

충돌 손상된 선체구조의 최종 종강도에 관한 실험적 연구

이탁기* · 임채환*

*한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

An Experimental Study on the Ultimate Longitudinal Strength of Ship Structures Damaged due to Side Collision

TAKKEE LEE* AND CHAE WHAN RIM*

*System Engineering Research Division, KIMM (Korea Institute of Machinery & Materials), Daejeon, Korea

KEY WORDS: Collision damage 충돌손상, Box-girder 박스 거더, Ultimate strength 최종강도, Pure bending load 순수 굽힘하중

ABSTRACT: Ships in bad weather conditions are likely to be subjected to accidental loads, such as high bending moment, collision, and grounding. Once she has damage to her hull, her ultimate strength will be reduced. This paper discusses an investigation of the effect of collision damage on the ultimate strength of a ship structure by performing a series of collapse tests. For the experiment, five box-girder models with stiffeners were prepared with a cross section of 720mm × 720mm and a length of 900mm. Of the five, one had no damage and four had an ellipse shaped damage area that represented the shape of the bulbous bow of a colliding ship. The amount of damage size was different between models. Among the damaged models, the damage in three of them was made by cutting the plate and stiffener, and in one by pressing to represent collision damage. Experiments were carried out under a pure bending load and the applied load and displacements were recorded. The ultimate strength was reduced as the damage size increased, as expected. The one with the largest amount of damage had damage to 30% of the depth, and its ultimate strength was reduced by 19% compared to the undamaged one. The pressed one has higher ultimate strength than those that were cut. This might be due to the fact that the plate around the pressed damage area contributes to the ultimate strength, whereas the cut one has no plate to contribute.

1. 서 론

최근 국제해사기구(IMO)와 국제선급연합회(IACS)는 선체 구조 설계 시 판 및 보강판의 최종강도를 고려하는 것을 포함한 규정이나 규칙을 만들고 있다. 국제해사기구에 의해 추진 중인 Goal based standards(GBS)의 궁극적인 목적은 일생 동안 안전한 선박이다. 즉, 선박은 설계 수명 동안 안전해야 하며, 이를 위해 선박의 설계, 건조, 운항 및 유지보수를 포함한 모든 단계에서 사용 가능한 모든 수단을 활용해야 한다는 것이다. 국제 선급연합회에서 유조선과 산적화물선에 대해 제정한 공통구조규칙(Common structural rules; CSR)은 설계 단계에서 적용해야 하는 수단의 좋은 예이며, 이 규칙에 의하면 구조 설계자는 다양한 하중 조건 하에서 판부재의 최종강도를 검토해야 한다.

한편, 판과 보강재로 이루어진 선각 거더의 종강도는 선박이 구조적 건전성을 유지하는데 가장 중요한 요소이다. 만약 선박이 사고로 인해 손상을 입었다 하더라도 종강도 상의 안전 여유가 있다면, 선박은 어느 정도 기간 동안 생존할 수 있을 것이다. 이때, 생존 기간은 안전 여유 크기에 달려 있을 것이다. 하지만, 너무 많은 안전 여유를 가지도록 선박을 건조하는 것은 건

조비, 운항비 등의 효율성 측면에서 바람직하지 않은 선택이 될 것이다. 그래서 설계자들은 선각 거더의 최종강도에 대한 정확한 정보를 알고 있어야 한다. 이것이 최근 최종 종강도가 중요한 관심사로 대두되고 있는 주된 이유이다.

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

충돌 및 좌초와 같은 사고에 의해 발생한 손상이 선체 구조의 최종강도에 어떠한 영향을 미치는가 하는 것 또한 관심사 중의 하나이다. 선박은 악천후 시 충돌 및 좌초와 같은 사고 하중을 받기 쉽다. 일단 선박이 손상을 입으면, 그 최종강도는 저하할 것이다. 본 연구에서는 최종강도에 대한 충돌손상의 영향을 조

교신저자 이탁기: 대전광역시 유성구 신성로 104

042-868-7473 tklee@kimm.re.kr

사하기 위하여 시리즈 붕괴실험을 수행하였다. 실험은 순수 굽힘 하중 하에서 수행되었으며, 작용 하중과 선저판 하부의 변위가 계측되었다.

2. 실험 방법 및 모형

Nishihara(1983)는 단일 선체 유조선, 이중 선체 유조선, 컨테이너선 및 벌크선의 단면을 이상화하여 9개의 모델을 제작하고 4점 굽힘으로 최종 붕괴실험을 수행한 바 있는데, 본 연구에서는 이 방법에 따라 실험을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 수행한 4점 굽힘 시험에 대한 개략도이며, 지지점과 가력점 사이의 거리 등이 표시되어 있다. 이 방법에 의하면, 두 가력점 사이에 위치한 시험체는 순수 굽힘 모멘트를 받게 된다. Fig. 2는 시험체와 시험용 지그에 대한 약식 도면을 보여주고 있다. 시험체는 Nishihara의 모델 중 단일 선체 유조선의 단면을 이상화한 MST-3 모델과 동일한 것이다.

본 연구에서는 단면의 크기가 720mm×720mm인 총 5개의 박스-거더 모델을 제작하였으며, 시험체의 길이는 900mm이다. 5개의 모델 중, 1개는 손상이 없으며, 나머지 4개 모델은 충돌선의 구상선수 모양을 이상화한 타원형 손상을 가지고 있다. Fig. 3은 3mm 두께의 보강재를 포함한 비손상 모델에 대한 단면도이다.

