

## 좌초손상을 고려한 최종강도 실험

이탁기<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

## Ultimate Strength Tests Considering Stranding Damage

T. K. Lee<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Machinery & Materials

### 요 약

연근해를 운항하는 선박의 경우, 선저가 압초 상에 올라앉는 정지형 좌초(stranding)를 당할 확률이 상대적으로 높다. 손상을 입은 선박의 최종강도는 저하할 것이다. 본 논문에서는 시리즈 붕괴실험을 수행하여 선체구조의 최종강도에 대한 정지형 좌초손상의 영향을 파악하고자 하였다. 단면이 720 mm × 720 mm이고, 시험체의 길이가 900 mm 인 5개의 박스 거더형 모형이 제작되었으며, 각 판 부재에는 중보강재가 부착되어 있다. 5개의 모델 중에는 1개의 비손상 모형과 압초 단면을 이상화한 마름모꼴 손상을 가진 4개의 손상 모형이 있다. 손상 모형 중 3개는 손상부의 판을 잘라 내었으며, 1개는 보다 실제적인 좌초손상을 표현하기 위해 프레스 가공하였다. 최종강도 실험은 순수 굽힘 하중 하에서 수행되었으며, 작용하중과 선저판의 변위를 계속하였다. 실험 결과, 최종강도는 손상의 크기가 증가할수록 감소하였다. 손상이 선폭의 30%에 이르는 가장 큰 손상 모형의 최종강도는 비손상 모형에 비해 약 21% 정도 감소되었다. 프레스 가공한 손상 모형의 최종강도는 손상부를 잘라 내어 제거한 모형에 비해 낮았다. 이는 프레스 가공한 손상부의 판이 최종강도를 떨어뜨리는 쪽으로 작용한 것으로 생각된다.

**Abstract** – Ships operating in littoral sea are likely to be subjected to accidental load such as stranding. Once she has damage on the hull structure, her ultimate strength will be reduced. This paper is to investigate the effect of the stranding damage on ultimate strength of ship structure by using a series of collapse tests. For the experiment, 720 mm × 720 mm in section and 900 mm in length of five box-girder models with stiffeners were prepared. Of the five, one has no damage and four have a diamond shaped damage which represents the shape of rock section in seabed. The damage size is different between models. Among the damaged models, the damages of 3 of them were made by cutting the plate and one by pressing to represent stranding damage. Experiments were carried out under pure bending load and the applied load and displacements were recorded. The ultimate strength is reduced as the damage size increases, as expected. The largest damaged model has the damage size of 30% of breadth and its ultimate strength is reduced by 21% than that of no damaged one. The pressed one has lower ultimate strength than cut one. This might be due to the fact that the plate around the pressed damage area effect negatively on the ultimate strength.

**Keywords:** Stranding(정지형 좌초), Ultimate Strength(최종강도), Collapse Test(붕괴실험)

### 1. 서 론

선박은 악천후를 운항하는 도중에 충돌이나 좌초사고를 당할 수 있으며, 이로 인한 기름유출은 심각한 해양오염을 야기할 수도

있다. 1974년부터 2006년까지 선박으로부터의 기름유출 사고를 원인별로 구분하여 집계한 통계(ITOPF[2007])에 의하면, 700톤 이상의 대형 유출사고의 경우 충돌 및 좌초사고에 의한 것이 전체 사고 건수의 60%를 상회하고 있다. 특히 1995년 남해에서 발생한 씨프린스호 사고와 같이 유조선이 연근해에서 좌초될 경우, 기름유출로 인한 피해는 막대할 것이다. 여기서 한걸음 더 나아가

\*Corresponding author: tklee@kimm.re.kr

좌초된 유조선이 거친 풍랑이나 조수간만의 변화에 의해 추가적인 하중을 받아 선체가 두 동강이 나는 시나리오를 생각할 수 있고, 이 경우 그 피해는 추산하기 어려운 정도일 것이며 실로 재앙의 수준이 될 수도 있다. 이러한 최악의 상황을 막기 위해서는 운항 측면에서 사고를 미연에 방지하고자 하는 노력이 가장 중요하지만, 만약의 경우 좌초사고로 인해 선체구조에 손상이 발생하더라도 선체가 붕괴되는 최악의 경우는 피할 수 있도록 선박을 설계하는 것도 필수적일 것이다. 이때, 좌초로 인해 발생한 손상이 선체 구조 전체의 최종강도에 어떠한 영향을 미치는지를 파악할 필요가 있다.

