

보재의 손상에 따른 비계용 작업발판의 강성 변화에 대한 실험적 연구

성용원* · 강민국** · 원정훈***†

An Experimental Study on the Stiffness Change of Scaffold Working Plate caused by Damage of Cross-beam

Yong-won Sung* · Min-guk Kang** · Jeong-Hun Won***†

†Corresponding Author

Jeong-Hun Won

Tel : +82-43-261-2459

E-mail : jhwon@chungbuk.ac.kr

Received : January 18, 2021

Revised : September 15, 2021

Accepted : October 14, 2021

Abstract : This study investigated the change in stiffness and deflection of a scaffold working plate caused by damage to a cross-beam in the plate. Experiments were conducted considering various load and damage conditions of cross-beams. A cross-beam falling off from the working plate was considered damaged. The load-displacement curves of specimens at the center of the uniform load showed that the working plate stiffness decreased by 14.66%-1.89%, depending on the load interval due to the damage of one cross-beam. A reduction in the stiffness of 33.94%-40.76% resulted from the damage of two cross-beams. Moreover, the displacement increased by an average of 25% when one cross-beam was damaged and an average of 65% when two cross-beams were damaged. Therefore, damage to the cross-beam in the working plate can potentially cause accidents and harm workers. As the load increases, the risk of an accident due to the aforementioned damage also increases because the stiffness remarkably decreases with the load increase. Further, the damage to the cross-beam mainly reduces the stiffness but increases the displacement rather than the strength of the working scaffold plate.

Key Words : stiffness, scaffold working plate, cross-beam, experiment, damage

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

국내 건설현장에서 사망 사고의 절반 이상을 차지하는 떨어짐 재해는 매년 꾸준히 발생하고 있다. 안전보건공단에서 발표한 2019년도 산업재해의 발생 현황에 따르면 건설업 사고사망자 428명 중 265명(61.9%)이 떨어짐에 의해 발생하였다¹⁾. 또한 건설업의 사망 재해 발생 형태를 기인물별로 살펴보면 2018년 사망 재해 371건 중 가설건축구조물이 190건(51.2%)으로 확인되었고, 세부항목에서 비계가 52건(27.3%)으로 가장 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 확인되었다²⁾.

비계의 구성 부재인 작업발판은 근로자가 고소작업 중 떨어짐이나 발이 빠질 위험이 있는 장소에서 안전

하게 작업 또는 이동할 수 있도록 설치되는 부재로, 일반적으로 바닥재, 수평재, 보재 및 걸침고리로 구성된다³⁾. 보재는 작업발판의 하부에 짧은 방향으로 걸쳐 바닥재를 지지하는 부품으로써, 보재는 작업발판의 전체적인 뒤틀림이나 변형을 방지하는 역할을 한다⁴⁾.

비계의 설치 및 해체 작업 시 부적절한 관리가 이루어질 경우, 작업발판은 보재의 탈락과 같은 손상이 발생될 수 있다. 보재가 손상된 작업발판을 건설현장에서 사용되는 사례가 존재하는 등 보재가 손상된 작업발판을 육안점검 등으로 식별하기는 쉽지 않다⁵⁾. 비계 구조는 「산업안전보건기준에 관한 규칙」에 최대 적재하중(강관 비계의 경우 비계기둥 간 적재하중 400 kg 이하)이 명시되어 있으므로 보재의 손상이 작업발판

*현대로템 안전지원팀 매니저 (Safety/Support Team, Hyundai Rotem)

**충북대학교 안전공학과 석사과정 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

***충북대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering / Department of Disaster Prevention Engineering & Department of Big Data, Chungbuk National University)

파괴의 직접적인 원인이 될 가능성은 작다. 그러나 보재의 손상은 적재작업 시 처짐량 증가를 발생시켜 적재물 전도로 인한 근로자의 깔림과 근로자의 떨어짐 사고 등의 잠재적인 원인이 될 수 있다. 작업발판으로 인한 사고를 예방하기 위해 작업발판의 사용기준 또는 안전대책을 대상으로 하는 연구는 활발히 진행되고 있으나⁶⁻¹¹⁾, 작업발판 보재의 손상으로 발생하는 강성 및 처짐량 변화를 구조적인 방법으로 접근한 연구는 거의 없는 실정이다.

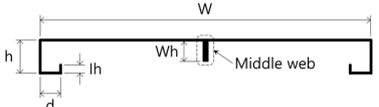
따라서 본 연구에서는 보재의 손상에 따른 비계용 작업발판의 강성 변화를 분석하고자 한다. 실제 건설 현장에서 사용되는 작업발판을 대상으로 다양한 하중 조건과 보재의 손상조건을 고려하여 실험을 수행하였다. 작업발판 보재 손상에 따른 강성변화는 해석적인 방법으로도 연구가 가능하나, 본 연구에서는 실제 현장에서 사용되는 중량물 재하 시 보재 손상으로 인한 위험성을 직접적으로 관리감독자에게 제공할 필요가 있다고 판단하여 다양한 하중재하 방법을 대상으로 실험을 수행하였다. 또한, 일부 하중 재하 시에 대한 해석도 실시하여 실험결과와 해석결과를 비교·분석하였다. 작업발판으로부터 보재가 탈락하는 것을 보재의 손상으로 고려하였으며, 하중 조건은 전면적 분포하중, 작업발판 중앙부 하중, 우측 보재부 분포하중으로 구성하였다.

