

Dent 손상을 갖는 원통부재의 최종강도에 관한 연구(제1보) -축 하중을 받는 경우-

전태병^{†*}, 노인식^{**}, 조병삼^{***}

한국해양연구소 해양시스템안전연구소^{*}
충남대학교 선박해양공학과^{**}, 한국선급^{***}

Ultimate Strength of Dented Tubular Members(1st report) -under Axial Loads-

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

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

Abstract

Loads on offshore structures are largely transferred to the bracing members in the form of axial forces. The detrimental effects of imperfections on compressive strength are well recognized. Damage in the members of offshore structures would significantly affect the compressive behavior of the members. As a result, such damages may also affect the ability of the structure to withstand the functional and environmental loads. It is important to be able to assess the residual strength of damaged members quickly and accurately. This will help operators to make the decision whether the member has to be repaired or not. In this study, a series of calculation is performed to study the effects of different parameters on the behavior of such damaged members under axial load. And the results of analysis are compared with those of experiment.

*Keywords: Dented tubular members(손상을 가진 원통부재), Axial compressive strength(축압축 강도), Load carrying capacity(내하력), Deformed shape(변형형상), Ultimate strength(최종강도)

1. 서 언

접수일: 2004년 6월 16일, 승인일: 2004년 8월 30일

† 주저자, E-mail: tbchun@kriso.re.kr

Tel: 042-868-7210

최근, 석유, 천연가스를 위시한 해양자원 개발
혹은 해상작업 및 해양 공간 이용 등의 목적으로,
여러 가지의 해양구조물이 건조되어 가동되고 있

다. 그러나 해양 구조물의 원통부재에는 가끔 보급 선의 충돌 혹은 갑판으로부터의 중량물 낙하 등의 사고하중이 작용하여 손상이 발생한다. 이러한 사고하중에 의한 손상은 충격특성, 부재치수, 재료 특성 등에 따라 달라지지만 기본적으로 2종류 즉, 국부적인 dent 손상 및 전체적인 굽힘 손상으로 분류할 수 있다.

이와 같은 손상은, 그 발생시점에 있어서는, 통상 그 손상부재의 거동에 큰 영향을 미친다고는 할 수 없다. 그러나 극단적인 큰 하중을 받게 되면 손상을 입은 원통부재가 국부적으로 파손하게 되어 더 이상의 하중을 감당하지 못하게 된다. 해양 구조물과 같이 부정적 치수가 적은 골조 구조물에 있어서는 어느 한 구성 부재가 한계강도 상태에 도달하면, 선박과 같은 판구조물에 비하여 내력의 재분포가 극심하게 일어나므로, 타 부재의 거동에도 심각한 영향을 미치게 되고, 이로 인하여 손상이 생기지 않는 부재에도 연쇄적으로 좌굴·소성 붕괴가 생겨, 구조물 전체가 붕괴에 이르는 가능성도 예상된다(Ellinas/Valsgard 1985).

따라서 손상 사고가 발생하였을 경우, 손상을 받은 원통부재의 잔류강도를 추정하고 이 결과를 바탕으로 구조물 전체의 안전성을 신뢰도 높게 평가할 수 있다면 안전성의 관점은 물론 경제성의 측면까지도 고려하여 당장 수리 여부를 정확히 판단할 수 있을 것이다. 또한, 예상되는 충돌 사고 시나리오를 사전에 설정하고 이에 대한 손상의 크기를 예측할 수 있는 평가법이 확립되면 초기설계 단계에서 건조비와 수리비를 비교 검토함으로써 합리적인 구조설계가 가능하게 된다. 이러한 관점에서 손상을 갖는 부재의 잔여 내하력을 정확하게 판단하는 것은 매우 중요하다.

Rashed(1980)는 축압축을 받는 손상 원통부재의 최종강도 및 최종강도 후 거동을 해석할 수 있는 이상화 구조요소법을 개발하였다. 또한, Taby et al.(1981)은 손상 원통부재의 최종강도 실험결과로부터 손상부 단면의 국부좌굴 발생으로 인한 전체 좌굴강도 저하, 부재 단면의 변형으로 인한 최종강도 후의 강도저하 등을 확인하였다. 백정기 등(1989)은 사고하중을 받는 원통부재에 대한 손상변형거동을 추정할 수 있는 손상예측모델을 제안

하고, dent 손상 및 굽힘 처짐과의 상관효과를 고려한 하중-손상변형 관계식을 도출하였다. 또한, 백정기/신병천(1990)은 축력과 굽힘모멘트의 조합하중을 받는 손상원통부재의 최종강도를 해석하기 위해 간이유한요소해석이론을 정식화하고, 실험 등 기존 결과와 비교하여 그 유용성을 확인하였다. 조상래/곽동일(1995)은 횡 충격하중을 받는 원통부재의 손상정도를 추정하기 위해 스프링-보 요소를 이용하여 동적거동을 추정하고 간편한 수치해석법을 도출하였다.

