

점진붕괴(Progressive Collapse)란 무엇인가?

조 상 래

〈울산대학교 교수〉

1. 글을 시작하면서

구조설계를 배우는 초급 과정에서부터 소개되는 것이 허용응력 개념이고 이는 구조 재료의 항복응력을 안전계수로 나누어 얻는 것으로 설명을 한다. 여기에 항상 덧붙여지는 것으로 안전계수는 경험에 의해 정해질 수 있다는 것인데 이 설명은 유경험자가 입문자에게 꺼낼 수 있는 전가의 보도일 수도 있겠다. 하지만 우리가 별 거부감없이 받아들인 개념들을 곰곰이 되씹어 보면 합리성이 부족하거나, 충분히 이해가 되지 않는 점들, 즉 개선의 여지를 지적할 수 있다. 이의 예로는 허용응력의 바탕이 되는 것이 항복응력인데 과연 구조물의 한 부위에 항복이 일어나면 어떤 상황이 발생하므로 피해야 된다는 설명은 주어지지 않는다는 것과 하중식이나 구조강도식에 등장하는 인자들이 확률분포를 하는 물리량인데도 이들의 평균값만 고려되고 분산은 반영되지 않는다는 점 등을 들 수 있겠다.

허용응력의 개념에 바탕을 둔 설계 방법을 개선하기 위해 제안된 것이 신뢰성 해석에 기초한 설계인데 이는 구조물의 기능을 잃게 되는 한계상태(Limit State)를 설계기준으로 삼아 이런 상황이 벌어질 확률을 정해 놓은 수준 이내로 만족시키자는 것이다. “선체 구조 신뢰성 해석법에 대하여”

이미 서울대 양 영순회원이 본 학회지에 해설 기사[1]로 기고하였으므로 여기에서는 이에 대해 더 언급하지 않겠고 본 해설에 필요한 보완적인 사항만 추가하기로 한다.

2. 한계상태(Limit State)

구조물로서의 기능을 잃게 되는 한계상태는 여러 방법으로 분류가 가능하겠으나 DnV 규정[2]의 것을 따르면 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 최종강도 한계상태(Ultimate Limit State)
- 피로강도 한계상태(Fatigue Limit State)
- 점진붕괴 한계상태(Progressive Collapse Limit State)
- 운항여건 한계상태(Serviseability Limit State)

각 한계상태에 대해 간략히 설명을 하면 다음과 같다.

- 최종강도 한계상태: 구조물이 견딜 수 있는 최대하중보다 큰 하중이 작용되어 붕괴가 되는 경우
- 피로강도 한계상태: 최대하중보다 작은 크기의 하중이 반복적으로 작용하여 구조물이 파괴되는 경우
- 점진붕괴 한계상태: 어떤 사고에 의해 구조물

에 국부적인 손상이 발생된 후 손상 구조물이 견딜 수 있는 최대하중(즉 잔류강도)보다 큰 하중이 작용하여 붕괴되는 경우

- 운항여건 한계상태: 상기 세 경우 어디에도 해당되지 않으나 구조물의 기능을 다하지 못하는 경우, 예를 들면 진동이나 소음이 허용값을 넘거나 구조물의 처짐이 지나쳐 탑재된 장비를 사용하지 못하게 될 때

상기 네 가지의 한계상태 중 이제까지 구조 관련 연구의 대부분은 최종강도 한계상태에 관한 것이고 비교적 최근에 와서 피로강도와 운항여건 한계상태에 관련된 연구가 활발해지고 있으며 본 해설에서 다루고자하는 점진붕괴 한계상태에 관한 연구는 아직 설계에 직접 적용할 수 있는 것이 극히 제한된 수준이다.

3. 점진붕괴(Progressive Collapse)

앞에서 설명하였듯이 어떤 사고에 의해 먼저 국부적인 손상이 발생하고 손상 구조물이 붕괴되는 것을 점진붕괴라고 하는데 여기에서는 사고라 함은 구조물 전체의 붕괴를 유발하는 대형사고(Major Accident)가 아니고 사고가 직접 발생된 부위나 이의 인접 부재에 손상이 국한되는 소형사고(Minor Accident)를 뜻한다. 대형사고의 경우는 구조설계자가 취할 수 있는 현실적인 대책은 없어 보이며 단지 사고의 사전 예방책을 강구하는 것이 효과적인 것으로 판단된다. 소형사고에 대해 구조설계자가 해야 할 일을 설명하고자 하는 것이 본 해설 취지의 일부인데 이의 예로는 선박의 접, 이안시의 충돌, 하역작업 중 실수에 의한 화물의 낙하, 해양구조물과 보급선의 충돌, 군함의 경우 폭발이나 포의 발사로 인한 충격 등을 들 수 있겠다.