2. 실험 계획

2.1 작업발판 제원과 물성

실험에 사용된 작업발판은 길이 1,819 mm, 너비(W) 400 mm이다. 상세한 단면 제원은 Table 3.2에 나타내었으며, 작업발판의 재질은 KS D 3506의 SGC 560Y¹²⁾이며, 제조업체에서 제공받은 항복강도는 614.9 MPa이다.

Table 1. Dimensions and shapes of scaffold working plate sections

Shape	
Dimension (mm)	W : 400.0, h : 49.7, Wh : 21, lh : 11.3, d : 26.1 t : 1.2 (t of middle web : 2.4)
Material property	KS D 3506 SGC560Y (Yield strength*: 614.9 MPa)

* Yield strength by inspection certificate

2.2 실험체의 안전인증 기준 적합성

실험에 사용된 작업발판의 안전인증 기준¹³⁾ 적합성을 확인하기 위해 선정된 작업발판 3개를 대상으로 인

Table 2. The result of strength based on certification standard for working plate

Classification	Strength
Specimen 1	4.808 kN
Specimen 2	4.820 kN
Specimen 3	4.860 kN

증기준에 따라 중앙부에 집중하중을 재하하여 대상 작업발판의 강도를 측정하였다. 측정 결과는 Table 2와 같으며, 실험체 중 파괴가 발생하는 최소 하중은 4.808 kN으로 인증기준에 따른 최소 요구 하중인 4.400 kN보다 크므로 실험에 사용된 작업발판은 인증기준을 만족하는 제품임을 확인하였다.

2.3 실험체 구성

보재의 손상 위치와 하중의 재하방법을 고려하기 위하여 총 27개의 작업발판을 대상으로 실험을 계획하였다. 보재의 손상에 따른 영향을 분석하기 위해 보재가 손상되지 않은 실험체 9개, 보재 1개가 손상된 실험체 9개, 그리고 보재 2개가 모두 손상된 작업발판 9개로 구성하였다(Fig. 1). 작업발판의 보재 손상은 작업발판의 보재를 임의로 탈락시켜 손상되도록 하였다.

작업발판의 재하 하중은 실제 현장에서 작업발판에 적재하고 있는 재료인 0.392 kN(40 kgf)의 무게를 가진 시멘트 포대를 기본 하중으로 고려하였다. 보재 손상에 따른 세 가지 종류의 실험체에 적용한 하중의 형태는

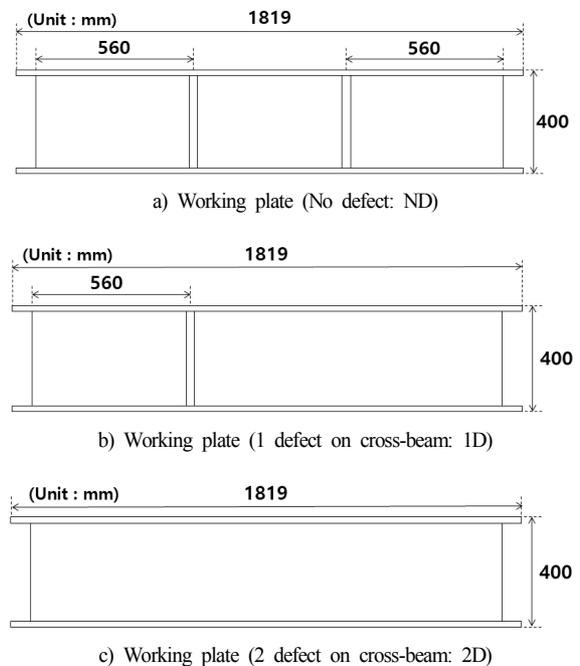


Fig. 1. Scaffold working plate configuration.

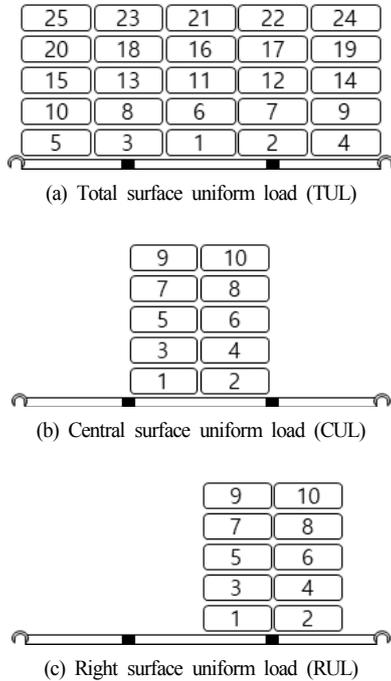


Fig. 2. Considered load cases.

전면적 분포하중(Total surface uniform load ; TUL), 중앙부 분포하중(Central surface uniform load ; CUL), 우측 보재부 분포하중(Right surface uniform load ; RUL)이다. 하중의 적재형태는 Fig. 2와 같으며, 그림에 표현된 숫자는 하중의 적재순서를 나타낸다.

실험체의 최대하중을 측정하기 위해서는 일반적으로 변위 제어를 실시해야 하나, 본 연구에서는 작업발판의 처짐량 증가로 변위제어가 어려우며 현장에서 사용되는 적재물에 의한 분포하중을 반영하기 위해 기본하중을 순차적으로 직접 작업발판에 적재하는 하중 제어 방법으로 실험을 실시하였다. 또한, 실험체의 급작스러운 파괴로 인한 사고를 방지하기 위해 일정 하중 이상에서는 하중의 크기가 작은 0.098 kN(10 kgf)과 0.049 kN(5 kgf)의 무게를 가진 무게 추를 추가로 준비하여 하중을 재하하였다.