손상이 없는 경우에 대하여는 대형 모형을 이용한 몇몇 최종 강도 실험이 수행된 바 있다. Dow[1991]는 새깅 조건에서 프리깃함에 대한 1/3 모형을 이용하여 최종강도 시험을 수행하였다. 시험용 지그를 포함한 총 길이는 18 m에 이르렀고, 단면 치수는 폭 4.0 m, 깊이 2.8 m였다. Daniel *et al.*[2000]은 6점 굽힘으로 대형 시험이 수행되었으며, 시험체 부분의 길이만 4.6 m이었고 폭 1.5 m, 깊이 1.1 m였다. 이 시험체는 3개의 화물창을 가진 종방향으로만 보강된 단일 방향 보강 이중 선체를 모델링한 것이었다. Qi *et al.*[2005]은 대형 수상함 구조의 내하력에 관한 자료를 수집할 목적으로 대형 모형 시험이 수행되었다. 5개의 횡격벽을 가진 모형의 치수는 길이 약 6 m, 폭 0.8 m (상갑판의 경우, 1.4 m) 그리고 깊이는 0.53 m이었다. 이러한 실험들은 최종강도 평가 도구에 대한 검증 차원에서 매우 유용한 자료를 제공하고 있다.

본 연구에서는 선박이 암초 상에 올라앉은 경우를 고려하여 마름모꼴의 손상을 가진 박스 거더 형태의 시험체를 대상으로 굽힘 붕괴실험을 수행하였다. 이를 통하여 좌초 손상이 최종강도에 어떻게 영향을 미치는지를 파악하고자 하였다. 손상의 종류도 손상부를 잘라 제거한 경우와 손상부를 프레스 가공하여 밀어냄으로써 변형된 판재를 그대로 둔 경우로 구분하여 그 영향을 살펴보고자 하였다.

## 2. 실험 방법 및 시험체

본 연구에서는 시험체에 순수 굽힘이 작용하도록 4점 굽힘의 형태로 최종 붕괴실험을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 수행한 4점 굽힘 시험에 대한 개략도이다. 이 방법은 Nishihara[1983]

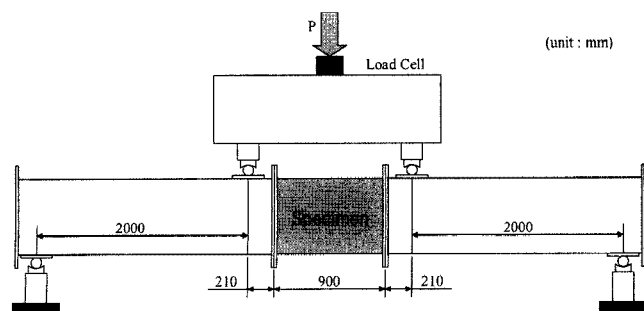


Fig. 1. Four point bending collapse test.

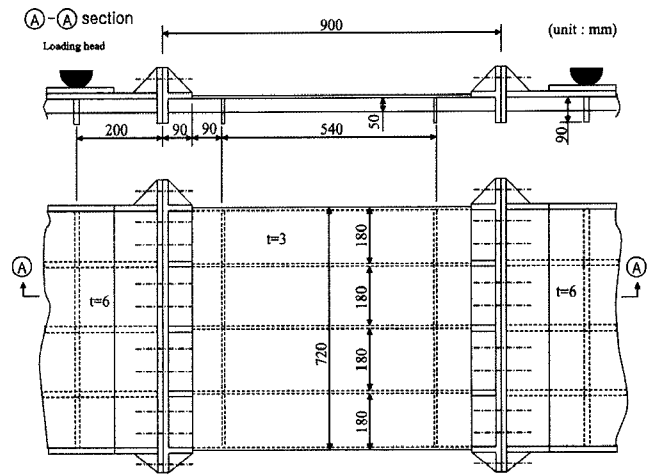


Fig. 2. Drawing for specimen and test jigs.

