

양단 고정된 스테브 거더 시스템의 해석 모델 개발

Development of the Analytical Model for the Fixed End Stub-Girder System

백 종 성*
Paek, Chong-seong

이 승 창**
Lee, Seung-chang

이 병 해***
Lee, Byung-hai

Abstract

This paper presents several modeling methods to analyze the stub-girder system, testifies those methods base on actual test results for the behavior of the simply supported stub-girder system, and finally, by changing the boundary conditions in those models, predicts the behavior of the fixed end stub-girder system.

Two different methods are used for the structural modeling. In the first method, the stub-girder is modeled as a viereendeel truss girder, and in the second method, as a finite element model. Both methods use the finite element analysis software package LUSAS™ for linearly elastic analyses and nonlinear analyses.

1. 서론

건축물이 대규모화함에 따라 콘크리트 슬라브와 철골 보로 이루어진 합성 바닥구조 시스템은 구조강화와 비용절감이라는 측면에서 대단히 중요한 구조 기술로 인식되어 많은 연구^{1,2,3,4}가 이루어지고 있다. 이러한 배경하에서 조세프 콜라코(Joseph Colaco)에 의해 개발된 스테브 거더 시스템(stub-girder system)⁴은 1970년대 이후 전통적으로 사용하고 있는 바닥구조 시스템의 代案(alternative)으로 많은 관심을 불러 일으켰다.

스테브 거더 시스템은 구조적, 설비적인 레이아웃에 유리하게 적용될 수 있으며, 공기단축 및 공비절감 등의 측면에서도 우수한 바닥구조 시스템이다. 미국 및 캐나다에서는 주로 30~50층의 고층 건물에 적용된 바 있으나, 국내에서는 H 개발 사옥에 처음으로 스테브 거더 시스템을 도입하여 시공 중에 있다. 그러나, 스테브 거더 시스템에 대한 충분한 자료축적이 미비할 뿐만 아니라 적용할만한 국내 규준이 없기 때문에 국내에서는 광범위하게 사용되지 못하고 있는 실정이다.

스테브 거더 시스템에 대한 기존의 연구^{5,6,7}는 안전측(safety side)의 관점에서 양단부가 단순 지지된 경우에 한해서 이루어져 왔기 때문에 양단부가 고정된 스테브 거더 시스템의 거동에 대해서는 명확히 규명된 바가 없다. 이러한 이유로, 현재로서는 양단 고정된 스테브 거더 시스템의 거동에 대해서는 정확한 판단을 할 수 없는 상태이다.

본 연구의 목적은 단순 지지된 스테브 거더 시스템의 해석에 적합한 비렌델 트러스 모델(vierendeel truss model)과 유한 요소 모델(finite element model)을 개발하여, 단순 지지된 스테브 거더 시스템에 대한 기존의 실험 결과들을 기반으로 모델의 타당성을 검증한 후, 그 모델의 경계 조건(boundary condition)을 양단 고정으로 바꾸어 양단 고정된 스테브 거더 시스템의 거동을 예측하는데 있다.

* 한양대학교 건축공학과 석사과정
** 한양대학교 건축공학과 박사과정
*** 한양대학교 건축공학과 교수

본 연구는 초대형 구조 시스템 연구 센터(STRESS)의 지원에 의해 수행되었음.

2. 스테브 거더 시스템의 해석 모델

콜라코는 스테브 거더 시스템을 개발하면서 다음과 같은 세가지 해석 모델을 제안하였다.

- ① 비균일 단면보 모델 (non-prismatic beam model)
- ② 비렌달 트러스 모델 (viereendeel truss model)
- ③ 유한 요소 모델 (finite element model)

비균일 단면보 모델은 스테브 거더 시스템을 해석하는데 사용되는 가장 단순한 모델로서, 실제 응력이나 변위보다 작은 값을 예측하게 되며, 이는 단순보 이론을 통한 접근에 그 원인이 있다.

비렌달 트러스 모델은 스테브 거더 전반에 걸쳐 발생하는 모멘트 뿐만 아니라 축방향력도 고려할 수 있기 때문에 설계시에 유용하게 사용되며, 그 구조적인 특성이 스테브 거더 시스템과 매우 잘 부합되는 모델이라 할 수 있다.

유한 요소 모델은 실험 결과의 비교 및 정확도를 높이기 위해서 많은 시간과 노력을 요하는 결점이 있기는 하나, 정확한 응력 상태를 구할 수 있는 모델이라는 점에서 재료적 거동이 복잡한 스테브 거더 시스템을 해석하는데 가장 적합한 모델이다.

따라서, 본 연구에서는 양단 고정된 스테브 거더 시스템의 거동 예측을 위하여 콜라코에 의해 제안된 3 종류의 모델 중 비교적 정확하게 스테브 거더 시스템의 거동을 해석할 수 있는 비렌달 트러스 모델과 유한 요소 모델을 적용하였다.

