

LP강판 거더의 효율적 설계

Efficient Design of Longitudinally Profiled Plate Girder

함 형 길* 이 성 행** 한 성 남*** 김 경 남****
Hahm, Hyung-Gil Lee, Seong-Haeng Han, Sung-Nam Kim, Kyoung-Nam

요 약

최근, 구조물의 건설에서 경제적으로 개선된 구조시스템을 개발하는데 많은 역량이 집중되고 있다. 이에 따라, 구조물을 단 순화시키고 시공기간을 단축시키고자 고성능강의 사용이 증가되고 있다. 구조물에 가해지는 단면적을 효과적으로 분배시키고, 자중감소와 용접개소를 줄일 수 있는 이점 등으로 인하여, 구조요소로서 LP강판에 대한 관심이 늘고 있다. 이러한 LP강판은 유럽에서 개발되어, 한국에서도 강구조물에 급속도로 사용이 증가되고 있으나, 이에 대한 구조적인 적용검토에 대한 연구는 아직 미흡한 상태이다. 본 연구에서는 유한요소해석의 고체요소를 이용하여 여러 단면형상에 대한 단면력과 처짐을 검토하여, 국내 생산 가능한 LP강판 제품에 대한 작업성, 효율성 및 경제성을 확인하였다.

Abstract

Recently, the trend of construction has been concentrated on the development of structural systems improved economically. As a result, the usage of High Performance Steel which simplifies the girder structures and shortens the construction time is increasing. Also the interest in Longitudinally Profiled(LP) plate as a structural element for girders has been increased. The LP can distribute efficiently the sectional force applied to the structure, and also reduce the self-weight and the number of welding points. The LP plate was developed in Europe originally and its application has been increased rapidly on steel structures in Korea. Though it is used widely and internationally, the study for the LP plate application is rarely performed. In this paper, sectional stress and deflections were analyzed in the different section types by solid element in the finite element method; finally the workability, as well as economical efficiency of the LP plate produced in Korea was evaluated.

키워드 : LP강판, 효율성, 작업성, 유한요소해석

Keywords : Longitudinally Profiled Plate, efficiency, Workability, Finite element analysis

1. 서 론

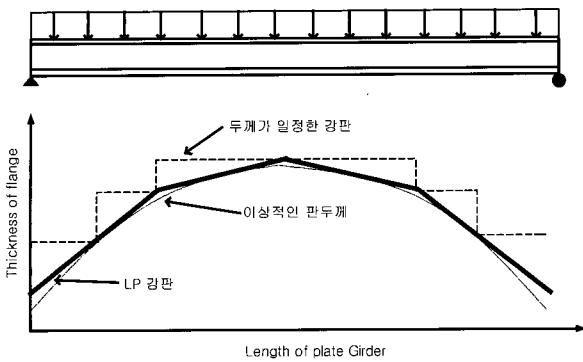
최근 선박 및 교량을 시작으로 강구조 분야에 경쟁력 측면에서 강구조물의 설계 및 제작, 유지관리 등에 대하여 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 경쟁력 있는 강구조물을 만들기 위하여 소재에 사용되는 두꺼운 강판에 대해서도 시공 공정수 감축과 구조의 간소화를 가능하게 하는 새로운 고성능강의 사용이 요구되고 있다.

초기의 일반적인 강구조물은 강중의 최소화 개념

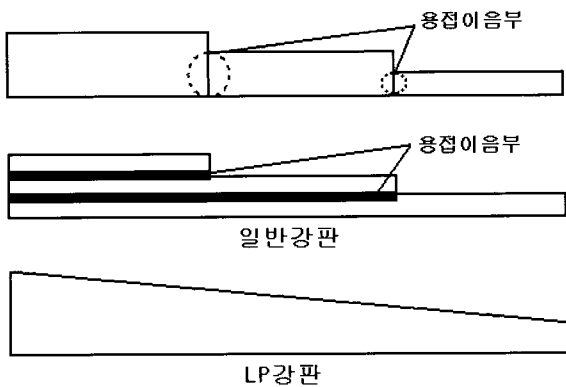
에 따라서 설계되어 왔으며 두께가 일정한 강판을 구조물에 적용하기 위해서는 위치별 저항 내력의 차이를 감당하기 위해 두께가 다른 여러 개의 강판을 용접하여 부재를 구성하거나, 구조물의 시공성을 위해 하나의 부재에서 단면력이 가장 큰 위치에 필요한 두께를 부재 전체에 사용하였다. 그러나 강재 중량의 최소화를 위해 <그림 1>의 계단형(두께가 일정한 강판)과 같이 단면력의 변화에 따라 두께가 다른 강판을 여러 개 사용할 경우 용접 이음부가 많이 발생하므로 이음에 많은 경비가 소요되고 피로에 대한 취약부가 많이 발생하게 되며, 두꺼운 강재로 전체를 사용하면 강재의 중량이 불필요하게 증가하여 자중 및 재료비가 상승하게 된다.

그러므로 부재의 길이방향에 따라 변하게 되는

* 정회원 · 부산대학교 산업토목학과 교수
** 교신저자, 정회원 · 부산대학교 산업토목학과 부교수
Tel : 055 -350-5314 E-mail : lsh77@pusan.ac.kr
*** 계룡건설산업(주) 토목부 차장
**** 충북대학교 건설기술연구소 연구원



<그림 1> LP강판 사용의 원리¹⁴⁾



<그림 2> 일반강판과 LP강판의 비교

부재력을 대응할 수 있도록 <그림 1>의 경사 직선(LP 강판)과 같이 두께가 연속적으로 변하는 강판을 사용한다면, 부재력의 변화에 따라 압연강판의 두께가 연속적으로 변하게 되므로 보다 이상적인 부재를 형성하여 강재중량도 감소되고 이음부의 수도 줄게 되므로 더욱 경제적이며 피로성능이 우수한 강구조물을 건설할 수 있다^{1)~3)}.