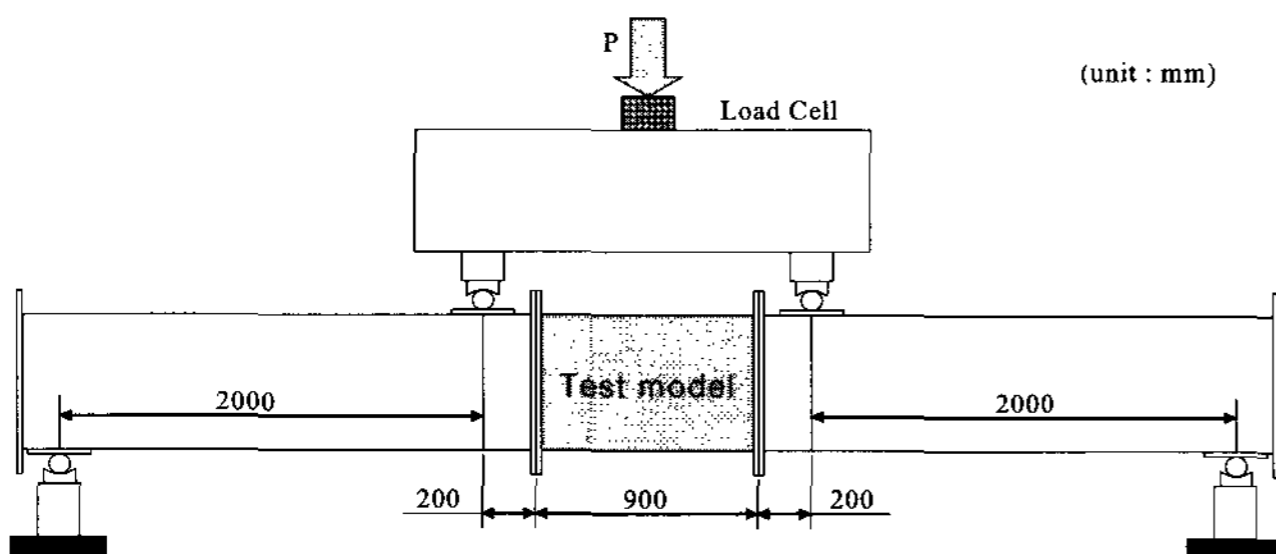


Fig. 1 Drawing for four point bending test

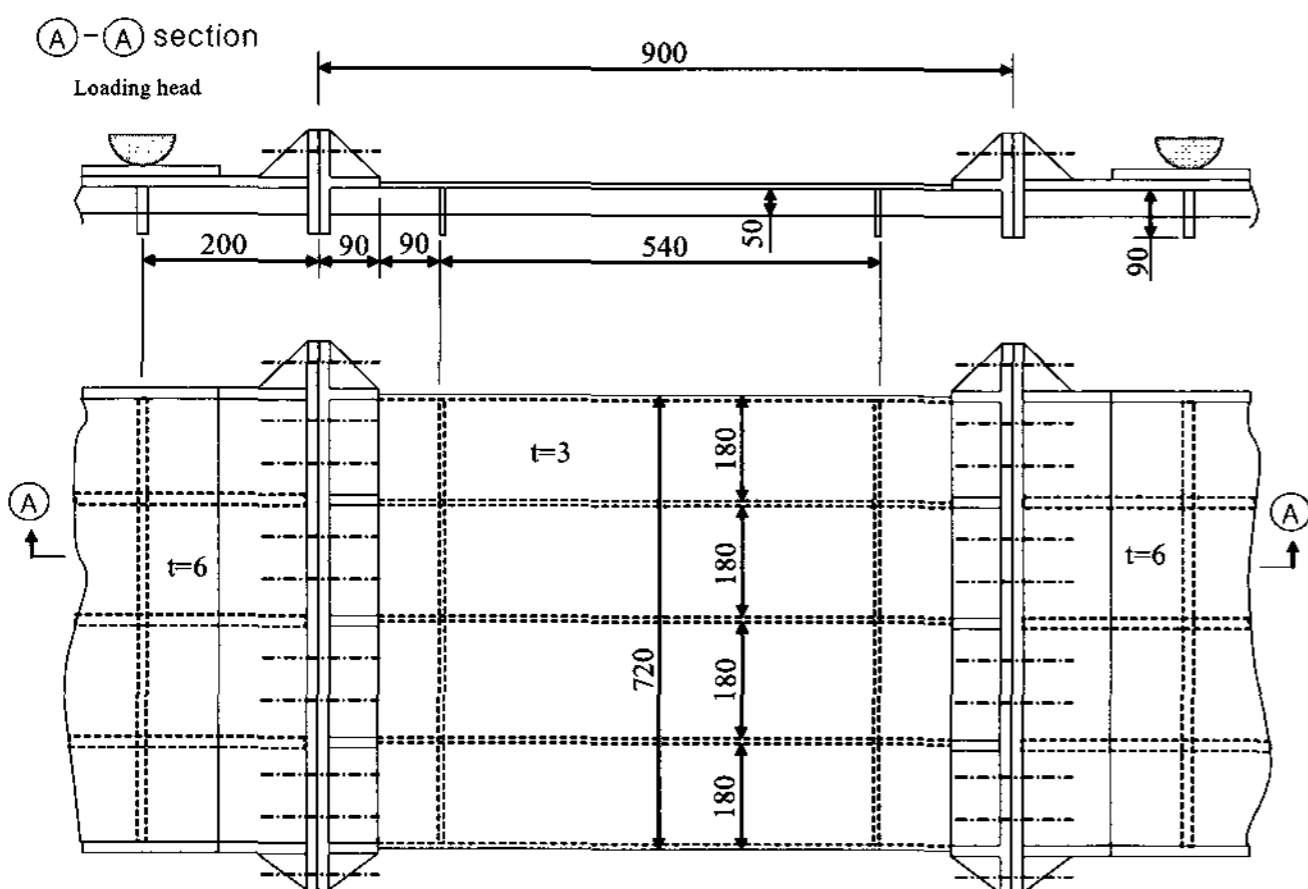


Fig. 2 Drawing for construction of test model and jig

선측 충돌시 충돌선의 구상 선수에 의한 손상은 Fig. 4와 같이 측면판에 타원형으로 만들어졌다. 손상 위치는 길이 방향에서는 시험체의 중앙부에, 깊이 방향으로는 새김상태에서 압축하중을 받게 되는 중립축 상부를 선택하였다. Fig. 4에서 a로 표현한 타원의 장축 직경은 시험체의 전체 깊이에 대한 10, 20 및 30%에 대응되도록 각각 72mm, 144mm 및 216mm로 정하였다. 또한, 이들 손상은 내부 보강재의 파단까지 포함하고 있는데, 이는 보강재 사이의 판만 손상을 입는 경우보다 심각한 손상을 설정한 것이다. Table 1에는 손상 형태와 손상의 크기를 포함한 5개의 시험체에 대한 정보를 요약해서 제시하고 있다. 손상 모델 중, CO-1 ~ 3의 손상은 판을 잘라 내어 만든 것이며, CO-4의 손상은 프레스에 의해 제작된 것으로 충돌로 인한 손상을 보다 실제에 가깝게 구현하고자 시도한 것이다(Fig. 5 참조). 프레스 가공시, 판의 전체적인 변형을 방지하기 위해 손상부를 제외한 바깥부분을 고정시켰으며, 최대 진입거리는 $0.5a=72\text{mm}$ 이다.