보재의 손상 여부와 하중 재하 형태에 따라 총 9개의 실험체 종류로 구별되며, 각 실험체 종류별로 3개의 실험체를 구성하였다(Table 3). 표에서 ND, 1D, 2D는 실험체의 손상 여부를 나타내는 기호이며, ND는 보재 손상이 없는 시편, 1D는 우측 보재 1개가 손상된 시편, 2D는 보재 2개가 모두 손상된 시편을 나타낸다. 또한, 하중의 형태를 나타내는 기호는 TUL, CUL, RUL이며, TUL은 전면적 분포하중을, CUL는 중앙부 분포하중을, RUL은 우측 보재부 분포하중을 나타낸다. 실험체 이름의 -1, 2, 3은 실험체 번호를 나타낸다.

Table 3. Specimen composition

Specimen name	Defect	Load
ND-TUL-1, 2, 3	No defect	Total surface uniform load
1D-TUL-1, 2, 3	1 defect	
2D-TUL-1, 2, 3	2 defect	
ND-CUL-1, 2, 3	No defect	Central surface uniform load
1D-CUL-1, 2, 3	1 defect	
2D-CUL-1, 2, 3	2 defect	
ND-RUL-1, 2, 3	No defect	Right surface uniform load
1D-RUL-1, 2, 3	1 defect	
2D-RUL-1, 2, 3	2 defect	

2.4 유한요소 해석에 의한 처짐량 검토

실험을 수행하기 전 유한요소해석을 수행하여 작업발판의 처짐량을 산출하였다. 해석은 구조해석 범용프로그램인 MIDAS Civil 2016을 이용하였으며, Beam 요소로 모델링 한 경우(Fig. 3)와 Shell 요소로 모델링한 경우(Fig. 4)인 두 가지 형태로 모델링을 실시하였다. Fig. 3은 Beam 요소 모델링에 단면을 같이 나타낸 것이다. 하중의 경우 전면적 분포하중, 중앙부 분포하중, 우측 보재부 분포하중의 형태 및 위치를 고려하여 해석 모델에 반영하였다. 실험결과와 비교를 위해 탄성범위내 적용 가능한 하중인 3.92 kN(400 kgf)를 총 하중으로 반영하였으며, 선형해석을 실시하였다. 작업발판의 걸침고리는 기구학적 구속(Rigid link)을 사용하여 모델링 하였으며, 걸침고리의 회전 축은 힌지(좌측)와 롤러(우측)으로 경계조건을 적용하였다(Fig. 5).

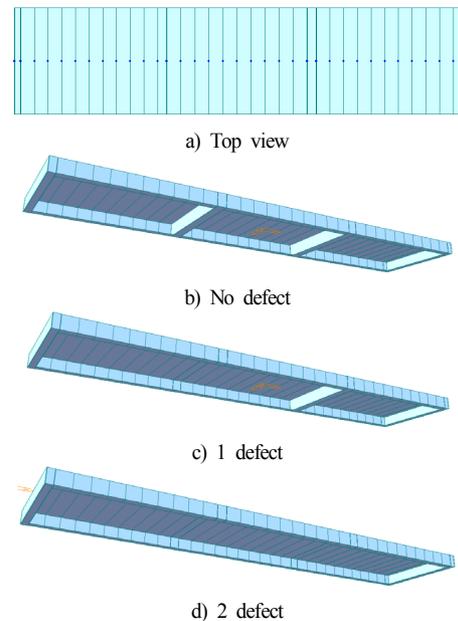


Fig. 3. Beam element model.

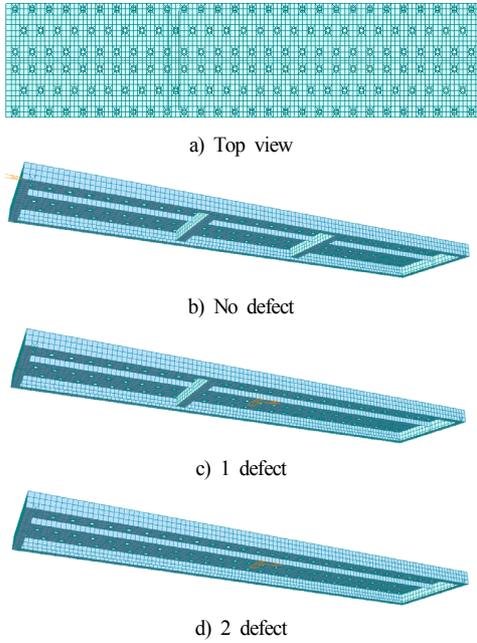


Fig. 4. Shell element model.

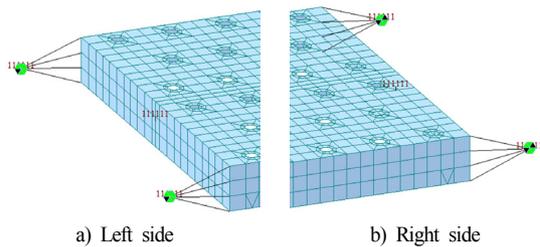


Fig. 5. Modelling of hooks and boundary.

유한요소 해석에 의한 작업발판의 처짐량은 중앙부 좌측과 우측의 평균(2.5절 Fig. 8의 Ch.2와 Ch.5의 평균)을 구하여 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다. Beam 요소의 해석 모델의 경우 보재 손상의 차이에 따른 처짐량의 차이가 적은 것을 확인할 수 있다. 실제 작업발판의 형상은 하부가 열린 박스형태이므로 웹(작업발판의 테두리 부분)의 횡방향 변형이 작업발판의 처짐량에 영향을 미친다. 그러므로 Beam 요소의 해석 모델의 경우 작업발판 단면의 변형을 반영하는데 한계가 있어 보재 손상에 따른 처짐량 검토에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

Shell 요소의 해석 모델의 경우 웹의 횡방향 변형을 확인할 수 있으며(Fig. 7), 보재의 손상에 따라 횡방향 변형과 처짐량이 증가하였다. 보재의 손상 시 웹의 횡방향 변형으로 인해 작업발판의 휨모멘트에 대한 저항이 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 보재는 하중 재하 시 단면의 변형을 억제하여 작업발판의 구조적 강성을 확보하는 역할을 하는 것을 확인할 수 있다.