점진붕괴를 보다 합리적으로 설계 단계에서 다루기 위해서는 다음의 세 가지 사항에 대해 추정할 수 있어야 하겠다.

- 손상을 일으킬 사고의 발생확률

- 정의된 사건에 의한 구조물의 손상정도 (Extent of Damage)

- 손상된 구조물의 잔류강도(Residual Strength)

만약 설계하고자 하는 선박이나 해양구조물에 대해 위의 세 가지 사항을 추정할 방법이 확보되어 있다면 초기 투자를 많이해 운항 중의 수리비를 줄일 것인지 아니면 그 반대의 경우를 택하는 것이 생애 비용을 최소화할 것인지에 대한 검토를 할 수 있겠다.

하지만 대부분의 선박이나 해양구조물의 경우 점진붕괴를 설계 단계에서 고려할 수 있는 수단이 갖추어져 있지 않아 구조물 생애 비용의 최적화 작업은 아직 요원한 목표이다. 고정식 해양구조물 설계를 위한 몇몇 규정[3, 4, 5]에서는 설계시 보급선과의 충돌을 고려하도록 명시하고 충돌 보급선의 배수량과 충돌속도를 제시하고 있다. 따라서 이런 경우에는 점진붕괴 해석의 두번째 단계인 손상정도의 추정 작업을 수행할 수 있게 되겠다.

4. 손상을 일으킬 사고의 발생확률

다른 형태의 사고 추정 문제와 마찬가지로 이 경우에도 과거의 기록을 통계 처리하여 추정식을 개발하는 방법과 사고 상황을 이론적으로 구현할 수 있는 모형을 개발하고 이를 이용하는 방법이 적용될 수 있겠다. 과거 기록의 통계처리 방법을 따르는 경우 부딪히게되는 어려움은 기록된 사건의 수효 부족을 들 수 있겠고 다행히 그 수효가 의미있는 결과를 줄 수 있는 수준이라 하더라도 책임회피 등의 이유로 필요한 사항들이 누락되어 있거나 불성실하게 기재되는 경우가 많다는 점이다.

과거 기록을 통계처리하여 사고 발생 확률을 추정하는 방법의 어려움을 극복하기 위한 것이 이론적으로 사고 상황을 구현하는 모형을 개발하여 이용하는 방법이다. Standing과 Brending [6]은 해양구조물 운영자에 대한 설문조사 결과를

바탕으로 보급선과 해양구조물의 충돌 확률이 제일 높은 상황의 시나리오를 네 가지 선정하였다. 이 네가지 시나리오에 대해 파도, 조류 등의 해상 상태에 관한 조건을 고려하여 보급선의 운동을 해석하고 여러 상황에 대한 충돌 속도의 평균치와 분산 등을 구하였다.

구조물에 손상을 일으킬 사고의 발생확률을 보다 정확히 추정하기 위해서는 먼저 이론적으로 이를 구현할 모형을 개발하고, 정확하고 자세한 과거의 기록을 이용하여 개발된 모형을 검증하고 이를 사용하여 필요한 정보를 만들어야 하겠다. 하지만 이런 작업이 구조설계자에 의해 이루어지는 것인 어려울 것이고 설계 규정을 제정하는 기관이 관련 연구를 주도하고 연구 결과를 바탕으로 설계 기준을 도출하는 것이 바람직하다고 보여진다.

5. 구조물의 손상 추정

사고의 발생확률이나 설계기준이 주어지는 경우 다음 단계의 작업은 정의된 사고로부터 예상되는 손상 정도의 추정이다. 선박이나 해양구조물의 손상정도 추정에 필요한 설계 지침은 아직 설계 규정에서 다루지 않고 있고 관련된 연구 또한 다른 분야에 비해 그리 활발하지 못하다. 그러나 캘리포니아만이나 멕시코만보다 해상이 거친 북해의 유전 개발은 이 분야에 대한 관심을 불러 일으켰고 최근 활발히 진행되는 이중선각 유조선의 개발 또한 이 분야 연구에 박차를 가하리라 예상된다.