가 수행한 붕괴실험 방법을 준용한 것이다. 그는 단일 선체 유조선, 이중 선체 유조선, 컨테이너선 및 벌크선의 단면을 단순화시킨 9개의 모델을 이용하여 그림과 같은 4점 굽힘에 의한 붕괴실험을 수행한 바 있다. 이 방법에 의하면, 두 가력점 사이에 놓인 시험체에는 순수 굽힘모멘트가 작용하게 된다. Fig. 2는 시험체와 시험용 지그에 대한 약식 도면을 보여주고 있다. 본 연구에서 수행한 비손상 시험체는 Nishihara의 모델 중에서 단일 선체 유조선의 단면을 이상화한 MST-3 모델과 동일한 것이다.

본 연구에서는 단면의 크기가 720 mm×720 mm인 박스-거더 모델을 5개 제작하였으며, 시험체의 길이는 900 mm이고, 지그를 포함하면 전체 길이는 5.3 m에 이른다. 5개의 모델 중, 1개는 손상이 없으며, 나머지 4개 모델은 선저판을 뚫고 진입한 암초의 수평 단면을 이상화한 마름모꼴의 손상을 가지고 있다. Fig. 3은 각각 3개씩의 보강재를 포함한 보강판으로 이루어진 비손상 박스 거

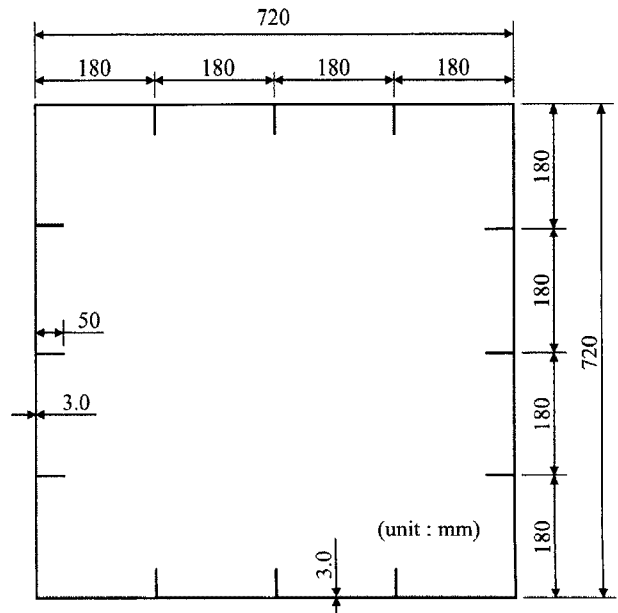


Fig. 3. Dimension of no damage model.

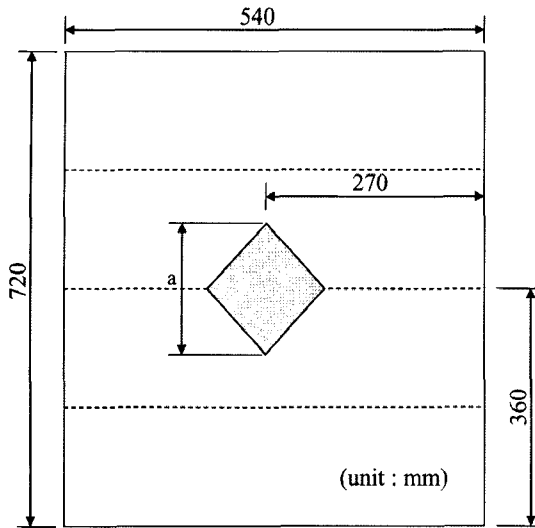


Fig. 4. Location of stranding damage.