Table 4. The vertical displacement from finite element analysis

Load (3.92 kN)	Defect	Vertical displacement (mm)	
		Beam element modelling	Shell element modelling
TUL	No defect	5.501	7.780
	1 defect	5.551	8.430
	2 defect	5.600	12.92
CUL	No defect	7.935	11.00
	1 defect	8.009	11.99
	2 defect	8.081	18.81
RUL	No defect	6.877	9.890
	1 defect	6.963	11.20
	2 defect	7.002	16.78

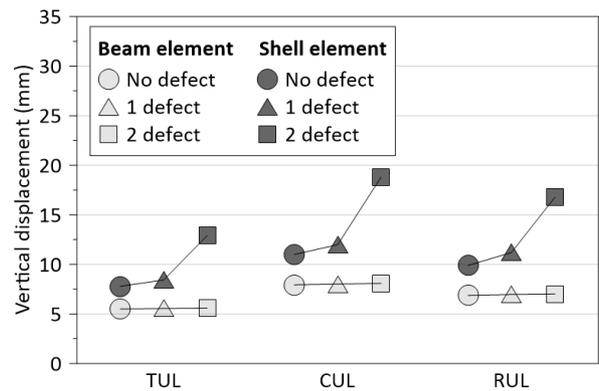


Fig. 6. The vertical displacement from finite element analysis.

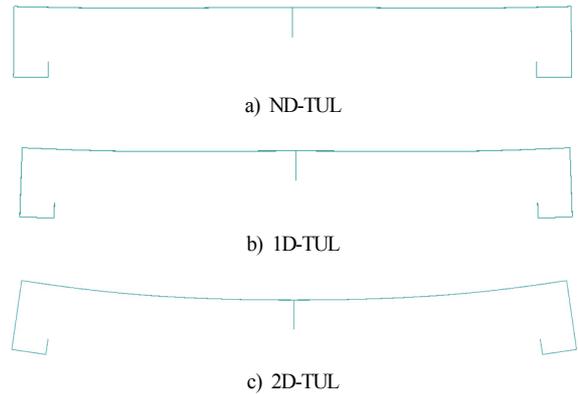


Fig. 7. Deformation shape of the cross section of the center part - shell model.

작업발판의 거동을 정확히 묘사하기 위해서는 shell 해석을 수행하여야 하나, 작업발판의 복잡한 구조 형상(실제 타공형태로 인한 Fluting과 같은 효과, 용접부의 해석과 실험간의 차이 등)으로 인해 FEM 해석 모형은 다소 복잡한 형상을 가지며, 보재의 손상에 따른 작업발판의 실제 거동을 확인하는데 한계가 존재할 것으로 판단된다. 또한, 건설현장에서 발생할 수 있는 일

반적인 상황인 시멘트 포대 등의 하중은 발판과 포대의 일부가 닿지 않으므로 완전한 등분포 하중과 일부 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 보재 손상에 따른 작업발판의 처짐량을 확인하기 위해 실험을 중심으로 연구를 진행하였으며, 실험 결과와 해석 결과를 비교·분석하였다.

2.5 변위측정 위치와 실험 형상

작업발판의 재하 하중에 따른 변위를 측정하기 위해 변위계(LVDT)를 Fig. 8과 같이 설치하였다. 변위계는 작업발판의 수평재 위치이며, 총 8개를 설치하였다. 실험 전경은 Fig. 9와 같다.

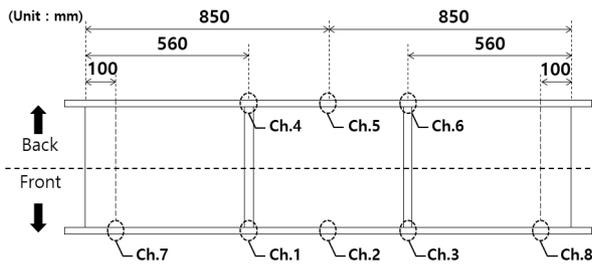


Fig. 8. Location of LVDT.



(a) 1D-TUL-3



(b) 1D-CUL-3



(c) 1D-RUL-3

Fig. 9. Configuration of test set-up.

3. 결과분석

3.1 유한요소 해석과 실험 비교분석

유한요소 해석(Shell 요소 모델)과 실험 결과를 비교하기 위해, 하중 3.92 kN(400 kgf)에서 Ch. 2와 Ch. 5에서 측정된 처짐량의 평균을 구하여 Table 5와 Fig. 10에 나타내었다. 처짐량은 중앙부 분포하중에서 가장 크게 나타나며 전면적 분포하중에서 가장 낮게 나타나고, 보재 손상에 따라 처짐량이 증가하는 등 해석과 실험의 경향은 유사한 것으로 나타났다. 그러나 실험으로부터 측정된 처짐량은 해석 결과보다 51.0~114.8% 큰 것으로 분석되었다. 즉, 작업발판의 타공과 같은 복잡한 구조 형상 등으로 보재 손상에 따라 작업발판의 처짐량을 해석적인 방법으로 산출하는 것은 쉽지 않다고 판단된다.