사고로 인한 구조물의 손상 범위와 정도의 추정에 있어 첫번째 어려움은 과연 이 문제를 동적인 것으로 다루어야 하는지 아니면 준정적인 문제로 풀어야 하는지이다. 이에 대한 원칙적인 기준은 구조물의 탄성 변형에너지를 무시할 수 있고 또한 구조재료 항복응력의 변형률(Strain rate)에 대한 민감도 등의 동적 효과를 무시한다는 가정이 적용될 수 있는 경우에는 준정적인 문제로 처리할 수 있다는 것이다. 하지만 지금 우리가 관심을 갖는 소형사고의 경우는 이에 대한 판단에 도움이

되는 정보는 그리 많지 않다. 두번째로는 해석 소요 시간을 들 수 있는데 만약 동적 해석을 해야 되는 경우는 대변형과 재료의 소성으로 인한 비선형성 때문에 계산시간이 많이 소요되는 단계별적분법(Step-by-Step Integration Method)을 사용해야 하기 때문이다[7]. 따라서 구조설계자가 직접 손상 추정 해석을 한다는 것은 비현실적으로 보여지고 수치해석법을 개발한 후 이를 사용하여 여러 경우에 대한 해석을 수행한 후 간편한 추정식을 유도하여 설계자에게 제공하는 것이 바람직하다고 하겠다.

선박이나 해양구조물의 손상 추정과 관련하여 최근 국내외에서 이루어진 연구들을 몇몇 소개하기로 한다. Samuelides와 Frieze[8]는 선축 충돌 문제에 대해 구조물의 재료 및 기하학적 비선형성은 물론 충돌 중 주변 유체의 응답을 고려하여 해석하였다. Frieze와 Cho[9]는 충돌차와 활주로를 이용하여 원통튜브에 대한 일련의 충돌시험을 하였고, Allan과 Marshall[10]은 진자형 충돌장치를 사용하여 원통튜브의 손상실험을 수행하였다. 또한 Goda등[11]은 T-단면 보에 충격하중이 작용될 때의 거동에 대한 일련의 실험을 수행하였으며, Ueda 등[12]은 해양구조물의 충돌시 유체력이 미치는 영향에 대해 수치해석과 실험 연구를 하였다.

조[13]는 두 개의 비선형 스프링으로 해양구조물 원통부재의 충돌문제를 이상화하였고, 참고문헌 14에는 이 모형을 사용하여 여러 경우에 대한 해석을 수행한 후 원통의 손상에 의해 흡수되는 에너지의 양, 전체굽힘 및 국부 우그러짐 손상량을 추정할 수 있는 설계식을 제공하였다. 백과 김[15]은 이상화 구조요소법을 사용하여 좌초시 선저 손상을 추정할 수 있는 방법을 개발하였고, 양[16]은 선수 구조요소의 압괴에 의해 흡수되는 에너지를 계산한 후 이를 이용하여 선수구조의 충돌에 의한 손상 정도를 추정하는 방법을 제안하였다.

6. 손상 구조물의 잔류강도

손상을 입은 구조물의 최종강도(즉 잔류강도)의 추정에는 설계 단계에서의 점진붕괴 해석 뿐만 아니라 선박이나 해양구조물의 운용자에게도 필요한 작업이다. 어떤 사고에 의해 구조물에 손상이 발생한 경우 운용책임자는 선박의 경우 최악의 상태에서는 퇴선 명령을 내려야 할 것이고 그런 상황이 아니라 하더라도 당장 입거하여 수리를 하느냐 아니면 정기 입거시까지 기다리느냐의 판단을 신속히 내려야 한다. 해양구조물의 경우도 이와 유사한데 고정식 구조물의 경우는 현지에서 수리를 하여야하기 때문에 수리 비용이 엄청날 수 있겠다. 이런 상황에서 운용책임자에게 필요한 것은 시간이 많이 소요되는 복잡한 해석방법이 아니라 어느정도의 오차를 감수하더라도 신속한 판단에 도움이되는 지침일 것은 어렵지 않게 짐작된다.

지금까지 보고된 연구 결과의 수준은 아직 운용자에게 직접 도움이 될 정도는 아니며 주로 손상 부재의 잔류강도 추정에 관한 것이고 손상 부재가 있는 구조물 전체의 잔류강도의 추정기법이나 해석 결과에 관한 것은 그리 많지 않다. Smith와 Dow[17]는 손상이 선체와 해양구조물의 강성 및 강도에 미치는 영향과 관련된 연구결과들을 정리 분석하고 잔류강도 해석을 위한 간이기법들도 제안하였다.