3. 해석 모델 개발

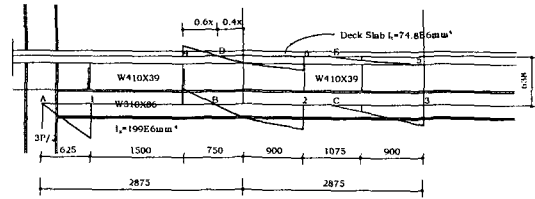
3.1 비렌달 트러스 모델

비렌달 트러스 모델은 캐나다 기준^[5]에 따라 모델링하였으며, 모델링 방법의 선정을 위해 콜라코가 제시한 모델(Colaco's model)과 캐나다 기준에서 제시한 단순화한 비렌달 트러스 모델(simplified viereendeel truss model)을 비교 검토하였다. 각 모델에서 구해진 응력은 캐나다 기준에서 제시한 설계를 위한 계산법인 정정모델(statically determinate model)을 통해 계산한 값과 비교하여 검증하였다. 콜라코 모델과 캐나다 기준의 모델을 비교한 결과는 [표 1]과 같다. 비렌달 모델에서는 주로 각 절점의 축방향력과 휨 모멘트를 비교 대상으로 하였으며, [표 1]에서의 각 절점의 위치는 [그림 1]과 같다.

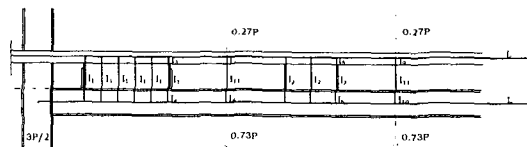
[표 1] 비렌달 트러스 모델에 의한 각 모델간의 응력 비교

	Structural Action	Statically Determinate Model	Colaco's Model	Simplified Viereendeel Model
1	Axial	0	0	0
	Bending	219	219	244.650
2	Axial	1411	1413	1415.26
	Bending	153	147	149.654
3	Axial	1837	1860	1855.37
	Bending	122	110	107.993
4	Axial	1411	1413	1415.03
	Bending	42.5	49.5	49.446
5	Axial	1837	1860	1855.37
	Bending	45.3	43.4	48.033
6	Axial	1411	1413	1415.26
	Bending	56.7	61.8	63.465

Unit : kN, Meter



[그림 1] 스테브 거더의 절점



[그림 2] 비렌달 트러스 모델 (Colaco's method)

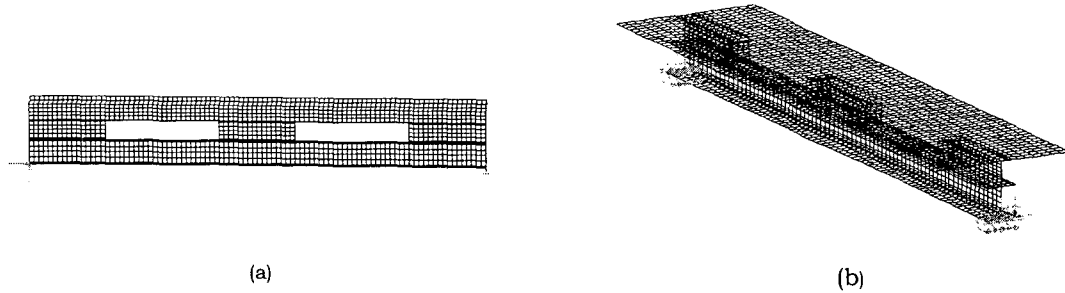
[표 1]에서 나타낸 바와 같이 콜라코가 제안한 모델과 단순화한 모델은 유사한 해석 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 콜라코의 모델보다 상대적으로 모델링이 간편한 단순화한 비렌달 트러스 모델을 이용하여 개발한 모델을 사용하였다. 이러한 비교를 통해서 비렌달 트러스 모델은 스테브 거더 시스템의 각 부분에 발생하는 응력을 구하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

3.2 유한 요소 모델

스테브 거더 시스템은 콘크리트 슬라브 및 철골 보와 같이 한 방향에 대한 두께가 다른 두 방

향에 비해 상대적으로 매우 작은 판(plane)요소로 이루어져 있다. 따라서, 스테브 거더 시스템을 모델링하는 데는 2차원 요소(i.e. plane stress, plate, shell element)를 사용하는 것이 적당하며, 실제로 3차원 요소(i.e. solid element)를 사용하여 수행한 유한 요소 해석은 2차원 요소를 사용한 모델의 해석 결과와 비교하여 많은 해석 시간이 요구되고 정확도가 떨어져 효율이 낮았다.

그러므로, 본 연구에서는 평면 응력도 요소(plane stress element)를 사용한 2차원적 모델인 2-D 모델^[6]과 셸 요소(shell element)를 사용하여 3차원으로 모델링한 3-D 모델을 개발하여 해석 결과를 비교하였다[그림 3].



