



# 船殼거더의 最終崩壞強度 解析法 및 簡易計算式에 관한 研究 動向

백점기 <부산대학교 조선해양공학과 교수>

## 1. 서 언

선체에 작용하는 외하중의 크기가 설계하중보다 작을 때에는 선체구조에는 기본적으로 좌굴, 소성붕괴등의 파손이 생기지 않는다. 그러나, 선박이 항해중에 격심한 파랑과 조우하거나 비일상적인 화물적재상태등에 기인하여 큰 외하중이 작용하면 선각거더는 좌굴, 소성붕괴할 가능성이 있다. 더우기, 노후화된 선박의 경우는 부식이나 피로균열등에 의해 선체구조의 강도와 강성이 약화되어 있으므로 비교적 작은 외하중의 작용하에서도 선각거더가 쉽게 붕괴할 가능성이 있다.

선체가 수직 종굽힘모멘트를 받으면 먼저 가장 큰 압축을 받는 판부재, 즉 상갑판 또는 선저외판이 좌굴하게 된다. 좌굴이 일어난 후에도 선각거더는 굽힘모멘트의 증가에 대해 더욱 견딜수 있으나, 좌굴이 생긴 부재의 강성은 저하되고 파손이 생기지 않은 부재가 하중을 많이 부담하게 되어 결과적으로 구조내부의 응력분포가 재분배된다. 하중을 더욱 증가시키면 좌굴이 발생한 부재가 국부적으로 붕괴하고, 타부재도 순차적으로 좌굴 및 붕괴하게 된다. 또한, 인장을 받는 부재도 항복하게 되며, 각 부재의 점진적인 파손에 의해 구조전체적인 강성이 더욱 저하하면 선각거더는 전체적으로 붕괴하게 된다. 따라서, 선각거더의 최종붕괴강도를 해석하기 위하여는 구성부재의 좌굴과 소성붕괴거동을 반드시 고려할 필요가 있다.

선체구조의 안전성 평가 및 합리적인 구조설계를 위하여는 탄성좌굴강도를 근거로 설정된 기준을 이용하는 기존의 수법은 불합리하며, 선체 각부재의 좌굴과 소성붕괴거동을 고려하여 계산된 선각거더의 최종붕괴강도를 하나의 구조설계기준으로 삼아야 할

것이다 [1].

지금까지 이 문제에 대하여 많은 연구성고가 보고되어 왔으며, 이들 중에는 선각거더의 최종붕괴거동을 상세하게 해석하기위한 해석수법의 개발과 초기구조설계단계에서 최종붕괴강도를 간단하게 추정하기 위한 간이계산식의 도출에 관한 연구가 있다.

본고에서는 선각거더의 최종붕괴강도 해석법과 간이계산식에 관한 연구동향을 문헌조사를 통하여 분석하고자 한다. 지금까지는 수직 종굽힘모멘트만을 받는 경우가 주로 연구되어 왔으나, 이 문제를 포함하여 조합하중을 받는 경우의 연구도 조사하였다. 문헌조사는 대표적인 몇가지 만을 대상으로 하였으므로 이 문헌조사에 포함되지 않은 것중에도 유용한 결과를 주는 것이 다수 있음은 물론이다. 한편, 선체구조의 최종강도 해석법에 관한 연구동향의 조사는 최근에 Yao [2]에 의해서도 수행된바 있으므로 참고하기 바란다.

## 2. 선각거더의 최종붕괴강도 해석법에 관한 연구 동향

유한요소법은 구조물의 비선형거동해석을 위한 강력한 수법중의 하나이기 때문에 좌굴과 소성붕괴등의 비선형거동을 고려한 선체구조의 최종강도문제를 해석함에 있어서도 유한요소법의 적용에 관해 당연히 고려해볼 가치가 있을것이다. 실제로 Chen등 [3], Kutt등 [4]은 탄소성대변형 유한요소법을 적용하여 정적 및 동적하중의 작용에 따른 선각거더의 최종붕괴거동을 해석하였다. 그러나, 이들은 컴퓨터 기억용량과 계산시간의 제약때문에 요소분할을 매우 크게 하였으며, 보다 높은 정도의 해석결과를 얻기

위하여는 요소분할을 더욱 작게 해야함을 지적하였다. 그러나, 컴퓨터의 성능이 급속도로 향상되고 있는 현시점에서도 선각거더의 최종붕괴강도해석에 탄소성대변형 유한요소법을 적용하는 것은 극히 어려운 실정이다. 이같은 측면에서 컴퓨터의 실용화가 이루어지기 이전에는 물론이려니와 그 이후에도 대부분의 연구는 간이계산수법의 개발에 집중되고 있다.