Table 5. The vertical displacement from Experiment and FEM

Load (3.92 kN)	Defect	Vertical displacement (mm)		
		FEM (Shell element)	Experiment	rate of increase
TUL	No defect	7.78	11.75	51.0 %
	1 defect	8.43	14.57	72.8 %
	2 defect	12.92	19.67	52.2 %
CUL	No defect	11.00	20.00	81.8 %
	1 defect	11.99	25.75	114.8 %
	2 defect	18.81	29.85	58.7 %
RUL	No defect	9.89	18.18	83.8 %
	1 defect	11.20	22.88	104.3 %
	2 defect	16.78	27.57	64.3 %

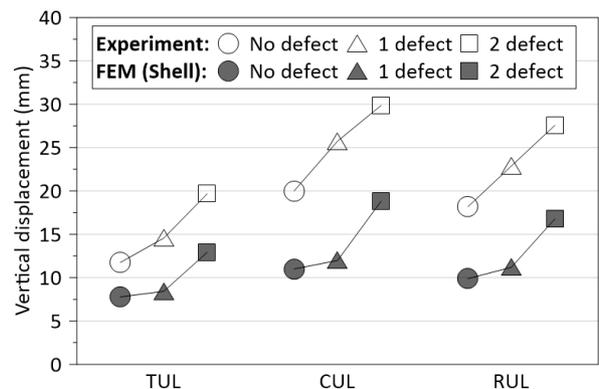


Fig. 10. The vertical displacement from Experiment and FEM.

3.2 전면적 분포하중 재하 시 강성 변화 분석

작업발판 바닥에 전면적 분포하중 재하 시(TUL 하중) 작업발판 중앙부의 전면(ch. 2)과 후면(ch. 5)에서 측정된 하중 변위 평균을 Fig. 11에 나타내었다. 보재

의 손상 정도가 증가함에 따라 동일 하중 수준에서 변위가 증가되고, 하중-변위 곡선의 기울기가 감소됨을 그림으로부터 확인할 수 있다. 본 실험은 변위제어가 아닌 하중제어 방식으로 진행되었으며 최대 강도보다는 실험체의 강성 변화에 초점을 두고 있으므로 실험의 안전성을 위해 손상이 없는 실험발판의 경우, 7.84 kN까지만 하중을 재하하였다. 손상이 발생한 실험체도 동일하게 실험의 안전성이 보장되는 범위까지만 하중을 재하하였다.

작업발판에 0.392 kN의 시멘트 및 레미탈 포대가 5개가 1단에 설치되므로 작업발판에 하중이 1단 설치되는 1.960 kN, 2단이 설치되는 3.920 kN, 3단이 설치되는 5.880 kN에서의 처짐량을 측정하여 Table 6에 나타내었다. 보재 손상에 따라 1단 하중에서는 변위가 5.53 mm에서 9.17 mm 까지 증가하였으며, 2단 하중에서는 11.75 mm에서 19.67 mm, 3단 하중에서는 18.97 mm에서 30.60 mm로 증가된 것으로 나타났다. 1~3단에서의 평균 변위 증가량을 분석하면, 보재가 1개 손상된 경우 평균 25%의 변위가 증가하며, 보재가 2개 손상된 경우 평균 65%의 변위가 증가된 것으로 분석되었다.

1단 하중, 2단 하중, 3단 하중이 재하되는 구간을 1, 2, 3구간(Step 1, 2, 3)으로 정의하고 각 구간의 강성값을 분석하여 Table 7에 나타내었다. 1구간의 경우 손상이 없는 실험체의 평균 강성은 354.43 N/mm, 보재가 1개 손상된 경우 302.47 N/mm, 2개 손상된 경우 213.74 N/mm로 평가되었다. 1구간에서 작업발판의 강성은 보재 손상 개수에 따라 14.66%, 39.69% 감소되었으며, 2구간에서는 보재 1개와 2개 손상됨에 따라 실험체의 강성이 23.12%, 40.76% 감소된 것으로 분석되었다. 3구간에서는 보재 손상에 따라 31.89%, 33.94% 강성이 감소되었다. 따라서 전면적 분포하중이 작업발판에 위

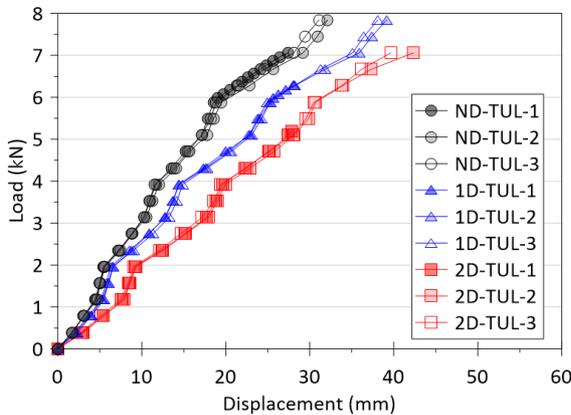


Fig. 11. Load-d in center under TUL load (average value of Ch. 2 and Ch. 5).