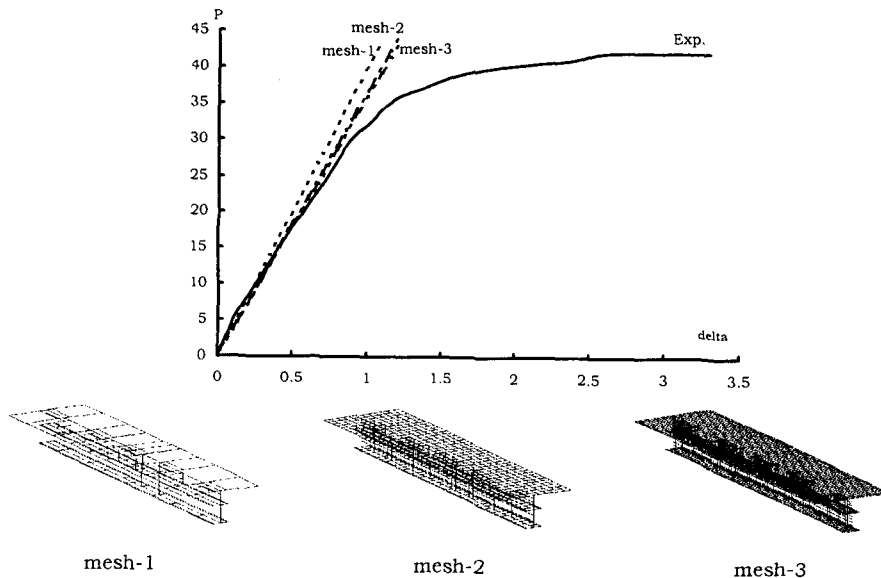
[그림 3] 유한 요소 해석 모델 (a): 2-D plane stress 모델, (b): 3-D shell 모델

[표 2] 2차원 요소에 의한 2-D 모델과 3-D 모델의 최대처짐 비교

Element	2-D Model		3-D Model	실험 결과
	Plane Stress	Shell	Shell	
Reinforcement	0.3925	0.3935	0.5756	0.55
Non-reinforcement	0.4042	0.3934	0.5676	

Unit : cm

상기한 각 모델을 사용한 SGC-1 실험체^[7]의 해석 결과는 [표 2]와 같다. 해석 결과에 따르면 2-D 모델이 스테브 거더 시스템의 처짐에 대한 강성을 다소 과대 평가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 3-D 모델을 유한 요소 모델로 선정하였다.



[그림 4] 유한 요소 해석 결과의 수렴성 검토 (Convergence Studies)

3. 2. 1 요소의 선정

요소의 선정은 다음과 같은 예제를 통해 본 연구에 적합한 요소를 선정하였으며, 예제의 해석에는 유한 요소 해석 프로그램인 LUSASTM[11,12]를 사용하였다.

1. 단순 지지된 균일 단면 보와 양단 고정된 균일 단면보의 해석.
2. 개구부가 있는 합성보의 해석.

우선, 요소의 선정을 위해 구형 단면의 콘크리트 보와 H형 단면의 철골 보를 해석하였다. 이 해석 결과로부터 오차율($error\ rate = \frac{displacement - exact\ solution}{exact\ solution} \times 100$)이 7%를 넘지 않는 요소인 QTS4를 선정하였다. QTS4 요소를 사용하여 모델링한 개구부가 있는 보를 해석한 결과에서는 최대 처짐이 0.077 cm(0.03021 inch)로, 실험에 의한 최대 처짐 0.1 cm(0.04 inch)와 근접한 결과를 나타냈다. 따라서, 합성보의 해석에 QTS4 요소가 적절한 요소로 판단됨에 따라 스티브 거더 시스템을 모델링하는 데에 3차원 모델링이 가능한 2차원 thick shell 요소인 QTS4 요소를 사용하였다. 또한 2-D 모델에서는 평면 응력도 요소인 QPM-8 요소를 사용하였다.

3. 2. 2 수렴성 검토

유한 요소 모델에서 사용한 mesh는 SGC-III 실험체를 3가지의 mesh로 모델링하여 해석한 해석 결과를 기반으로 선정하였으며, 이때의 작용하중은 20t으로 하였다. 그 결과는 [그림 4]와 같다. 본 연구에서는, 수렴성 검토 결과에 의해 실험 결과에 수렴하는 것으로 나타난 mesh-2와 mesh-3 중에서 해석 시간의 단축을 위해 mesh-2를 사용하여 모델링하였다.

4. 스티브 거더 시스템의 선형 탄성 해석

본 연구에서는 1983년에 행해진 문정호의 ‘Stub-Girder 시스템의 내력에 관한 연구’^[6]와 1984년에 행해진 신경재의 ‘Deck-Plate의 유무에 따른 Stub-Girder 시스템의 거동에 관한 연구’^[7]에서 사용한 실험체를 모델링하여 해석하였다. 각 실험체에 대해 실험을 통해 제시된 하중-처짐 곡선(P-δ curve)을 기반으로 특정 하중 하에서의 중앙부 최대 처짐을 비교하였다.

4. 1 단순 지지된 스티브 거더 시스템의 해석

각 실험체의 제원은 [표 3]에 나타난 바와 같으며, 작용 하중은 모든 탄성해석에서 20t으로 하였다. 본 연구에서는 신경재의 연구에서 사용된 실험체 중 데크 플레이트(deck plate)가 없는 실험체인 SGC-1, SGC-2, SGC-3 실험체와, 문정호의 연구에서 사용된 총 8개의 실험체 중에서 스티브 거더가 아닌 합성보 실험체 CGC-I과 신경재의 연구에서 사용된 실험체와 동일한 실험체인 SGC-I, SGC-II, SGN-I를 제외한 SGC-III, SGC-IV, SGC-V, SGN-II 등 총 7개의 실험체를 모델링하였다. 단순 지지된 스티브 거더 시스템 실험체에 대한 유한 요소 해석에 의한 중앙부 최대 처짐과 실험 결과의 비교는 [표 4]와 같다. 실험 결과에 대한 평균 오차는 5.78%로 해석 모델의 예측이 상당히 정확함을 알 수 있다.