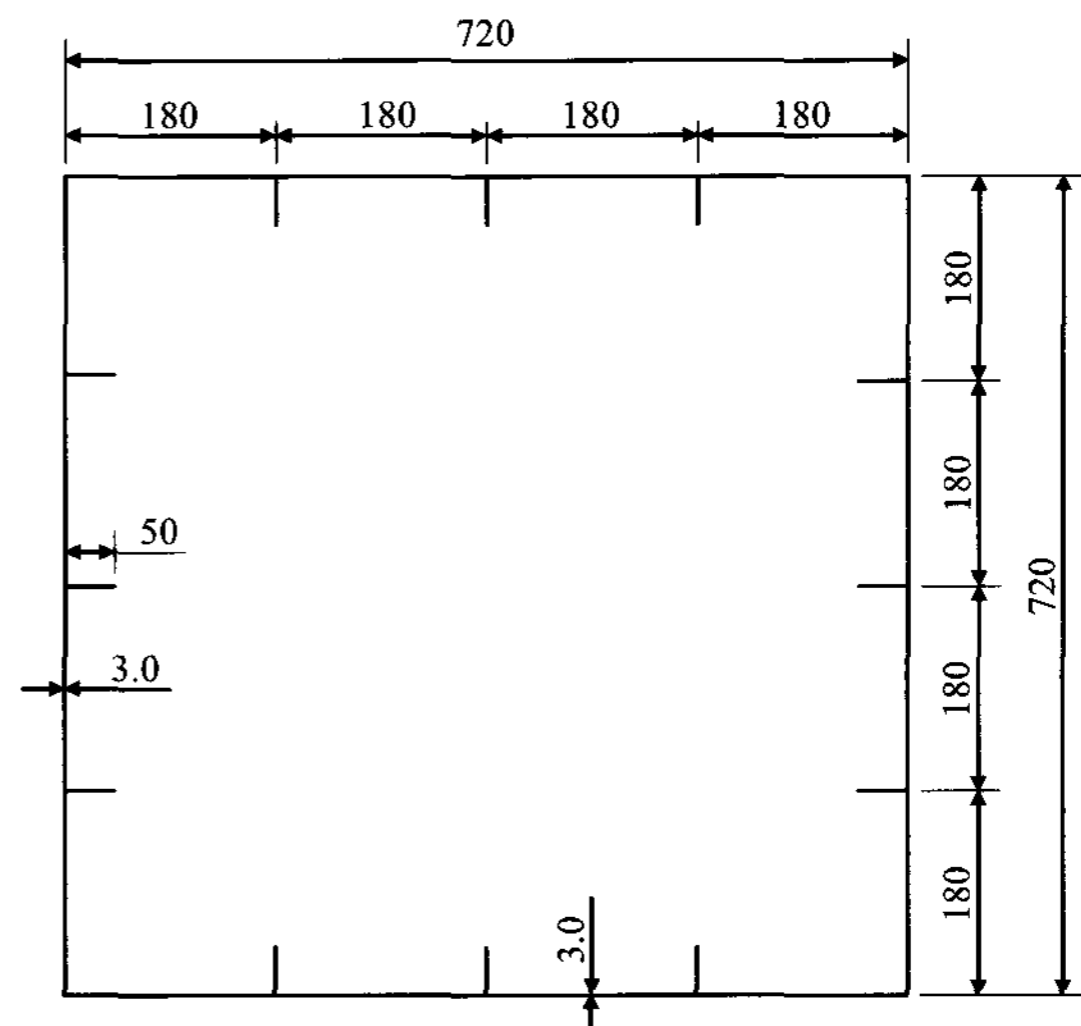


Fig. 3 Dimension of no damage model

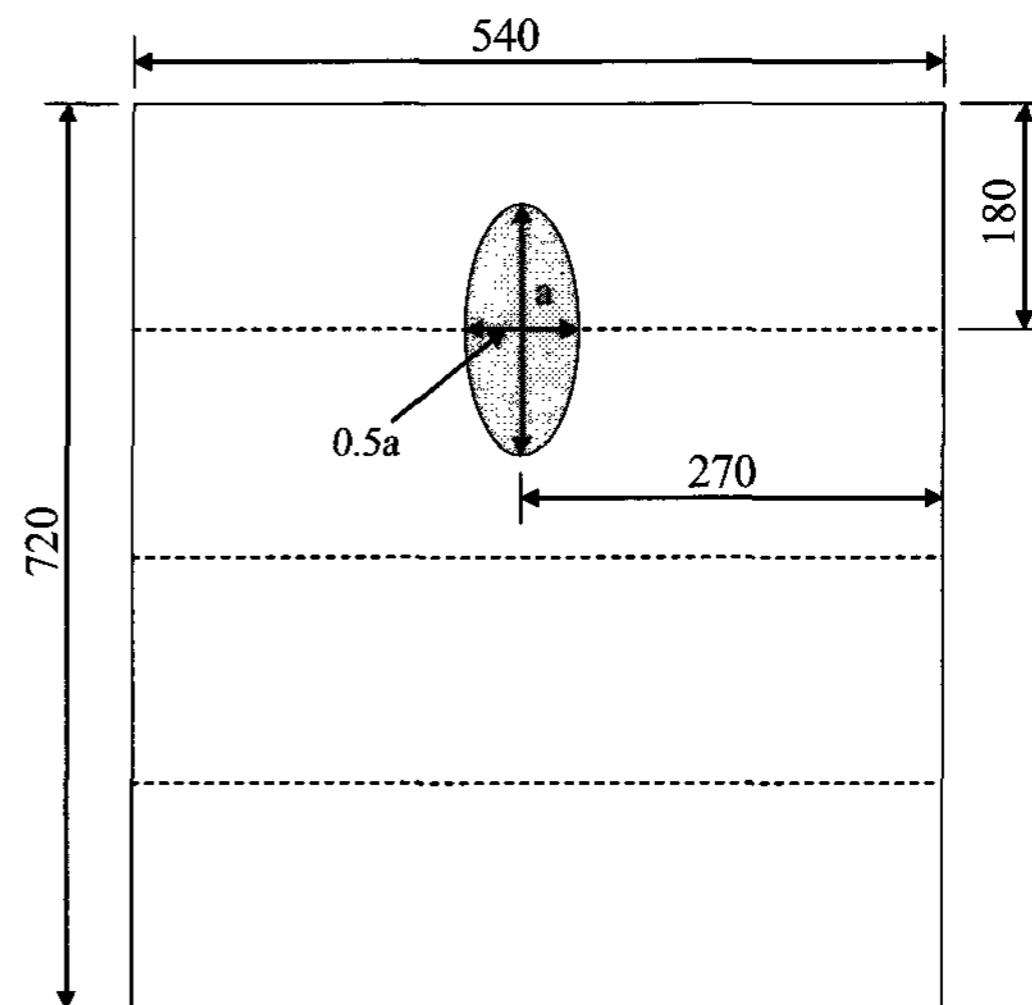


Fig. 4 Location and shape of collision damage

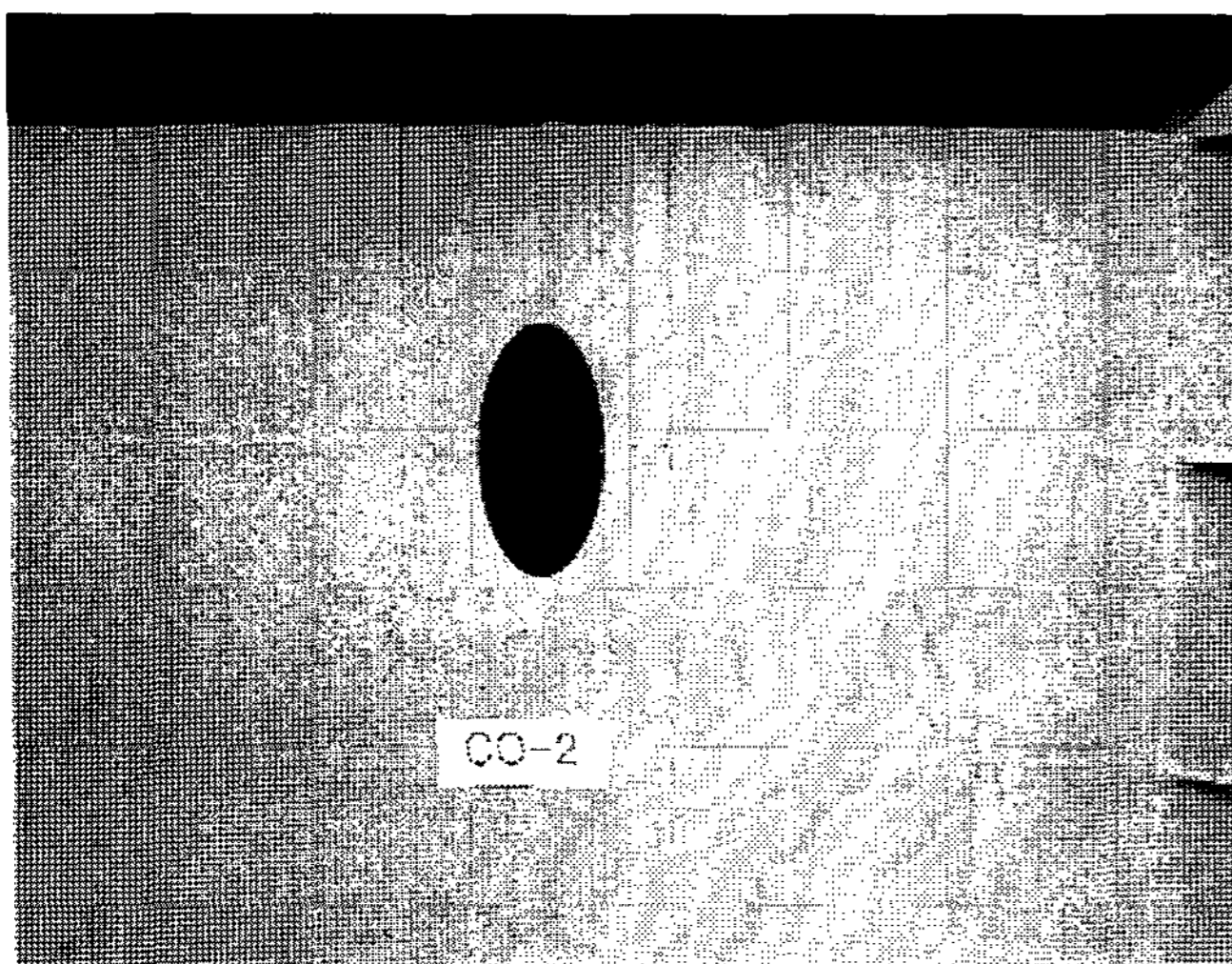
3mm 두께의 시험체에 사용된 재료는 연강(SS400)으로 인장 시험 결과, 항복강도는 284MPa, 탄성계수는 200GPa이었다.