한편, 최근에는 컴퓨터의 눈부신 발전으로 인하여 해석 범위 및 계산 시간에 있어서 예전과 같은 해석 모델의 간이화에 대한 필요성이 상대적으로 감소되고 있는 실정이다. 이와 같은 관점에서, 본 연구에서는 원통부재가 축 하중 및 굽힘 하중을 받는 경우를 대상으로 원통부재의 손상 실험 및 범용 구조해석 프로그램을 활용한 유한요소법 상세해석을 통해 그 거동을 파악하여, 해양구조물의 원통부재의 최종강도에 관한 연구를 수행하였으며, 이번 제1보에서는 축 하중에 대한 거동을 다루었다.

2. 원통부재의 Dent 부가시험

먼저 손상된 시험편을 제작하면서 dent 생성 거동을 고찰하기 위한 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 실제 해양구조물에서 많이 사용되고 있는 원통부재를 고려하여, 직경과 판 두께의 비(D/t)가 31 정도의 원통 시험체를 제작하였다. 시험체로는 직경 101.6mm, 판 두께 3.25mm ($D/t=31.3$)의 원통강관을 이용하였고 강관 재료의 화학 성분과 재료 특성을 Table 1 및 Table 2에 나타냈다.

Dent 생성은 Fig. 1과 같이 실제의 발생조건에 가깝고 잔류 굽힘이 동시에 구현될 수 있는 3점 굽힘으로 하였다. 시험 과정에 있어서 dent의 생성 거동을 조사하기 위해서 모든 시험체에 대해서 2축소성역 게이지를 부착하여 변형률을 계측하였으며, cross head의 하강량을 4대의 변형률 게이지식 변위계를 사용하여 계측하였다. dent 양은 직경의 10%, 20%로 하고, 각 시험체에 대해 dent를 부가하였다.

Fig. 2는 dent를 만들었을 때의 하중과 indenter

Table 1 Chemical component of specimen

C	Si	Mn	P	S	Cu	SolAl
0.18	0.23	0.47	0.007	0.004	0.01	0.012

Table 2 Results of material test

	Tensile Test		Comp. Test	
	σ_y (MPa)	E(GPa)	σ_y (MPa)	E(GPa)
Test1	282.6	211.6	281.6	213.6
Test2	277.2	206.1	282.2	205.6

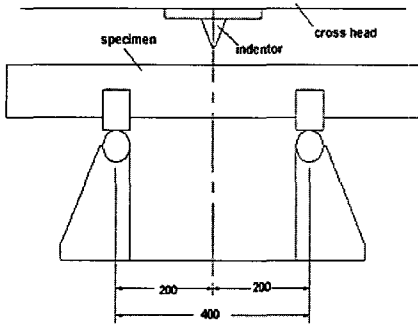


Fig. 1 Test setup in indenting specimen

의 관계를 나타낸다. 이 곡선의 기울기는 dent변형의 성장에 대한 저항으로 볼 수 있는데, 하중 작용 시작 직후 곧 저항은 감소한다. 이것은 indenter 와 접촉부 근방의 외각이 소성화하기 시작한 때문인 것으로 판단된다. 이후의 저항은 하중이 증가해도 거의 일정하다. 이것은 indenter 와의 접촉부에는 소성역이 늘어나지만, 동시에 접촉면적도 증가하기 때문으로 생각된다. 또한, 각 재하단계에서 dent가 일부 탄성적으로 회복하고 있음을 보이고 있다.

Fig. 3에 dent를 생성한 후의 변형 단면을 보았다. 그림에서는 dent양이 직경의 20%인 경우를 나타냈고, 수치는 dent 중앙부에서 단면이 길이 방향으로 떨어진 거리를 나타냈다. 그림에서부터 거리가 멀수록 단면의 변형 및 손상이 줄어들고 있음을 확인할 수 있다.

