

Dent 손상을 갖는 원통부재의 최종강도에 관한 연구(제2보) -굽힘 하중을 받는 경우-

노인식^{†*}, 전태병^{**}, 조병삼^{***}

충남대학교 선박해양공학과*,
한국해양연구원 해양시스템안전연구소**, 한국선급***

Ultimate Strength of Dented Tubular Members(2nd report) -under Bending Loads-

In Sik Nho^{†*}, Tae Byng Chun^{**} and Byung Sam Cho^{***}

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University*
Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering/KORDI**
Korean Register of Shipping***

Abstract

Several types of steel structures which are employed in offshore petroleum activities are constructed with tubular members. These structures are usually subjected to various types of loads such as normal functional loads and environmental loads. Furthermore, accidental loads may also act on the leg or bracing members due to supply boat collisions and objects droppings from platform decks. The extent of damage caused by these loads ranges from total collapse of the structure to small damage which may not have serious consequence at the time of accident. To make optimal design decisions regarding structural safety and economical efficiency, it is very important to be able to assess the influence of damages on the performance of damaged structural members. In the 2nd report, a series of calculations is performed to study the effects of different parameters on the load carrying capacity of such damaged members under pure bending. And the results of analysis are compared with experiment results.

※Keywords: Dented tubular members(손상된 원통부재), Pure bending(순수굽힘), Load carrying capacity(내하력), Deformed shape(변형형상), Ultimate strength(최종강도)

접수일: 2004년 6월 16일, 승인일: 2004년 8월 30일

† 주저자, E-mail: isnho@cnu.ac.kr

Tel: 042-821-6621

1. 서 언

해양구조물의 구성부재로서 원통부재가 널리 쓰이고 있다. 이러한 원통부재는 기본적으로는 전단력, 축력 및 굽힘 하중하의 작용 하에 있으며 극심한 해상상태에서도 응력이 허용치를 넘지 않도록 설계되어 있다. 그러나 실제로는 보급선의 충돌 또는 갑판으로부터의 중량물의 낙하 등으로 인하여 손상이 자주 발생한다. 일반적으로 이러한 손상은 최종 강도를 저하시켜(Smith et al. 1979) 최종적으로는 구조물 전체의 강도도 저하시키게 된다. 또한, 실제 건조 과정에서도 구조물에 초기부정이나 용접변형 및 잔류응력이 존재하므로, 이러한 요인들 역시 구조물의 강도에 영향을 끼친다. 따라서 이러한 손상의 결과로 인하여 구조물의 강도에 미치는 영향이 크다고 판단되는 경우에는, 부분적인 수리 또는 부재의 교체가 필요하게 된다. 이 수리여부의 결정을 위해서는 경제성 및 안전성 측면에서 검토가 이루어져야하고, 이를 위해서는 손상의 영향을 정도 높게 추정할 수 있어야 한다. 또한, 설계의 초기단계에서부터 손상의 발생을 가정하고 구조물의 안전성을 검토할 수 있으면, 건조와 수리를 포함한 건조비의 최적화에도 매우 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

이러한 손상의 영향을 정밀하게 추정하기 위해서는 여러 가지의 영향인자를 포함한 비선형거동의 해석기법이 요구되며 현재까지는 유한요소법이 가장 유력한 것으로 알려져 있으나 계산시간의 단축을 위한 다양한 간이 해석법에 관한 연구들이 수행된 바 있다(Ueda et al. 1983,1985, Rashed 1980, Moan et al. 1985). 한편, 백정기/신병천(1989)은 굽힘 및 국부손상을 가진 원통부재가 축력, 굽힘모멘트 및 이들의 조합하중을 받는 경우의 최종강도를 이론적 및 실험적 방법으로 평가하고, 원통부재의 최종강도에 관한 손상의 영향을 검토하였다. 또한, 조상래/곽동일(1989)은 축압축력과 수압 및 단 굽힘 모멘트를 받는 손상원통의 잔류강도를 계산하는 설계식을 도출하였다.