3. 측정 및 시험

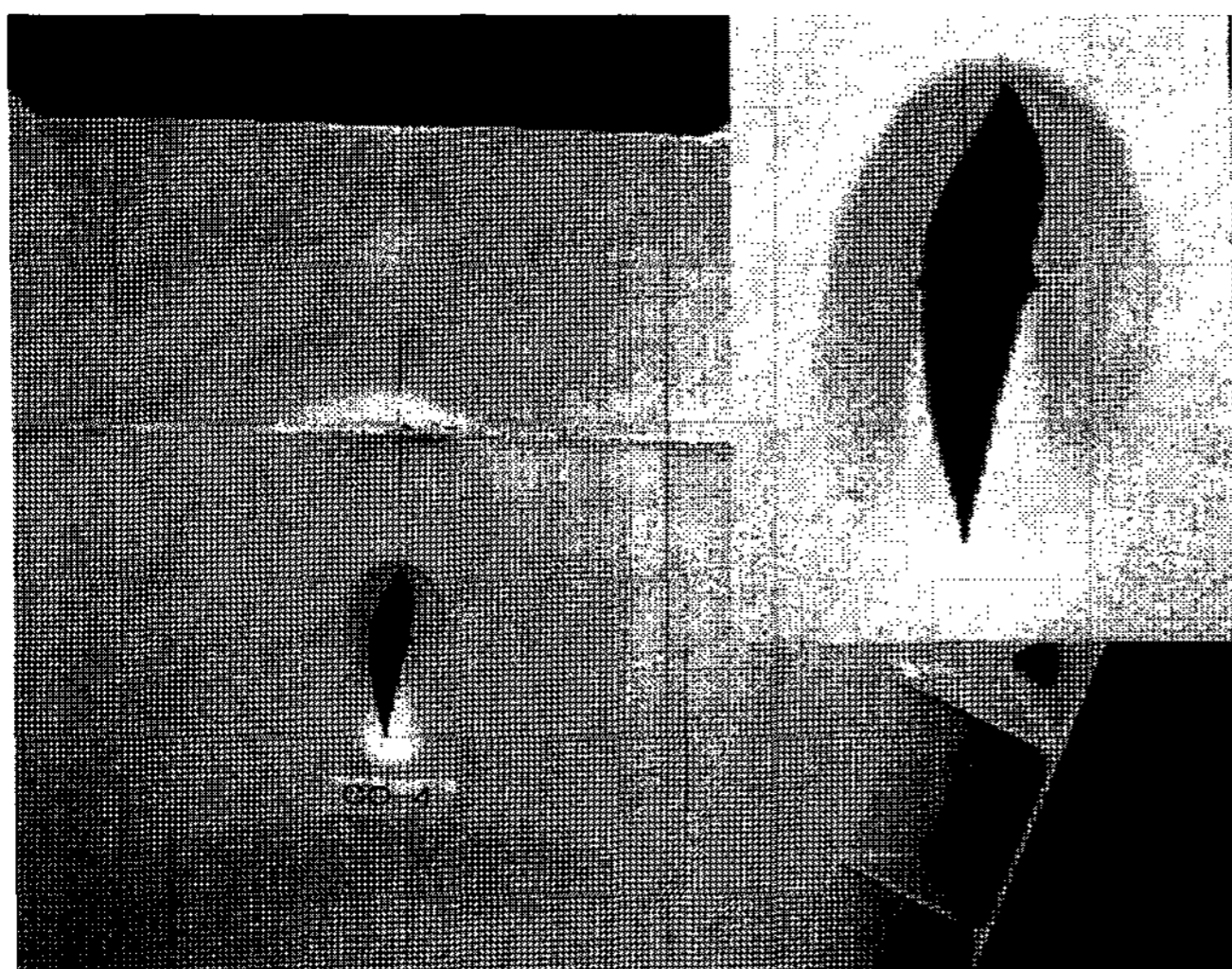
용접 제작시 구조물에는 초기 처짐이 발생할 수 있다. 압축하중을 받는 경우, 판의 초기 처짐은 최종강도에 상당한 영향을

Table 1 Test models for ultimate strength test

Model	Type of damage	Damage size (mm)	Remark
ND-1	No damage	-	MST-3
CO-1	cutting	72	
CO-2	cutting	144	
CO-3	cutting	216	
CO-4	pressing	144	



(a) Cutting damage (CO-2)



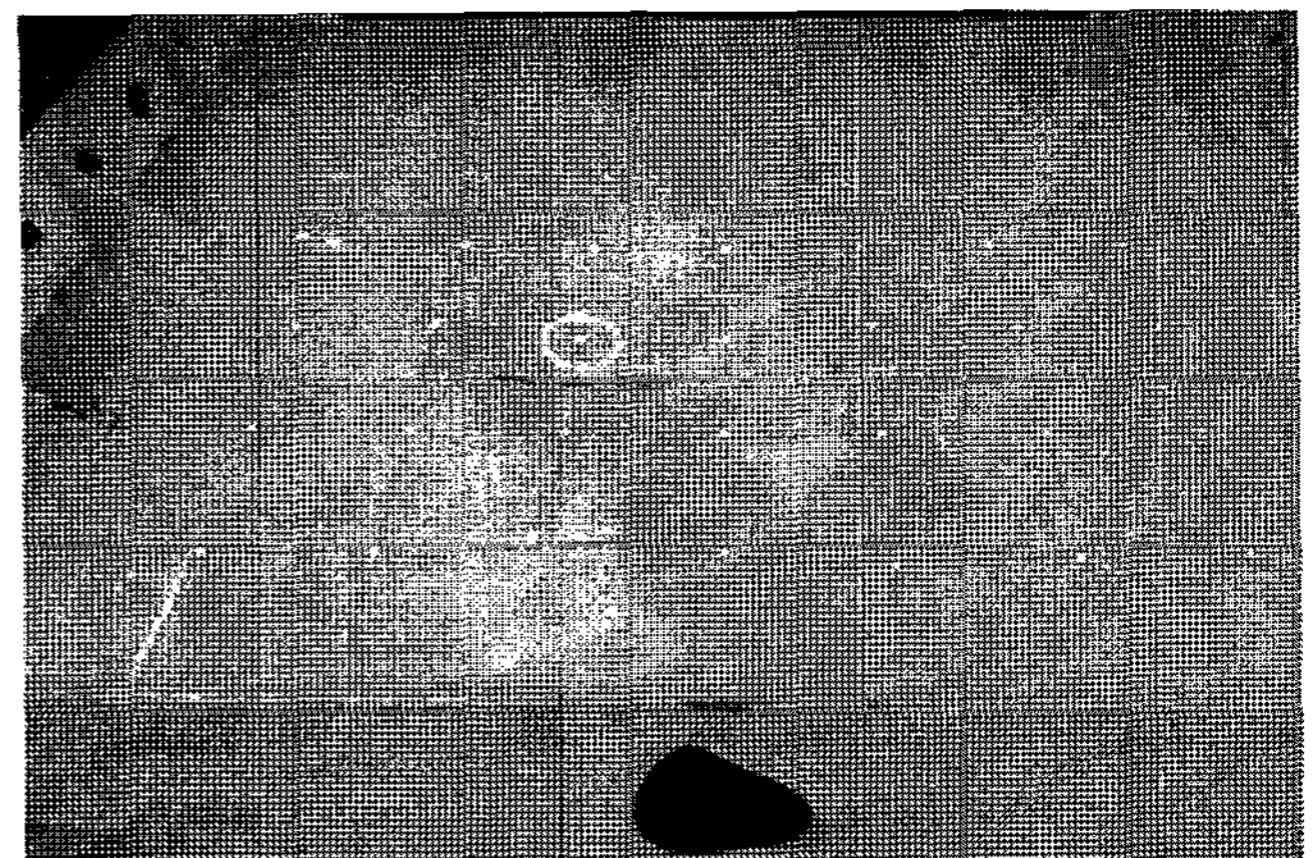
(b) Pressing damage (CO-4)