[표 3] 실험체의 제원

	Stub 갯수	Stub 길이	개구부 길이	Stiffener	Deck Plate
SGC-1	3	40	60	있음.	없음.
SGC-2	5	24	30	있음.	없음.
SGC-3	5	24	30	없음.	없음.
SGC-III	5	24	36, 24	있음.	없음.
SGC-IV	5	24	40, 20	있음.	없음.
SGC-V	3	32	72	있음.	없음.
SGN-II	5	28, 24	30	없음.	없음.

Unit : cm

[표 4] 최대 처짐의 비교

실험체	유한 요소 해석 결과	실험 결과
SGC-1	0.5676	0.5500
SGC-2	0.5427	0.5294
SGC-3	0.5474	0.5400
SGC-III	0.5447	0.5500
SGC-IV	0.5562	0.4900
SGC-V	0.6110	0.6500
SGN-II	0.5846	0.5000

Unit : cm

4. 2 양단 고정된 스티브 거더 시스템의 해석

본 연구에서 개발된 유한 요소 모델로 단순 지지된 스티브 거더 시스템을 해석한 결과는 실험 결과와 비교해서 오차율이 최대 6.5% (평균오차: 5.78%)이내에 있었다. 따라서, 본 모델이 스티브 거더 시스템의 거동 해석에 적합한 것으로 판단됨에 따라, 본 모델의 경계 조건만을 바꾸어 양단

고정된 스테브 거더 시스템의 거동을 예측하는데 사용하였다.

양단 고정된 스테브 거더 시스템의 첫번째 유한 요소 모델을 FSM-1 이라고 하고, 이 모델에서는 콘크리트 슬라브가 압축력만을 지지하는 구조요소로 상현재의 단부에서 작용하는 인장력을 전혀 지지하지 않는 것으로 가정했다. 이 가정은 스테브 거더 시스템의 경계조건이 주거더(main girder)에 의해 지배되는 것으로 가정한 콜라코의 비렌달 트러스 모델을 따른 것이다[그림 5].

두번째 모델인 FSM-2 는 콜라코에 의해 모델되지 않은 다른 한 가지의 가능성을 염두에 두기 위한 것으로 스테브 피스(stub piece)도 구속한 모델이다. 그러나, 스테브 피스는 상하현재간의 응력 전달요소일 뿐이기 때문에 FSM-1 에 의한 해석 결과가 FSM-2 에 의한 해석 결과에 비해서 신뢰성 있는 결과일 것으로 판단된다.

[표 5] 유한 요소 해석에 의한
각 모델간의 최대 처짐 비교

실험체	유한 요소 해석 결과	
	FSM 1	FSM 2
SGC-1	0.3298	0.2918
SGC-2	0.2985	0.2622
SGC-3	0.3025	0.2658
SGC-III	0.3008	0.2523
SGC-IV	0.3074	0.2591
SGC-V	0.3598	0.3126
SGN-II	0.3219	0.2791

Unit : cm

[표 6] 경계 조건의 변화에 따른
처짐의 변화

실험체	단순 지지	양단 고정	변화율(%)
SGC-1	0.5676	0.3298	58.1
SGC-2	0.5427	0.2985	55.0
SGC-3	0.5474	0.3025	55.3
SGC-III	0.5447	0.3008	55.2
SGC-IV	0.5562	0.3074	55.3
SGC-V	0.6110	0.3598	58.9
SGN-II	0.5846	0.3219	55.1

Unit : cm

정정보 이론에 의하면 중앙부에 집중하중이 가해진 단순 지지보는 중앙부의 최대처짐이 $PL^3/48EI$ 이며, 양단 고정된 보에서는 $PL^3/192EI$ 이다. 양단 고정된 집중하중을 받는 보는 단순 지지된 보에 비해 중앙부 최대 처짐이 25% 발생함을 알 수 있다. 그러나, [표 6]에서와 같이 스테브 거더의 해석 결과는 모든 실험체에서 경계 조건의 변화에 의해 처짐이 평균 56.12%로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 FSM-1 의 값을 기준으로 계산한 것이며, FSM-2 의 경우는 처짐이 49.58%로 감소했다.

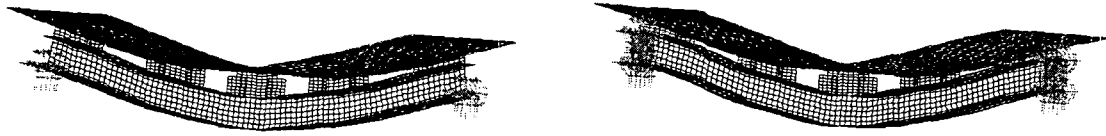
스테브 거더 시스템은 개구부와 이질 재료 등의 이유로, 그 구조적인 속성이 대단히 복잡하여 정정보 이론으로는 그 거동을 예측하기 어렵다. Hosain^[11]이 5 가지의 파괴형태를 가정하여 해석하는 방법을 제시한 바 있으나, 실제에 거의 적용할 수 없을 정도로 큰 오차를 보여 주었으며, 극한 강도 해석법으로는 해석할 수 없음이 증명되었다. 또한, 본 연구에서의 해석 결과에 의해서도 스테브 거더 시스템의 경계 조건을 단순 지지된 상태에서 양단 고정된 상태로 변경하였을 때, 그 거동을 예측하는데 정정보 이론에 근거한 접근은 적당치 않음을 알 수 있었다.