더 모델에 대한 단면도이다. 사용된 재료는 항복강도가 290MPa 인 일반 구조용 강이다. 정지형 좌초시 압축에 의한 손상은 Fig. 4와 같이 선저판의 중심부에 마름모꼴로 제작하였다. 손상의 크기는 그림에서 a로 표시한 마름모의 대각선 길이가 시험체의 선폭에 대해 10, 20 및 30%를 차지하도록 각각 72 mm, 144 mm 및 216 mm로 정하였다. 이는 선저판의 면적(720 mm×540 mm 기준) 대비 각각 1.3, 5.3 및 12%에 해당한다. 또한, 이들 손상은 내부 보강재의 파단까지 포함시켰는데, 이는 보강재 사이의 판만 손상을 입는 경우보다 심각한 손상을 설정한 것이다. Table 1에는 손상 형

Table 1. Specimens for ultimate strength test

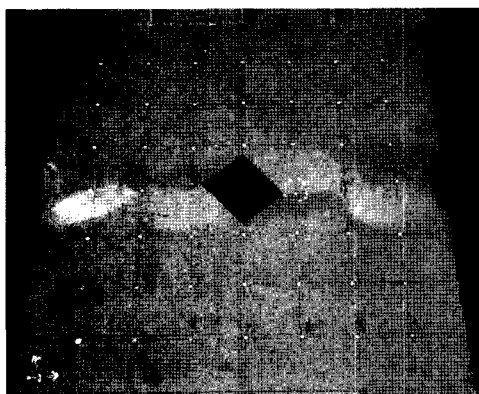
Specimen	Type of damage	Damage size (mm)	Remark
ND-1	no damage	-	MST-3
SR-1	cutting	72	
SR-2	cutting	144	
SR-3	cutting	216	
SR-4	pressing	144	

태와 손상 크기를 포함하여 전체 시험체에 대한 정보를 요약하여 정리한 것을 보여주고 있다. 손상 모델 중, SR-1부터 SR-3까지의 손상은 판을 잘라 내어 만들었으며, SR-4의 경우는 프레스에 의해 제작된 것으로 좌초로 인한 손상을 보다 실제에 가깝게 구현하고자 시도한 것이다(Fig. 5참조). 프레스 가공시, 판의 전체 변형을 방지하기 위해 손상부를 제외한 바깥 부분을 고정시켰다.

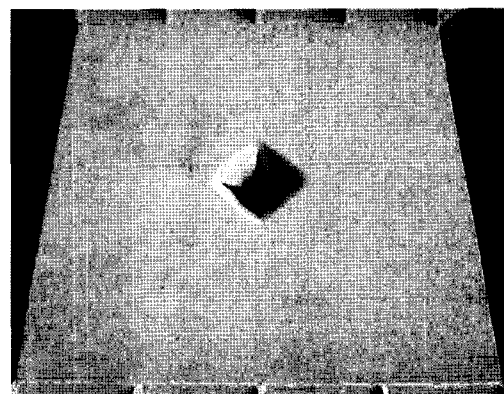
### 3. 계측 및 시험

선박의 경우, 용접열에 의해 초기 처짐이나 잔류응력이 남게 되며, 압축하중을 받는 경우 판의 초기 처짐은 최종강도에 상당한 영향을 끼칠 수 있다는 것이 알려져 있다(Paik and Thayamballi [2003]). 호킹상대에서는 선저판이 압축하중을 받게 되므로, 본 연구에서는 손상부를 잘라 낸 3개의 시험체의 선저판에 대한 초기 처짐을 NC기계를 이용하여 계측하였다. Fig. 6은 계측에 이용된 기준점과 계측점 및 좌표계를 보여주고 있는데, (a)에서 기준점은 점선의 원으로 표시되어 있다. 기준점은 계측의 편의상 임의로 정한 것으로 시험체마다 다르다. Table 2-4는 각각 SR-1, 2, 3에 대하여 계측된 초기 처짐을 정리한 것이다. 표에서 (-) 부호는 아랫방향 처짐을 의미하며, 중앙부 근처의 ◆로 표시된 부분은 좌초손상 때문에 처짐을 계측하지 못한 위치이다. 표에서 숫자 뒤에 \*을 부기한 곳은 기준점을 의미한다.