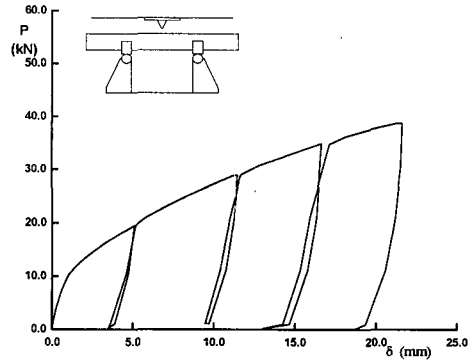


Fig. 2 Load and load-point displacement relationship in indenting test

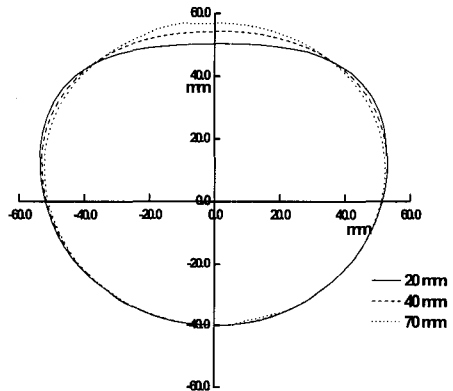


Fig. 3 Deformed shape after indenting

Fig. 4는 dent 하부 중앙의 부하 하중에 대한 축 및 원주방향의 변형을 관계를 보이고 있다. 실선 표시가 축 방향, 점선 표시가 원주방향의 변형률이다. 변형률의 크기로부터 보면 dent 하부는 하중이 가해지는 초기 단계에서부터 소성화된 것을 알 수 있다. 소성화 이후, 축 방향은 압축, 원주방향은 인장 변형률이 계속하여 증가한다. 그러나 하중이 34kN 부근부터는 증가량이 줄고 있다. 이것은 dent 하부 주변에 소성 관절선에 의한 붕괴구가 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 소성 관절선의 형성에 의해, 그때까지 dent 하부 주변에 분포되어 있는 소성변형이 관절선으로 집약된 결과로서 dent 하부 주변의 축방향의 굽힘 곡률에 변화가 줄어들게 된 것으로 보인다. 또한, 이상과

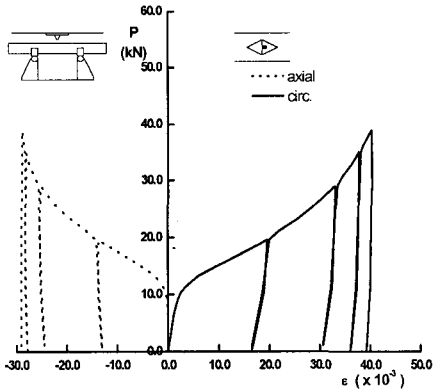


Fig. 4 Load-strain relationship

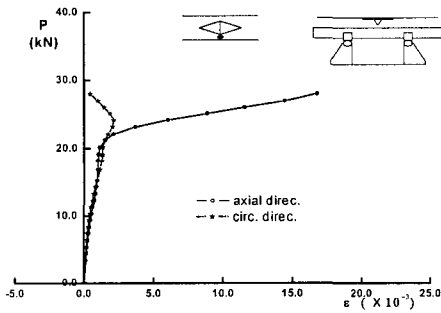


Fig. 5 Load-strain relationship

같이 소성 관절선이 형성되고, 소성봉괴가 생긴 후에도 하중이 증가하는 것은 dent 하부의 막력의 증가 및 시험체와 indentor와의 접촉 길이가 보다 더 길어지고, dent가 성장하기 어렵게 되는 등의 여러 원인에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 부하하중에 대한 dent 하부의 모서리에 해당하는 곳의 축방향과 원주방향 변형률의 변화를 나타낸다. 여기서는, dent 깊이가 직경의 20%인 경우를 보였다. 하중이 20kN을 넘어서면서 원주방향 변형률이 급격하게 증가하는 데, 이것은 indentor가 누름에 따라 원통이 평편화하여 밖으로 넓어지기 때문이다. 또한, 축방향의 변형률은 감소하기 시작하는 데, 이것은 계측점 부근까지 dent가 형성되었기 때문으로 보인다.