이러한 강재의 필요성에 따라 개발된 압연강판의 두께를 연속적으로 변하게 제조하는 기술은 유럽에서 1881년에 최초로 특허등록 이전부터 고안되어 왔지만 적절한 설비 및 제조기술의 미비로 인해 실현되지 못했으나 그 후 1983년에 프랑스와 독일에서 공동으로 길이에 따라 두께가 변하는 LP강판(Longitudinally Profiled Plate)의 개발에 성공하였다⁴⁾. LP강판은 변단면 후판 또는 테이퍼드 플레이트(Tapered Plate)라고도 불리며 <그림 2>에 보여지는 바와 같이 길이 방향으로 판 두께가 연속적으로 변화하는 형식의 신개념 후판이다. 또한, 부재 각 단면에서의 발생하는 휨응력을 고려하여 길이 방향으로

플랜지 두께를 증감시킨 고품질 압연강판이다^{5)~7)}.

국내에서도 1998년에 POSCO에서 LP강판을 개발하였으며, 생산되는 LP강판의 형상과 두께 차이, 두께변화를 등이 고려되어 생산되고 있다⁸⁾. 그러나 국내에서는 LP강판의 적용이 아직까지 부진한데 이것은 새로운 강판의 사용에 확신을 갖을 만큼의 이론적, 실험적 자료의 확보가 충분하지 못한 불확실성에 기인한다. 그러므로 국내에서도 많은 데이터를 확보하고 기존의 설계법을 검토하여 해당 시방서 규정의 재정 및 개정안을 작성하는 등의 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 김명모 등(2000)이 국내에서 생산되어 적용 가능한 LP강판으로 시험체를 제작, 구조성능 시험을 실시하여 등가 치환단면으로 해석하여 유한요소모델링의 유용성을 평가한 기존 연구¹⁴⁾를 확장하여, 유한요소 모델상의 고체(solid)요소를 이용한 상세 구조해석을 수행하였다. 고체요소를 사용함으로써 LP강판의 두께변화를 효과적으로 모델링하여, 연속적 단면강성의 변화를 해석하였다. 또한, 해석모델의 적합성은 3.1절에서 기존 시험결과⁹⁾를 이용하여 검증하고, 3.2절에서 동일시간에서 사용가능한 4가지 형식의 단면 형상을 선정하여 구조해석을 실시하고, 4장에서는 LP강판을 이용한 강거더 설계의 효율성 및 경제성을 평가하였다.

2. LP강판의 시험체 평가

2.1 시험편 제작 및 제작성 평가

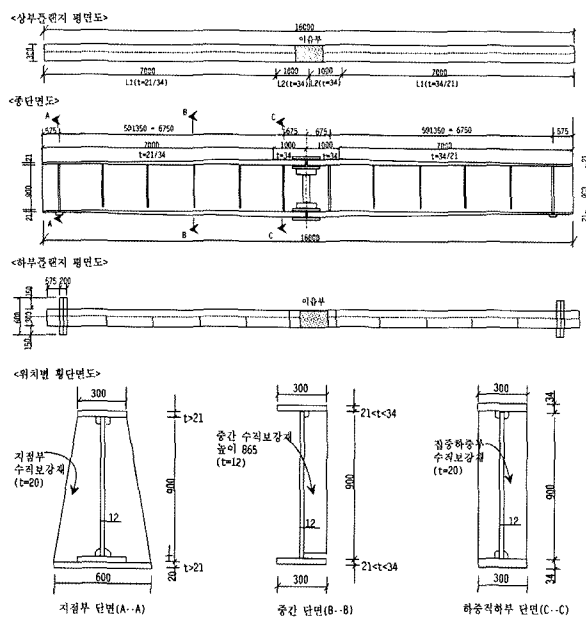
국내에서 생산되는 LP강판에 대하여 일반적인 판형의 설계법과 제작여건을 고려하여 만들어진 시험체에 대하여 구조성능을 평가하였다. LP강판이 가장 효과적이며 일반적으로 적용되는 부위는 휨부재의 플랜지이므로 시험체를 휨부재의 기본이 되는 단순 지지된 보 시험체로 설정하였으며 단면형상은 대칭I형 단면으로 구성하였다. 시험체에 사용된 재질은 용접구조용 압연강재인 SM490YB로 하였다. LP강판의 형상은 두께가 21mm에서 34mm로 지점부에서 중앙부로 갈수록 두꺼워지고 중앙 연결부위에 등두께부가 부착된 일방향 LP 강판이며, 두께변화율은 국내 생산

가능한 범위내에서 1.857mm/m로 제작되었다. <표 1>에 시험체의 제원 및 규격을 나타내었다.

<표 1> LP 시험체의 제원 및 규격

강재 종류	두께 변화율 (mm/m)	두께(mm)		길이(1 segment당) (m)			
		후 측	박 측	시험체	등두 계부	변화 부	지점-중앙
SM490YB	1.857	34	21	8.0	1.0	7.0	7.425

시험체의 형상은 <그림 3>과 같으며 설계조건은 현행 도로교 시방서를 근거로 일반적인 판형의 설계조건에 따라 이음부 및 보강재를 설계하였다^{10)~12)}. I형 단면 시험체의 제작은 두 개의 세그먼트로 제작하여 중앙부에 고력볼트에 의한 마찰이음을 하도록 하였다.