시험은 좌초 손상을 입은 선저판에 압축이 가해지는 호킹 조건을 구현하기 위해 갑판과 선저판의 상하 위치를 바꾸어 설치한 상태에서 수행하였으며, 이때 Fig. 7에서와 같이 시험체 하부(갑판)의 5개 지점에서 LVDT (Linear Variable Differential Transducer)를 이용하여 변위를 계측하였다. 또한, 하부에 2개의 스트레인 게이지를 부착하여 예비시험을 통해 시험체 설치 상태를 점검하였으며 전체 붕괴 시점에 판의 항복 여부도 확인하였다. 시험체, 지그, 가력기, 데이터 취득 장치를 포함한 전 시험장면은 Fig. 8에 보이는 바와 같다.

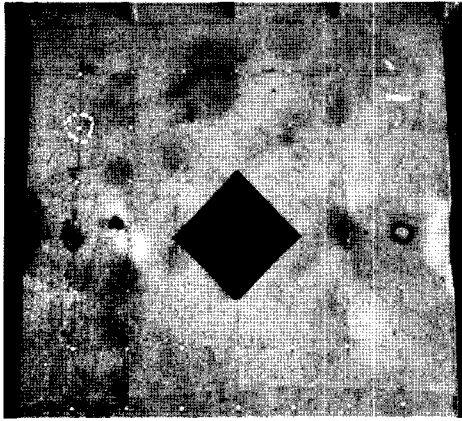


(a) SR-2 specimen with cut damage

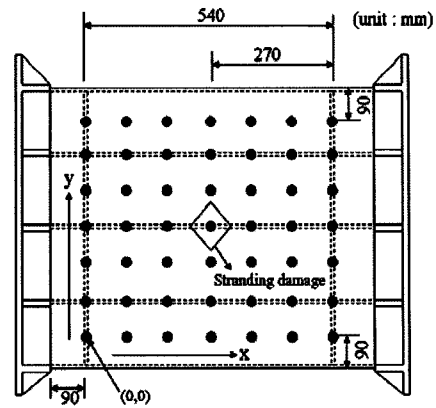


(b) SR-4 specimen with pressed damage

Fig. 5. Type of damage - cut and pressed damage.



(a) A reference point (dotted circle)



(b) Origin and measurement point

Fig. 6. Measurement for initial deformation.

Table 2. Measured initial deformation of SR-1

		(unit: mm)						
x \ y	0	90	180	270	360	450	540	
0	5.16	5.76	5.08	4.42	4.16	4.70	5.38	
90	4.82	4.07	3.95	3.85	4.00	4.30	4.60	
180	4.65	4.63	6.09	6.01	7.38	6.92	4.31	
270	3.82	3.20	3.10	◆	2.97	3.35	3.82	
360	4.14	2.36	0.79	0.98	0.00*	1.55	3.99	
450	4.30	3.36	3.00	3.06	3.27	3.75	4.30	
540	5.31	5.08	5.29	5.02	5.15	5.32	5.33	

Table 3. Measured initial deformation of SR-2

		(unit: mm)						
x \ y	0	90	180	270	360	450	540	
0	4.69	2.80	3.55	4.85	2.79	3.37	4.25	
90	4.23	3.05	2.51	2.38	2.46	2.79	3.80	
180	3.99	3.94	2.70	0.00*	5.34	5.51	2.68	
270	3.56	2.89	2.19	◆	1.25	1.50	0.98	
360	3.65	3.20	2.25	4.47	-1.17	-1.06	1.15	
450	3.63	2.50	2.98	3.69	1.55	1.70	1.05	
540	4.08	3.49	3.71	4.66	2.00	2.14	1.48	