스테브 피스의 갯수가 변화함에 따른 처짐의 변화는 SGC-1 실험체와 SGC-2 실험체에서 알 수 있으며, 경계조건의 변화에 따른 각각의 처짐은 SGC-1 이 58.1%, SGC-2 가 55.0%로 감소하였다. 따라서, 스테브 피스 갯수의 변화에 따른 처짐의 변화는 경계조건에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

스티프너 보강에 따른 처짐의 변화는 SGC-2 와 SGC-3 의 비교를 통해 알 수 있다. SGC-2 와 SGC-3 는 모두 경계조건의 변화에 따라서 처짐이 55% 내외로 감소하는 것으로 나타났으므로 스티프너의 보강 여부에 따른 처짐의 변화는 경계조건에 큰 영향을 받지 않는 것임을 알 수 있다. SGC-1 과 SGC-V 를 통해서 거더 길이에 대한 전체 스테브 길이의 비를 변수로 하여 스테브 거더 시스템의 처짐을 고찰하였으며, 이 또한 경계조건에 큰 영향을 받지 않았다. SGC-2, SGC-III, SGC-IV 에서 개구부의 상대적인 길이의 비에 따른 처짐의 변화를 알 수 있다. 이 경우도 역시 경계조건에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

스테브 피스 갯수가 변화할 때, 경계조건에 따른 처짐의 변화를 검증하기 위해 스테브 피스가 7 개인 새로운 모델을 모델링하여 해석하여 본 결과, 단순 지지된 경우에 처짐이 0.5405cm 로, 양단 고정의 경우에 0.2924cm 로 나타나, 경계조건의 변화에 처짐이 53.72% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 시뮬레이션을 통해서 스테브 피스의 갯수가 경계조건에 따른 스테브 거더 시스템의

처짐에 대한 강성변화에 영향을 미치는 가장 결정적인 변수라는 예측을 할 수 있다.



[그림 5] 경계조건에 따른 SGC-III 실험체의 유한 요소 모델의 처짐.

4. 3 스티브 거더의 경계조건 변화에 따른 응력의 변화

스티브 거더 시스템의 응력 변화는 비렌달 트러스 모델을 이용하여 해석한 결과로부터 고찰하였다. 주요 비교 변수는 스티브 거더 시스템의 축력과 휨 모멘트로 하였으며, 응력의 측정은 개구부의 단부, 즉 스티브 피스의 끝부분으로 하였다. [표 7]은 SGC-III 실험체에 대한 해석 결과이며, 나머지 타 실험체의 해석 결과도 비슷한 경향을 보였다.

[표 7] 경계조건의 변화에 따른 응력의 변화 (SGC-III)

	no	구조적 거동	단순 지지	양단 고정	응력 변화
하 현 재	1	축력	17.31	-6.61	-23.92
		휨모멘트	37.79	78.16	40.37
	2	축력	17.31	-6.61	-23.92
		휨모멘트	-107.0	-77.34	29.66
3	축력	38.40	14.47	-23.93	
	휨모멘트	-12.84	13.75	26.59	
4	축력	38.40	14.47	-23.93	
	휨모멘트	-106.10	-74.39	31.71	
상 현 재	7	축력	-17.31	-13.35	3.96
		휨모멘트	106.80	137.20	30.40
	8	축력	-17.31	-13.35	3.96
		휨모멘트	-190.30	-149.20	41.10
9	축력	-38.40	-34.43	3.97	
	휨모멘트	30.34	69.43	39.09	
10	축력	-38.40	-34.43	3.97	
	휨모멘트	-201.80	-162.90	38.90	

Unit : ton, meter

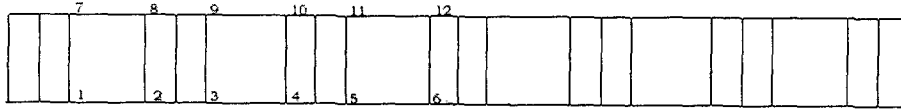
경계조건을 양단 고정으로 변경하면, 상현재에서는 인장력이 발생하여 압축력이 단순 지지된 경우에 비해서 다소 감소하며, 하현재에서는 큰 압축력이 발생하여 인장응력이 크게 감소하였다. 이 경우, 하현재에서는 평균 23.9t의 인장응력 감소를 보였으며 상현재에서는 평균 3.9t의 압축응력 감소를 보였다.

이러한 경향은 스티브 피스 갯수의 변화에 반응하는 것으로 나타났으며, 스티브 피스의 갯수가 많아질수록 하현재의 인장응력의 감소량이 작아지고 상현재의 압축응력의 감소량은 커졌다. SGC-1 과 SGC-2 에서의 경계조건의 변화에 따른 상하현재의 응력변화는 각각 SGC-1 에서 -24.11t, 4.43t 이고, SGC-2 에서 -23.93t, 3.96t 이었다. 또한 외측 개구부에 비해 내측 개구부에서의 축방향 응력 감소가 다소 크게 나타났다. 스티브 피스의 갯수 변화 외의 다른 변수에 따른 응력의 변화는 경계조건에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

휨모멘트의 변화 역시 스티브 피스의 갯수에 영향을 받는 것으로 판단되며 최외곽 스티브의 단부측(절점 1)에서의 휨모멘트의 변화는, SGC-1 의 경우에 32.24 t-m, SGC-2 의 경우에 40.72 t-m 이었다. 또한 이러한 경향은 스티브 피스의 갯수를 7 개로 하였을 때에도 이어져 58.68 t-m 로 나타났다.