Fig. 5 Types of damages

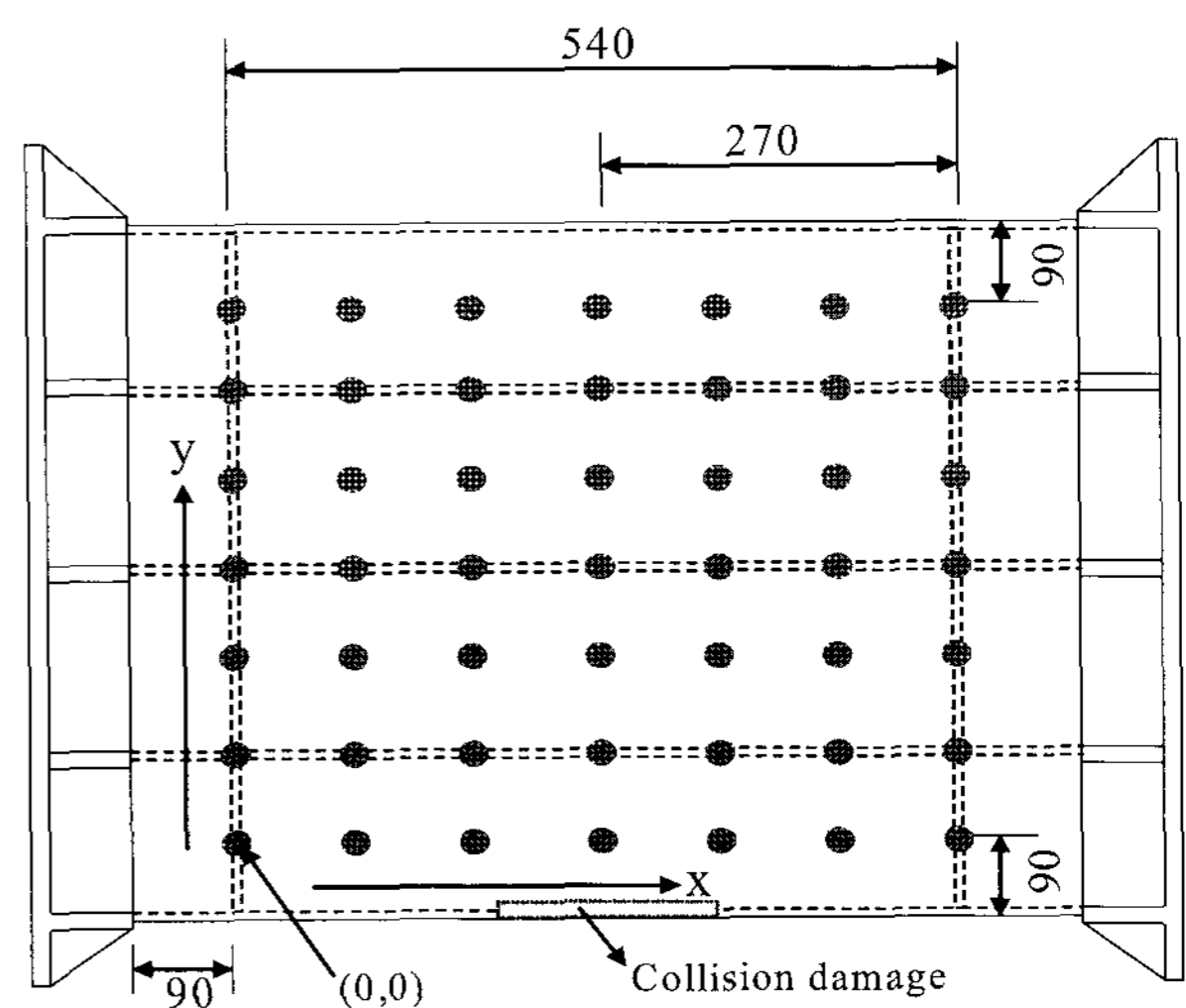
끼칠 수 있다는 것은 이미 알려져 있는 사실이다(Paik and Thayamballi, 2003). 새김 상태에서는 갑판 부재가 압축하중을 받게 되므로, 본 연구에서는 손상부를 잘라 낸 3개 시험체의 갑판 부재에 대한 초기 처짐을 NC기계를 활용하여 측정하였다. Fig. 6은 측정에 이용된 기준점과 측정점 그리고 좌표계를 보여 주고 있다. Table 2~4는 CO-1, 2, 3에 대하여 측정된 초기 처짐을 정리하여 보여 준다. (-)부호는 아랫방향 처짐을 의미한다.

Fig. 7에서 보여 주듯이, 시험 도중 선저판 하부의 5개 지점에서 LVDT를 이용하여 변위를 측정하였으며, 두 개의 스트레인 게이지를 이용하여 설치 상태를 점검하고 전체 붕괴시 판의 항복 여부도 확인하였다. Fig. 8은 시험 설치를 보여준다.

또한, Fig. 9는 CO-1 ~ 4의 변형률 측정자료이며, Fig. 10은 변위 측정자료를 제시하고 있다. 이때, ND-1에 대한 변형률 측정은 게이지 이상으로 제대로 수행되지 못하였으며, 다른 모델에 대한 변위는 모두 Fig. 10과 유사한 양상으로 5개의 LVDT에 의해 거의 비슷한 값으로 변화되고 있다.



(a) A reference point (CO-3, a dotted circle)



(b) Measuring points and origin

Fig. 6 A reference point, measuring point and coordinate system for initial deformation

Table 2 Measured initial deformation of CO-1 (unit: mm)

y \ x	0	90	180	270	360	450	540
0	2.65	1.93	1.70	0.68	1.44	2.43	2.60
90	2.15	2.10	1.81	1.55	1.33	1.64	2.02
180	2.42	2.06	0.50	3.05	2.01	1.37	2.30
270	2.00	2.05	1.75	1.47	1.28	1.46	1.81
360	2.34	2.74	3.23	0.11	-0.30	1.47	2.37
450	2.05	2.06	1.80	1.65	1.58	1.87	2.23
540	2.44	1.77	1.43	2.28	3.09	0.00*	2.55

Note: * ref. pt; max.: 3.23mm, min.: -0.30mm, diff.: 3.53mm

Table 3 Measured initial deformation of CO-2 (unit: mm)

y \ x	0	90	180	270	360	450	540
0	2.41	1.82	2.29	1.64	-0.31	0.36	1.02
90	1.35	1.31	0.87	0.48	0.18	0.01	0.26
180	1.15	0.65	-1.64	-1.81	0.20	-0.27	0.22
270	0.58	0.43	-0.03	-0.40	-0.62	-0.60	-0.40
360	0.80	-0.05	0.76	0.54	-0.88	-0.48	0.15
450	0.71	0.71	0.41	0.11	0.02	-0.06	0.02
540	1.44	1.18	0.71	0.00*	-0.08	-0.23	1.10

Note: * ref. pt; max.: 2.41mm, min.: -1.81mm, diff.: 4.22mm

Table 4 Measured initial deformation of CO-3 (unit: mm)

y \ x	0	90	180	270	360	450	540
0	2.79	2.08	1.61	1.67	2.65	3.08	3.69
90	1.87	1.74	1.70	2.26	2.63	3.00	3.12
180	1.99	1.26	1.64	3.77	3.15	2.88	3.10
270	1.67	1.61	1.58	1.98	2.18	2.48	2.54
360	2.31	1.80	2.35	0.73	0.00*	1.53	2.86
450	2.10	1.75	1.73	2.26	2.45	2.56	2.54
540	2.92	1.70	-0.29	3.32	4.05	3.24	3.14