Table 4. Measured initial deformation of SR-3

		(unit: mm)						
x \ y	0	90	180	270	360	450	540	
0	4.65	2.98	4.40	3.90	2.94	3.15	3.98	
90	3.72	3.40	2.80	2.48	2.50	2.76	2.95	
180	3.71	2.90	1.52	◆	1.40	1.80	2.85	
270	3.32	3.11	◆	◆	◆	1.95	2.18	
360	3.42	3.12	2.34	◆	2.45	2.84	2.08	
450	2.95	2.62	2.24	1.78	1.60	1.53	1.52	
540	3.10	1.50	0.52	3.30	0.55	0.00*	1.60	

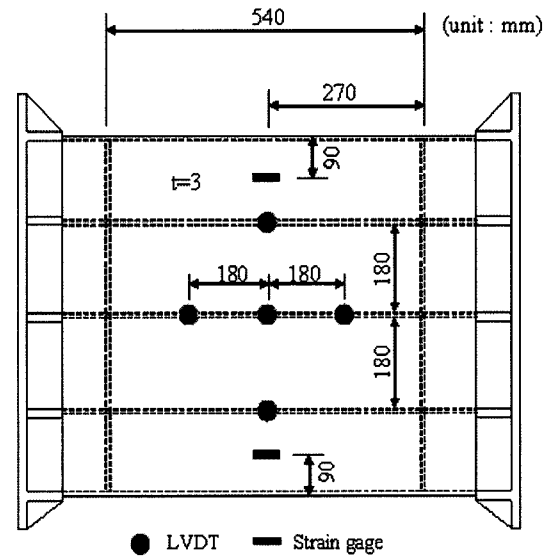


Fig. 7. Location of LVDT and strain gage.



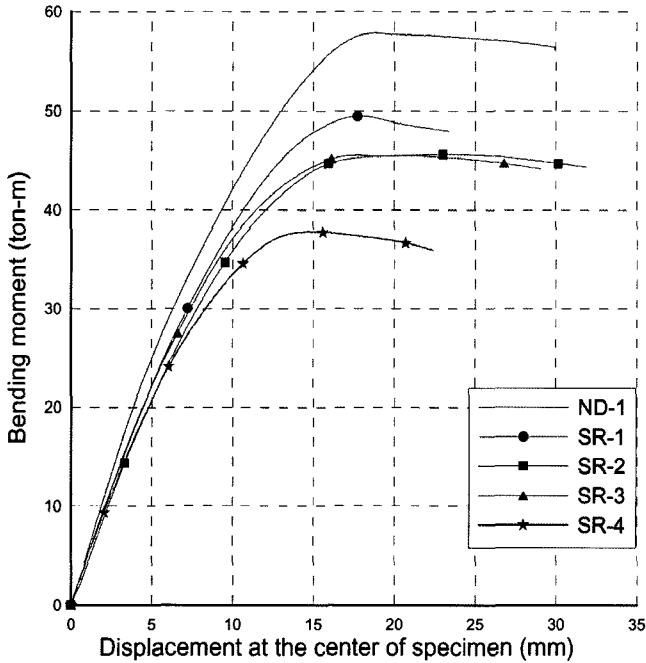
Fig. 8. Overview of test set-up.

#### 4. 실험 결과 고찰

Paik and Thayamballi[2003]에 의하면, closed-form 형태의 설계식들은 최종 한계 상태(Ultimate Limit State)를 기준으로 한 ULS 설계와 신뢰성 해석을 보다 효과적으로 구현할 수 있다. 본 연구에서는 수직 굽힘모멘트가 작용하는 경우에 대하여 제안된 식

**Table 5.** Result summary for ultimate strength

Specimen	Experiment		Closed form solutions (ton-m)			Remarks
	Mu (ton-m)	disp. (mm)	Vasta	Frieze & Lin	Paik & Mansour	
ND-1	57.9	18.6	49.8	58.5	63.5	
SR-1	49.51	18.02	-	-	-	cut
SR-2	45.65	23.53	-	-	-	cut
SR-3	45.57	17.71	-	-	-	cut
SR-4	37.92	14.65	-	-	-	pressed