휨모멘트의 변화는 스티브 피스뿐만 아니라 스티프너의 보강 유무에도 반응하는 것으로 판단되는데 SGC-3 의 경우 앞서와 같은 점에서의 휨모멘트가 50.72 t-m 로 나타나 SGC-2 의 경우에 비해 약 10 t-m 정도가 큰 것으로 나타났다. 각 실험체에서의 경계조건 변화에 의한 응력의 변화는

[표 8]과 같다. 응력을 측정할 점은 스테브 피스의 단부이며, 하현재의 지지부측으로부터 중앙부, 상현재의 지지부측으로부터 중앙부로 번호매김하였다[그림 6].



[그림 6] 비렌탈 트러스의 절점

[표 8] 경계조건의 변화에 따른 각 실험체에서의 응력의 변화

실험체	action	하현재						상현재					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SGC-1	Axial	-24.1125	-24.1125	/	/	/	/	4.4294	4.4294	/	/	/	/
	Bending	32.2392	32	/	/	/	/	40.387	62.67	/	/	/	/
SGC-2	Axial	-23.9266	-23.9266	-23.9307	-23.9307	/	/	3.96	3.96	3.96	3.96	/	/
	Bending	40.719	30.0622	23.73	31.78	/	/	30.03	40.8	39.07	38.9	/	/
SGC-3	Axial	-23.66	-23.66	-23.74	-23.74	/	/	4.04	4.04	4.11	4.11	/	/
	Bending	50.72	30.67	30.64	31.6	/	/	21.55	41.6	39.84	38.9	/	/
SGC-III	Axial	-23.924	-23.924	-23.93	-23.93	/	/	3.96	3.96	3.97	3.97	/	/
	Bending	40.37	29.66	26.59	31.71	/	/	30.4	41.1	39.39	38.9	/	/
SGC-IV	Axial	-23.927	-23.927	-23.92	-23.92	/	/	3.98	3.98	3.97	3.97	/	/
	Bending	40.14	29.41	31.595	31.72	/	/	30.6	41.3	39.1	38.9	/	/
SGC-V	Axial	-260.729	-260.729	/	/	/	/	242.69	242.69	/	/	/	/
	Bending	33	31.2	/	/	/	/	38.5	40.3	/	/	/	/
SGN-II	Axial	-23.056	-23.056	-23.07	-23.07	/	/	3.83	3.83	3.84	3.84	/	/
	Bending	41.08	29.87	29.827	30.56	/	/	27.4	38.54	38.44	37.7	/	/
7piece	Axial	-22.863	-22.863	-23.185	-25.935	-23.2	-23.2	5.5	5.5	5.82	5.82	5.83	5.83
	Bending	58.68	27.98	29.58	31.48	31.657	31.69	19.17	49.85	41.222	39.33	38.79	38.8

Unit : ton, meter

5. 스테브 거더의 재료적 비선형 해석

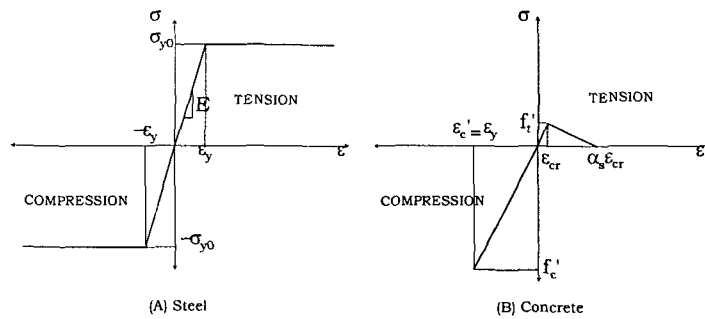
스테브 거더 시스템의 극한 하중을 예측하기 위하여 전술한 유한 요소 모델을 이용하여 비선형 해석을 실시하였다. 스테브 거더 시스템의 유한 요소 해석은 선형 해석에 국한되어 이루어져 극한 하중에 대한 연구가 미비한 상태이나, 1995년에 발표된 Wang^[8]의 연구에서 극한 하중에 대한 연구가 다소나마 이루어진 바 있다. 본 연구에서는 실험 결과를 기반으로 하여 단순 지지된 스테브 거더 시스템의 극한 하중을 구하고, 그 모델을 토대로 양단 고정된 스테브 거더 시스템의 극한 하중을 예측하였다.

5.1 재료의 비선형 모델

비선형 해석을 위해 철골과 콘크리트의 재료적인 속성은 다음과 같이 가정하였다. 철골은 압축과 인장에서 모두 완전 탄소성(elastic - perfectly plastic) 거동을 하는 것으로 가정하였다. 이 가정으로 모델링하는데에 LUSAS™는 철골에 대한 탄성계수 E와 포아송비 ν , 그리고 항복 강도 σ_{y0} 를 필요로 한다. 이 값들은 실험체의 재료실험에 의한 값을 사용하였다.

