int. Sym. on Practical Design of Ships and Mobile Units(PRADS), Vol.II, Trondheim, Norway, 1987, pp.1043-1059.
- [47] Paik, J.K. and Kim, C.Y., Strength Analysis of Double Bottom Structures in Stranding by Idealized Structural Unit Method, Trans. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.28, No.1, April 1991, pp.125-138.
- [48] Amdahl, J. and Kavlie, D., Analysis and Design of Ship Structures for Grounding Collision, Proc. of the 5th Int. Sym. on Practical Design of Ships and Mobile Units (PRADS), Vol.II, May, 1992, pp.1101-1114.
- [49] Jones, N. and Jouri, W.S., A Study of Plate Tearing for Ship Collision and Grounding Damage, J. of Ship Research, Vol.31, No.4, Dec. 1987, pp.253-268.
- [50] Vaughan, H., Bending and Tearing of Plate with Application to Ship-Bottom Damage, The Naval Architect, RINA, May 1978, pp.97-99.
- [51] Vaughan, H., The Tearing of Mild Steel Plate, J. of Ship Research, Vol.24, No.2, June 1980, pp.96-100.
- [52] Woisin, G., Comments on Vaughan: The Tearing Strength of Mild Steel Plates, J. of Ship Research, Vol.26, No.1, March 1982, pp.50-52.
- [53] Lee, J.W. and Song, J.Y., A Study on the Tearing and Crushing Behaviour of Isotropic Aluminium Alloy Plate, Korean Register of Shipping, Report No. 10053, 1983, pp.3-16.
- [54] Atkins, A.G., Tearing of Thin Metal Sheets, Structural Failure (eds. T. Wierzbicki and N. Jones), John Wiley & Sons, 1989, pp. 107-132.
- [55] Lu, G. and Calladine, C.R., On the Cutting of a Plate by a Wedge, Int. J. Mech. Sci., Vol.32, No.4, 1990, pp.293-313.
- [56] Wierzbicki, T. and Thomas, P., Closed-Form Solution for Wedge Cutting Force Through Thin Metal Sheets, Int. J. Mech. Sci., Vol.35, No.3/4, 1993, pp.209-229.

- [57] Paik, J.K., Hyun, M.H. and Lee, T.K., On the Grounding Damage of Ship Bottom Stiffened Platings (Part I: Experiment), *Trans. of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.31, No.1, 1994, pp.121-132.
- [58] Paik, J.K. and Lee, T.K., On the Grounding Damage of Ship Bottom Stiffened Platings (Part II: Damage Prediction Formula), *Trans. of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.31, No.4, 1994, pp.119-129.
- [59] Paik, J.K., Cutting of a Longitudinally Stiffened Plate by a Wedge, *J. of Ship Research*, Vol.38, No.4, December 1994, pp.340-348.
- [60] Paik, J.K. and Lee, T.K., Damage and Collapse of Double Hull Tankers in Groundings, Submitted for presentation in the Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), June 1995.
- [61] Kuroiwa, T., Kawamoto, Y. and Yuhara, T., Study on Damage of Ship Bottom Structures Due to Grounding, *Proc. of Conf. on Prediction Methodology of Tanker Structural Failure*, Tokyo, Japan, July 1992.
- [62] Wierzbicki, T. and Thomas, P., Grounding Damage of Ships, *Structural Crashworthiness and Failure* (eds. N. Jones and T. Wierzbicki), Elsevier Applied Science, 1993, pp.467-507.
- [63] Huther, M. and Letourneur, J.C., Estimation of the Contact Length After Grounding on a Soft Shore, *Bulletin Technique du Bureau Veritas*, February 1980.
- [64] Pedersen, P.T., Ship Grounding and Hull-Girder Strength, *Marine Structures*, Vol.7, 1994, pp.1-29.
- [65] Ohtsubo, H. et al. ISSC'94 Committee V.6 on Structural Design for Pollution Control, *Proc. of the 12th International Ship and Offshore Structures Congress*, Vol.II, September 1994, pp.249-295.
- [66] Jones, N. and Jouri, W.S., Scaling of Ship Collision and Grounding Damage, *Proc. of Int. Maritime Associ. of East Mediterranean*, Vol.3, Varna, Bulgaria, 1987, pp.95.1-95.8.
- [67] Hutchison, B.M., Gray, D.L. and Bauer, G., Determination of Cargo Damage Risk in Barge Collisions Using a Generalized Minorsky Model and Monte Carlo Methods, *National Spring Meeting and STAR Symposium*, SNAME, Portland, Oregon, U.S.A., 1986, pp.233-265.
- [68] Robeson, D.E., Haftka, R.T. and Sundkvist, K.E., Potential of Optimal Ship Structure Redesign for Minor Collisions, *J. of Ship Research*, Vol.31, No.1, March 1987, pp.53-59.
- [69] Hegazy, E.H., Criteria for Soft Bow Design for Ships, *Department of Shipbuilding and Ocean Tech., RWTH Aachen Report*, September 1984.
- [70] Hegazy, E.H., Bow Strengthening Requirements for Safety of Ships During Collision, *Structural Safety and Reliability Conf.*, Kobe, Japan, May 1985.
- [71] Ellinas, C.P. and Valsgard, S., Collisions and Damage of Offshore Structures: A State-of-the-Art, *Trans. ASME, J. of Energy Resources Technology*, Vol.107, 1985, pp.297-314.
- [72] Porricelli, J.D. and Boyd, J.H., Analytical Techniques for Predicting Grounded Ship Responses, *Ship Structure Committee, Report No.324*, 1984.
- [73] Arita, K. and Aoki, G., Strength of Ship Bottom in Grounding (1st Report) - An Investigation into the Case of a Ship Stranded on a Rock, *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.158, 1985, pp.359-367.
- [74] Poudret, J., Huther, M., Jean, P. and Vaughan, H., Grounding of a Membrane Tanker: Correlation Between Damage Predictions and Observations, *Proc. of Extreme Loads Response Symposium*, SNAME, Arlington, U.S.A., October 1981, pp.125-130.
- [75] Thomas, P. and Wierzbicki, T., Grounding Damage to Double Hull Tank Vessels, *Proc. of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conf.*, San Francisco, U.S.A., June 1992, pp.108-116.
- [76] Daley, C.G., Phillips, L.D. and McCallum, J.S., *Dynamics Ship/Ice Impact - Results of Parametric Model Testing Ice Technology* (ed. T.K.S. Mourthy), Springer, 1986.
- [77] Aldwinkle, D.S. and Lewis, K.J., Prediction of Structural Damage, Penetration and Cargo Spillage due to Ship Collision with Icebergs, *Proc. of ICE TECH'84*, Calgary, May 1984.