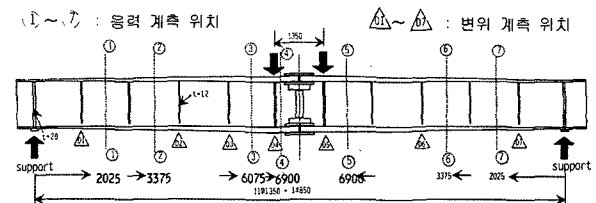
<그림 3> I형 거더 시험체 형상

2.2 시험방법 및 결과

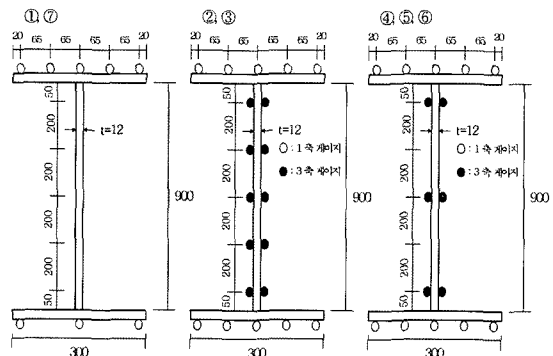
I형 plate 시험체의 재하 실험 사용기기는 RIST (경기도 기흥 소재)에서 10MN UTM 시험기를 사용하였다. 가력방법은 SM490YB 강재의 허용응력인 210MPa 수준에 도달하도록 하중을 점차 증가시켰으며, 2점 재하의 4점 휨 실험으로 하여 플랜지 두께가 일정한 중앙부에서 균일한 최대 휨 모멘트가 작용하도록 하였다. 또한 횡변위 방지를 위하여 횡지지 프레임을 설치하였다.

<그림 4>에서와 같이 I형 보 시험체에 상,하부 플랜지에 발생하는 허용응력에 대한 설계하중 범위인 허용응력 210MPa의 하중 613.6kN과 충격을 고려한 설계하중의 85%인 522.9kN과 설계하중의 40%인 249.8kN에 대한 7개소 (D1-D7)에 보의 수직변위를 LVDT로 계측하고 7개 단면(①-⑦)에 대한 변형률을 계측하여 응력을 산출하였다. 이 중 결과는 허용응력에 대응하는 613.6kN의 하중 재하 결과에 대하여만 언급한다. <그림 4>는 시험체의 계측위치 및 변위계 설치위치이며, <그림 5>는 각 단면의 게이지 위치를 나타낸다.

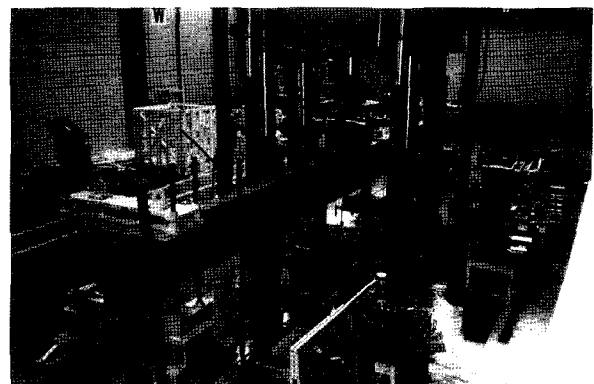
<그림 6>은 I형 보 시험체의 재하 상황을 보여주고 있으며, 시험체의 시험결과에 따른 계측값을 <표



<그림 4> 시험체의 변형률게이지 및 변위계 위치



<그림 5> 각 단면의 게이지 부착 위치



<그림 6> I 거더 실험 재하 전경

2>와 <표 3>에 나타내었다.

<표 2> 상하 플랜지의 측정응력 (MPa)

구분	단면 1	단면 2	단면 3	단면 4	단면 5	단면 6	단면 7
하부 플랜지	74.7	120.0	194.5	214.1	195.6	120.6	76.3
상부 플랜지	-77.4	-120.0	-191.1	-203.2	-189.5	-120.3	-72.4

<표 3> 처짐 측정 결과(mm)

위치	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
처짐	12.24	32.63	39.29	42.86	43.56	32.60	11.90

2.3 시험체의 제작성

구조 시험체의 제작은 제작설비, 제작기준 등 국내의 일반 판형 제작과정과 동일하게 제작하여 제작성을 평가하였다.

제작과정 결과 절단, 조립, 용접 등 전반적인 제작공정에 있어서 일반 판형제작과 비교하여 큰 어려움 없이 제작하였으며, 절단면 및 용접조립 상태가 양호하였고, 추가되는 작업공수 없이 양호한 결과를 얻을 수 있었다. <표 4>에서 나타낸 것과 같이 제작 후 측정된 제작오차가 일반판형과 동등한 범위로 만족하였다.

<표 4> 제작오차 검사 결과(mm)

class/point	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
DWG size	8000	300	300	900	900	900	300	300	900	900	900	8000	300
DEV(±)	0	0	+1	+2	+2	+2	+1	+1	+2	+2	+2	0	0

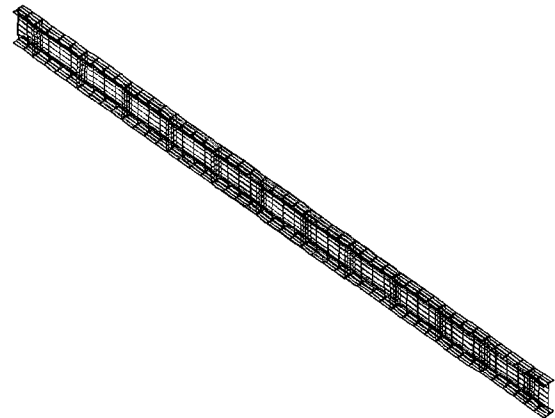
class/point	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
DWG size	300	900	900	900	300	300	900	900	900				
DEV(±)	0	+2	+1	0	0	0	+1	+1	+1				

그러므로 LP 강판의 제작성을 검토한 바, 일반 후판재의 제작과정을 적용하여 동일한 조건으로 부재를 제작하였을 경우의 안정성이 확인되었다.