Table 6. Vertical displacement in center point due to TUL load (average value of Ch 2 and Ch 5)

		Vertical displacement (mm)		
		Load 1.96 kN	Load 3.92 kN	Load 5.88 kN
No defect	ND-TUL-1	5.45	11.65	18.55
	ND-TUL-2	5.60	12.05	19.50
	ND-TUL-3	5.55	11.55	18.85
	Mean	5.53	11.75	18.97
1 defect	1D-TUL-1	6.55	14.4	25.25
	1D-TUL-2	6.30	14.45	24.95
	1D-TUL-3	6.60	14.85	25.30
	Mean	6.48	14.57	25.17
2 defect	2D-TUL-1	9.20	19.65	-
	2D-TUL-2	9.30	19.95	30.70
	2D-TUL-3	9.00	19.40	30.50
	Mean	9.17	19.67	30.60

Table 7. Comparison of calculated stiffness of specimens in center point under TUL load (unit: N/mm)

Classification	Step 1 (0~1.96 kN)	Step 2 (1.96~3.92 kN)	Step 3 (3.92~5.88 kN)
No defect	354.43	315.11	271.47
1 defect	302.47	242.27	184.91
2 defect	213.74	186.67	179.32

치할 경우, 보재의 손상은 작업발판의 강성을 최대 약 40% 감소시키며 평균 변위도 최대 65% 증가시키므로 보재의 손상은 잠재적인 작업자의 사고 발생 원인이 될 수 있다고 판단된다. 또한, 하중이 증가됨에 따라 강성 감소가 두드러지므로 하중이 증가될수록 보재 손상과 관련된 사고 위험성은 증가된다.

작업발판 우측 보재 위치에서의 하중-변위 관계를

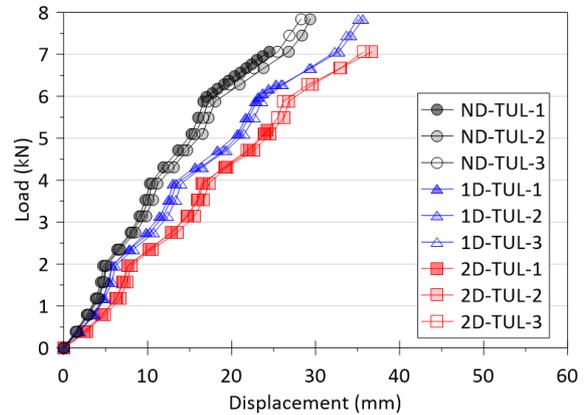


Fig. 12. Load-displacement in right cross-beam point under TUL load (average value of Ch. 3 and Ch. 6).

Table 8. Comparison of calculated stiffness of specimens in right cross-beam under TUL load (unit: N/mm)

Classification	Step 1 (0~1.96 kN)	Step 2 (1.96~3.92 kN)	Step 3 (3.92~5.88 kN)
No defect	397.30	341.86	296.22
1 defect	333.14	257.89	203.11
2 defect	251.82	217.78	202.24

분석하기 위해 변위계 Ch. 3과 Ch. 6의 평균 하중-변위 관계를 분석하여 Fig. 12에 나타내었다. 동일 손상 조건의 실험체들은 유사한 하중-변위 관계를 나타내었으며, 보재가 손상되지 않은 실험체에 비해 보재가 손상된 실험체의 하중-변위 곡선의 변위증가와 기울기 감소가 현저하게 나타남을 확인할 수 있다.

1단 하중, 2단 하중, 3단 하중이 재하되는 구간인 1, 2, 3구간(Step 1, 2, 3)의 강성값을 분석한 결과(Table 8), 우측 보재 위치에서의 손상에 따른 각 구간 강성값의 변화를 분석하면, 초기 강성에 해당되는 1구간에서는 보재 손상이 증가함에 따라 16.15%, 36.62% 강성이 감소된 것으로 나타났다. 2구간에서는 보재 1개와 보재 2개가 손상됨에 따라 손상이 없는 실험체 강성의 24.56%, 36.30%가 감소되었다. 또한, 3구간에서는 보재 손상에 따라 각각 31.43%, 31.73% 강성이 감소된 것으로 분석되었다.

작업발판 좌측 보재 위치에 설치된 변위계(Ch. 1과 Ch. 4)의 평균 하중-변위 관계를 조사한 후 구간별 강성을 분석한 결과는 Table 9과 같다. 작업발판 좌측 보재 위치에서 측정된 강성은 우측 보재 위치에서 측정된 강성과 유사함을 알 수 있다.

Table 9. Comparison of calculated stiffness of specimens in left cross-beam under TUL load (unit: N/mm)

Classification	Step 1 (0~1.96 kN)	Step 2 (1.96~3.92 kN)	Step 3 (3.92~5.88 kN)
No defect	388.12	334.09	298.48
1 defect	339.88	283.37	214.99
2 defect	246.54	214.21	209.07

3.3 중앙부 분포하중에 의한 강성 변화

작업발판의 중앙부에 집중하중이 작용하는 경우(CUL 하중)의 하중-변위 곡선을 분석하였다. 작업발판 중앙부 전면과 후면에 설치된 변위계인 Ch. 2와 Ch. 5에서 측정된 평균 하중-변위 관계를 계산한 결과는 Fig. 13과 같다. 그림으로부터 손상이 발생한 보재의 수가 증가함에 따라 변위의 증가와 하중-변위 곡선의 기울기 감소를 확인할 수 있다.