Note: * ref. pt; max.: 4.05mm, min.: -0.29mm, diff.: 4.34mm

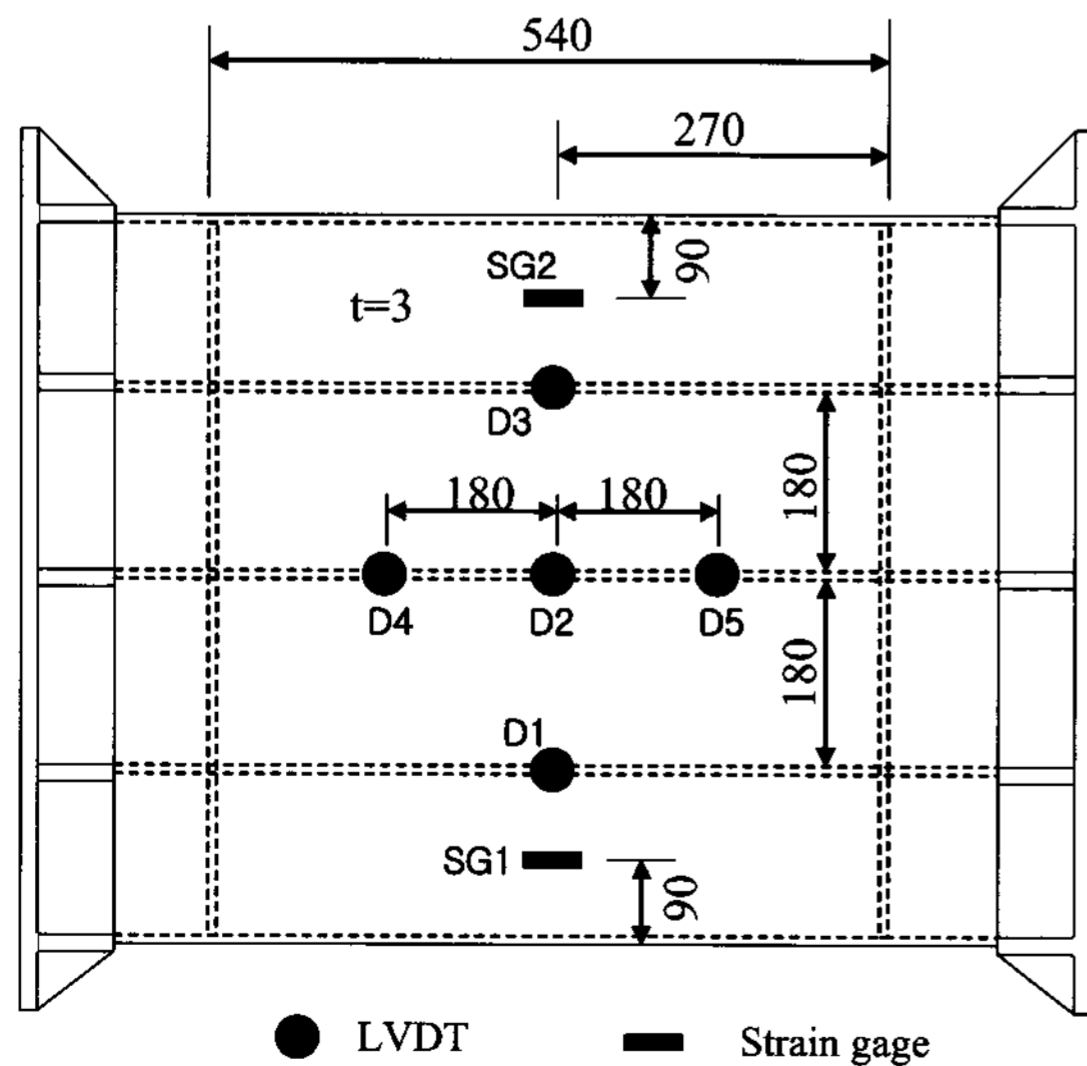


Fig. 7 Location of LVDT and strain gage

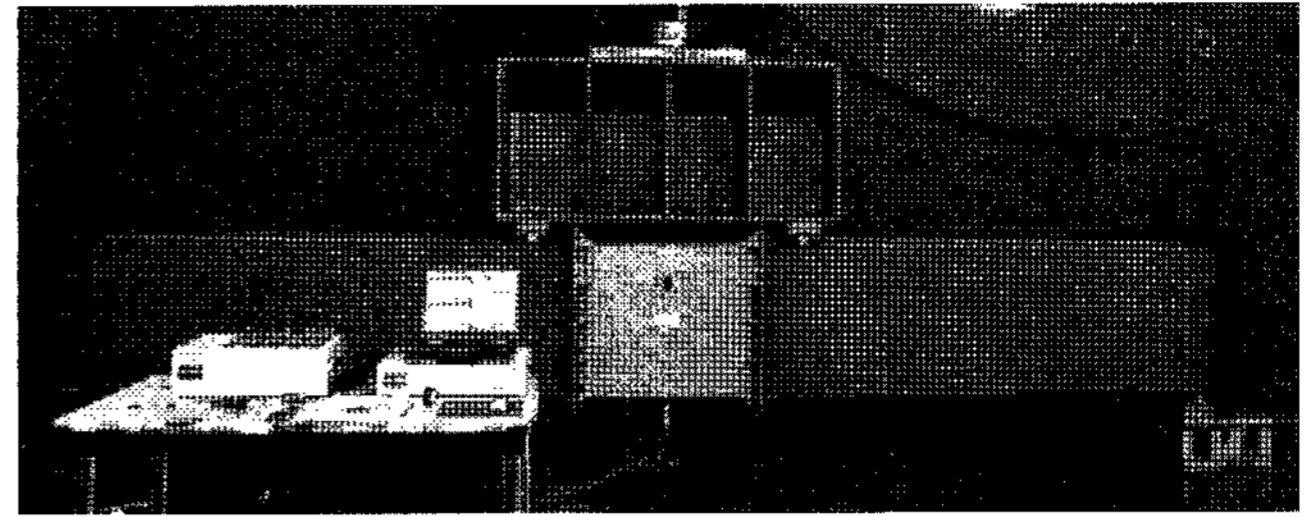


Fig. 8 Overview of test set-up

Table 5 Result summary for ultimate strength

Test model	Present experiment		Closed-form solutions (ton-m)			Remarks
	M_u (ton-m)	Disp. (mm)	Vasta	Frieze & Lin	Paik & Mansour	
ND-1	57.9	18.6	49.8	58.5	63.5	
CO-1	49.6	15.1	-	-	-	cutting
CO-2	45.6	14.0	-	-	-	cutting
CO-3	47.0	16.0	-	-	-	cutting
CO-4	53.0	19.2	-	-	-	pressing