콘크리트의 인장 거동은 균열(crack)이 발생하거나 항복하기 전까지는 탄성계수 E와 포아송비 ν 에 의한 등방성 탄성 거동을 하는 것으로 가정하여 두 개의 직선으로 모델화하였다. 첫번째 직선은 원점과 균열이 발생하게 되는 변형도 ϵ_{cr} 에서의 최대 인장 응력 f_t' 을 연결한 선이다. 본

연구에서는 최대 인장 응력을 최대 압축 응력의 10%로 가정하였다. ϵ_{cr} 이후에는 $\alpha_s \epsilon_{cr}$ 의 변형도에서 응력이 0이 될 때까지 점차 감소하는 것으로 가정하였으며, 이는 균열 발생 후에 균열로 인한 콘크리트의 응력 軟化(stress softening)를 유한 요소 해석에 반영하기 위한 가정이다. α_s 는 軟化 계수(softening factor)이며, 35로 하였다. 스테브 거더 시스템에서 콘크리트 슬라브의 압축 거동은 시스템의 거동에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단되므로, 콘크리트의 압축 거동은 응력이 f'_c 이 될 때까지 선형거동하는 것으로 가정하였다.

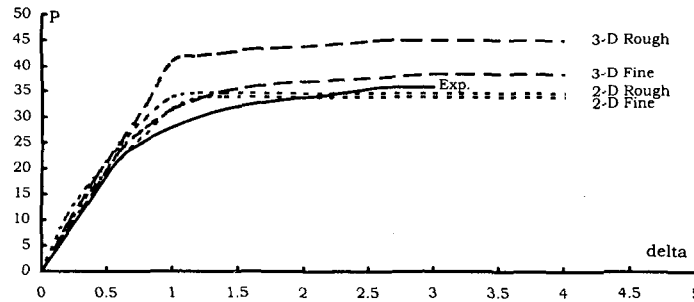


[그림 7] 이상화된 응력 변형률 관계

LUSASTM는 또한 균열에 의한 전단 강성의 손실을 고려하기 위하여 shear retention factor β 를 제공하며, 본 연구에서는 0.5로 가정하였다.

5. 2 스테브 거더 시스템의 재료적 비선형 해석

5. 2. 1 단순 지지된 스테브 거더 시스템의 비선형 해석

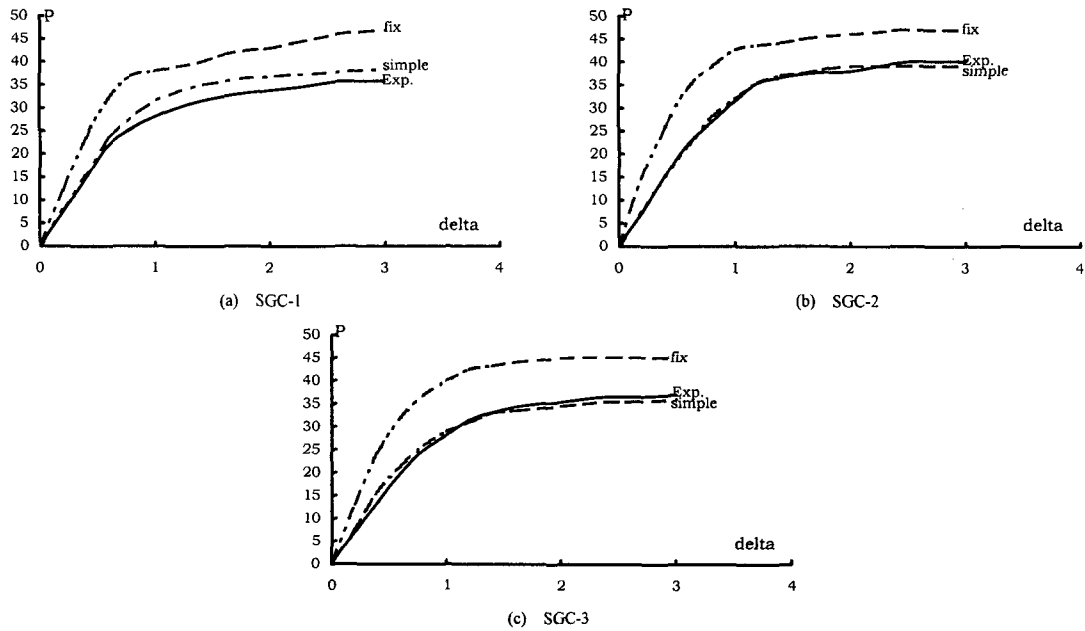


[그림 8] 2-D 모델과 3-D 모델의 수렴성 검토(units: ton-cm)

[그림 8]과 같이 극한 하중의 예측을 위해 전술한 2-D 모델과 3-D 모델을 비교하여 비선형 해석 모델을 선정하였다. 2-D 모델을 통한 해석 결과, 선형 탄성 구간에서는 실험에 의한 값과 근접한 값을 얻을 수 있었으나, 극한 하중에서의 내하력은 다소 과소 평가되었다. 3-D 모델은 선형 탄성 구간에서는 실험에 의한 값과 상당히 근접한 결과를 보였으며, 극한 하중은 다소 과대 평가되는 것으로 나타났다. 그러나, 2-D 모델은 실험에 의한 극한하중보다 다소 작은 하중으로 수렴하는 반면, 3-D 모델은 실험에 의한 극한 하중으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 3-D 모델을 비선형 해석 모델로 선정하였다.