해양구조물의 구성요소인 원통부재는 기본적으로는 보-기둥(Beam-column)으로서 거동하지만 하중의 증가와 함께 최종강도에 도달하기까지 좌

굴, 소성 변형 등의 복잡한 비선형 거동을 나타낸다. 이같은 비선형 거동을 정확하게 파악하기 위해서는 원통부재를 다수의 쉘 요소로 모델링한 탄소성 대변형 유한요소해석을 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 dent 손상을 갖는 원통부재의 내하력을 실험과 해석을 통하여 고찰하였다. 우선 제1보(전대병 등 2004)에서 축 하중에 대한 구조 거동을 다루었고, 이어서 이번 제2보에서는 순수 굽힘 하중을 받는 경우를 대상으로 dent 손상이 최종강도에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 손상된 원통부재의 굽힘 시험

순수 굽힘을 구현하기 위하여 Fig. 1과 같이 200ton 만능 시험기를 이용하여 4점 굽힘 시험을 실시하였다. 지지점과 하중점에서는 시험체의 국부 변형을 방지하기 위해, 시험체와 지지 roller사이, 시험체와 재하보의 사이에는 지지 틀을 삽입하였다. 또, 재하보의 roller와 지지 틀 사이에는 1.0 mm 두께의 테프론 시트를 끼워서 굽힘에 의해 생기는 축 방향 변위에 대한 마찰에 의한 구속을 경감함으로써, 축방향의 힘이 생기지 않도록 하였다.

우선, 실험의 기준치를 얻기 위하여 dent 손상이 없는 시험체에 대해서 4점 굽힘 시험을 수행하였다. 시험체의 길이는 손상이 있는 시험체와 마찬가지로 1,300mm로 하였다. 그리고 손상 시험체에 대한 실험은 미리 생성한 dent를 갖는 시험체를 각각 손상이 굽힘의 인장 측 및 압축 측에 있는 2가지의 경우에 대해 4점 굽힘 시험을 실시하였다.

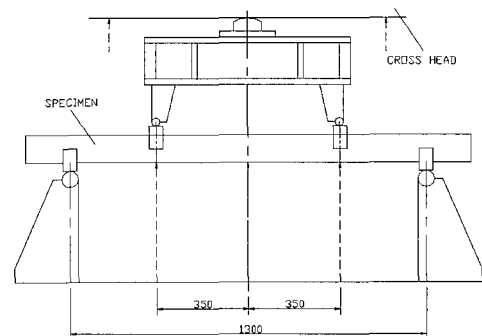


Fig. 1 Test setup in pure bending specimen

2.1 dent가 굽힘의 압축 측에 있는 경우

Fig. 2에 굽힘 모멘트와 cross head의 처짐량의 관계를 나타낸다. dent 깊이가 직경의 20%, 10%의 경우 모두 손상이 없는 경우와 비교하여 최종강도가 크게 저하하였다. 이것은 굽힘 모멘트의 증가와 함께 dent 역시 성장해가기 때문이다.

또, 최종강도는 dent 깊이가 클수록 현저히 저하하지만, 초기 강성은 손상이 없는 경우와 비교하여 거의 변화하지 않는다. 그러나 dent 깊이가 직경의 20%인 경우에는 굽힘 모멘트가 6 kN·m을 넘으면서 강성의 저하가 현저해지기 시작한다. 이것은 이 단계에서 dent 하부가 항복하기 때문인 것으로 보인다. Table 1에 실험 결과를 나타냈다.

Fig. 3은 굽힘 모멘트와 dent 저부, dent로부터 100mm 및 230mm 떨어진 장소에서의 굽힘 모멘트와 축 변형률의 관계를 나타낸다. dent 양이 직경의 20%인 경우, 각각의 계측점에서 압축 측으로 변형률이 증가하고 있다. 즉 이것은 굽힘에 의한 압축하중을 충분히 견딜 수 있다는 것을 의미한다. 최종강도 부근에서 압축 측으로부터 인장 측으로 변형률이 변화하는 데, 이것은 dent의 성장이 이

Table 1 Maximum load after pure bending

	No dent	0.10D	0.20D
최종강도 (kN·m)	19.09	17.46	13.91
강도저하량(kN·m)	—	1.63	5.18
강도저하율 (%)	—	8.5	27.1