3. 구조해석

3.1 시험편 모델링 및 해석결과

본 연구에서 사용된 I형 단면 시험체를 범용 구조 해석 프로그램인 EMRC NISA를 사용하여 해석하기 위해 <그림 7>과 같이 고체요소를 이용하여 3-D 모델링하였다^{15,16}. 하중은 실험조건과 같게 중앙 2점에 주었으며, 지점조건은 단순지지 하였고, 시험체에서 볼트로 연결된 중앙부위 연결은 고려하지 않고, 강체로 간주하였다.



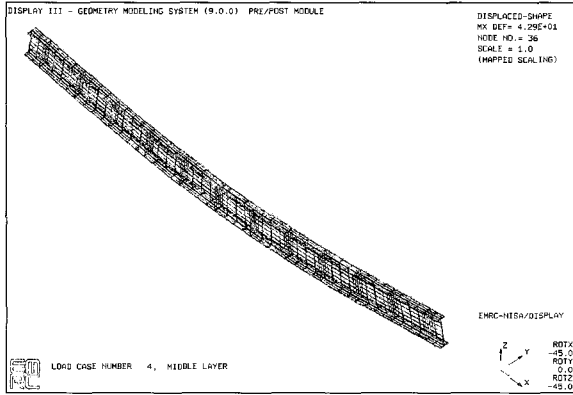
<그림 7> 3D 해석 모델 형상

I형 plate 시험체의 상,하부 플랜지에 시험하중과 같은 613.6kN의 하중을 재하하여 <그림 8>과 같이 응력과 변위를 확인한 결과, 측정치와 해석치간에 근사한 결과 값을 보였다.

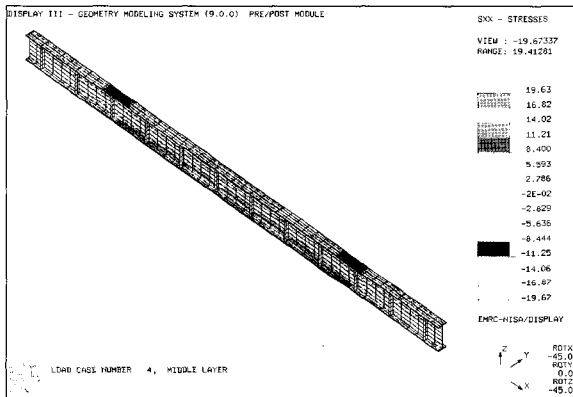
<그림 8>의 구조해석 결과에서 시험체의 계측위치와 같은 위치의 응력값과 처짐값의 응답비를 구하여 <표 5>와 <표 6>에 나타내었다.

<표 5>는 실험 측정값과 유한요소 해석에 의한 처짐값을 비교한 것이다. 각 위치별 처짐량의 측정치 변화가 부재내력의 탄성한계내 정적하중 하에서 직선변화를 약간 벗어난다. 이는 고장력볼트 마찰이 음부의 미끄러짐이 원인으로 판단된다. 그러나 아직 외적으로는 미끄러짐이 나타나기 이전이므로 이러

한 미세한 양은 볼트체결을 위한 샌드블라이스팅에 의한 후피제거로 설계하중 이내에서의 마찰력을 확보할 경우 충분히 제어될 수 있을 것이다.



(a) 변위(Dz) - 613.6kN

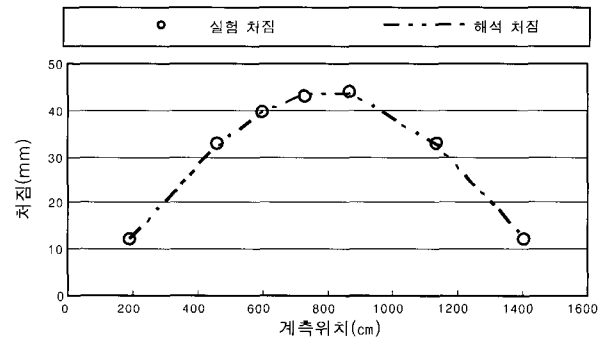


(b) 응력(Sxx) - 613.6kN

<그림 8> 시험체의 구조해석 결과

시험체의 연직 변위를 <그림 9>에 그래프로 비교하여 나타내었다. ○표시는 실험값이고, 점선은 시험체 유한요소 해석값이다. 처짐에 대한 시험값과 구조해석값은 유사하게 나타났으나, 기존연구¹⁴⁾에서 평균단면을 이용한 보요소로 해석한 경우에 시험보다 해석의 결과가 대부분 크게 나오는 것과는 다른 결과를 나타냈다. 그러나 설계시 고려되는 안전율을 고려할 때 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단되므로 일반적인 설계법을 적용하여도 구조물 거동에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

기존 연구¹⁴⁾에서는 Tapered beam을 고려하지 못하였기 때문에 구간을 나눠 등가단면인 구간별 평균 단면을 사용하여 해석을 하였기 때문에 단면이 변하는 경계부분에서는 오차발생을 피할 수 없게 된다. 그러나 고체요소를 사용하면 형상을 그대로 묘사가 가능하기 때문에 연속된 단면 강성변화를 고려할 수 있