**Fig. 9.** Bending moment - displacement curves.

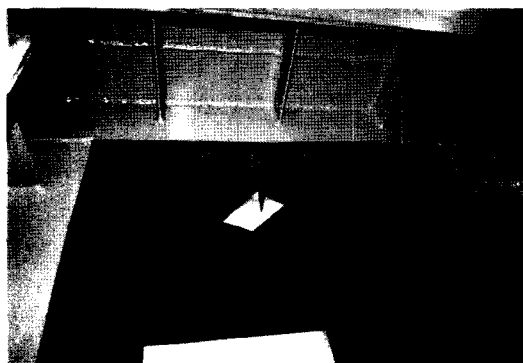
중에서 Vasta식, Frieze & Line식 그리고 Paik & Mansour식을 선택하여 적용해 보았다. 식에 대한 자세한 사항은 참고문헌(백과 Mansour[1995])을 참조하기 바란다.

위의 세 가지 최종강도식을 ND-1 모델에 적용한 결과를 Table 5에 실험결과와 함께 제시하였다. 표에 제시한 바와 같이 본 실험에서 ND-1의 최종 모멘트는 57.9 ton-m로 예측되었으며, Nishihara의 MST-3 모델에 대한 붕괴시험 결과는 57.5와 60.0 ton-m였다(Nishihara[1983]). 이들 결과를 종합하면, Vasta식을 제외한 모든

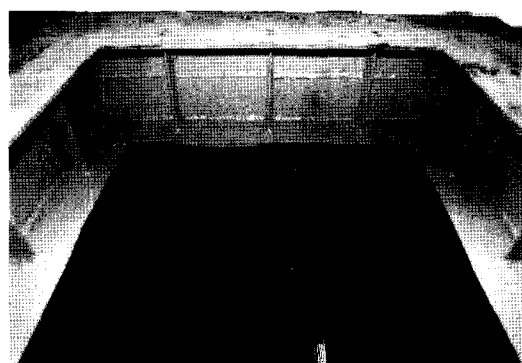
실험과 강도식들은 매우 유사한 결과를 주고 있음을 알 수 있으며, 이를 통하여 본 실험은 적절하게 제작된 시험체를 이용하여 합리적으로 수행되었다고 할 수 있을 것이다.

Fig. 9는 5개의 시험 결과를 굽힘모멘트와 하부 중앙에서 계측한 변위의 관계로 나타낸 것이다. 기본적으로 손상을 가진 모델의 최종강도는 비손상 모델에 비해 감소되었다. 손상부를 잘라 낸 3개의 모델(SR-1, 2, 3)의 결과를 볼 때, 손상의 크기가 커지면, 최종모멘트는 작아진다. 그러나 최종모멘트의 감소율은 손상 크기에 대해 선형적으로 변화하지 않았다. Table 5와 Fig. 9에서 알 수 있듯이 SR-1의 최종강도는 49.51 ton-m로 비손상 모델인 ND-1보다 약 14.5% 줄어들었다. 그러나 SR-2와 3은 매우 유사한 최종강도를 보여주었는데, 비손상 모델에 대한 감소량은 21% 정도로, 손상 크기가 SR-1에 비해 각각 100%와 200% 증가한 반면 최종강도는 45% 정도 감소하는데 그쳤으며 그나마 SR-2와 3가 유사한 최종강도를 보임으로써 다른 영향인자에 대한 추가적인 분석이 필요한 것으로 판단된다. 이러한 경향의 원인으로는 시험체의 용접 제작과정에서 발생하는 초기 처짐과 용접 잔류응력 등이 있을 수 있다. 또한, 세 모델에 대한 이러한 실험 결과로부터 손상을 가진 구조의 최종강도는 비손상 구조에 비해 저하하지만, 손상 크기에 비례하지는 않으며 손상 크기에 비해 손상의 존재 자체가 중요한 의미를 가진다는 분석이 가능하다.