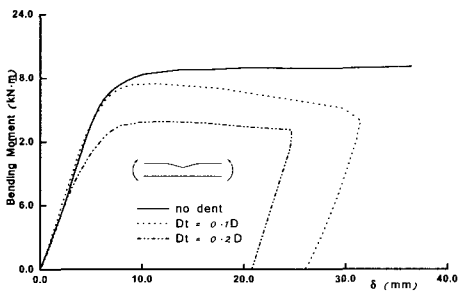


Fig. 2 Bending moment–displacement relationship

부근에서 급격히 진행된 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4에는 굽힘 모멘트와 dent 단면의 축 방향 변형률의 관계를 나타낸다. dent 깊이가 직경의 20%인 경우, 굽힘 모멘트가 7 kN·m을 넘으면서 계측점 4는 소성화되는 것으로 보이는 데, 단면의 인근 부분의 구속에 의해 변형률의 증가가 억제되고 있는 현상이 보인다. 이것은 dent가 굽힘의 인장 측에 있는 경우와 같은 경향이다. 또, 계측점 1은 굽힘의 중립축에 가까우므로 초기 단계에서는 변형률의 변화가 별로 크지 않지만, 8 kN·m 부근에서 인장방향으로 변형률이 변화한다. 이것은 dent가 깊게 형성됨에 따라 이 계측점까지 편평화가 진행된 때문인 것으로 여겨진다.

2.2 dent가 굽힘의 인장 측에 있는 경우

Fig. 5에 굽힘 모멘트와 처짐의 관계를 보였다. Dent 크기가 직경의 10% 및 20%의 경우에도, 최

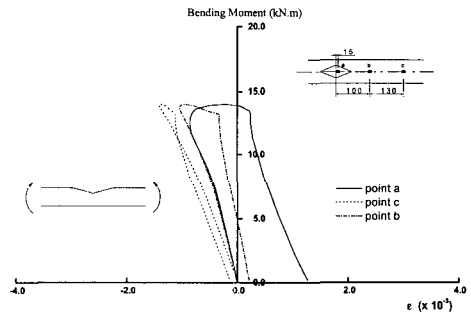


Fig. 3 Bending moment–axial strain relationships

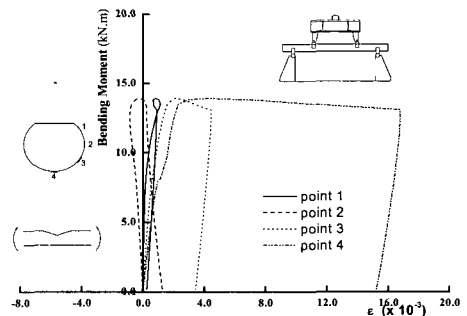


Fig. 4 Axial strains at dented section

종강도는 손상이 없는 경우와 거의 같은 수준이다. 이것은 최종강도에 도달한 상태에서는, dent가 인장력을 받아 거의 대부분 회복되었기 때문이며, dent의 존재가 강도 저하의 원인으로 작용하지 않고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 dent 깊이가 직경의 20%인 경우 굽힘 모멘트와 dent 하부 및 dent로부터 100mm 및 230mm 떨어진 곳에서의 축 변형률의 관계를 나타낸다. b 및 c의 경우 모두 굽힘 모멘트의 증가와 함께 축 변형률도 증가한다. 한편, dent 저부에서는 초기에 인장 변형률이 발생하나, 점차 압축으로 변화해 가고 있다. 따라서 dent 하부에서는 굽힘에 의한 인장응력이 작용하지 않는다.

Fig. 7은 굽힘 모멘트와 dent 하부의 축 방향 및 원주방향의 변형을 관계를 나타낸다. dent 양이 직경의 20% 경우에는 굽힘 모멘트의 증가와 동시에 원주방향의 변형률이 증가하는 데, 이것은 편평해진 dent 하부가 원래의 단면 형상을 회복하려 하는 것이기 때문으로 여겨진다. 20 kN·m 부근에서 축방향의 변형률이 압축 측에서 인장 측으로, 원주방향의 변형률이 인장 측에서 압축 측으로 변화한다. 이것은 이 굽힘 모멘트에서 dent가 원래 단면 형상으로 거의 회복하였기 때문으로 판단할 수 있다.