<그림 9> 해석과 실험의 처짐 결과

<표 5> 실험과 해석의 처짐 응답비

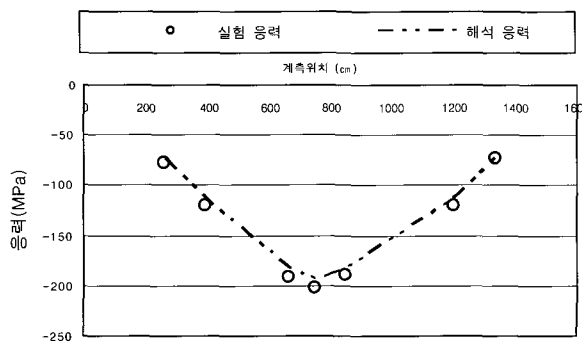
위치	D1 1.925m	D2 4.625m	D3 5.975m	D4 7.325m	D5 8.675m	D6 11.375m	D7 14.075m
계측 (mm)	12.24	32.63	39.29	42.86	43.56	32.60	11.90
FEM (mm)	12.03	32.42	39.33	43.19	43.19	32.42	12.03
계측/FEM	1.017	1.006	0.999	0.992	1.009	1.006	0.989

<표 6> 실험과 해석의 응력 응답비

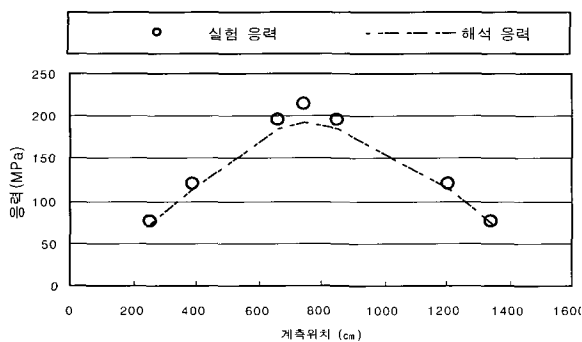
구분	응력비교	단면 1	단면 2	단면 3	단면 4	단면 5	단면 6	단면 7
하부 플랜지 (인장)	계측응력(MPa)	74.69	120.04	194.46	214.07	195.59	120.62	76.30
	FEM(MPa)	73.11	114.74	183.83	193.65	183.88	114.73	73.11
	계측/ FEM	1.022	1.046	1.058	1.105	1.064	1.051	1.044
상부 플랜지 (압축)	계측응력(MPa)	-77.40	-119.99	-191.10	-203.15	-189.50	-120.33	-72.37
	FEM(MPa)	-73.10	-114.74	-183.07	-193.30	-183.07	-114.73	-73.09
	계측/ FEM	1.059	1.046	1.044	1.051	1.035	1.049	0.990

게 된다. <표 6>은 실험 측정값과 본 연구에 따른 유한요소 해석에 의한 응력값을 비교한 것이다. 계측응력과 해석결과의 비교에서 일반적으로 실측 데이터가 작게 나타나는 것이 일반적이며, 평균단면을 이용한 보요소로 평가를 한 기존연구¹⁴⁾에서 해석의 결과가 큰 것으로 보고된 바 있지만 본 연구에서는 해석치가 약 5% 정도 작게 나타나고 있다. 이는 고체요소를 사용함으로써 상세부와 함께 연속적으로 변하는 단면강성을 반영하여 좁으로서 차이가 발생하는 것으로 판단되며, 모델링에 있어서 보강재 연결부의 상세 조건 변화 및 지점조건, 요소 등을 변화시켜 정밀해석을 실시하여 결과를 추가 검토, 비교하였으나 동일한 수준의 결과값을 얻었다. 이는 실제 구조물 제작시 발생하는 잔류응력의 영향 때문인 것으로 판단되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

상부 플랜지 휨 응력의 교축방향 분포를 <그림 10(a)>에, 하부 플랜지는 <그림 10(b)>에 보이고 있다. ○표시는 실험값이고, 점선은 시험체 유한요소 해석값을 나타낸다. 발생 응력에서 약 5% 정도의 차이가 발생하고 있지만, 처짐 계측 결과는 <표 5>



(a) 상부 플랜지



(b) 하부 플랜지

<그림 10> 휨응력의 교축방향 분포

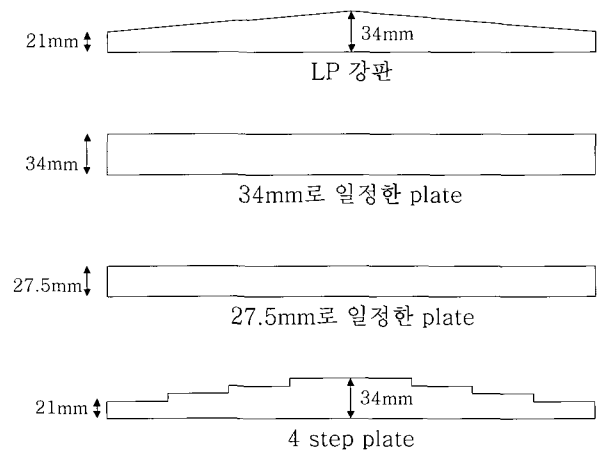
에서 확인한 바와 같이 큰 차이가 발생하지 않으므로 전체적으로 구조물의 거동에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단하였다.

시험과 구조해석의 비교 검토를 통하여 LP강판을 기존 설계법으로 설계, 제작 시공하여도 큰 차이점이 없이 공정을 진행할 수 있음을 보였고, 구조적으로도 기존의 설계방법으로 사용하는 해석결과와 비교했을 때 안정적임을 보여 강구조물 설계에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3.2 여러 형상의 모델링 및 해석결과

<그림 11>과 같이 LP 강판의 이점을 알기 위해 두께가 34mm, 27.5mm로 일정한 단면과 4단계의 판두께 변화를 갖는 거더를 추가적으로 각각 모델링하여 해석을 수행하였다.