Note: * displacement at the center of bottom plate

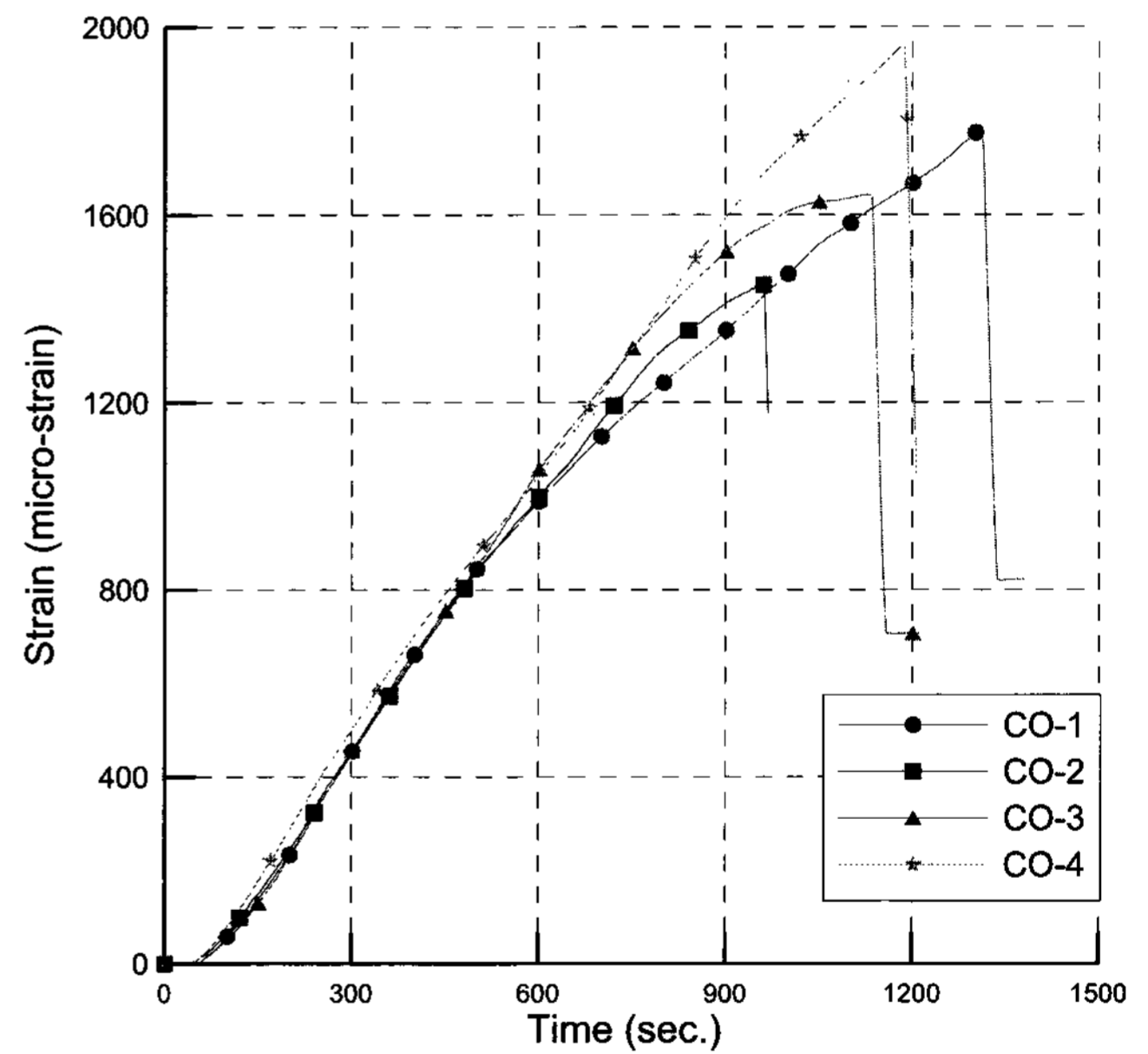


Fig. 9 Measured strains for CO-1 ~ 4

4. 시험결과에 대한 검토

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 중에서 Vasta식, Frieze & Line식 그리고 Paik & Mansour식을 선택하여 적용해 보았다. 식에 대한 자세한 사항은 참고문헌을 참조하기 바란다(백점기와 Mansour, 1995).