Fig. 8에 굽힘 모멘트와 dent 단면의 축방향 변형률의 관계를 나타낸다. dent 깊이가 직경의 20%인 경우, 계측점 4에서는 18 kN·m 부근에서부터 급격히 압축 변형률이 증가하고 있다. 또, 이 점들은 이미 소성화된 것으로 여겨진다. 그러나, 단면의 소성화하고 있지 않은 다른 부분에 의해 변형이 구속됨으로써 변형률의 증가가 저지되는 것으로 여겨진다. 이것은 계측점 3에서 현저히 나타났다. 굽힘 모멘트가 18 kN·m을 초과할 때부터는 압축 변형률이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 이 시점에서 소성화가 시작된 것으로 여겨진다. 그러나 그 후 또 증가량이 줄어들고 있는데, 이것은 단면의 소성화되지 않는 다른 부분에 의해 변형이 구속되어 있는 것이라 볼 수 있다. 또, 계측점 1에서는 초기에 인장 변형률이 발생하는데, 18 kN·m 근방에서 압축방향으로 변형률이 변화하고 있다. 이것은 dent 부가 시 단면이 편평화하여 계측점 1의

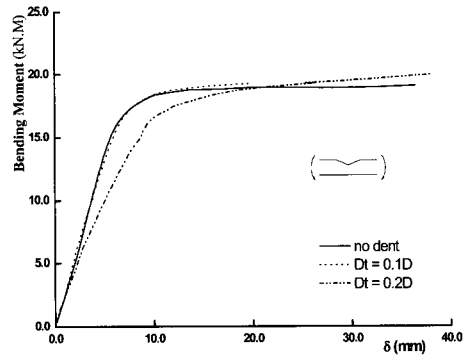


Fig. 5 Bending moment-displacement relationships

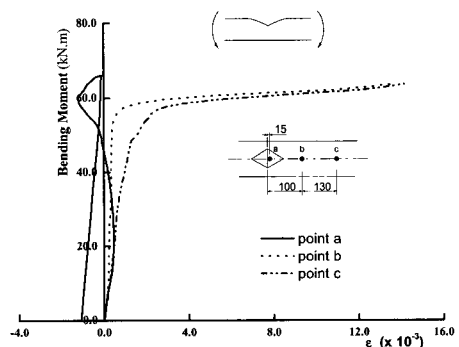


Fig. 6 Bending moment-axial strain relationship

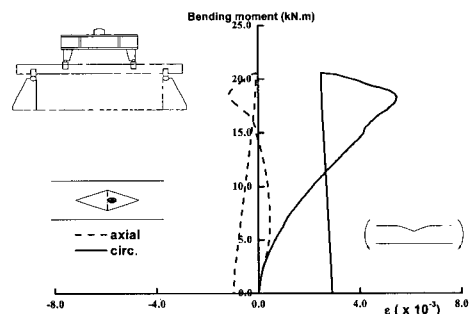


Fig. 7 Bending moment-axial strain relationships at the center of dented part

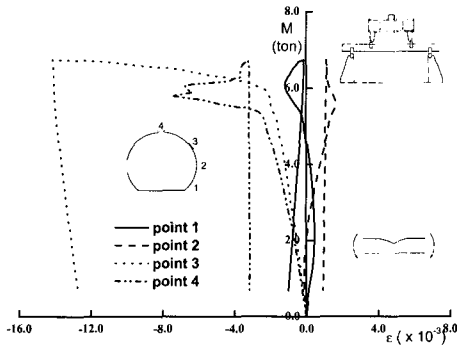


Fig. 8 Axial strains at dented section

부분에서 팽창하였기 때문에 dent가 회복함에 따라 원래의 단면으로 되돌아가려하기 때문으로 판단된다.

앞에서도 언급하였지만, Fig. 6은 dent가 굽힘의 인장 측에 있는 경우의 dent 부의 축 방향 변형률과 굽힘 모멘트의 관계를 나타낸 것인데, dent 하부의 변형률은 처음 인장 측으로 증가하다가 점차로 압축 측으로 증가해간다. 이것은 굽힘에 따른 인장에 의하여 dent가 회복할 때에 dent 부가 주위의 탄성 영역으로 남아 있는 부분의 구속에 의해 압축을 받아 압축변형률이 발생하고, 전체적인 굽힘 하중에 의해 인장 변형률을 소거시키기 때문이다. 따라서 dent 부근은 굽힘에 의한 인장하중을 받지 않는 것이 된다. 다시 말하면 dent 부근의 일정 범위 내에서는 단면 2차모멘트가 작아지므로, 이것이 dent가 굽힘의 인장 측에 있는 경우에 굽힘 강성이 저하하는 원인이 된다.