좌굴과 소성의 영향을 고려하여 선각거더의 최종강도를 해석하고자 하는 노력은 Caldwell [5]에 의해 처음으로 시도되었다. 물론 그 당시는 컴퓨터가 실용화되기 전이었지만 이 문제에 관한 Caldwell의 연구는 최초의 시도로 평가되고 있다. 그의 연구는 붕괴거동의 해석보다는 간이계산식의 도출에 주안점을 두고 있기 때문에 그 소개는 다음절로 미루고자한다.

Smith [6]는 선각의 횡단면을 판-보강재로 조합된 보-기둥요소의 집합체로 모델링하고, 축압축력과 축인장력의 증가에 따른 각 보-기둥요소의 응력-변형률관계식을 사전에 구축하여 두었다가 선각거더 전체의 굽힘강도는 외하중의 증가에 따라 얻어지는 응력 또는 변형률상태에서 각요소의 기여분을 적분하여 계산하였다. Smith는 탄소성대변형 유한요소해석법에 의해 주요치수의 변화에 따른 시리즈해석을 수행하여 축압축력하의 보-기둥요소의 응력-변형률관계를 계산하였으나, 그 후 Yao [7]는 해석적인 수법을 적용하여 응력-변형률관계를 명시적인 형태로 도출함으로써 계산이 더욱 편리하도록 하였다. Smith의 방법은 그 후 Billingsley [8], Dow 등 [9], Adamchak [10], Faulkner 등 [11], Rutherford & Caldwell [12]에 의해 실제 선박의 붕괴강도 해석문제에 적용되어 그 유용성이 잘 알려져 있다 [13]. 기본적으로 Smith법을 적용하면서도 굽힘뿐만 아니라 전단과 비틀림을 받는 선각거더에도 적용하기 위한 시도는 Ostapenko [14]에 의해 이루어졌으나, 굽힘, 전단, 비틀림이 모두 작용하는 경우는 이 연구에서 제안한 계산식과 실험치가 서로 잘 맞지 않으므로 개선이 필요함을 지적하였다.

Ueda 등 [15, 16]은 이상화구조요소법 (ISUM: idealized structural unit method)을 제안하였다. 이 방법에서는 먼저 선체구조를 판요소, 보강판요소, 보-기둥요소등 크기가 매우 큰 기본구성부재로 모델링한다. 사전에 이들 각요소의 비선형거동을 하중조건과 경계조건하에서 이론해석, 수치해석 또는 실험결과를 바탕으로 이상화시킨 이상화구조요소 (idealized structural unit)를 개발한다. 실제해석에서

는 일반적인 유한요소법에서와 같이 대상구조를 각 이상화구조요소의 집합체로 생각하여 다룬다. 구조응답은 기하학적, 재료적 비선형성을 나타내므로 하중중분 또는 변위중분법을 채용한다. 적절한 이상화구조요소를 개발하면 순수굽힘뿐만아니라 전단, 수압, 비틀림등 각종 조합하중을 받는 선각거더의 최종붕괴거동을 해석할수 있으며, 지금까지 개발된 이상화구조요소들은 이들의 영향을 고려하고 있다. Bendiksen [33], Bai 등[34]도 이상화구조요소법을 적용하여 보요소, 1축 압축/인장력하의 판요소, 순수전단 하중하의 전단요소, 스프링요소등을 개발하였다. 또한, 선체가 큰 하중을 받을때 과도한 인장력을 받는 부재는 파단할 가능성이 있으며, 이렇게 되면 선체구조 전체의 강성은 더욱 저하하고 거동도 복잡하게 될 것이다 [17]. 이같은 거동은 노후화된 선박에서 피로균열이 존재하는 부재에 과도한 인장력이 작용하는 경우에 일어날 가능성이 있으며 [18], Paik [18, 19]은 이들의 영향을 고려할수 있도록 기존의 이상화구조요소를 개선시켰다. 이상화구조요소법은 Hori 등 [20], Paik [19, 21, 22], Mansour 등 [35]에 의해 실제 선박의 최종종강도 해석문제에 적용되어 그 유용성이 잘 알려져 있다 [13].