손상원통의 잔류강도는 Smith 등[18]이 이 분야의 연구를 시작한 이래 비교적 활발히 연구가 추진된 분야이다. 참고문헌 19-21에는 손상원통이 축압축력을 받는 경우에 대한 이론 및 실험연구가 보고되어 있으며 Ueda와 Rashed[22]는 단순 굽힘 하중, Frieze와 Cho[9]는 축압축력과 수압의 조합하중 그리고 백과 신[23]은 축압축력과 굽힘모멘트가 조합된 하중 하 손상원통의 거동을 실험적으로 조사하였다. 조는 축압축력과 수압의 조합하중[24]과 여기에 굽힘모멘트도 조합된 하중[25]이 작용할 때의 잔류강도를 손쉽게 추정할 수 있는 설계식을 유도하였다. 그리고 Ronalds

와 Dowling[26], Smith와 Creswell[27]은 각각 중속 골 보강원통과 원환 보강원통의 강도에 대한 손상의 영향을 조사하였다.

7. 글을 맺으면서

일본 히로시마대의 Yao 교수는 최근 그의 논문 [28]에서 Progressive Collapse를 본 해설과는 달리 최종강도 한계상태에 도달하는 과정에서 구조물의 구성 부재 개개가 점진적으로 붕괴되는 의미로 사용하였다. 따라서 점진붕괴로 번역된 Progressive Collapse라는 용어는 아직도 전문가들 사이에 잘 정의된 것으로 보기 어렵다고 할 수 있겠다. 만약 어떤 용어에 대한 해설을 이미 전문가들 사이에서는 잘 정의되어 있는 내용을 해당 분야에 조예가 깊지않은 사람들에게 보다 평이한 방법으로 설명하는 것으로 정의한다면 이 해설은 그 정의를 벗어나는 것이라 할 수 있겠다. 그럼에도 불구하고 본 해설을 기고한 이유는 아직 부위들에 대한 우리말 용어가 익숙치 않고 조리법 또한 정립되지 않은 생선이라 하더라도 일단 도마 위에 올려 놓으면 적절한 우리말 용어나 좋은 조리법 등이 빨리 정착되지 않을까하는 바램에서이다. 필자의 부족한 이해나 용어의 부적절한 번역에 대한 독자 여러분의 주저없는 지적을 바라면서 글을 맺는다.

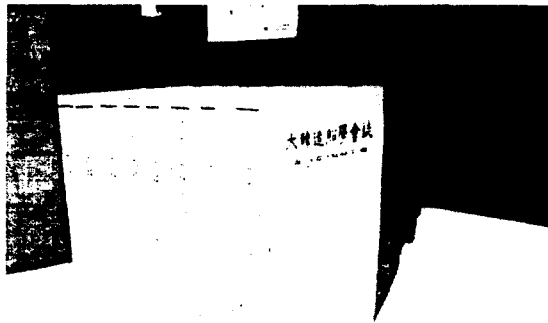
참 고 문 헌

- [1] 양영순 “선체구조 신뢰성 해석법에 대하여”, 대한조선학회지 제27권 제3호, 127-130쪽, 1990.
- [2] Det norske Veritas “Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures”, Oslo, 1977.
- [3] Det norske Veritas “Impact Loads from Boats: Fixed Offshore Installations”, Technical Note TNA 102, Oslo, 1981.