SR-2와 SR-4 모델은 손상의 크기는 동일하지만, 손상의 형태가 각각 잘라낸 손상과 프레스 가공한 손상으로 다르다. 실험 결과, 프레스 가공으로 만든 손상을 가진 SR-4의 최종모멘트는 37.92 ton-m로 손상부를 잘라 낸 SR-2에 대한 값보다 훨씬 작게 나타났다. Fig. 9에서 알 수 있듯이, 이 값은 손상 크기가 큰 SR-3의 경



(a) SR-2



(b) SR-3

**Fig. 10.** Buckling damages after test.

우보다도 작은 것이다. 이것은 프레스 가공으로 인해 판 부재에 남아 있는 변형된 부분이 최종강도를 떨어뜨려 생긴 결과로 보인다. 즉, 압축하중을 받아 좌굴 붕괴하는 과정에서 변형된 부분이 좌굴모드의 진행을 가속화시켜 보다 낮은 하중 상태에서 최종 붕괴한 것으로 생각된다. SR-2와 SR-4를 비교해 보면, 변형되어 남아 있는 부분의 기여도는 약 17%(7.73 ton-m) 정도인 것으로 계산 가능하다. 한편, Fig. 10은 실험이 종료된 후의 변형 상태를 찍은 것으로 손상부 주변이 좌굴 붕괴된 것으로 잘 보여주고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 선저가 암초 위에 올라앉은 다음 손상을 당한 정지형 좌초 손상을 고려하여 다섯 개의 모델을 만들어 시리즈 붕괴실험을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 좌초손상이 커지면, 최종강도는 감소한다. 그러나 본 실험에서 수행한 손상 범위 내에서 살펴볼 때 손상 크기와 최종강도 감소량의 관계는 선형적이지 않으며, 손상에 의한 최종강도 감소라는 측면에서 볼 때 손상이 얼마나 증가하는 것보다는 일정 크기 이상의 손상이 있느냐 없느냐라는 손상의 존재 자체가 중요한 것으로 나타났다.

2) 잘라 낸 손상과 프레스 가공한 손상을 가진 모델에 대한 최종강도 비교 결과, 프레스 가공한 손상모델의 경우 프레스에 의해 변형되었으나 판 부재에 붙어 있는 부분이 최종강도에 어느 정도 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었다. 이것은 손상을 가진 구조에 대한 최종강도를 평가할 때 변형된 부분의 기여도를 적절하게 반영해야 함을 보여주는 것이라 판단된다.

## 후 기

이 연구는 산업자원부 지원으로 수행된 “선박 구조 안전성 평가 및 방음/쌍진 기술 개발” 과제의 연구 성과 중 하나임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 백점기, Mansour, A.E., 1995, “선각거더의 최종강도 간이계산식”, 대한조선학회 논문집, 제32권, 제3호, 83-97.
- [2] Daniel, D.B., Kihl, D.P. and Adamchak, K.C., 2000, “Evaluation of the effect of construction tolerances on vessel strength”, Ship Structure Committee, Report No. SSC-411.
- [3] Dow, R.S., 1991, “Testing and analysis of 1/3-scale welded steel frigate model”, Proc. of the International Conference on Advances in Marine Structure, Dunfermline, Scotland, 749-773.
- [4] International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF), [www.itopf.com/information%2Dservices/data%2Dand%2Dstatistics/statistics/index.html](http://www.itopf.com/information%2Dservices/data%2Dand%2Dstatistics/statistics/index.html).
- [5] Nishihara, S., 1983, “Analysis of ultimate strength of stiffened rectangular plate (4th report) -on the ultimate bending moment of ship hull girder”, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.154, 367-375.
- [6] Paik, J.K. and Thayamballi A.K., 2003, Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England.
- [7] Qi, E., Chi, W. and Wan, Z., 2005, “Comparative study of ultimate hull girder strength of large double hull tankers”, Marine Structures, Vol.18, 227-249.

2008년 2월 19일 원고접수

2008년 4월 14일 수정본 채택