### 3. 선각거더의 최종붕괴강도 간이계산식에 관한 연구동향

전술한바와 같이 좌굴과 소성의 영향을 고려하여 선각거더의 최종강도를 해석하고자 하는 시도는 Caldwell [5]에 의해 처음으로 이루어 졌다. 그는 선체구성부재의 좌굴의 영향을 고려하기 위하여 가장 큰 압축을 받는 부분, 즉 상갑판 또는 선저외판의 좌굴후의 최종강도를 재료 항복응력에 구조불안정계수 (structural instability factor) 또는 감소계수 (reduction factor)를 곱하여 계산할것을 제안하였다. 또한, 선체 횡단면의 응력분포는 압축을 받는 횡단면에는 판의 최종강도, 인장을 받는 횡단면에는 항복응력이 균일하게 분포한다고 가정하여 선각거더의 최종붕괴강도 계산식을 도출하였다. Caldwell의 논문에 대한 토론을 통하여 Faulkner [23]는 상갑판이나 선저외판의 압축최종강도는 단위판부재에 대한 압축최종강도 계산결과를 그대로 적용할수 있음을 보였다. Caldwell의 계산식은 선각의 최종강도를 전반적으로 과대평가하는 경향이 있다. 이것은 선각이 최종강도에 도달한 후에서도 중립축 근방의 선측구조는 보통 선형탄성상태에 놓여있기 때문이다. 최근

에 Paik & Mansour [36]는 이 같은 문제점을 개선할 수 있는 응력분포를 가정하여 단일 및 이중선체구조에 적용할 수 있는 최종강도 간이계산식을 해석적인 수법으로 도출하였다.

1970년 ISSC [24]는 새깅상태하의 선각거더를 대상으로 가장 큰 압축력을 받는 상갑판이 최종강도에 도달하면 선각거더는 전체적으로 붕괴하며, 이때까지의 모멘트-곡률관계는 선형적이라 가정하여 최종붕괴강도 간이계산식을 도출하였다. 그러나, Mansour & Faulkner [25]는 좌굴후의 판요소의 강성저하 효과를 무시할 수 없고 결과적으로 이 가정이 불합리함을 지적하였으며, 좌굴후 유효횡단면 효과를 고려한 계산식을 제시하였다. Lee [26]는 기본적으로 최종붕괴강도는 Mansour & Faulkner의 계산식과 동일한 식을 적용하여 계산하지만, 이 계산식에 포함되는 보강판의 압축최종강도와 유효횡단면 효과의 평가식을 독자적으로 도출하였다. Viner [27]는 1970년 ISSC계산식에 0.92 - 1.05의 범위 내에 있는 적절한 수정계수를 곱하여 선각거더의 최종붕괴강도를 계산하였다.

Faulkner & Sadden [28]도 기본적으로 1970년 ISSC [24]의 계산식을 적용하면서 재료항복응력, 판의 압축최종강도, 좌굴에 의한 유효강성효과등과 관련된 불확실성을 고려한 간이계산식을 제안하였다. 또한, 이들은 상기 각인자의 불확실성을 실용적인 범위내에서 가정하여 최종붕괴강도 계산식을 가장 큰 압축력을 받는 보강판, 즉 상갑판 또는 선저외판의 압축최종강도만의 함수로 나타내었다. Frieze & Lin [29]은 실용적인 범위내의 초기처짐과 잔류응력을 가진 보강판의 압축최종강도를 탄소성대변형 유한요소법을 적용하여 시리즈해석하고, 이들결과를 바탕으로 보강판의 압축최종강도의 경험식을 도출하였으며, 선각거더의 최종붕괴강도식도 box girder 실험모형 및 수치해석결과를 바탕으로 새깅 및 호깅시에 형태가 서로 다른 경험식을 도출하였다.