따라서 이와 같은 Dent의 생성과정을 관찰해 보면 미소 탄성변형에서 출발하여 소성변형이 발생되고 이어서 소성 관절선으로 발전된 다음 최종적으로

dent가 생성되는 과정을 확인할 수 있다.

3. 원통부재의 유한요소 해석

원통부재의 dent 생성 및 축압축력에 대한 강도를 계통적으로 평가하기 위해, 유한요소법을 이용한 탄소성 대변형 해석을 실시하였다. 범용구조해석프로그램인 ANSYS를 이용하였으며, 해석 내용은 dent를 부가하는 과정 및 축 하중을 부하 하는 과정으로 나뉘 수행하였다.

3.1 해석 모델

해석의 모델은 Fig. 6과 같이 쐐기형의 indentor와 원통 쉘로 구분하여 작성하였다. Fig. 7에 유한요소 모델을 나타냈다. dent를 생성하는 indentor의 선단은 내하력 시험시의 장비와 같은 5mm로 하여 가능한 한 유사한 dent를 생성토록 하였다.

원통 부재는 대변형 거동에 의한 기하학적, 재료적 비선형의 표현이 우수한 shell 요소(shell 181)를 사용하였다. 주 분석 대상인 dent 근방은 fine mesh, 그 외는 coarse mesh로 하여 계산 시간의 단축을 꾀하였다. 또한, 해석 대상 부위는 원통부재의 구조적인 대칭성을 고려하여 원통부재의 폭

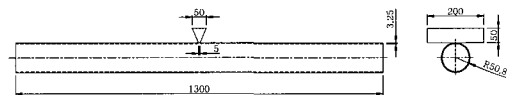


Fig. 6 Principle dimension of model

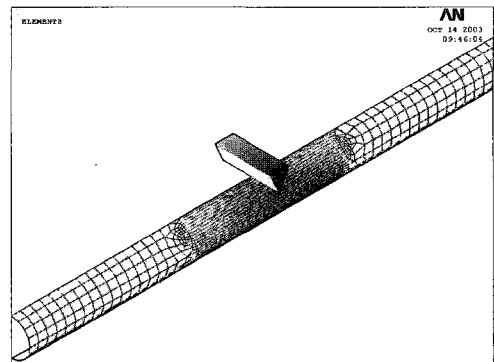


Fig. 7 Finite element model

방향으로 1/2만을 모델링하였고, 대칭성을 고려하여 중심선에 있어서 좌우 대칭 조건을 적용하였다. 모델의 총 절점의 수는 4,593개, 요소의 수는 6,372개이다.

3.2 Dent 생성과정 해석

Dent의 생성에 있어서는 접촉요소를 사용하였으며, 이 요소는 target 및 contact 요소로 구성되어 있다. 본 연구에서는 surface-to-surface 요소를 사용하였으며, 이 요소는 기본적으로 요소접촉성을 부여하기 위해 수정 Lagrange 승수법을 사용하고 있다. Dent의 깊이 및 범위 등에 따른 손상의 영향을 평가하기 위해 dent 깊이는 0.05D, 0.1D, 0.15D, 0.2D의 4가지로 하였다.

Dent 양이 소정의 깊이 된 후, indenter를 일정한 높이로 올려서 dent 부가를 위한 강제 변위를 제거한다. 이렇게 함으로써 단순한 기하학적인 형상만이 아니라, 잔류 응력, 잔류 변형률을 가진 dent가 생기게 된다. 또한, 강제 변위의 제거로 인한 원통부재의 회복에 대한 자료도 갖게 된다.

본 연구에서는 강제변위를 부여하였으므로 하중과 변위 곡선은 indenter의 변위와 강제부여 시의 지지점의 반력으로부터 구하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 하중의 증가와 함께 dent가 성장해 나가는 양상이 시험 결과와 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에는 Dent 깊이가 .20D인 경우일 때 dent 부의 등가 응력 분포를 나타냈다. 그림에서 보는