그런데 dent가 굽힘의 인장 측에 있는 경우, 강성의 저하량은 Fig. 9와 같은 보 모델을 고려하면 간단히 계산할 수 있다. 즉, 보의 단부는 완전한 원단면, 중앙부분은 dent저의 부분이 없는 불완전 단면으로 한다. 이와 같은 모델 1을 가정하면, 굽힘 강성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{Pa}{\delta} = EI \left[\frac{aL}{2} - \frac{I}{I_0} \frac{2a^2}{3} - (L - La) \frac{a}{2} - (L - Ld) \frac{a}{2} \right] \quad (1)$$

실험체의 경우, dent 회복의 영향으로 굽힘 강성이 작아진 부분의 길이를 직경의 2배로 하면,

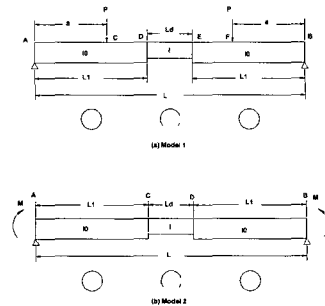


Fig. 9 Model to evaluate flexural rigidity

dent 깊이가 직경의 20%인 경우의 강성 저하율은 약 25%가 되어 실험결과와 거의 일치하고 있다.

실제의 해양구조물의 원통부재에서는 4점 굽힘과 같은 하중조건은 없다. 따라서 보다 일반적인 경우로서 3점 굽힘을 받는 모델2의 경우를 가정하고, 굽힘 모멘트와 중앙부의 처짐 관계를 이용하여 굽힘 강성을 나타내면 다음과 같다.

$$ML^2/8\delta = \frac{EI}{1 - (1 - I/I_0)(1 - Ld/L)^2} \quad (2)$$

이 식으로부터 확인할 수 있는 바와 같이 dent가 깊어지면 단면 2차모멘트가 작아져 강성이 저하되는 것을 알 수 있다. 또, 본 논문의 대상 시험체의 길이는 비교적 짧기 때문에 강성은 상당히 크게 저하되나, 실제 해양구조물의 원통부재는 길이가 매우 길기 때문에 (2)식의 분모는 비교적 작아져 강성의 저하량은 상대적으로 작아진다.

3. 원통부재의 유한요소 해석

Dent 손상을 갖는 원통형 부재의 굽힘 모멘트에 대한 내하력을 계통적으로 평가하는 한편, 실험 결과와의 비교를 위한 목적으로 4점 굽힘 시험을 수행한 시험체에 대해 유한요소법을 이용한 탄소성 대변형 해석을 실시하였다.

3.1 해석 모델

해석 모델은 기본적으로 제1보의 dent 생성 및 축 하중 해석에 사용된 모델과 동일하다. 제1보의

축 하중 해석에서와 마찬가지로 Dent 생성 시 발생하는 변형과 잔류응력을 모두 현실적으로 고려하기 위하여 dent 생성 해석 결과를 restart하여 굽힘 하중에 대한 해석을 수행하였다.

3.2 dent부가 굽힘의 압축에 있는 경우

Fig. 10과 Fig. 11은 굽힘에 의해 dent부가 압축하중을 받았을 때 단면형상 및 길이방향의 처짐 곡선을 나타냈다.

그림에서 보는 바와 같이 $Dt=0.05D$ 의 경우에는 처짐이 매우 작아 dent가 없는 경우와 유사하게 거동한다. 이것은 dent 깊이가 직경의 5%의 경우에는 부재의 거동에 있어서 dent의 영향이 거의 없다는 것을 의미한다. 그러나 10%부터는 dent의 영향으로 그 처짐이 상당히 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