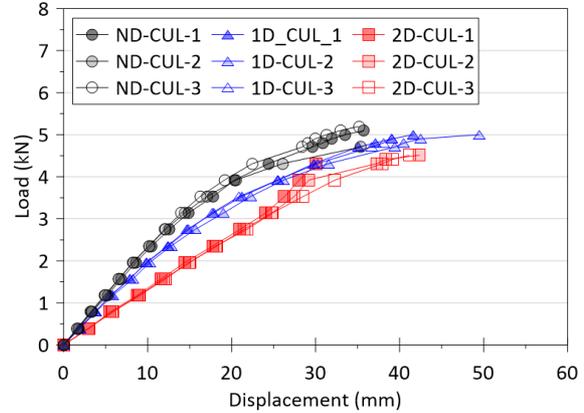


Fig. 13. Load-displacement in center point under CUL load (average value of Ch. 2 and Ch. 5)

Table 10. Average initial stiffness of specimens due to CUL load (unit: N/mm)

	Center point	Right cross-beam point	Left cross-beam point	Average
No defeat (ND-CUL-1~3)	229.27	252.69	252.69	244.88
1 defeat (1D-CUL-1~3)	187.50	206.74	213.64	202.63
2 defeat (2D-CUL-1~3)	130.31	148.11	150.80	143.07

실험체 중간부, 우측 보재 위치, 좌측 보재 위치에서의 1구간에 해당하는 강성(초기 강성)을 계산하여 Table 10에 나타내었다. 중앙부보다 좌, 우측 보재 위치에서 계산된 강성이 다소 큰 것으로 나타났다. 평균 초기 강성은 손상이 없는 경우 244.88 N/mm로 평가되었으며, 보재가 1개 손상된 실험체들의 평균 초기 강성은 202.63 N/mm, 보재 2개 손상된 실험체들의 평균 초기 강성은 143.07 N/mm로 평가되었다. 손상된 실험체들의 평균 초기 강성은 손상이 없는 실험체의 56.84%~84.55% 수준인 것으로 판단된다. 특히, 보재 2개가 모두 손상된 실험체들의 평균 초기 강성은 손상 없는 실험체들의 58.43%로 약 41.57%의 초기 강성이 보재 손상으로 감소되었음을 알 수 있다.

본 실험은 하중 재하 방법으로 진행되어 각 시편의 최대하중을 정확히 측정할 수 없으나, 중앙부 분포하중 실험에서는 실험체들의 하중-변위 곡선의 추세로부터 최대하중에 거의 도달하였음을 알 수 있다. 실험에서 측정된 최대하중이 실제 실험체의 최대하중과 큰 차이가 없음을 가정하여, 중앙부 분포하중에 의한 작업발판의 최대 적재하중을 분석하여 Table 11에 나타내었다. 보재 손상이 없는 실험체의 평균 최대하중은 5.00 kN이며, 우측 보재 1개가 손상된 실험체의 평균

Table 11. Maximum load by CUL load (unit: kN)

Type		Specimen number			Average (SD)
		1	2	3	
No defect	ND-CUL	5.10	4.71	5.20	5.00 (0.21)
1 defect	1D-CUL	5.00	5.00	4.90	4.97 (0.05)
2 defect	2D-CUL	4.31	4.51	4.51	4.44 (0.09)

최대하중은 4.97 kN, 보재 2개 모두 손상된 경우 평균 4.44 kN를 나타내었다. 보재 손상에 따라 평균 최대하중은 0.60%, 11.20%가 감소된 것으로 나타나므로 보재 손상은 작업발판의 강도 감소보다 강성 감소와 변위 증가에 크게 영향을 준다고 판단된다.

3.4 우측 보재부 분포하중에 의한 강성 변화

작업발판의 우측 보재 위치에 분포하중이 작용하는 경우(RUL 하중)의 하중-변위 곡선을 분석하였다. 변위 측정 위치 중 우측 보재 위치에 설치된 변위계(Ch. 2와 Ch. 5)의 평균값을 Fig. 14에 나타난 결과, 손상이 발생이 심해짐에 따라 하중-변위 곡선의 기울기가 감소와 변위 증가 경향이 나타남을 알 수 있다.

손상 정도에 따른 중앙부, 좌측 및 우측 보재 위치에서 측정된 초기 강성(구간 1 강성)을 계산한 결과는 Table 12과 같다. 표로부터 평균 초기 강성은 보재 손상 없는 경우 268.50 N/mm, 보재 1개 손상된 경우 211.42 N/mm, 보재 2개 모두 손상된 경우 169.61 N/mm를 나타내었다. 그러므로 보재가 1 개 손상된 실험체의 평균 초기 강성은 손상이 없는 실험체를 기준으로 21.26% 강성 저하가 발생하였으며, 보재 2개 손상된 경우 36.83%의 초기 강성이 감소된 것으로 분석되었다.

우측 보재부 분포하중의 경우도 하중-변위 곡선은

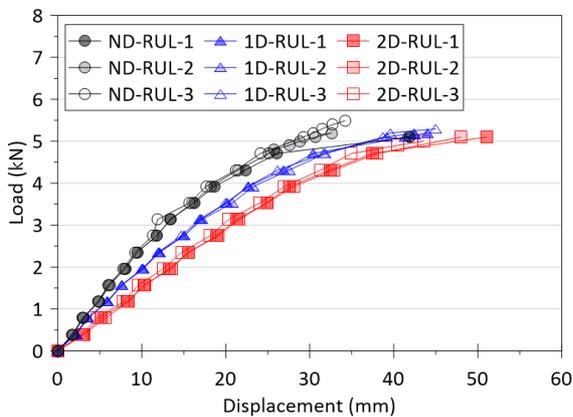


Fig. 14. Load–displacement in right cross–beam point under RUL load (Average value of Ch. 3 and Ch. 6).