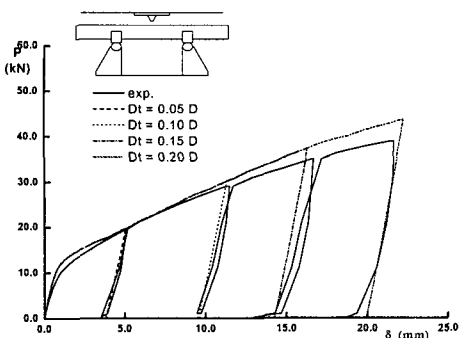


Fig. 8 Load and load-point displacement relationship

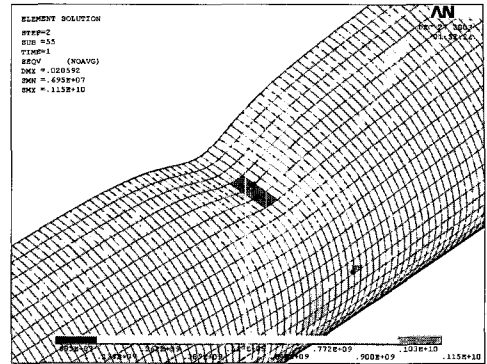


Fig. 9 Equivalent stress distribution

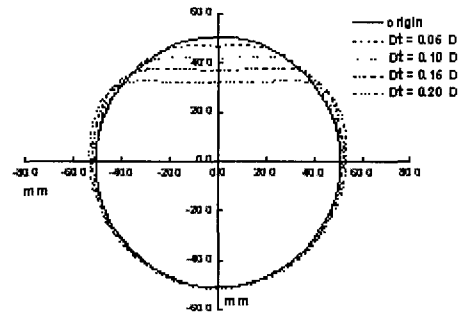


Fig. 10 Deformed section after unloading

바와 같이 모서리부에 응력이 크게 나온 것을 알 수 있는데, 이것은 dent가 깊어짐에 따라 원주 방향으로 저항이 커져 이에 따른 응력이 증가된 것으로 판단된다.

Fig. 10에는 dent 생성 후의 단면을 보였으며, Fig. 11에는 indenter를 제거하였을 때의 길이 방향 dent부의 변형을 나타냈다.

Dent 깊이에 따른 dent부의 변형을 Table 1에 나타냈다. Table 1을 살펴보면, 0.05D의 경우 dent 생성 시보다 20% 이상 회복된 것을 볼 수 있으며, 회복량은 dent 깊이가 커질수록 절대치는 증가하나 손상량 기준의 상대치는 감소한다. 0.20D의 경우는 약 10% 정도 회복되었고, 제하시 회복량을 기준으로 살펴보았을 때, 실질적인 손상 깊이는 각각 3.81%(0.05D), 8.66%(0.10D), 13.29%(0.15D) 및 18.04%(0.20D)에 이른다.

Table 1 Deformation results for indenting and unloading

손상 깊이	0.05D	0.10D	0.15D	0.20D
손상시 (mm)	5.08	10.16	15.27	20.32
제하시 (mm)	3.87	8.8	13.5	18.33
회복량 (mm)	1.21	1.36	1.77	1.99
회복율 (%)	23.8	13.4	11.6	9.8
손상률 (%)	3.81	8.66	13.29	18.04

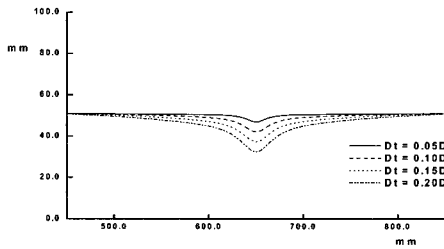


Fig. 11 Longitudinal deformed shape after unloading

Fig. 12에는 dent 깊이가 원통부재 직경의 20%인 경우의 dent 생성 후의 횡단면의 형상을 시험 결과와 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 해석결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13에는 dent 저 중앙부의 부하하중 P에 대한 축 방향 및 원주방향의 변형을 관계를 시험 결과와 함께 보였으며, 대체적으로 내하력 시험 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.3 축 하중을 받는 경우

Dent 생성 시 발생하는 변형 형상뿐만 아니라 잔류응력을 모두 현실적으로 고려하기 위하여 dent 해석 결과를 restart하여 축하중 해석을 수행하였다. 이때, indenter를 소거하고, 축방향 강제 변위 작용시 역학적 특성을 고려하여 경계조건을 다시 조정하였다.

먼저 Fig. 14에 손상된 부재가 축 압축 하중을 받는 경우, dent 깊이에 따른 하중 크기와 축방향 변위의 관계를 나타냈다.