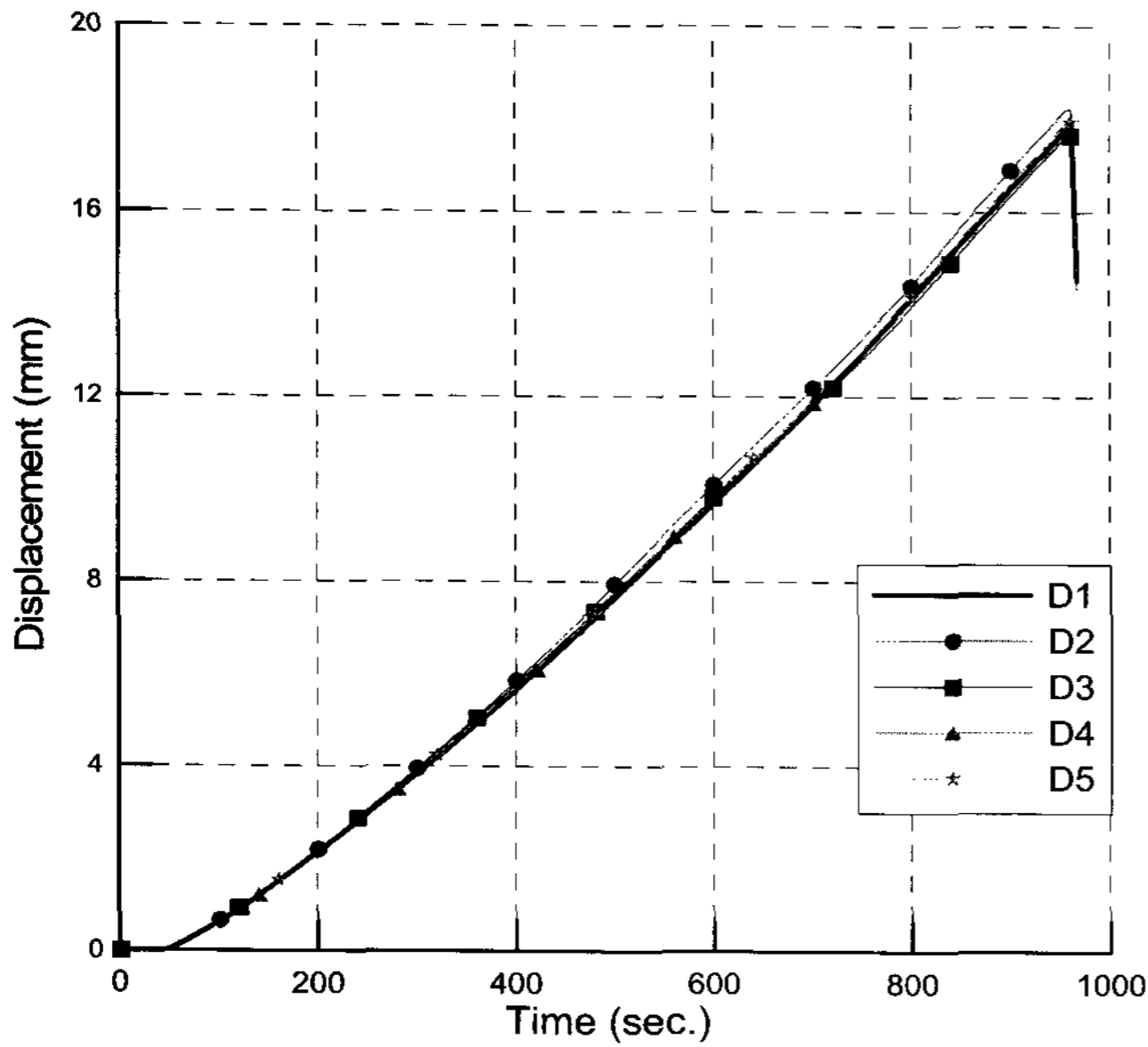


Fig. 10 Measured displacements for CO-2

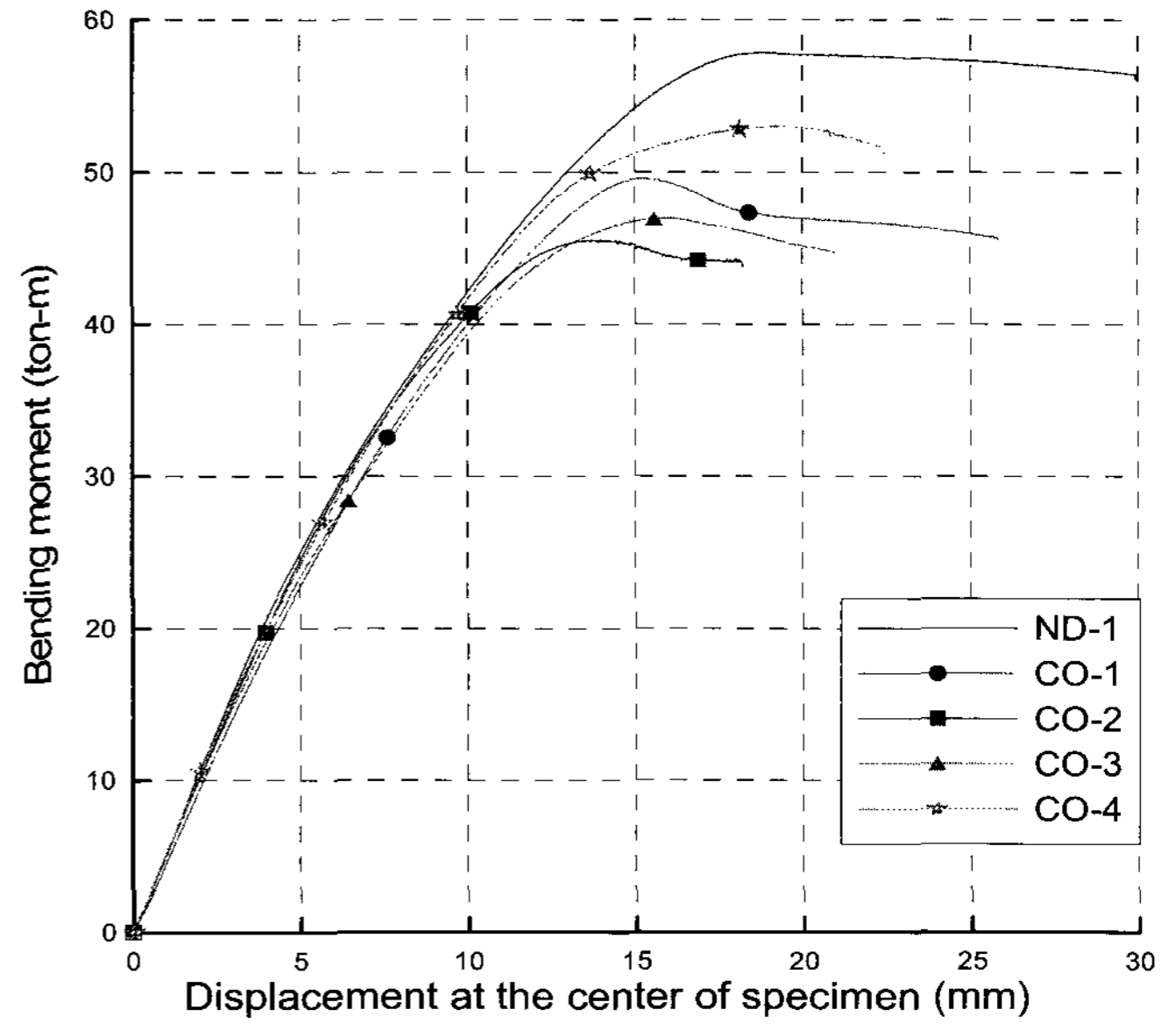


Fig. 11 Bending moment - displacement curves

위의 세 가지 최종강도식은 좌우가 대칭인 구조에 대해서만 적용 가능하며, 그 결과는 손상이 압축 플랜지에 있고 대칭인 경우에만 의미를 가진다. 그래서 위 식들은 ND-1 모델에만 적용하였다. 본 실험에서 ND-1의 최종 모멘트는 57.9ton-m로 계측되었다. Nishihara의 실험(1983)에 의하면, MST-3의 최종 모멘트는 57.5와 60.0ton-m였다. Table 5에서 알 수 있는 바와 같이, Vasta의 식을 제외하면 모든 실험과 강도식들은 매우 유사한 결과를 주고 있으며, 이를 통하여 본 실험은 적절하게 제작된 시험체를 이용하여 합리적으로 수행되었다고 할 수 있다.

손상부를 잘라 낸 3개의 모델에서 손상의 크기가 커지면, 최종모멘트는 작아진다. 그러나 최종모멘트의 감소율은 손상 크기에 대해 선형적이지도 않고 그리 크지도 않다. 손상의 크기가 커졌음에도 불구하고 CO-3의 최종모멘트는 CO-2의 최종모멘트보다 크다. 이러한 경향의 주된 이유는 시험체의 용접 초기처짐과 잔류응력 등의 영향일 것으로 추정된다. 이 중, 초기처짐의 경우 Table 2~4에서 알 수 있듯이 CO-1에 비해 CO-2, 3의 처짐량이 크게 계측되었으나, CO-2와 3의 경우는 오히려 CO-3이 약간 큰 것으로 나타났다. 관련 분석은 Paik and Thayamballi (2003)이 지적하였듯이 처짐량 뿐만 아니라 처짐 형상도 강도에 영향을 미치므로 보다 면밀한 분석이 필요하다.

한편, Fig. 5 (b)와 Fig. 7 (a)에서 알 수 있듯이, 주요 손상 형태는 압축 플랜지에서 발생한 좌굴 손상이었으며, 어떠한 경우에도 판이나 보강재의 파단은 발생하지 않았다. 그리고 CO-1 모델에서, 최종강도는 손상이 없는 ND-1의 경우보다 약 14% 감소된다. CO-3 모델은 그 감소율이 19%이다. 다른 한편, 손상의 크기가 선체 깊이와 비교하여 CO-1의 10%에서 CO-3의 30%까지 20% 증가되었음에도 불구하고, 최종강도는 단지 5% 정도 줄어든 결과를 보여주고 있다(Fig. 11 참조). 이러한 실험 결과로부터 손상을 가진 구조의 최종강도에 있어서 중요한 것은 손상의 크기가 아니라 손상의 존재 여부라는 것을 알 수 있다.

CO-2와 CO-4 모델은 손상의 크기는 동일하지만, 손상의 형태

가 각각 잘라낸 손상과 프레스 가공한 손상으로 다르다. 실험 결과, 프레스 가공으로 만든 손상을 가진 CO-4의 최종모멘트는 53.0ton-m로 손상부를 잘라 낸 CO-2의 45.6ton-m보다 크게 나타났다. 또한, Fig. 11에서 알 수 있듯이, CO-4의 최종모멘트는 손상 크기가 보다 작은 경우인 CO-1의 결과보다도 크게 나타났다. 이것은 프레스 가공으로 인해 손상은 되었으나 판부재에 남아 있는 변형된 부분이 최종강도에 어느 정도 영향을 끼쳐 생긴 결과로 보인다. CO-2와 CO-4를 비교해 보면, 변형되어 남아 있는 부분의 기여도는 약 14%(7.4ton-m) 정도인 것으로 계산 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 선측 충돌로 생긴 손상을 고려하여 다섯 개의 모델을 만들어 시리즈 붕괴실험을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 손상이 커지면, 최종강도는 감소한다. 그러나 본 실험에서 수행한 손상 범위 내에서 살펴볼 때 최종강도 측면에서 보다 중요한 것은 손상의 크기가 아니라 손상의 존재 그 자체라는 것을 알 수 있었다.

(2) 잘라 낸 손상과 프레스 가공한 손상을 가진 모델에 대한 최종강도 실험 결과, 프레스 가공한 손상에서 변형되었으나 판부재에 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

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행된 '선박 구조 안전성 평가 및 방음/방진 기술 개발' 과제의 연구결과 중 일부임을 밝

하며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 백점기, Mansour, A.E. (1995). "선각거더의 최종강도 간이계산식", 대한조선학회 논문집, 제32권, 제3호, pp 83-97.
- 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.
- Dow, R.S. (1991). "Testing and Analysis of 1/3-scale Welded Steel Frigate Model", Proceedings of the International Conference on Advances in Marine Structure, Dunfermline, Scotland, pp 749-773.
- 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, pp 367-375.
- Paik, J.K. and Thayamballi A.K. (2003). Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England.
- Qi, E., Chi, W. and Wan, Z. (2005). "Comparative Study of Ultimate Hull Girder Strength of Large Double Hull Tankers", Marine Structures, Vol 18, pp 227-249.

2007년 12월 5일 원고 접수

2008년 4월 1일 최종 수정본 채택