- [4] British Standard Institution "Code of Practice for Fixed Offshore Structures", BS 6235, London, 1984.
- [5] Det norske Veritas "Rules for Classification of Mobile Offshore Units", Part 3, Oslo, 1984.
- [6] Standing, R.G. and Brending, W. "Collisions of Attendant Vessels with Offshore Installations : Part 1-General Description and Principal Results", Dept of Energy(UK) Offshore Technology Report OTH 84208, HMSO, London, 1985.
- [7] Cook, R.D., Malkus, D.S. and Plesha, M.E. "Concepts and Application of Finite Element Analysis", Chap. 13, 3rd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [8] Samuelides, E. and Frieze, P.A. "Fluid-Structure Interaction in Ship Collisions", *Marine Structures*, vol.2, No.11, pp.65-88, 1989.
- [9] Frieze, P.A. and Cho, S-R "Dynamic Impacts to Tubulars and Their Residual Strength", *Proc. 4th Intl Symp. on Practical Design of Ships and Mobile Units*(PRADS '89), Varna, pp.50/1-50/7, 1989.
- [10] Allan, J.D. and Marshall, J. "Ship Impact on Steel Tubulars", Dept of Energy(UK), Offshore Technology Information series, OTI 88532, HMSO, London, 1988.
- [11] Goda, K. et al "Lateral Buckling of a Thin-Walled Beam Subjected to Impulsive Load(4th Report)", *Jour. Society of Naval Architects of Japan*, Vol.168, pp.339-345, 1990(in Japanese).
- [12] Ueda, Y. et al "Effect of Fluid Force on Elastic-Plastic Response of Offshore Structures under Collision", *Jour. Society of Naval Architects of Japan*, Vol.168, pp.409-417, 1990(in Japanese).
- [13] 조상래 "Development of a Simplified Dynamic Analysis Procedure for Offshore Collisions", *Jour. Society of Naval Architects of Korea*, Vol.27, No.4, pp.72-82, 1990 (in English).
- [14] Cho, S-R and Frieze, P.A. "Predicting the Extent of Damage of Offshore Tubulars due to Collisions", *Proc. 1st Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp.* (PACOMS '90), Seoul, Vol.Ⅲ, pp.339-346, 1990.
- [15] 백점기, 김창렬 "이상화 구조요소법에 의한 좌초시 이중저 구조의 손상 및 강도 해석", 대한조선학회 논문집 제28권 제1호, 125-138, 1991.
- [16] 양 박달치 "충돌시 선수구조의 손상추정에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제29권 제2호, 92-102, 1992.
- [17] Smith, C.S. and Dow, R.S. "Residual Strength of Damaged Steel Ships and Offshore Structures", *Jour. of Constructional Steel Research*, Vol.1, No.4, pp.2-15, 1981.
- [18] Smith, C.S., Kirkwood, W. and Swan, J.W. "Buckling Strength and Post-Collapse Behaviour of Tubular Bracing Members Including Damage Effects", *Proc. 2nd Intl Symp. on Behaviour of Offshore Structures*(BOSS '79), BHRA Fluid Engg, Cranfield, pp.303-326, 1979.
- [19] Taby, J., Moan, T. and Rashed, S.M.H. "Theoretical and Experimental Study of the Behaviour of Damaged Tubular Members in Offshore Structures", *Norwegian Maritime Research*, Vol.9, No.2, pp.26-33, 1981.
- [20] Ellinas, C.P. and Walker, A.C. "Effects of Damage on Offshore Tubular Bracing Members", *Proc. IABSE Colloquium on Ship Collision with Bridges and Offshore Structures*, Copenhagen, pp.253-261, 1983.

- [21] Smith, C.S. "Assessment of Damage in Offshore Steel Platforms", in *Marine and Offshore Safety*, eds. Frieze, P.A., McGregor, R.C. and Winkle, I.E., Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp.279-307, 1984
- [22] Ueda, Y. and Rashed, S.M.H. "Behaviour of Damaged Tubular Structural members", *Jour. of Energy Resources Technology*, ASME, Vol.107, pp.342-349, 1985.
- [23] 백집기, 신병천 "해양구조물 원통부재의 최종 강도에 대한 손상의 영향", 한국해양공학회지, 제3권 제2호, 577-586, 1989.
- [24] 조상래 "Design Equation for Predicting the Residual Strength of Damaged Tubulars under Avial Compression and Hydrostatic Pressure", *Jour. Society of Naval Architects of Korea*, Vol.26, No.4, pp.44-56, 1989.
- [25] 조상래, 곽동일 "복합하중에 대한 손상원통의 잔류강도", 한국해양공학회지, 제3권 제2호, 618-624쪽, 1989.
- [26] Dowling, P.J. and Ronalds, B.F. "On the Behaviour of Damaged and Intact Stiffened Cylindrical Shells", *Proc. Structural Stability Research Council(SSRC) Annual Technical Session*, Houston, pp.265-274, 1987.
- [27] Smith, C.S. and Creswell, D.J. "Effects of Damage on the Strength of Ring-Stiffened Cylinders under External Pressure", *Proc. 3rd Intl Sym. on Practical Design of Ships and Mobile Units(PRADS '87)*, Trondheim, pp.1004-1015, 1987.
- [28] Yao, T. and Nikolov, P.I. "Progressive Collapse Analysis of a Ship's Hull under Longitudinal Bending", *Jour. of Society of Naval Architects of Japan*, Vol.170, pp.449-461, 1991(in English).

대한조선학회지 제20권 1호부터 제27권 4호까지(총32권)을 4권으로 나누어 합본하였습니다. 한정된 부수를 제작한 관계로 구입을 희망하는 회원에게 신청순서에 따라 판매하고 있습니다.



4×6배판
價格：卷當 8,000원
(우송료 별도)

Vol.9 1983~1984, Vol.10 1985~1986 Vol.11 1987~1988, Vol.12 1989~1990

希望하시는 會員은 學會로 連絡바랍니다.

社團 法人 大韓造船學會

서울特別市 江南區 驛三洞 635-4
電話 568-7533, FAX 554-1006