최대두께인 34mm로 구성되어진 형상의 플랜지는 부재를 연결하지 않고 단면력이 가장 큰 위치에 필요한 두께를 적용하여 하나의 부재로 전체를 사용하던 이전의 설계방법과 비교하여 LP강판의 효율성을 검증하고자 구조해석을 실시하였다. 두께 27.5mm로 일정하게 적용된 I형 보는 최대 34mm와 최소 21mm의 중간값의 두께를 사용하여 제작 경제성보다 두께 감소에 따른 자중감소측면을 고려하여 비교하고자 구조해석을 실시하였다. 4 step plate 형상은 기존에 사용되는 설계방법으로 자중은 감소하는 반면 이음개소의 증가에 따른 성능 저하측면과 제작비 증가요소가 있는 단면으로서 LP 강판과 비교하고자



<그림 11> 연구에 고려된 여러 형상의 플랜지

〈표 7〉 응력 결과(Tapered 21mm→34mm, 단위 : MPa)

하중조건 위치 (cm)	자 중 37.87kN	하 중 100kN	자중+하중	비 고
260	3.678	12.186	15.864	
395	5.219	18.976	24.195	
665	6.481	30.254	36.735	
800	6.402	32.058	38.435	
935	6.481	30.254	36.735	
1205	5.219	18.975	24.195	
1340	3.678	12.185	15.863	

〈표 11〉 응력 결과(34mm, 단위 : MPa)

하중조건 위치 (cm)	자 중 42.76kN	하 중 100kN	자중+하중	비 고
260	3.171	9.511	12.682	
395	4.762	15.835	20.597	
665	6.602	28.581	35.184	
800	6.838	31.833	38.672	
935	6.602	28.581	35.184	
1205	4.762	15.835	20.597	
1340	3.171	9.511	12.682	

〈표 8〉 변위 결과(Tapered 21mm→34mm, 단위 : mm)

하중조건 위치 (cm)	자 중 37.87kN	하 중 100kN	자중+하중	비 고
192.5	0.488	1.968	2.456	
462.5	1.270	5.302	6.572	
597.5	1.510	6.432	7.942	
732.5	1.631	7.064	8.695	
867.5	1.631	7.064	8.695	
1137.5	1.270	5.302	6.572	
1407.5	0.488	1.968	2.456	

〈표 12〉 변위 결과(34mm, 단위 : mm)

하중조건 위치 (cm)	자 중 42.76kN	하 중 100kN	자중+하중	비 고
192.5	0.468	1.754	2.221	
462.5	1.233	4.794	6.027	
597.5	1.476	5.863	7.339	
732.5	1.602	6.477	8.080	
867.5	1.602	6.477	8.080	
1137.5	1.233	4.794	6.027	
1407.5	0.468	1.754	2.221	

〈표 9〉 응력 결과(4 step plate, 단위 : MPa)

하중조건 위치 (cm)	자 중 37.97kN	하 중 100kN	자중+하중	비 고
260	3.769	12.161	15.931	
395	5.048	17.810	22.858	
665	6.318	28.580	34.898	
800	6.555	31.834	38.388	
935	6.318	28.580	34.898	
1205	5.048	17.810	22.858	
1340	3.769	12.160	15.930	

〈표 13〉 응력 결과(27.5mm, 단위 : MPa)

하중조건 위치 (cm)	자 중 37.87kN	하 중 100kN	자중+하중	비 고
260	3.341	11.362	14.703	
395	5.027	18.931	23.958	
665	6.977	34.169	41.147	
800	7.228	38.052	45.280	
935	6.977	34.169	41.147	
1205	5.027	18.931	23.958	
1340	3.341	11.361	14.702	

〈표 10〉 변위 결과(4 step plate, 단위 : mm)

하중조건 위치 (cm)	자 중 37.97kN	하 중 100kN	자중+하중	비 고
192.5	0.482	1.883	2.366	
462.5	1.248	5.052	6.300	
597.5	1.482	6.124	7.606	
732.5	1.603	6.738	8.341	
867.5	1.603	6.738	8.341	
1137.5	1.248	5.052	6.300	
1407.5	0.482	1.883	2.366	

〈표 14〉 변위 결과(27.5mm, 단위 : mm)

하중조건 위치 (cm)	자 중 37.87kN	하 중 100kN	자중+하중	비 고
192.5	0.496	2.107	2.603	
462.5	1.310	5.759	7.069	
597.5	1.569	7.039	8.607	
732.5	1.703	7.769	9.471	
867.5	1.703	7.769	9.471	
1137.5	1.310	5.759	7.069	
1407.5	0.496	2.107	2.603	

한다. 연속테이퍼진 LP강판은 플랜지의 두께가 21mm에서 34mm로 변하는 강판이다.

각각의 모델링은 플랜지의 형상만을 <그림 11>과 같이 구성하였으며, 기타 조건은 시험을 실시한 시험체와 같은 조건과 치수를 적용하였다. 하중재하는 모든 모델링에 똑같이 100kN을 2점 집중하중으로 주어진 경우에 대하여 해석하였다.

여러 형상의 구조해석에서 얻어진 응력과 변위의 결과값을 <표 7>에서 <표 14>까지 나타내었다.

4. 플랜지 형상에 따른 분석

4.1 효율성 분석

하중 100kN을 집중하중으로 재하시의 LP강판과 두께가 34mm로 일정한 plate를 사용한 경우, 27.5mm로 일정한 plate를 사용한 경우, 4단계 판두께 변화를 갖는 거더의 경우 구조해석에 의한 응력과 처짐을 구하여 <표 15>와 <표 16>에서 나타내었다.

비교하는 값은 하중조건을 자중과 집중하중을 모두 적용한 경우의 결과값을 사용하여 비교하였으며, 응력값 및 처짐값 위치는 모델링의 좌측 끝점인 시작부에서의 거리를 나타낸다.