5. 2. 2 양단 고정된 스테브 거더 시스템의 극한 하중 예측

현재까지는 SGC-1, SGC-2, SGC-3에 대해서만 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석 결과[그림 9], 단순 지지된 SGC-1 실험체는 극한 하중이 38.4t로 나타났으며, 양단 고정된 상태에서는 46.8t로 나타나 약 21.8%정도가 증가되었다. SGC-2 실험체와 SGC-3 실험체의 경우도, 단순 지지되었을 때 각각 39.0t, 36.0t, 양단 고정되었을 때 각각 46.8t, 45.1t로 나타나 약 20.0%정도와 25.3%의 극한하중의 증가를 보였다. 그러므로, 단순 지지된 경우에 비하여 양단 고정된 상태에서의 극한 하중은 약 20~25%정도 증가하는 것으로 예측된다.



[그림 9] 각 실험체의 비선형 해석에 의한 극한 하중 예측(units : ton-cm)

6. 결론

본 연구에서는 실험으로 검증된 바 없는 양단 고정된 스테브 거더 시스템의 거동을 선형 유한 요소 해석에 의한 처짐, 비렌달 트러스 모델에 의한 응력, 그리고 비선형 해석에 의한 극한 하중의 비교를 통하여 예측하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 스테브 거더 시스템의 해석모델로는 실험 결과와 비교적 일치하는 3-D 유한 요소 모델 및 비렌달 트러스 모델이 적합한 것으로 판단된다.
2. 스테브 거더 시스템의 경계조건 변화에 따른 처짐 및 축방향력에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 스테브 피스의 갯수로 나타났다. 스티프너의 보강여부, 거더 길이에 대한 전체 스테브 피스의 길이의 비, 개구부의 상대적인 길이의 비 등의 변수들은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
3. 스테브 거더 시스템의 경계조건 변화에 따른 휨모멘트 및 극한 하중은 스테브 피스의 갯수 뿐만 아니라 스티프너의 보강 유무에 따라서도 영향을 받는 것으로 판단된다.
4. 스테브 거더 시스템의 극한 하중은 단순 지지된 경우에 비해 양단 고정되었을 때 20.0~25.0% 증가하는 것으로 나타났다.

상기한 바와 같은 해석모델에 의한 예측 결과는 실험적 검증을 통한 뒷받침이 필수적이다.

참고 문헌

1. Clawson, W. C., and Darwin, David, "Composite Beams with Web Openings," *Structural Engineering and Engineering Materials*, SM Report No. 4, University of Kansas Center for Research Center, Inc., Lawrence, Kans., Oct., 1980.
2. Clawson, W. C., and Darwin, David, "Composite Beams with Web Openings," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.108, No.ST1, Proc. Paper 16811. Jan., 1982.
3. R. Paul Johnson, "Longitudinal Shear Strength of Composite Beams," *Journal of the American Concrete Institute*, June, 1970.
4. Colaco, J. P., "A Stub-Girder System for High-Rise Buildings," *AISC Engineering Journal*, July, 1972, pp. 89-95.

5. E.Y.L.Chien, J.K.Ritchie, and Vice President, *Design and Construction of Composite Floor Systems*, Canadian Institute of Steel Construction, Aug., 1984.
6. 문정호, “스터브 거더 시스템의 내력에 관한 연구,” 한양대학교 대학원 석사 학위 논문, 1983,12.
7. 신경재, “Deck-Plate 의 유무에 따른 Stub-Girder 시스템의 거동에 관한 연구,” 한양대학교 대학원 석사 학위 논문, 1984, 12.
8. C. M. Wang, K. Padmanaban, N. E. Shanmugam, “Ultimate Strength Analysis of Stub Girders,” *Journal of Structural Engineering*, sept., 1995.
9. Ahmad, M., Hosain, M. U., “Recent Research on Stub-Girder Floor Systems,” *Proc., Int. Conf. On Steel and Aluminium Struct.*, Elsevier Applied Science, London, England, R. I.
10. Hosain, M. U.,and Tse, W. C., “Failure Mechanism of Stub Girders,” *Proc., 5th ASCE EMD Specialty Conf.*, ASCE, New York, N.Y., 595-598.
11. *LUSAS Theory Manual version 11.*, Finite Element Analysis Ltd.
12. *LUSAS User Manual version 11.*, Finite Element Analysis Ltd.
13. Li-hyung Lee, Jeong-ho Moon, and Kyoung-jae Shin, “Behavior of Stub-Girders at Ultimate Load,” *East Asian Conference on Structural Engineering and Construction*, Bangkok, Jan., 1986.
14. Bjorhovde, R., and Zimmerman, T. J., “Some Aspects of Stub-Girder Design,” *Engineering Journal*, AISC, Vol. 17, No. 3, 1980, pp. 54-69.
15. Colaco, J. P., “Partial Tube Concept for Mid-Rise Structures,” *Engineering Journal*, AISC, Vol. 11, No. 4, Dec., 1974, pp. 81-85.
16. Y. W. Lam, Trezansoff, and Hosain, M. U., “An Experimental Investigation of Stub-Girders,” *Structural Eng. Research Report*, No. 14, June, 1977.