Valsgaard & Steen [17]은 1980년 7월 부두에서 화물하역중에 호깅상태에서 붕괴한 초대형유조선 Energy Concentration의 선각거더에 대해 탄소성대변형 유한요소해석을 수행하여 얻을 결과로부터 가장 큰 압축을 받는 선저외판이 최종강도에 도달한 후에도 선각거더는 곧바로 전체적으로 붕괴하지 않고 최종굽힘강도에 도달하기까지 다소간의 여유가 있음을 발견하였으며, 이 영향을 횡단면강도여유(cross-section strength margin)의 개념을 도입하여 고려하였다. 또한, 이들은 Energy Concen-

tration에 대해 조사해본 결과 횡단면강도여유계수는 1.127정도임을 알았다.

한편, Mansour [30]는 선각거더가 수직, 수평 및 비틀림굽힘모멘트의 조합하중을 받는 경우를 대상으로 하여 선체횡단면에 대한 최종붕괴강도 상관관계식을 도출하였다. 그는 보강판의 좌굴, 항복, 소성붕괴 등 각종 파손모드를 고려하였다.

#### 4. 결 언

아직도 선박의 구조설계단계에서 최종붕괴강도를 설계기준으로 삼는 경우는 거의 없으나, 최근에 각국 선급에서 최종붕괴강도를 의무적인 설계기준으로 삼기위해 자체적인 해석법과 설계식을 제시하고 규정화하는 작업을 진행하고 있다 [12, 17, 31, 32]. 1994년 ISSC [1]에서도 토론된바와 같이 특히 새로운 구조방식을 가진 선박의 합리적인 구조설계를 위하여는 해상플랫폼의 구조설계와 마찬가지로 최종강도와 피로강도를 직접적인 구조설계기준으로 삼아야 할 것이다.

본고에서는 선각거더의 최종붕괴강도에 대한 해석법과 간이계산식에 관한 연구동향을 문헌조사를 통하여 분석하였다. 그 결과 순수굽힘모멘트가 작용하는 문제의 경우 최종붕괴강도 해석법은 어느정도 확립되었다고 판단되지만 최종붕괴강도의 간이계산식은 아직도 정도등의 면에서 개선의 여지가 남아있다고 생각된다. 앞으로 순수 굽힘모멘트뿐만 아니라 조합하중을 받는 경우와 피로균열을 비롯한 초기구조손상을 가진 노후화된 선박에 대한 최종붕괴강도를 보다 정밀하게 해석하기 위한 해석법의 개발과 간이계산식의 도출이 필요하다고 사료된다. 또한, 충돌, 좌초, 폭발 등에 기인된 선각거더의 붕괴강도 평가를 위한 해석법의 개발도 앞으로 남은 과제중의 하나이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. Moan et al., Report of Committee V.1 "Applied Design - Strength Limit States Formulations," International Ship and Offshore Structures Congress, St. John's, Canada, September 1994.
- [2] T. Yao, 船體構造の座屈, 塑性崩壊に関する研究動向, 日本造船學會誌, 第785, 1994年 11月.