Table 12. Average initial stiffness of specimens due to RUL load (unit: N/mm)

	Center point	Right cross-beam point	Left cross-beam point	Average
No defeat (ND-RUL-1~3)	250.89	252.69	301.93	268.50
1 defeat (1D-RUL-1~3)	195.02	195.29	243.94	211.42
2 defeat (2D-RUL-1~3)	153.43	164.34	191.06	169.61

Table 13. Maximum load by RUL load (unit: kN)

Type		Specimen number			Average (SD)
		1	2	3	
No defect	ND-RUL	5.10	5.25	5.59	5.31 (0.20)
1 defect	1D-RUL	5.20	5.20	5.30	5.23 (0.05)
2 defect	2D-RUL	5.10	5.10	5.00	5.07 (0.05)

최대하중에 거의 도달한 것으로 가정할 수 있으며, 하중-변위 곡선의 최대하중을 비교하여 Table 13에 나타내었다. 최대하중은 보재 손상 개수의 증가함에 따라 1.51%와 4.52%만 감소되므로 중앙부 분포하중의 경우와 동일하게 최대하중의 변화는 강성변화에 비해 작게 발생된다. 따라서 작업발판의 보재는 가로보의 역할을 수행하여 작업발판의 전체적인 강성을 유지시켜주는 역할을 수행함을 알 수 있으며, 보재의 손상은 작업발판의 강도보다 강성 감소와 변위 증가에 주로 영향을 준다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 건설현장에서 사용하고 있는 비계용 작업발판을 대상으로 발판 하부의 보재 손상으로 발생하는 작업발판의 강성변화와 처짐량 변화를 분석하였다. 보재의 손상여부와 하중 재하 형태에 따라 하중 재하 실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 작업발판에 가장 많은 하중이 재하되는 전면적 분포하중의 중앙부의 하중-변위 곡선으로부터 보재 1개 손상으로 작업발판의 강성이 하중 구간에 따라 14.66%~31.89% 감소되었으며, 보재 2개 손상으로 33.94%~40.76% 감소되는 것으로 분석되었다. 또한, 변위는 보재가 1개 손상된 경우 평균 25%, 보재가 2개 손상된 경우 평균 65%의 변위가 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서, 보재의 손상은 잠재적인 작업자의 사고 발생 원인이 될 수 있으며, 하중이 증가에 따라 강성 감소가 두드러지므로 하중이 증가될수록 보재 손

상으로 인한 사고 위험성은 증가한다고 판단된다.

(2) 중앙부 분포하중과 우측 보재부 분포하중의 하중-변위 곡선으로부터 보재 손상에 따른 강성 감소는 각각 41.57%와 36.83%를 나타내는 것으로 분석되었다. 반면, 하중-변위 곡선으로부터 예측한 최대하중의 감소비율은 각각 11.20%와 4.52%인 것으로 분석되었다. 따라서 보재의 손상은 작업발판의 강도보다 강성 감소와 변위 증가에 주로 영향을 준다고 판단된다.

본 연구를 통해 보재가 손상된 작업발판에서 적재 작업 등을 하는 경우, 작업발판 강성 감소와 처짐량 증가가 분석되었다. 즉, 작업발판 보재의 손상은 근로자의 넘어짐, 적재물의 낙하 등이 잠재적인 원인이 될 수 있으므로 작업발판 사용 전 반드시 육안점검을 통해 작업발판 보재의 손상 등을 반드시 확인하도록 현장 안전점검 체크리스트에 관련 점검항목을 추가시킬 필요가 있다.

Acknowledgement: This paper was partially supported by Ministry of the Interior and Safety as “Human resource development Project in Disaster management”.

References

- 1) Ministry of Employment and Labor, “The Status of Industrial Accidents in 2019”, 2020.
- 2) Ministry of Employment and Labor, “Analysis of Industrial Accidents in 2018”, 2019.
- 3) KOSHA, Guidelines for Safety Work of Steel Pipe Scaffolds(KOSHA GUIDE C-30-2020), 2020.
- 4) KOSHA, Safety Guidelines for Installing and Using Work Plate(KOSHA GUIDE C-08-2015), 2015.
- 5) B. H. Won, “Survey and Improvement Scheme of Safety

- Certification System for Construction Safety of Temporary Equipment and Materials”, Inje University Graduate School, Doctor’s thesis, 2016.
- 6) J. Y. Jang, H. S. Ahn, I. H. Oh and T. W. Kim, “Current State and Improvement of Safety Regulations of Working Platform and Working Passage in Construction Sites”, Journal of the Korea Institute of Construction Safety, Vol. 2, No. 1, pp. 28-35, 2019.
- 7) H. S. Kim, Y. S. Lee, I. H. Oh and H. S. Ahn, “Falling Accident Case Analysis on Construction Working Platform and Working Passage”, Journal of the Korea Institute of Construction Safety, Vol. 2, No. 1, pp. 9-15, 2019.
- 8) Y. S. Jeong, “A Study on the Selection of the Working Footboard Load and the Loading Method Within the Allowable Load”, Hankyong National University Graduate School, Mater’s thesis, 2018.
- 9) H. D. Yoo and K. S. Kang, “Research of the Reduction Measures for Fall Accident Death in Small Scale Construction Sites -On the Basis of Work Plate and Scaffolding-, Journal of the Korea Safety Management & Science, Vol. 16, No. 3, pp. 55-62, 2014.
- 10) S. C. Jeong, Y. K. Park and J. H. Kwon, “A Study on Preventing Falls by Tripping in Platforms at Construction Sites”, Occupational Safety and Health Research Institute, 2014.
- 11) D. H. Choi, “A Study on the Amendment of Regulation about the Work Platform of the Construction Site”, Occupational Safety and Health Research Institute, 2012.
- 12) Korean Agency for Technology and Standards, “KS D 3506: 2018 Hot-dip zinc-coated steel sheets and coils”, 2018.
- 13) Korean Agency for Technology and Standards, “KS F 8012: 2015 Work Plate”, 2015.