I형 plate 시험체에서 LP강판과 다른 세 시험체를 비교하면, 두께 34mm로 일정한 plate의 자중이 12.91% 정도 크지만 응력은 비슷하므로 전체적으로 보면 LP 강판이 효율적임을 알 수가 있다.

두께가 27.5mm로 일정한 plate와 비교시 자중은 비슷하지만 LP강판보다 27.5mm plate가 응력값이 크

<표 15> 단면형상에 따른 응력과 자중 비교(MPa)

단면 위치 (cm)	연속 taper 21mm → 34mm	두께일정 34mm	두께일정 27.5mm	4 step plates
260	15.864	12.682	14.703	15.931
395	24.195	20.597	23.958	22.858
665	36.735	35.184	41.147	34.898
800	38.460	38.672	45.280	38.388
935	36.735	35.184	41.147	34.898
1205	24.195	20.597	23.958	22.858
1340	15.863	12.682	14.702	15.930
자중(kN)	37.8721	42.7633	37.8699	38.5352
자중비교	100.00	112.91	99.99	101.75

<표 16> 단면형상에 따른 처짐량 비교 (단위 : mm)

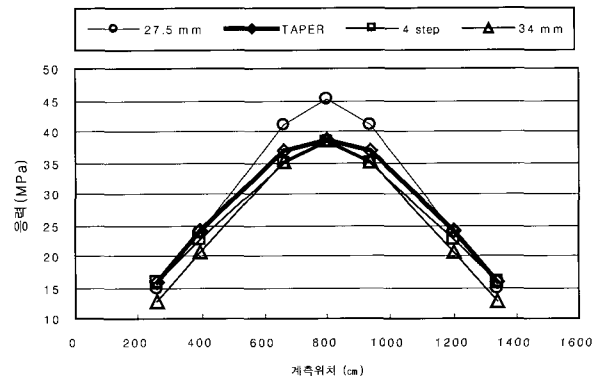
위치 (cm)	연속 taper	34mm로 일정	27.5mm 로 일정	4 step plate
192.5	2.456	2.221	2.603	2.366
462.5	6.572	6.027	7.069	6.300
597.5	7.942	7.339	8.607	7.606
732.5	8.695	8.080	9.471	8.341
867.5	8.695	8.080	9.471	8.341
1137.5	6.572	6.027	7.069	6.300
1407.5	2.456	2.221	2.603	2.366

게 나타나므로, LP강판의 제작비에 대한 일반 plate 제작과정의 비용감소를 경제적이라고 할 수 없다. 4단계 판두께 변화를 갖는 거더와 비교시 자중과 응력 모두 LP강판과 비슷하게 나타나지만, 용접개소가 6곳이 발생하여 제작과정에 공사비 및 작업공수가 증가하게 되며, 4단계 판두께 변화를 갖는 거더는 단면 형상 변화가 있어 응력의 집중부위가 생기며, 용접부위에 의한 결함으로 인한 피로거동의 저하를 일으킬 수 있다.

<그림 12>에서는 형상별 구조해석에 따른 응력비교를 그래프로 나타내었으며, 굵은선으로 보인 LP강판이 단순보의 휨응력 형상인 포물선형상을 가장 근접하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 I형 단순보에서 LP강판을 사용한 구조형상이 가장 효율적임을 나타내어 주고 있다.

<표 16>에서는 구조해석을 통한 여러 형상의 처짐값을 나타내었다.

두께가 27.5mm로 가장 얇은 형상의 구조체에 큰 변위가 나타났으며, LP강판을 비롯한 34mm로 일정한 단면과 4 step plate 형상의 구조체는 비슷하게

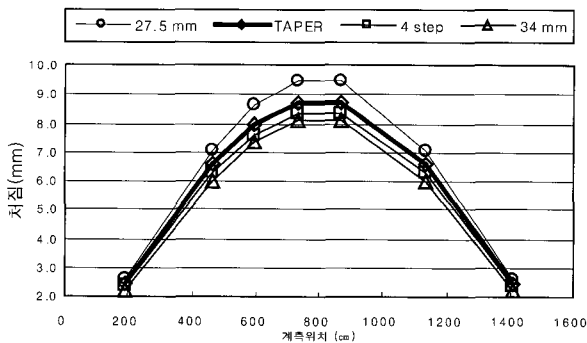


<그림 12> 단면형상에 따른 응력 분포 비교

값이 나타났다. 플랜지 두께가 27.5mm인 형상의 I형 구조체는 자중이 가장 가벼움에도 불구하고 자중과 하중 각각에서 최대처짐을 보였으며, 34mm로 일정한 형상의 구조체는 자중이 큰 반면 두께가 두꺼움으로 가장 작은 처짐을 보였다. 그러나 자중이 비슷한 4 step plate 형상의 구조체는 자중과 하중 각각 또는 복합하중 조건에서도 처짐이 비슷하게 나타났다. 그러므로 구조성능에 대한 제작, 시공성에서 LP강판이 경제적임을 확인할 수 있었다.

<그림 13>에서는 여러 형상의 처짐값을 그래프로 나타내었다. 굽은선으로 나타낸 것이 LP강판을 사용한 형상을 모델링하여 해석한 처짐값으로 가장 얇은 27.5mm의 강판과는 큰 차이를 나타내지만 4 step plate와 34mm의 강판과는 비슷한 값의 그래프를 나타내고 있다.

그러므로 여러 형상의 플랜지를 가진 I형 단순보의 구조체를 구조해석한 결과 LP강판을 적용할 경우 자중의 감소와 구조성능에서 안정적임이 확인되었으며, LP강판이 다른 형상보다 효율적임을 확인할 수 있었다.