- [3] Y.K. Chen, L.M. Kutt, C.M. Piaszczyk and B.P. Bieniek, Ultimate Strength of Ship Structures, Trans. SNAME, Vol. 91, 1983.
- [4] L.M. Kutt, C.M. Piaszczyk, Y.K. Chen and D. Liu, Evaluation of the Longitudinal Ultimate Strength of Various Ship Hull Configurations, Trans. SNAME, Vol. 93, 1985.
- [5] J.B. Caldwell, Ultimate Longitudinal Strength, Trans. RINA, Vol. 107, 1965.
- [6] C.S. Smith, Influence of Local Compressive Failure on Ultimate Longitudinal Strength of a Ship's Hull, Proc. Int. Sym. on Practical Design in Shipbuilding, Tokyo, Japan, October 1977.
- [7] 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.
- [8] D.W. Billingsley, Hull Girder Response to Extreme Bending Moments, Proc. SNAME Spring Meeting, April 1980.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] J.A. Faulkner, J.D. Clarke, C.S. Smith and D. Faulkner, The Loss of HMS COBRA - a Reassessment, Trans. RINA, Vol. 127, 1984.
- [12] S.E. Rutherford and J.B. Caldwell, Ultimate Longitudinal Strength of Ships: A Case Study, Trans. SNAME, Vol. 98, 1990.
- [13] J.J. Jensen et al., Report of Committee III.1 "Ductile Collapse", International Ship and Offshore Structures Congress, St. John's, Canada, September 1994.
- [14] A. Ostapenko, Strength of Ship Hull Girders under Moment, Shear and Torque, Proc. SSC/SNAME Sym. on Extreme Loads Response, Arlington, October 1981.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] J.K. Paik, Hull Collapse of an Ageing Bulk Carrier under Combined Longitudinal Bending and Shearing Force, Trans. RINA, Vol. 136, Part B, 1994.
- [19] J.K. Paik, Tensile Behavior of Local Members on Ship Hull Collapse, J. of Ship Research, Vol. 38, No. 3, September 1994.
- [20] 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, April 1990.
- [21] J.K. Paik, Ultimate Longitudinal Strength-Based Safety and Reliability

- ty Assessment of Ship's Hull Girder (2nd Report) -Stiffened Hull Structure-, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 169, 1991.
- [22] 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, Trans. SNAME, Vol. 100, 1992.
- [23] D. Faulkner, Discussion to Ref. [5].
- [24] ISSC, Report of Committee on "Plastic and Limit Analysis", International Ship Structures Congress, Tokyo, 1970.
- [25] A.E. Mansour and D. Faulkner, On Applying the Statistical Approach to Extreme Sea Loads and Ship Hull Strength, Trans. RINA, Vol.115, 1973.
- [26] J.S. Lee, On the Study of System Reliability Analysis of Tension Leg Platforms, Proc. the Autumn Meeting of the Society of Naval Architects of Korea, November 1989.
- [27] A.C. Viner, Development of Ship Strength Formulations, Proc. Int. Conf. on Advances in Marine Structures held at Admiralty Research Establishment, Dunfermline, Scotland, Elsevier Applied Science (eds. C.S. Smith and J.D. Clarke), May 1986.
- [28] D. Faulkner and J.A. Sadden, Toward a Unified Approach to Ship Structural Safety, Trans. RINA, Vol. 121, 1979.
- [29] P.A. Frieze and Y.T. Lin, Ship Longitudinal Strength Modelling for Reliability Analysis, Proc. Marine Structural Inspection, Maintenance, and Monitoring Symposium, SSC/SNAME, Arlington, March 1991.
- [30] A.E. Mansour, Ultimate Strength of a Ship's Hull Girder in Plastic and Buckling Modes, Ship Structures Committee Report No. SSC-299, 1980.
- [31] DnV, Rules for Classification for Ships, Det Norske Veritas Classification AS, January 1994.
- [32] KR, Development of Ultimate Longitudinal Strength Standard for Ships, Korean Register of Shipping, Report No. OR-04-93, July 1993.
- [33] E. Bendiksen, Hull Girder Collapse, Phd. Thesis, Department of Ocean Engineering, Technical University of Denmark, March 1992.
- [34] Y. Bai, E. Bendiksen and P.T. Pedersen, Collapse Analysis of Ship Hulls, J. of Marine Structures, Vol. 6, 1993.
- [35] A.E. Mansour, Y.H. Lin and J.K. Paik, Ultimate Strength of Ships under Combined Vertical and Horizontal Moments, Submitted for publication in the International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units (PRADS), Seoul, Korea, September 1995.
- [36] J.K. Paik and A.E. Mansour, A Simple Formulation for Predicting Ultimate Strength of Ships, Accepted for publication in the International Journal of Marine Science and Technology, February 1995.