Dent 깊이에 따라 초기 강성의 차이는 그다지 크지 않지만 최종 강도는 심하게 저하되는 것을 확

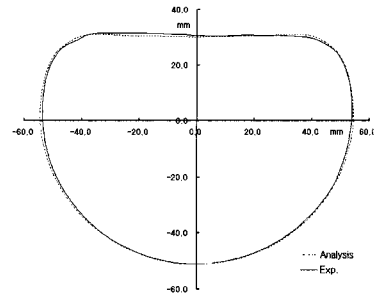


Fig. 12 Deformed shape in dented section

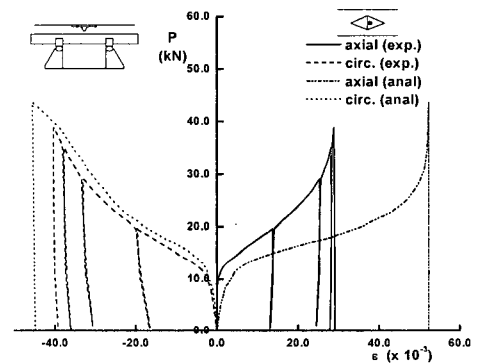


Fig. 13 Relationship between load and strain at the center of dented part

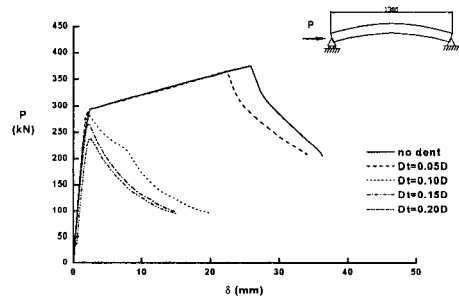


Fig. 14 Load-displacement relationship of the dented member subjected to axial compression

인할 수 있다. 특히 dent 깊이가 0.05D-0.1D 사이 구간에서 불안정 소성좌굴이 시작되는 시점이 급격히 앞당겨 지는 현상을 보이고 있다. 이는 이 구간에서 부재의 붕괴시 에너지 흡수 능력이 급격히 감

소뒀을 의미한다.

Fig. 15에는 축 압축하중을 받는 경우의 dent부의 변위 및 등가 응력분포를 보였으며, Table 2에 dent 깊이에 따른 해석 결과를 나타냈다. 에너지 흡수 능력의 저하와 마찬가지로 최종 강도 역시 0.05D-0.10D 사이에서 상당히 급격하게 변화함을 보이고 있다 (Fig. 16 참조).

Fig. 17에는 축 인장 하중을 받는 경우의 dent 양에 따른 하중과 하중점 변위의 관계를 나타냈으며, Fig. 18에는 축 압축 및 인장 하중을 받는 경우를 비교하여 하중-변위 곡선을 도시하였다. 그림으로부터 축 압축 하중을 받는 경우의 최종 강도가 축 인장 하중을 받는 경우에 비해 약 20% 정도의 저하를 보이고 있으나, 에너지 흡수 능력에서는 현격한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

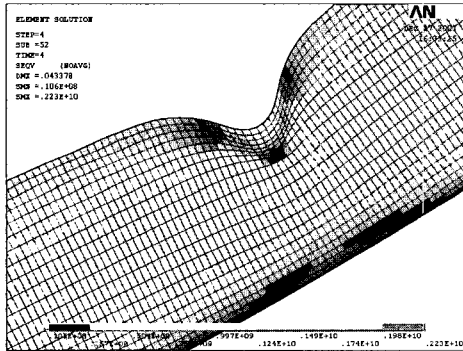


Fig. 15 Equivalent stress distribution in the dented member subjected to axial compression

Table 2 Maximum axial load

	No dent	0.05D	0.10D	0.15D	0.20D
최종강도(kN)	374.1	365.0	284.3	266.1	238.4
강도저하량(kN)	—	9.1	89.8	108.0	135.7
강도저하율(%)	—	5.97	24.01	28.89	36.29