Dent 손상 깊이에 따른 최종강도의 영향을 Fig. 12에 정리하였다. 또한, Fig. 13에는 실험결과와

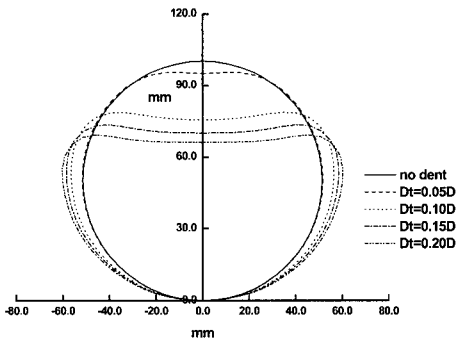


Fig. 10 Deformed shape at dented section

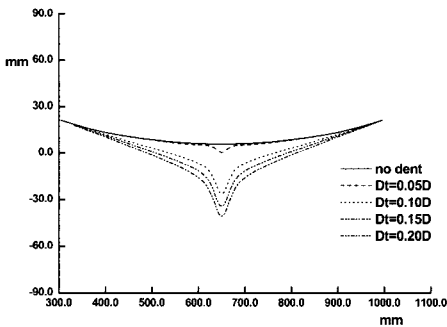


Fig. 11 Longitudinal deformed shape

비교하여 나타냈다. Fig. 12로부터 굽힘 모멘트를 적게 받는 초기 단계의 강성은 거의 저하하지 않으나 그 후, dent 하부에 항복이 발생하면 강성은 초기 dent 깊이에 따라 저하하고, 그 후 최종강도 역시 dent 깊이에 따라 크게 저하하는 것을 알 수 있다. 제1보의 축 하중에 대한 거동과 마찬가지로 $Dt=0.05D$ 에서는 하중-변위의 거동이 dent 손상이 없는 부재의 거동과 매우 유사하나 0.10D 이상부터는 강도저하가 급격히 일어남을 볼 수 있다.

3.3 dent가 굽힘의 인장 측에 있는 경우

Fig. 14과 Fig. 15는 굽힘에 의해 dent부가 인장하중을 받았을 때의 단면형상 및 길이방향의 처짐 곡선을 나타냈다. Dent부가 압축하중을 받는 경우와 달리, 초기에 있었던 dent부위가 점차 회복되는 양상을 보이고 있다.