<그림 13> 단면형상에 따른 처짐량 비교

4.2 경제성 분석

하중의 적절한 분담과 응력의 배분을 통한 설계의 효율성 확보와 함께 중요한 것이 얼마나 경제적인 설계가 되는지이며, 이에 대한 척도로서 강재중량의 감소와 용접 길이의 감소를 들 수 있다. 이 중에 강재 중량은 4.1장에서 확인된 바와 같이 약 13%정도였으며, 용접개소에 대한 평가는 <표 17>과 같이 Fillet용접으로 환산하여 비교할 수 있다.

LP강판을 사용하지 않고 4 step plate를 사용하게 될 경우, 기본 Fillet용접으로 제작되는 용접 길이는 동일하며 추가적으로 맞대기용접이 사용된다. 여기서는 맞대기용접에 V형판이음용접을 사용하는 것으로 가정하여 기존연구¹³⁾에 따르는 Fillet용접 환산율을 적용하여 용접량의 증가를 평가하였다.

<표 17> 용접길이 비교

구분	상세부	용접방법	용접 길이(m)	Fillet환산 용접 길이(m)
LP 강판	주거더	Fillet	16 × 4면	64
	보강재	Fillet	(0.15+0.9+0.15) × 2면 × 24개소	57.6
4 step plate	주거더	Fillet	16×4면	64
		34mm V형	0.3×2개소	0.6×37.3 = 22.38
		30mm V형	0.3×2개소	0.6×30.2 = 18.12
	25mm V형	0.3×2개소	0.6×22.6 = 13.56	
	보강재	Fillet	(0.15+0.9+0.15) × 2면 × 24개소	57.6

6mm목두께 Fillet용접으로 환산하면, LP강판을 이용하여 제작할 경우에 총 환산 용접길이는 121.6m이며, 4 step plate를 사용할 경우에는 175.66m로서, 용접공에서 30.7%의 절감을 할 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 구조실험과 비교하여 적합성이 확보된 모델을 이용하여 동일지간의 여러 플랜지 형상을 비교 분석하였다. LP강판을 이용한 강교량 설계의 효율성과 경제성을 평가를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. LP강판을 적용할 경우 34mm로 균등한 두께의 플랜지를 사용할 경우에 비하여 최대 13%의 자중이 감소됨으로 충분히 경제적임을 확인하였다.
2. 자중을 최소화하기 위하여 4 step plate 거더를 사용할 경우와 LP강판을 적용할 경우를 비교

하면, 응력 및 처짐 등의 구조성능에서 안정성을 확보하면서 LP강판을 사용할 경우에 30.7%의 용접비용 감소 등 경제성을 확인하였다.

3. 각 모델의 응력을 비교해 보면 LP강판이 단순보의 휨응력 형상인 포물선형상을 가장 근접하게 나타나고 있어 LP강판을 사용한 구조형상이 재료 단면을 가장 효율적임을 나타내어 주고 있다.
4. LP강판을 적용할 경우에 기존 방법들에 의한 거더에 비하여 응력 및 처짐 등의 구조성능에서 안정성을 확보하였다.
5. LP강판의 제작성 평가에서 일반 후판재와 동일한 조건으로 부재의 제작이 가능한 것으로 평가되었으며, 추가되는 작업공수도 없이 허용 오차내의 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. 緒方辰男, 林辰一, 上高原正弘, 板橋壯吉 “테ーパー플레이트의 橋梁への適用” 土木學會第50回年次學術演會, 平成7年, pp. 612~613.
2. 益子直人, 並川賢治, 宮田明, 板橋壯吉 “테ーパー플레이트의 鋼箱桁橋への適用” 土木學會第51回年次學術演會. 平成8年, pp. 584~585.
3. 屈田, 瀧英明, 村上茂之, 西村宣男 “LP周邊支持板および補剛板의 壓縮強度特性と設計法” 鋼構造年次論文報告集, 第6卷, 1998, pp. 107~116.
4. GTS industries Dunkerque, FRANCE, “Longitudinally Profiled Plates A Smart Product For Steel Construction”.
5. 弓削 佳徳, 堀 紀文, 西田 俊一(1998), “LP 鋼板(테ーパー플레이트)의 製造技術と船舶, 橋梁への適用”, 川崎製鐵技報, pp. 137~141.
6. Klaus Pichterand,(1992), “Longitudinally Profiled Plates Cut Costs”, Joining and Material, pp. 270~273.
7. Shigeyuki MURAKAMI, Nobuo NISHIMURA and HITTA, "Ultimate Strength of Outstanding Tapered Plates in Compression", 構造工學論文集, 1997, Vol 43A, pp. 107~116.
8. 포항제철주식회사, “변단면 후판(TAPERED PLATES)” 1999.
9. 한국강구조학회 “ Tapered Plate의 강구조물 적용성 연구” 2000.
10. 한국강구조학회 “강구조공학” 구미서관, 2006, pp. 199~235.
11. 건설교통부제정 “도로교표준시방서” 1999, pp. 48~93.
12. 건설교통부제정 “도로교 설계기준” 2000, pp. 90~103.
13. 대한토목학회, 강교량 제작 품셈 개정, 2005, pp.48~50.
14. 김명모, 이재혁, 윤태양, LP강판의 강교량 적용성에 관한 실험적 연구, RIST 연구논문, 제14권 제3호, 2000, pp.263~269.
15. EMRC, 2005, NISA II User’s Manual, Center for Engineering and Computer Technology, Michigan, U.S.A., pp. 1~50.
16. EMRC, 2005, DISPLAY III User’s Manual, Center for Engineering and Computer Technology, Michigan, U.S.A., pp. 1~100.