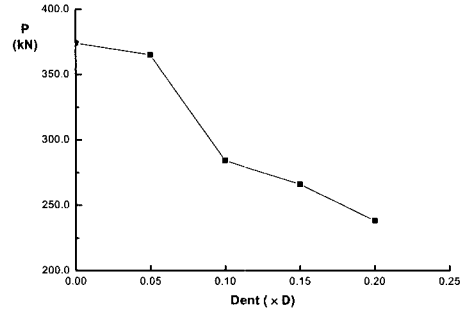


Fig. 16 Ultimate strength and dent depth relationship in axial thrust

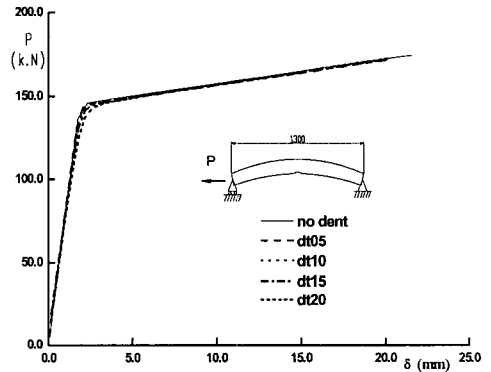


Fig. 17 Load-displacement relationship of the dented member subjected to axial tension

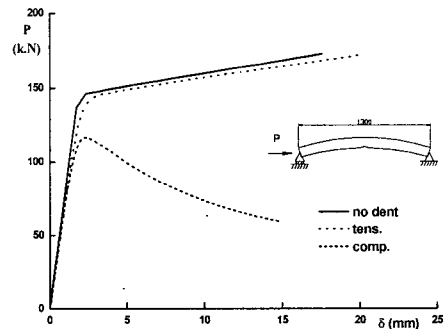


Fig. 18 Load-displacement relationship of the dented member subjected axial thrust

4. 결 론

참 고 문 헌

본 연구에서는 dent 손상을 가진 원통부재의 잔여 내하력을 검토하기 위하여 실험 및 유한요소법을 사용한 탄소성 대변형 해석을 수행하고, 해석 결과를 상호 비교하였다. 본 제1보에서는 먼저 dent의 생성 과정을 실험과 해석을 상호 비교 검토함으로써 범용 프로그램을 이용한 탄소성 대변형 해석법이 상당히 합리적인 결과를 제공할 수 있음을 확인하였다. 또한, 이렇게 손상이 발생한 부재가 축하중을 받는 경우의 소성 붕괴 거동을 해석하고 결과를 고찰하였다. 이 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 축 압축 하중을 받는 경우, 하중이 작은 초기 단계의 강성은 dent 깊이에 따라 거의 변화하지 않는다. 그 후 dent의 저부에 항복이 발생하기 시작하면, 강성은 dent양에 따라 저하한다.

(2) 최종강도 또한 dent양에 따라 저하하는데, 그 양상이 Table 2 및 Fig. 14에서 보는 바와 같이 dent 양이 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 최종강도 측면에서 손상이 없는 부재와 큰 차이가 없으나, 5-10% 사이 구간에서 최종강도 및 붕괴 시 에너지 흡수 능력이 급격히 저하된다.

(3) 축 인장 하중을 받는 경우, dent 깊이에 따라 강성이 저하한다. 그러나 최종강도는 dent의 깊이 관계없이 dent가 없는 경우에 거의 수렴한다.

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.

- 백점기, 신병천, 김창열, 1989, “준정적하중을 받는 해양구조물의 원통부재에 대한 손상예측,” 대한조선학회지, 제 26권, 제 4호, pp. 81-93.
- 백점기, 신병천, 1990, “손상원통부재의 최종강도 해석에 관한 연구,” 대한조선학회지, 제 27권, 제 1호, pp. 24-34.
- 조상래, 곽동일, 1995, “스프링-보 모형을 이용한 해양구조물 원통부재의 충돌해석,” 한국해양공학회지, 제 9권, 제 1호, pp. 22-35.
- Ellinas, C.P. and Valsgard, S., 1985, "Collisions and Damages of Offshore Structures : A state-of-the-art", Proc. 4th Int. Offshore Mechanics and Artic Engrs., Symposium, Vol. II, ASME, pp. 475-495.
- Rashed, S. M. H., 1980, Ultimate Strength and Post-Ultimate Strength Behavior of Damaged Tubular Structural Members, Report SK/R52, Division of Marine Structures, Norwegian Institute of Technology
- Taby, J., Moan T. and Rashed S. M. H., 1981, "Theoretical and Experiment Study of the Behavior of Damaged Tubular Members in Offshore Structures", Norwegian Maritime Research, Vol. 9, No. 2, pp. 26-33.



< 전 태 병 >



< 노 인 식 >



< 조 병 삼 >