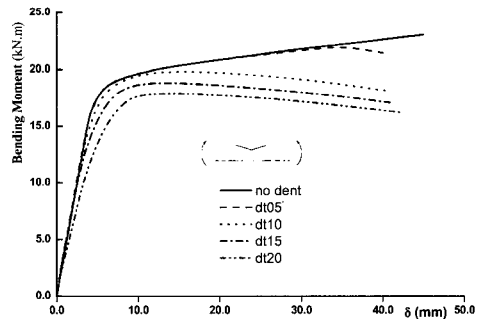


Fig. 12 Comparison of the bending moment-displacement relationship

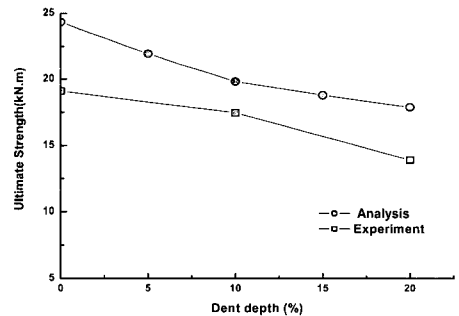


Fig. 13 Comparison of the ultimate strength

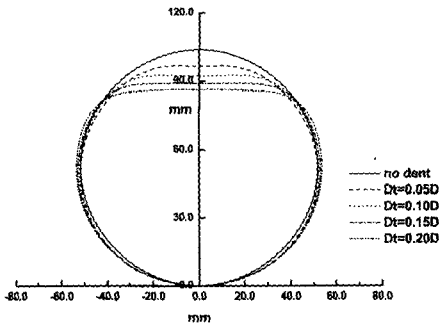


Fig. 14 Deformed shape at dented section

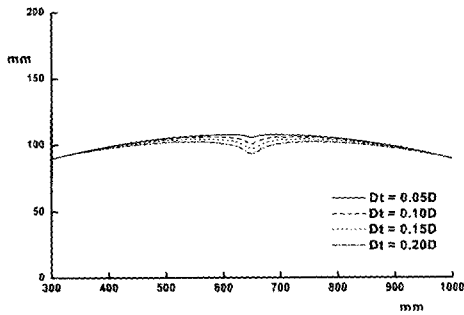


Fig. 15 Longitudinal shape

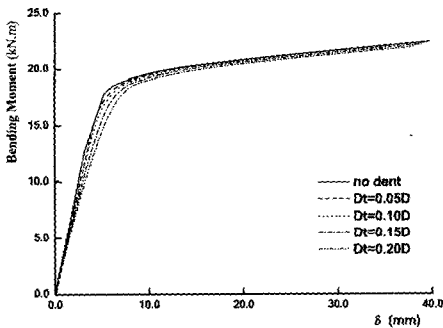


Fig. 16 Bending moment-displacement relationship

Fig. 16에는 dent 깊이에 따른 굽힘 모멘트와 처짐에 대한 비교를 나타냈는데, 보는 바와 같이 dent 깊이가 커짐에 따라 초기 굽힘 강성이 저하한다. 그러나 dent 깊이에 관계없이 최종강도는 크게 변화하지 않는다. 이것은 dent 손상이 굽힘의

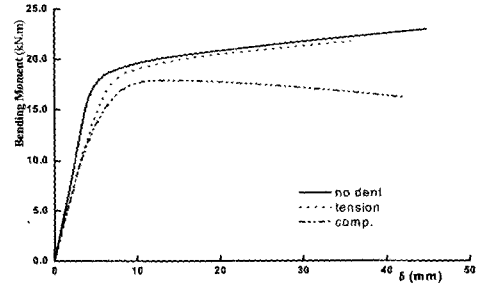


Fig. 17 Bending moment-displacement relationship

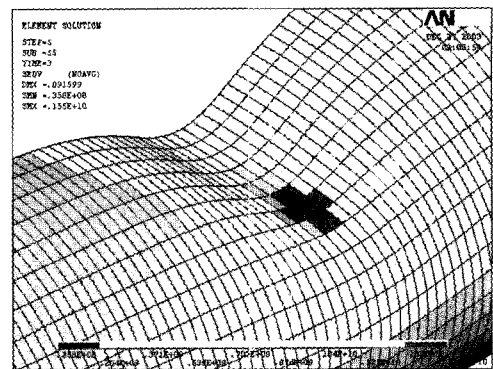


Fig. 18 Equivalent stress distribution after pure bending (dent in compression side)

인장 측에 있는 경우에는 최종강도에 영향을 끼치지 않는 것으로 판단 할 수 있다.

Fig. 17에는 dent 손상이 굽힘의 인장 및 압축 측에 있는 경우를 상호 비교하였다. Fig. 17을 살펴보면 dent 부가 굽힘의 인장측에 존재하는 경우에는 최종강도에 미치는 영향이 미미하다. 그러나 압축 측에 dent가 존재하는 경우, 초기 강성은 그다지 큰 차이가 없으나 최종 강도는 현저하게 감소한다는 사실을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 18 및 Fig. 19에는 dent 손상이 굽힘 모멘트의 인장 및 압축 측에 있는 경우에 대한 해석결과를 나타냈다.

Fig. 20에는 dent 깊이가 직경의 10%인 경우에 대해 압축 후 인장 하중을 가한 경우를 내하력 시험과 비교하여 나타냈다. 그림으로부터 해석 결과가 내하력 시험과 유사한 거동을 하는 것을 확인할 수 있다.

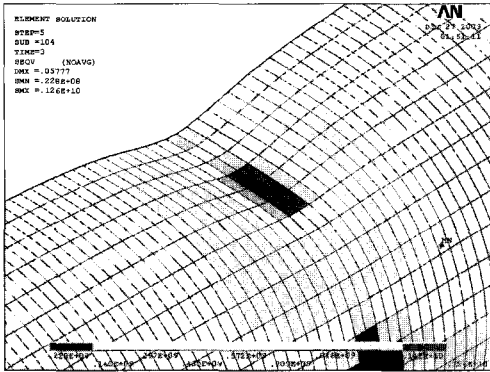


Fig. 19 Equivalent stress distribution after pure bending (dent in tension side)

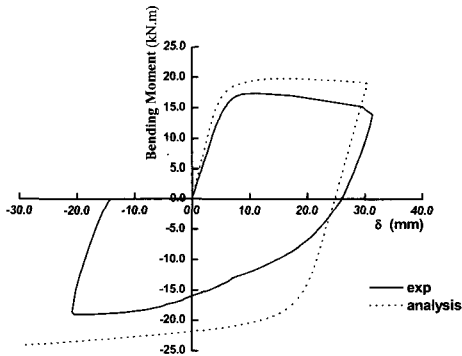


Fig. 20 Bending moment-displacement relationship

4. 결론

본 연구에서는 원통부재의 내하력 시험을 수행하고, 그 결과를 탄소성 대변형 유한요소해석 결과와 비교하였다. 범용 프로그램을 이용한 탄소성 대변형 해석법이 dent 손상을 갖는 원통부재의 거동을 어느 정도 타당성 있게 평가할 수 있다는 사실을 확인하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) Dent손상이 굽힘의 압축 측에 있는 경우, 굽힘 모멘트가 작은 초기단계의 강성은 거의 저하하지 않는다. 그 후 dent의 하부에 항복이 발생하면, 강성은 초기 dent의 깊이에 따라 현저히 저하한다.

최종강도 또한 dent양에 따라 저하하는데, 그 양상이 Table 1에서 보는 바와 같이 dent 깊이가 직경의 5% 이하인 경우와 10% 이상인 경우(15% 및 20% 포함)로 구별되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, dent 깊이가 직경의 5% 이하인 경우에는 최종강도의 저하량이 극히 미미하므로, 해양구조물의 설계에 있어서 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

(2) Dent손상이 굽힘의 인장 측에 있는 경우, dent양에 따라 굽힘 강성이 저하한다. 그러나 dent의 크기에 관계없이 최종강도는 dent가 없는 경우와 거의 같다.

(3) 축방향 변형률이 가장 크게 생기는 곳은 dent단면의 dent저 단부이다.

(4) Dent 양에 의한 잔류응력은 초기강성에 영향을 미친다(Fig. 16 참조).

(5) 실제의 해양구조물에서는 손상을 가진 원통부재가 축 하중 및 굽힘 모멘트의 조합하중이 작용하는 경우가 대부분으로 이에 대한 안전성 평가가 필요하고 또한, 이 결과를 해양구조물 전체의 최종강도에 적용하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

후 기

본 연구는 해양수산부 용역과제인 “해양폐기물 수거·처리 실용화 기술개발 사업”과 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터가 지원한 연구 (과제번호: R11- 2002-104-02003-0)의 일부이다.

참 고 문 헌

- 백정기, 신병천, 1989, “해양구조물 원통부재의 최종강도에 관한 손상의 영향”, 한국해양공학회지, 제 3권, 제 2호, pp. 577-586.
- 조상래, 곽동일, 1989, “복합하중에 대한 손상 원통의 잔류강도”, 한국해양공학회지, 제 3권, 제 2호, pp. 18-624.
- 전태병, 노인식, 조병삼, 2004, “Dent 손상을 갖는 원통부재의 최종강도에 관한 연구(제1보)”, 대한조선학회 논문집 제 41권, 제 6호, pp. 48-55.

- Moan, T., Amdahl, J., Engseth, A. G. and Granli, T., 1985, "Collapse Behavior of Trusswork Steel Platforms," BOSS'85
- Rashed, S. M. H., 1980, "Behavior to Ultimate Strength of Tubular Offshore Structures by the Idealized Structural Unit Method", Report SK/R5, Division of Marine Structures, Norwegian Institute of Technology
- Smith, C. S., Kirkwood, W. and Swan, J. W., 1979, "Buckling Strength and Post-collapse Behavior of Tubular Bracing Members Including Damage Effects", BOSS'79, pp. 303-326.
- Ueda, Y., Rashed, S. M. H. and Nakacho, K., 1983, "Ultimate Strength Analysis of Offshore Structures - application of Idealized Structural Unit Method," J. of Kansai Society of Naval Arc., Vol. 190, pp. 131-142
- Ueda, Y., Rashed, S. M. H. and Nakacho, K., 1985, "New Efficient and Accurate Method of Nonlinear Analysis of Offshore Tubular Frames(The Idealized Structural Unit Method)," OMAE'85



< 노인식 >



< 전태병 >



< 조병삼 >